



**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA
PACT® (POWDERED ACTIVATED CARBON
TREATMENT) PARA TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE REFINARIA**

Guilherme Moura Thurler

Projeto Final do Curso de Engenharia Química

Orientadores:

Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Junho/2012

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA PACT® (POWDERED ACTIVATED CARBON TREATMENT) PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REFINARIA

Guilherme Moura Thurler

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

Aprovado por:

Prof.^a Fabiana Valéria da Fonseca Araújo - D.Sc.- DPI/UFRRJ

Prof. Alexandre Lioi Nascentes, M.Sc. –DENG/UFRRJ

Prof. Carlos André Vaz Junior - D.Sc. – DEQ/UFRRJ

Orientado por:

Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Rio de Janeiro - Brasil

Junho de 2012

Thurler, Guilherme Moura

Modelagem e simulação do sistema PACT® (powdered activated carbon treatment) para tratamento de efluentes de refinaria/ Guilherme Moura Thurler. Rio de Janeiro: UFRJ / EQ, 2012.

xi, 86 p.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2012.

Orientadores:

Prof. Carlos Augusto G. Perlingeiro e Prof. Juacyara Carbonelli Campos

1. PACT 2. Dimensionamento e Simulação 3. Análise de Sensibilidade 4. Projeto Final (Graduação – UFRJ / EQ) 5. Carlos Augusto G. Perlingeiro 6. Juacyara Carbonelli Campos I. Título.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus que me proporcionou as condições para o término desse curso e conclusão deste projeto.

Aos professores da Escola de Química, em especial aos meu orientadores, Carlos Augusto Guimarães Perlingeiro e Juacyara Carbonelli Campos por todo conhecimento que compartilharam.

Agradeço também aos meus familiares que sempre me apoiaram e não deixaram que eu desanimasse, em especial a minha mãe Leila, meu pai Reinaldo, meu irmão Rafael, as minhas tias Fátima e Lucinha e a minha prima Fernanda.

Agradecimento especial a minha querida Luiza, sem você nada disso seria possível, obrigado pela força e companheirismo de sempre.

Deixo também agradecimentos aos meus amigos de faculdade com quem compartilhei dúvidas e anseios nesses anos e também os meus amigo do Effatá que sempre estiveram do meu lado.

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

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA PACT® (POWDERED ACTIVATED CARBON TREATMENT) PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REFINARIA

Guilherme Moura Thurler

Junho, 2012

Orientadores:

Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Nos últimos anos, as questões ambientais tornaram-se cada vez mais importantes. Assim, economizar recursos e diminuir os impactos das atividades industriais no meio ambiente tornaram-se primordiais para a sobrevivência das empresas. Para atender a esses objetivos o projeto preliminar de uma estação de tratamento de efluentes industriais de refinaria foi desenvolvido, sendo a tecnologia escolhida para o sistema aquela que consorcia o uso dos lodos ativados com a adsorção em carvão ativado, conhecida como PACT® (POWDERED ACTIVATED CARBON TREATMENT). A modelagem do processo seguiu o recomendado para o processo de lodos ativados ajustando-se os parâmetros cinéticos para operação em regime de aeração prolongada e incluindo nos balanços de massa uma parcela referente à contribuição das partículas de carvão. O projeto preliminar foi realizado com o auxílio do programa EXCEL, utilizando linguagem VBA. O programa permite simular variações nas condições de entrada e nos parâmetros cinéticos, determinando as principais dimensões das operações que compõe o sistema (Tanque de aeração e Sedimentador) de maneira a garantir as metas de projeto estabelecidas pela refinaria utilizada como base de dados. Foram analisados dois cenários: o primeiro com parâmetros cinéticos obtidos da literatura e o segundo com parâmetros cinéticos ajustados de maneira a garantir condições melhores para o processo, condições essas que foram obtidas da dissertação de MACHADO (2010). Ainda utilizando o programa foi realizada uma Análise de Sensibilidade abrangendo as principais fontes de incerteza no desenvolvimento do modelo: os parâmetros cinéticos e as condições de entrada. Essa análise se desenvolveu a partir de duas alterações em cada uma das variáveis, aumentos de 1% e 10% no valor inicial. Como resultado, foi possível identificar as variáveis mais influentes nas respostas obtidas, principalmente os parâmetros cinéticos (μ_m e K_b para o Tanque de aeração e m e n para o Sedimentador), isso indica que é de suma importância a obtenção de dados cinéticos confiáveis para efluentes de refinaria.

Índice

| | | |
|----------|---|----|
| I. | Introdução | 1 |
| II. | Motivação | 4 |
| III. | Objetivo | 5 |
| IV. | Revisão Bibliográfica:..... | 6 |
| IV.1. | Refinarias de petróleo e seus efluentes característicos..... | 6 |
| IV.2. | Parâmetros de Qualidade de Efluentes..... | 8 |
| IV. 3. | Processo de Lodos Ativados | 9 |
| IV. 3.1. | Produção de sólidos | 13 |
| IV.3.2. | Tempo de retenção hidráulica e tempo de residência celular: | 15 |
| IV.3.3. | Tempo de varrimento celular: | 16 |
| IV.3.4. | Relação Alimento/Micro-organismo (A/M): | 17 |
| IV.4. | Adsorção em Carvão Ativado | 18 |
| IV.5. | PACT® (Powdered Activated Carbon Treatment)..... | 21 |
| IV.5.1. | O Processo..... | 21 |
| IV.5.2. | Vantagens do processo PACT® (<i>Powdered Activated Carbon Treatment</i>) . | 22 |
| IV.5.3. | Aplicações do processo PACT® (<i>Powdered Activated Carbon Treatment</i>) . | 22 |
| IV.5.4. | Regeneração do Carvão | 23 |
| IV.5.5. | Trabalhos e Pesquisas Recentes envolvendo o uso de PACT | 24 |
| V. | Metodologia do Trabalho | 27 |
| V.1. | Metas a serem alcançadas: Parâmetros Ambientais e Legislação Vigente..... | 27 |
| VI. | Resultados e Discussão..... | 29 |
| VI.1. | Fluxograma | 29 |
| VI.2. | Equipamentos e Modelagem Matemática | 32 |
| VI.2.1. | Tanque de aeração..... | 32 |
| VI.2.2. | Sedimentador..... | 40 |
| VI.2.3. | Regenerador de Carvão | 45 |
| VI.2.4. | Adensamento e Desidratação do Lodo..... | 46 |
| VI.2.5. | Controle do processo | 47 |
| VI.3. | Dimensionamento através de código implementado em EXCEL/VBA..... | 47 |
| VI.4. | Análise de Sensibilidade | 51 |

| | | |
|-------|---|----|
| VII. | Conclusão..... | 59 |
| VIII. | Referências Bibliográficas..... | 60 |
| IX. | Anexos | 64 |
| | Anexo I - Limites de Lançamento de DQO para Diferentes Indústrias | 64 |
| | Anexo II – Concentrações Máximas permitidas para diversas substâncias (NT- 202.R10 - INEA) | 66 |
| | Anexo III – Principais Gráficos da Análise de Sensibilidade..... | 68 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Estrutura Ideal do Floco Microbiano | 10 |
| Figura 2 - Esquema do Processo de Lodos Ativos | 11 |
| Figura 3 - Partícula de Carvão Ativado | 19 |
| Figura 4 - Fluxograma do presente projeto..... | 31 |
| Figura 5 – Tanque de Aeração e Correntes | 33 |
| Figura 6 - Volume de controle definido para este trabalho | 38 |
| Figura 7 - Correntes do sedimentador e regenerador | 41 |
| Figura 8 - Sensibilidade de TRH em relação a μm | 68 |
| Figura 9 - Sensibilidade do Volume em relação a μm | 68 |
| Figura 10- Sensibilidade da Produção de lodo em relação a μm | 69 |
| Figura 11 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a μm | 69 |
| Figura 12 - Sensibilidade da Idade do lodo em relação a μm | 70 |
| Figura 13 - Sensibilidade do TRH em relação a K_s | 70 |
| Figura 14 - Sensibilidade do Volume em relação a K_s | 71 |
| Figura 15- Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a K_s | 71 |
| Figura 16 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a K_s | 72 |
| Figura 17 - Sensibilidade da Idade do Lodo em relação a K_s | 72 |
| Figura 18 - Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a K_b | 73 |
| Figura 19 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a K_b | 73 |
| Figura 20 - Sensibilidade da Idade do Lodo em relação a K_b | 74 |
| Figura 21 - Sensibilidade do TRH em relação a Y | 74 |
| Figura 22 - Sensibilidade do Volume em relação a Y | 75 |
| Figura 23 - Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a Y | 75 |
| Figura 24 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a Y | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Sensibilidade do Volume em relação a Q..... | 76 |
| Figura 26- Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a Q..... | 77 |
| Figura 27- Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a Q | 77 |
| Figura 28 - Sensibilidade da Área em relação a Q..... | 78 |
| Figura 29 - Sensibilidade do TRH em relação a S_0 | 78 |
| Figura 30 - Sensibilidade do Volume em relação a S_0 | 79 |
| Figura 31 - Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a S_0 | 79 |
| Figura 32 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a S_0 | 80 |
| Figura 33 - Sensibilidade do TRH em relação a r | 80 |
| Figura 34 - Sensibilidade do Xe em relação a r | 81 |
| Figura 35 - Sensibilidade do Volume em relação a r | 81 |
| Figura 36 - Sensibilidade da Área em relação a r | 82 |
| Figura 37 - Sensibilidade do TRH em relação a X_u | 82 |
| Figura 38 - Sensibilidade do Xe em relação a X_u | 83 |
| Figura 39 - Sensibilidade do Volume em relação a X_u | 83 |
| Figura 40 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a X_u | 84 |
| Figura 41 - Sensibilidade da Área em relação a X_u | 84 |
| Figura 42 – Sensibilidade da Área em relação a K | 85 |
| Figura 43 - Sensibilidade da Área em relação a m | 85 |
| Figura 44 - Sensibilidade da Área em relação a n | 86 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Consumo Médio de Água na Indústria | 2 |
| Tabela 2 - Etapas do Refino e seus Contaminantes Específicos..... | 7 |
| Tabela 3 - Sedimentabilidade do Lodo vs. IVL para esgoto doméstico..... | 12 |
| Tabela 4 - Fração Biodegradável vs. Idade do Lodo | 15 |
| Tabela 5 - Utilização do PACT no Tratamento de Efluentes de Refinaria | 23 |
| Tabela 6 - Equacionamento do Tanque de Aeração | 40 |
| Tabela 7 - Coeficientes v_0 , K em função da Sedimentabilidade para efluentes sanitários | 44 |
| Tabela 8 - Equacionamento do Sedimentador | 45 |
| Tabela 9 - Dados do exemplo utilizado para validação do código | 48 |
| Tabela 10 - Comparação dos resultados | 49 |
| Tabela 11 - Resultados do dimensionamento a partir do código Excel/VBA (Cenário I) | 49 |
| Tabela 12 - Resultados do dimensionamento a partir do código Excel/VBA (Cenário II) | 50 |
| Tabela 13 - Condições de Entrada vs Respostas (Cenário II)..... | 55 |
| Tabela 14 - Análise de Sensibilidade | 55 |

Lista de Símbolos

A/M - Relação Alimento/ Micro-organismo

CAG - Carvão Ativado Granular

CAP - Carvão Ativado Pulverizado

CI - Carbono Inorgânico

COT - Carbono Orgânico Total

CT - Carbono Total

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

Fa - Fluxo Aplicado ao Sedimentador

fb - Fração Biodegradável do Lodo

Fl - Fluxo Limite do Sedimentador

Ft - Fluxo Total do Sedimentador

Fg - Fluxo por Gravidade no Sedimentador

Fu - Fluxo pela Retirada de Fundo do Sedimentador

IVL - Índice Volumétrico de Lodo

K - Coeficiente de Sedimentação

Kb - Coeficiente de Respiração Endógena

Ks - Constante de Saturação

LA - Lodos Ativados

m - Coeficiente Específico para o cálculo do Fluxo Limite

n - Coeficiente Específico para o cálculo de Fluxo Limite

OD - Oxigênio Dissolvido

O&G - Óleos e Graxas

PACT® - Powdered Activated Carbon Treatment

PL - Produção de Lodo

Q – Vazão em m³/h

r – Razão de Reciclo do Processo

r_s - Taxa de Consumo de Substrato

r_x - Taxa de Crescimento Microbiano

S - Concentração de Substrato

SST - Sólidos Suspensos Totais

SSV - Sólidos Suspensos Voláteis

SSF - Sólidos Suspensos Fixos

TRH - Tempo de Retenção Hidráulica

TAH - Taxa de Aplicação Hidráulica

TAS - Taxa de Aplicação de Sólidos

t_{dup} - Tempo de Duplicação Celular

V - Volume útil do Tanque de Aeração

v – Velocidade de Sedimentação da Interface

v_0 - Velocidade de Sedimentação da Interface na Concentração Hipotética de $X_u = 0$

W - Vazão de Purga

WAR - Wet Air Regeneration

X - Concentração de Biomassa

Y - Coeficiente de Produção Celular

μ - Taxa de Crescimento Específica

μ_m - Taxa de Crescimento Específica Máxima

θ_c - Idade do Lodo

I. Introdução

A História mostra que foi fator determinante na fixação do homem em determinadas regiões a disponibilidade de alguns recursos básicos, sendo o principal a água. Ao longo dos anos as comunidades cresceram em torno das fontes de água e conseqüentemente os resíduos dessas sociedades foram poluindo os corpos hídricos. A poluição é caracterizada quando algum uso típico da água é comprometido pelos contaminantes.

Apesar de a água representar cerca de 70% da constituição do nosso planeta, apenas 2,4% desse volume não são de águas salgadas ou salobras e apenas 1 % está disponível em rios e lagos. Assim, economizar água torna-se um fator essencial à vida.

O Brasil é um dos países que possui o cenário mais favorável na questão de disponibilidade de água já que uma parcela significativa da água doce disponível no mundo se encontra em solo brasileiro. Apesar da distribuição entre as regiões do país não ser igualitária, mesmo no estado com a menor disponibilidade de água doce per capita (Pernambuco), a escassez não atingiu níveis considerados altos. Obviamente há pessoas no Brasil com dificuldades enormes no acesso à água potável, mas isso se deve na maior parte dos casos a uma má administração dos recursos (MATTOSO, 2012 & SCARE, 2007).

Devido a essa relativa abundância de água, nunca houve uma grande preocupação do setor industrial com este insumo, até começarem a aparecer os problemas relacionados à escassez e à poluição da água nos grandes centros urbanos. Assim, começou a haver um maior interesse por parte das indústrias no gerenciamento da água em seus processos, considerando novas opções e soluções que impliquem em autonomia no abastecimento de água e racionalização no seu consumo. Além disso, a cobrança pela água representa um custo de produção para o setor industrial.

A experiência ao longo dos anos mostra que é possível economizar água, energia, gastos com matérias-primas, e combater a poluição, sem prejudicar a produção. Podemos citar como práticas nesse sentido (SANTIAGO, 2011):

- O resfriamento em circuito fechado;
- Substituição dos resfriadores a água pelos que utilizam ar;
- Construção de bacias de retenção (simples e de baixo custo) se a vazão dos efluentes na rede for pequena;
- Utilização de ar durante as pré-lavagens dos equipamentos, evitando-se o emprego de vapor de água;
- Reutilização de água pouco ou nada poluída;
- Extinção dos vazamentos nas instalações hidráulicas (torneiras, válvulas etc);

- Instalação de registros e sistema de parada automática das bombas quando os reservatórios estiverem cheios;
- Preferência por lavagem a seco. Em inúmeros casos os resíduos podem ser eliminados. Se a água for indispensável na lavagem, usá-la sob pressão forte e vazão pequena;

Atualmente, uma dessas práticas apresenta-se como uma alternativa muito promissora para reduzir a necessidade dos recursos hídricos, o reúso. Na realidade toda a água que usamos de alguma forma já foi reciclada. O próprio ciclo hidrológico constitui uma forma de reúso da água, e durante muitos anos apenas isso foi suficiente para garantir o abastecimento de forma amplamente satisfatória, o que infelizmente não acontece mais devido ao agravamento das condições de poluição.

Baseadas nesse agravamento, as exigências ambientais foram se tornando cada vez mais restritivas, assim as próprias indústrias concluíram que, devido aos altos investimentos requeridos para o tratamento dos efluentes, se torna mais vantajoso reutilizar estes efluentes ao invés de lançá-los de volta aos rios.

Na Tabela 1, podemos encontrar o consumo médio de água para alguns fins industriais:

Tabela 1 - Consumo Médio de Água na Indústria

| Indústria | Consumo de Água |
|------------------|-------------------------------------|
| Laticínio | 2,5 L/litro de leite |
| Bebidas | 5,0 L/litro de cerveja |
| Têxtil | 60.000 a 100.000 L/tonelada tecido |
| Papel e celulose | 35.000 a 150.000 L/tonelada papelão |
| Refinaria | 250 a 350 L/ Barril processado |

Fonte: Adaptado de (SANTIAGO, 2011) & (MARIANO, 2001)

A exemplo das indústrias mostradas acima as refinarias de petróleo também utilizam grandes quantidades de água para realizar suas atividades, pois quase todas as operações de refino requerem elevados volumes hídricos.

O Brasil possui hoje 14 refinarias de petróleo (12 de propriedade da PETROBRAS e duas particulares) que são capazes de processar, juntas, cerca de 1,7 milhão de barris de petróleo por dia. Normalmente o petróleo extraído no país é classificado como pesado de acordo com grau API e índice de acidez (presença de sulfeto).

A fim de se obter êxito no reúso do efluente é necessário um tratamento adequado e conseqüentemente é preciso conhecer as características do seu efluente bem como as especificações para reúso do mesmo.

Uma refinaria de petróleo gera significativos volumes de rejeitos, esses rejeitos podem ser os mais diversos, pois uma refinaria está equipada para produzir vários produtos diferentes de acordo com a necessidade do mercado e, além disso, as características do óleo bruto utilizado como matéria prima podem variar. Assim, essa indústria pode apresentar efluentes de difícil tratamento e separação, inclusive com compostos orgânicos recalcitrantes, sendo necessária muitas vezes a utilização de etapas específicas para remoção desses poluentes.

A característica recalcitrante sugere a utilização de tratamento terciário em conjunto com o processo de lodos ativados, capaz de remover altas taxas de DBO e DQO, nessa perspectiva se insere o processo de lodos ativados adicionado de carvão ativado em pó (PACT®- Powdered Activated Carbon Treatment).

A grande vantagem do PACT é o efeito em conjunto da adsorção em carvão ativado e da biodegradação pelo lodo biológico. Assim, pode obter-se uma adequação do efluente tratado aos parâmetros de qualidade necessários para o reúso.

II. Motivação

A motivação para esse trabalho surgiu de Machado (2010) que, através de ensaios laboratoriais, atestou a eficiência do sistema PACT[®] para o tratamento de efluentes de refinaria. A partir dessa experiência, surgiu a oportunidade de desenvolvimento de um modelo e de um projeto preliminar de um sistema de tratamento em escala industrial para uma refinaria.

III. Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar um projeto preliminar de uma estação de tratamento de efluente de refinaria visando adequar esse efluente aos padrões de reúso na própria planta ou aos padrões de descarte nos corpos hídricos. A tecnologia de tratamento escolhida foi o processo de lodos ativados (LA) combinado com carvão ativado em pó (CAP) resultando no PACT®- (Powdered Activated Carbon Treatment).

O projeto preliminar compreende as seguintes etapas:

- Elaboração de um Fluxograma do processo PACT®
- Definição das operações utilizadas
- Modelagem matemática das operações utilizadas
- Dimensionamento do sistema de tratamento através de um programa EXCEL/VBA
- Análise de sensibilidade em relação aos parâmetros e variáveis conhecidas

IV. Revisão Bibliográfica:

IV.1. Refinarias de petróleo e seus efluentes característicos

O óleo cru é extraído dos poços e minas. Esse óleo é composto de diversos hidrocarbonetos e, por isso, tem pouca utilidade prática. É necessário que esse óleo seja processado para então se decompor em diferentes subprodutos que utilizamos todos os dias: lubrificantes, asfalto, coque, diesel, gasolina, GLP, nafta, querosene e outros. As plantas industriais responsáveis por esse processo são as refinarias.

O refino é constituído por uma série de operações de beneficiamento, começando pela separação das frações desejadas. Em seguida, as frações são processadas de diferentes maneiras como, por exemplo: Dessalgação, Destilação atmosférica, Destilação a vácuo, Hidrotratamento, Reforma catalítica, Craqueamento e outros. Por fim, essas frações são industrializadas a fim de se tornarem produtos comerciáveis. Todas essas operações tornam as refinarias grandes consumidoras de água, conseqüentemente grandes geradoras de efluentes líquidos (MARIANO, 2001).

Além de hidrocarbonetos, o petróleo contém compostos oxigenados, nitrogenados, sulfurados e metais pesados. A composição e o seu aspecto variam em larga faixa, segundo a formação geológica do terreno de onde foi extraído e a natureza da matéria orgânica que lhe deu origem. Assim, há petróleos leves, petróleos pesados, petróleos com alto ou baixo teor de enxofre e outros contaminantes, o conhecimento prévio destas características facilita as operações de refino e o tratamento dos efluentes das mesmas (MARIANO, 2001).

Assim, não é possível generalizar as características do efluente de cada refinaria. Cada refinaria possui um tamanho, processa um tipo de óleo e possui condições diferentes de operação. Logo os efluentes hídricos gerados em cada refinaria são diferentes em quantidade e em qualidade. Esses poluentes se não tratados de forma correta podem contaminar a água, o ar e o solo.

O efluente de uma refinaria é composto de quatro parcelas: águas contaminadas coletadas; águas de refrigeração; águas de processo; e efluentes sanitários (MARIANO, 2001).

As águas contaminadas coletadas a céu aberto são intermitentes e irão conter os constituintes dos eventuais derramamentos, dos vazamentos dos equipamentos e águas pluviais. A maior parte da água utilizada no refino de petróleo é usada para resfriamento, embora grande parcela dessa água seja reciclada, pode haver alguma contaminação de óleo proveniente de eventuais vazamentos nos equipamentos, ou até mesmo utilização de aditivos químicos nessa água. Assim, essa água passa apenas uma vez pela unidade de processo e então é descarregada diretamente na unidade de tratamento de efluentes.

A água de processo também representa parcela significativa do montante a ser tratado, essa corrente é gerada nos diversos equipamentos constituintes da planta e

normalmente entram em contato direto com o óleo, sendo assim muito contaminadas (MARIANO, 2001).

Na Tabela 2, encontram-se resumidas as principais etapas presentes nas refinarias bem como os principais contaminantes proveniente desses processos:

Tabela 2 - Etapas do Refino e seus Contaminantes Específicos

| Etapa do Processo | Contaminantes |
|-----------------------------------|---|
| Dessalinização | Sulfeto, Fenol, Naftênicos, Organo Sulfurados, Alta DBO, Alta DQO, Óleo, Sólidos em suspensão e Cloreto |
| Destilação | Sulfetos, Óleos, Cloretos Mercaptanas Substâncias Redutoras, Fenol, Naftênicos e Organo Sulfurados |
| Craqueamento Catalítico | Alcalino, Alta DBO, Alta DQO, Óleos, Sulfeto, Fenol, Amônia, Compostos Naftênicos e Organo Sulfurados |
| Condensadores | Substâncias Redutoras |
| Armazenamento dos Produtos Finais | Substâncias Alcalinas, Alta DBO |
| Limpeza | Óleo, Sólidos em suspensão e Alta DQO |

Fonte: Adaptado de Mariano, 2001

Além desses poluentes podemos ter ainda na corrente a ser tratada metais pesados como, chumbo, ferro, cádmio e cobre (MACHADO, 2010). A retirada de todos esses contaminantes é essencial para o reúso da água nos processos da refinaria. Além disso, o efluente tratado deve atender aos parâmetros de qualidade tais como pH, temperatura e concentração de sais.

Uma estação de tratamento de efluentes em uma refinaria de petróleo possui, na maior parte dos casos, duas etapas de tratamento. Na primeira etapa é realizado o tratamento primário que basicamente trata da separação do óleo, água e sólidos. De início o óleo é separado em um separador onde o efluente flui lentamente permitindo que o óleo flutue e que os sólidos precipitem possibilitando assim a remoção de ambos, em seguida é realizada uma separação do óleo emulsionado que pode ser feita de forma química, através de agente coagulante, ou física por meio de tanques aerados com tempos de retenção elevados (MARIANO, 2001).

A segunda etapa é o tratamento secundário, na qual o óleo dissolvido e os demais poluentes orgânicos são biologicamente degradados por micro-organismos, normalmente de maneira aeróbia através de filtros biológicos e principalmente em unidades que utilizam o processo de lodos ativados (MARIANO, 2001).

Em alguns casos, é necessário que as refinarias empreguem mais um estágio de tratamento, normalmente denominado polimento. O objetivo desta etapa é adequar o efluente aos padrões exigidos para descarte ou para reúso. Um exemplo de tecnologia de polimento é o uso do carvão ativado para retirar as impurezas remanescentes (SOUZA, 2010).

Deve haver ainda preocupação com a própria estação de tratamento de efluentes, pois ela é responsável pela geração de outros resíduos perigosos, como por exemplo, as lamas dos separadores e o resíduo de biomassa do tratamento secundário, além de contribuírem para a emissão de poluentes atmosféricos no decorrer do processo de tratamento. O tratamento desse resíduo sólido é responsabilidade da própria refinaria e normalmente é realizado através da digestão anaeróbia e desidratação (MACHADO, 2010).

IV.2. Parâmetros de Qualidade de Efluentes

Uma estação de tratamento de efluentes existe para adequar uma corrente industrial de descarte aos principais padrões de qualidade impostos pelo órgão regulador para descarte no corpo hídrico. Assim é de fundamental importância o conhecimento desses padrões bem como das exigências ambientais em torno deles.

Os principais parâmetros de qualidade de efluente segundo a definição de (SANT'ANA JR, 2010) são:

- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é a quantidade de oxigênio requerida pelos micro-organismos para oxidar os compostos presentes na amostra, geralmente expressa em mg/L. O teste de determinação da DBO é um bioensaio que procura simular a biodegradação dos poluentes presentes no efluente, é um teste longo que dura vários dias, assim, convencionou-se realizá-lo em apenas 5 dias, obtendo assim o que conhecemos como DBO₅.
- Demanda Química de Oxigênio (DQO) é a quantidade de oxigênio necessária à oxidação química dos poluentes presentes na amostra, geralmente exposta em mg/L. O teste é conduzido utilizando-se de um oxidante químico (dicromato de potássio) em meio ácido (ácido sulfúrico). Em um efluente de refinaria de petróleo a razão DQO/DBO₅ normalmente atinge valores entre 2,5 e 3,5
- Carbono Orgânico Total (COT) é um indicador da presença de matéria orgânica num efluente, normalmente é obtido através da diferença entre o Carbono Total (CT) determinado através de um ensaio com temperatura elevada e o Carbono Inorgânico (CI) determinado através do mesmo ensaio, porém em condições mais brandas.

- Óleos e Graxas (O&G) é um indicador global de uma ampla classe de substâncias que podem ser solubilizadas e extraídas por solventes orgânicos. Esse parâmetro tem a qualidade de quantificar uma ampla classe de poluentes hidrofóbicos.
- Sólidos em Suspensão Totais (SST) é o indicador de material sólido particulado presente no efluente que aumenta a turbidez e pode provocar assoreamento dos corpos receptores, em geral são divididos em duas categorias, os sólidos em suspensão voláteis (SSV) e os fixos (SSF)
- Cor, o efluente pode apresentar diferentes cores, devido às substâncias poluentes, exigindo tratamento para o lançamento no corpo hídrico.
- Turbidez é o resultado da determinação do espalhamento e da absorção de luz pelo material sólido em suspensão, geralmente a turbidez é expressa em Unidades de Turbidez Nefelométricas (NTU).
- Toxicidade, determinada através de bioensaios, observando-se a resposta de organismos de diferentes níveis tróficos quando expostos a diferentes diluições do efluente. A toxicidade pode ser aguda ou crônica acarretando danos letais ou adversos aos organismos.

IV. 3. Processo de Lodos Ativados

O processo de lodos ativados consiste basicamente em um tanque onde o efluente entra em contato com micro-organismos capazes de degradar matéria orgânica e retirar outros contaminantes da corrente. Esse tanque é provido de aeração e agitação, em seguida a corrente segue para um tanque de decantação visando separar a biomassa do efluente líquido, grande parte dessa biomassa retorna ao processo e uma pequena parte é purgada gerando um resíduo sólido que precisa ser devidamente tratado (VON SPERLING, 2002).

A tecnologia de lodos ativados teve origem na Inglaterra em 1914 e é uma das mais aplicadas em todo mundo, em grande parte por ser eficiente e ocupar área relativamente pequena, geralmente é operado de forma contínua objetivando remover da corrente principalmente as substâncias orgânicas solúveis e insolúveis transformando-as em uma biomassa decantável. O processo de lodos ativados possui um grau de mecanização superior em relação às outras técnicas de tratamento ocasionado maior consumo de energia e operação mais delicada (JORDÃO & PESSOA, 2011).

Os micro-organismos presentes no sistema de lodos ativados formam um consórcio contendo: bactérias, arqueas, algas, fungos, protozoários, rotíferos e nematódeos, desempenhando funções diferentes cada um deles. As bactérias são os de maior importância na degradação de matéria orgânica, os protozoários nutrem-se de outros micro-organismos e material orgânico particulado (no sistema de lodos ativados tem particular importância na indicação da diversidade dessas comunidades) e os rotíferos são metazoários que atuam na

remoção de bactérias livres em suspensão e contribuem para a formação dos flocos (SANT'ANNA, JR., 2010).

A diversidade microbiana é fator primordial no sucesso do tratamento biológico, pois a degradação será mais rápida se houver diferentes linhagens de micro-organismos presentes no reator, assim cada sistema possui um consórcio (conjunto de micro-organismos) diferente, de acordo com as suas condições operacionais e características do efluente a ser tratado. Embora cada consórcio seja único existem condições para efetiva degradação da matéria orgânica que são comuns a todos eles, são elas (JORDÃO & PESSOA, 2005) :

- População de micro-organismos ativos
- Contato adequado entre os micro-organismos e o efluente
- Disponibilidade de Oxigênio
- Disponibilidade de nutrientes, normalmente na razão de 100(DBO)/5(N)/1(P)
- Condições Ambientais favoráveis (Temperatura, pH, etc)

A etapa inicial na remoção dos poluentes é a adsorção dos mesmos nas superfícies dos flocos microbianos, para que isso ocorra de forma satisfatória é necessário que a característica do floco seja ideal, ou seja, os flocos não sejam dispersos (restritos apenas a bactérias, pequenos e facilmente suscetíveis a cisalhamento) e nem sejam flocos filamentosos que possam causar Lodo Intumescido (*Bulking*) interferindo na sedimentação e compactação do lodo. Na Figura 1 pode-se visualizar a estrutura ideal do floco microbiano no processo:

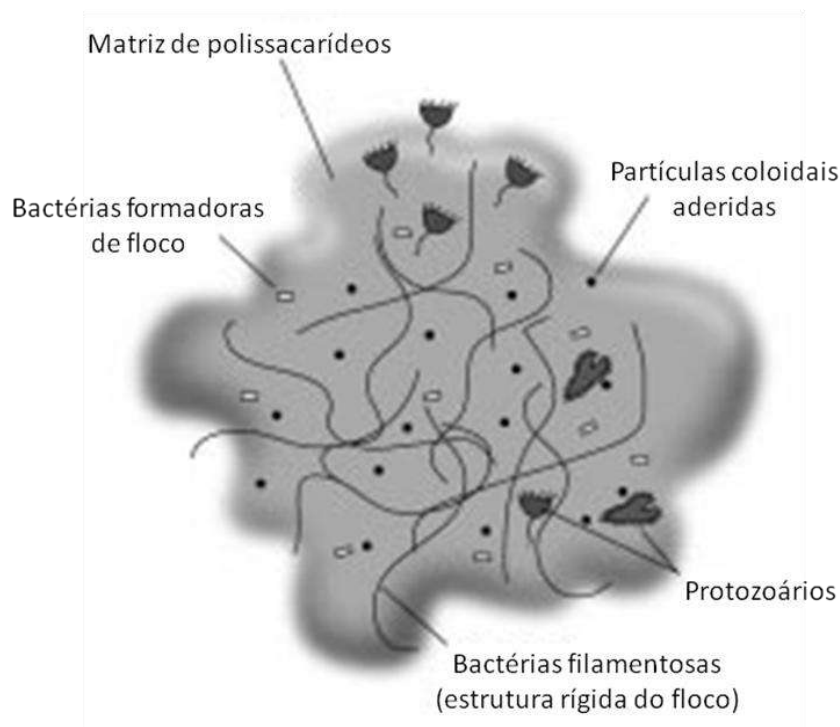


Figura 1 - Estrutura Ideal do Floco Microbiano

Fonte: Von Sperling, 2002

A formação dos flocos microbianos é resultado de uma estratégia de sobrevivência das bactérias em ambientes adversos, pois em sistemas com relativa falta de nutrientes várias linhagens bacterianas são capazes de produzir material polissacarídeo que possibilitam a adesão e a aglomeração (SANT'ANNA, JR., 2010).

A Figura 2 ilustra o esquema e a simbologia do processo de lodos ativados.

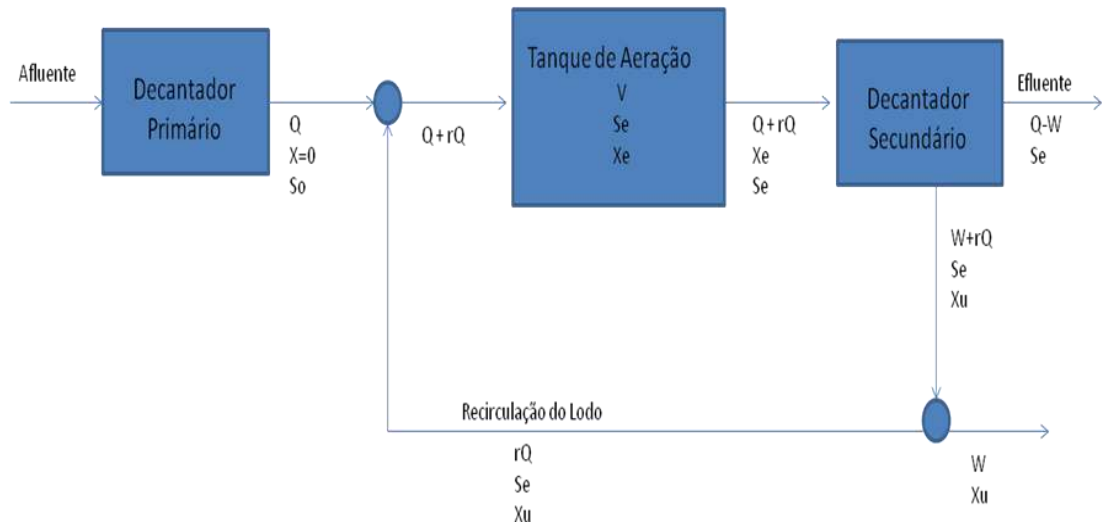


Figura 2 - Esquema do Processo de Lodos Ativados

Fonte: SANT'ANNA JR., 2010

Sendo:

- Q = Vazão da corrente de alimentação (m^3/h)
- V = Volume útil do Tanque de Reação (m^3)
- S_o = Concentração de substrato na corrente de alimentação (mg/L)
- S_e = Concentração de substrato na corrente de efluente tratado (mg/L)
- X_e = Concentração de biomassa no Reator (mg/L)
- X_u = Concentração de biomassa no fundo do sedimentador (mg/L)
- W = Vazão de purga de lodo (m^3/h)
- r = Razão de reciclo

O processo de lodos ativados depende da formação e do crescimento de uma comunidade de micro-organismos variada. Esses micro-organismos irão consumir e degradar a

matéria orgânica visando remover DBO e DQO. Também é necessário promover a biofloculação e sedimentação, pois é importante obter um efluente final com baixa turbidez.

A sedimentabilidade do lodo é o fator primordial para o funcionamento do processo de maneira satisfatória, pois se não for adequada, pode não ser possível atingir a concentração microbiana ideal.

No controle do processo de sedimentação do lodo podemos empregar o ensaio de Índice Volumétrico de Lodo (IVL), que por definição é o volume em mililitros, ocupado por 1 grama de lodo ativado após sedimentação de 30 minutos. Assim quanto menor for o IVL, melhores as condições de decantação do efluente em aeração (VON SPERLING, 2002).

$$IVL = \frac{H_{30} \times 10^6}{H_0 \times SS} \quad (\text{Eq. 1})$$

- H_{30} = Altura da interface após 30 minutos (m)
- H_0 = Altura da interface no instante 0 (m)
- SS = Concentração de sólidos em suspensão (mg/L)

Embora cada estação de tratamento de efluentes possua sua condição ótima de projeto podemos realizar uma avaliação preliminar da qualidade do lodo através do resultado do IVL, conforme elencado na Tabela 3, que ilustra valores referentes a esgoto doméstico.

Tabela 3 - Sedimentabilidade do Lodo vs. IVL para esgoto doméstico

| Sedimentabilidade | IVL |
|-------------------|---------|
| Ótima | 0-50 |
| Boa | 50-100 |
| Média | 100-200 |
| Ruim | 200-300 |
| Péssima | >300 |

Fonte: (VON SPERLING, 2002)

Outras variantes do processo são quanto à idade do lodo e quanto ao fluxo de efluente para tratamento. Sistemas com idade do lodo reduzida (inferior a 3 dias) são denominados sistemas de aeração modificada. Aqueles com idade do lodo entre 4 a 10 dias são os sistemas de lodo ativado convencional. Já os que apresentam idade do lodo superior a 18 dias são os sistemas da aeração prolongada. Podemos aplicar essa classificação tanto em sistemas de fluxo contínuo quanto para sistema em batelada (VON SPERLING, 2002).

Normalmente, as estações de tratamento de refinarias trabalham em regime de aeração prolongada e fluxo contínuo. Nesse modo de operação há menor disponibilidade de alimento para os micro-organismos. Os reatores que operam com aeração prolongada possuem maiores volumes e tempos de retenção de líquido (16-24h). Assim, proporcionalmente, há menos matéria orgânica e para sobreviver, as bactérias passam a utilizar a própria matéria orgânica biodegradável em seus processos metabólicos. Isso significa que ocorre uma estabilização da biomassa no próprio tanque de aeração (SANT'ANNA, JR., 2010).

Como a estabilização do lodo já ocorre no reator do processo com aeração prolongada não se utilizam decantadores primários, para não haver a necessidade de posterior estabilização de lodo e de uma unidade digestora desse lodo. Com isso simplifica-se o fluxograma (VON SPERLING, 2002). Esse processo apresenta, como desvantagens, os elevados custos de implantação/operação e o maior consumo de energia. Porém, apresenta como vantagens elevados níveis de remoção de DBO (90-95%), nitrificação consistente, operação mais simples, menor geração de lodo e lodo mais estável, além de possuir resistência a variações de carga e presença de cargas tóxicas (VON SPERLING, 2002).

No estudo do modelo dos sistemas de lodos ativados, alguns parâmetros operacionais têm importância destacada são eles: o teor de sólidos totais, o tempo de retenção hidráulica (TRH), a idade do lodo (θ_c) e a relação A/M (alimento/micro-organismo).

IV. 3.1. Produção de sólidos

A produção bruta de sólidos (X) (em função do substrato) pode ser descrita como:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot \frac{d(S_0 - S)}{dt} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde "Y" é o coeficiente de produção celular (g/g), ou seja, esse coeficiente indica a proporção de substrato convertida em biomassa pela ação do consórcio microbiano.

Essa equação demonstra a relação linear entre a taxa de crescimento bacteriana e a taxa de utilização de substrato (ou remoção de DBO).

Assim a taxa de produção bruta também pode ser descrita em função da concentração de biomassa.

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde μ é a taxa de crescimento específica (d^{-1}).

O crescimento microbiano é função da disponibilidade de substrato no meio, assim μ deve ser expressa como uma função da concentração de substrato. Monod propôs uma relação empírica para essa função (VON SPERLING, 2002):

$$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_S + S} \quad (\text{Eq. 4})$$

Nessa equação K_S é uma constante de saturação, definida como a concentração do substrato para a qual $\mu = \mu_m/2$ (g DBO₅/m³).

Outro fator muito importante a ser considerado é o decaimento bacteriano, que começa a ocorrer normalmente após o primeiro dia, nessa fase é necessário considerar no balanço de massa o metabolismo endógeno, ou seja, parte do material celular é consumida como substrato de novas reações, logo para se obter a taxa líquida de crescimento deve-se descontar essa perda de biomassa.

$$\frac{dX_b}{dt} = -K_b \cdot X_b \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo X_b a concentração de sólidos suspensos voláteis biodegradáveis (mg/L) e K_b o coeficiente de respiração endógena (/d).

Assim o balanço de massa assume a seguinte forma:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot \frac{d(S_0 - S)}{dt} - K_b \cdot X_b \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X - K_b \cdot X_b \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \cdot \frac{S}{K_S + S} \cdot X - K_b \cdot X_b \quad (\text{Eq. 8})$$

Integrando em um intervalo finito de tempo:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = Y \cdot \frac{(S_0 - S)}{t} - K_b \cdot X_b \quad (\text{Eq. 9})$$

Como X_b se refere apenas à parcela de sólidos biodegradáveis e X se refere aos voláteis totais é necessário transformar X_b em X . Para tal utiliza-se um fator f_b , conhecido como fração biodegradável. Assim:

$$f_b = \frac{X_b}{X} \quad (\text{Eq. 10})$$

A recirculação do lodo conduz a uma acumulação da fração não biodegradável. Então, quanto maior for a idade do lodo, menor é a relação X_b/X . Operando com idade do lodo maior predominam no sistema as reações da respiração endógena, ou seja, ocorre uma estabilização do próprio lodo (VON SPERLING, 2002).

Segundo Eckenfelder (1989), cerca de 80% dos sólidos voláteis são biodegradáveis. A fração biodegradável pode ser expressa como segue:

$$fb = \frac{f_b'}{1 + (1 + f_b') \cdot K_b \cdot \theta_c} \text{ (Eq. 11)}$$

Nesse caso f_b' é a fração gerada com $\theta_c = 0$, esse valor é tipicamente 0,8.

Assim é possível construir um quadro de valores de fb em função de diferentes valores de K_b e de idade do lodo para efluentes sanitários (Tabela 4).

Tabela 4 - Fração Biodegradável vs. Idade do Lodo

| θ_c (dias) | $K_b = 0,05$ | $K_b = 0,07$ | $K_b = 0,09$ | $K_b = 0,11$ |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 4 | 0,77 | 0,76 | 0,75 | 0,74 |
| 8 | 0,74 | 0,72 | 0,70 | 0,68 |
| 12 | 0,71 | 0,68 | 0,66 | 0,63 |
| 16 | 0,69 | 0,65 | 0,62 | 0,59 |
| 20 | 0,67 | 0,63 | 0,59 | 0,56 |
| 24 | 0,65 | 0,60 | 0,56 | 0,52 |
| 28 | 0,63 | 0,57 | 0,53 | 0,50 |
| 32 | 0,61 | 0,55 | 0,52 | 0,47 |

Fonte: (VON SPERLING, 2002)

O projeto em questão trata de uma refinaria, instalação na qual são utilizados sistemas com aeração prolongada e conseqüentemente com idade do lodo em torno de 30 dias. Assim, de acordo com a Tabela 4, a faixa de valor de fb é de 0,47 a 0,63.

IV.3.2. Tempo de retenção hidráulica e tempo de residência celular:

Outros parâmetros importantes para o sistema de lodos ativados se referem à parcela líquida do efluente, que não sofre variação quantitativa a não ser pela retirada da vazão de lodo excedente, que em um âmbito global podemos considerar desprezível ($W \rightarrow 0$). Assim, o tempo de permanência dos sólidos e do líquido no sistema é diferente e podemos definir duas variáveis distintas, o tempo de retenção hidráulica (TRH) (horas) e o tempo médio de residência celular (θ_c), ou seja, a idade do lodo (dias) (SANT'ANNA, JR., 2010).

O tempo de retenção hidráulica é função do volume de líquido no sistema e do volume de líquido retirado do sistema por unidade de tempo.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (\text{Eq. 12})$$

Para sistemas com reator de mistura completa e com recirculação, caso em questão, a idade do lodo é expressa pelas seguintes equações:

$$\theta_c = \frac{X \cdot V}{W \cdot Xu} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\theta_c = \frac{1}{\mu - Kb} \quad (\text{Eq. 14})$$

Como W é muito menor que Q, podemos concluir que o TRH é menor que o θ_c , isso explica a maior eficiência em se operar com sistema de recirculação. O tempo de detenção hidráulica no sistema de lodos ativados com aeração prolongada é de 16 a 24 horas (JORDÃO & PESSOA, 2011).

IV.3.3. Tempo de varrimento celular:

É importante ainda que a idade do lodo seja superior ao tempo necessário para a duplicação celular. Caso isso não ocorra, pode haver varrimento celular levando a uma queda na concentração de biomassa no reator (VON SPERLING, 2002).

Considerando que as bactérias se reproduzem por fissão binária, a taxa de crescimento bacteriana pode ser expressa pela equação (VON SPERLING, 2002):

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X \quad (\text{Eq. 15})$$

Integrando de $t=0$ a $t=t$:

$$\ln \frac{X}{X_0} = \mu \cdot t \quad (\text{Eq. 16})$$

Quando $X = 2X_0$

$$\ln 2 = \mu \cdot t \quad (\text{Eq. 17})$$

Assim o tempo de duplicação (t_{dup}) (dias) é:

$$t_{dup} = \frac{0,693}{\mu} \quad (\text{Eq. 18})$$

A vazão recirculação pode então ser ajustada de modo que garanta $\theta_c > t_{dup}$ (VON SPERLING, 2002).

I V.3.4. Relação Alimento/Micro-organismo (A/M):

É a relação que expressa a quantidade de substrato fornecida ao sistema por unidade de massa dos micro-organismos, também conhecida como carga mássica, está diretamente relacionada à eficiência do sistema, pois indica quanto substrato os micro-organismos terão que degradar.

Assim quanto maior a relação A/M (gDBO/gSSV.d) mais sobrecarregados ficarão os micro-organismos e menor será a eficiência. Nos sistemas operando com aeração prolongada costuma prevalecer a respiração endógena, sinalizando uma baixa relação A/M, o que em parte explica as altas taxas de remoção que esses sistemas são capazes de alcançar.

Equacionando:

$$A = Q \cdot S_0 \quad (\text{Eq. 19})$$

$$M = V \cdot X \quad (\text{Eq. 20})$$

Assim,

$$\frac{A}{M} = \frac{Q \cdot S_0}{V \cdot X} \quad (\text{Eq. 21})$$

Utilizando a equação 12,

$$\frac{A}{M} = \frac{S_0}{TRH \cdot X} \quad (\text{Eq. 22})$$

Segundo Sant'ana Jr (2010) os valores típicos da relação A/M para processos de lodos ativado com aeração prolongada são de 0,02 a 0,10 kgDBO₅/kgSSV.d.

Assim, uma vez definido o valor de projeto da relação A/M, adotado um valor para x e conhecidas: a vazão Q, e as concentrações S₀ (característica do efluente) e S (parâmetros de qualidade desejados para descarte ou reúso) de DBO, podemos calcular o volume do reator através da equação:

$$V = \frac{Q \cdot (S_0 - S)}{X \cdot (A/M)} \quad (\text{Eq. 23})$$

Segundo Von Sperling (2002) atualmente se utiliza mais o conceito de idade do lodo para dimensionar o reator. Assim, é necessário definir uma relação entre a taxa A/M e a idade do lodo. Partindo da hipótese do estado estacionário, pode-se considerar que o lodo biológico gerado é igual ao lodo descartado (VON SPERLING, 2002).

IV.4. Adsorção em Carvão Ativado

Em muitos casos apenas o tratamento biológico não consegue adequar o efluente para que o mesmo atinja os padrões de reúso. Por esse motivo, normalmente, é necessária a utilização de métodos de tratamento terciário. Um desses métodos é a adsorção em carvão ativado para a remoção de substâncias que produzem: gosto, odor, cor e também a matéria orgânica dissolvida no efluente.

O carvão ativado possui uma grande capacidade adsorvente devido a sua área superficial elevada, portanto é utilizado em muitos processos onde há necessidade de se obter uma elevada eficiência de remoção.

Apresenta como grande vantagem a possibilidade de poder ser regenerado, ou seja, é possível “descontaminar” o carvão do poluente e adquirir novamente seu poder de adsorção. Os métodos mais utilizados para a regeneração são: térmico, vapor, extração por solventes, tratamento com ácidos ou bases e oxidação química (LAS CASAS, 2004).

A propriedade adsorvente do carvão ativado é conhecida desde a antiguidade, por exemplo, os egípcios e os sumérios utilizavam o carvão ativado para remoção de níquel e o cobre de peças de bronze e também na purificação de óleos e ervas utilizados. Apesar desse conhecimento milenar, a primeira aplicação comercial data do final do século XVIII na indústria da cana-de-açúcar, para descoloração (LAS CASAS, 2004 e MASSCHELEIN, 1992).

O uso do carvão ativado no tratamento de água começou no século 19, na Inglaterra, para remover os odores e gosto indesejáveis. Atualmente o uso do carvão ativado para a remoção de poluentes orgânicos tornou-se muito comum devido a sua eficácia e seu custo inferior ao de outros tratamentos similares (MACHADO, 2010).

O material precursor do carvão ativado pode ser composto por diferentes materiais, entre eles: madeira, osso e casca de coco, normalmente esses constituintes são materiais carbonáceos porosos que sofrerem processamento visando aumentar a porosidade interna. Esse processamento envolve a carbonização (em temperaturas entre 500 – 800°C) e a oxidação (em temperaturas de 800 a 900°C) para obtenção dos vazios internos, ou seja, a ativação do carvão (DI BERNARDO, 2005).

Após esse processo o carvão apresenta área superficial muito maior do que antes, podendo alcançar até mesmo valores acima de 800 m²/g. Isso ocorre, porque há a formação de uma estrutura interna comparável a uma rede de túneis que se dividem em canais cada vez menores, como podemos observar na Figura 3 (CLAUDINO, 2000).

Partícula de Carvão Ativado

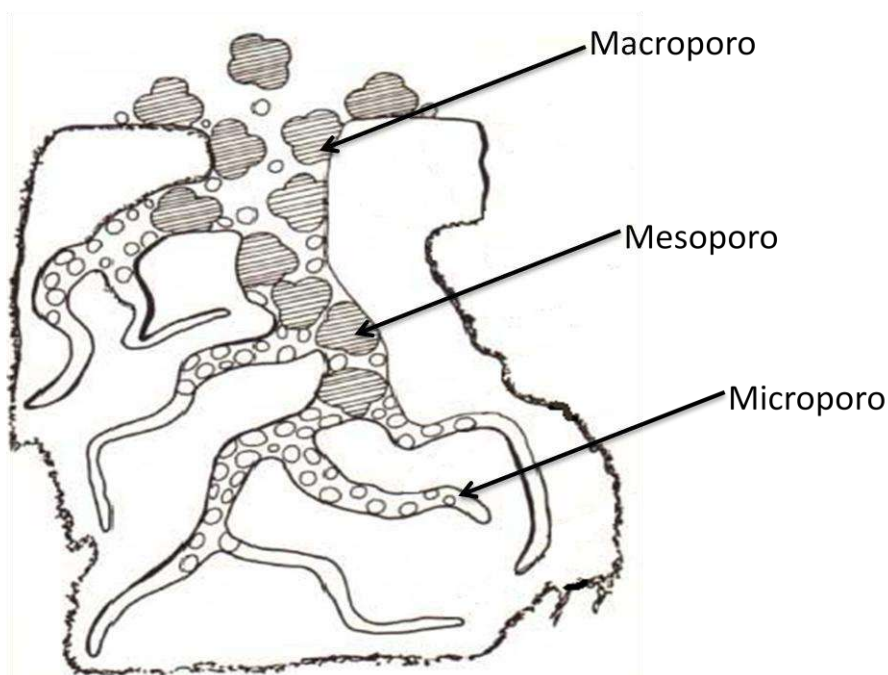


Figura 3 - Partícula de Carvão Ativado

Fonte: (Adaptado de www.alphacarbo.com.br)

Segundo a IUPAC esses poros formados são divididos de acordo com o seu diâmetro médio em: Microporos, com diâmetro médio inferior a 2 nm, Mesoporos, cujos diâmetros estão na faixa de 2 a 50 nm e Macroporos, com diâmetros superiores a 50 nm (FLORIDO, 2011). Os microporos são responsáveis pela maior parte da área superficial, proporcionando alta capacidade de adsorção para moléculas pequenas (gases e solventes comuns), já os mesoporos contribuem para a adsorção de moléculas maiores e propiciam a maior parte da área superficial em carvões contaminados com produtos químicos, por fim os macroporos normalmente não têm grande contribuição para a adsorção servindo como meio de transporte para que as moléculas alcancem os poros menores (GREGG, 1982).

Pode-se aplicar o carvão ativado de duas maneiras, do tipo granular (CAG) ou do tipo pulverizado (CAP), a escolha sobre qual das duas formas é melhor utilizar depende das características do efluente, dos poluentes presentes, dos equipamentos utilizados na estação e dos custos envolvidos em cada um deles, a grande diferença entre o CAP e o CAG é o tamanho da partícula, no CAP as partículas são menores, com no máximo 100 µm de tamanho (SNOEYINK, 1990).

Normalmente, o uso do CAG se dá sob a forma de meios filtrantes, assim a superfície dos poros dentro dos grãos vai saturando de moléculas adsorvidas, quando a saturação atinge seu ponto máximo o carvão deve ser retirado, e regenerado. Já o CAP normalmente é adicionado à água e depois de um determinado tempo removido para regeneração, normalmente como floco na descarga de lodo do decantador (MACHADO, 2010).

Para avaliar os carvões ativados pode-se utilizar alguns parâmetros de caracterização, como por exemplo, Número de Iodo, pois devido a seu pequeno tamanho a molécula de iodo é capaz de penetrar nos microporos. Assim pode-se estimar a capacidade que determinado carvão ativo tem de adsorver compostos com baixa massa molar. (MASSCHELEIN, 1992)

Outro parâmetro que se pode citar é o Azul de Metileno, pois o mesmo avalia a mesoporosidade do carvão ativado. Há ainda o número de fenol, usado para avaliar a capacidade de remoção de compostos com cheiro e odor (MASSCHELEIN, 1992).

No fenômeno de adsorção, existem substâncias capazes de fixar em sua superfície outras moléculas. Essas substâncias agem como adsorventes e as moléculas que são removidas são os adsorbatos. A adsorção é um fenômeno espontâneo, que ocorre com redução da energia livre superficial (ΔG°), redução da desordem do sistema, portanto diminuição da entropia (ΔS°) (CIOLA, 1981).

A adsorção só é possível graças a um gradiente de energia provocado pelo desequilíbrio das forças de coesão e adesão dos átomos ou íons. Termodinamicamente essa fase é instável, buscando sempre o equilíbrio através de interações físicas e químicas. As interações físicas, também chamadas de fisissorção, normalmente compreendem interações que se desenvolvem com baixas energias e a desorção pode ser ocasionada por qualquer interferência externa. Já se o adsorbato interage quimicamente com a interface temos a quimissorção com energias envolvidas muito maiores e dificilmente a substância se desorve (LAS CASAS, 2004).

É importante ressaltar que a etapa limitante no processo é a difusão de adsorbato através dos poros. Podemos ainda avaliar a capacidade de adsorção do carvão para um determinado contaminante através do cálculo de sua isoterma de adsorção.

A isoterma de adsorção relaciona a quantidade de adsorbato por unidade de adsorvente e a concentração de equilíbrio na solução, sob determinada temperatura. As equações mais utilizadas para descrever as isotermas de adsorção são as de Freundlich e de Langmuir.

A equação de Langmuir, geralmente não descreve os dados de adsorção tão precisamente quanto à equação de Freundlich, assim a isoterma de Freundlich é usada normalmente para descrever o fenômeno de adsorção envolvendo efluentes industriais (ECKENFELDER, 1999).

A isoterma de Freundlich corresponde a uma equação do tipo:

$$\left(\frac{X}{M}\right) = K \cdot C_e^{1/n} \quad (\text{Eq. 24})$$

Linearizando essa equação obtemos:

$$\log\left(\frac{X}{M}\right) = \log(k) + \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \log(C_e) \quad (\text{Eq. 25})$$

Sendo:

- X/M , quantidade de soluto adsorvido por massa de carvão (mg/g)
- C_e , concentração de equilíbrio (mg/L)
- K e $1/n$, constantes empíricas

A constante K está relacionada principalmente com a capacidade de adsorção e o expoente $1/n$ é um adimensional com valor menor do que 1 (normalmente está entre 0,3 e 0,7, quando a adsorção é favorável) e está relacionado com a intensidade da adsorção (ECKENFELDER, 1999).

IV.5. PACT® (Powdered Activated Carbon Treatment)

IV.5.1. O Processo

Visando aprimorar a remoção de poluentes e adequar o efluente tratado na estação de tratamento para descarte nos corpos hídricos, foi desenvolvido na década de 70, pela DuPont, o processo conhecido como PACT® (*Powdered Activated Carbon Treatment*). O PACT® é um processo de tratamento de efluentes industriais que combina o uso do CAP (Carvão Ativado Pulverizado) ao processo de lodos ativados, consorciando assim a oxidação biológica e a adsorção em carvão em uma única etapa de tratamento. O carvão ativado pode inclusive ser adicionado a um processo de lodos ativados já em funcionamento, no caso deste não estar mais atendendo aos padrões requeridos, propiciando assim uma redução de custos (ECKENFELDER, 1999).

Basicamente, o PACT funciona da maneira semelhante ao processo de lodos ativados, ou seja, ao aerador é alimentada a corrente a ser tratada, entrando em contato com a biomassa e, nesse caso também, com as partículas de carvão ativado, na saída do aerador a corrente segue para o decantador, separando assim os sólidos do efluente tratado. Esses sólidos são realimentados ao aerador e a fração líquida é descartada ou reutilizada (MACHADO, 2010).

Apenas uma parte dos sólidos decantados é purgada do sistema e assim como no processo de lodos ativados essa fração deve receber destinação adequada. O carvão deve ser regenerado, pois seus poros estão obstruídos e, portanto, indisponíveis para adsorver mais poluentes (VON SPERLING, 2002). Essa demanda gera a necessidade de um equipamento que não ocorria no processo convencional: o regenerador de carvão, que será detalhado mais adiante.

IV.5.2. Vantagens do processo PACT® (*Powdered Activated Carbon Treatment*)

A propriedade de adsorção física do carvão ativado em pó facilita a remoção de produtos de resíduos perigosos e aumenta a capacidade de remoção de cor e odor da estação além de oferecer um custo menor no descarte de resíduos. Os aspectos fundamentais da utilização do carvão ativado em conjunto com o processo biológico são (ECKENFELDER, 1999):

- O carvão torna possível a retirada de substâncias não-biodegradáveis
- Diminuição da toxicidade
- Diminuição da inibição biológica
- Melhora da sedimentabilidade do lodo
- Controle da remoção de matéria orgânica pelo ajuste da dose de carvão
- Aumento significativo da Nitrificação

Ainda segundo Eckenfelder (1999), os efeitos sinérgicos da utilização desses processos em conjunto são decorrentes da existência de uma biorregeneração do carvão, isto é, os micro-organismos são capazes de renovar a capacidade de adsorção do carvão, e do aumento da atividade biológica pela adsorção de compostos tóxicos por parte do CAP.

Outro motivo é o fato de que, na presença do carvão, a substância adsorvida permanece no sistema pelo tempo relativo à idade do lodo (dias), enquanto na ausência do CAP, a substância permanece no sistema apenas pelo Tempo de Retenção Hidráulica (horas). Desse modo, a idade do lodo afeta a eficiência do CAP, sendo que para lodos de maior idade, a remoção de orgânicos por unidade de carvão é aumentada (ECKENFELDER, 1999).

IV.5.3. Aplicações do processo PACT® (*Powdered Activated Carbon Treatment*)

Esse sistema vem sendo utilizado ao redor do mundo em inúmeras estações de tratamento de efluentes industriais, alcançando altas taxas de remoção de poluentes, permitindo assim que esse efluente seja descartado na natureza de forma segura ou até mesmo reutilizado na própria indústria (MEIDL, 1992).

Provavelmente, a razão primordial para a aplicação do PACT é a sua inerente estabilidade em resposta às condições a montante. Devido a essa propriedade, as plantas que possuem características de operação variáveis, como as refinarias, optam por esse sistema de tratamento (MACHADO, 2010). A Tabela 5 apresenta as condições de entrada de um efluente típico de refinaria em uma estação de tratamento e na sua saída após a utilização da tecnologia do PACT.

Tabela 5 - Utilização do PACT no Tratamento de Efluentes de Refinaria

| Parâmetro | Afluente | Efluente |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| DQO (mg/L) | 616 | 129 |
| DBO ₅ (mg/L) | 149 | <6 |
| Sólidos Suspensos (mg/L) | 31 | 7 |
| N-NH ₃ (mg/L) | 16,1 | <1 |
| Cianeto (mg/L) | 4,78 | 0,154 |
| Fenóis (mg/L) | 9,55 | 0,053 |
| Cor (unidades de cor) | 109 | 38 |
| Óleos e Graxas (mg/L) | 14,8 | 0,7 |

Fonte: Adaptado de MEIDL (1992)

IV.5.4. Regeneração do Carvão

Segundo Meidl (1999), o lodo proveniente do sistema PACT pode ser tratado de forma eficaz em um regenerador de ar úmido (WAR - *Wet Air Regeneration*) desenvolvido pela empresa SIEMENS, recuperando assim o carvão para reutilização no sistema, enquanto simultaneamente destrói a biomassa agregada. Os sólidos provenientes do regenerador são estáveis, semelhantes às cinzas de incineração, e, portanto, apresentam menor custo de descarte em um aterro industrial (MEIDL, 1992).

Após o tratamento, uma parte de carvão e biomassa é purgada. Isso é feito para garantir que as concentrações no reator se mantenham estáveis. Esses resíduos sólidos podem ser lavados e eliminados como suspensão, desidratadas até uma torta estável, ou bombeado para a unidade de regeneração de ar úmido (WAR).

Nessa unidade o carvão é regenerado e a biomassa destruída, ou seja, as unidades de regeneração de carvão podem até mesmo eliminar a necessidade de disposição final do lodo secundário, eliminando essa despesa e responsabilidade (MEIDL, 1999).

Segundo a empresa fabricante (SIEMENS), esses sistemas operam em temperaturas moderadas (230°C) de modo que as superfícies de carbono são regeneradas, as taxas de recuperação de carvão nesse método são normalmente superiores a 90%. Esses regeneradores não emitem poluentes atmosféricos e são mais indicados para sistemas que excedem os 2.000 quilos de carvão por dia (SIEMENS).

IV.5.5. Trabalhos e Pesquisas Recentes envolvendo o uso de PACT

Nas últimas décadas muitos estudos têm sido realizados para avaliar a capacidade do carvão ativado e do PACT no tratamento de efluentes industriais. Assim, alguns deles apresentaram resultados interessantes e pertinentes ao objetivo desse trabalho como, por exemplo, Martin *et al.*(2004) apresentaram um estudo que concluiu que a adição de um adsorvente carbonáceo ao tanque de aeração de um processo de lodo ativado aumenta a estabilidade e melhora o desempenho se comparado ao processo convencional. A adição de carbono melhorou a remoção de fenol (entre 58% e 98,7%) e de matéria orgânica (entre 87% e 93%). Ainda nesse trabalho não foram encontradas diferenças significativas entre reatores contínuos em escala de bancada operando com adsorvente de base carbonácea ou com o carbono ativado comercial.

Kargi & Ozmiş (2004) realizaram um trabalho a respeito da eficácia do tratamento de águas residuais que requerem tecnologias de tratamento avançadas, tais como adsorção para a remoção de corantes. Demonstrando que em concentrações de adsorvente acima de 4g/L mais de 95% de eficiência de remoção de corantes é obtido para o processo conjunto de lodos ativados com carvão ativado.

Sher *et al.*(1999) apresentaram um trabalho a respeito das taxas inibição do consumo de oxigênio no processo PACT, com o objetivo de determinar se o PACT resistiria melhor à inibição. Três compostos inibitórios com diferentes características de adsorção foram testados visando avaliar a resistência do processo, entre esses compostos estava o Fenol (presente muitas vezes nos efluentes de refinaria). O resultado mostrou que a concentração do composto inibidor reduziu a captação de compostos orgânicos do lodo ativado comum em 50% de sua taxa máxima, já o PACT apresentou uma resistência maior à inibição aguda para todas as idades de lodo avaliadas.

Embora estes resultados sejam em resposta a testes de toxicidade aguda, indicam que a populações microbianas do PACT são provavelmente diferentes daquelas em idade semelhante no processo de lodos ativados convencional e que estes organismos resistem melhor à toxicidade. Isto indica que o processo do PACT deve resistir melhor às variações da corrente de entrada (SHER *et al.*, 1999).

Costa *et al.*(2003) apresentaram um estudo a respeito do tratamento de efluentes de uma indústria química pelo processo de lodos ativados convencional e pelo PACT. O efluente em questão possuía composição química complexa, alta salinidade, elevada temperatura e toxicidade. Depois de realizarem inúmeros ensaios para avaliar os diferentes parâmetros que poderiam influenciar na operação dos sistemas de tratamento, como por exemplo, Temperatura, Toxicidade e TRH, os resultados foram comparados para avaliar as diferenças que a presença do carvão ativado trouxe para o processo.

Uma das conclusões apresentadas no estudo de Costa *et al.* (2003) foi que o emprego do processo PACT não conduziu a um aumento significativo na remoção de matéria orgânica, porém houve uma melhora na estabilidade do processo, esse fato pode ser vantajoso para o

tratamento de um efluente complexo e variável, como é o caso do efluente de indústria química, como uma refinaria por exemplo.

Ainda segundo os autores, o processo mostrou-se ainda eficiente na remoção de amônia, conseguindo reduzir o teor desse poluente adequando-o aos níveis estabelecidos pela legislação (5,0 mg/L). A remoção de fósforo também foi favorecida no processo PACT e a melhora na qualidade do lodo, que se mostrou muito menos sensível, sobretudo aos compostos tóxicos presentes no efluente.

Conforme exposto anteriormente, o sistema PACT combina o tratamento biológico e a adsorção em carvão ativado em uma única etapa de tratamento, sinérgica, resultando em significativa redução de custos e melhora no desempenho sobre outros sistemas. Além disso, podemos citar como outras vantagens do PACT: a estabilização do sistema biológico contra perturbações e choques de carga, utilização de menor quantidade de carbono do que seria usado normalmente em um sistema granular para atingir o mesmo desempenho e a ausência de problemas com pré-filtragem comum nos sistemas granulares (ECKENFELDER, 1999).

O sistema PACT pode ser utilizado para tratar efluentes de refinaria, industriais, petroquímicos e outros, até mesmo lixiviado de aterros de resíduos (chorume). O lixiviado é o líquido poluente originado dos processos biológicos, químicos e físicos da decomposição de resíduos orgânicos que em conjunto com a água das chuvas lixivia os compostos orgânicos dos aterros para o meio ambiente. Normalmente, o lixiviado possui elevada concentração de matéria orgânica e características muito variáveis, desde volume até mesmo as concentrações dependem das condições ambientais do local onde o aterro está instalado e da idade desse aterro, o que torna seu tratamento um desafio aos processos comuns.

O PACT se apresenta como alternativa promissora no tratamento do lixiviado, pois é capaz de degradar os poluentes biodegradáveis e adsorver os não biodegradáveis em um único processo. Além de ser ideal para os resíduos variáveis, porque o carvão protege a biomassa do sistema dessas variações, ainda é possível promover uma maior nitrificação, remover cores e odores, e também alguns metais e recalcitrantes.

Machado (2010) realizou um estudo no qual teve como objetivo estudar a adição de carvão ativado em pó ao processo de lodos ativados (PACT®) no tratamento de efluente de refinaria de petróleo. O objetivo do trabalho era principalmente avaliar a capacidade do PACT em remover as substâncias resistentes ao tratamento biológico, reduzir a toxicidade residual, remover nitrogênio amoniacal e avaliar a estabilidade do processo.

A partir dos resultados obtidos na avaliação da DQO solúvel, verificou-se que os efluentes tratados com carvão ativado em pó (CAP) em conjunto com os biorreatores de lodos ativados apresentaram valores menores quando comparados ao reator controle que continha apenas lodo ativado, enquanto o controle apresentou taxas de remoção na faixa de 70 a 80% os biorreatores com carvão atingiram valores em torno de 85 a 95% (MACHADO, 2010).

Ao final do estudo de Machado (2010) foi possível concluir que embora a adição de carvão aumente a estabilidade do processo, e apresente um efluente com baixa turbidez, não foi possível verificar nos sistemas estudados a remoção de nitrogênio amoniacal. Este fato

pode ser explicado devido a inibição da nitrificação, devido à presença de compostos inibidores, como o fenol.

Ainda no trabalho de Machado (2010), foi possível identificar que a DQO para os efluentes tratados com carvão alcançou a meta requerida de descarte de DQO (150 mg/L) em todos os ensaios e que o lodo do reator controle (sem carvão) apresentou baixa sedimentabilidade, em função da alta concentração de organismos filamentosos. Quanto às condições operacionais ideais esse trabalho mostrou que o melhor rendimento foi encontrado no sistema com tempo de retenção hidráulica de 24 horas, idade do lodo de 30 dias, reposição de carvão de 300 mg de CAP/L de efluente.

Por fim, os resultados de Machado (2010) mostraram que após a adição de carvão o sistema se tornou mais estável sendo, portanto, o PACT® um processo promissor para adequar o efluente de refinaria para reúso na própria planta ou descarte dentro dos parâmetros legais.

V. Metodologia do Trabalho

O projeto da Estação de Tratamento de Efluentes utilizando o sistema PACT® foi desenvolvido a partir das seguintes etapas:

- Fluxograma
- Parâmetros Ambientais e Legislação Vigente
- Equipamentos e Modelagem Matemática
- Dimensionamento através de programa EXCEL/VBA
- Análise de Sensibilidade

O Fluxograma foi gerado através da análise de um conjunto de considerações técnicas encontradas na literatura e de considerações específicas para a aplicação em questão, em seguida são apresentadas as metas de projeto, estabelecidas a partir dos parâmetros ambientais mais relevantes na legislação além de metas internas da refinaria, obtidas através de comunicação pessoal.

A etapa de descrição dos equipamentos e modelagem matemática do processo segue os procedimentos indicados por Perlingeiro (2005) utilizando informações e descrição fenomenológica de Sant'ana Jr (2010). O dimensionamento foi realizado através de programa EXCEL/VBA utilizando as equações presentes no texto. Através do programa é possível realizar variações que retratem alterações nas condições de entrada do processo ou até mesmo dos parâmetros cinéticos utilizados. Essas variações possibilitam uma análise de sensibilidade do projeto, permitindo identificar quais variáveis e parâmetros mais relevantes.

Os dados utilizados no projeto advêm da dissertação de Machado (2010), da comunicação pessoal com funcionários da refinaria em questão e por fim de valores sugeridos pela literatura para os principais parâmetros. É importante ressaltar que a literatura trata basicamente do tratamento de esgoto doméstico. Assim os parâmetros encontrados também são referentes à efluentes sanitários.

V.1. Metas a serem alcançadas: Parâmetros Ambientais e Legislação Vigente

A legislação ambiental vigente no estado do Rio de Janeiro é composta pelas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo vinculado ao Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), sendo o responsável por estabelecer as normas, critérios e padrões relativos ao controle e manutenção da qualidade do meio ambiente em âmbito federal e dos instrumentos normativos do Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA), que é responsável pela implementação das políticas estaduais para o meio ambiente sendo vinculado à Secretaria do Meio Ambiente.

A legislação que atualmente rege os descartes industriais nos corpos hídricos é encontrada na resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 2011

que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, além de complementar e alterar a Resolução nº 357 de 2005.

Entre outras regras, essas resoluções estabelecem que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências condizentes com o tipo de corpo receptor a que se destina o descarte.

No âmbito geral, o lançamento de efluentes em corpos de água, não poderá exceder as condições e padrões de qualidade de água estabelecidos para as respectivas classes, nas condições da vazão de referência ou volume disponível, além de atender outras exigências aplicáveis.

A Resolução 430/2011 estabelece os limites de descarte das principais substâncias poluentes. Vale ressaltar que os limites de DBO estabelecidos poderão ser elevados, caso se verifique capacidade de autodepuração no corpo receptor e que se demonstre que as concentrações mínimas de oxigênio dissolvido (OD) previstas não serão desobedecidas, nas condições de vazão de referência, com exceção da zona de mistura.

A diretriz DZ-205. R-6 do INEA estabelece as exigências que as indústrias precisam cumprir sobre seu rejeito industrial para reduzir a emissão de: Matéria orgânica biodegradável de origem industrial, matéria orgânica não biodegradável de origem industrial e compostos orgânicos de origem industrial que interferem nos mecanismos ecológicos dos corpos d'água e na operação de sistemas biológicos de tratamento implantados pelas indústrias e pelas operadoras de serviços de esgoto.

Essa norma, na realidade, determina a eficiência mínima exigida de remoção de DBO (40%,70% ou 90%), no caso em estudo (PACT) se trata de um sistema Nível 3, ou seja, capaz de remover no mínimo 90% da DBO. Os efluentes de indústrias com vazão superior a 3,5 m³/dia, como no caso em questão, somente poderão ser lançados nos corpos d' água, direta ou indiretamente, se atenderem aos limites de DQO estabelecidos pelo INEA (Anexo I).

No caso específico de indústrias químicas, petroquímicas e refinarias de petróleo o limite é de 250 mg/L ou 5,0 kg/dia, porém no caso específico da refinaria cujo o efluente foi analisado por Machado (2010) a meta interna que se deseja obter para a DQO do efluente tratado é de 150mg/L.

Complementado a legislação apresentada devemos recorrer à norma NT-202.R-10 também do INEA que visa estabelecer um padrão sobre que condições o efluente industrial deve se encontrar para poder ser descartado. A corrente de descarte dos efluentes deve obedecer aos padrões de pH, temperatura, sólidos sedimentáveis, cor e outros já destacados anteriormente, além de apresentarem valores de concentração inferiores ao máximo permitido para as substâncias listadas no Anexo II.

VI. Resultados e Discussão

VI.1. Fluxograma

A Figura 4 ilustra o fluxograma desenvolvido para o presente projeto, abaixo a descrição dos principais equipamentos, bem como as condições admitidas. O desenvolvimento do fluxograma teve base no processo de lodos ativados, adicionando-se em seguida os equipamentos e as correntes necessárias para incluir o carvão ativado. Conforme visto, o fator primordial para o sucesso desse sistema é a capacidade do Sedimentador separar a biomassa do efluente.

- Tanque de Aeração:

É um tanque simples que recebe 3 correntes de alimentação. A primeira é a corrente constituída pela carga de efluentes industriais a serem tratados e pela parcela de “make-up” de carvão, necessária para recompensar as perdas no equipamento de regeneração (cerca de 10% do carvão).

A segunda corrente é a de recirculação do lodo retirado do fundo do Sedimentador, constituída de grande parte da biomassa sedimentada e a terceira corrente é constituída de carvão regenerado advindo do Regenerador de carvão e pequena parcela de lodo estabilizado que permaneceu agregado ao carvão.

Esse tanque conta ainda com outras 3 correntes que são responsáveis por garantir as condições ideais para o crescimento microbiano, são elas: corrente de ar, corrente de nutrientes e corrente de Ácido ou Base para equalização do pH.

Como os efluentes de refinaria possuem altas cargas de DBO e DQO opta-se normalmente pela utilização de aeração prolongada no processo de lodos ativados, aumentando a capacidade de digestão e gerando lodo já estabilizado. Assim foi dispensado do fluxograma o decantador primário.

Considerando que a estação de tratamento irá operar em regime contínuo é necessário que haja controles de pH, Temperatura e Oxigênio dissolvido no Tanque de Aeração. Além desse controle pode ser necessária a adição de nutrientes, principalmente o Fósforo na proporção de 100DBO/5N/1P segundo (JORDÃO & PESSOA, 1995).

Por fim, é também necessária a adição carbonato de cálcio para ajustar a alcalinidade e servir de fonte de carbono inorgânico para as bactérias autotróficas nitrificantes (FURLAN, 1997).

- Sedimentador:

Essa operação recebe a corrente de saída do Tanque de Aeração sendo responsável por separar a biomassa do efluente líquido tratado em duas correntes que serão recolhidas no topo (Efluente Tratado) e no fundo (Lodo), a corrente de topo segue para o controle de qualidade e posterior reuso ou descarte e a corrente de fundo é recirculada para o Tanque de Aeração.

Para que a separação ocorra é necessário que haja floculação da biomassa, que só é possível graças à matriz gelatinosa que aglutina os micro-organismos, aumentando as dimensões e criando os flocos, a adição de carvão só irá colaborar para que essa floculação e consequente decantação sejam ainda mais notáveis (Machado, 2010).

Nos Sedimentadores, normalmente, acontece a sedimentação zonal. Nesse tipo de sedimentação o aumento da concentração de sólidos forma uma interface que sedimenta de forma única, sendo a velocidade dessa interface o parâmetro de projeto dessas operações. A tendência seria o aumento dessa interface ao passar do tempo. Porém no sistema de lodos ativados a retirada de lodo é constante. Assim, a interface permanece constante se as velocidades de retirada e de sedimentação forem iguais (VON SPERLING, 2002).

Embora a maior parte do lodo seja recirculado, uma parte deve ser purgada. Caso contrário haveria um crescimento indefinido da população microbiana que acarretaria problemas de sedimentação e transferência de oxigênio no tanque.

- Regenerador de Carvão:

No que se refere à adição de carvão o único equipamento que será necessário incluir no fluxograma é o regenerador de carvão, já que o CAP será adicionado em um ponto em conjunto com o lodo recirculado, existindo apenas uma corrente de “make-up” para a reposição do carvão perdido ou inutilizado. Essa perda está associada, sobretudo à saturação dos poros do carvão que não conseguem ser totalmente regenerados.

Esse equipamento é responsável pela regeneração do carvão, ou seja, é fundamental para redução de custo na utilização do carvão e na qualidade do efluente, pois essa operação garante a qualidade do carvão utilizado no tanque.

Recebe a corrente de fundo da Sedimentação depois de separada a fração de recirculação. Essa corrente contém carvão esgotado e uma parcela de biomassa aderida, do equipamento saem duas correntes, uma com carvão regenerado que será alimentada ao Tanque de Aeração e outra que seguirá para Adensamento e Desidratação se necessário e então destinação adequada em aterro industrial.

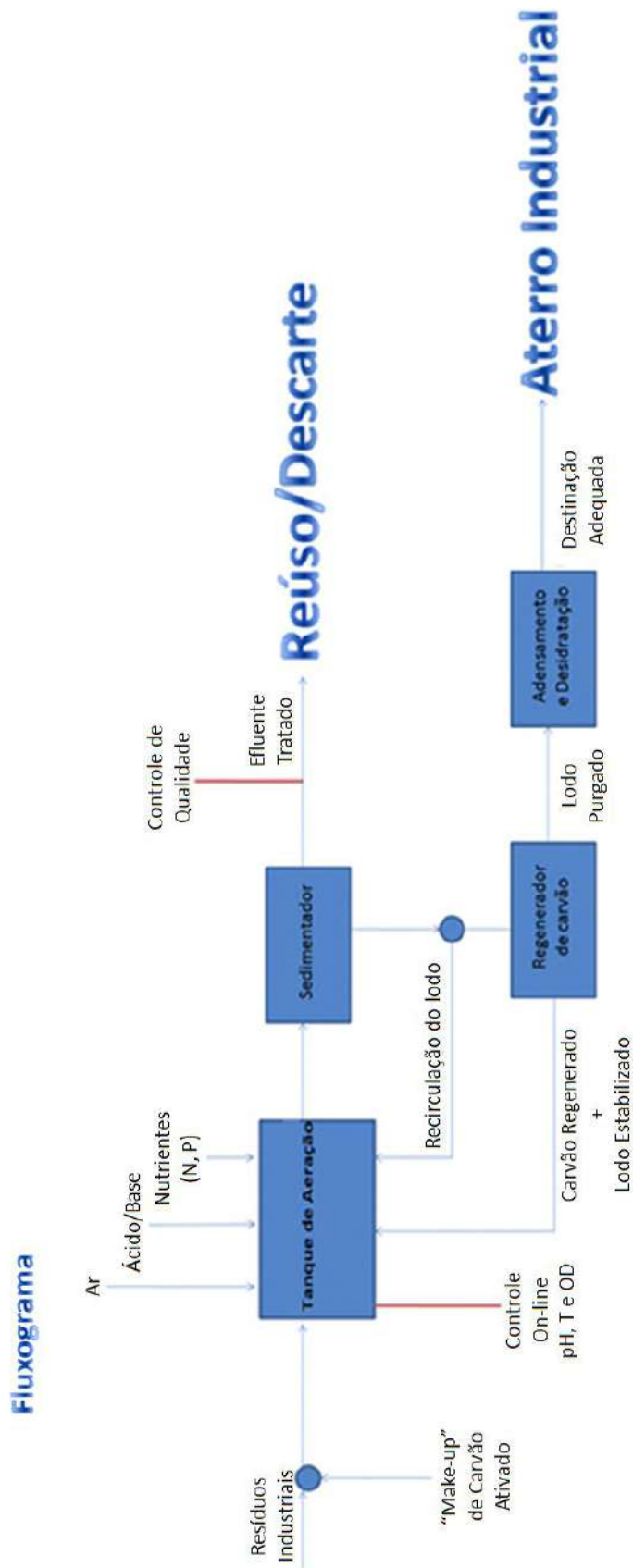


Figura 4 - Fluxograma do presente projeto

VI.2. Equipamentos e Modelagem Matemática

Segundo Perlingeiro (2005), o modelo matemático de um processo é formado pelo conjunto dos modelos dos equipamentos e de uma representação da estrutura do fluxograma. O modelo de um equipamento por sua vez é constituído das equações representativas dos fenômenos que regem seu comportamento, tais como balanços materiais, balanços de energia, relações de equilíbrio de fases, equações de dimensionamento e outras.

De forma a sistematizar o projeto e facilitar o desenvolvimento e compreensão o processo foi dividido em partes. Assim o tanque de aeração e o sedimentador serão apresentados em separado.

VI.2.1. Tanque de aeração

O aerador ou tanque de aeração é o equipamento no qual ocorre a degradação e adsorção dos poluentes, no caso específico desse projeto irá operar com idade do lodo elevada, ou seja, regime de aeração prolongada para atender satisfatoriamente as condições típicas do efluente de uma refinaria, isso significa que se trata de um equipamento com volume elevado e com altos requisitos de oxigênio e de energia, por possuir elevada quantidade de biomassa e dispensar o decantador primário.

Esse aerador é um tanque simples, normalmente de concreto armado que possui alimentação submersa, o que evita o desprendimento de gases, e saída na extremidade oposta através de vertedores, pode ser construído de diversas formas.

A configuração escolhida para este projeto é a de mistura completa de dimensões predominantemente quadradas, pois segundo Von Sperling (2002), é a mais adequada aos despejos industriais, possui maior resistência a sobrecargas e a componentes tóxicos e, além disso, garante concentrações iguais em qualquer ponto do reator.

A aeração desse tanque é parte muito importante no processo e pode ser realizada de duas formas diferentes: aeração mecânica, que introduz oxigênio por ação de aeradores mecânicos fixos, geralmente superficiais, provocando agitação, favorecendo o contato com o ar atmosférico; aeração por ar difuso, na qual o oxigênio é introduzido por meio de micro-bolhas, originárias de difusores (cerâmicos ou de borracha) instalados no fundo dos tanques, alimentados por sopradores de ar comprimido.

Foi escolhida a aeração através da utilização de ar difuso, por ser a opção que otimiza da transferência de massa, ou seja, o micro-organismo tem maior facilidade de assimilar o Oxigênio, pois se encontra em micro-bolhas finamente divididas (JORDÃO & PESSOA, 1995).

No projeto, o tanque de aeração irá receber quatro correntes: a corrente de efluentes industriais à qual já foi adicionado carvão em pó injetado, a corrente de reciclo proveniente do decantador secundário, o carvão que foi regenerado após a passagem pelo regenerador e

também a corrente de ar, além é claro de possíveis doses de Nitrogênio e Fósforo para garantir a nutrição microbiana e corrente de ácido ou base dependendo da necessidade de equalização. Uma única corrente deixará o tanque de aeração e seguirá para o sedimentador, essa corrente contém uma mistura de efluente tratado, biomassa e carvão esgotado.

O primeiro passo na formulação de um modelo é a identificação das variáveis relevantes no tanque de aeração, conforme mostrado na Figura 5.

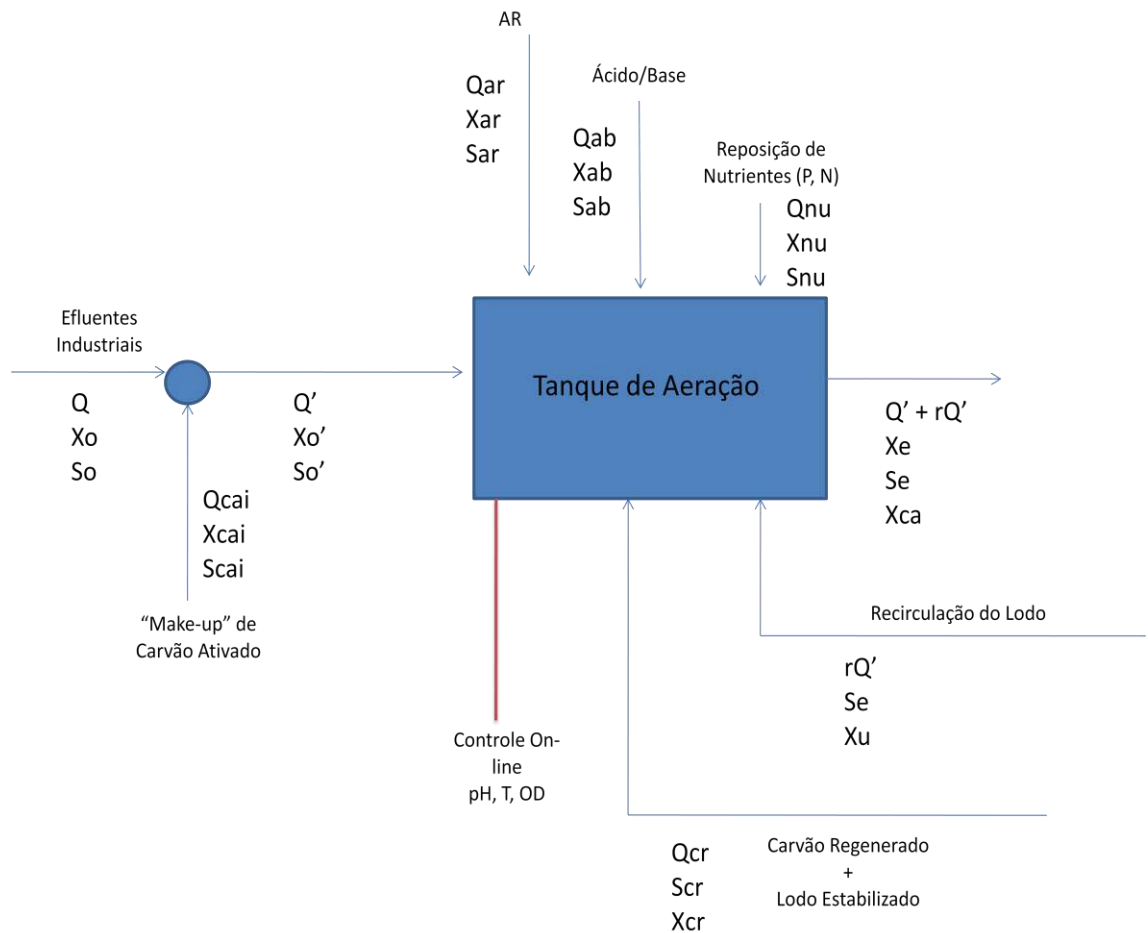


Figura 5 – Tanque de Aeração e Correntes

Em que, as correntes podem ser definidas como:

- Corrente de alimentação:

Q = Vazão de alimentação da ETDI (Estação de Tratamento de Despejos Industriais) em $m^3/h = 1000 m^3/h$. Esse valor foi adquirido por informações na refinaria (Comunicação Pessoal, 2012).

X_o = Concentração de biomassa na corrente de entrada em $mg/L = 0 mg/L$. Foi assumido que não há sólidos no afluente.

S_o (DQO) = Concentração de substrato na corrente de entrada em $mg/L = 1000 mg/L$, o valor de $1000 mg/L$ foi utilizado pelos dados do trabalho de Machado (2010).

- Corrente de “Make-up” de carvão:

Q_{cai} = Vazão de carvão ativo reposta na corrente de “Make-up” em $m^3/h = 0,075 m^3/h$, Esse valor pode ser encontrado a partir da seguinte equação.

$$Q_{cai} = \frac{\left(\text{concentração de reposição de carvão } \left(\frac{mg}{L} \right) \cdot \left(1 - \frac{\text{taxa de regeneração do carvão}}{100} \right) \right) \cdot Q}{\text{densidade do carvão}} \quad (\text{Eq. 26})$$

Segundo dados do trabalho de Machado (2010), para garantir que o efluente tratado não apresente toxicidade relevante é necessário que a taxa de regeneração do carvão no reator seja de 300 mg CAP/L de efluente e segundo informação da SIEMENS (2012) que o regenerador é capaz de regenerar entre 90 e 95%. De acordo com informações do fabricante do carvão ativado NORIT SAE SUPER (NORIT DIGITAL LIBRARY, 2012) a densidade aparente, ou seja, aquela que considera o volume dos vazios do carvão ativado é 400 kg/m³, portanto $Q_{cai}=0,075 m^3/h$.

É importante ressaltar ainda que esse valor para a taxa de reposição de carvão se refere ao sistema em estado estacionário. A concentração de carvão no interior do reator segundo Meidl (1997) é proporcional à idade do lodo. Então, realizando o balanço de massas no reator, a relação entre a idade do lodo e a biomassa com carvão se dá pela equação a seguir:

$$[\text{carvão no reator}] = \frac{\text{Taxa de reposição de carvão ativado} \cdot \theta_c}{TRH} \quad (\text{Eq. 27})$$

X_{cai} = Concentração de biomassa na corrente “Make-up” em mg/L = **0 mg/L**. Neste trabalho foi considerado que a corrente de “Make-up” de carvão é constituída 100% de carvão ativo.

S_{cai} = Concentração de substrato na corrente de “Make-up” em mg/L = **0 mg/L**, pelo mesmo motivo de $X_{cai}=0$.

- Corrente de entrada no Tanque de Aeração:

Q' = Vazão de alimentação do tanque de aeração = $Q + Q_{cai}$ em $m^3/h = 1000,075 m^3/h$, valor que será obtido através da equação 28.

$$Q' = Q_{cai} + Q = 1000,075 \frac{m^3}{h} \quad (\text{Eq. 28})$$

$X_o' = X_o + X_{cai} = 0 \text{ mg/L}$.

$S_o' = S_o + S_{cai} = 1000 \text{ mg/L}$

- Corrente de Ar:

Q_{ar} = Vazão de ar para oxidar completamente os contaminantes em $m^3/h = 20,1 m^3/h$. Esse valor foi obtido através de cálculos levando-se em conta as considerações abaixo.

Segundo a ABNT (NBR-570 de 1990), no projeto de sistema operando com lodos ativados com aeração prolongada a concentração de oxigênio dissolvido no reator é de 1,5 mg/L. Porém devido à sensibilidade dos medidores de oxigênio dissolvido o *set-point* será de 2,0mg/L. No projeto em questão, a aeração no reator deverá garantir as condições necessárias para a degradação da matéria orgânica carbonácea, respiração endógena, síntese bacteriana e ainda para o processo de nitrificação.

Calculando a vazão mássica a partir da vazão de entrada Q' (**1000,075 m³/h**), encontra-se o valor de 2,0 kg de O₂/h. Como a proporção de oxigênio em volume no ar é em torno de 21% seria necessária uma vazão de ar de 9,52 kg de Ar/h considerando que a eficiência de transferência de oxigênio para a água fosse de 100%. Levando em consideração a eficiência dos difusores a serem utilizados, 40% para difusores de bolhas finas com membranas flexíveis à 4,5 metros de profundidade (JORDÃO & PESSOA, 1995), a vazão de Ar necessária é 23,80 kg de Ar/h. Segundo FINNEMORE & FRANZINI (2002) a densidade do ar ao nível do mar a 25°C é 1,185 kg/m³ (valor interpolado) assim obteve-se uma vazão de aproximadamente 20,1 m³/h de ar.

Xar = Concentração de biomassa na corrente de ar em mg/L = **0 mg/L**, a corrente de Ar é constituída de Ar puro.

Sar = Concentração de substrato na corrente de ar em mg/L = **0 mg/L**, a corrente de Ar é constituída de Ar puro.

- Corrente de ajuste de pH:

Qab = Vazão de Ácido/Base alimentada ao reator em m³/h = **0 m³/h**. Normalmente essa corrente é adicionada para equalizar o pH favorecendo as reações de nitrificação. Assim, os volumes adicionados são muito inferiores ao montante que será tratado, podendo-se considerar Qab insignificante no balanço de massa do reator.

Xab = Concentração de biomassa na corrente Ácido/Base em mg/L = **0 mg/L**

Sab = Concentração de substrato na corrente Ácido/Base em mg/L = **0 mg/L**

- Corrente de Nutrientes:

Qnu = Vazão de nutrientes adicionados ao reator em m³/h = **0 m³/h**. Essa adição geralmente é de fósforo para otimizar a biodegradação (100DBO₅ :5N:1P). Porém, os volumes são muito inferiores ao total. Assim essa vazão é desprezível no balanço de massa.

Xnu = Concentração de biomassa na corrente de nutrientes em mg/L = **0 mg/L**

Snu = Concentração de substrato na corrente de nutrientes em mg/L = **0 mg/L**

- Corrente de recirculação:

r = Razão de reciclo, razão entre a corrente de alimentação do reator e a corrente que retorna ao processo = **1,0**. Valor intermediário recomendado por SANT'ANA JR (2010) e JORDÃO E PESSOA (2011) para a variante de aeração prolongada.

Xu = Concentração de biomassa no fundo do sedimentador em mg/L = **10.000 mg/L**, valor arbitrado para proceder a resolução do sistema, normalmente a faixa de valores de Xu é entre 8000 e 12000 mg/L segundo Sant'ana Jr (2010).

- Corrente de saída do Tanque:

Xe = Concentração de SSV no tanque de aeração (SSVTA) em biomassa no efluente tratado. O valor dessa variável resulta da simulação.

Se = Concentração da DBO₅ efluente solúvel em mg/L = **150 mg/L**. É um meta interna na refinaria (Comunicação Pessoal, 2012).

É importante ressaltar que uma das hipóteses admitidas para esse sistema (reator de mistura completa) é a de que a concentração de substrato no volume do reator (S) é exatamente igual à concentração na saída do reator (Se), ou seja, S = **150 mg/L**.

Xca = Concentração de carvão acumulado no reator em mg/L = **4500 mg/L**, valor que garante os melhores resultados segundo o procedimento experimental de Machado (2010).

- Corrente de carvão regenerado:

Qcr = Vazão de carvão regenerado em m³/h = **0,675 m³/h**, valor obtido pela equação 28.

$$Q_{cr} = \frac{\left(\text{Concentração de reposição de carvão} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \cdot \text{taxa de regeneração do carvão} \right) \cdot Q}{\text{densidade do carvão}} \quad (\text{Eq. 29})$$

Conforme visto acima, a taxa de reposição do carvão é de 300mg/l (MACHADO, 2010), a taxa de regeneração é de 90 a 95% e a densidade 400 Kg/m³, logo Qcr = 0,675 m³/h.

Xcr = Concentração de biomassa na corrente de regeneração do carvão em mg/L = **0 mg/L**. Como o processo de regeneração do carvão normalmente envolve uma etapa com temperaturas elevadas, a biomassa será consumida pelo calor e, portanto sua concentração nessa corrente será igual a zero.

Scr = Concentração de substrato na corrente de regeneração do carvão em mg/L. Foi considerado que o valor do substrato que volta na corrente regenerada é desprezível frente à concentração de substrato afluente.

Para se obter um balanço de massa simplificado foram adotadas hipóteses simplificadoras embasadas por Von Sperling (2002), Jordão & Pessoa (1995) e Sant'ana Jr. (2010) são elas:

- Reator de fluxo contínuo e mistura completa. Isso significa que as concentrações de biomassa e substrato são consideradas homogêneas em todo o volume do reator e na corrente de saída (**X=Xe e S=Se**).

- O lodo recirculado possui maior concentração de sólidos em suspensão. Assim, a produção de biomassa deve ser compensada por um descarte em quantidade equivalente à produção, visando manter o sistema em equilíbrio.
- As reações bioquímicas ocorrem apenas no reator, apesar de haver reações no decantador secundário elas representam uma parcela muito pequena, que pode ser desprezada.
- A biomassa está presente somente no reator, desconsiderando a parcela de biomassa no sobrenadante do decantador secundário.
- Estado estacionário, embora seja muito difícil o sistema atingir a condição estacionária devido às variações na corrente de entrada. Analisando o quadro de maneira mais ampla é possível considerar, para efeitos de projeto e de planejamento, o sistema operando em estado estacionário.
- Sedimentador operando de forma ideal.
- A DQO foi a fonte de carbono disponível no meio reacional e foi considerada como a fonte de substrato biodegradável por não se dispor de dados de biodegradabilidade do substrato.
- A concentração microbiana foi considerada pelo teor de sólidos suspensos voláteis.

A seguir serão ilustrados os dados do equacionamento do modelo:

A partir do crescimento microbiano, considerando o modelo de Monod modificado (que leva em consideração a respiração endógena) e a equação 4.

$$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} - K_b \quad (Eq\ 30)$$

A taxa r_x (taxa de crescimento microbiano) pode ser escrita:

$$r_x = \frac{\mu_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} - K_b \cdot X \quad (Eq\ 31)$$

De acordo com Metcalf & Eddy (1991), os valores mais adequados à modelagem de sistemas aeróbios são: $\mu_{m\acute{x}} = 1,5 - 5,0 \text{ d}^{-1}$ e $K_s = 25 \text{ a } 100 \text{ mgDBO}_5/\text{L}$. Segundo Von Sperling (2002), os valores de K_b tipicamente se encontram na faixa de 0,06 a 0,10 $\text{mgSSV}/\text{mgSSV.d}$ e os valores de Y na faixa de 0,4 a 0,8 $\text{g SSV}/\text{gDBO}_5$ removida.

Ressalta-se que todos os dados cinéticos utilizados nesse trabalho são oriundos de tratamento de esgoto sanitário, por não se dispor de dados para efluentes de refinarias o que irá impactar na precisão dos resultados, já que o efluente de refinaria possui características diferentes, além de ser altamente variável.

Para o consumo de substrato, o equacionamento é realizado considerando o crescimento microbiano proporcional à utilização do substrato, com Y sendo o coeficiente de proporcionalidade.

$$Y = \frac{r_x}{-r_s} \quad (Eq\ 32)$$

Sendo r_s a taxa consumo do substrato, sempre negativa, dada pela equação 32.

$$r_s = -\left(\frac{\frac{\mu_m \cdot X \cdot S}{K_s + S}}{Y}\right) \quad (Eq\ 33)$$

Realizando o balanço material, uma vez definido o volume de controle (VC) abaixo:

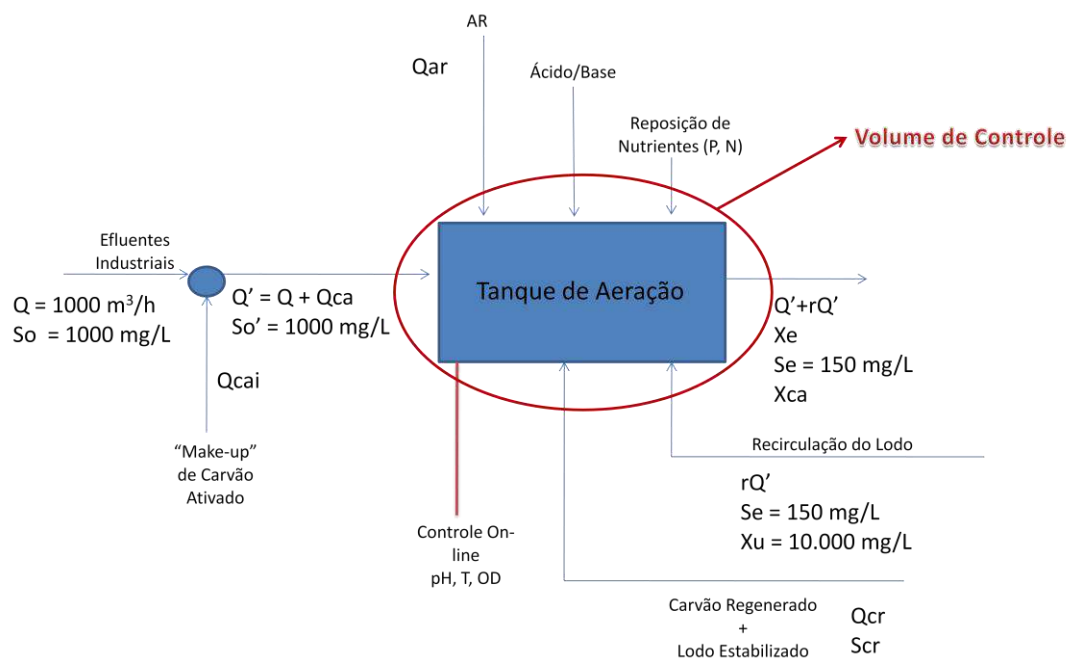


Figura 6 - Volume de controle definido para este trabalho

Sendo:

{E} = a taxa mássica de substrato que entra no VC

{S} = a taxa mássica de substrato que sai do VC

{G} = a geração de substrato no VC

{A} = ao acúmulo de substrato no VC

O balanço de massa será $\{E\} - \{S\} + \{G\} = \{A\}$

Assim para o Substrato:

$$Q' \cdot S_o' + r \cdot Q' \cdot S_e + Q_{cr} \cdot S_{cr} - (Q' + r \cdot Q') \cdot S_e + r_s \cdot V = 0 \quad (Eq\ 34)$$

No entanto Q_{cr} será sempre muito menor que Q' , ou seja, sua contribuição para o balanço de massa do substrato é desprezível ($Q_{cr}.S_{cr} \rightarrow 0$). Logo,

$$Q'.S_o + r.Q'.S_e - (Q' + r.Q').S_e + r_s.V = 0 \quad (Eq\ 35)$$

Dividindo toda a equação 35 por Q e substituindo a equação 12 teremos:

$$S_o - S_e + r_s.TRH = 0 \quad (Eq\ 36)$$

Da mesma forma para biomassa teremos a seguinte equação:

$$r.Q.X_u - (Q + r.Q).X_e + r_x.V = 0 \quad (Eq\ 37)$$

Dividindo toda a equação 37 por Q e substituindo a equação 12 teremos:

$$r.X_u - X_e - r.X_e + r_x.TRH = 0 \quad (Eq\ 38)$$

Ao final podemos calcular ainda a Produção de lodo (PL) pela equação:

$$PL = r_x.V = W.X_u \quad (Eq\ 39)$$

Onde W é a vazão da corrente de purga. Assim podemos resumir as equações, os parâmetros e as variáveis conhecidas são listados na Tabela 6, nota-se que o número de equações é igual ao número de incógnitas, ou seja, o grau de liberdade do sistema é igual a zero e o mesmo possui solução única.

As incógnitas que foram calculadas são: TRH ; X_e ; V ; r_x ; r_s ; PL ; W ; A/M . Com base neste modelo, foi desenvolvido um programa em EXCEL/VBA para o dimensionamento e a análise do processo.

Tabela 6 - Equacionamento do Tanque de Aeração

| Equações | |
|---|--|
| Balanço de Material do Substrato | $S_o + S_{cr} + S_e = (\mu_m \cdot X_e \cdot S_e \cdot TRH) / (Y \cdot (K_s + S_e))$ |
| Balanço de Material da Biomassa | $r(X_u/X_e) + TRH \cdot ((\mu_m \cdot S_e) / (K_s + S_e) - K_b) = 1 + r$ |
| Volume do Tanque | $V = TRH \cdot Q$ |
| Taxa de crescimento do Substrato | $r_s = -((\mu_m \cdot X_e \cdot S_e) / (K_s + S_e) \cdot Y)$ |
| Taxa de crescimento da Biomassa | $r_x = (\mu_m \cdot X_e \cdot S) / (K_s + S) - K_b \cdot X_e$ |
| Produção de Lodo | $PL = r_x \cdot V$ |
| Vazão de Purga do Lodo | $W = PL / X_u$ |
| Relação A/M | $A/M = S_o / (TRH \cdot X_e)$ |
| Parâmetros Cinéticos e de Projeto | |
| Faixa de Valores de μ_m (d^{-1}) | 1,5 - 5,0 |
| Faixa de Valores de K_s (mg/L) | 25-100 |
| Faixa de Valores de K_b (mg SSV/mgSSV.d) | 0,06 - 0,1 |
| Faixa de Valores de Y (gSSV/gDBO5) | 0,4-0,8 |
| Concentração Inicial de Substrato (S_o) | 1000 mg DBO/L (Condição Conhecida) |
| Concentração de Substrato na corrente de Carvão Regenerado (S_{cr}) | 0 (Admitida) |
| Concentração de Substrato no Tanque e no Efluente ($S=S_e$) | 150mg/L (Meta de Projeto) |
| Razão de Reciclo (r) | 1 (Admitida) |
| Concentração de biomassa no fundo do decantador (X_u) | 10.000 mg/L (Admitida) |

VI.2.2. Sedimentador

O efluente do tanque de aeração é submetido à sedimentação, onde o lodo ativado é separado, voltando ao tanque de aeração. O retorno do lodo é fundamental para manter uma relação alimento/micro-organismo capaz de decompor com maior eficiência a matéria orgânica.

A eficiência de todo o processo está intimamente relacionada à capacidade de sedimentação apresentada por esse equipamento, ou seja, os sedimentadores secundários exercem um papel fundamental no processo de lodos ativados. São eles que permitem a separação dos sólidos em suspensão do efluente clarificado, isso faz com que o efluente líquido possa ser descartado diretamente no corpo hídrico receptor, ou até mesmo reutilizado

internamente, e que os sólidos depositados no fundo sejam retornados ao reator com concentração mais elevada.

As configurações mais comuns para esse tipo de sedimentador são a retangular de fluxo horizontal, e a circular de alimentação central. Ambas necessitam de remoção contínua de lodo seja através de raspadores ou de sucção de fundo. Porém, como é de interesse que o lodo retorne rapidamente após ser sedimentado, os decantadores de forma circular com aspiração do lodo sedimentado têm sido mais utilizados, já que permitem uma remoção contínua de lodo de maneira mais eficaz (JORADÃO & PESSOA, 1995).

Normalmente, esse dispositivo succiona o lodo de forma contínua ao longo do raio do sedimentador através de braços raspadores, assim o material aspirado alcança uma caixa de acumulação com tamanho suficiente para que escoe até a caixa de separação do lodo recirculado e do em excesso.

No fluxograma da Figura 8 nota-se que existe apenas uma corrente de alimentação no sedimentador, justamente a corrente proveniente do tanque de aeração. Ao passar por esta operação, essa corrente será separada em duas. Uma, que será recolhida no topo da operação unitária, é a que contém o efluente tratado e que seguirá para o reúso ou descarte. A outra, conhecida como corrente de fundo, seguirá para um separador, onde grande parte retornará ao tanque de aeração e uma pequena parte será purgada, passando para o regenerador de carvão.

A seguir é detalhada a formulação do modelo do sedimentador.

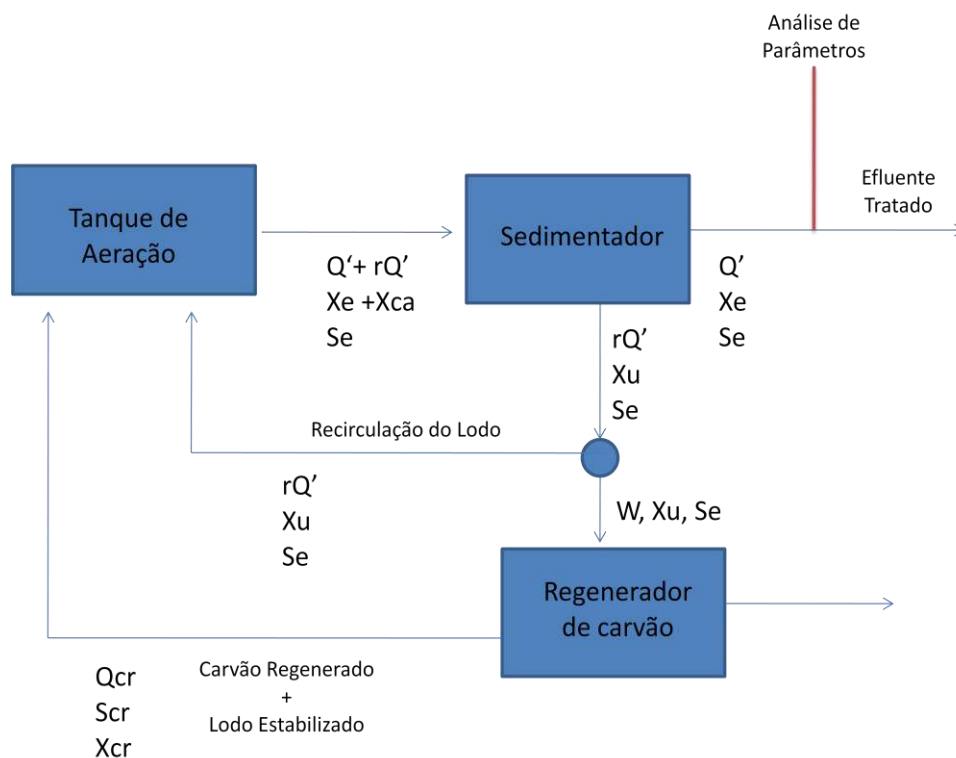


Figura 7 - Correntes do sedimentador e regenerador

Onde:

Q' = Vazão de alimentação do Tanque de Aeração = **1000,75 m³/h**

X_e = Concentração de SSV no tanque de aeração (SSVTA) em biomassa no efluente tratado

S_e = Concentração da DBO₅ efluente solúvel em mg/L = **150 mg/L**.

X_{ca} = Concentração de carvão acumulado no reator em mg/L = 4500 mg/L.

X_u = Concentração de biomassa no fundo do sedimentador em mg/L = 10.000 mg/L.

Q_{cr} = Vazão de carvão regenerado em m³/h = 0,675 m³/h

X_{cr} = Concentração de biomassa na corrente de regeneração do carvão em mg/L = **0 mg/L**.

S_{cr} = Concentração de substrato na corrente de regeneração do carvão em mg/L.

r = Razão de reciclo, razão entre a corrente de alimentação do reator e a corrente que retorna ao processo = **1,0**. Valor intermediário recomendado por SANT'ANA JR (2010) e JORDÃO E PESSOA (2011) para a variante de aeração prolongada.

W = Vazão de Purga do Lodo em m³/h.

Foram adotadas as mesmas hipóteses simplificadoras do dimensionamento do tanque de aeração.

O principal aspecto no projeto de um sedimentador é a área superficial requerida, calculada através dos seguintes parâmetros:

- Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH):

$$TAH = \left(\frac{Q'}{A} \right) \text{ (Eq 40)}$$

- Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS):

$$TAS = \left(\frac{(Q' + r \cdot Q') \cdot (X_e + X_{ca})}{A} \right) \text{ (Eq 41)}$$

No projeto do sedimentador é necessário considerar a contribuição das partículas de carvão na concentração de sólidos em suspensão que devem ser removidos do efluente. Assim a modelagem foi semelhante ao processo de lodos ativados convencional, porém com adição da parcela de carvão (X_{ca}).

Considerando que a sedimentação no decantador será do tipo zonal, pode-se descrever dois diferentes fluxos no equipamento. O Fluxo por Gravidade (F_g), causado pela sedimentação gravitacional do lodo, e o Fluxo pela retirada de fundo (F_u), ocasionado pela retirada de lodo no fundo do sedimentador, sendo o Fluxo total (F_t) a soma dos dois. (VON SPERLING, 2002).

Fluxo Total:

$$F_t = F_g + F_u \quad (Eq\ 42)$$

Fluxo por gravidade:

$$F_g = X_u \cdot v \quad (Eq\ 43)$$

Em que v é a velocidade de sedimentação da interface na concentração X_u . Na verdade v é função da própria X_e e decresce com o seu aumento. De todas as relações empíricas para estimação da velocidade a mais utilizada, segundo VON SPERLING (2002) é:

$$v = v_0 \cdot e^{-KX_u} \quad (Eq\ 44)$$

Em que v_0 é a velocidade de sedimentação da interface na concentração hipotética de $X_u=0$ e K é o coeficiente de sedimentação (m^3/kg).

A seguir a expressão do Fluxo pela retirada de fundo (F_u):

$$F_u = X_u \cdot \left(\frac{r \cdot Q'}{A} \right) \quad (Eq\ 45)$$

O Fluxo Aplicado que corresponde à carga de sólidos que o sedimentador recebe por área e o Fluxo Limite.

Fluxo Aplicado:

$$F_a = \left(\frac{Q' + r \cdot Q'}{A} \right) \cdot (X_e + X_{ca}) \quad (Eq\ 46)$$

Fluxo Limite:

$$F_l = m \cdot \left(\frac{r \cdot Q'}{A} \right)^n \quad (Eq\ 47)$$

Onde m e n são coeficientes específicos.

A Tabela 8 apresenta os parâmetros v_0 e K em função da sedimentabilidade do lodo, que deve ser determinada pelo IVL (Tabela 3).

Tabela 7 - Coeficientes v_0 , K em função da Sedimentabilidade para efluentes sanitários

| Sedimentabilidade | v_0 (m/h) | K (m ³ /kg) | m | n |
|-------------------|-------------|------------------------|-------|------|
| Ótima | 10,0 | 0,27 | 14,79 | 0,64 |
| Boa | 9,0 | 0,35 | 11,77 | 0,70 |
| Média | 8,6 | 0,50 | 8,41 | 0,72 |
| Ruim | 6,2 | 0,67 | 6,26 | 0,69 |
| Péssima | 5,6 | 0,73 | 5,37 | 0,69 |

Fonte: (VON SPERLING, 2002)

Utilizando como referência o IVL obtido no trabalho de Machado (2010), obtém-se o valor de 67 a 59 mg/L, ou seja, uma sedimentabilidade boa, conforme indicado na Tabela 3. Assim, os valores de v_0 , K, m, n serão, respectivamente, 9,0; 0,35; 11,77; 0,70.

Para que o sedimentador opere de forma satisfatória é necessário que ele atenda aos seguintes critérios:

- Sedimentador não sobrecarregado para clarificação, isto é, a TAH deve ser menor que a velocidade de sedimentação (v):

$$\frac{Q'}{A} \leq v_0 \cdot e^{-K \cdot X_u} \quad (Eq 48)$$

- Sedimentador não sobrecarregado para adensamento, ou seja, o fluxo de sólidos aplicados não pode ser maior que o limite:

$$\frac{(Q' + r \cdot Q') \cdot (X_e + X_{ca})}{A} \leq m \cdot \left(\frac{r \cdot Q'}{A}\right)^n \quad (Eq 49)$$

Assim, o sistema de equações, os parâmetros e as variáveis conhecidas encontram-se resumidas na Tabela 8. É possível notar que o número de equações é igual ao número de incógnitas (TAH; TAS; Ft; Fg; v; Fu; Fa; Fl; A), ou seja, é um sistema com grau de liberdade igual a zero e solução única.

Tabela 8 - Equacionamento do Sedimentador

| Equações | |
|---|---------------------------------------|
| Vazão de Alimentação | $Q'+rQ'$ |
| Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH) | $TAH= (Q')/A$ |
| Taxa de Aplicação de sólidos (TAS) | $TAS= (((Q'+r.Q').(Xe+Xca)/A)$ |
| Fluxo Total | $Ft=Fg+Fu$ |
| Fluxo por gravidade | $Fg= Xu.v$ |
| Velocidade de sedimentação da interface | $v=vo.e^{(-KXu)}$ |
| Fluxo pela retirada de fundo | $Fu= Xu.((r.Q')/A)$ |
| Fluxo Aplicado | $Fa= ((Q'+r.Q')/A).(Xe+Xca)$ |
| Fluxo Limite | $Fl= m. [((r.Q')/A)] ^n$ |
| Parâmetros Cinéticos e de Projeto | |
| Concentração de carvão acumulado no reator (Xca) | 4500 mg/L (Admitida) |
| Razão de reciclo (r) | 1 (Admitida) |
| Vazão de Alimentação do Aerador (Q') | 1000,75 m ³ /h (Calculada) |
| Concentração de SSV no tanque de aeração (SSVTA) em biomassa no efluente tratado em mg/L (Xe) | 5246,107692 (Calculada) |
| Concentração de biomassa no fundo do sedimentador | 10.000 mg/L |
| V ₀ | 9 |
| K | 0,35 |
| m | 11,77 |
| n | 0,7 |

VI.2.3. Regenerador de Carvão

Os equipamentos de regeneração são utilizados para reativar o carvão ativo quando o mesmo encontra-se saturado. Normalmente, a dessorção é conduzida na própria planta. Essa reativação pode ser conduzida de diversas maneiras, principalmente por via térmica, processo que pode exigir altas temperaturas, embora as condições exatas utilizadas dependam do tipo de carbono e os adsorbatos a serem removidos. O objetivo principal é remover o material adsorvido sem alterar a estrutura de carbono, minimizando as perdas de material inerentes ao processo.

A empresa SIEMENS desenvolveu um sistema de regeneração utilizando ar úmido (WAR) que vem sendo utilizado em aplicações de tratamento de esgoto e efluentes industriais para regenerar o carvão ativado do processo PACT.

Esse sistema pode ser projetado para regenerar grandes quantidades de carvão, normalmente apresentando taxas de recuperação maiores que 90%. Além disso, as outras vantagens são: operação eficiente de energia, baixo custo de operação, não emissão de partículas além do emprego de temperaturas moderadas em torno de 230°C (SIEMENS).

No projeto estudado, o regenerador irá receber a corrente proveniente do separador contendo o lodo do Sedimentador. Essa corrente contém biomassa e carvão saturado. Após passagem pelo Regenerador ela se dividirá em duas, uma contendo carvão regenerado, que seguirá para o tanque de aeração, e outra contendo as cinzas do processo para descarte. Além disso, caso não se adote a regeneração, há a necessidade de adensamento e desidratação do lodo antes do descarte.

VI.2.4. Adensamento e Desidratação do Lodo

Esta é a etapa em que acontece a redução do volume do lodo. Como o lodo contém uma quantidade muito grande de água, deve-se realizar a redução do seu volume.

O adensamento visa aumentar o teor de sólidos do lodo e, conseqüentemente, reduzir o seu volume facilitando, assim, as etapas seguintes do tratamento, tais como: digestão, desidratação e secagem

Os métodos mais comuns de adensamento são por gravidade ou por flotação. O adensamento por gravidade é similar aos sedimentadores convencionais, sendo o lodo adensado retirado do fundo do tanque. Já no adensamento por flotação, o ar é introduzido na solução através de uma câmara de alta pressão formando micro-bolhas que se dirigem para cima e arrastam consigo os flocos de lodo que são removidos na superfície.

No caso do regime de aeração prolongada o lodo segue diretamente para a etapa de desidratação, na qual é feita a remoção de umidade do lodo, com o uso de equipamentos tais como: centrífuga, filtro prensa ou belt press (JORDÃO & PESSOA, 1995). A escolha dentre eles depende das características do lodo a ser tratado, das vantagens e desvantagens de cada equipamento e do custo.

A etapa final do tratamento do lodo é a secagem, na qual é utilizado o secador térmico, em um processo de redução de umidade através de evaporação de água para a atmosfera com a aplicação de energia térmica (SIEMENS). É possível obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95%, com isso, o volume final do lodo é reduzido significativamente.

No presente trabalho, foram dispensadas as etapas de tratamento do lodo por utilizar regenerador.

VI.2.5. Controle do processo

O controle de processos permite manter as variáveis mais importantes sempre próximas a valores pré-determinados (*set points*).

Os valores dos *set points* são determinados de forma a atender melhor os requisitos de qualidade e segurança do processo com reflexos no resultado econômico. O controle de processos tem com objetivos (VON SPERLING, 2002):

- Garantir a qualidade final do efluente
- Reduzir a variabilidade final do efluente
- Reduzir os custos de operação
- Aumentar a capacidade de tratamento da estação
- Acomodar as variações sazonais na característica da alimentação
- Reduzir os custos de mão de obra para a operação.

A determinação dos modelos e ajustes de parâmetros de controle foge ao escopo deste trabalho. Porém, é importante destacar a importância do controle, ainda mais no caso de efluentes de refinaria, pois possuem características altamente variáveis. Podemos resumir as principais variáveis do sistema PACT da seguinte maneira:

Variáveis de entrada: Características da corrente de entrada (S_0' , Q')

Variáveis de controle: Características da corrente de saída (S_e , X_e)

Variáveis medidas: pH, Temperatura (T), Oxigênio Dissolvido (OD),

Variáveis manipuladas: Vazão de aeração (Q_{ari}), razão de recirculação (r), Vazão de purga (W).

Outro aspecto fundamental no controle do sistema PACT é a verificação da qualidade do efluente tratado na corrente de saída do sedimentador. Os equipamentos de medição instalados nesse local definirão se o efluente possui qualidade para ser reutilizado na própria planta ou se deve ser descartado no corpo hídrico receptor, além de verificar o atendimento dos parâmetros de qualidade exigidos por lei.

VI.3. Dimensionamento através de código implementado em EXCEL/VBA

O dimensionamento realizado levou em consideração dois diferentes cenários. No primeiro, através da utilização de valores intermediários dos parâmetros cinéticos, foram calculados as dimensões do tanque de aeração e parâmetros importantes no processo, como TRH e θ_c (idade do lodo).

Os parâmetros se referem ao tratamento de lodos ativados convencional para efluentes sanitários. Assim, fez-se necessário um segundo estudo em que, considerando que o projeto em questão se trata da aplicação do PACT para tratamento de efluentes de refinaria operando com aeração prolongada, utilizou-se a idade do lodo sugerida pelos experimentos de Machado (2010), isto é, 30 dias.

Essa idade do lodo é a suficiente para garantir a nitrificação, pois é um objetivo da refinaria que a concentração de N-NH₃ não exceda o valor de 5 mg/L. Uma idade do lodo inferior removeria apenas a matéria orgânica. Assim, para que a nitrificação ocorra é necessária uma idade do lodo maior e conseqüentemente maior consumo de oxigênio.

O código desenvolvido foi testado para um sistema de lodos ativados convencional que está exemplificado em Sant'ana Jr (2010, pg. 149). Os resultados obtidos estão muito próximos aos encontrados nessa referência. Assim, o código pode ser considerado válido. Os dados desse exemplo e uma comparação entre os resultados obtidos podem ser encontrados nas Tabela 9 e 10.

Tabela 9 - Dados do exemplo utilizado para validação do código

| Dados | |
|--|-------------|
| Vazão (m ³ /h) = Q' | 100 |
| DBO inicial (mg/L) = S ₀ ' | 400 |
| DBO final (90 % de remoção)(mg/L) = S _e | 40 |
| Razão de recirculação | 0,5 |
| X _u (mg/L) | 9000 |
| μ _m (d ⁻¹) | 0,6 |
| K _s (mg/L) | 50 |
| Y (gSSV/gDBO ₅) | 0,45 |
| K _b (d ⁻¹) | 0,05 |

Tabela 10 - Comparação dos resultados

| Resultados de Sant'ana Jr. (2010, pg. 149) | Resultados do Código Implementado em EXCEL/VBA |
|---|---|
| $X_e = 2912 \text{ mg/L}$ | $X_e = 3087,75 \text{ mg/L}$ |
| TRH = 5 horas | TRH = 4,7218 horas |
| Volume do Tanque = 502 m^3 | Volume do Tanque = 472 m^3 |
| Produção de Lodo = 317 kg SSV/d | Produção de Lodo = $315,9 \text{ kg SSV/d}$ |
| Vazão de purga = $35,2 \text{ m}^3/\text{d}$ | Vazão de purga = $35,1 \text{ m}^3/\text{d}$ |
| Idade do Lodo = 4,6 dias | Idade do Lodo = 4,615 dias |

A Tabela 11 apresenta os resultados do primeiro cenário de dimensionamento da ETDI, admitindo os valores médios dos parâmetros e condições de entrada expostos anteriormente.

Tabela 11 - Resultados do dimensionamento a partir do código Excel/VBA (Cenário I)

| Tanque de Aeração | |
|----------------------------------|--------|
| Volume (m^3) | 1017 |
| Profundidade (m) | 4,5 |
| Comprimento (m) | 15 |
| Largura(m) | 15 |
| TRH (h) | 1,02 |
| Idade do Lodo (dias) | 0,45 |
| Sedimentador | |
| Área (m^2) | 5374,2 |
| Número de Sedimentadores | 5 |
| Área Individual (m^2) | 1074,8 |
| Profundidade (m) | 4,5 |
| Diâmetro (m) | 37 |

Foi adotado mais de um sedimentador, pois, segundo a recomendação de Jordão & Pessoa (1995), o diâmetro máximo recomendável para um equipamento do tipo é de 40 metros.

O resultado desse primeiro cenário indica que, com a utilização dos parâmetros cinéticos de efluentes sanitários, o sistema resultante não seria capaz de proceder à nitrificação, pois a idade do lodo é insuficiente. Assim, não seria capaz de alcançar as metas de projeto.

Outra consideração importante se refere ao fato de serem disponíveis apenas dados de DQO. Assim, não é possível precisar a fração biodegradável do efluente além do fato do

sistema operar com aeração prolongada para garantir a oxidação dos contaminantes recalcitrantes.

O segundo cenário foi desenvolvido a partir da verificação experimental de Machado (2010) para a idade do lodo (30 dias). Segundo a referência, esse idade garante o atendimento das metas de remoção de DQO e de nitrificação da refinaria.

O único parâmetro cinético alterado neste cenário foi a taxa de crescimento específica máxima (μ_m), pois é possível esperar que o efluente de refinaria possua menor fração biodegradável quando comparado ao esgoto sanitário além de possuir compostos inibidores do crescimento microbiano. Assim, haverá uma diminuição significativa da taxa específica de crescimento microbiano.

Através do código implementado foi possível verificar que o valor de μ_m que fornece uma idade do lodo capaz de proceder nitrificação e oxidação dos compostos recalcitrantes é de 0,16 (d⁻¹).

Tabela 12 -Resultados do dimensionamento a partir do código Excel/VBA (Cenário II)

| Tanque de Aeração | |
|--|--------------|
| VOLUME (m³) | 21359 |
| Nº de Tanques de Aeração | 8 |
| Volume individual (m³) | 2670 |
| PROFUNDIDADE (m) | 4,5 |
| COMPRIMENTO (m) | 24,36 |
| LARGURA (m) | 24,36 |
| TRH (h) | 21,36 |
| Idade do Lodo (dias) | 30,36 |
| Sedimentador | |
| Área (m²) | 5065 |
| Número de Sedimentadores | 5 |
| Área Individual (m²) | 1013 |
| Profundidade (m) | 4,5 |
| Diâmetro (m) | 36 |

A alteração no parâmetro μ_m modifica todas as variáveis de resposta, inclusive o TRH, que nesse cenário possui valor (aproximadamente 21 horas) muito mais próximo do sugerido por Machado (2010) (24 horas) em comparação com o primeiro cenário (apenas uma hora).

O segundo cenário possui um requisito de área mais elevado que o primeiro. Porém uma idade do lodo elevada é necessária para garantir a nitrificação e o atendimento das metas internas. Visando uma configuração espacial que seja realista foi adotada a utilização de mais de um tanque.

VI.4. Análise de Sensibilidade

O projeto de processos é executado em ambiente de incertezas. As duas principais fontes são os modelos matemáticos e os valores dos parâmetros. Os modelos nem sempre são capazes de descrever com boa precisão os fenômenos que se desenvolvem nas operações. Os parâmetros são muitas vezes obtidos experimentalmente ou estimados a partir de dados conhecidos para condições diferentes de operação. Os parâmetros podem variar ainda de acordo com choques de carga e outras perturbações nas condições de entrada (PERLINGEIRO, 2005).

Assim, depois de concluído o dimensionamento, não é possível garantir que os resultados estejam corretos e nem que o processo irá operar de forma a alcançar as metas de projeto. Logo, é necessário avaliar o efeito dessas incertezas sobre o dimensionamento, ou seja, proceder uma análise de sensibilidade em relação aos principais parâmetros (PERLINGEIRO, 2005).

No projeto em questão, os principais parâmetros são: os cinéticos da biomassa (μ_m ; K_s ; K_b ; Y) e as condições admitidas como conhecidas (Q ; S_0 ; r ; X_u ; v_0 ; K ; m ; n). A análise de sensibilidade foi realizada apenas para o cenário II, já que é aquele que garante a nitrificação e a idade do lodo adequada.

As variáveis do processo foram avaliadas individualmente, a partir de duas perturbações tipo degrau (1% e 10%) em seu valor estimado a princípio. As variáveis de respostas utilizadas para a avaliação foram: TRH, X_e , Volume do tanque, produção de lodo, vazão de purga, idade do lodo e área do sedimentador.

A seguir estão relacionados os resultados obtidos via simulação em programa EXCEL/VBA. A partir das perturbações obtém-se: as variações percentuais de cada variável e gráficos que ilustram as principais relações de dependência entre elas.

- **Análise de Sensibilidade a μ_m :**

A primeira variável analisada foi a taxa de crescimento específica máxima (μ_m). É possível observar que uma perturbação nesse parâmetro cinético tem influência em todas as variáveis de resposta, principalmente na produção de lodo, vazão de purga e idade do lodo. Esse resultado era esperado, pois o μ_m tem relação direta com o crescimento da biomassa e consequentemente influência significativa nesses parâmetros de projeto.

As variações percentuais da idade do lodo, do TRH e do Volume do tanque com relação à μ_m apresentam sinal negativo, ou seja, são grandezas inversamente proporcionais, é importante ainda notar que para o caso da idade do lodo a variação na resposta é mais que o dobro da perturbação na entrada. Assim uma pequena incerteza no valor desse parâmetro implica uma variação significativa nas respostas.

Os principais gráficos representativos da Análise de Sensibilidade estão apresentados no Anexo III. Os gráficos de produção de lodo e vazão de purga indicam uma relação aproximadamente linear, com coeficientes de linearidade de 0,918181818 e os gráficos de TRH

e Volume do tanque com coeficiente de 0,915542758. Já o gráfico de idade do lodo apresenta coeficiente de linearidade de 0,770212766, fato que fica evidente se comparadas as variações das respostas para 1% de variação (aproximadamente 3%) e para 10% (aproximadamente 25% de variação).

- **Análise de Sensibilidade a K_s :**

A taxa de crescimento específica máxima (μ_m) influencia ainda a constante de saturação K_s . Portanto, é natural que as variáveis que apresentam maior sensibilidade à variação de K_s sejam as mesmas sensíveis a μ_m . Analisando as respostas nota-se que os sinais são inversos aos da variação de μ_m , fato que explicita a relação inversa entre esses parâmetros.

As Figuras 13, 14, 15, 16 e 17 apresentam os gráficos obtidos com essas variações. Cinco gráficos (TRH, Volume do tanque, Produção de lodo, Vazão de purga e Idade do lodo) indicam uma relação linear, com coeficientes de linearidade aproximadamente iguais a 1. Nota-se que as inclinações dos gráficos são inversas às apresentadas para o μ_m , fato já indicado através dos sinais das variações percentuais.

- **Análise de Sensibilidade a K_b :**

O coeficiente de respiração endógena K_b , apresenta influência significativa nas respostas de produção de lodo, vazão de purga e idade do lodo, assim como μ_m e K_s . Isso se deve ao fato de serem parâmetros cinéticos relacionados com o crescimento da biomassa e, conseqüentemente, tem maior influência nas variáveis que quantificam a produção de lodo.

No Anexo III os gráficos 18, 19 e 20 ilustram a evolução das respostas perante as variações de 1% e 10% no valor de entrada. Os gráficos de produção de lodo e vazão de purga apresentam relação linear, coeficientes iguais à 1 e inclinações negativas que demonstram resposta inversa em relação ao parâmetro. Já o gráfico de idade do lodo possui coeficiente de linearidade de 1,288679245 e variação percentual positiva, ou seja, diretamente proporcional.

- **Análise de Sensibilidade a Y :**

Apesar de ser também um parâmetro cinético, o coeficiente de produção celular (Y), não apresenta influência no resultado da idade do lodo. Porém, tem contribuição significativa em 4 respostas, são elas: TRH, Volume do tanque, produção de lodo e vazão de purga.

Como a produção de lodo e a vazão de purga são diretamente proporcionais e as variações percentuais obtidas são idênticas aos degraus, conclui-se que as três grandezas são diretamente proporcionais com coeficiente de linearidade igual a 1.

Para o TRH e o Volume do tanque a variação na resposta é um pouco inferior ao degrau. Porém, as respostas para as duas variações são proporcionais. Assim os gráficos 21, 22, 23 e 24 do Anexo III também se apresentam de forma linear.

- **Análise de Sensibilidade a Q:**

Além da necessidade de analisar as incertezas relacionadas aos parâmetros determinados experimentalmente, é importante conhecer a sensibilidade das respostas às condições de operação consideradas inicialmente. A estação de tratamento foi dimensionada para atender a uma vazão determinada. Porém, pode haver uma necessidade de ampliação futura da planta ou até mesmo uma diminuição das necessidades atuais da indústria.

A influência apresentada pela vazão (Q) nessas respostas é absolutamente linear e proporcional. Por exemplo, um variação de 10% na entrada gera uma variação de 10% nas 4 respostas citadas acima como pode ser visto nos gráficos 25, 26, 27 e 28. É interessante notar que a vazão não tem nenhuma influência nas demais respostas.

- **Análise de Sensibilidade a So:**

As condições de operação em uma refinaria são altamente mutáveis. Assim, variações nas cargas admitidas na estação são comuns. Este projeto foi concebido para uma carga específica de DQO (So). Porém, essa condição nem sempre poderá ser considerada representativa da realidade. Assim, avaliar a sensibilidade a essa variável de entrada é fundamental.

A carga inicial influencia em quase todas as respostas. Porém, as mais significativas são o TRH, o Volume do tanque, a Produção de lodo e a Vazão de purga. As variações percentuais indicam grandezas diretamente proporcionais e representações gráficas lineares, já que a variação percentual se modifica da mesma maneira que a perturbação, gráficos 29, 30, 31 e 32 do Anexo III.

- **Análise de Sensibilidade a r:**

A razão de reciclo (r) foi arbitrada em 1 com base na literatura específica. Assim, deve-se analisar as variações nas respostas para quantificar a importância dessa imprecisão no dimensionamento dos equipamentos. Nota-se que as variações provocadas por um degrau na razão de reciclo são percentualmente inferiores ao valor do degrau. Assim, considera-se que r tem influência significativa no TRH, no Xe, no Volume do tanque e na Área do Sedimentador.

As figuras 33, 34, 35 e 36 apresentam inclinações correspondentes aos sinais das variações e coeficientes de linearidade bem próximos ao valor unitário.

- **Análise de Sensibilidade a Xu:**

Da mesma forma em que r foi arbitrado, assim também foi para Xu, sendo 10.000 o valor intermediário da faixa recomendada. Analisando as respostas é fácil notar que as respostas com maior sensibilidade a variações de Xu, são: TRH, Xe, Volume do tanque, vazão de purga e Área do Sedimentador, sendo a última a de maior relevância.

Os sinais negativos em TRH, Volume do tanque e Vazão de purga indicam grandezas inversamente proporcionais e os coeficientes de linearidade são relativamente próximos a 1, como mostram os gráficos de 37 a 41.

- **Análise de Sensibilidade a v_0 :**

A tabela da variação de v_0 não indica nenhuma variação percentual nas respostas. Embora isso possa sugerir que esse parâmetro deva ser descartado da análise, isso não corresponde à realidade. Pois, o v_0 atua em cima do valor da área do Sedimentador pelo critério de clarificação, porém na faixa de valores escolhidas para o projeto a área pelo critério de adensamento é sempre maior, impedindo assim o v_0 de influenciar diretamente nas dimensões de projeto.

- **Análise de Sensibilidade a K:**

O coeficiente de sedimentação K tem influência apenas na resposta relacionada ao Sedimentador. Com o degrau de 1% não foi possível observar variação na Área do Sedimentador, devido ao K alterar somente a Área pelo critério de clarificação. Porém com o degrau de 10% essa área passa a ser maior que a de adensamento e o efeito pode ser observado.

O valor percentual de alteração não pode ser considerado representativo, pois, ele representa a comparação entre duas grandezas distintas: a área de clarificação para o valor admitido inicialmente (0,35) e a área de adensamento no caso da variação de 10% (0,385).

O gráfico 42 pode ser dividido em duas partes distintas, na primeira o degrau não é suficiente para que a área de clarificação ultrapasse a área por adensamento assim o gráfico é um reta paralela ao eixo y, já na segunda aparte o gráfico apresenta a tendência de proporcionalidade direta entre as grandezas.

- **Análise de Sensibilidade a m e n:**

Os coeficientes m e n exercem grande influência sobre o Fluxo Limite do Sedimentador e, conseqüentemente, sobre a sua área. Pequenas variações nesses parâmetros são capazes de gerar alterações muito relevantes na área. Para o coeficiente m, por exemplo, a variação de 10% resulta em uma variação de 27% (valor aproximado).

O sinal negativo indica que se trata de grandezas inversamente proporcionais e que a medida de variação percentual tende a diminuir com o aumento da intensidade do degrau, a evolução desse comportamento está demonstrada pelo gráfico 43.

No caso do parâmetro n, a influência se torna ainda maior. O sinal positivo indica que são grandezas diretamente proporcionais e que a variação percentual aumenta de forma muito mais significativa que o degrau. A variação percentual pode ser observada na Tabela 14 e a evolução da resposta frente aos diferentes degraus no gráfico 44.

Abaixo estão resumidas as respostas às condições de entrada estabelecidas para o Cenário II.

Tabela 13 - Condições de Entrada vs Respostas (Cenário II)

| Condições de Entrada | Valor | Respostas | Valor |
|----------------------|--------|----------------------|-------------|
| μm | 0,16 | TRH | 21,35731001 |
| Ks | 62,5 | Xe | 5074,375 |
| Kb | 0,08 | Volume do tanque | 21358,91181 |
| Y | 0,6 | Produção de lodo | 3570,26775 |
| Q | 1000 | Vazão de purga | 357,026775 |
| So | 1000 | Idade do lodo | 30,35714286 |
| r | 1 | Área do Sedimentador | 5064,996217 |
| Xu | 10.000 | | |
| v ₀ | 9 | | |
| K | 0,35 | | |
| m | 11,77 | | |
| n | 0,7 | | |

As principais variações percentuais foram resumidas em na Tabela 14 de forma a ilustrar com valores as conclusões apresentadas acima para cada uma das variáveis analisadas, as variações percentuais iguais a zero ou insignificantes foram descartadas da tabela, assim somente estão retratadas as respostas que possuem sensibilidade ao parâmetro variado em cada uma das vezes.

Tabela 14 - Análise de Sensibilidade

| μm | | | |
|---------|------------------|-------------|--------------------|
| Entrada | Respostas | Valor | Varição Percentual |
| 0,1616 | TRH | 21,13840167 | -1,024980861 |
| | Volume do tanque | 21139,98705 | -1,024980861 |
| | Produção de lodo | 3656,115772 | 2,404526167 |
| | Vazão de purga | 365,6115772 | 2,404526167 |
| | Idade do lodo | 29,35082873 | -3,314917127 |
| 0,176 | TRH | 19,35311056 | -9,384138039 |
| | Volume do tanque | 19354,56204 | -9,384138039 |
| | Produção de lodo | 4358,508682 | 22,07792208 |
| | Vazão de | 435,8508682 | 22,07792208 |

| | | | |
|----------------|------------------|--------------|---------------------------|
| | purga | | |
| | Idade do lodo | 22,60638298 | -25,53191489 |
| Ks | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Varição Percentual |
| 63,125 | TRH | 21,4223684 | 0,304618808 |
| | Volume do tanque | 21423,97507 | 0,304618808 |
| | Produção de lodo | 3544,765838 | -0,714285714 |
| | Vazão de purga | 354,4765838 | -0,714285714 |
| | Idade do lodo | 30,66546763 | 1,015658062 |
| 68,75 | TRH | 22,00850749 | 3,049061311 |
| | Volume do tanque | 22010,15813 | 3,049061311 |
| | Produção de lodo | 3315,248625 | -7,142857143 |
| | Vazão de purga | 331,5248625 | -7,142857143 |
| | Idade do lodo | 33,65384615 | 10,85972851 |
| Kb | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Varição Percentual |
| 0,0808 | Produção de lodo | 3483,561248 | -2,428571429 |
| | Vazão de purga | 348,3561248 | -2,428571429 |
| | Idade do lodo | 31,11273792 | 2,489019034 |
| 0,088 | Produção de lodo | 2703,202725 | -24,28571429 |
| | Vazão de purga | 270,3202725 | -24,28571429 |
| | Idade do lodo | 40,09433962 | 32,0754717 |
| Y | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Varição Percentual |
| 0,606 | TRH | 21,56772194 | 0,985198622 |
| | Volume do tanque | 21569,33952 | 0,985198622 |
| | Produção de lodo | 3605,970428 | 1 |
| | Vazão de purga | 360,5970428 | 1 |
| 0,6 | TRH | 23,45865771 | 9,839009212 |
| | Volume do tanque | 23460,41711 | 9,839009212 |
| | Produção de lodo | 3927,294525 | 10 |
| | Vazão de purga | 392,7294525 | 10 |
| Q | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Varição Percentual |
| 1010 | Volume do tanque | 21572,50093 | 1 |
| | Produção de lodo | 3605,970428 | 1 |
| | Vazão de purga | 360,5970428 | 1 |

| | | | |
|----------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|
| | Área do sedimentador | 5115,646179 | 1 |
| 1100 | Volume do tanque | 23494,80299 | 10 |
| | Produção de lodo | 3927,294525 | 10 |
| | Vazão de purga | 392,7294525 | 10 |
| | Área do sedimentador | 5571,495838 | 10 |
| So | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Variação Percentual |
| 1010 | TRH | 21,60484705 | 1,159027228 |
| | Volume do tanque | 21606,46742 | 1,159027228 |
| | Produção de lodo | 3612,2709 | 1,176470588 |
| | Vazão de purga | 361,22709 | 1,176470588 |
| 1100 | TRH | 23,82884544 | 11,57231613 |
| | Volume do tanque | 23830,63261 | 11,57231613 |
| | Produção de lodo | 3990,29925 | 11,76470588 |
| | Vazão de purga | 399,029925 | 11,76470588 |
| r | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Variação Percentual |
| 1,01 | TRH | 21,2546652 | -0,480607391 |
| | Xe | 5098,880597 | 0,482928381 |
| | Volume do tanque | 21256,2593 | -0,480607391 |
| | Área do sedimentador | 5074,773289 | 0,193032176 |
| 1,1 | TRH | 20,41372351 | -4,418096199 |
| | Xe | 5308,928571 | 4,6223145 |
| | Volume do tanque | 20415,25454 | -4,418096199 |
| | Área do sedimentador | 5172,0691 | 2,113977555 |
| Xu | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Variação Percentual |
| 10100 | TRH | 21,1489206 | -0,975728747 |
| | Xe | 5124,375 | 0,985343023 |
| | Volume do tanque | 21150,50677 | -0,975728747 |
| | Vazão de purga | 353,4918564 | -0,99009901 |
| | Área do sedimentador | 5153,703959 | 1,751388122 |
| 11000 | TRH | 19,44164144 | -8,969615428 |
| | Xe | 5574,375 | 9,853430225 |
| | Volume do tanque | 19443,09956 | -8,969615428 |
| | Vazão de purga | 324,5697955 | -9,090909091 |
| | Área do sedimentador | 6001,660006 | 18,49288232 |
| K | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Variação Percentual |

| | | | |
|----------------|----------------------|--------------|---------------------------|
| 0,3535 | Área do sedimentador | 5064,996217 | 0 |
| 0,385 | Área do sedimentador | 5221,843079 | 3,096682713 |
| m | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Varição Percentual |
| 11,8877 | Área do sedimentador | 4899,757045 | -3,262375027 |
| 12,947 | Área do sedimentador | 3686,408919 | -27,21793342 |
| n | | | |
| Entrada | Respostas | Valor | Varição Percentual |
| 0,707 | Área do sedimentador | 5265,156633 | 3,951837433 |
| 0,77 | Área do sedimentador | 8298,628774 | 63,84274377 |

VII. Conclusão

Os principais objetivos deste Trabalho foram alcançados, quais sejam:

(a) a modelagem do sistema PACT® (POWDERED ACTIVATED CARBON TREATMENT), sob o regime de aeração prolongada, para o tratamento de efluentes industriais de refinaria de petróleo;

(b) implementação do modelo sob a forma de um programa na linguagem Excel/ VBA,

(c) utilização do programa para o dimensionamento do processo e subsequente análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais relevantes do processo.

O programa desenvolvido assumiu uma forma bastante simples de se utilizar, permitindo avaliar diversos cenários e apresentar os resultados da análise de sensibilidade sob a forma de gráficos e tabelas. Permitiu, ainda, mensurar a influência da adição das partículas de carvão ativado em pó ao tanque de aeração do processo de lodos ativados.

A precisão dos resultados obtidos foi prejudicada por dois motivos principais:

(a) os parâmetros utilizados, disponíveis na literatura, são referentes à utilização do processo de lodos ativados;

(b) a maior parte dos dados disponíveis para caracterização dos efluentes é proveniente de estudos com efluentes sanitários e não especificamente de refinaria.

Novos trabalhos e pesquisas com essa tecnologia precisam ser realizados para que seja possível trabalhar com parâmetros mais realistas e eliminar as incertezas do modelo, principalmente avaliar mais a fundo a cinética do processo de crescimento da biomassa, a interação da biomassa com as partículas de carvão e realizar uma melhor caracterização dos efluentes de refinaria gerando assim uma base de dados mais confiáveis para que pudesse ser alimentado no programa e assim obter-se resultados mais confiáveis

VIII. Referências Bibliográficas

- CAMMAROTA, M. C.; Notas de Aula, EQB-365 –Biotecnologia Ambiental; EQ/UFRJ; 2010/1.
- CAMPOS, J. C.; “Processos combinados aplicados ao tratamento de água de produção de petróleo”, Tese D. Sc., Programa de Engenharia Química – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,2000.
- CIOLA, R.; Fundamentos da catálise; São Paulo; Ed. Moderna, 1981.
- CLAUDINO, 2000. CLAUDINO, A.; MINOZZO, A. P.; Projeto de uma Indústria de Carvão Ativado. Trabalho Referente à Disciplina de Projetos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, p. 6-7, Toledo, 2000.
- CONSUMO MÉDIO DE ÁGUA. Disponível em: <http://www.fernandosantiago.com.br/>, acessado em março de 2012.
- COSTA, C.; MÁRQUEZ, M.C.; Kinetics of the PACT Process; Salamanca, Spain; 1997.
- COSTA, F. C.; RODRIGUES, F. A. M.; FONTOURA, G. A. T.; CAMPO, J. C.; SANT’ANNA JR, G. L.; DEZOTTI, M.; Tratamento do Efluente de uma Indústria Química pelo Processo de Lodos Ativados Convencional Combinado com Carvão Ativado; Artigo Técnico; 2003
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.; Métodos e Técnicas de Tratamento de Água; Rima; 2ª Edição; Volume 1; São Carlos, SP; 2005.
- ECKENFELDER, W. W. J.; Industrial Water Pollution Control, 3ª Ed., The McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 1999.
- FINNEMORE, E. J. e FRANZINI, J. B., “Fluid Mechanics with Engineering Applications”, 10ª Ed., McGraw-Hill; 2002.
- FLORIDO, P. L.; Tratamento de Efluente de Refinaria pelo Processo Combinado de Adsorção em Carvão Ativado e Biorreator com Membranas; Tese de Doutorado COPPE/UFRJ; Rio de Janeiro;2011.
- FURLAN, L. T. GONÇALVES, R. A.; SANTA’ANNA, L. M. M.; QUEIROZ, M. S.; Redução de amônia do efluente industrial da refinaria de Paulínia – REPLAN - por processo Microbiológico; ABES; 1997.
- GREGG, S. J.; SING, K. S. W.; Adsorption, Surface Area and Porosity.Academic Press 2, p. 40-48, London, 1982.
- HISTÓRIA DO REFINO DO PETRÓLEO. Disponível em: <http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/refino.html>, acessado em abril de 2012.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA C. A.; Tratamento de Esgotos Domésticos. 3ª ed., Rio de Janeiro; ABES; 1995.

KARGI, F.; OZMICH, S.; Biosorption performance of powdered activated sludge for removal of different dyestuffs; *Enzyme Microb. Technol.* 35 (2004) 267–271.

Landfill Leachate Treatment Using the PACT® System; 2006 Siemens Water Technologies Corp. Disponível em <http://www.siemens.com/water>, acessado em abril de 2012.

LAS CASAS, A.; Tratamento de Efluentes Industriais Utilizando Radiação Ionizante de Acelerador industrial de elétrons e por adsorção com carvão ativado – Estudo Comparativo; Tese de Mestrado; São Paulo; 2004.

LEGISLAÇÃO AMBIENTAL. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br>, acessado em maio de 2012.

MACHADO, C. R. A.; “Avaliação de Processo de Lodos Ativados combinado com Carvão Ativado em Pó no Tratamento de Efluente de Refinaria de Petróleo”; Dissertação de Mestrado; UFRJ; 2010.

MARIANO, J. B.; Impactos Ambientais do Refino de Petróleo, Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, 2001.

MARTIN, M. J.; SERRA, E.; ROS, A.; BALAGUER, M.D.; RIGOLA, M.; Carbonaceous adsorbents from sewage sludge and their application in a combined activated sludge-powdered activated carbon (AS-PAC) treatment; 2004.

MASSCHEKEIN, W.; Unit processes in drinking water treatment; Dekker; 1992

MATTOSO, S.Q., DSc.; ÁGUA: Necessidade humana, agrícola e industrial. Clima. Geologia. Há perspectiva de um dilúvio moderno?; Disponível em: <http://www.cepabrasilba.org.br/?p=2057>, acessado em Abril de 2012.

MEIDL, J. A.; SIEMENS Technical Report nº 77 – An Overview of PACT Wastewater Treatment for the Petroleum and Petrochemical Industries, 1992.

MEIDL, J. A.; SIEMENS Technical Report nº 97 – Use of the PACT System to Treat Industrial Wastewater for Direct Discharge or Reuse, 1999.

MEIDL, J. A.; SIEMENS Technical Report nº 100 – The Challenges of Treating a Complex Pharmaceutical Wastewater; 2003.

METCALF e EDDY; Wastewater Engineering: treatment and Reuse, 4ª. Ed, Tchobanoglous, G., Burton, F L., Stensel, D. Metcalf e Eddy, Inc., Mcgraw Hill, 1819 p., 2003.

NORIT DIGITAL LIBRARY, Disponível em: <http://www.norit.com/>, acessado em Maio de 2012.

ORIENTAÇÃO PARA CONSERVAÇÃO E REÚSO DE ÁGUA - FIESP. Disponível em: <http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/reuso.pdf>, acessado em março de 2012.

PACT® and WAR Systems: Cleaner Treated Effluents, Lower Operating Costs, 2010 Siemens Water Technologies Corp. Disponível em <http://www.siemens.com/water>, acessado em abril de 2012.

PERLINGEIRO, C. A. G.; Engenharia de processos, 1º Ed.; Blucher; 2005.

DADOS DA EXPLORAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO PETRÓLEO BRASILEIRO, Disponível em <http://www.petrobras.com.br>, acessado em Abril de 2012.

POMBO, F. R.; “Gestão da demanda de água na indústria de refino de petróleo: desafios e oportunidades de racionalização”; Tese de Doutorado; COPPE, UFRJ; 2011.

PROPIEDADES DO CARVÃO ATIVADO. Disponível em: <http://www.norit-ac.com/english/>, acessado em Abril de 2012.

REPRESENTAÇÃO DA PARTÍCULA DE CARVÃO ATIVADO. Disponível em: <http://www.alphacarbo.com.br/origens.php>, acessado em abril de 2012.

REVISTA DAS ÁGUAS, Ano 2, Número 6, Junho 2008; Disponível em: <http://revistadasaguas.pgr.mpf.gov.br/edicoes-da-revista/edicao-06/artigos/a-agua-e-sua-distribuicao-espacial>, acessado em Março de 2012.

SANTIAGO, F. (2011); Disponível em: <http://www.fernandosantiago.com.br/aguaimp.htm>, acessado em Abril de 2012.

SANT’ANNA JR, G. L.; Tratamento biológico de efluentes: Fundamentos e Aplicações, Interciência; 2010.

SCARE, R. F.; ZYLBERSTAJN, D.; “Escassez de Água e Mudança Institucional: Análise da Regulação dos Recursos Hídricos nos Estados Brasileiros”, 2007; Disponível em: <http://www.anpad.org.br/rac-e>, acessado em Março de 2012.

SHER, MI.; ARBUCKLE, W. B.; SHEN, Z.; Oxygen uptake rate inhibition with PACT sludge; 1999.

SNOEYINK, V., (1990). “Adsorption of organic compounds”. In: Water Quality and Treatment: A handbook of communy Water Supplies. Mc Graw Hill, Nova York, EUA, 781-867.

SOUZA, B. M.; “Avaliação de processos oxidativos avançados acoplados com carvão ativado granulado com biofilme para reúso de efluentes de refinaria de petróleo”; COPPE, UFRJ; Rio de Janeiro; 2010.

VANTAGENS E CARACTERÍSTICAS DO PACT. Disponível em: <http://sourcing.indiamart.com/engineering/plants-machinery/water-treatment-plant/powdered-activated-carbon-treatment-pact/>, acessado em abril de 2012.

VENSKIS, Z.; CARDILLO, L.; Tecnologia de Tratamento de Chorume de Aterro Sanitário Utilizando-se Lodo Ativado de Forma não Convencional e Adsorção em Carvão Ativado; 2004.

VON SPERLING, M.; Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, Vol.4, Lodos Ativados, 2ª Ed, 2002; UFMG.

IX. Anexos

Anexo I - Limites de Lançamento de DQO para Diferentes Indústrias

| INDÚSTRIAS | DQO |
|---|--------------------------|
| Indústrias químicas, petroquímicas e refinarias de petróleo | < 250 mg/L ou 5,0 kg/dia |
| Fabricação de produtos farmacêuticos e veterinários, exclusive unidades de fabricação de antibióticos por processo fermentativo | < 150 mg/L ou 3,0 kg/dia |
| Fabricação de antibióticos por processo fermentativo | < 300 mg/L ou 6,0 kg/dia |
| Fabricação de bebidas – cervejas, refrigerantes, vinhos, aguardentes, exclusive destilarias de Álcool | < 150 mg/L ou 3,0 kg/dia |
| Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas, impermeabilizantes, secantes e resinas/massas plásticas | < 300 mg/L ou 6,0 kg/dia |
| Curtume e processamento de couros e peles | < 400 mg/L ou 8,0 kg/dia |
| Operações unitárias de tratamento de superfícies efetuadas em indústrias dos gêneros metalúrgico, siderúrgico, mecânico, material de transporte, material elétrico, eletrônico e de comunicações, editorial e gráfico, material plástico, borracha, aparelhos, instrumentos e materiais fonográficos, fotográficos e óticos | < 200 mg/L ou 4,0 kg/dia |
| Indústrias alimentícias, exclusive pescado | < 400 mg/L ou 8,0 kg/dia |
| Indústrias de pescado | < 500 mg/L ou 10 kg/dia |
| Fabricação de cigarros, charutos e preparação de fumo | < 450 mg/L ou 9,0 kg/dia |
| Indústria têxtil | < 200 mg/L ou 4,0 kg/dia |

| | |
|--|--------------------------|
| Indústrias siderúrgicas e metalúrgicas | |
| Coqueria, carboquímica e alto forno | < 200 mg/L |
| Aciaria e laminação | < 150 mg/L |
| Demais unidades, exceto setor de tratamento de Superfícies | < 100 mg/L |
| Papel e celulose | < 200 mg/L ou 4,0 kg/dia |
| Estações terceirizadas de tratamento de efluentes líquidos | < 250 mg/L ou 5,0 kg/dia |
| Percolado de aterro industrial | < 200 mg/L |

Fonte: (<http://www.inea.rj.gov.br>)

Anexo II – Concentrações Máximas permitidas para diversas substâncias (NT-202.R10 - INEA)

| SUBSTÂNCIA | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA |
|------------------|---------------------|
| Alumínio total | 3,0 mg Al/L |
| Arsênio total | 0,1 mg As/L |
| Bário total | 5,0 mg Ba/L |
| Boro total | 5,0 mg B/L |
| Cádmio total | 0,1 mg Cd/L |
| Chumbo total | 0,5 mg Pb/L |
| Cobalto total | 1,0 mg Co/L |
| Cobre total | 0,5 mg Cu/L |
| Cromo total | 0,5 mg Cr/L |
| Estanho total | 4,0 mg Sn/L |
| Ferro solúvel | 15,0 mg Fe/L |
| Manganês solúvel | 1,0 mg Mn/L |
| Mercurio total | 0,01 mg Hg/L |
| Níquel total | 1,0 mg Ni/L |
| Prata total | 0,1 mg Ag/L |
| Selênio total | 0,05 mg Se/L |
| Vanádio total | 4,0 mg V/L |
| Zinco total | 1,0 mg Zn/L |
| Amônia | 5,0 mg N/L |
| Cloro ativo | 5,0 mg Cl/L |

| | |
|--|---|
| Cianetos | 0,2 mg CN/L |
| Índice de fenóis | 0,2 mg C ₆ H ₅ OH/L |
| Fluoretos | 10,0 mg F/L |
| Sulfetos | 1,0 mg S/L |
| Sulfitos | 1,0 mg SO ₃ /L |
| Pesticidas organofosforados e carbamatos | 0,1 mg de composto/L |
| Pesticidas organofosforados e carbamatos totais (somatório dos pesticidas analisados individualmente) | 1,0 mg/L |
| Hidrocarbonetos alifáticos halogenados voláteis, tais como: 1,1,1-tricloroetano; diclorometano; tricloroetileno e tetracloroetileno. | 0,1 mg por composto /L |
| Hidrocarbonetos alifáticos halogenados voláteis totais | 1,0 mg Cl/L |
| Hidrocarbonetos halogenados não listados acima tais como: pesticidas e ftalo-ésteres | 0,05 mg por composto /L |
| Hidrocarbonetos halogenados totais, excluindo os hidrocarbonetos alifáticos halogenados voláteis | 0,5 mg Cl/L |
| Sulfeto de carbono | 1,0 mg/L |
| Substâncias tensoativas que reagem ao azul de metileno | 2,0 mg/L |
| Outras substâncias | Limites para cada caso específico a serem fixados pela CECA por indicação da FEEMA. |

Fonte: (<http://www.inea.rj.gov.br>)

Anexo III - Principais Gráficos da Análise de Sensibilidade

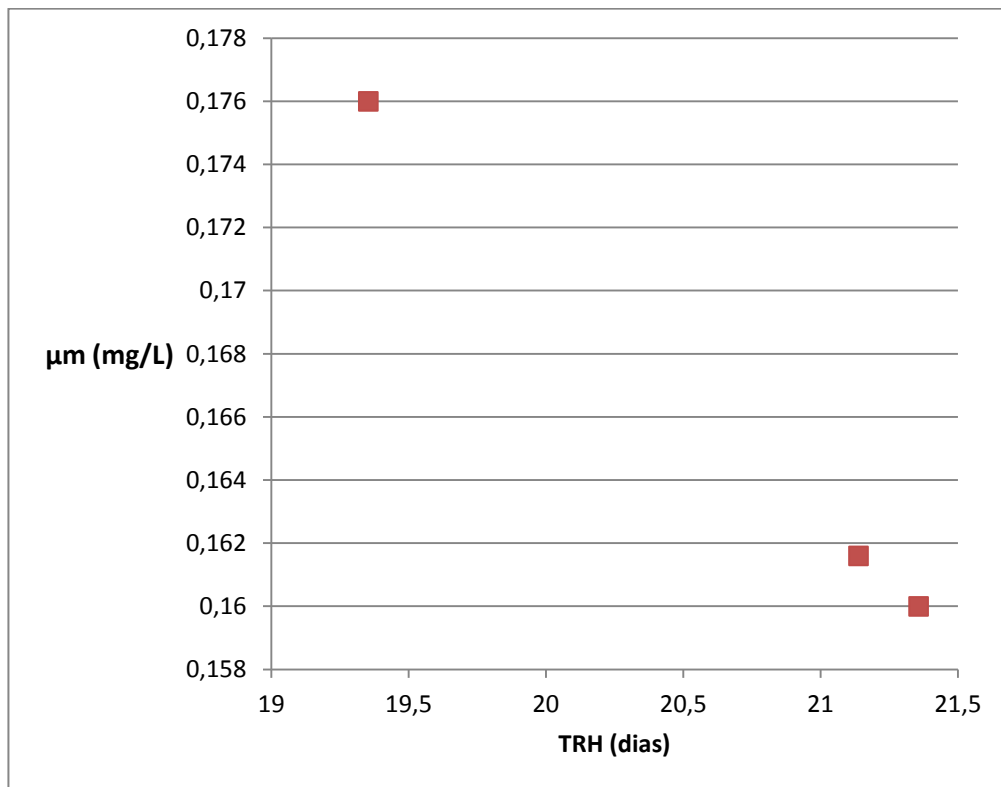


Figura 8 - Sensibilidade de TRH em relação a μm

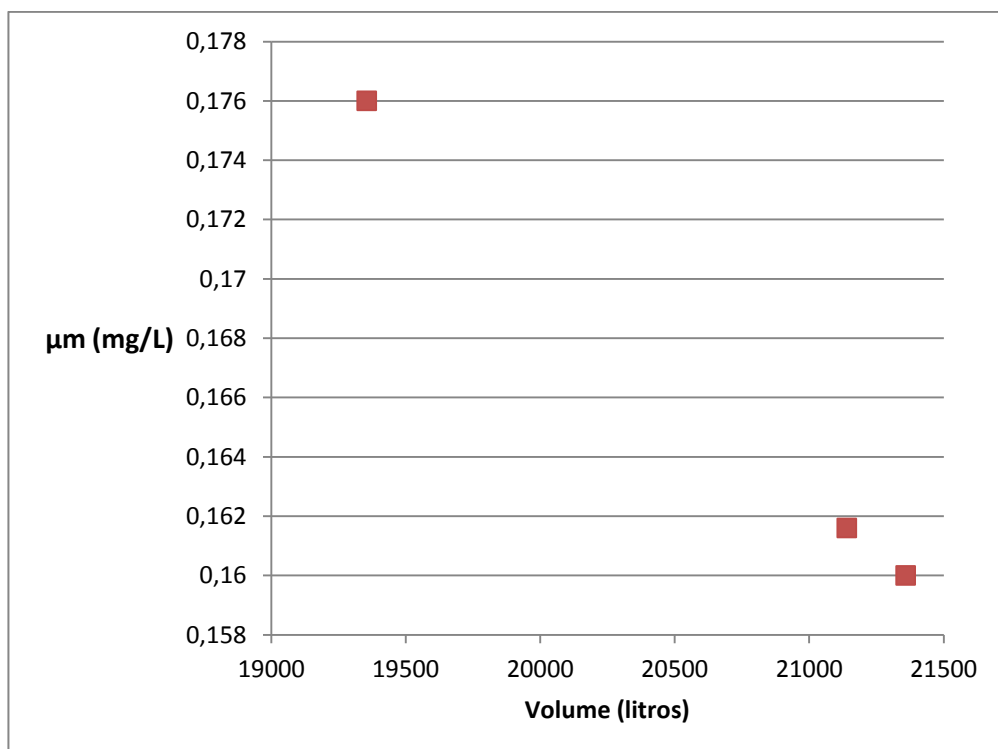


Figura 9 - Sensibilidade do Volume em relação a μm

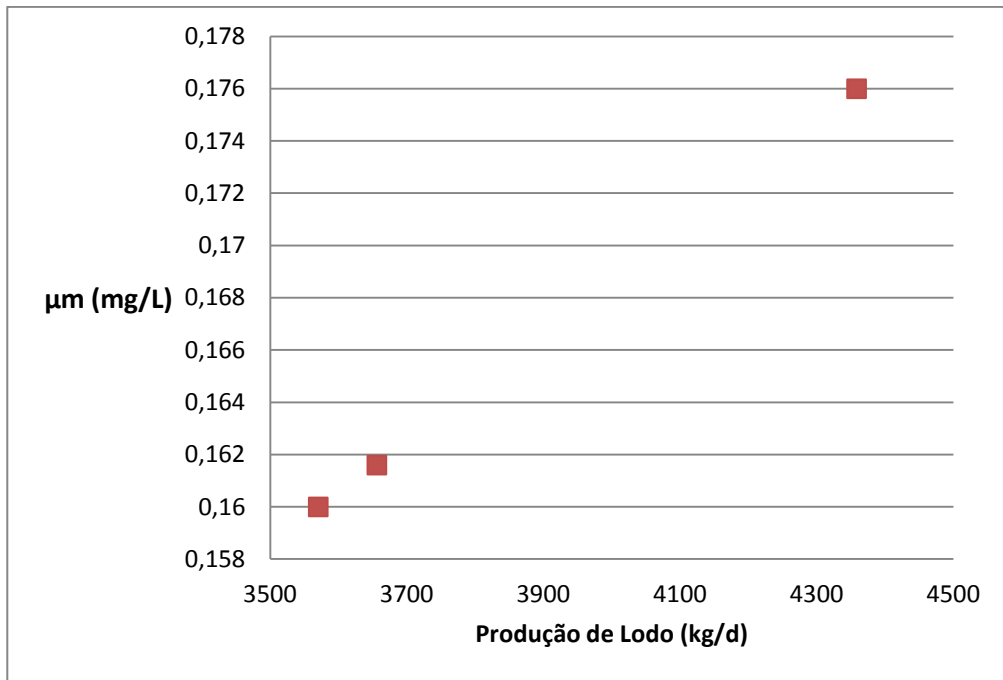


Figura 10- Sensibilidade da Produção de lodo em relação a μm

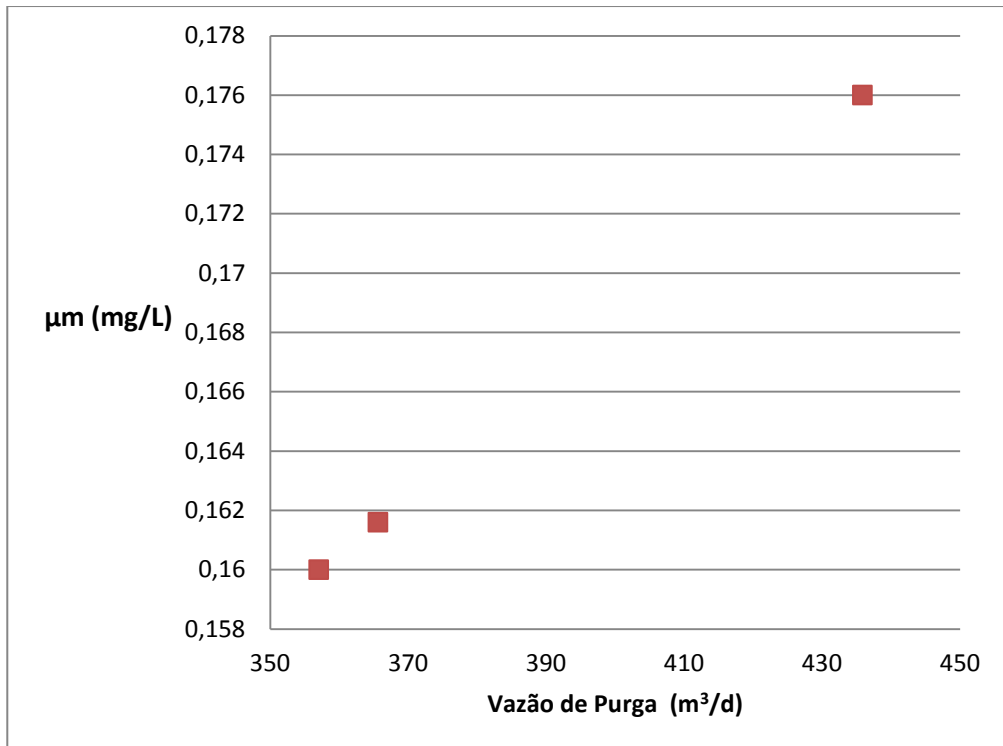


Figura 11 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a μm

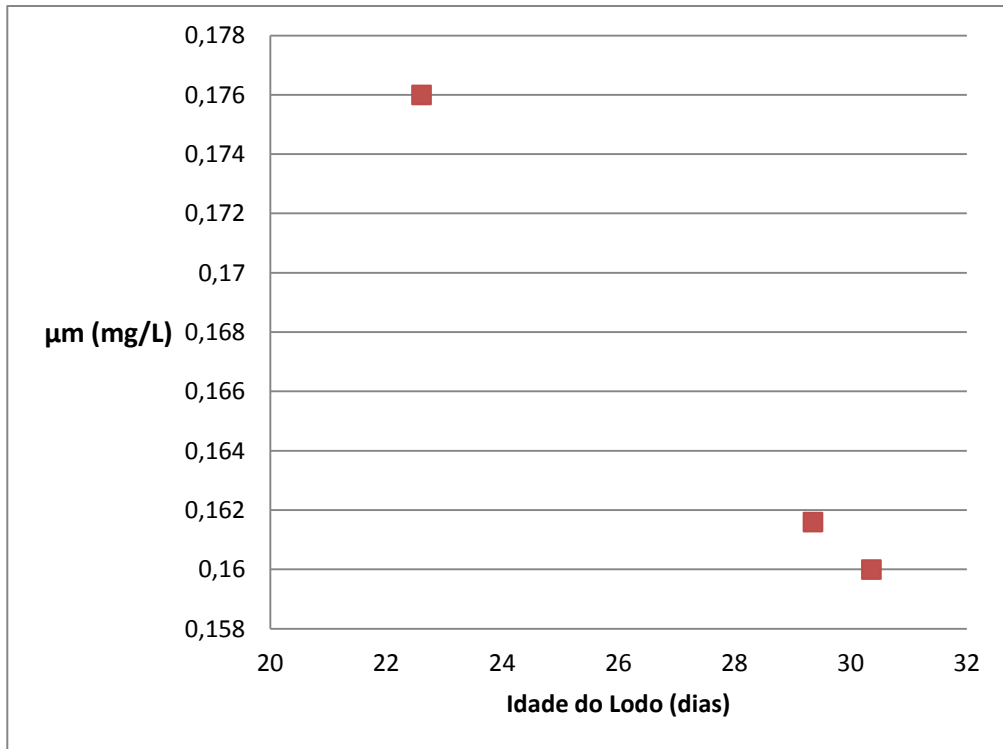


Figura 12 - Sensibilidade da Idade do lodo em relação a μm

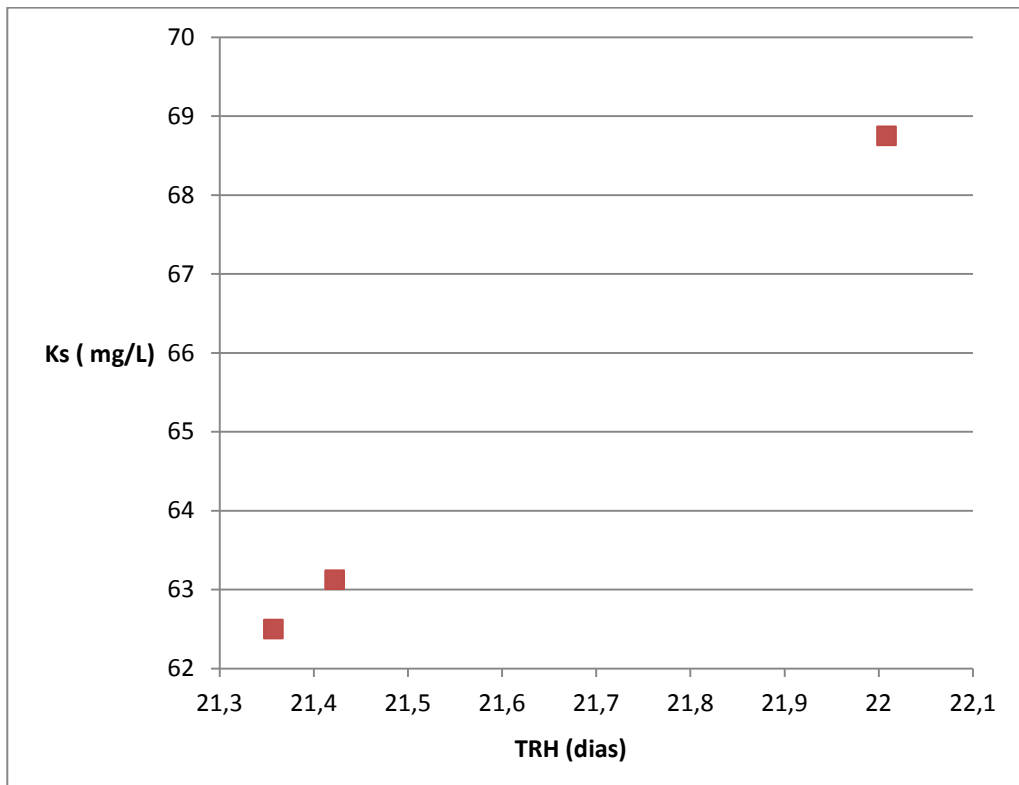


Figura 13 - Sensibilidade do TRH em relação a K_s

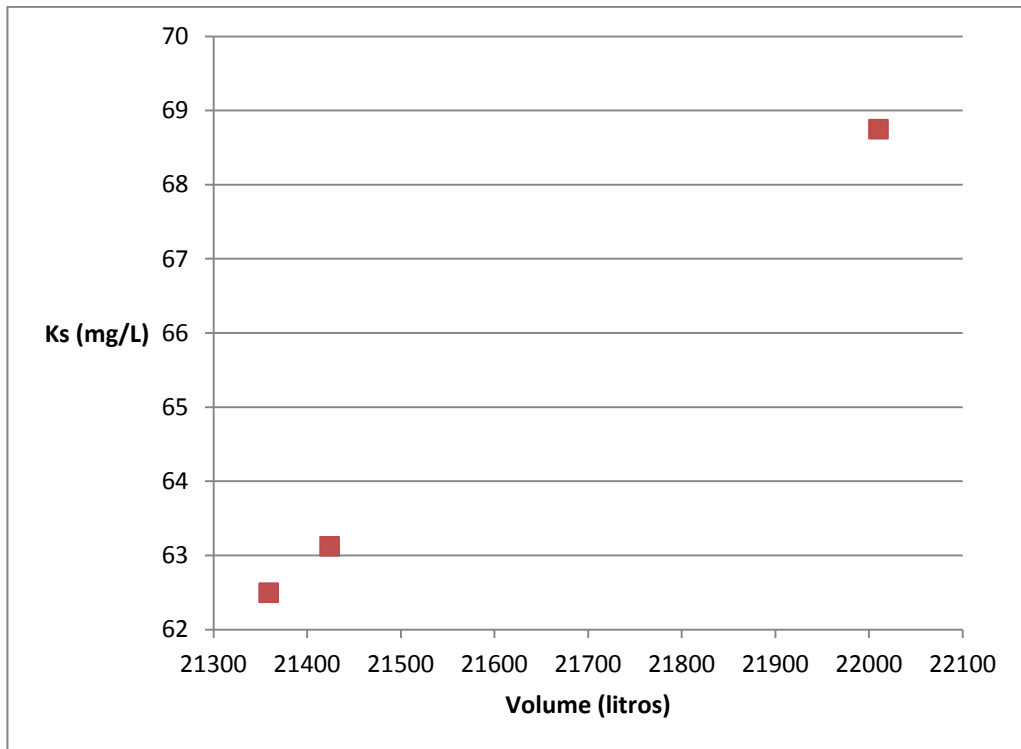


Figura 14 - Sensibilidade do Volume em relação a Ks

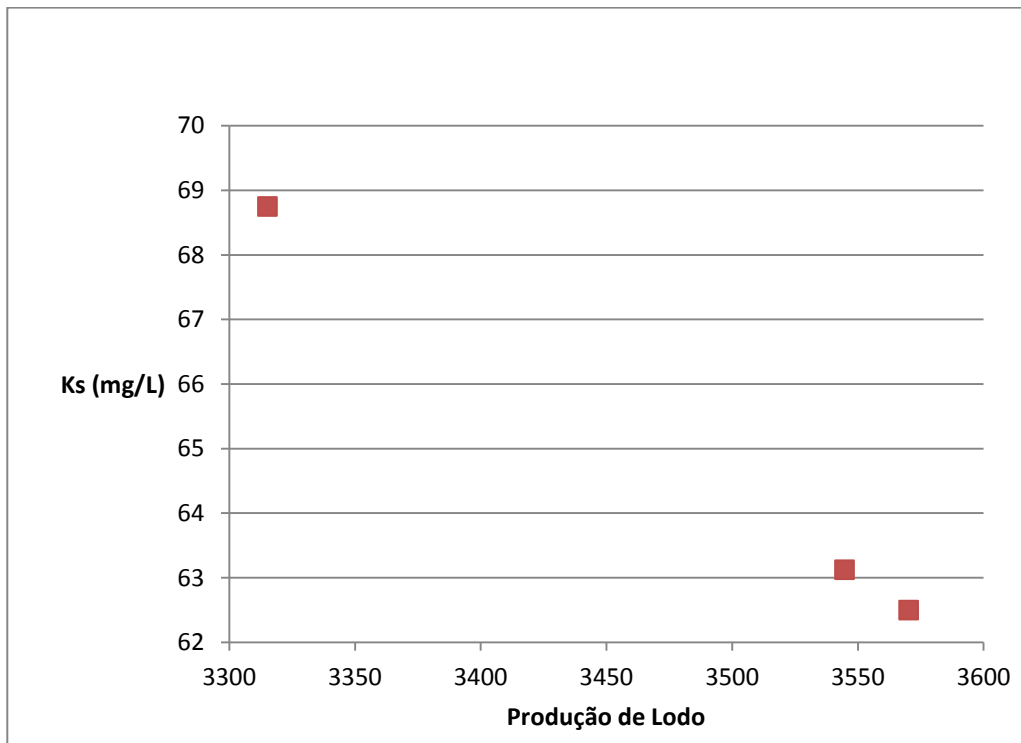


Figura 15- Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a Ks

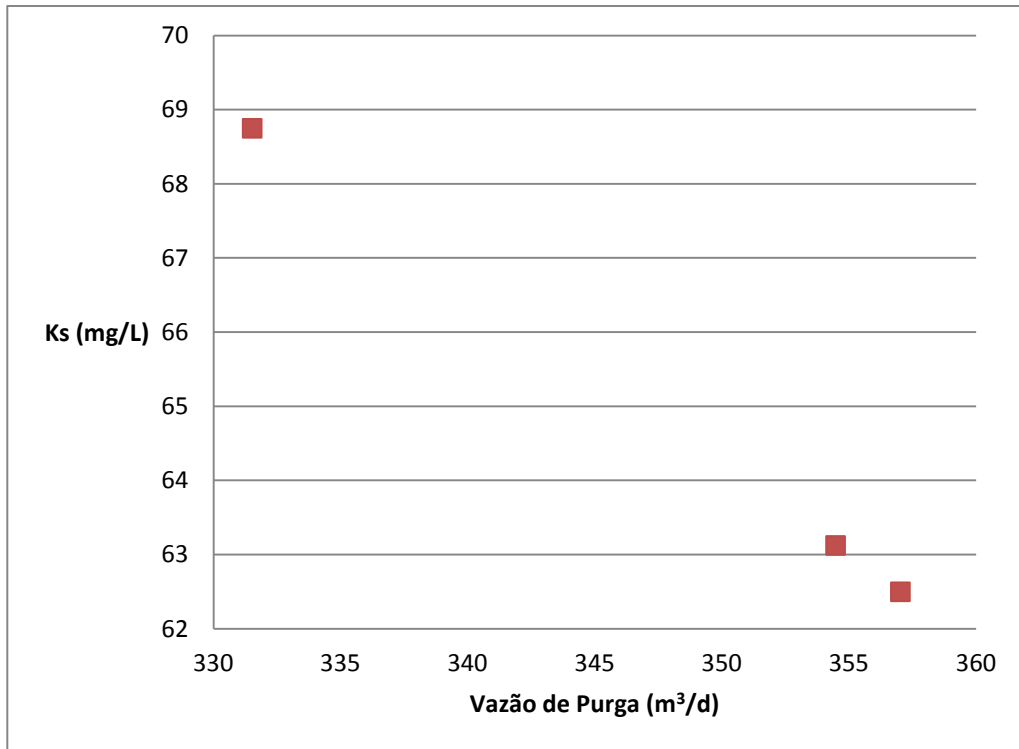


Figura 16 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a Ks

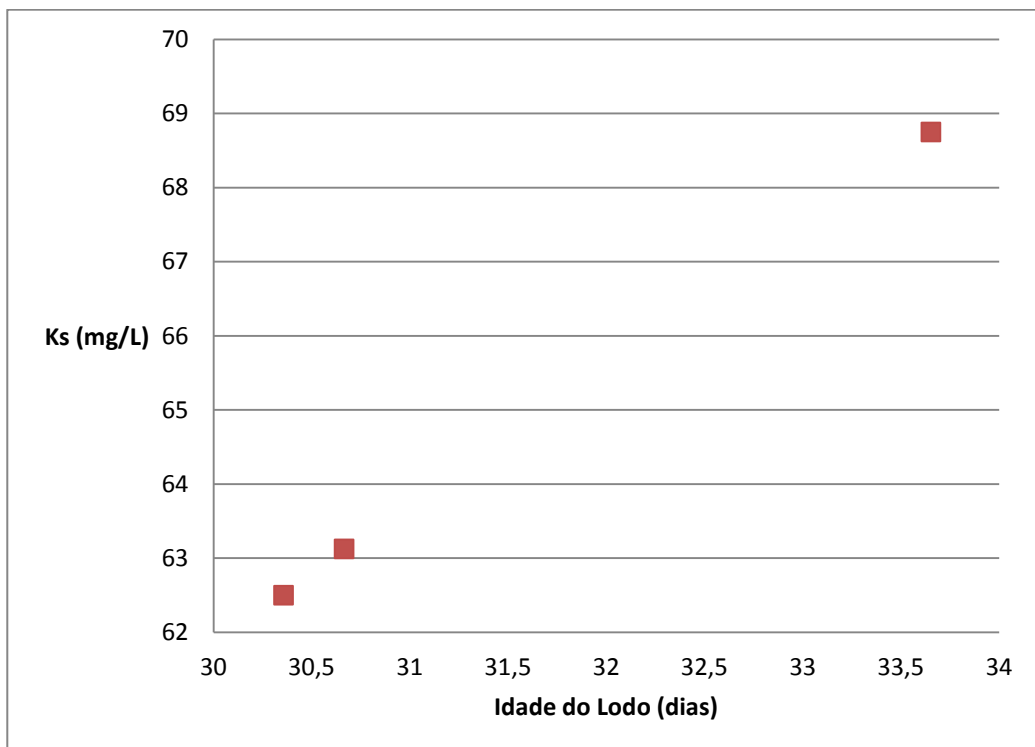


Figura 17 - Sensibilidade da Idade do Lodo em relação a Ks

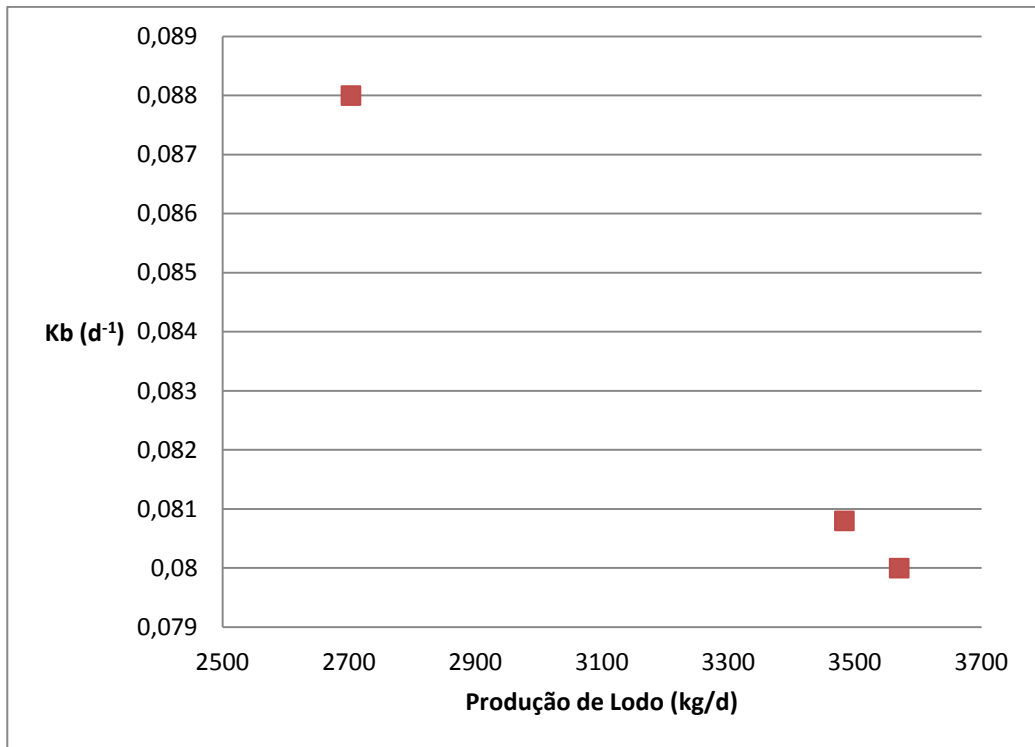


Figura 18 - Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a K_b

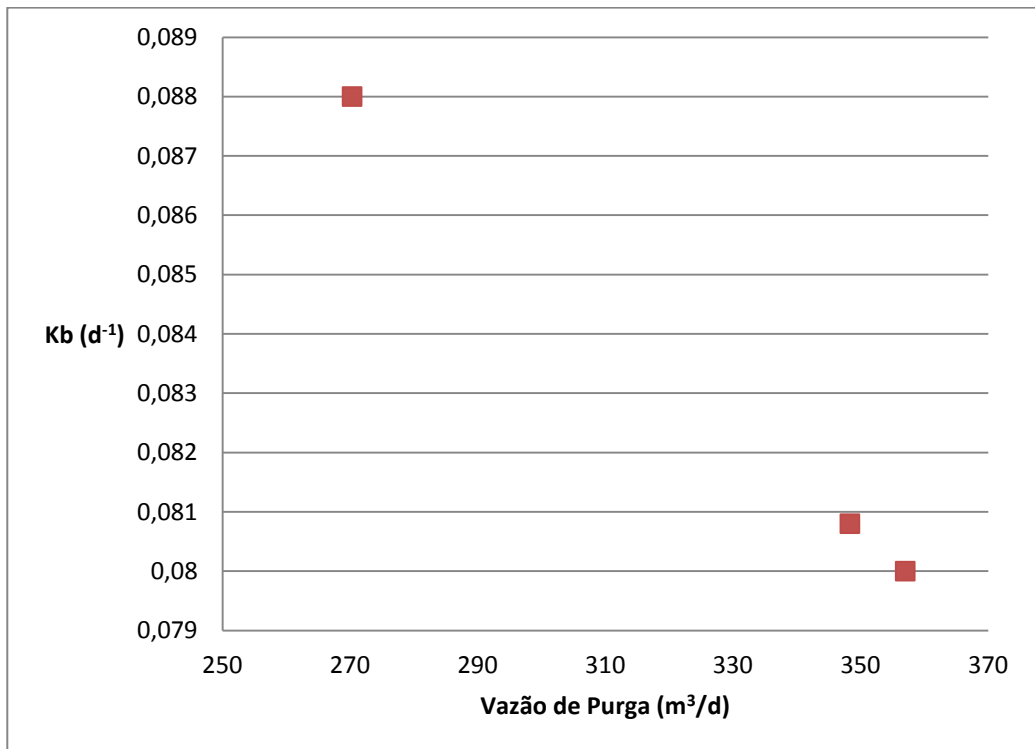


Figura 19 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a K_b

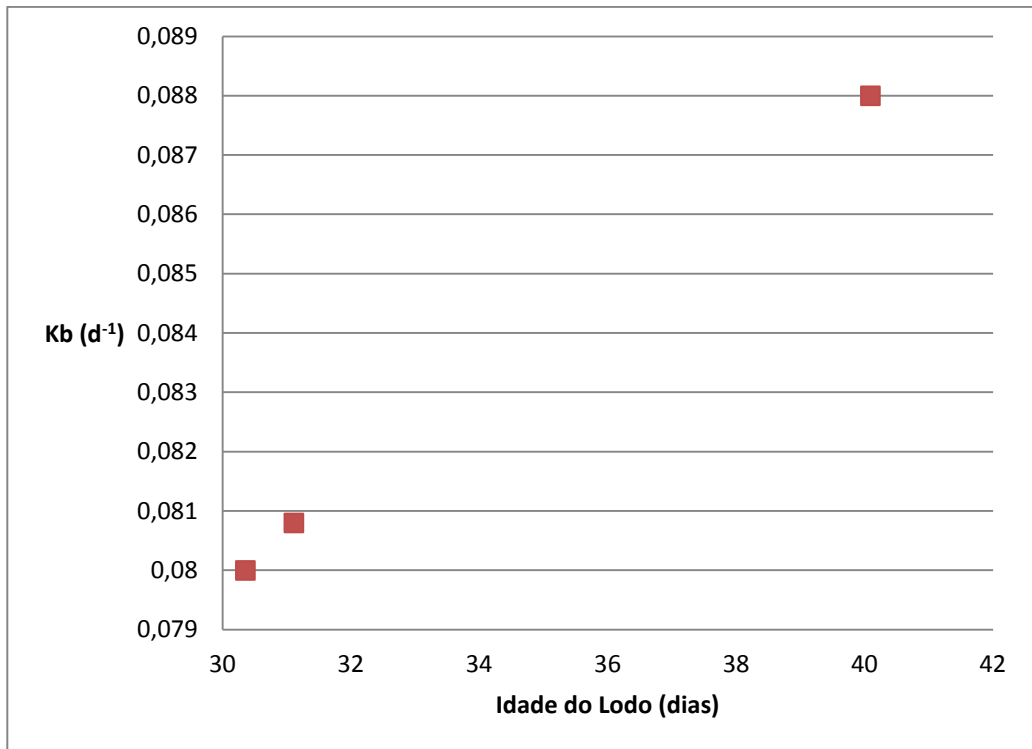


Figura 20 - Sensibilidade da Idade do Lodo em relação a K_b

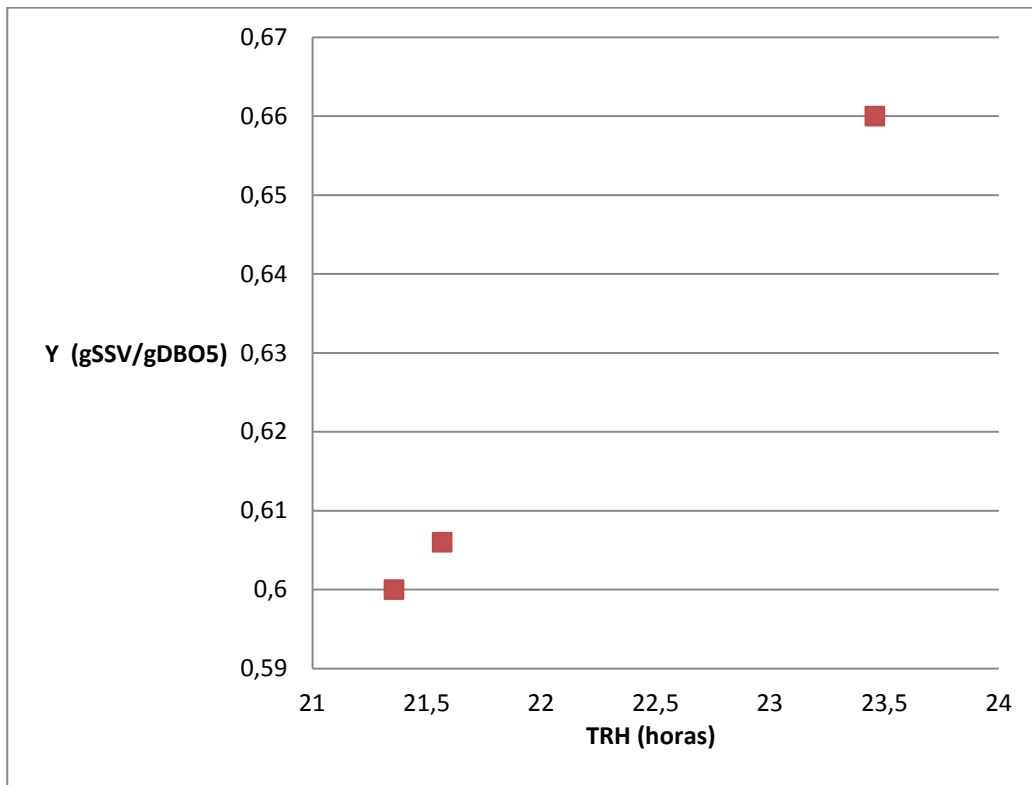


Figura 21 - Sensibilidade do TRH em relação a Y

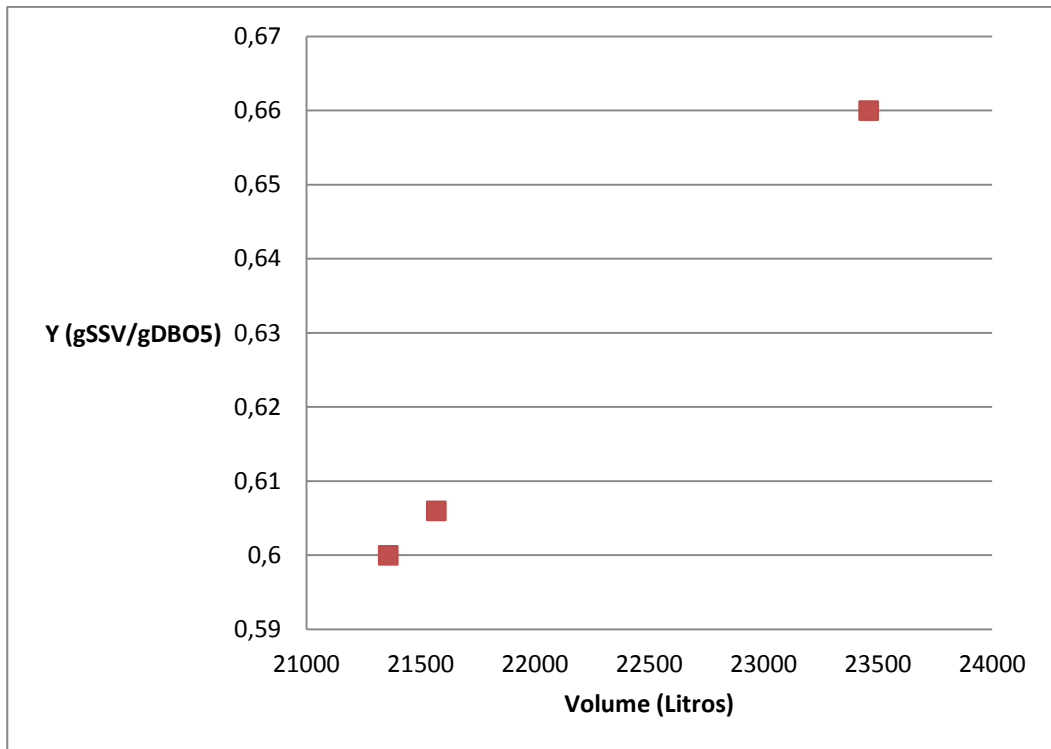


Figura 22 - Sensibilidade do Volume em relação a Y

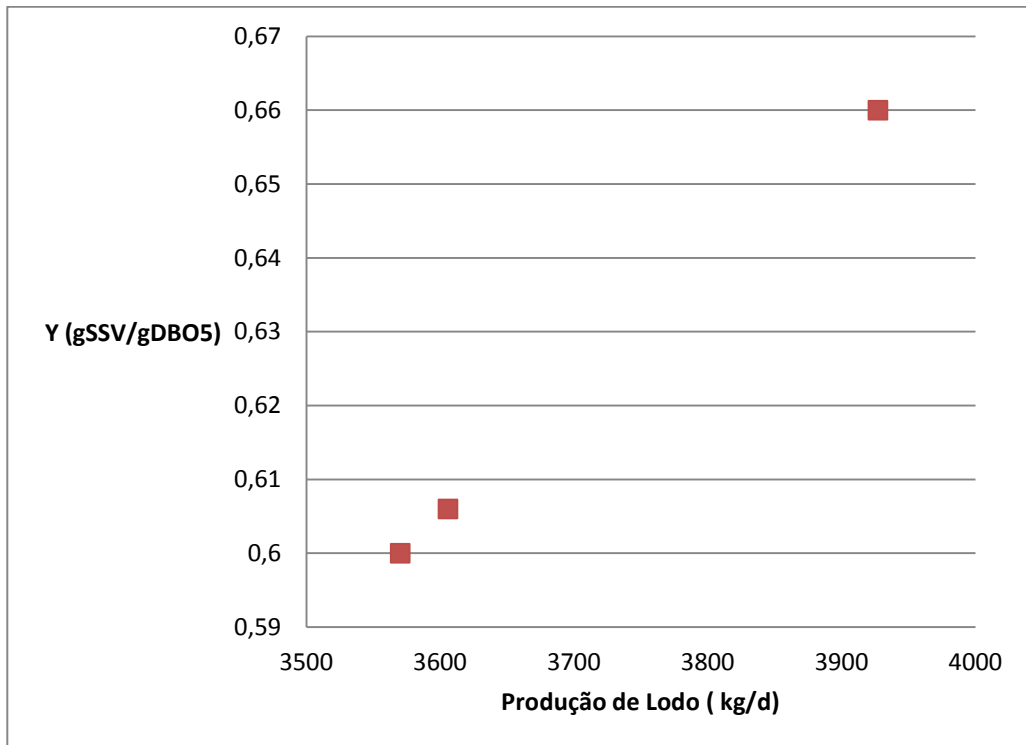


Figura 23 - Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a Y

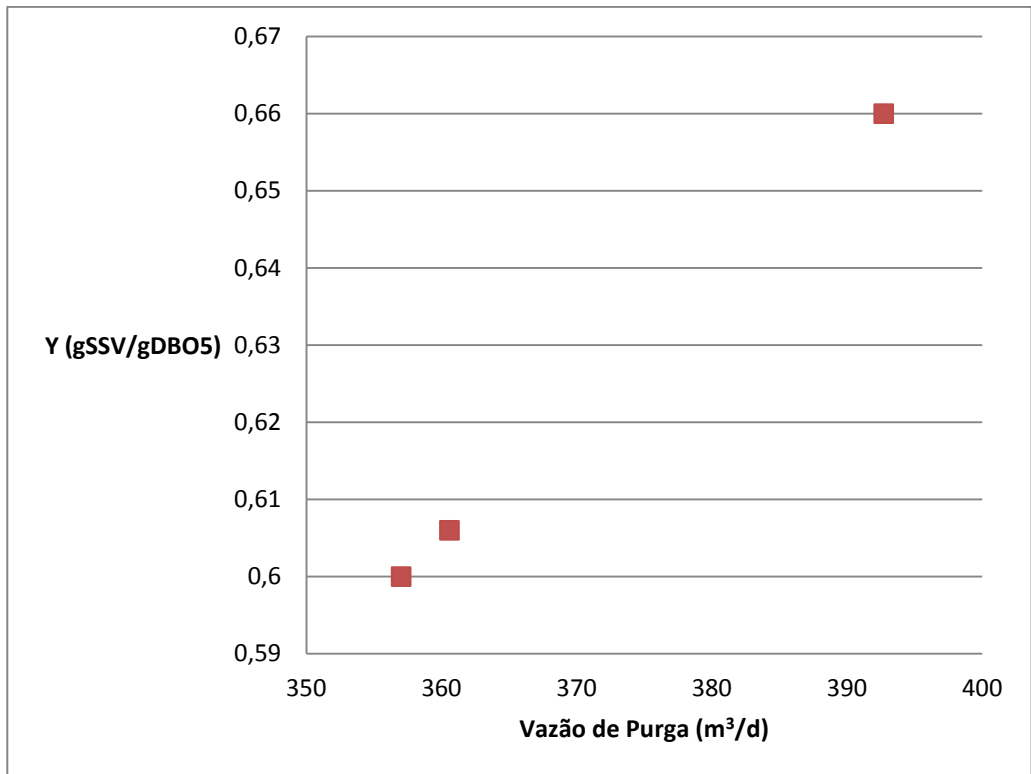


Figura 24 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a Y

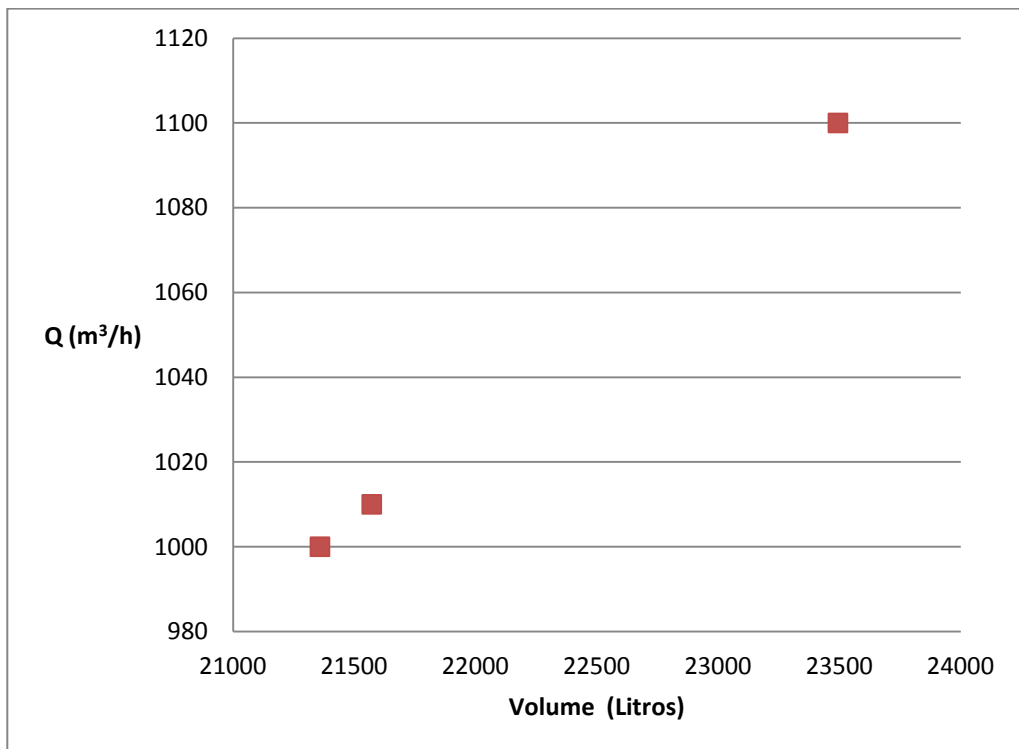


Figura 25 - Sensibilidade do Volume em relação a Q

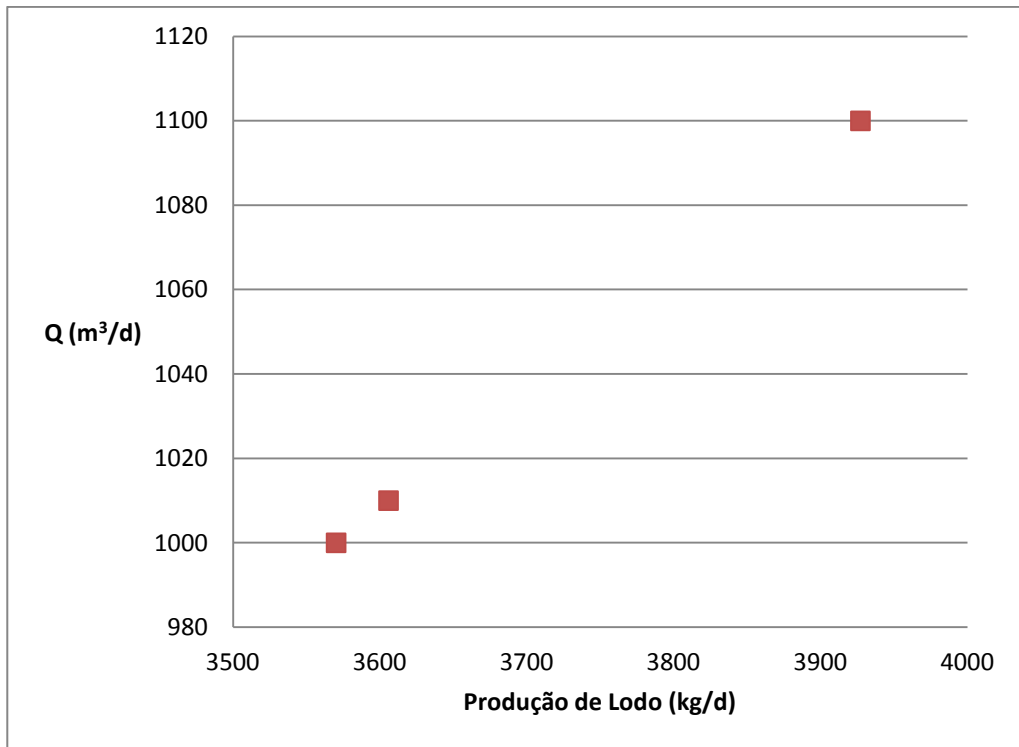


Figura 26- Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a Q

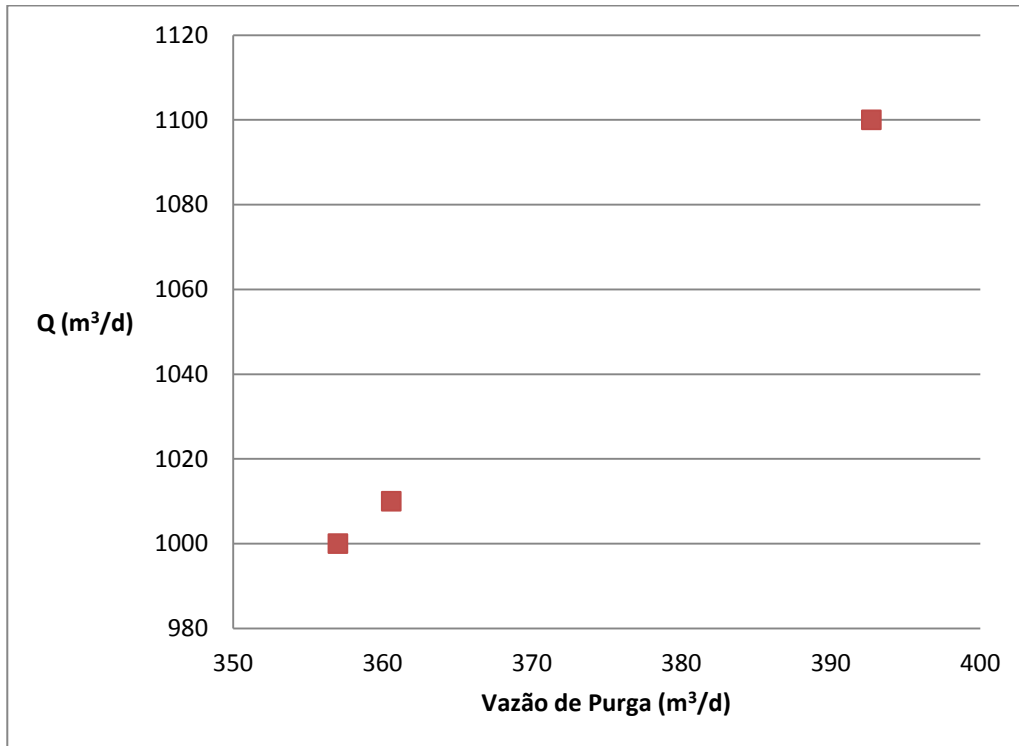


Figura 27- Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a Q

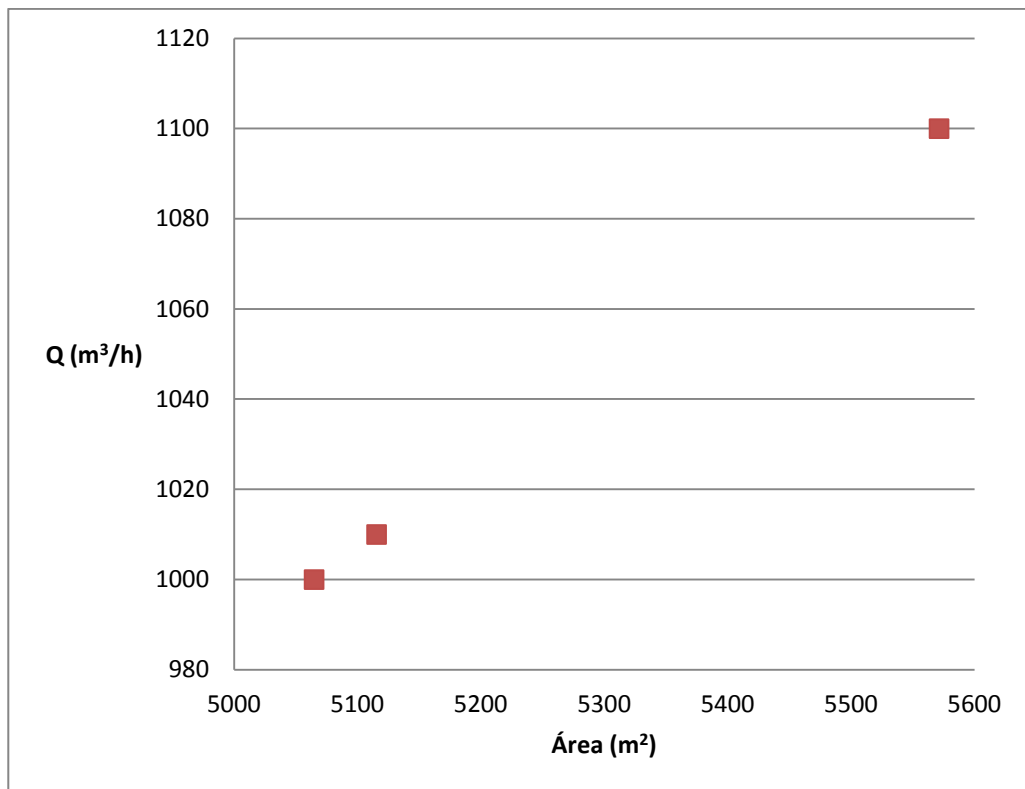


Figura 28 - Sensibilidade da Área em relação a Q

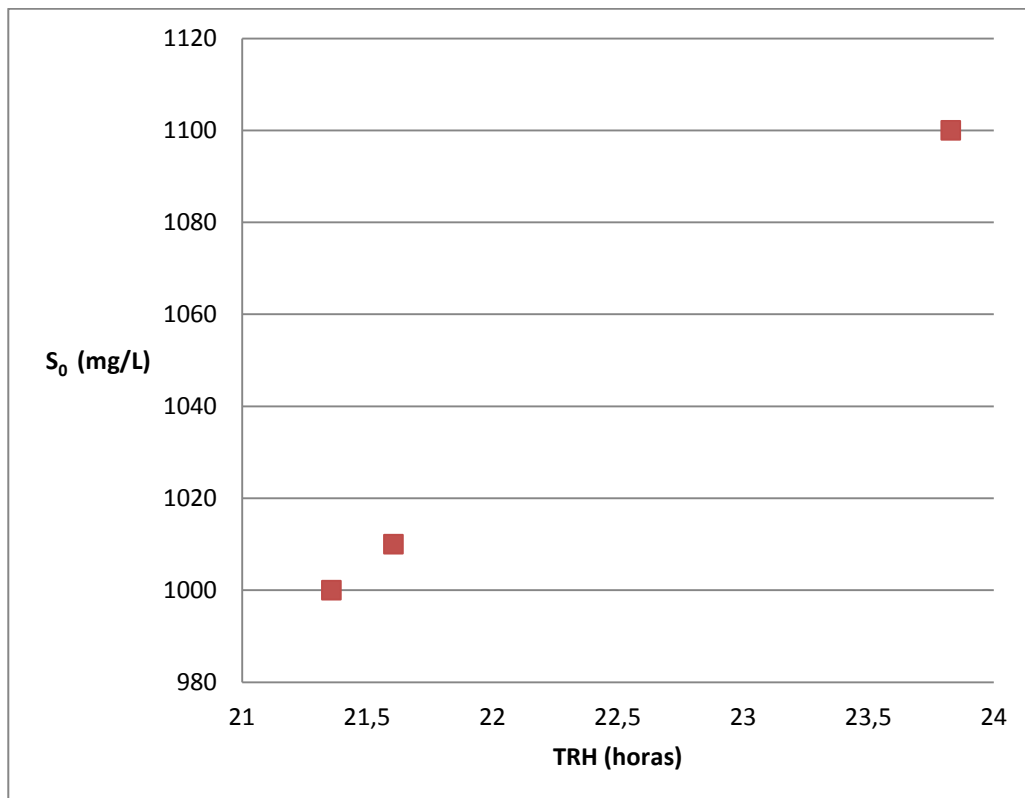


Figura 29 - Sensibilidade do TRH em relação a S₀

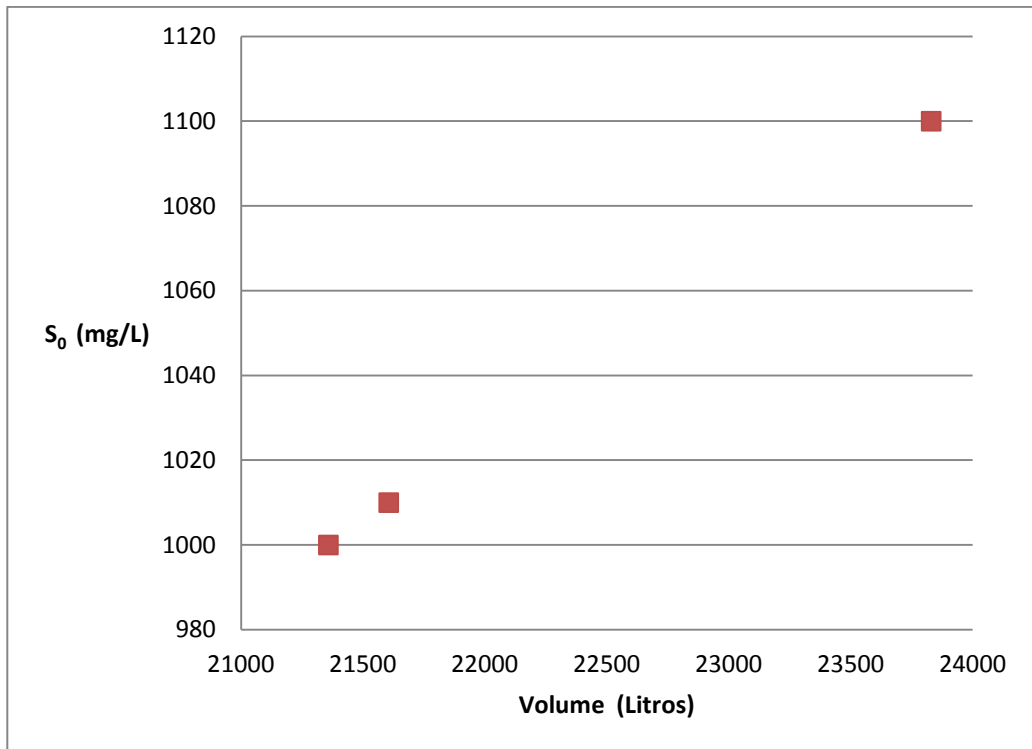


Figura 30 - Sensibilidade do Volume em relação a S₀

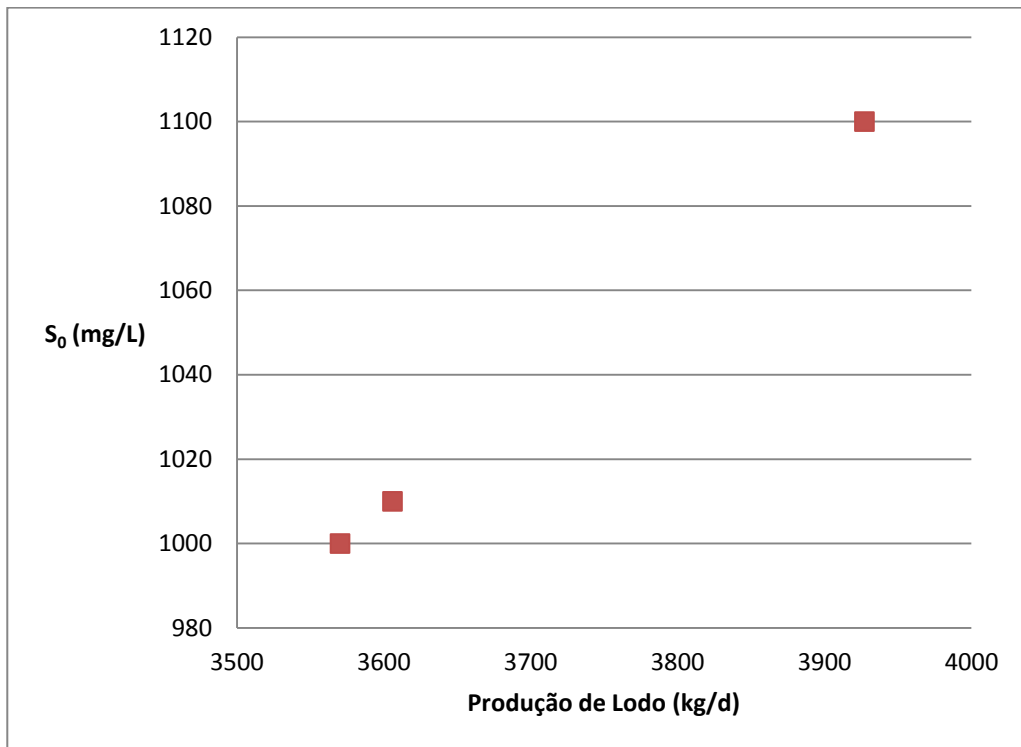


Figura 31 - Sensibilidade da Produção de Lodo em relação a S₀

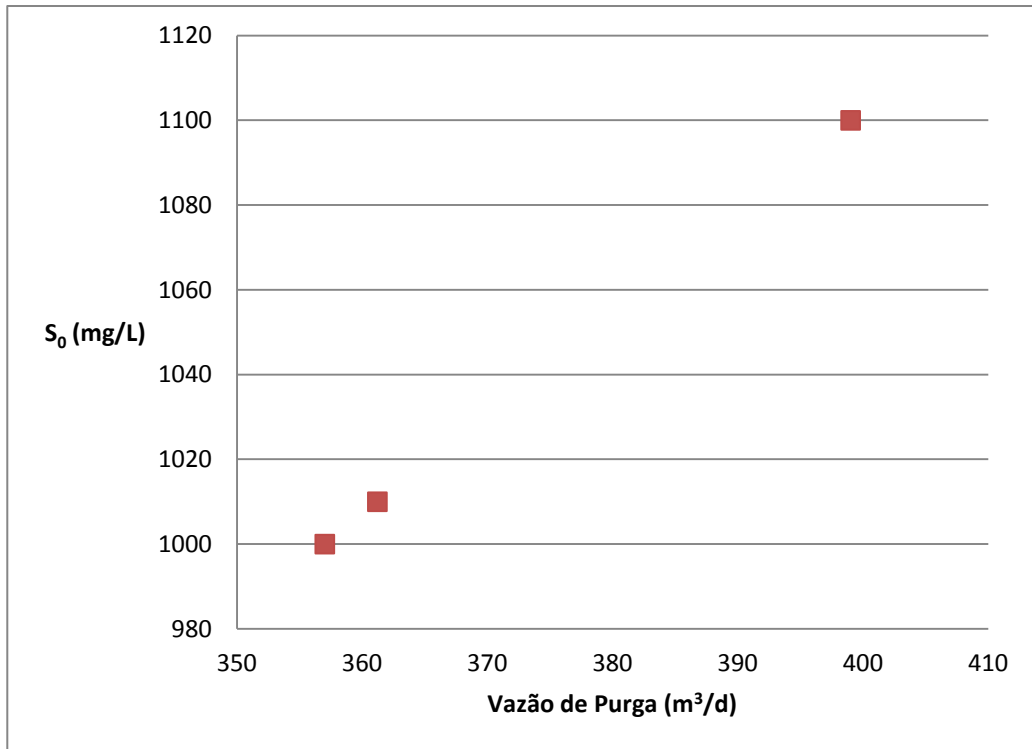


Figura 32 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a S₀

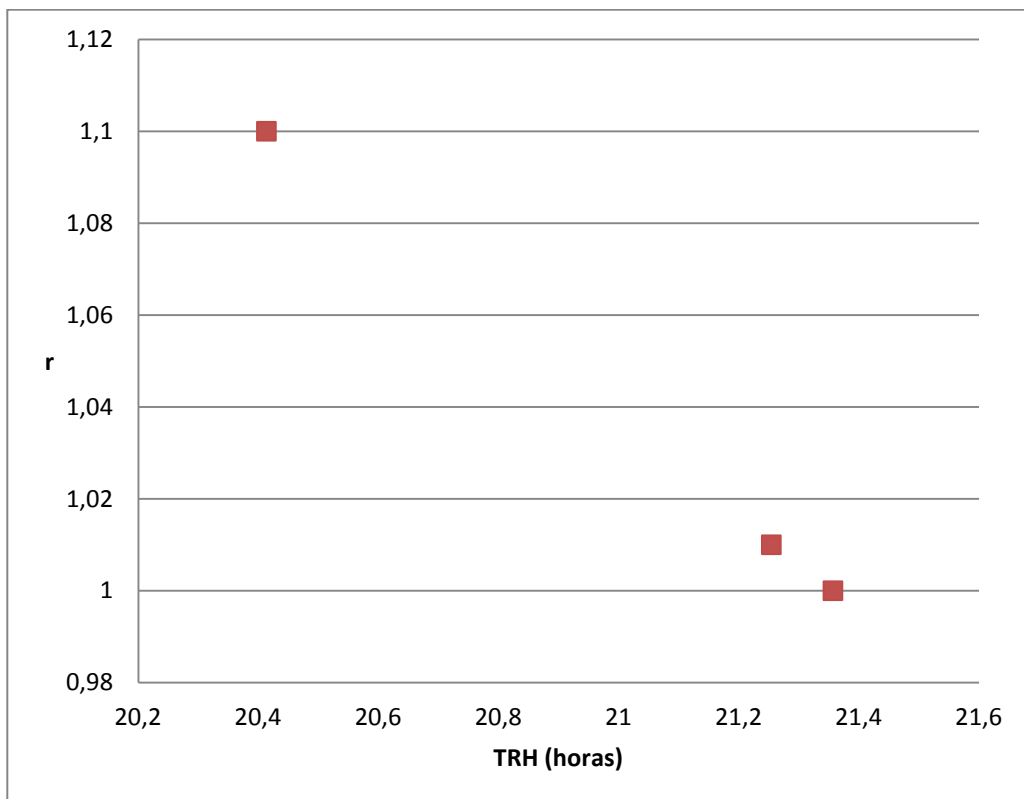


Figura 33 - Sensibilidade do TRH em relação a r

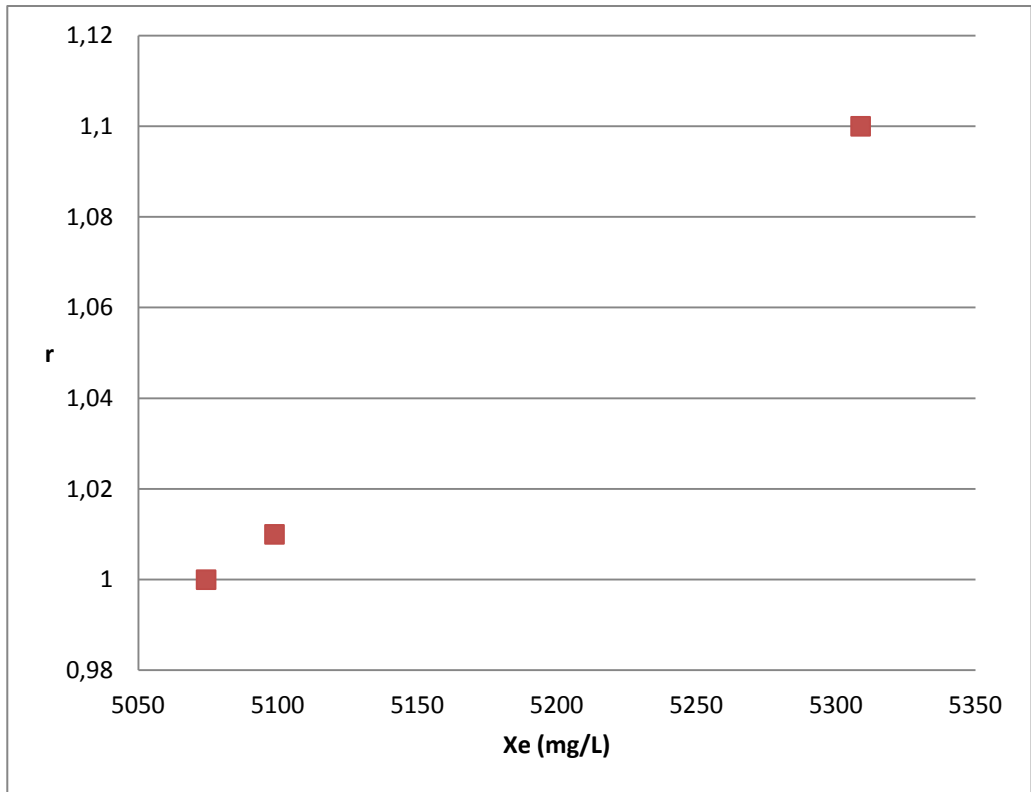


Figura 34 - Sensibilidade do Xe em relação a r

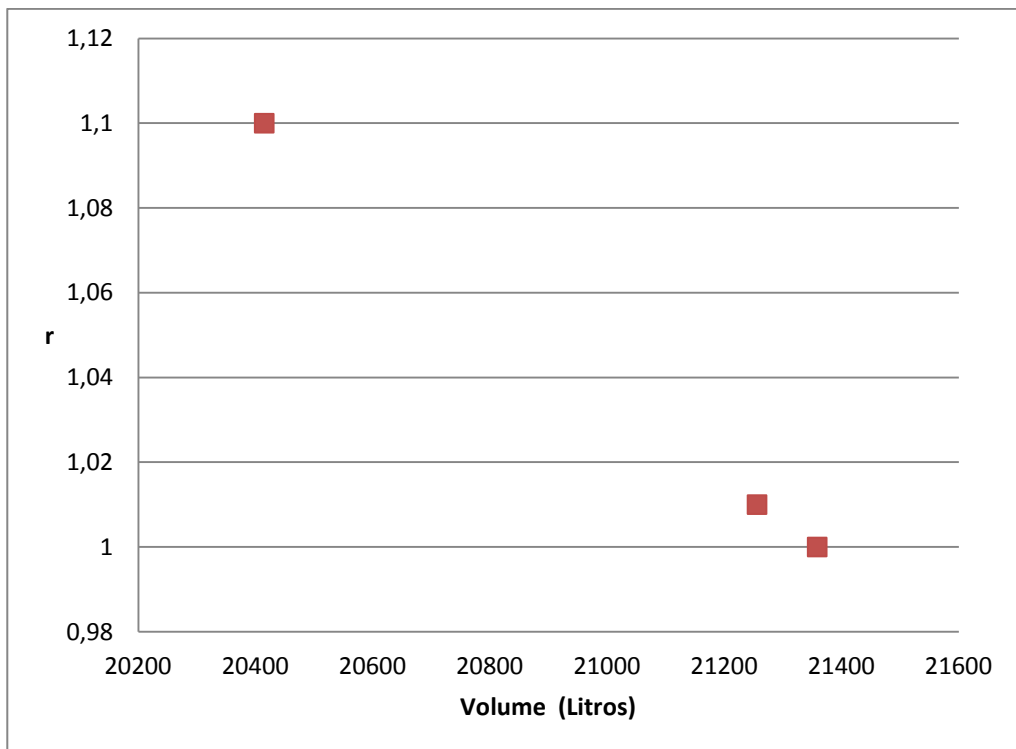


Figura 35 - Sensibilidade do Volume em relação a r

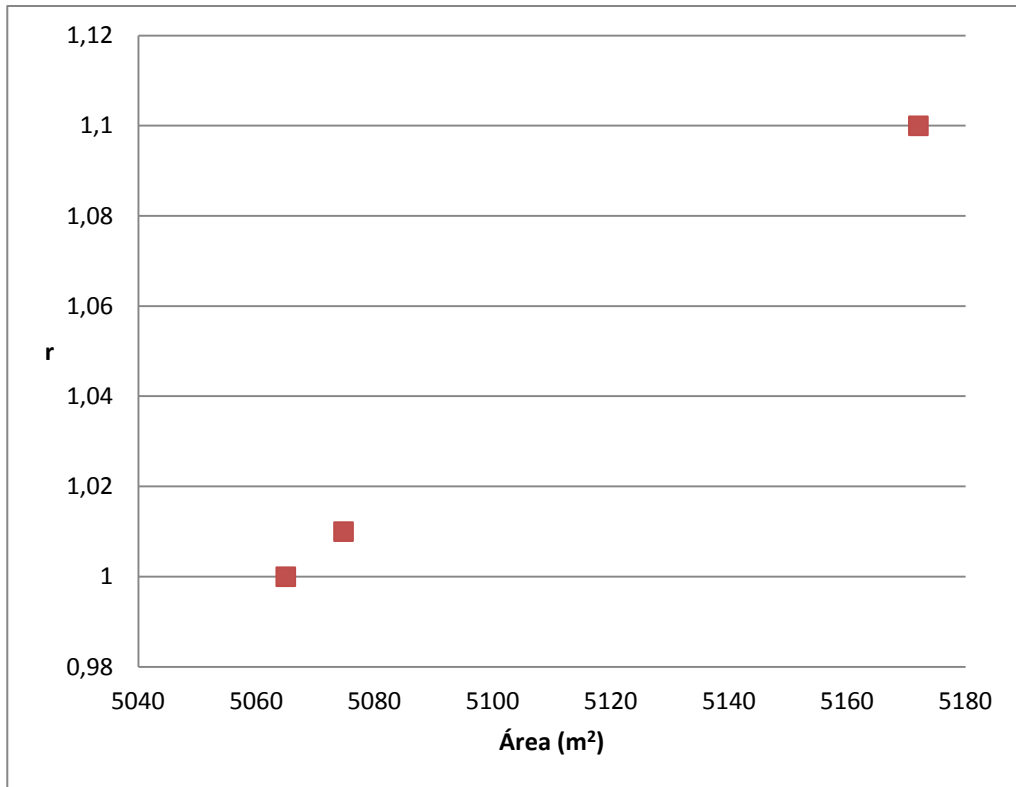


Figura 36 - Sensibilidade da Área em relação a r

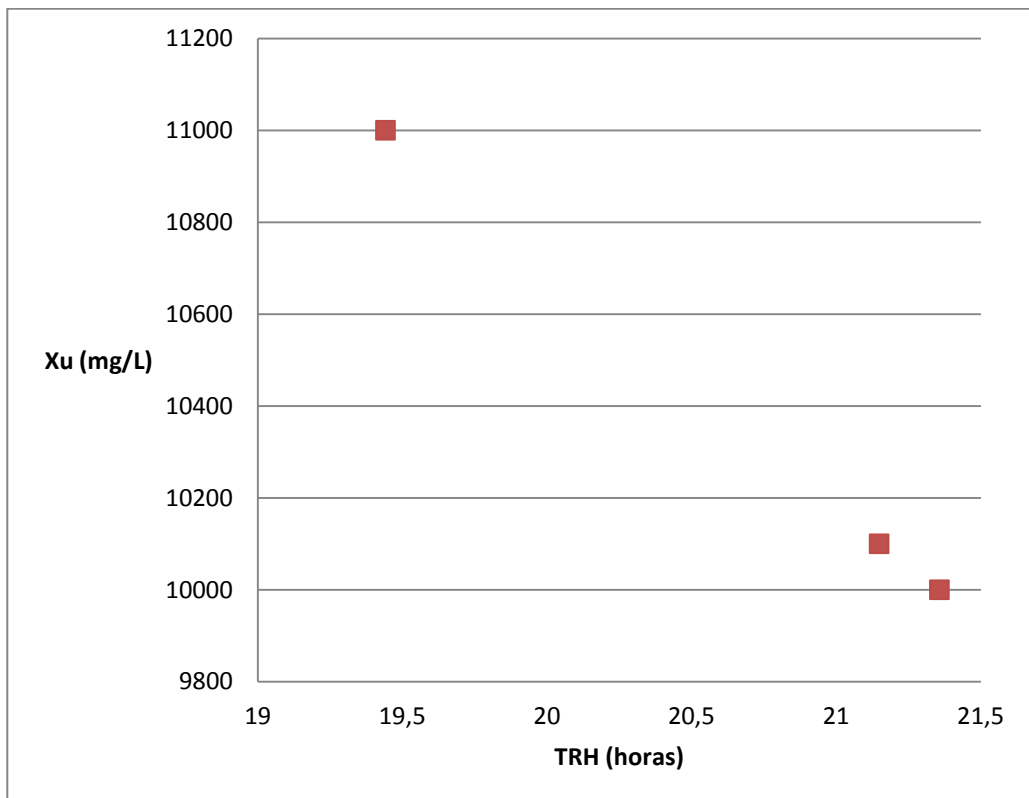


Figura 37 - Sensibilidade do TRH em relação a Xu

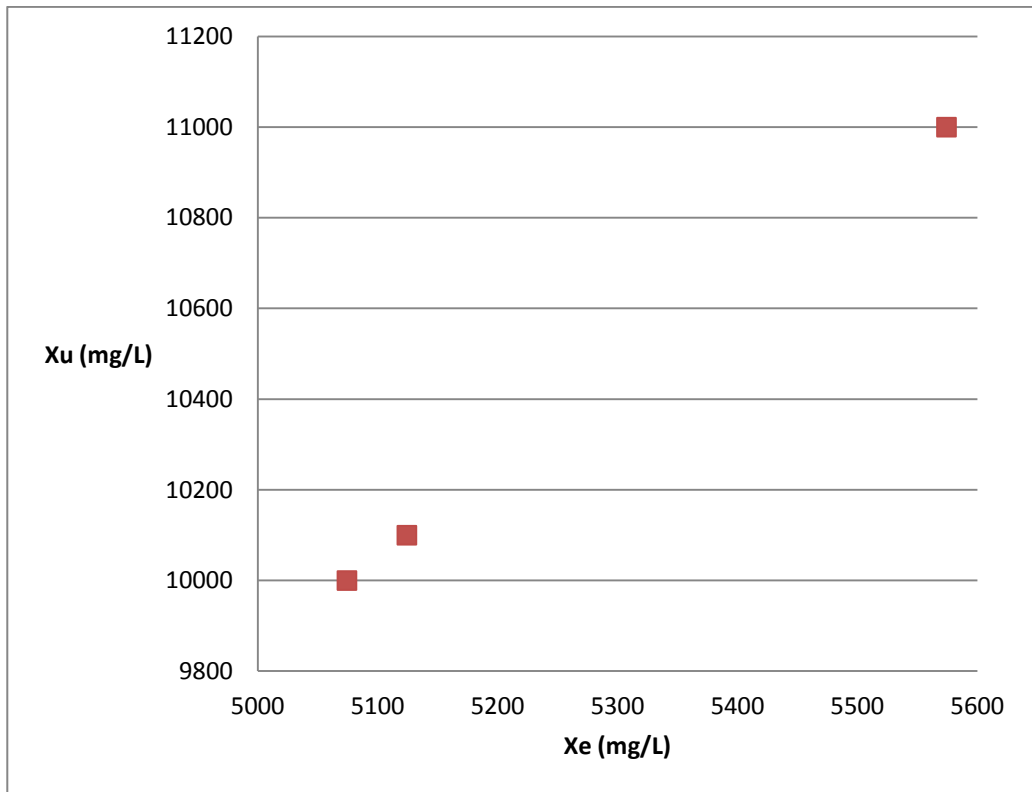


Figura 38 - Sensibilidade do Xe em relação a Xu

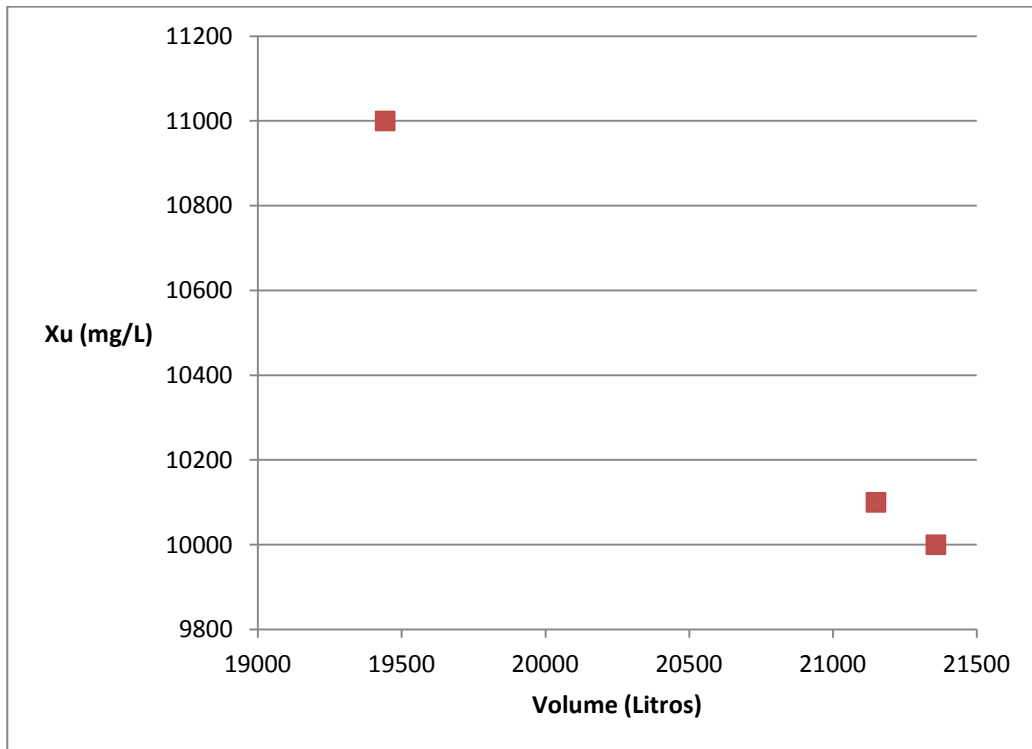


Figura 39 - Sensibilidade do Volume em relação a Xu

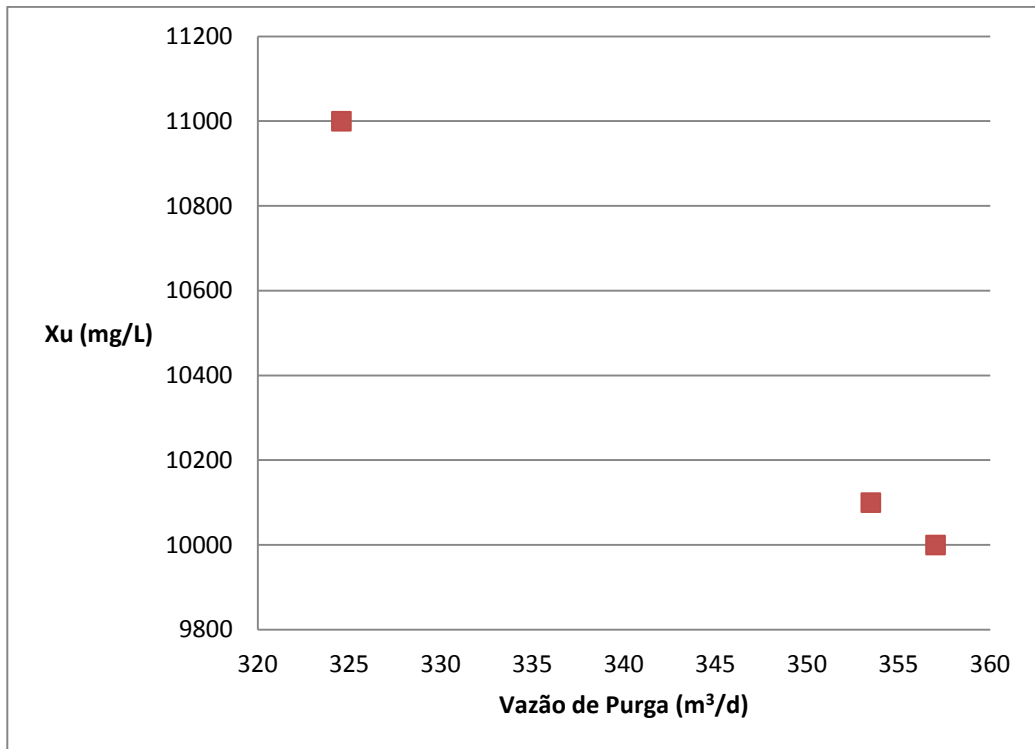


Figura 40 - Sensibilidade da Vazão de Purga em relação a Xu

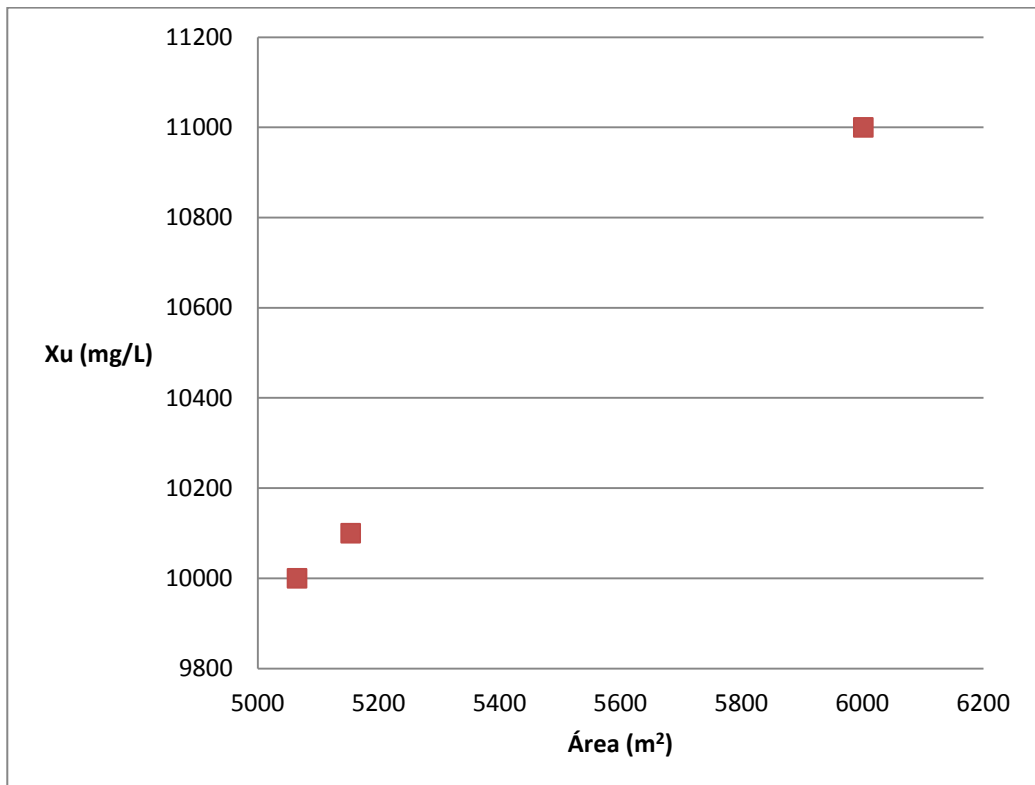


Figura 41 - Sensibilidade da Área em relação a Xu

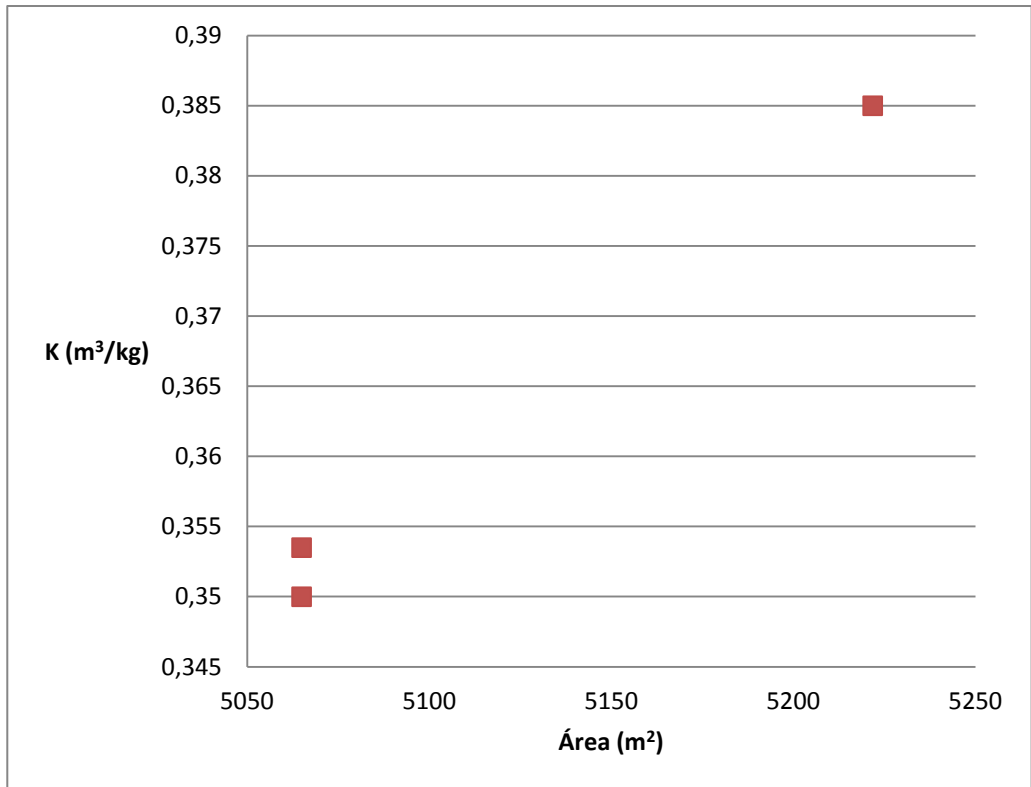


Figura 42 – Sensibilidade da Área em relação a K

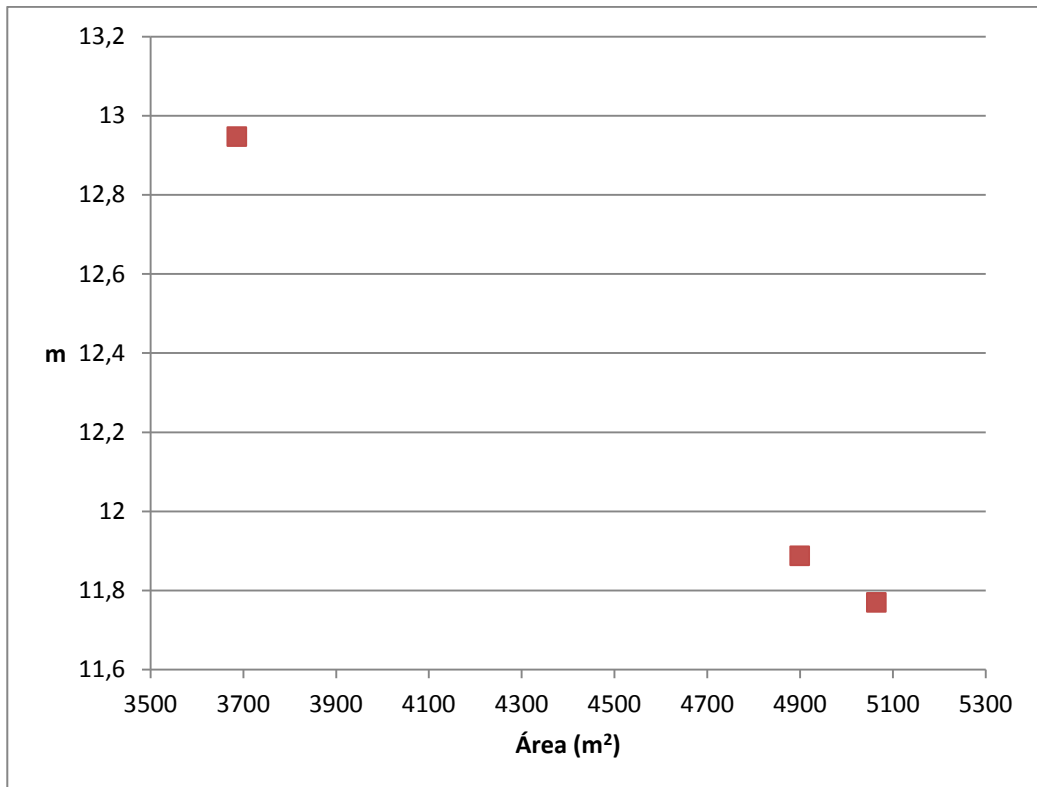


Figura 43 - Sensibilidade da Área em relação a m

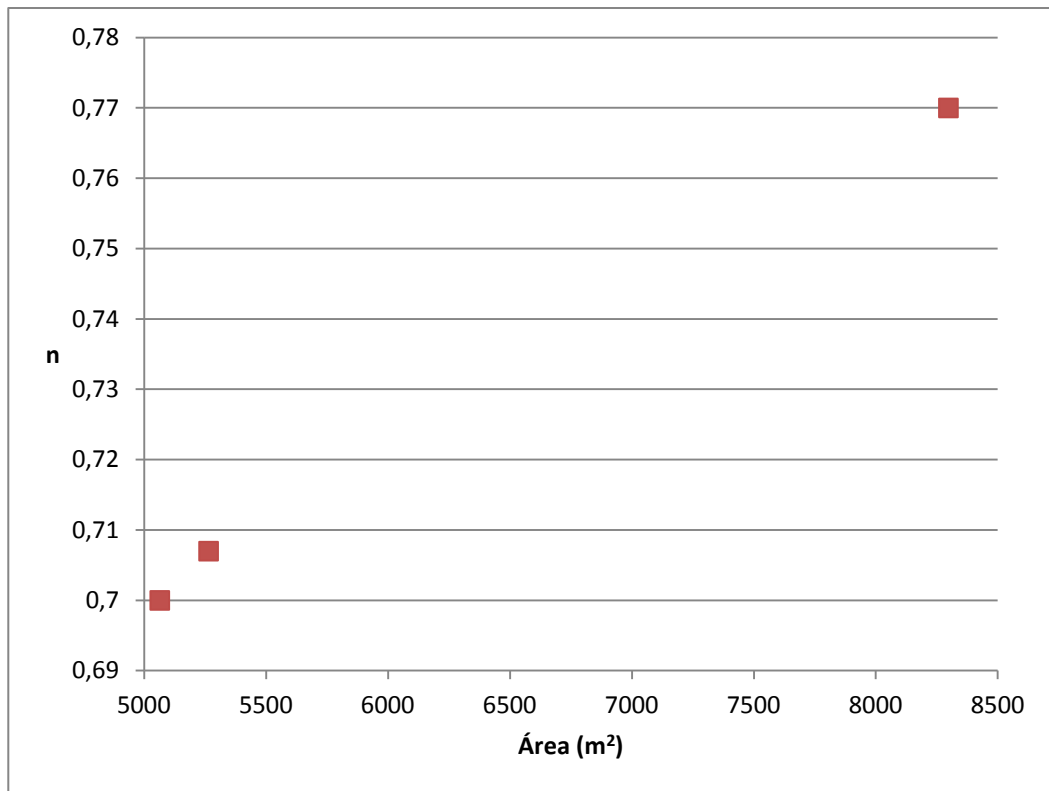


Figura 44 - Sensibilidade da Área em relação a n