

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Afonso Henrique Pellenz

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LAGOAS DE
ESTABILIZAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES
INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO**

Porto Alegre
Fevereiro 2018

AFONSO HENRIQUE PELLEZ

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LAGOAS DE
ESTABILIZAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES
INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Fernando de Abreu Cybis
Relator: Dieter Wartchow

Porto Alegre
Fevereiro 2018

AFONSO HENRIQUE PELLENZ

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LAGOAS DE
ESTABILIZAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES
INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, fevereiro de 2018

Prof. Luiz Fernando de Abreu Cybis
Dr. em Engenharia de Saúde Pública pela Universidade de Leeds
Orientador

Prof. Dieter Wartchow
Dr. em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade de Stuttgart
Relator

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Fernando de Abreu Cybis
Dr. em Engenharia de Saúde Pública pela Universidade de Leeds

Prof. Dieter Wartchow
Dr. em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade de Stuttgart

Cássio Florisbal de Almeida
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha mãe, Aneli, meu exemplo de vida, ao meu pai, Antonio, e aos meus amigos, que estiveram sempre presentes, nas horas fáceis e também nas difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. Luiz Fernando de Abreu Cybis, pela paciência e auxílio na obtenção dos dados junto à SITEL e por ter aceitado me orientar mesmo em uma situação complicada.

Agradeço ao relator deste trabalho, Prof. Dr. Dieter Wartchow, pelos inúmeros apontamentos e sugestões para melhoria do mesmo.

Agradeço aos meus pais, Aneli Marques Pellenz e Antonio Adenor Pellenz, por terem me apoiado desde o início, quando decidi me mudar para Porto Alegre e ingressar na graduação. Sem eles eu não estaria aqui.

Agradeço à técnica Rosane Klochner Barsanti da SITEL-CORSAN por toda atenção dada e pelo auxílio na obtenção dos dados.

Agradeço ao técnico em Hidrologia Kurt Neri Strack, que foi a primeira pessoa com quem tive contato na SITEL-CORSAN e nos abriu as portas para que esse trabalho pudesse ser feito.

Agradeço à técnica em Química, Andréia Barros de Santos, pelo auxílio na obtenção dos dados de operação e pela disponibilidade de me acompanhar em um tour pela SITEL.

Agradeço às minhas amigas Vanessa, as Marianas, Tatiane, Laura, Débora, Luigi, Seko, entre outros, amigades que a graduação me proporcionou e pretendo levar para a vida toda.

Agradeço aos meus melhores amigos, Thamis, Felipe e Kayuane, por todos momentos que passamos juntos durante esses anos todos em Porto Alegre.

Agradeço à UFRGS por ter me proporcionado um aprendizado de tamanha qualidade, com professores extremamente capacitados. Espero que meus trabalhos futuros façam jus a essa formação.

Por fim, agradeço a mim mesmo por ter vencido a procrastinação, se eu consegui, outros também podem.

O sucesso é ir de fracasso
em fracasso
sem perder o entusiasmo.

Winston Churchill

RESUMO

Este trabalho versa sobre a avaliação, quanto à eficiência de remoção de poluentes, do sistema de pós-tratamento dos efluentes do Polo Petroquímico do Sul, localizado em Triunfo, utilizando lagoas de estabilização (polimento). O sistema de lagoas é considerado um dos mais simples e econômicos, tanto na parte construtiva quanto operacional. A legislação estadual, através da Resolução 355 do CONSEMA, de julho de 2017, e a federal, através da Resolução 430 do CONAMA, de maio de 2011, e a FEPAM, através da licença de operação da estação de tratamento, estabelecem valores máximos para vários parâmetros de qualidade da água, os quais devem ser atendidos para que o efluente que sai das estações de tratamento possa ser encaminhado ao respectivo corpo receptor. O objetivo é, portanto, verificar se o sistema de pós-tratamento por lagoas de polimento é eficiente no auxílio do tratamento de efluentes industriais e se ajuda a atender os limites recomendados por dadas legislações. Estabelecidos tais padrões, parte-se para uma caracterização dos elementos envolvidos no tratamento de efluentes, através de revisão bibliográfica. Caracteriza-se primeiramente águas residuárias industriais e seus principais parâmetros de qualidade. Então são apresentados os tipos de lagoas de estabilização, suas vantagens e desvantagens, bem como as principais características para a viabilidade de implantação do sistema. Na segunda parte do trabalho é feita uma análise de efluente de sistema de tratamento de indústria petroquímica estabelecida em Triunfo – RS. A empresa responsável pelo tratamento desse efluente é a SITEL (Superintendência de Tratamento de Efluentes Líquidos e Resíduos Sólidos), pertencente à CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento) e que tem por objetivo gerenciar e executar a prestação de serviços de tratamento de resíduos (líquidos e sólidos) industriais. Constatou-se que, a nível de remoção apenas de parâmetro químicos e físicos, o tratamento preliminar e o tratamento secundário são muito eficientes e o efluente já chega às lagoas de polimento com a maior parte dos parâmetros abaixo dos limites estabelecidos pela Licença de Operação. No entanto, as lagoas de polimento têm eficiência presente de forma sólida apenas na remoção de nitritos e nitratos, apresentando também uma leve remoção de fósforo e uma diminuição de pH. A nível operacional, as lagoas permanecem a maior parte do tempo com níveis elevados de altura da lâmina d'água, contrapondo o recomendado pela bibliografia.

Palavras-chave: Lagoas de Estabilização. Lagoas de Polimento. Tratamento de Esgotos.
Efluentes Industriais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Lagoas de Estabilização da SITEL.....	28
Figura 2 – Modelo de lagoa com chicanas.....	36
Figura 3 – Detalhes e elementos de um dique de lagoa de estabilização.....	41
Figura 4 – Complexo Industrial do Polo Petroquímico do Sul.....	44
Figura 5 – Planta simplificada das etapas de tratamento da SITEL.....	45
Figura 6 – Bacia de Equalização Org. à esquerda, Bacia de Emergência Org. ao fundo..	46
Figura 7 – Fazenda de lodo – campo 8.....	47
Figura 8 – DQO média nas lagoas 1 e 8.....	53
Figura 9 – SDT médios nas lagoas 1 e 8.....	55
Figura 10 – SST médios nas lagoas 1 e 8.....	57
Figura 11 – Valores médios de Alumínio nas lagoas 1 e 8.....	59
Figura 12 – Valores médios de Cromo nas lagoas 1 e 8.....	60
Figura 13 – Valores médios de Ferro nas lagoas 1 e 8.....	62
Figura 14 – Valores médios de Fósforo nas lagoas 1 e 8.....	64
Figura 15 – Valores médios de Zinco nas lagoas 1 e 8.....	67
Figura 16 – Valores médios de Nitratos nas lagoas 1 e 8.....	66
Figura 17 – Valores médios de Nitritos nas lagoas 1 e 8.....	69
Figura 18 – Valores médios de Nitrogênio Amoniacal nas lagoas 1 e 8.....	71
Figura 19 – Valores médios de Fósforo nas lagoas 1 e 8.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de bases para associação de parâmetros com unidades de produção para alguns tipos de indústrias.....	20
Tabela 2 – Componentes orgânicos de efluentes industriais.....	21
Tabela 3 – Principais processos e operações unitárias de tratamentos aplicados a alguns contaminantes.....	22
Tabela 4 – Concentrações presentes no efluente de indústria petroquímica.....	23
Tabela 5 – Parâmetros de Análise do Efluente da Lagoa de Estabilização nº 8.....	24
Tabela 6 – Parâmetros de Análise do Efluente da Lagoa de Estabilização nº 8.....	25
Tabela 7 – Efluentes de Manufatura de Produtos Petroquímicos.....	26
Tabela 8 – Características dos principais sistemas de lagoas para a remoção de DBO....	29
Tabela 9 – Eficiência de remoção de DBO em lagoas anaeróbias em função de T.....	31
Tabela 10 – Vinculação entre a cor da lagoa e a característica de funcionamento.....	32
Tabela 11 – Principais diferenças entre lagoas de estabilização e lagoas de polimento...	37
Tabela 12 – Principais aspectos a serem analisados para decisão do local de implantação das lagoas de estabilização.....	39
Tabela 13 – Profundidades usuais das lagoas de estabilização.....	40
Tabela 14 – Acumulação de lodo de acordo com a taxa de aplicação.....	41
Tabela 15 – Aspectos construtivos dos taludes de lagoas de estabilização.....	42
Tabela 16 – Características Básicas Das Lagoas De Estabilização (Tratamento Terciário)	47
Tabela 17 – Métodos aplicados nas análises.....	50
Tabela 18 – Eficiência na remoção de DQO das lagoas de polimento.....	52
Tabela 19 – Remoção de OD nas lagoas de polimento.....	54
Tabela 20 – Eficiência na remoção de SDT nas lagoas de polimento.....	55
Tabela 21 – Eficiência na remoção de SST nas lagoas de polimento.....	56
Tabela 22 – Eficiência na remoção de Alumínio nas lagoas de polimento.....	58
Tabela 23 – Eficiência na remoção de Cromo nas lagoas de polimento.....	60
Tabela 24 – Eficiência na remoção de Ferro nas lagoas de polimento.....	61
Tabela 25 – Eficiência na remoção de Fósforo nas lagoas de polimento.....	63
Tabela 26 – Eficiência na remoção de Zinco nas lagoas de polimento.....	65
Tabela 27 – Eficiência na remoção de Nitratos nas lagoas de polimento.....	66

Tabela 28 – Eficiência na remoção de Nitritos nas lagoas de polimento.....	68
Tabela 29 – Eficiência na remoção de N Amoniacal nas lagoas de polimento.....	70
Tabela 30 – Eficiência na remoção de NTK nas lagoas de polimento.....	72
Tabela 31 – Concentrações de OG na entrada da ETE da SITEL.....	74
Tabela 32 – Concentrações de OG na saída da ETE da SITEL.....	74
Tabela 33 – Médias ponderadas de ABI e ABO.....	74
Tabela 34 – Concentrações de OG na saída da ETE da SITEL.....	75
Tabela 35 – Comparação dos resultados obtidos com os limites estabelecidos pela LO..	76
Tabela 36 – Valores de pH e Temperatura nas Lagoas 1 e 8 em 2015 e 2016.....	77
Tabela 37 – Valores de cota de fundo e nível de linha d’água de projeto e de operação das lagoas de polimento.....	78
Tabela 38 – Valores de volume de projeto e de operação das lagoas de polimento.....	78
Tabela 39 – Valores de operação calculados utilizados nas lagoas de polimento.....	79
Tabela 40 – Análise estatística de valores de nível de linha d’água, volume e TDH das lagoas de polimento nos anos de 2015 e 2016.....	80

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABI – Afluente Bruto Inorgânico

ABO – Afluente Bruto Orgânico

ANA – Agência Nacional de Águas

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONSEMA – Conselho Estadual de Meio Ambiente

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento

COT – Carbono Orgânico Total

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgotos

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LD – Limite de Detecção

LO – Licença de Operação

NBR – Norma Brasileira

OD – Oxigênio Dissolvido

OG – Óleos e Graxas

pH – Potencial Hidrogeniônico

POPs – Poluentes Orgânicos Persistentes

SITEL – Superintendência de Tratamento de Efluentes Líquidos e Resíduos Sólidos

SMEWW – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

SST – Sólidos Suspensos Totais

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.3 HIPÓTESE	16
2.4 PRESSUPOSTO	17
2.5 PREMISA	17
2.6 LIMITAÇÕES	17
2.7 DELINEAMENTO	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 EFLUENTES INDUSTRIAIS.....	19
3.1.1 INDÚSTRIA PETROQUÍMICA.....	23
3.2 NORMAS E PARÂMETROS MÉDIOS.....	22
3.3 LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO.....	27
3.3.1 LAGOAS ANAERÓBICAS.....	29
3.3.2 LAGOAS FACULTATIVAS.....	32
3.3.3 LAGOAS DE MATURAÇÃO.....	34
3.3.4 LAGOAS DE POLIMENTO	36
3.3.5 DIMENSIONAMENTO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO.....	38
4 MATERIAIS A MÉTODOS.....	43
4.1 O POLO PETROQUÍMICO DO SUL E ETE DA SITEL.....	43
4.2 COLETA E AMOSTRA DE DADOS.....	48
4.3 ANÁLISE DE DADOS.....	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
5.1 DQO.....	52
5.2 OD.....	53
5.3 SDT.....	54
5.4 SST.....	56

5.5 ALUMÍNIO	58
5.6 CROMO.....	59
5.7 CIANETOS.....	61
5.8 FERRO.....	61
5.9 FÓSFORO.....	62
5.10 ZINCO.....	64
5.11 NITRATOS.....	66
5.12 NITRITOS.....	68
5.13 NITROGÊNIO AMONIACAL.....	69
5.14 NITROGÊNIO KJELDHAL TOTAL.....	72
5.15 ÓLEOS E GRAXAS.....	73
5.16 COMPARAÇÃO COM OS LIMITES ESTABELECIDOS PELA LO.....	75
5.17 ANÁLISE OPERACIONAL DA ETE.....	77
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXO A.....	89

1 INTRODUÇÃO

Na maioria dos países, especialmente nos mais desenvolvidos, o setor de águas é extremamente importante. Uma das principais razões é a limitada quantidade de água doce disponível, que precisa atender a demanda humana e também a das indústrias. Devido a este fato, agravado pelo incessante crescimento populacional e também industrial, o tratamento de águas e esgotos deve ser tratado com muito cuidado.

Outro fator muito importante é a crescente preocupação com o impacto ambiental gerado pela disposição de efluentes domésticos e industriais sem tratamento diretamente em corpos receptores, como rios e lagos, dos quais possivelmente há coleta de água para abastecimento humano à jusante.

No Brasil, por ser um país em desenvolvimento e com uma das maiores reservas hídricas do planeta, a questão do tratamento da poluição gerada pela indústria ainda não é discutida com devida importância e, embora existam legislações estaduais e federais que regem sobre as qualidades com as quais o efluente deve sair das indústrias, sabe-se que o problema de disposição de efluentes industriais fora dos parâmetros dispostos nessas legislações ainda é preocupante.

O emprego de água na indústria, nos diferentes sistemas de manufatura, é essencial, sendo alguns dos usos mais comuns os para fins de resfriamento, lavagem de peças, misturas para separação de componentes, etc.

É citado em caderno de recursos hídricos da ANA (2007, p. 101) que:

“Levantamento recente realizado pelo Ministério da Saúde revela que, no País, existem cerca de 15.000 áreas com contaminação em solo e/ou água e que aproximadamente 1,3 milhões de habitantes estão expostos diretamente nestas regiões. As atividades petroquímicas, de extração mineral, siderúrgicas, fábricas e galpões de agrotóxicos estão listadas como principais causadoras de contaminação”.

O Terceiro Polo Petroquímico, localizado na cidade de Triunfo, no estado do Rio Grande do Sul, foi estabelecido no início da década de 1980, acontecimento que foi seguido de grande mobilização da população, contrária à essa implantação. Em 1982, através da Lei Estadual nº 7.691, houve a proibição por parte do Estado de lançamento dos efluentes do Polo

Petroquímico de Triunfo em cursos d'água naturais e que seus efluentes deveriam ser descartados na própria área de implantação do Polo.

Essa Lei fez com que ficasse implícito que o tratamento dos efluentes deveria ser muito eficaz na remoção de poluentes. Para isso foi criada a Superintendência de Tratamento de Efluentes Líquidos e Resíduos Sólidos (SITEL), gerenciado pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), que ficou responsável por conduzir as operações da ETE (Estação de Tratamento de Esgotos), desde o tratamento dos efluentes até a disposição final em solo (SANTOS, 2010).

O efluente do Polo é dividido em duas vertentes: uma orgânica e uma inorgânica. A inorgânica passa por pré-tratamento nas próprias empresas do Polo. Já a orgânica é levada diretamente à ETE da SITEL, por onde passa por tratamento preliminar e tratamento secundário antes de se juntar ao efluente inorgânico. Juntos, esses efluentes são, então, encaminhados à terceira e última etapa de tratamento: as oito lagoas de polimento em série, que somam mais de um milhão de metros cúbicos de esgoto.

Este trabalho tem como finalidade verificar se essas lagoas de polimento da estação de tratamento da SITEL, apresentam uma remoção eficiente de poluentes e se sua operação está de acordo com o que foi projetado e com o que é comentado pela literatura. Além disso, verificar-se-á se o efluente final atinge os parâmetros fixados pela licença de operação, elaborada pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), para aspersão em solo, conforme projeto aprovado da estação de tratamento.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

O trabalho será desenvolvido conforme as diretrizes a seguir.

2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

A questão do trabalho é: as lagoas de estabilização são eficientes quando empregadas como pós-tratamento de efluentes industriais?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal deste estudo é avaliar se as lagoas de polimento apresentam remoção eficiente de poluentes quando empregadas como pós-tratamento de efluente industrial. Além disso, complementando o estudo, se verificará se as lagoas de polimento estão operando conforme projeto e se o efluente final da estação de tratamento da SITEL apresenta os parâmetros de qualidade exigidos pela licença de operação.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese aqui seguida é que um sistema de lagoas de polimento apresenta uma boa eficiência na remoção de poluentes quando usado como tratamento terciário.

2.4 PRESSUPOSTO

Pressupõe-se o correto uso da norma NBR 12209:2011 – Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários – para estação estudada.

2.5 PREMISA

O trabalho tem como premissa a preocupação com a má qualidade do efluente industrial despejado nos corpos receptores, o que pode acarretar sérios danos ao meio ambiente e também à população, tanto no longo quanto no curto prazo.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho é delimitado por análise de dados do afluente bruto, do afluente às lagoas de polimentos e do efluente após as mesmas, quando é despejado em solo por aspersores e tubulação perfurada.

2.7 LIMITAÇÕES

O trabalho é limitado por:

- a) Os parâmetros físico-químicos analisados serão: DQO, Oxigênio Dissolvido, Sólidos Dissolvidos Totais, Sólidos Suspensos Totais, Alumínio, Cromo, Cianetos, Ferro, Fósforo, Nitratos, Nitritos, Nitrogênio Amoniacal, Nitrogênio Kjeldhal Total, Zinco, Óleos e Graxas, pH e Temperatura;
- b) Os parâmetros operacionais analisados serão: altura da linha d'água, volume armazenado e TDH nas lagoas de polimento;
- c) O afluente das lagoas de polimento passa por tratamento preliminar e tratamento secundário anteriores às lagoas de estabilização (polimento);
- d) A ETE recebe somente efluente industrial advindo do Polo Petroquímico do Sul;
- e) Os dados analisados correspondem somente aos anos de 2015 e 2016.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho será escrito da seguinte maneira:

- a) Revisão bibliográfica;
- b) Caracterização de lagoas de estabilização;
- c) Análise do caso estudado;
- d) Levantamento de dados;
- e) Análise dos dados;
- f) Considerações finais;

Na etapa de revisão bibliográfica, afim de embasar o trabalho com conhecimento necessário para que sejam compreendidas as informações sobre as lagoas de polimento, é caracterizado primeiramente o esgoto, tanto física, quanto química e biologicamente e são estabelecidos os padrões exigidos por lei com os quais os efluentes devem sair das estações de tratamento para despejo nos corpos receptores.

Na etapa seguinte são apresentadas as lagoas de estabilização, mostrando suas funções e também critérios de dimensionamento e de viabilidade técnica para construção. Além disso são apresentados materiais e métodos para execução das mesmas.

Estabelece-se, então, o sistema de lagoas de estabilização objeto deste estudo, de acordo com o que foi anteriormente apresentado como embasamento teórico.

Em seguida são coletados e analisados os dados de efluentes que passam por sistema de pós-tratamento por lagoas de estabilização, os quais são comparados com os parâmetros estabelecidos por norma, permitindo a análise de eficiência de remoção dos poluentes. Além disso, podemos verificar se o efluente pode ser despejado no local atual ou se deve haver alguma melhoria no tratamento.

Por fim são feitas considerações finais em cima dos resultados obtidos desta comparação, julgando o sistema em sua eficiência, objetivo deste trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EFLUENTES INDUSTRIAIS

De acordo com Walters e Wint (1981, tradução nossa), a definição de poluição da água é muito simples: se ela não puder mais ser empregada para o seu uso original, então esta água está poluída.

A poluição de águas na indústria decorre de processos, operações e/ou utilidades, podendo conter esgoto sanitário e também águas pluviais contaminadas (CAVALCANTI, 2012).

Os efluentes gerados variam de acordo com os produtos fabricados, grau de modernidade do maquinário e dos processos produtivos, porte da indústria, entre outros. Inclusive, empresas do mesmo ramo podem produzir efluentes diferentes entre si de acordo com práticas internas adotadas (CAVALCANTI, 2012).

Os tipos de poluição podem ser diversos. Materiais tóxicos podem ser tóxicos na sua essência ou utilizar tanto oxigênio para sua biodegradação que acabam sendo tão tóxicos quanto os anteriores (WALERS e MINT, 1981, tradução nossa).

Anderson et al. (1976, tradução nossa) separam a poluição nas águas em três tipo:

- a) Poluição nutricional, que pode ser orgânica ou inorgânica;
- b) Poluição química, que inclui toxicidade direta, acidez, alcalinidade e alterações salinas;
- c) E poluição física, que afeta temperatura, turbidez e propriedades da superfície da água.

O autor ainda comenta que, caracterizando uma indústria dentro dessas categorias, uma planta para tratamento pode ser criada para minimizar seus efluentes, com poucas exceções, que ocorrem quando poluentes de uma das categorias muda seu comportamento conforme algum parâmetro de outra categoria, como, por exemplo, o comportamento de íons metálicos na presença de diferentes pHs.

Já Cavalcanti (2012) relaciona os principais constituintes de águas residuais industriais em: substâncias orgânicas biodegradáveis, materiais flutuantes e oleoso, sólidos em suspensão, produtos orgânicos tóxicos, nitrogênio e fósforo, micropoluentes tóxicos às próprias estações de tratamento, cor e turbidez, materiais voláteis (que provocam também poluição do ar) e substâncias dissolvidas.

Todo material tóxico ao meio ambiente contido nas águas residuais industriais são responsabilidade da própria indústria, seja o lançamento em corpos hídricos, ou em redes públicas de esgoto ou quaisquer outros meios de descarte (CAVALCANTI, 2012).

Eckenfelder (2000, tradução nossa) comenta que, usualmente, a volume e carga de despejos industriais são medidos em termos de unidades de produção, como kg DBO por tonelada de matéria prima utilizada na fabricação de um certo produto.

Tabela 1 - Exemplos de bases para associação de parâmetros com unidades de produção para alguns tipos de indústrias

Origem dos Despejos	Bases
Papel e celulose	kg DBO ou SS/ton de papel; m ³ /ton de papel ou polpa de madeira ou polpa branqueada
Frigoríficos	kg DBO ou SS/ton de rês abatido; m ³ /ton de rês abatido
Cervejarias	kg DBO ou SS/litro de cerveja; m ³ /litro de cerveja
Curtumes	kg DBO ou SS/ton de pele curtida; m ³ /ton de pele curtida
Galvanoplastia	mg (metal)/m ³ de área galvanizada
Amido	kg DBO ou SS/ton de milho ou batata; m ³ /ton milho ou batata
Matadouro	kg DBO ou SS/ton de carcaça; m ³ /ton de carcaça
Carne enlatada	kg DBO ou SS/ton de carne enlatada; m ³ /ton de carne enlatada
Aves	kg DBO ou SS/ton de ave abatida; m ³ /ton de ave abatida
Refinaria	kg DBO ou SS/ton de petróleo cru; m ³ /ton de petróleo cru

(fonte: CAVALCANTI, 2012, p. 27)

Estes índices permitem uma estimativa de carga a ser tratada mesmo que a empresa esteja apenas em fase de implantação (CAVALCANTI, 2012).

A DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e a DQO (Demanda Química de Oxigênio) são medidas indiretas de sólidos voláteis contidos no efluente e representam a quantidade oxigênio dissolvido (OD) necessária para degradar os compostos orgânicos bioquimicamente ou quimicamente (GIORDANO, 2004). O autor ainda cita outros componentes orgânicos e suas fontes:

Tabela 2 – Componentes orgânicos de efluentes industriais

Poluente	Descrição e/ou origem
Detergentes	Limpeza de equipamentos, pisos, tubulações e uso sanitário
Fenóis	Provém de desinfetantes, resinas fenólicas e outras matérias-primas
Óleos e Graxas	Restaurantes industriais, oficinas mecânicas, casas de caldeiras, equipamentos que utilizam óleo hidráulico, matérias primas de composição oleosa
pH	Indica o caráter ácido ou básico dos efluentes

(fonte: adaptado de GIORDANO, 2004, p. 10)

Os compostos inorgânicos são os que não possuem carbono em sua composição e são representados pelos sais, que causam a dureza da água. Dentre os principais compostos inorgânicos que podemos citar estão o nitrogênio e fósforo, considerados nutrientes essenciais a diversas formas de vida, incluindo algas, que, dependendo das concentrações desses nutrientes no efluente, podem se multiplicar de forma massiva, processo conhecido como eutrofização; podem ser encontrados nas próprias fezes humanas e também em materiais de limpeza tanto domésticos quanto industriais (GIORDANO, 2004; WALTERS e MINT, 1981).

Os metais também fazem parte dos compostos inorgânicos e são analisados separadamente. Alguns deles podem ser muito tóxicos e até concentrações baixas dos mesmos podem dificultar o mecanismo de autodepuração de um rio. Outros componentes inorgânicos também podem apresentar toxicidade, como cloraminas, sulfetos, cianetos e amônia. Outros metais, não-tóxicos, como sódio, cálcio e magnésio, são medidos dependendo do uso final do efluente (GIORDANO, 2004; WALTERS e MINT, 1981, tradução nossa).

Vírus, bactérias, fungos, vermes e algas representam a porção biológica dos efluentes. A maior parte desses microorganismos têm como origem indústrias de alimentos e abates de animais, assim como o esgoto sanitário. A remoção desses poluentes é normalmente medida em relação à remoção das bactérias do grupo “coliforme” (GIORDANO, 2004; WALTERS e MINT, 1981, tradução nossa).

As etapas de tratamento variam conforme a características do efluente e podem conter tratamentos químicos, físicos e/ou biológicos.

Abaixo está uma tabela com os principais métodos para alguns contaminantes.

Tabela 3 – Principais processos e operações unitárias de tratamentos aplicados a alguns contaminantes

CONTAMINANTES	PROCESSOS E OPERAÇÕES UNITÁRIOS
Óleos e Graxas	Separação por gravidade diferencial
	Flotação
	Filtração por membrana
Sólidos em suspensão	Peneiramento
	Remoção de areia
	Sedimentação
	Filtração por membrana
	Flotação
	Coagulação/Sedimentação
Orgânicos Biodegradáveis	Lodos ativados e suas modalidades
	Filtros biológicos
	Reatores biológicos rotativos
	Lagoas aeradas e de estabilização e suas associações
	Sistemas anaeróbios
Orgânicos Voláteis	"Stripping"
	Adsorção em carvão ativado
Patógenos	Cloração
	Hipocloração
	Ozonização
	UV
Nitrogênio	Tratamentos biológicos
	"Stripping" de amônia
	Troca iônica
	Cloração
Fósforo	Coagulação
	Tratamentos biológicos
Orgânicos refratários	Adsorção em carvão ativado
	Precipitação química
	Incineração
	Tratamentos oxidativos avançados
Metais pesados	Precipitação química
	Troca iônica
Sólidos Dissolvidos	Troca iônica
	Osmose reversa
	Eletrodialise reversa
	Eletrodeionização

(fonte: CAVALCANTI, 2012, p. 35)

3.1.1 INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

A indústria petroquímica é baseada no cracking térmico de nafta para produção de diversas matérias primas químicas orgânicas, sendo as principais o etileno e o propileno.

O uso de água nessa indústria vai de processos de resfriamento (o cracking acontece a 800°C), geração de vapor e para uso direto no processo químico, como para a produção de etileno glicol. Os processos de resfriamento utilizam o maior montante de água (ANDERSON et al., 1976, p. 218, tradução nossa).

Tabela 4 - Concentrações presentes no efluente de indústria petroquímica

DBO	DQO	SST	OG	Cianetos	Fluoretos	Fenóis	Metais Pesados	Outros Poluentes
Alta	Muito alta	Alta	Alta	Presente	Presente	Presente	-	POPs

(fonte: CAVALCANTI, 2012, p. 177)

3.2 NORMAS E PARÂMETROS

Os efluentes, tanto domésticos quanto comerciais e industriais, devem obedecer a legislações estaduais e federais no que diz respeito à qualidade do efluente que produzem e que vai ser despejado em corpo receptor após tratamento. Além disso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) também estabelece parâmetros de qualidade dos efluentes.

Nacionalmente, o órgão que limita os valores máximos para tais parâmetros de lançamento em corpos hídricos é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através da Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Já no estado do Rio Grande do Sul, os parâmetros, também para lançamento em corpos d'água, são definidos pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA), através da Resolução nº 355 de 13 de julho de 2017.

A NBR 9800/87 lista os critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário.

Quando o corpo receptor for o solo ou mar, não há legislação específica, ficando responsável pela limitação dos parâmetros o órgão estadual competente, através de estudo da origem do afluente que será tratado e também do local de disposição final do mesmo, entre outros

aspectos que forem julgados pertinentes pelo órgão. No caso estudado, o lançamento do efluente final é dado por aspersores diretamente em solo, sendo estabelecidos os parâmetros pela FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental).

A FEPAM estabeleceu os seguintes limites (e também frequência de análise dos parâmetros) para o efluente final, conforme licença de operação 8314 de 02 de dezembro de 2016, da Estação de Tratamento da SITEL:

Tabela 5 – Parâmetros de Análise do Efluente da Lagoa de Estabilização nº 8

Parâmetro	Limites	Frequência de Análise
pH	-	(0,3 x D) Análises/Mês
Vazão	-	Diária
Temperatura	até 40°C	(0,3 x D) Análises/Mês

(fonte: Licença de Operação nº 8314 da SITEL, emitida pela FEPAM, 2016, p. 2)

Tabela 6 – Parâmetros de Análise do Efluente da Lagoa de Estabilização n° 8

Parâmetro		Concentração	Frequência de Análise
Descrição	Sigla		
Alumínio	Al	5,00 mg/L	Quinzenal
Arsênio	As	0,50 mg/L	Quadrimestral
Bário	Ba	5,00 mg/L	Quadrimestral
Benzeno	-	1,20 mg/L	Quinzenal
Boro	B	5,00 mg/L	Quadrimestral
Cádmio	Cd	0,10 mg/L	Quinzenal
Chumbo	Pb	0,10 mg/L	Quinzenal
Cianeto	CN	0,05 mg/L	Mensal
Cloreto	Cl	700,00 mg/L	Semanal
Cobre	Cu	0,50 mg/L	Mensal
Cromo hexavalente	Cr+6	0,05 mg/L	Quadrimestral
Cromo total	Cr	0,40 mg/L	Quinzenal
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO5	15,00 mg/L	Semanal
Demanda Química de Oxigênio	DQO	100,00 mg/L	(0,6 x D) Análises/Mês
Estanho	Sn	4,00 mg/L	Quadrimestral
Etilbenzeno	-	0,84 mg/L	Quinzenal
Fenóis totais (reagentes à 4-aminoantipirina)	Fenol	0,05 mg/L	Quinzenal
Ferro	Fe	5,00 mg/L	Mensal
Fluoreto	F	10,00 mg/L	Quadrimestral
Hidrocarbonetos Totais de petróleo	-	-	Quinzenal
Manganês	Mn	0,50 mg/L	Trimestral
Mercúrio	Hg	5,00 mg/L	Quinzenal
Níquel	Ni	2,00 mg/L	Trimestral
Nitrato	NO3-N	-	Semanal
Nitrito	NO2-N	-	Semanal
Nitrogênio amoniacal	NH3-N	5,00 mg/L	Semanal
Nitrogênio total Kjeldahl	TKN	-	Semanal
Óleos e Graxas totais	OG	10,00 mg/L	Semanal
Prata	Ag	0,10 mg/L	Quadrimestral
Selênio	Se	0,05 mg/L	Quadrimestral
Sólidos Dissolvidos Totais	SDT	2000,00 mg/L	Semanal
Sólidos sedimentáveis	S Sed	1,00 mg/L	Quadrimestral
Sulfeto total	S	0,50 mg/L	Mensal
Titânio	Ti	5,00 mg/L	Mensal
Tolueno	-	1,20 mg/L	Quinzenal
Vanádio	V	1,00 mg/L	Mensal
Xilenos	-	1,60 mg/L	Quinzenal
Zinco	Zn	1,00 mg/L	Mensal

(fonte: Licença de Operação n° 8314 da SITEL, emitida pela FEPAM, 2016, p. 3)

O documento ainda estabelece mais uma série de parâmetros que devem ser monitorados através de análises do solo onde é feita a disposição final do efluente e também do excesso de lodo, dos quais devem ser gerados relatórios com regularidade também especificada, que são

entregues à FEPAM para fiscalização da qualidade. Esses e outros parâmetros exigidos serão discutidos com maior profundidade na apresentação do caso estudado nos capítulos 4 e 5.

Segundo o World Bank (1998, p. 372, tradução nossa):

“Unidades petroquímicas geram águas residuais de operações de processos como condensação de vapor, vindos da remoção de minerais de torres de resfriamento e de águas de chuvas que carregam poluentes. Águas residuais de processos são geradas a uma taxa de aproximadamente 15 metros cúbicos por hora (m³/h), baseados em uma produção de 500.000 toneladas por ano de etileno e podem conter níveis de DBO de 100mg/L, assim como DQO de 1.500 - 6.000 mg/L, sólidos suspensos de 100 – 400 mg/L, e óleos e graxas de 30 – 60 mg/L. Níveis de fenóis até 200 mg/L e níveis de benzeno de até 100 mg/L também podem estar presentes.”

O World Bank estabeleceu, conforme tabela 7 a seguir, parâmetros de emissão de efluentes industriais de produção de petroquímicos que deveriam ser atingidos após tratamento para financiamento de projetos por sua parte.

Tabela 7 – Efluentes de Manufatura de Produtos Petroquímicos

Parâmetro	Valor Máximo
pH	6 – 9
DBO	30 mg/L
DQO	150 mg/L
SST	30 mg/L
Óleos e graxas	10 mg/L
Cádmio	0,1 mg/L
Crômio Hexavalente	0,1 mg/L
Cobre	0,5 mg/L
Fenol	0,5 mg/L
Benzeno	0,05 mg/L
Cloreto de Vinila	0,05 mg/L
Sulfeto	1 mg/L
Nitrogênio (Total)	10 mg/L
Aumento de Temperatura	≤ 3°C ^a

Nota: Requisitos de efluentes para descarga direta em águas superficiais

a. O efluente deve gerar um aumento de temperatura de não mais que 3°C na borda da zona onde a diluição e mistura iniciais acontecem. Onde a zona não é definida, use 100 metros a partir do ponto de descarga.

(fonte: World Bank, Pollution Prevention and Abatement Handbook, 1998, p. 374, cap. Petrochemicals Manufacturing, tradução nossa)

Podemos encontrar também compostos orgânicos tóxicos, metais pesados, soluções cáusticas e outros resíduos perigosos nos esgotos e rejeitos sólidos dessas fábricas, dependendo dos produtos fabricados nas mesmas (WORLD BANK, 1998, tradução nossa).

3.3 LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

O uso de lagoas de estabilização data do início do século passado, onde na cidade de San Antonio, no Texas, EUA, foi construída uma lagoa, datada de 1901, que servia como destino das águas residuais de uma comunidade (SILVA e MARA, 1979). Segundo Silva e Mara (1979, p. 45), a sua época, “cerca de um terço de todas as estações de tratamento de águas residuais dos Estados Unidos da América são de lagoas de estabilização.”

Mendonça (1990) descreve as lagoas de estabilização como constituintes do método mais simples de tratamento de esgotos que existe, sendo basicamente compostas de escavações rasas, de forma retangular ou quadrada e cercadas por taludes de terra. O autor ainda afirma que, diferente de sistemas de tratamento mais convencionais, como por lodos ativados ou filtros biológicos, que consomem uma grande quantidade de energia, as lagoas de estabilização, além de serem de simples construção e baixo custo, também utilizam pouca ou nenhuma energia elétrica e sua operação é simples, não necessitando de mão-de-obra excessivamente especializada.

As lagoas de estabilização podem ser aplicadas como sistema principal de tratamento, nas formas de lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação, que constituem os principais tipos de lagoas. Além disso, podem ser implantadas também como pós-tratamento, quando se gostaria de melhorar a qualidade do efluente, principalmente na remoção de patogênicos, de sistema de tratamento anterior, como por exemplo do tipo UASB (VON SPERLING, 2002).

Figura 1 – Sistema de Lagoas de Estabilização da SITEL



(fonte: ¹ Site da CORSAN - SITEL)

Nosso país apresenta fatores excelentes para a aplicação de tratamento por lagoas de estabilização seguido por disposição controlada do efluente tratado em solo, especialmente pela vasta disponibilidade de áreas e pelo clima favorável (VAN HAANDEL et al., 1999). Entretanto, os mesmos autores citam que nem sempre é possível a aplicação deste sistema, pois além de requerer grandes áreas, o solo e relevo precisam ser adequados para este tipo de tratamento. Sugerem, porém, que a opção deve ser avaliada mesmo quando há necessidade de transporte mecanizado do efluente para local mais apropriado.

Van Haandel et al. (1999) afirmam que o custo de implantação de um sistema de lagoas de estabilização gira em torno de R\$ 25,00 a R\$ 50,00 por pessoa atendida, enquanto para implantação de sistema de reatores aeróbios mecanizados, esse valor pode variar entre R\$ 60,00 e R\$ 150,00 por pessoa atendida, tomando como base o mês de abril de 1999. Na tabela 8, abaixo, podemos ver algumas das principais características de um sistema de lagoas.

¹ Disponível em: <http://www2.corsan.com.br/sitel/www/?page_id=54>. Acesso em jun. 2017.

Tabela 8 – Características dos principais sistemas de lagoas para a remoção de DBO

Item geral	Item específico	Sistema de lagoas			
		Facultativa	Anaeróbia - facultativa	Aerada facultativa	Aerada de mist. completa - decantação
Eficiência	DBO (%)	75 - 85	75 - 85	75 - 85	75 - 85
	DQO (%)	65 - 80	65 - 80	65 - 80	65 - 80
	SS (%)	70 - 80	70 - 80	70 - 80	80 - 87
	Amônia (%)	< 50	< 50	< 30	< 30
	Nitrogênio (%)	< 60	< 60	< 30	< 30
	Fósforo (%)	< 35	< 35	< 35	< 35
	Coliformes (%)	90 - 99	90 - 99	90 - 99	90 - 99
Requisitos	Área (m ² /hab)	2,0 - 4,0	1,5 - 3,0	0,25 - 0,5	0,2 - 0,4
	Potência (W/hab)	≈ 0	≈ 0	1,2 - 2,0	1,8 - 2,5
Custos	Implantação (R\$/hab)	40 - 80	30 - 75	50 - 90	50 - 90
	Operação (R\$/hab.ano)	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	5,0 - 9,0	5,0 - 9,0

Data: 1º semestre de 2002 (US\$ 1,00 = R\$ 2,50)

(fonte: VON SPERLING, 2002, p. 14)

Mara et al. (1992) cita que num sistema de lagoas, com lagoa de maturação inclusa, a remoção de organismos patogênicos, como bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos, pode ser igual ou ficar muito próxima de 100% (apud VON SPERLING, 2002).

3.3.1 LAGOAS ANAERÓBIAS

Lagoas anaeróbias são menos comuns que as lagoas facultativas e geralmente se encontram associadas a outros tipos de lagoas em série, usualmente operando como tratamento primário e seguidas de lagoa facultativa ou aeróbia, sistema comumente conhecido como “australiano”. Elas são empregadas quando o afluente tem alto teor de DBO (HESS et al., 1975; VON SPERLING, 2002).

De acordo com Mara e Pearson (1986), quando a concentração de DBO do afluente se situa entre 1.000 e 30.000 mg/l, o tratamento inicial feito através de lagoas anaeróbias em série se mostra como uma forma altamente vantajosa e o número de unidades é dimensionado para que o efluente final possa ser tratado em lagoas facultativas (DBO₅ < 500 mg/l, preferencialmente < 400 mg/l) (apud OESTREICH, 1989).

No entanto, segundo Uehara e Vidal (1989), deve-se ficar alerta para o fato de que taxas de aplicação superiores a 2.000 kg.DBO₅/ha.dia podem gerar odores fortes o suficiente para causar incômodos aos operadores (apud KELLNER e PIRES, 1998).

Os processos bioquímicos são variados e, por isso, existe uma gama grande de microrganismos envolvidos (VAN HAANDEL et al., 1999).

Os processos em lagoas anaeróbias são bastante mais complexos que nas lagoas aeróbias. O processo biológico nelas acontece na ausência de oxigênio, de modo que os organismos na digestão têm que remover o oxigênio dos compostos existentes no esgoto para poder oxidar a matéria orgânica e para manter sua energia vital (HESS et al., 1975; VAN HAANDEL et al., 1999).

Hess (1975, p. 68) explica que existem etapas pelas quais a lagoa anaeróbia passa assim que é posta em funcionamento:

- a) Nas primeiras semanas são metabolizados lipídios, hidratos de carbono e proteínas, formando grandes quantidades de ácidos orgânicos e matéria orgânica volátil desprovida de oxigênio. Nesse estado o pH baixa para um valor entre 5 e 6 e a lagoa apresenta odor desagradável;
- b) Num segundo momento surgem bactérias produtoras de metano e gás carbônico que usufruem dessa grande quantidade de ácidos orgânicos. O pH sobe para um valor em torno de 7,2 a 7,5. O odor começa a sumir;
- c) Aqui a lagoa entra em equilíbrio biológico, os ácidos orgânicos metabolizados são consumidos pelas bactérias produtoras de metano e gás carbônico; gases odoríficos são substituídos por outros compostos, como o gás sulfídrico substituído por sulfidrilas, praticamente inodoras; são formados nitritos e nitrogênio, fosfitos e fosfatos; a lagoa pode ser considerada inodora. Eventualmente pode acontecer de haver desequilíbrio ecológico, por razão de mudança de temperatura, por exemplo, que pode durar alguns dias ou semanas, mas devendo, em algum momento, voltar à normalidade.

A remoção de DBO se dá apenas a partir da segunda etapa, na transformação dos ácidos em metano, gás carbônico e água (VON SPERLING, 2002).

A temperatura tem grande influência na conversão do substrato e na taxa de reprodução das bactérias anaeróbias, responsáveis pela conversão da matéria orgânica, devendo a temperatura de operação, para haver eficiência na atividade anaeróbia, ser maior do que 15°C (MENDONÇA, 1990; VON SPERLING, 2002).

Lagoas anaeróbias geralmente requerem uma área muito menor que lagoas facultativas, pois são consideravelmente mais fundas, variando em torno de 3,5 a 5 metros, mas podendo chegar a profundidades maiores, caso o solo seja de fácil escavação e o lençol freático não seja muito superficial. Uma das principais vantagens em se associar lagoas anaeróbias a lagoas facultativas é a substancial diminuição de área que o sistema anaeróbio + aeróbio proporciona, uma área em torno de 45 a 70% menor em comparação ao de uma lagoa facultativa única (HESS et al., 1975; VON SPERLING, 2002).

De acordo com Mara (1997), a eficiência de remoção de DBO de uma lagoa aeróbica está estritamente ligada à temperatura ambiente (apud VON SPERLING, 2002).

Tabela 9 – Eficiência de remoção de DBO em lagoas anaeróbias, em função da temperatura

Temperatura média do ar no mês mais frio - T (°C)	Eficiência de remoção de DBO - E (%)
10 a 25	2T + 20
> 25	70

(fonte: MARA, 1997, p. 55)

A questão de gerenciamento de lodo deve ser cuidada nas lagoas anaeróbias, pois estas possuem um volume menor e o acúmulo de lodo se mostra um problema mais cedo, devendo serem limpas de forma sistemática uma vez ao ano ou, no máximo, quando atingirem 1/3 da altura útil (VON SPERLING, 2002).

Mendonça (1990) e Gonçalves (2000) sugerem uma taxa de acúmulo de 0,03 a 0,10 m³/hab.ano, sendo que em locais de climas mais quentes, predomina a menor taxa (apud VON SPERLING, 2002).

3.3.2 LAGOAS FACULTATIVAS

Lagoas facultativas são lagoas fotossintéticas das mais comuns, nas quais a estabilização da matéria orgânica se dá pelas atividades aeróbias que ocorrem na parte superior da lagoa e pelas atividades anaeróbias que se desenrolam no lodo sedimentado (HESS et al., 1975). O autor ainda afirma que o efeito prático é análogo ao das lagoas estritamente aeróbias.

Esse tipo de lagoa costuma receber o efluente bruto, ou que recebeu apenas tratamento preliminar (SILVA e MARA, 1979).

O oxigênio necessário para a manutenção aeróbia das camadas superiores se dá em parte pela reaeração da atmosfera em contato com a superfície, porém a maior parte é suprida pela ação fotossintética das algas, que crescem naturalmente em presença de quantidade grande de nutrientes e energia solar incidente (SILVA e MARA, 1979). Os autores ainda comentam que as lagoas deste tipo possuem coloração verde brilhante em função da proliferação destas algas.

Tabela 10 – Vinculação entre a cor da lagoa e a característica de funcionamento

Cor da Lagoa	Interpretação
<i>Verde escura e parcialmente transparente</i>	- Presença pouco importante de outros microrganismos no efluente - Altos valores de pH e OD - Lagoa em boas condições
<i>Verde amarelada ou excessivamente clara</i>	- Crescimento de rotíferos, protozoários ou crustáceos, que se alimentam das algas, podendo causar a sua destruição em poucos dias - Caso as condições persistam, haverá decréscimo do OD e eventual mau cheiro
<i>Acinzentada</i>	- Sobrecarga de matéria orgânica e/ou tempo de detenção curto - Fermentação na camada de lodo incompleta - A lagoa deve ser posta fora de operação
<i>Verde leitosa</i>	- A lagoa está em processo de auto floculação, decorrente de elevação do pH e da temperatura - Precipitação de hidróxidos de magnésio e de cálcio, arrastando consigo algas e outros microrganismos
<i>Azul esverdeada</i>	- Excessiva proliferação de cianobactérias - A floração de certas espécies forma natas que se decompõem facilmente, provocando a exalação de maus odores, reduzindo a penetração da luz e, em consequência, diminuindo a produção de oxigênio
<i>Marrom avermelhada</i>	- Sobrecarga de matéria orgânica - Presença de bactérias fotossintéticas oxidantes de sulfeto (requerem luz e sulfetos, utilizam CO ₂ como receptor de elétron, não produzem oxigênio e não contribuem para a remoção de DBO)

(fonte: VON SPERLING², 2002, p. 55)

² O autor indica que a tabela foi adaptada por ele de ARCEIVALA (1981); CETESB (1989).

O processo de remoção de poluentes se dá através da simbiose que a lagoa proporciona entre as algas e as bactérias. Parte dos sólidos em suspensão, incluindo os coloidais, sedimentam ou são precipitados com a ajuda dos sais presentes no esgoto. Estes sólidos sedimentados são decompostos de forma anaeróbia (ausência de oxigênio dissolvido) por microrganismos presentes no lodo de fundo, onde formam-se resíduos inertes, sais minerais, como fosfatos e nitratos, gás carbônico, água, metano e outros. Na parte mais superficial se encontra a zona aeróbia, onde a matéria orgânica dissolvida é decomposta por bactérias na presença de oxigênio, este último é suprido pela ação fotossintética das algas. As algas e bactérias geram um perfeito equilíbrio entre produção e consumo de oxigênio e gás carbônico (SILVA e MARA, 1979; VON SPERLING, 2002; HESS et al., 1975).

A mistura dentro das lagoas é feita principalmente pela ação dos ventos, o qual auxilia também na remoção de oxigênio, que com frequência se encontra em estado de supersaturação, causado pela ação fotossintética das algas (HESS et al., 1975; VON SPERLING, 2002). Silva e Mara (1979) comentam que a circulação causada pelo vento é uma das únicas formas pelas quais algumas algas não motoras conseguem entrar na zona fótica, que é a camada onde há penetração de luz solar, e, conseqüentemente permite que as algas realizem a fotossíntese. Os autores comentam ainda que a mistura também é responsável pelo transporte do oxigênio para as camadas mais inferiores e que uma boa mistura, por conseguinte, aumenta a carga de DBO que pode ser tratada por uma lagoa.

Von Sperling (2002) comenta que, além das zonas aeróbias e anaeróbias, há também a zona facultativa (que dá nome ao tipo de lagoa) onde pode ou não haver presença de oxigênio livre. “Na ausência de oxigênio livre, são utilizados outros receptores de elétrons, como nitratos (condições anóxicas) e sulfatos e CO_2 (condições anaeróbias) (VON SPERLING, 2002, p. 22).

Quando não há mistura, acontece o processo de estratificação térmica, onde as camadas mais quentes são separadas das mais frias por uma fina camada chamada de Termoclima. As algas não motoras decantam até o fundo, onde se tornam aeróbias e, ao invés de produzir oxigênio, acabam por utilizá-lo. As algas motoras fogem da parte superior da lagoa, por esta ser quente demais e formam uma camada espessa, logo acima da do Termoclima, que acaba por barrar a luz. Nessa situação há uma diminuição substancial na eficiência da lagoa (SILVA e MARA, 1979). Os autores comentam ainda que as lagoas possuem um ciclo diário de mistura, onde

durante a manhã, com algum vento, acontece o período de mistura completa, onde a temperatura é uniforme em todas partes da lagoa e durante intervalos de calmaria acontece a estratificação. Estas condições se revezam conforme a presença ou não da luz solar e da ação do vento.

Kellner e Pires (1998, p. 15) citam que, para lagoas facultativas, “em geral, essas unidades apresentam profundidades que variam de 1,00 a 1,50m e tempos de detenção hidráulicos próximos a 20 dias.” Já Von Sperling (2002) sugere que a faixa mais usual de profundidades varia de 1,50 a 2,00m e os tempos de detenção hidráulicos entre 15 e 45 dias.

3.3.3 LAGOAS DE MATURAÇÃO

Lagoas de maturação têm como objetivo principal a eliminação de organismos patogênicos. “As bactérias fecais e os vírus morrem em razoável espaço de tempo, devido ao que é para eles um meio inóspito. Os cistos e ovos dos parasitos intestinais [...] se sedimentam no fundo da lagoa, aonde eventualmente morrem” (SILVA e MARA, 1979, p. 91).

Kellner e Pires (1998) ainda mencionam que essas lagoas têm grande importância na remoção de nitrogênio e fósforo.

Dependendo do corpo receptor ou caso se opte pela reutilização do efluente final, para agricultura, aquacultura, entre outros, a qualidade do efluente se torna um dos principais fatores e a eliminação dos patogênicos é indispensável (KELLNER e PIRES, 1998).

Von Sperling (2002) comenta que as lagoas de maturação podem ser como uma etapa de polimento para qualquer sistema de tratamento de esgotos. O autor ainda define como um sistema típico de lagoas de estabilização uma lagoa anaeróbia, seguida de uma facultativa e uma série de lagoas de maturação.

Segundo Silva e Mara (1979), ocorre também uma certa remoção de DBO_5 durante a passagem do esgoto pelas lagoas de maturação, porém elas não são dimensionadas para este propósito. Os autores comentam que para um afluente a duas lagoas de maturação em série, com concentração de DBO_5 de 75 mg/l, o efluente final sai das lagoas com concentração de DBO_5 em torno de 25 mg/l.

Os fatores que mais influem na eliminação de organismos patogênicos e na diminuição de coliformes são: temperatura, insolação, pH, escassez de alimento, organismos predadores, competição, compostos tóxicos e sedimentação. Por consequência, lagoas de maturação normalmente são mais rasas, com profundidades que giram em torno de 0,8m a 1,00m, favorecendo uma elevada penetração de radiação solar, elevado pH, devido à elevada taxa fotossintética, que também aumenta a concentração de oxigênio dissolvido, auxiliando bactérias eficientes na remoção de coliformes (VON SPERLING, 2002; KELLNER e PIRES, 1998).

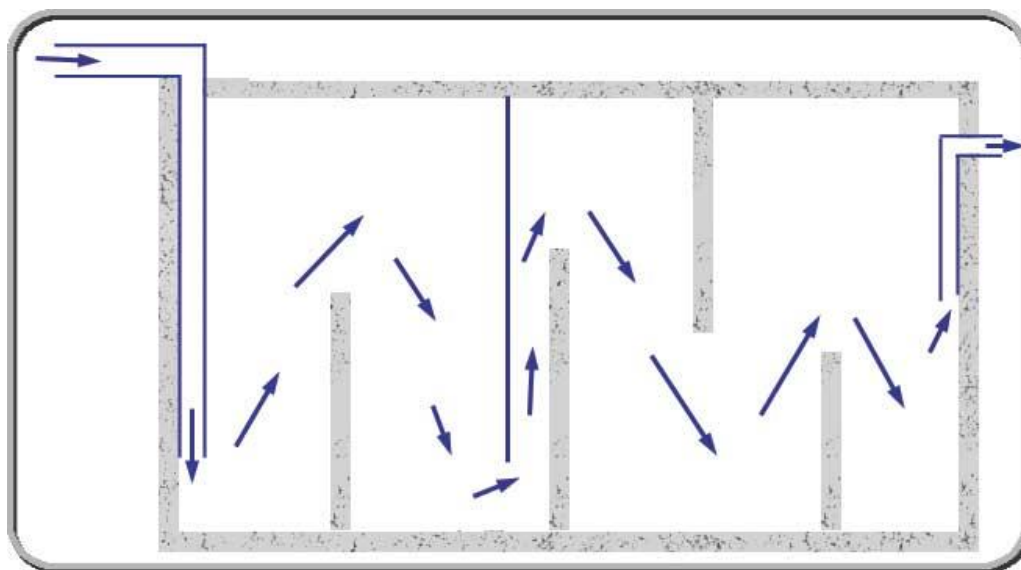
Além destes parâmetros, o tempo de detenção hidráulica é um fator importante na remoção de ovos de helmintos. Segundo Silva e Mara (1986) e Marais (1974), não há remoção efetiva destes organismos quando o tempo de detenção hidráulica é menor que 3,2 dias (apud KELLNER e PIRES, 1998).

A Organização Mundial de Saúde estabelece que, para uso de águas residuárias na agricultura, com irrigação restrita e irrestrita, objetivando um DALY $\leq 10^{-6}$ [*disability-adjusted life year* (ano de vida ajustado por incapacidade), unidade que representa anos de vida perdidos em função de doenças, deficiências ou morte prematura], a concentração de ovos de helmintos na água deve ser menor que 1 ovo/l, e, caso haja exposição de crianças com menos de 15 anos, esse valor deve ser diminuído a 0,1 ovo/l e/ou devem ser tomadas outras medidas, como uso de equipamentos de proteção (WHO, 2006, tradução nossa).

Von Sperling (2002) estabelece que as lagoas de maturação devem ser dimensionadas para atingir valores de remoção de coliformes acima de 99,99%. O autor ainda comenta, citando Arceivala (1981), que usualmente as lagoas removem com totalidade cistos de protozoários e ovos de helmintos, que são organismos não tão bem representados pela quantidade de coliformes na água. Geralmente, para atender essas taxas, são projetadas de 3 a 4 lagoas em série.

Caso opte-se por apenas uma lagoa de maturação, ao invés de uma série de lagoas, esta deve ser projetada com chicanas, como pode ser visto na Figura 2, a fim de forçar um percurso em zig zag (VON SPERLING, 2002).

Figura 2 – Modelo de lagoa com chicanas



(fonte: ³Site da EMBRAPA)

3.3.4 LAGOAS DE POLIMENTO

Van Haandel et al. (2001, p. 107) explicam que “[...] convém denominar as lagoas de pós-tratamento de efluentes de sistemas anaeróbios eficientes de lagoas de polimento (LP), distinguindo-as, assim, de lagoas de estabilização que tratam esgoto bruto.”

Usualmente, lagoas de polimento são empregadas para a remoção de microrganismos patogênicos (VAN HAANDEL et al., 2001).

Reatores anaeróbios, como o reator UASB, apresentam eficiência de remoção de DBO em torno de 60 a 80%, o que, na maior parte das vezes, é insuficiente para o lançamento direto em corpos receptores. As lagoas de polimento são uma alternativa muito atraente para o pós-tratamento destes efluentes, mantendo a simplicidade do sistema (VON SPERLING, 2002).

Na Tabela 11 podemos ver um apanhado das principais diferenças entre as lagoas de estabilização e as lagoas de polimento.

³ Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br/invtec/26.html>>. Acesso em jun. 2017.

Tabela 11 – Principais diferenças entre lagoas de estabilização e lagoas de polimento

Parâmetro	Lagoas de estabilização	Lagoa de polimento
Afluentes	Esgoto bruto	Esgoto digerido
Principal Objetivo	Remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão	Remoção de patógenos e/ou nutrientes
Configuração	Lagoas em Série (LA + LF + LM)	Lagoa unitária, em série ou paralelo (LP)
Área necessária	Muito grande (cerca de 3 m ² /hab)	Considerável (cerca de 1 a 2 m ² /hab)
Lodo no fundo	Acumulação rápida (250 mg/l)*	Acumulação lenta (70 mg/l)*
Regime de escoamento desejável	Mistura completa	Tubular
Odor	Maus odores e ocasionalmente terríveis odores	Sem problemas de odor
Remoção de nutrientes	Baixa	Remoção elevada de NH ₃ e PO ₄ factível sob condições favoráveis
Área de aplicação	Longe de regiões urbanas	Proximidade da população não é problema
Sistema de tratamento	Centralizado	Setorizado (são possíveis vários sistemas de tratamento em uma cidade)

* Tempo de limpeza: 3 a 5 anos (LA) e 15 a 25 anos (LP)

(fonte: VAN HAANDEL⁴ et al., 2001, p.109)

Uma das vantagens indiretas de se poder projetar um sistema UASB + lagoas de polimento perto ou dentro de áreas urbanas é a considerável economia com sistema de esgotamento sanitário (VAN HAANDEL et al., 2001).

Em lagoas de polimento de profundidade baixa (menores que 1 metro), há uma tendência ao pH se elevar, em decorrência da fotossíntese intensa ao longo da lagoa, o que propicia a volatilização da amônia e a precipitação de fosfatos, removendo, desta maneira, nitrogênio e fósforo do sistema. Porém, cabe salientar que só é conveniente remover estes nutrientes caso o receptor final sejam águas de superfície, para evitar a eutrofização. Caso o destino final seja irrigação, estes nutrientes podem substituir fertilizantes químicos, sendo muito mais importante mantê-los no efluente final (VAN HAANDEL et al., 2001; VON SPERLING, 2002).

Em caso de necessidade de redução de área das lagoas de polimento (ou mesmo das lagoas facultativas e aeróbias), pode-se utilizar de aeração mecanizada. A fonte de oxigênio deixa de ser fotossintética e passa a ser mecânica, deixando a remoção de nutrientes e matéria orgânica

⁴ Os autores citam como referência GONÇALVES (1999) e CAVALCANTI (2000)

primariamente às bactérias. Um problema que surge com essa opção é que o efluente final apresenta concentração considerável de sólidos suspensos e material biodegradável, devido à presença de flocos de lodo, gerados pela aeração mecânica (VAN HAANDEL et al., 2001).

3.3.5 DIMENSIONAMENTO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

De acordo com Filho (2007), primeiramente devem ser analisadas as características do local, como o relevo, a temperatura, radiação solar, ventos, etc. para que seja escolhido o espaço ideal para a implantação da(s) lagoa(s). Outro fator importante que deve ser observado é a permeabilidade do fundo da lagoa, buscando evitar solos muito permeáveis para que não haja contaminação do lençol freático e também para manter estável o nível da lagoa. Em certos casos, quando os outros fatores se mostrarem muito propícios, pode-se fazer a impermeabilização do fundo da lagoa por diversas maneiras, como com o uso de cimento asfáltico, camada de argila, solo-cimento, entre outros (FILHO, 2007).

Tabela 12 – Principais aspectos a serem analisados para decisão do local de implantação das lagoas de estabilização

Aspectos	Comentários
Disponibilidade de área	A disponibilidade de área pode conduzir à seleção do tipo de lagoa a ser adotado.
Localização da área em relação ao local de geração dos esgotos	A maior proximidade reduz os custos de transporte dos esgotos.
Localização da área em relação ao corpo receptor	A maior proximidade reduz os custos de transporte dos esgotos tratados ao local de destinação final.
Localização da área em relação às residências mais próximas	As lagoas anaeróbias necessitam de um afastamento mínimo em torno de 1000m das residências mais próximas, em função da possibilidade de maus odores; outros tipos de lagoas podem ter afastamento mais reduzido.
Cotas de inundação	Deve-se verificar se o terreno é inundável, e a que nível chegam as inundações, para a definição da altura dos taludes.
Nível do lençol freático	O nível do lençol freático pode determinar o nível de assentamento das lagoas e a necessidade de impermeabilização do fundo.
Topografia da área	A topografia da área tem grande influência no movimento de terra e, em outras palavras, no custo da obra; topografia pouco íngreme é preferível.
Forma da área	A forma da área influencia o arranjo das diversas unidades em planta; podem-se aproveitar as curvas de nível, desde que de forma suave, evitando-se a criação de zonas mortas.
Características do solo	O tipo de solo tem grande influência no planejamento da compensação entre o corte e o aterro, na necessidade de material de empréstimo, na inclinação dos taludes, nos custos da obra (ex.: pedras) e na necessidade de impermeabilização do fundo.
Ventos	A localização da lagoa deve permitir o livre acesso do vento, o qual é importante para se garantir uma mistura suave na lagoa.
Legislação	Verificar legislação local, regional ou federal, com o intuito de auxiliar no grau de tratamento necessário.
Alternativas de reuso	O estudo das alternativas, em conjunto com a legislação pertinente, traz consigo respostas para aproveitamento do efluente tratado.
Condição de acesso	O acesso das equipes de obra e das futuras equipes de operação e manutenção não deve ser difícil.
Facilidade de aquisição do terreno	Dificuldade na desapropriação de áreas pode ser um elemento de inviabilização da locação da lagoa na área pretendida.
Custo do terreno	Em áreas urbanas ou próximas a áreas urbanas ou de algum elemento de importância, o custo do terreno pode ser bastante elevado, conduzindo à necessidade de se adotarem soluções mais compactas.

(fonte: FILHO⁵, 2007, p. 36)

⁵ O autor cita como referência: Espana (1991) e Von Sperling (2002)

Filho (2007) ressalta que, para que o nível da lagoa se mantenha estável, o balanço hídrico deve se manter constante, de acordo com os parâmetros descritos a seguir:

$$Q_{med} \geq 0,001 \cdot A_t \cdot [(P - E) + I] \quad (1)$$

Onde:

Q_{med} = vazão média do afluente ao sistema (m^3/s);

A_t = área total das lagoas (m^2);

P = precipitação média mensal convertida em média diária (mm/dia);

E = evaporação média mensal convertida em média diária (mm/dia);

I = taxa de infiltração (mm/dia).

Sobre as formas das lagoas, “[...] as ideais [...] são regulares, sem reentrâncias, sem baías, com cantos arredondados e diques formando ângulos retos ou obtusos” (NETTO, 1985, p. 46). O autor ainda afirma que o formato mais usual é o retangular, com cantos redondos com raio de 12 metros. A direção principal da lagoa segue a direção dos ventos e a relação comprimento/largura destas costuma ficar entre 2:1 e 4:1.

Netto (1985) afirma que as profundidades usualmente adotadas são:

Tabela 13 – Profundidades usuais das lagoas de estabilização

Lagoas Anaeróbicas	2,5 m a 4,5 m
Lagoas Facultativas	1 m a 2 m
Lagoas Aeróbicas	0,25 m a 0,45 m
Lagoas de Maturação	1 m a 2 m
Lagoas Aeradas	2,5 m a 5 m

(fonte: NETTO, 1985, p. 46)

Em casos de lagoas com superfície grande, onde a ação do vento consegue realizar uma boa agitação e mistura de oxigênio na água, podem ser adotadas profundidades maiores (NETTO, 1985).

Ao calcular-se a profundidade da lagoa também deve-se levar em consideração a sedimentação das partículas do esgoto em forma de lodo no fundo da lagoa. Esta camada cresce gradualmente conforme o uso da lagoa, de acordo com a taxa de aplicação da lagoa (NETTO, 1985).

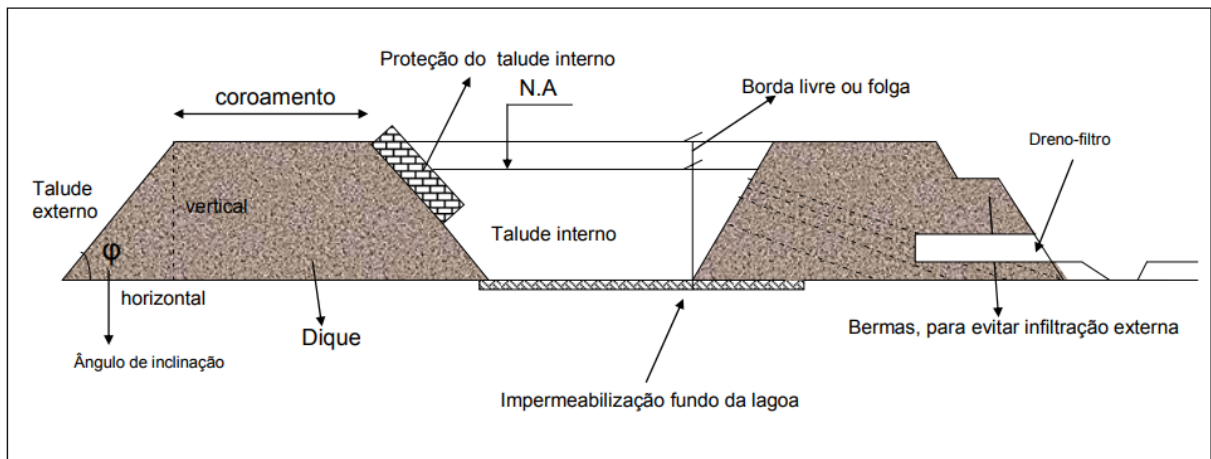
Tabela 14 – Acumulação de lodo de acordo com a taxa de aplicação

Taxa de aplicação	Acréscimo anual de Lodo
100 kg DBO ⁵ /ha	2,5cm
200 kg DBO ⁵ /ha	5,0 cm
300 kg DBO ⁵ /ha	7,5 cm

(fonte: NETTO, 1985, p. 47)

Diques são estruturas laterais que dão sustentação às lagoas e seus taludes internos e externos também devem ser devidamente dimensionados. A figura e a tabela a seguir mostram os principais detalhes de um dique (FILHO, 2007).

Figura 3 – Detalhes e elementos de um dique de lagoa de estabilização



(fonte: FILHO, 2007, p. 45)

Tabela 15 – Aspectos construtivos dos taludes de lagoas de estabilização

Item	Comentários
Inclinação do talude interno	<ul style="list-style-type: none"> • Inclinação usual: 1:2 a 1:3 • Inclinação mínima: 1:6 (V/H), evitar áreas com pouca profundidade, possibilitando crescimento de vegetação. • Inclinação máxima: 1:2 (função da estabilidade do terreno) • Terrenos argilosos: inclinação superior a 1:2 • Terrenos arenosos: inclinação entre 1:3 a 1:6
Inclinação do talude externo	<ul style="list-style-type: none"> • Inclinação usual: 1:1,5 a 1:2 • Terrenos argilosos: inclinação superior a 1:2,5 • Terrenos arenosos: inclinação entre 1:5 a 1:8
Coroamento do talude (pista na crista do talude)	<ul style="list-style-type: none"> • Largura superior a 1,5m; usualmente entre 2,0m e 4,0m. Esta dimensão deve permitir a movimentação das máquinas durante a construção, o tráfego das equipes de manutenção e operação e a possibilidade de acréscimo da altura do dique, se necessário.
Borda livre ou folga	<ul style="list-style-type: none"> • Pequenas lagoas (< 1ha de área): adotar 0,5m; entre 1-3 ha: 0,5-1,0m • Lagoas maiores, usa-se a fórmula: borda livre = $[\log (\text{Área}_{\text{nível médio lagoa}})]^{0,5} - 1$. (área em m²). • Finalidades: segurança contra aumento do nível d'água além das condições de projeto (obstrução da saída, efeito de ventos fortes, nova concepção de projeto) e segurança contra recalque do terreno devido ao eventual afundamento do próprio dique.
Impermeabilização	<ul style="list-style-type: none"> • Caso o material do dique seja extremamente permeável, pode ser necessária a impermeabilização do maciço do dique com a argila, geomembranas, estacas-pranchas ou lajes de concreto. • Após compactação, o coeficiente de permeabilidade deve ser $< 10^{-7}$ m/s.
Proteção dos taludes internos	<ul style="list-style-type: none"> • Os taludes internos, no ponto de contato com o nível da água, devem ser protegidos contra as ondas, erosão e crescimento de vegetais. • O crescimento de vegetação possibilita o desenvolvimento de mosquitos nas lagoas (ovos postos na água, na sombra causada pela vegetação). • Os tipos de proteção mais empregados são o rip-rap (pedras com tamanhos de 15-20cm), lajes de concreto (espessura entre 7-13cm, levemente armada), placas de concreto, argamassa armada, pavimentação asfáltica ou geomembrana. • Proteção descontínua com pedras possibilita o crescimento de vegetação. • A proteção deve se estender por pelo menos 0,5 m acima e 0,5m abaixo do nível d'água. • Acima da proteção deve-se colocar brita ou grama no restante do talude.
Talude externo	<ul style="list-style-type: none"> • O talude externo deve ser gramado, de forma a proteger contra a erosão.
Canto dos taludes	<ul style="list-style-type: none"> • As esquinas das lagoas devem ser ligeiramente arredondadas, visando facilitar a construção e a manutenção, e evitando pequenas zonas mortas.
Material dos taludes	<ul style="list-style-type: none"> • Os diques devem ser construídos de terra, de preferência do próprio local ocupado. O material deve ser denso, fino, coeso e bem granulado. • A sua constituição deve ser de (a) terra limpa, isenta de pedras e matéria orgânica e (b) de argila com um pouco de areia.
Drenagem pluvial	<ul style="list-style-type: none"> • Em lagoas que possuam alguma lateral constituída por um talude natural (ex: morro), deve-se efetuar a drenagem pluvial através de canaletas paralelas a esta lateral, evitando a passagem da água pluvial por cima do talude.
Bermas	<ul style="list-style-type: none"> • As bermas devem ser construídas nos diques externos ou internos, quando o terreno for muito permeável, evitando assim a infiltração.

(fonte: FILHO⁶, 2007, p. 36)⁶ Adaptado pelo autor de: Von Sperling (2002) e Oakley (2005)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 O POLO PETROQUIMICO DO SUL E A ETE DA SITEL

A estação de tratamento da Superintendência de Tratamento de Efluentes Líquidos e Resíduos Sólidos (SITEL) é responsável pelo serviço de tratamento dos resíduos sólidos e líquidos produzidos pelo Polo Petroquímico do Sul, localizado na cidade de Triunfo, no Estado do Rio Grande do Sul. Ela entrou em operação em novembro de 1982, após cerca de um ano e meio de construção. Em 1983 começaram a ser feitos os testes dos efluentes para a primeira e segunda fase do tratamento; as lagoas de polimento ainda se encontravam em fase de construção.

O Polo é um complexo industrial formado pelas empresas: Arlanxeo, Braskem, BRK Ambiental, Innova, Oxiteno e White Martins. Além destas, segundo a Licença de Operação da SITEL, está autorizado o recebimento de efluente industrial da empresa HEXION QUÍMICA DO BRASIL LTDA. Os produtos produzidos pelas empresas do polo têm como matéria prima a nafta; desta derivam o eteno, propeno, butadieno e solventes, os quais são posteriormente transformados em produtos como polietileno de alta densidade, polipropileno, borracha sintética, metiltilcetona, etilbenzeno, estireno, e poliestireno. Estes últimos, por sua vez, são matéria prima de inúmeros produtos de diversas indústrias. Uma vista superior do Polo pode ser vista na Figura 4, abaixo.

Tendo em vista a multiplicidade de produtos desenvolvidos no polo, podemos concluir que também os efluentes gerados pelas empresas são diferentes entre si, tornando mais complexa a questão dos seus tratamentos.

Os efluentes dessas indústrias são divididos em dois: orgânico e inorgânico. O efluente inorgânico é pré-tratado pelas empresas antes de ser enviado à estação de tratamento da SITEL. O efluente orgânico é proveniente de caixas de gordura, fossas sépticas e banheiros químicos.

Figura 4 – Complexo Industrial Polo Petroquímico do Sul

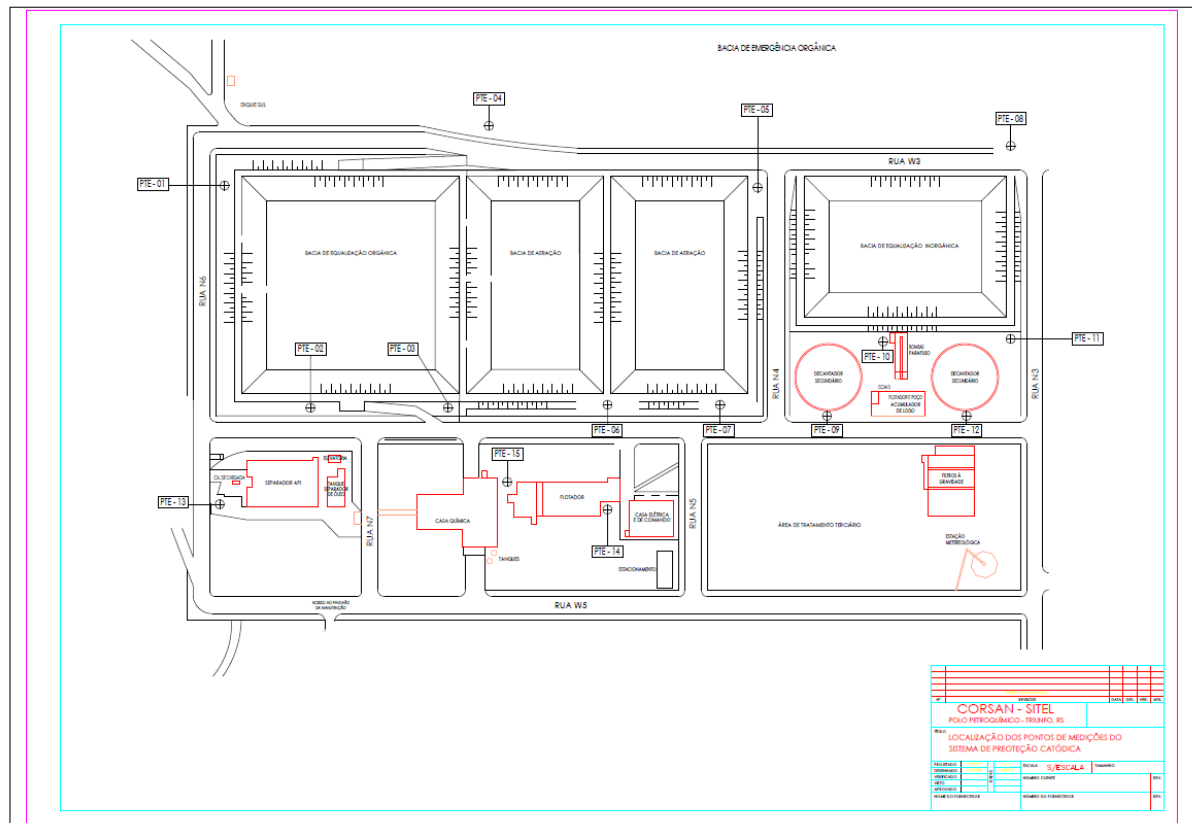


(fonte: ⁷ Site do Polo Petroquímico do Sul)

O afluente orgânico que chega à SITEL passa, em sequência, pelos seguintes processos de tratamento: grade mecânica, separador API (de onde os óleos vão para o tanque de separação de óleos), bacia de equalização orgânica (Figura 6), caixa de mistura rápida (onde são acrescentados sulfato de alumínio, hidróxido de cálcio, ácido sulfúrico e polieletrólitos, para precipitação de compostos), floculador, flotador, ajuste de pH, bacia de aeração com lodos ativados, decantadores, e, por fim, é misturado ao afluente inorgânico e segue para as oito lagoas de polimento em série. Anteriormente, o afluente orgânico ainda passava por filtro à gravidade antes de prosseguir às lagoas, porém o mesmo se encontra desativado no momento por ser julgado ineficiente para remoção de poluentes. Na Figura 5 abaixo, podemos ver o uma planta baixa com as principais etapas de tratamento da estação da SITEL.

⁷ Disponível em: <<http://www.falecomopolo.com.br/polo>>. Acesso em jan. 2017.

Figura 5 – Planta simplificada das etapas de tratamento da SITEL



(fonte: planta fornecida pela SITEL)

O efluente inorgânico também passa por bacia de equalização antes de ser misturado ao efluente orgânico.

O sistema de tratamento ainda conta com bacias de emergência, tanto para o afluente orgânico quanto para o inorgânico e é utilizado em casos de excesso de volume ou quando é identificado uma sobrecarga de algum composto. Neste último caso o afluente sobrecarregado é tratado aos poucos quando a situação de sobrecarga é normalizada.

Figura 6 – Bacia de Equalização Orgânica à esquerda, Bacia de Emergência Orgânica ao fundo



(fonte: autor)

O lodo excedente produzido pelo tratamento biológico dos efluentes é disposto nas chamadas “Fazendas de Lodo” (figura 7), conforme projeto aprovado pela FEPAM e disposto na licença de operação da SITEL. São 8 fazendas ao total, nas quais o lodo é disposto em revezamento.

Há um grande controle sobre estas fazendas, a fim de manter a qualidade da fauna e flora e aumentar a vida útil das fazendas, monitorando a quantidade de lodo disposto no solo e também os totais acumulados de poluentes no mesmo.

As 8 (oito) lagoas estabilização da SITEL operam em série e servem como tratamento terciário (polimento) dos efluentes orgânicos e inorgânicos. De acordo com o manual de OPERAÇÃO DAS LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO (código POP-DEOM-077) da SITEL, as lagoas “[...] são impermeabilizadas por camada de argila compactada com coeficiente $K=10^{-7}$ cm/s”. Na tabela 16 pode-se ver os principais parâmetros de projeto das lagoas de polimento da SITEL.

Figura 7 – Fazenda de lodo – campo 8



(fonte: autor)

A medição do afluyente unificado (orgânico + inorgânico) à primeira lagoa é medido através de uma calha Parshall, usando um medidor ultrassônico. A interligação das lagoas através de bueiros e vertedouros possibilita manter os níveis das lagoas ideais. A altura da lâmina d'água nas lagoas é verificada todos os dias, manualmente, pelas equipes de turno, e lançadas em planilhas de controle.

Tabela 16 - Características Básicas Das Lagoas De Estabilização (Tratamento Terciário)

LAGOA N°	ÁREAS (há)	COTA DE FUNDO (m)	PROFUNDIDADE (m)			VOLUME (m³)		
			MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
1	8,5	2,50	1,25	1,50	2,00	106.205	127.500	170.000
2	12	2,25	1,25	1,50	2,25	180.000	198.000	270.000
3	12	2,00	1,50	1,57	2,26	188.400	210.000	271.200
4	7,6	2,00	1,25	1,50	2,25	114.000	136.000	171.000
5	5	2,00	1,25	1,50	2,01	113.400	135.000	180.000
6	4,1	2,00	1,25	1,50	2,00	62.500	75.000	100.000
7	2	1,75	1,00	1,50	2,00	41.000	61.500	82.000
8	2,3	1,75	1,00	1,50	2,00	23.000	34.500	46.000
TOTAL	53,5					828.505	977.500	1.290.200
TEMPO DE DETENÇÃO ESTIMADO NAS LAGOAS DE ESTAB. (considerando 29.117 m³/dia)						29 DIAS	32 DIAS	44 DIAS

(fonte: OPERAÇÃO DAS LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO, código POP-DEOM-077, CORSAN, 2017)

Ocorre geração de lodo nas lagoas, decorrente de deposição de algas e do corte de vegetação dos taludes/aguapés/marrequinhas, com presença de metais pesados e outros compostos presentes do efluente tratado. É feita uma avaliação periódica do nível de lodo de fundo nas lagoas 01 e 08, afim de manter a capacidade de contenção volumétrica e também objetivando manter a lâmina d'água na faixa recomendada mínima, evitando o arraste de lodo para as redes de disposição final (solo). Segundo um levantamento de 2000, havia um acúmulo de lodo na lagoa 8 de aproximadamente 7% do volume total. Até o ano de 2017 o percentual ainda não interferia significativamente em relação ao arraste de sólidos para a disposição final. Prevê-se um novo levantamento para daqui 10 anos.

Tanto níveis de volume muito baixos quanto muito altos não são bons para a operação das lagoas e devem ser evitados. Quando muito alto, há risco de transbordamento ou ruptura dos taludes, e, no caso oposto, quando muito baixo, pode ocorrer arraste de sólidos de fundo e também baixa concentração de oxigênio. No último caso, deve-se avaliar a possibilidade de interromper a disposição do efluente final até o volume d'água normalizar.

4.2 COLETA E AMOSTRA DE DADOS

Conforme a Licença de Operação da SITEL, uma série de análises devem ser feitas (ver tabelas 6 e 7), a fim de constatar a eficiência do tratamento do efluente e sua conformidade com os padrões de disposição no solo.

No presente trabalho, se fará uma avaliação da eficiência do tratamento terciário (lagoas de estabilização/polimento) através de uma amostra de dados dos anos de 2015 e 2016, fornecida pela equipe da SITEL.

A coleta de dados do afluente à lagoa 1 (um) é feita trimestralmente, ou seja, há 4 (quatro) análises por ano, enquanto a análise do efluente da lagoa 8 (oito) é muito mais recorrente, havendo dados mensais sobre os parâmetros (conforme tabela 7).

A partir dos dados fornecidos, foi feita uma análise dos seguintes parâmetros:

- 1) DQO (mg O₂/L);
- 2) Oxigênio Dissolvido (mg O₂/L);

- 3) Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L);
- 4) Sólidos Suspensos Totais (mg/L);
- 5) Alumínio (mg/L);
- 6) Cromo (mg/L);
- 7) Cianetos (mg/L);
- 8) Ferro (mg/L);
- 9) Fósforo (mg/L);
- 10) Zinco mg/L);
- 11) Nitrato (mg/L);
- 12) Nitrito (mg/L);
- 13) Nitrogênio Amoniacal (mg/L);
- 14) Nitrogênio Kjeldahl Total (mg/L);

Segundo Cavalcanti (2012), a indústria de produtos petroquímicos básicos também produz despejos contendo óleos e graxas, porém este parâmetro não é analisado nas amostras trimestrais do afluente à lagoa 1 (um), impedindo a análise da eficiência das lagoas de polimento apenas, portanto será feita uma análise da eficiência do tratamento completo para este parâmetro.

Além dos parâmetros acima mencionados, foram monitorados também pH e temperatura d'água, mostrados apenas na tabela comparativa com os limites estabelecidos na LO.

Uma sucinta análise operacional das lagoas também será feita, baseada nos dados, também fornecidos pela SITEL, de monitoramento nos mesmos anos (2015 e 2016), analisando-se volume, altura da lâmina d'água e TDH.

As análises das amostras coletadas de efluentes são feitas pelo próprio laboratório da SITEL, que dispõe de todos os equipamentos necessários para tal. A maior parte das análises segue o *Standard Methods for the Examination of Water*, que relaciona diversas técnicas padronizadas para determinação da qualidade do efluente. A tabela a seguir mostra os parâmetros que serão estudados e seus respectivos métodos de análise.

Tabela 17 – Métodos aplicados nas análises

Parâmetro	Unidade	Metodologia	LD
DQO	mg O ₂ /L	Titulométrico / SMEWW - 5220 B	6,8
OD	mg O ₂ /L	Eletrodo de Membrana / SMEWW - 4500 - OG	-
SDT	mg/L	Gravimétrico / SMEWW - 2540 C	1
SST	mg/L	Gravimétrico / SMEWW - 2540 D	1
Al	mg/L	Espectometria por Absorção Atômica / SMEWW - 3113 B	0,027
Cr	mg/L	Espectometria por Absorção Atômica / SMEWW - 3113 B	0,4
Cianetos	mg/L	Colorimétrico / SMEWW – 4500-CN – C e E	0,002
Ferro	mg/L	Espectometria por Absorção Atômica / SMEWW - 3113 B	0,1
Fósforo	mg/L	Espectrofotométrico / SMEWW - 4500-P - E	0,02
Zinco	mg/L	Espectrometria por Absorção Atômica / SMEWW - 3111 B	
Nitrato	mg/L	Colorimétrico	0,05
Nitrito	mg/L	Espectrofotométrico / SMEWW - 4500-NO ₂ - B	0,01
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	Colorimétrico / SMEWW – 4500-NH ₃ – C (18ª ed.)	0,03
Nitrogênio Kjeldahl	mg/L	Calculado SMEWW – 4500-NH ₃ - C e SMEWW – 4500-N org - B	-
Óleos e Graxas	mg/L	5520 B e D Soxhlet Extraction Method	1,04

(fonte: adaptado de Relatório de Ensaio nº 13100/16, SITEL-CORSAN, 2016)

4.3 ANÁLISES DE DADOS

A SITEL faz uma análise de parâmetros na lagoa 1 (um) trimestralmente, ou seja, são 4 (quatro) dados por ano, centrados nos meses de março, junho, setembro e dezembro. Já o efluente da lagoa 8 (oito) é analisado conforme Licença de Operação, descrita no capítulo 3.2, havendo uma gama de dados de saída muito maior. Levando em conta esse tipo de amostragem, se fará uma média trimestral dos parâmetros analisados da lagoa 8 (oito), centrados nos meses em que há análise de dados da lagoa 1 (um). Por exemplo, tomando a análise no mês de março na lagoa 1 (um), se fará uma média dos meses de fevereiro, março e abril para os dados coletados do efluente da lagoa 8 (oito) e, assim, consecutivamente. Os dados obtidos são referentes aos anos de 2015 e 2016.

Os dados serão analisados através de: valor mínimo, valor máximo, média maior (quando não se é detectado o parâmetro através do método de análise, usa-se o valor de limite detectável, exposto na tabela 17), média menor (para valores não detectados, usa-se o valor zero), mediana e desvio padrão.

A eficiência de remoção será calculada através da seguinte fórmula:

$$E = \frac{C_a - C_e}{C_a} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

E = eficiência da remoção (%);

C_a = Concentração afluyente (mg/L);

C_e = Concentração do efluente (mg/L).

Os resultados de eficiências de remoção serão comentados e comparados com a literatura. Posteriormente será feita uma comparação com os limites propostos pela FEPAM através da Licença de Operação para verificar se os parâmetros atingem os valores para disposição do efluente final no solo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui serão mostrados e discutidos os resultados das análises dos parâmetros citados, conforme descrito no capítulo anterior.

5.1 DQO

Os valores de DQO na lagoa 1 (um) ficaram na faixa entre 49,9 e 74,8 mg O₂/L. O tratamento secundário (lodos ativados + decantadores) proporciona remoção de DQO de forma que o afluente à lagoa 1 (um) já chega com concentração bastante baixa de DQO.

Já os valores de DQO no efluente da lagoa 8 (oito) ficaram entre valores de 33,6 e 92,8 mg O₂/L.

A eficiência da lagoa na remoção desse parâmetro se mostrou ineficiente, sendo, na verdade, negativa. Uma das explicações é que o efluente que chega às lagoas de polimento já teve a maior parte da matéria orgânica de fácil degradação removida pelo sistema de lodos ativados e decantadores, sobrando apenas a matéria orgânica mais difícil de ser tratada (VON SPERLING et al., 2009).

Tabela 18 – Eficiência na remoção de DQO das lagoas de polimento

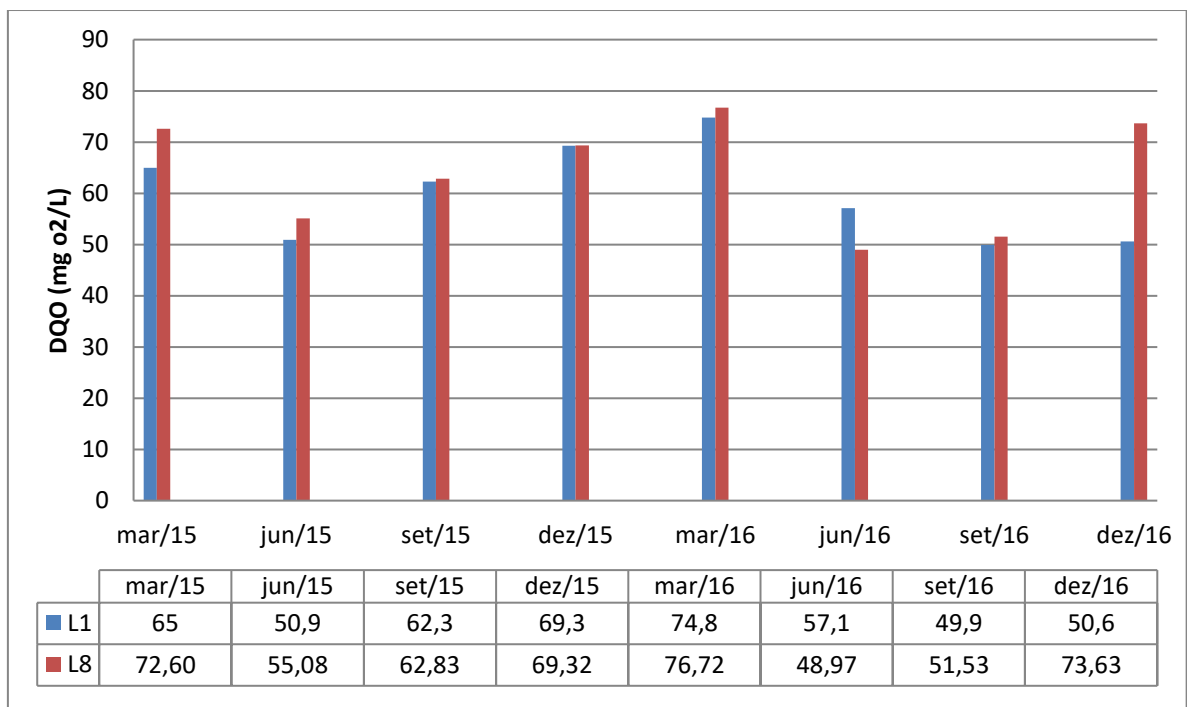
	DQO (mg O ₂ /L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	50,900	33,600	49,900	37,700
Média Menor	61,875	64,958	58,100	62,713
Mediana	63,650	66,450	53,850	59,750
Média Maior	61,875	64,958	58,100	62,713
Valor Máximo	69,300	92,300	74,800	92,800
Desvio Padrão	7,864	18,262	11,596	16,226
Eficiência	-4,98%		-7,94%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Uma das explicações possíveis para o aumento de carga orgânica é que, visto que há remoção de nutrientes, conforme se verá a seguir, ocorre o crescimento de algas nas lagoas, e parte dessas algas pode se desprender do fundo e se misturar ao efluente, adicionando carga orgânica ao mesmo.

O gráfico abaixo exemplifica melhor a situação da eficiência de remoção de DQO das lagoas de polimento. Pode-se notar uma tendência de a DQO permanecer mais baixa nos meses mais frios e mais alta nos meses mais quentes.

Figura 8 – DQO média nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

De modo geral, os valores de DQO se encontram abaixo do limite estabelecido pela LO, tanto na entrada quanto na saída do sistema de lagoas de polimento, sendo que o sistema não interfere significativamente na mudança desse parâmetro.

5.2 OXIGÊNIO DISSOLVIDO

De acordo com Von Sperling et. al. (2009) espera-se, nas lagoas de polimento, uma produção de oxigênio dissolvido, devido à prevalência de processos fotossintéticos e baixa demanda

oxigênio. Esse caso não se observou no sistema de lagoas da SITEL, onde houve uma redução de, em média, 41,84% deste parâmetro.

Tabela 19 – Remoção de OD nas lagoas de polimento

	OD (mg O ₂ /L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	6,200	7,200	9,500	6,400
Média Menor	16,075	9,300	12,100	7,075
Mediana	18,400	8,100	10,400	6,700
Média Maior	16,075	9,300	12,100	7,075
Valor Máximo	21,300	13,800	18,100	8,500
Desvio Padrão	6,850	3,034	4,023	0,974
Eficiência	42,15%		41,53%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

O teor de saturação de oxigênio dissolvido na água varia de acordo com a altitude, temperatura e salinidade da água, ficando, geralmente, entre 8 e 9 mg/L a 20°C e pressão atmosférica de 1 atm. Isso significa que o tratamento secundário está gerando um elevado teor de oxigênio dissolvido, acima do teor de saturação, principalmente através dos tanques de aeração. Naturalmente, o oxigênio dissolvido sai do sistema pela interface ar/água nas lagoas de polimento. Os valores de saída são condizentes com os valores de saturação de oxigênio dissolvido na água. A licença de operação não exige medição deste parâmetro, que é analisado por opção da SITEL, a fim de evitar mortandade de peixes e outros organismos aquáticos em função de níveis muito baixos de oxigênio dissolvido.

5.3 SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS

Na lagoa 1 (um) os valores de sólidos dissolvidos ficaram entre 872 e 1266 mg/L. Já na lagoa 8 (oito), estes valores ficaram entre 556,00 e 1290,00 mg/L.

A eficiência na remoção de sólidos dissolvidos foi relativamente baixa e mais homogênea, alcançado uma média de 23,72% em 2015 e 10,44% no ano de 2016. A tabela abaixo traz uma análise estatística dos dados.

Tabela 20 –Eficiência na remoção de SDT nas lagoas de polimento

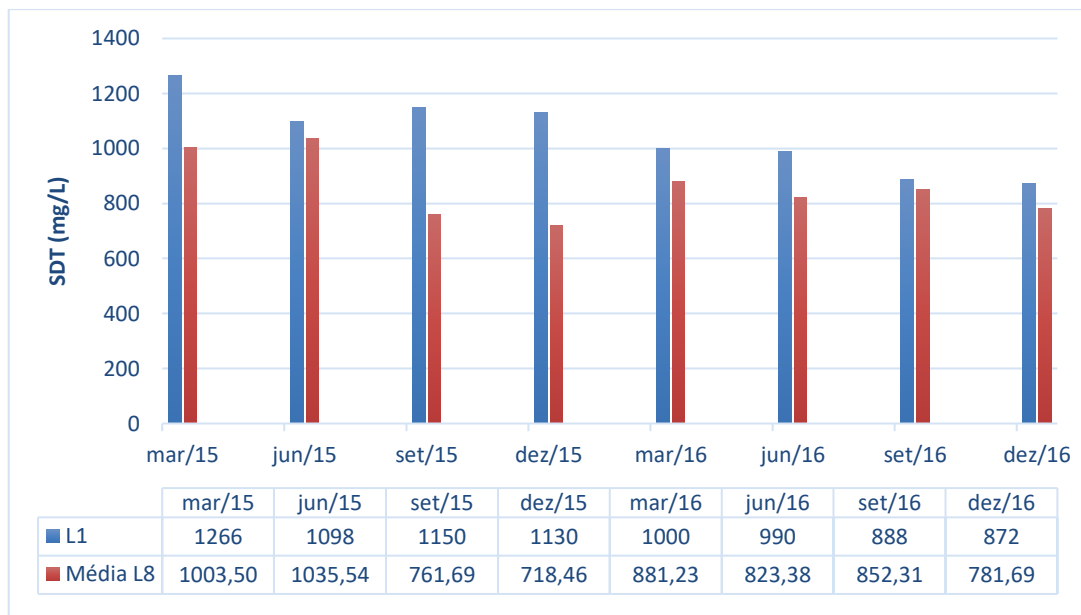
	SDT (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	1.098,00	556,00	872,00	580,00
Média Menor	1.161,00	882,04	937,50	839,64
Mediana	1.140,00	844,00	939,00	852,00
Média Maior	1.161,00	882,04	937,50	839,64
Valor Máximo	1.266,00	1.290,00	1.000,00	1.050,00
Desvio Padrão	73,20	197,55	66,84	108,42
Eficiência	23,72%		10,44%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Os valores do afluente à lagoa 1 (um) já atendiam o padrão de lançamento de SDT < 2.000 mg/L e a série de lagoas de polimento obteve significativo sucesso na remoção desses sólidos dissolvidos, com as médias na saída variando entre 839,64 e 882,04 mg/L para os anos de 2016 e 2015, respectivamente.

A carga aplicada na lagoa 1 (um), considerando-se a vazão de projeto de 18.750 m³/dia (valor bem próximo da realidade, será comentado melhor na avaliação operacional) e a área de 8,5 ha, girou em torno de 231,45 g/m².dia.

Figura 9 – SDT médios nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Pode-se notar que houve uma diminuição gradual na concentração de SDT conforme o passar do tempo. Isso pode ser explicado por uma melhora no pré-tratamento realizado pelas empresas, ou um aumento de eficácia do próprio tratamento da SITEL.

5.4 SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

Diferentemente dos sólidos dissolvidos, no caso dos suspensos, a eficiência de remoção deixou a desejar. Os valores de entrada ficaram entre 12 e 34 mg/L e na saída entre 14 e 128 mg/L, resultando em uma adição média de sólidos suspensos.

Essa adição foi em média de 164,34% em 2015 e de 135,37% em 2016, conforme explicita o gráfico abaixo.

Tabela 21 –Eficiência na remoção de SST nas lagoas de polimento

	SST (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	12,00	16,00	14,00	14,00
Média Menor	21,50	56,83	20,50	48,25
Mediana	20,00	56,00	19,00	44,00
Média Maior	21,50	57,38	20,50	48,25
Valor Máximo	34,00	128,00	30,00	96,00
Desvio Padrão	9,29	22,26	6,81	21,05
Eficiência	-164,34%		-135,37%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

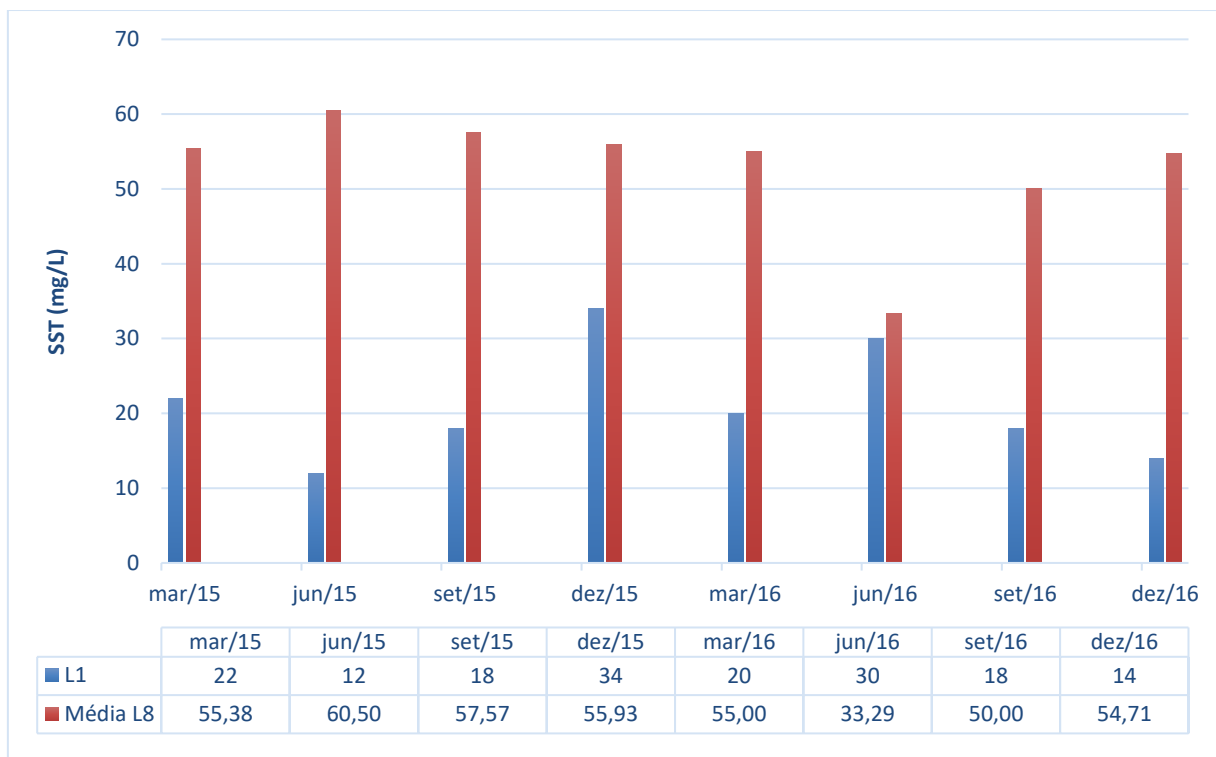
De acordo com Chernicharo (2007, apud RODRIGUES et. al., 2009, p. 1429), um pré-tratamento anaeróbio eficiente facilita a remoção de sólidos suspensos em um sistema de lagoas de polimento com um TDH muito inferior. Segundo o mesmo autor, um fator que pode influenciar uma baixa remoção de sólidos suspensos é a quantidade de algas que podem estar saindo junto com o efluente.

De acordo com Sato et. al (2006, apud NASCIMENTO, 2014, p. 31), que estudaram o desempenho de lagoas de polimento na Índia, valores altos de SST encontrados por eles no efluente final do sistema de tratamento foram associados a sólidos advindos de um reator UASB, por causa de uma periodicidade baixa de descarte de lodo do mesmo. Essa situação de

descarte pode estar ocorrendo também nos decantadores (parte do tratamento secundário) da SITEL, explicando uma maior concentração de SST no efluente final. Nascimento (2014) ainda comenta que valores elevados de sólidos, associados a um pH neutro, valores baixos de OD e TDH podem influenciar negativamente a remoção de coliformes termotolerantes.

A elevação da concentração de sólidos suspensos, relacionada ao crescimento de algas e sua adição ao efluente, corrobora a explicação do aumento de DQO no sistema, onde parte das algas é carregada junto ao efluente final.

Figura 10 – SST médios nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

A licença de operação da SITEL não limita a concentração máxima de sólidos suspensos para a disposição final do efluente.

5.5 ALUMÍNIO

Os valores médios de alumínio na lagoa 1 (um) variaram entre 0,44 e 0,71 mg/L em 2016 e 2015, respectivamente. Já na saída da lagoa 8 (oito), as médias ficaram entre 2,48 e 2,88 mg/L, resultando em um acréscimo de alumínio no decorrer das lagoas. Esse aumento foi de 308,57% em 2015 e 459,57% em 2016.

Tabela 22 – Eficiência na remoção de Alumínio nas lagoas de polimento

	Alumínio (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	0,49	0,29	0,30	0,22
Média Menor	0,71	2,88	0,44	2,48
Mediana	0,62	3,30	0,47	2,05
Média Maior	0,71	2,88	0,44	2,48
Valor Máximo	1,10	4,90	0,54	5,00
Desvio Padrão	0,28	1,41	0,10	1,47
Eficiência	-308,57%		-459,57%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

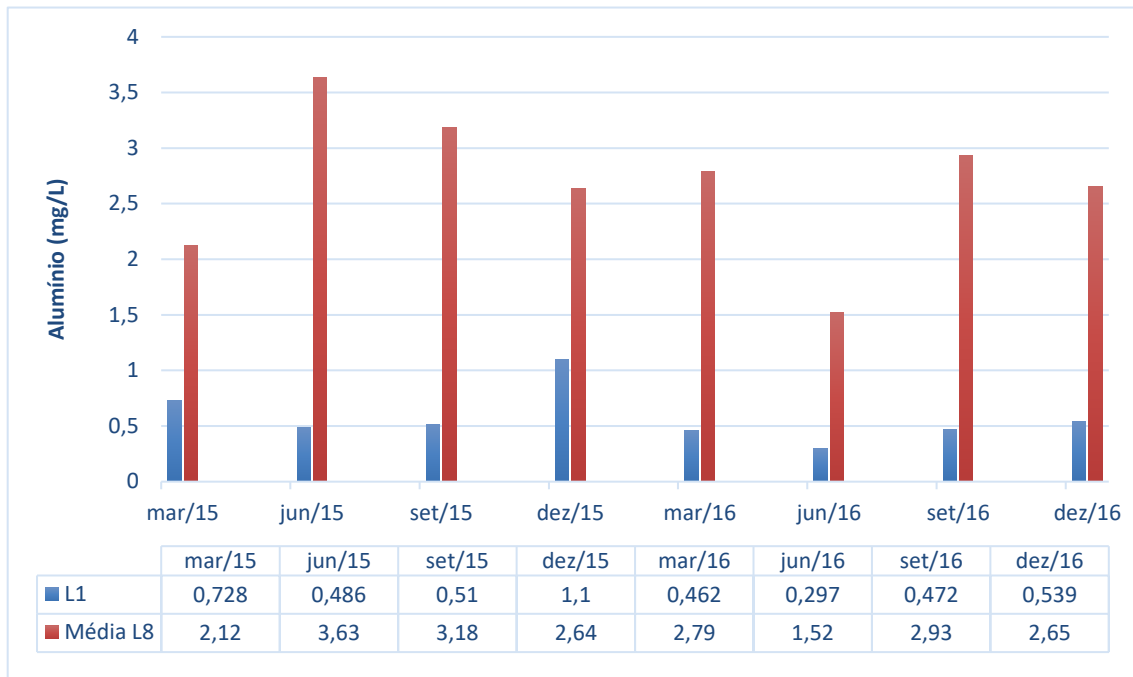
Embora os valores tenham permanecido abaixo do limite estabelecido pela LO de 5,00 mg/L, os valores máximos em 2015 (4,9 mg/L) e 2016 (5,0 mg/L) chegaram muito próximos do limite.

Uma explicação possível, já comentada anteriormente, é a possibilidade de estar havendo uma remobilização de alguns compostos depositados no fundo das lagoas junto ao lodo no decorrer dos 36 anos de operação da estação de tratamento da SITEL.

De acordo com Simon et al. (1983), alumínio, ferro e manganês são constituintes naturais do material utilizado para construção da base das lagoas da SITEL e isso influencia na eficiência negativa encontrada para remoção destes parâmetros (apud Goettems et al., 1988, p. 153).

Valores baixos de TDH (atrelados a maiores volumes de entrada) também podem estar desfavorecendo a precipitação de alguns parâmetros nos fundos das lagoas.

Figura 11 – Valores médios de Alumínio nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.6 CROMO

Os valores médios de cromo na lagoa 1 (um) variaram entre 0,0019 e 0,0131 mg/L em 2016 e 2015, respectivamente. Na saída da lagoa 8 (oito), as médias variaram entre 0,0084 e 0,0095 mg/L.

A disparidade entre os valores de entrada em 2015 e 2016 é devida à pequena quantidade de amostras analisadas (apenas em junho e dezembro de cada ano). Um valor mais alto encontrado em dezembro de 2015 favoreceu a eficiência de remoção para este ano, o que pode evidenciado pelo desvio padrão no valor de entrada de 2015 se comparado ao de 2016.

Tabela 23 – Eficiência na remoção de Cromo nas lagoas de polimento

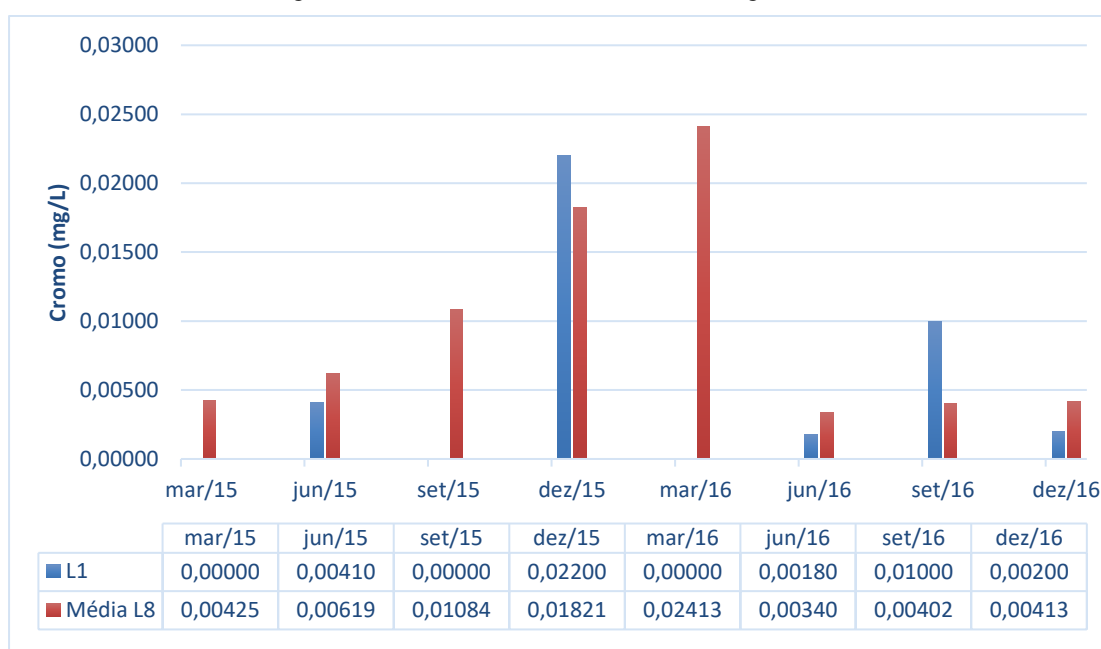
	Cromo (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	0,0041	0,0020	0,0018	0,0006
Média Menor	0,0131	0,0093	0,0019	0,0084
Mediana	0,0131	0,0064	0,0019	0,0041
Média Maior	0,0131	0,0095	0,0019	0,0084
Valor Máximo	0,0220	0,0316	0,0020	0,1120
Desvio Padrão	0,0127	0,0096	0,0001	0,0217
Eficiência	27,17%		-341,11%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

O valor de eficiência negativa apresentado em 2016 representa melhor a situação das lagoas, ocorrendo para esse parâmetro o mesmo problema de remobilização que pode estar ocorrendo com os outros metais.

Dito isso, os valores ainda atendem o padrão de 0,4 mg/L da licença de operação com bastante folga, mesmo se comparado ao valor máximo encontrado durante os dois anos, de 0,1120 mg/L em 2016.

Figura 12 – Valores médios de Cromo nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.7 CIANETOS

Dos 22 dados de entrada e saída disponíveis para os parâmetros de cianetos, 21 deles tiveram valores não-detectados (valor de não-deteccção de 0,002 mg/L). Os valores detectados variaram entre 0,002 e 0,003 mg/L.

Uma média de 0,01438 mg/L de cianetos foi encontrada no afluente bruto orgânico. No afluente inorgânico o composto teve a maior parte dos valores não-detectados, deixando apenas o afluente bruto orgânico como fonte de cianetos.

É seguro afirmar que o tratamento secundário já remove mais de 85% dos cianetos e as lagoas de polimento não impactam na remoção desse parâmetro.

5.8 FERRO

Os valores médios de entrada de ferro na primeira lagoa ficaram entre 0,55 e 0,57 mg/L, um valor já bastante baixo, comparado ao limite de 5 mg/L do efluente final.

Já na saída da última lagoa, a problemática de recirculação de compostos torna a aparecer, com as médias de concentração variando entre 1,71 e 1,83 mg/L em 2016 e 2015, gerando um aumento de 198,14% e 239,12%, respectivamente.

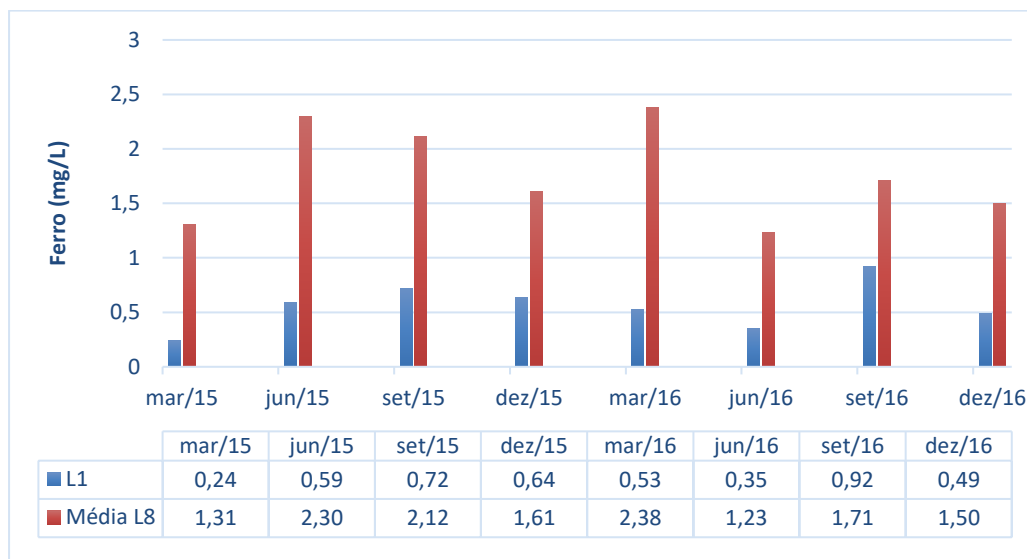
Tabela 24 – Eficiência na remoção de Ferro nas lagoas de polimento

	Ferro (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	0,24	0,89	0,35	0,67
Média Menor	0,55	1,86	0,57	1,71
Mediana	0,62	1,81	0,51	1,34
Média Maior	0,55	1,83	0,57	1,71
Valor Máximo	0,72	2,80	0,92	3,24
Desvio Padrão	0,21	0,60	0,24	0,91
Eficiência	-239,12%		-198,14%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Embora os valores ainda atendam o limite proposto, as lagoas têm aumentado as concentrações desse parâmetro conforme o efluente passava pelas lagoas, evidenciando ainda mais que pode estar ocorrendo um problema de remobilização de sólidos depositados no fundo dessas lagoas. Essa adição na concentração de ferro tem deixado os valores desse parâmetro bastante próximos ao limite estabelecido pela LO.

Figura 13 – Valores médios de Ferro nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.9 FÓSFORO

Um dos principais propósitos das lagoas de polimento é a remoção de nutrientes, sendo um deles o fósforo. As médias de entrada de fósforo na lagoa 1 (um) foram de 2,21 mg/L em ambos os anos. Na saída da lagoa 8 (oito) as médias variaram entre 1,65 e 1,87 mg/L em 2016 e 2015, respectivamente. Esses valores corresponderam a remoções de 15,31% em 2015 e 25,23% em 2016.

Tabela 25 – Eficiência na remoção de Fósforo nas lagoas de polimento

	Fósforo (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	1,74	1,39	0,74	1,13
Média Menor	2,21	1,87	2,21	1,65
Mediana	2,29	1,96	2,50	1,54
Média Maior	2,21	1,87	2,21	1,65
Valor Máximo	2,53	2,27	3,11	2,61
Desvio Padrão	0,34	0,26	1,11	0,36
Eficiência	15,31%		25,23%	

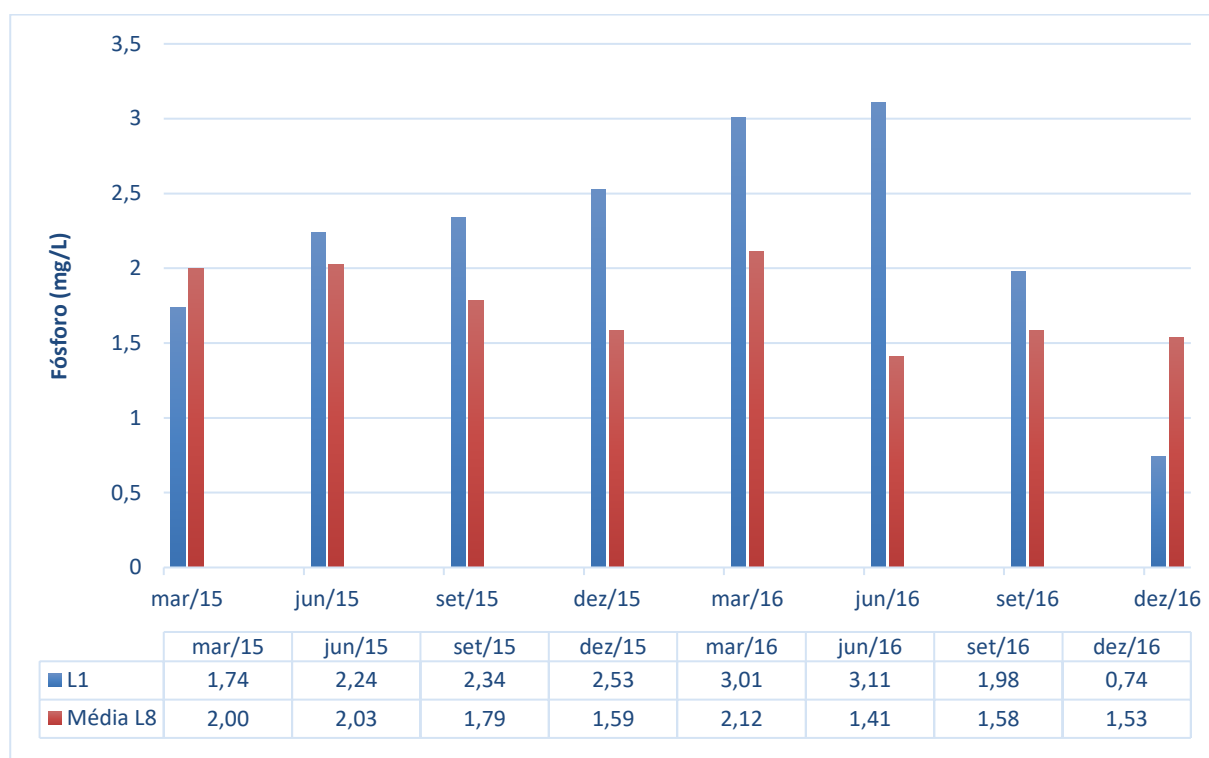
(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Uma alta concentração de nutrientes no efluente final pode acarretar num problema de eutrofização quando o destino final do efluente é um corpo hídrico. Porém, quando o efluente final pode ser utilizado para agricultura, por exemplo, a remoção de fósforo não é necessária, pois serve de nutriente para as plantações. No caso da SITEL, o efluente final é aspergido em solo, então a remoção de nutrientes não é essencial. Mesmo sendo dito isso, a remoção de nutrientes foi bastante baixa para uma série de 8 lagoas de polimento.

De acordo com Kato e Florêncio (2001, apud PINTO et. al, 2013, p. 2) para uma remoção elevada de fósforo, é necessário que haja uma elevada atividade fotossintética, que consome CO₂ e aumenta o pH na água, formando íons fosfato que precipitam na forma de fosfato de cálcio.

Tendo em vista o supracitado, a LO da SITEL não apresenta limite de concentração de fósforo no efluente final.

Figura 14 – Valores médios de Fósforo nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.10 ZINCO

As remoções de zinco pelas lagoas de polimento não foram muito altas. Embora as médias de entrada e saída estejam dentro dos valores permitidos, as lagoas não tiveram um impacto muito grande na remoção desse metal. No ano de 2015, com uma concentração de entrada relativamente maior, houve uma eficiência de cerca de 47% comparado à média de saída. Já em 2016, com uma concentração de entrada menor que no ano anterior, as lagoas praticamente não tiveram efeito algum sobre a remoção de zinco, ficando a eficiência negativa em -0,24%.

Tabela 26 – Eficiência na remoção de Zinco nas lagoas de polimento

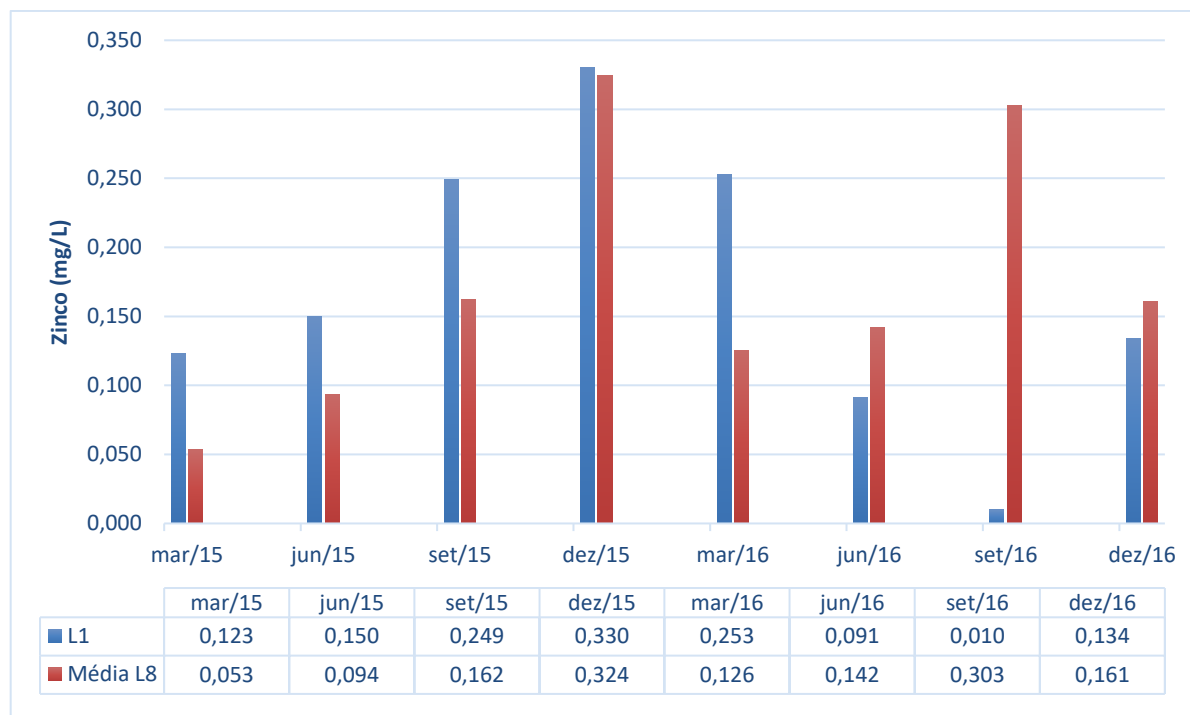
	Zinco (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	0,12	0,03	0,09	0,04
Média Menor	0,21	0,16	0,18	0,18
Mediana	0,20	0,11	0,19	0,17
Média Maior	0,21	0,16	0,18	0,18
Valor Máximo	0,33	0,82	0,25	0,36
Desvio Padrão	0,09	0,19	0,08	0,09
Eficiência	26,26%		-0,24%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Para sólidos e metais pesados, espera-se que ao menos uma pequena porcentagem das concentrações de entrada precipite e se junte ao lodo nos fundos das lagoas, contanto que o TDH seja razoável e não esteja havendo uma sobrecarga no sistema, caso que ocorreu apenas no ano de 2015.

A figura abaixo mostra a remoção de zinco pelas lagoas e a variação de concentrações encontradas durante os dois anos de análises.

Figura 15 – Valores médios de Zinco nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.11 NITRATOS

As remoções de compostos nitrogenados foram as mais expressivas entre os parâmetros estudados, onde o sistema de lagoas, de fato, impactou nas concentrações finais desses compostos.

Para o caso dos nitratos, as concentrações médias de entrada em 2015 e 2016, respectivamente, foram de 8,23 e 7,33 mg/L e na saída, esses valores médios chegaram a 0,19 em 2015 e 0,44 mg/L em 2016, resultando em uma remoção de 97,70% e 94,04% para os dois anos, consecutivamente.

Ferrara e Avci (1982, apud BARBOSA, 2013, p. 16) sugerem que a remoção de nitrogênio nas lagoas se dá principalmente pela assimilação de amônia e nitratos pelas algas, com consequente sedimentação de nitrogênio ao fundo das lagoas.

Camarago, Valero e Mara (2010, apud BARBOSA, 2013, p. 16) comentam que a biomassa, com metabolismo elevado em ambiente com temperatura elevada, utiliza o nitrogênio dissolvido nos seus processos metabólicos, absorvendo, assim, amônia e nitratos e removendo o nitrogênio.

Os processos de nitrificação e desnitrificação são os responsáveis pela remoção de nitrogênio do efluente. O íon amônio (NH_4^+) é oxidado a nitrato (NO_3^-) por meio da nitrificação em condições aeróbias e posteriormente ocorre o processo de desnitrificação, onde os nitratos (NO_3^-) são transformados em nitrogênio gasoso ($\text{N}_2(\text{g})$) (GRAAF et al., 1995; AHN, 2006; apud RODRIGUES, 2016, p. 26 e 27).

Tabela 27 – Eficiência na remoção de Nitratos nas lagoas de polimento

	Nitratos (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	5,60	0,07	0,81	0,07
Média Menor	8,23	0,19	7,33	0,44
Mediana	7,61	0,18	7,61	0,20
Média Maior	8,23	0,19	7,33	0,44
Valor Máximo	12,10	0,45	13,30	2,30
Desvio Padrão	2,88	0,10	5,13	0,50
Eficiência	97,70%		94,04%	

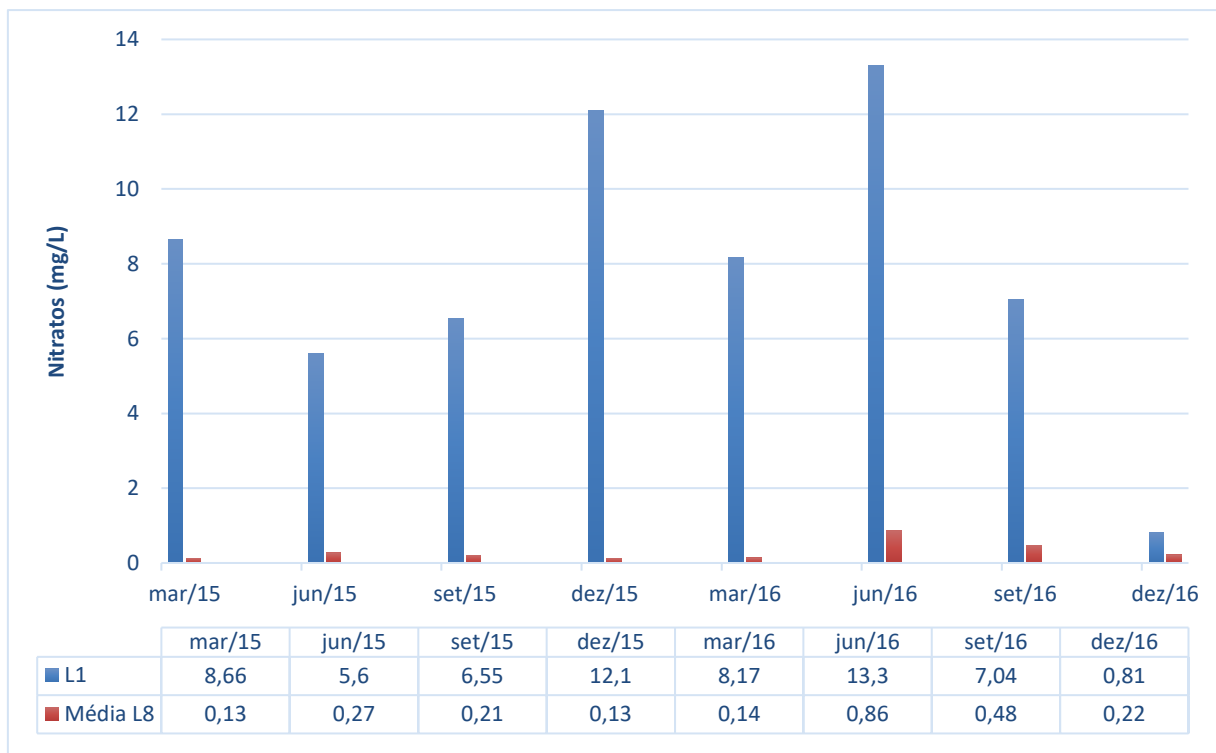
(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Mendonça (2002) comenta que valores a presença de oxigênio dissolvido é necessária para que ocorram os processos de nitrificação e desnitrificação. Os valores altos de OD, acima da concentração de saturação, podem ajudar a explicar a alta eficiência na remoção de nitratos pelas lagoas de polimento.

Embora a sólida eficiência de remoção de nitratos apresentada pelas lagoas de polimento, a licença de operação da SITESL apenas restringe as concentrações de nitrogênio amoniacal no efluente final. No entanto, essa remoção de nitratos é extremamente importante, em vista do pH elevado encontrado nas primeiras lagoas, que faz com que a maior parte destes nitratos se encontre em sua forma livre, que pode ser muito tóxica e pode ajudar a explicar as malformações encontradas em peixes e tartarugas que habitam as lagoas de polimento da SITESL.

A figura abaixo mostra a remoção de nitratos que ocorre nas lagoas.

Figura 16 – Valores médios de Nitratos nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITESL)

5.12 NITRITOS

De forma similar ao que ocorre aos nitratos, as lagoas de polimento apresentaram uma boa eficiência na remoção de nitritos.

Os nitritos (NO_2^-) são bastante instáveis e são convertidos rapidamente em nitratos, onde pode ocorrer o processo de desnitrificação comentado no item anterior.

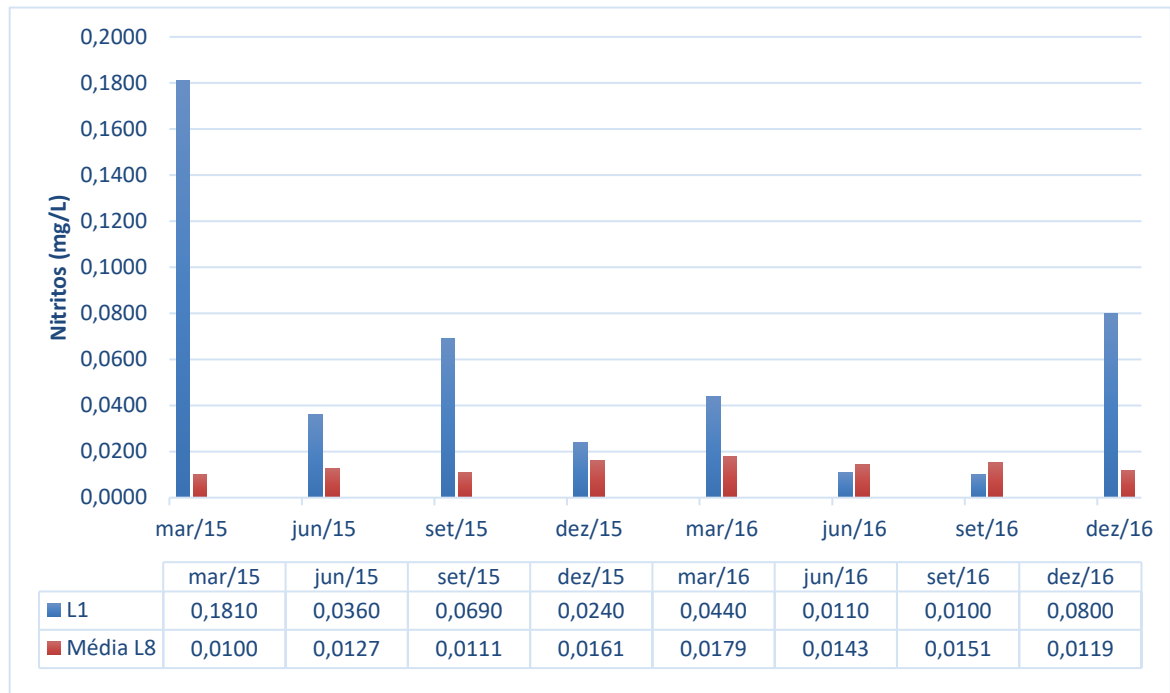
A tabela abaixo mostra a eficiência encontrada no processo de remoção de nitritos, de 93,92% em 2015, baixando as médias de entrada de 0,0775 mg/L na entrada da primeira lagoa para 0,0125 na saída da última lagoa, e de 59,21% em 2016, reduzindo os valores de 0,0363 mg/L para 0,0148 mg/L. A disparidade de eficiência dos dois anos pode ser explicada pelo valor de desvio padrão mais elevado em 2015, que aumentou a média do ano e, portanto, apresentou “melhores” resultados. Os dados dos anos de 2016 representam melhor a eficiência na remoção de nitritos pelas lagoas de polimento.

Tabela 28 – Eficiência na remoção de Nitritos nas lagoas de polimento

	Nitritos (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	0,0240	0,0100	0,0100	0,0100
Média Menor	0,0775	0,0051	0,0363	0,0091
Mediana	0,0525	0,0100	0,0275	0,0100
Média Maior	0,0775	0,0125	0,0363	0,0148
Valor Máximo	0,1810	0,0500	0,0800	0,0660
Desvio Padrão	0,0716	0,0067	0,0332	0,0107
Eficiência	83,92%		59,21%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Figura 17 – Valores médios de Nitritos nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Como comentado anteriormente, o único composto nitrogenado que a LO da SITEL estabelece limite é para nitrogênio amoniacal, porém, segundo Bastos et al. (2003, apud RODRIGUES, 2016, p. 17), “as formas de nitrogênio apresentam diferentes níveis de toxicidade, levando em conta a tolerância em espécies de peixes. Os níveis letais para os compostos nitrogenados são: amônia total entre 0,6 e 2,0 mg/L, nitrito > 0,5 mg/L e nitrato > 5,0 mg/L”.

Um estudo feito por Lai e Lam (1997) com um sistema de oito lagoas de polimento em série na Austrália mostrou maiores concentrações de nitrato e nitrito nos efluentes finais das lagoas, caso que ocorreu nas lagoas da SITEL apenas com concentrações de nitrato nas médias entre maio e outubro de 2016 (apud RODRIGUES, 2016, p. 21).

5.13 NITROGÊNIO AMONIACAL

A maior parte dos dados de Nitrogênio Amoniacal retornou valores não detectados (valor limite de detecção de 0,03 mg/L). Para fins de cálculo de eficiência, utilizou-se a média maior

como valor principal, priorizando a segurança do sistema, visto que o nitrogênio amoniacal é o único composto nitrogenado que tem valor limitado pela LO.

Dentro esse tipo de composto, os valores de remoção para o nitrogênio amoniacal foram os menores encontrados, variando entre 5,46% em 2015 e 2,77% em 2016.

O limite padrão para lançamento do efluente é de 5,0 mg/L. Dito isso, o maior valor encontrado na entrada foi de 0,27 mg/L em 2015 e na saída foi de 1,51 mg/L também em 2015. Isso sugere que a lagoa de polimento não seria necessária para remoção desse parâmetro, visto que os valores já se encaixam no limite desde a lagoa 1(um).

Tabela 29 – Eficiência na remoção de N Amoniacal nas lagoas de polimento

	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300
Média Menor	0,0675	0,0598	0,1150	0,1092
Mediana	0,0300	0,0300	0,1050	0,0750
Média Maior	0,0900	0,0851	0,1225	0,1191
Valor Máximo	0,2700	1,5100	0,2500	0,6500
Desvio Padrão	0,1200	0,2284	0,1063	0,1338
Eficiência	5,46%		2,77%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITES)

Pode-se notar que a série de lagoas pouco impacta na remoção desse parâmetro, possivelmente pelas concentrações na lagoa 1 (um) já serem bastante baixas.

O processo de nitrificação e desnitrificação que ocorre com a oxidação de nitrogênio amoniacal em nitritos e nitratos é altamente dependente de condições de oxigenação, pH, temperatura do meio, concentrações de amônia, de nitrogênio orgânico e até de níveis de alcalinidade do meio (BITTON, 2005; TUNDISI; MATSUMURA, 2008; apud BARBOSA, 2013, p. 17).

Barbosa (2013, p. 22) explica que:

“A remoção de parte do nitrogênio amoniacal é possível em lagoas de polimento pelo fato de haver um balanço entre produção e consumo de CO₂. Segundo Mara e Pearson (1992), devido à baixa entrada de matéria orgânica na lagoa, há uma menor produção de CO₂ nos processos de degradação da matéria orgânica. Em

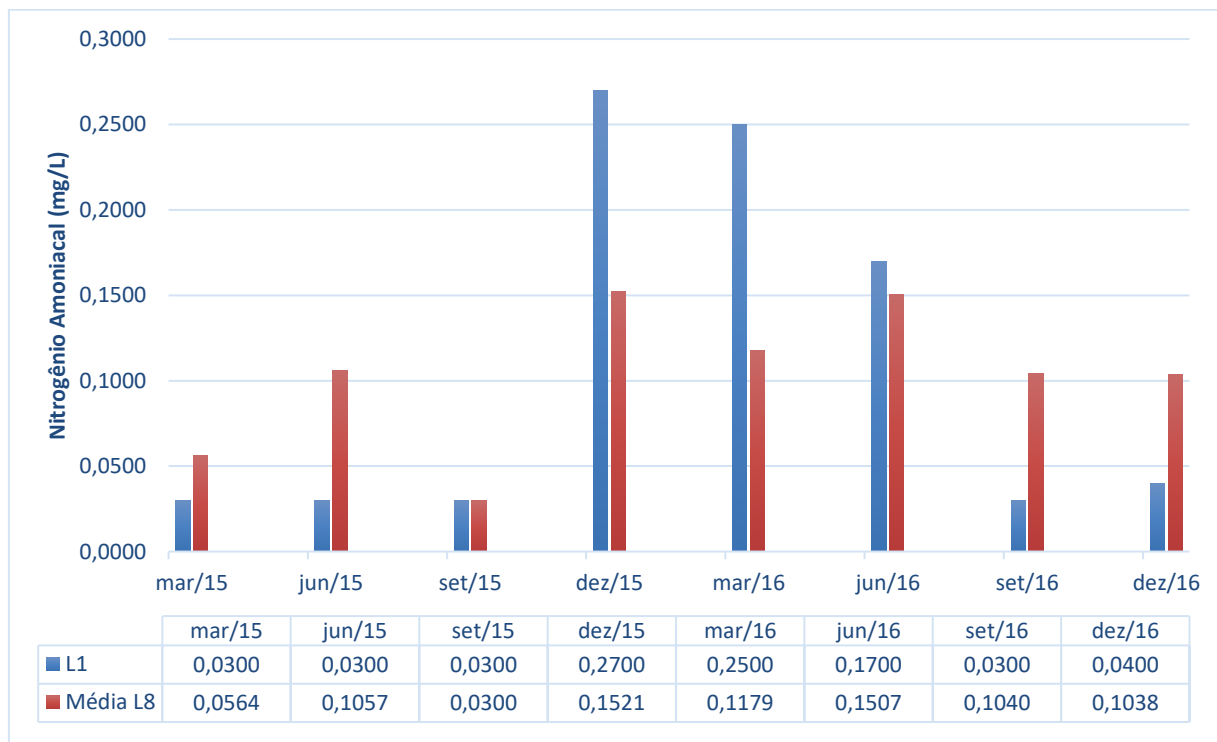
contrapartida, existe um alto consumo de CO_2 a partir da atividade fotossintética, gerando um saldo negativo de CO_2 na massa líquida. Essa retirada de acidez carbônica, favorece a elevação do pH, e possibilita a mudança de fase da amônia, passando de sua forma iônica (NH_4^+) dissolvida no meio para a forma livre (NH_3) que é gasosa, e assim contribuem no desprendimento de amônia da massa líquida, garantindo um efluente com características positivas quanto a esse aspecto.”

A maior parte do nitrogênio amoniacal presente no afluente à estação da SITEL é proveniente da parte orgânica, com médias variando entre 10 mg/L em 2015 e 9,84 mg/L em 2016. O braço inorgânico do afluente contribui com concentrações muito menores, ficando em 0,87 mg/L em 2015 e 0,796 mg/L em 2016.

Conclui-se, através dos dados de valores de entrada da lagoa 1 (um), que os sistemas preliminar e secundário são suficientes para remoção de nitrogênio amoniacal no sistema, levando em conta que as médias maiores na primeira lagoa ficaram entre 0,09 mg/L em 2015 e 0,1225 mg/L em 2016, bem abaixo do valor limite de 5,0 mg/L.

Podemos notar, a partir da figura abaixo, que nos meses em que os valores de entrada são maiores (dez/15 e mar/16) a eficiência de remoção é ligeiramente mais expressiva.

Figura 18 – Valores médios de Nitrogênio Amoniacal nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.14 NITROGÊNIO KJELDHAL TOTAL

O nitrogênio Kjeldhal representa uma soma da quantidade de amônia e de nitrogênio orgânico presentes no efluente. Essas formas de nitrogênios são as mais encontradas em efluentes brutos orgânicos (BAUR, 2012).

Os valores de entrada em 2015 se mostraram muito maiores, pouco mais do dobro de 2016, 5,73 mg/L e 2,55 mg/L, respectivamente. Pode-se dizer que por essa média de entrada ter sido maior, assim também foi sua remoção, cerca de seis vezes maior em 2015.

O desvio padrão dos dados de entrada em 2015 seguiu o mesmo caminho, sendo mais de duas vezes maior que os de 2016. Caso a amostra de dados de entrada fosse mais ampla, provavelmente o valor de eficiência mais próximo da realidade ficaria num meio termo entre os resultados encontrados, de 65,93% em 2015 e 11,46% em 2016.

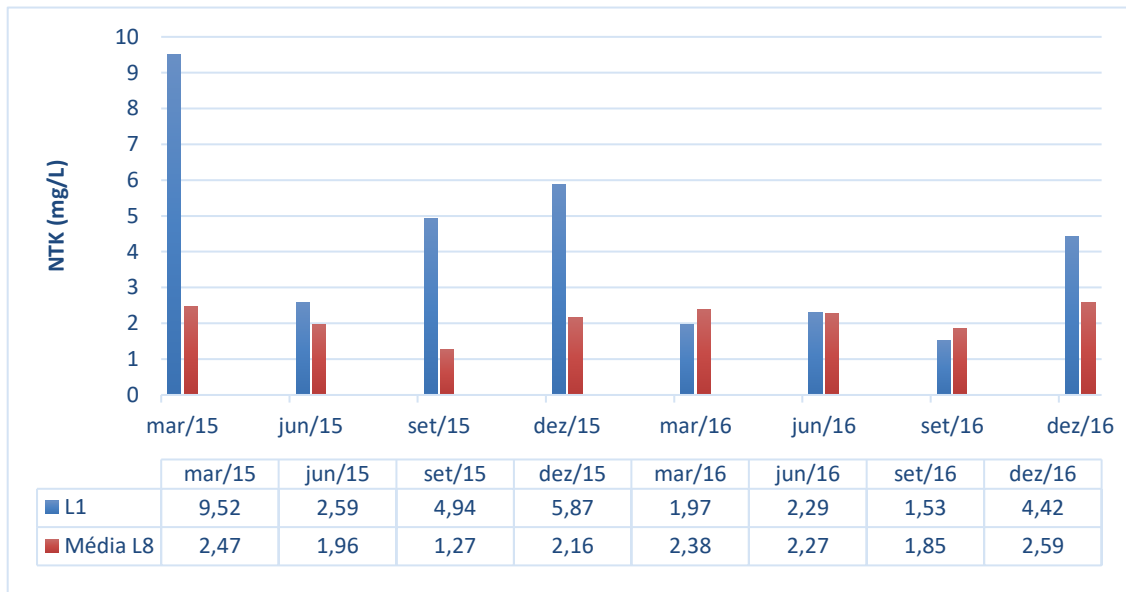
Tabela 30 – Eficiência na remoção de NTK nas lagoas de polimento

	NTK (mg/L)			
	2015		2016	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Valor Mínimo	2,59	0,04	1,53	0,65
Média Menor	5,73	1,95	2,55	2,26
Mediana	5,41	1,69	2,13	2,18
Média Maior	5,73	1,95	2,55	2,26
Valor Máximo	9,52	5,29	4,42	4,32
Desvio Padrão	2,88	1,02	1,28	0,80
Eficiência	65,93%		11,46%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Pela figura 19, nota-se que nos meses em que a concentração encontrada era maior, também maior foi a remoção, havendo um limite aparente, entre 1,5 e 2,2 mg/L, do qual parece não haver mais eficiência na remoção, explicando os valores baixos de remoção em 2016, onde também os valores de entrada foram menores.

Figura 19 – Valores médios de Fósforo nas lagoas 1 e 8



(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.15 ÓLEOS E GRAXAS

Como comentado anteriormente, não é feito a análise de óleos e graxas no estudo trimestral executado pela SITEL nas lagoas de polimento. Porém, por se tratar de um parâmetro muito comum no efluente de um complexo industrial petroquímico, viu-se a necessidade de verificar a eficiência de remoção desse parâmetro.

Para tanto, foram usados dados de entrada do sistema, das vias orgânica e inorgânica. Para a análise estatística foi usado apenas a média maior, como parâmetro de segurança.

Nota-se através da tabela abaixo que o efluente inorgânico pré-tratado já apresenta uma média bastante baixa de óleos e graxas e o afluente bruto orgânico apresenta concentrações cerca de cinco vezes maior.

Tabela 31 – Concentrações de OG na entrada da ETE da SITEL

	OG 2015 (mg/L)		OG 2016 (mg/L)	
	ABI 2015	ABO 2015	ABI 2016	ABO 2016
	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada
Valor Mínimo	1,04	1,04	2,07	2,07
Mediana	1,04	5,40	2,07	4,73
Média Maior	1,96	11,52	2,07	9,02
Valor Máximo	13,00	251,00	2,07	147,00
Desvio Padrão	2,20	26,36	0,00	16,69

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Abaixo estão também os valores de saída do sistema, onde foi feita a mesma análise estatística.

Tabela 32 – Concentrações de OG na saída da ETE da SITEL

	OG (mg/L)	
	2015	2016
	Saída	Saída
Valor Mínimo	1,04	2,07
Mediana	1,04	2,07
Média Maior	1,42	2,14
Valor Máximo	6,60	3,45
Desvio Padrão	1,02	0,25

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Para que fosse feita uma análise da eficiência de remoção do sistema, foi necessário descobrir a concentração média de óleos e graxas do afluente orgânico acrescido do afluente inorgânico. Para tanto, foi feita uma média ponderada, baseada nos volumes de entrada de afluentes orgânicos e inorgânicos.

Tabela 33 – Médias ponderadas de ABI e ABO

		Méd. Vol. (m ³)	Razão (V/V)	Média ponderada (mg/L)
Média ABI 2015 (mg/L)	1,961	5.607,00		1,961
Média ABO 2015 (mg/L)	11,523	9.251,00	1,65	19,01
Média ABI 2016 (mg/L)	2,070	4.107,00		2,070
Média ABO 2016 (mg/L)	9,019	11.397,00	2,78	25,03

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

Com base na média ponderada dos valores, foi-se calculada a média dos afluentes bruto orgânico e inorgânico (ABI + ABO), com a qual se pôde comparar com os valores de saída e calcular a eficiência de remoção do sistema para este parâmetro.

Os valores de eficiência foram bastante satisfatórios, ficando na faixa de 86,47% em 2015 e 84,18% em 2016.

Tabela 34 – Concentrações de OG na saída da ETE da SITEL

	Média ABI+ABO 15 (mg/L)	Média Saída 2015 (mg/L)	Média ABI+ABO 16 (mg/L)	Média Saída 2016 (mg/L)
	10,49	1,42	13,55	2,14
Eficiência (%)	86,47%		84,18%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

A licença de operação da SITEL estabelece um valor de concentração de óleos e graxas no efluente final de 10 mg/L. Com a eficiência do sistema de tratamento, esse valor foi atingido com tranquilidade.

5.16 COMPARAÇÃO COM OS LIMITES ESTABELECIDOS PELA LO

Abaixo foi compilada uma tabela com os resultados obtidos da análise dos parâmetros, comparando-os com os limites exigidos pela licença de operação.

Foram utilizados os valores de média maior, conforme análises, visando uma maior segurança quanto ao atingimento destes valores.

Tabela 35 – Comparação dos resultados obtidos com os limites estabelecidos pela LO

Parâmetro	Unidade	Média L1 2015	Média L8 2015	Média L1 2016	Média L8 2016	Limite LO
DQO	mg O ₂ /L	61,88	64,96	58,10	62,71	100,00
OD	mg O ₂ /L	16,08	9,30	12,10	7,08	-
SDT	mg/L	1.161,00	879,80	937,50	834,65	2.000,00
SST	mg/L	21,50	57,38	20,50	48,25	-
Alumínio	mg/L	0,710	2,880	0,440	2,480	5,00
Cromo	mg/L	0,0131	0,0095	0,0019	0,0084	0,40
Cianetos	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,05
Ferro	mg/L	0,550	1,830	0,570	1,710	5,00
Fósforo	mg/L	2,210	1,870	2,210	1,650	-
Zinco	mg/L	0,2130	0,1571	0,1823	0,1827	1,00
Nitrato	mg/L	8,228	0,189	7,330	0,437	-
Nitrito	mg/L	0,0775	0,0125	0,0363	0,0148	-
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	0,09	0,0851	0,1225	0,1191	5,00
Nitrogênio Kjeldhal Total	mg/L	5,73	1,95	2,55	2,26	-
Óleos e Graxas	mg/L	-	1,42	-	2,14	10,00
pH		9,34	7,83	8,93	8,04	6~9
Temperatura	°C	24,8	22,8	23,3	22,0	40,00

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

De acordo com os dados calculados, podemos afirmar que todos os parâmetros analisados se encontram dentro da faixa de valor aceitável segundo a licença de operação, sendo os valores de DQO os mais próximos de ultrapassarem esses padrões de lançamento final. Os valores de pH e temperatura sofrem uma pequena variação durante a passagem do efluente nas lagoas, ficando a média de pH na lagoa 1 (um) de 9,34 em 2015 o único parâmetro que ficou fora dos limites na entrada do sistema de lagoas de polimento.

Tabela 36 – Valores de pH e Temperatura para os anos de 2015 e 2016

	pH			Temperatura (°C)	
	2015/2016			2015/2016	
	Entrada	Saída		Entrada	Saída
Valor Mínimo	8,36	7,27	Valor Mínimo	15	10
Média Menor	9,14	7,94	Média Menor	24	22,4
Mediana	8,94	7,89	Mediana	25	23
Média Maior	9,14	7,94	Média Maior	24	22,4
Valor Máximo	10,36	9,06	Valor Máximo	29	36
Desvio Padrão	0,63	0,31	Desvio Padrão	4,41	4,60
Eficiência	13,15%		Eficiência	6,67%	

(fonte: autor, baseado nos dados fornecidos pela SITEL)

5.17 ANÁLISE OPERACIONAL DA ETE

A nível operacional, foi feita uma breve análise da altura da linha d'água, o volume e o TDH nas lagoas de polimento também durante os anos de 2015 e 2016, comparando os valores com os aceitáveis conforme literatura, a fim de aferir se as lagoas estão trabalhando conforme projetadas ou se está ocorrendo algum tipo de sobrecarga.

Cabe aqui comentar que os valores de cota de fundo, níveis de altura de linha d'água e volumes nas lagoas presentes nas planilhas de controle de operação são diferentes dos que anteriormente citados, contidos no documento “OPERAÇÃO DA LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO”, descritos como dados de projeto. As diferenças serão descritas abaixo. Para fins de análise, foram considerados apenas os dados de operação, julgados serem os valores utilizados em prática.

Abaixo é mostrada uma tabela comparativa entre os dados de projeto e os dados operacionais atualmente utilizados.

Tabela 37 – Valores de cota de fundo e nível de linha d'água de projeto e de operação das lagoas de polimento

LAGOA	COTA DE FUNDO PROJETO (m)	PROFUNDIDADE DE PROJETO (m)			COTA DE FUNDO OPERAÇÃO (m)	PROFUNDIDADE DE OPERAÇÃO (m)	
		MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO		MÍNIMO	MÁXIMO
1	2,50	1,25	1,50	2,00	2,50	1,30	2,64
2	2,25	1,25	1,50	2,25	2,50	1,13	2,50
3	2,00	1,50	1,57	2,26	2,25	1,10	2,25
4	2,00	1,25	1,50	2,25	2,25	1,10	2,25
5	2,00	1,25	1,50	2,01	2,25	0,83	2,25
6	2,00	1,25	1,50	2,00	2,25	0,83	2,25
7	1,75	1,00	1,50	2,00	2,25	0,15	2,25
8	1,75	1,00	1,50	2,00	2,25	0,15	2,25

(fonte: adaptado de OPERAÇÃO DAS LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO, código POP-DEOM-077, CORSAN, 2017; REGISTROS DIÁRIOS DE OPERAÇÃO_DEZEMBRO_2016, CORSAN-SITEL, 2016)

Tabela 38 – Valores de volume de projeto e de operação das lagoas de polimento

LAGOA	VOLUME DE PROJETO (m³)			VOLUME DE OPERAÇÃO (m³)	
	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
1	106.205	127.500	170.000	81.380	170.544
2	180.000	198.000	270.000	102.830	233.000
3	188.400	210.000	271.200	197.120	406.800
4	114.000	136.000	171.000		
5	113.400	135.000	180.000	95.865	269.325
6	62.500	75.000	100.000		
7	41.000	61.500	82.000		
8	23.000	34.500	46.000	6.450	103.275
TOTAL	828.505	977.500	1.290.200		
TDH (DIAS)	29	32	44		

(fonte: adaptado de OPERAÇÃO DAS LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO, código POP-DEOM-077, CORSAN, 2017; REGISTROS DIÁRIOS DE OPERAÇÃO_DEZEMBRO_2016, CORSAN-SITEL, 2016)

Tabela 39 – Valores de operação calculados utilizados nas lagoas de polimento

LAGOA	PROFUNDIDADE DE OPERAÇÃO (m)			VOLUME DE OPERAÇÃO (m ³)		
	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
1	1,30	1,75	2,90	81.380	111.101	170.544
2	1,13	1,47	2,50	102.830	135.373	233.000
3	1,10	1,21	2,25	197.120	216.433	406.800
4	1,10	1,39	2,25			
5	0,83	1,30	2,25	95.865	152.924	269.325
6	0,83	1,30	2,25			
7	0,15	1,20	2,25	6.450	54.863	103.275
8	0,15	1,20	2,25			
			TOTAL	483.645	670.693	1.182.944
TDH ESTIMADO (DIAS) (Q = 29.117 m ³ /dia)				17	23	41

(fonte: adaptado de OPERAÇÃO DAS LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO, código POP-DEOM-077, CORSAN, 2017; REGISTROS DIÁRIOS DE OPERAÇÃO_DEZEMBRO_2016, CORSAN-SITEL, 2016)

Os valores normais de operação usados foram aferidos tomando como base a relação dos valores normais usados no projeto.

Para o cálculo de detenção hidráulica operacional, foi utilizado o valor de vazão de 29.117 m³/dia, mesmo valor utilizado no projeto, de acordo com a fórmula abaixo:

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Onde:

TDH = tempo de detenção hidráulica (dias);

V = volume total das lagoas de polimento (m³);

Q = vazão média do afluente (m³/dia).

Abaixo é apresentada uma tabela com a análise dos dados obtidos. Além dos valores de máximo, mínimo, média e mediana, foi feita uma análise calculando-se um valor limite onde 25% dos dados são maiores que ele e um valor onde 25% dos dados são menores que ele.

Tabela 40 – Análise estatística de valores de nível de linha d'água, volume e TDH das lagoas de polimento nos anos de 2015 e 2016

	L1		L2		L3/L4	
	H água (m)	Volume (m ³)	H água (m)	Volume (m ³)	H água (m)	Volume (m ³)
Mínimo	1,37	85.762	1,18	107.380	1,29	231.555
Máximo	2,35	149.930	2,32	215.296	2,56	462.848
Média	1,64	103.206	1,58	144.297	1,75	315.262
Mediana	1,56	97.656	1,51	137.863	1,69	304.200
< 25%	1,51	94.526	1,45	132.385	1,56	280.488
> 25%	1,71	107.559	1,68	153.888	1,90	342.760
	L5/L6		L7/L8		TDH (dias)	
	H água (m)	Volume (m ³)	H água (m)	Volume (m ³)		
Mínimo	1,29	150.801	1,10	47.850	21	
Máximo	2,56	306.432	2,54	116.586	43	
Média	1,75	207.214	1,71	76.973	29	
Mediana	1,69	199.927	1,64	73.800	28	
< 25%	1,56	183.456	1,49	66.305	26	
> 25%	1,90	226.100	1,87	85.085	31	

(fonte: adaptado de OPERAÇÃO DAS LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO, código POP-DEOM-077, CORSAN, 2017; REGISTROS DIÁRIOS DE OPERAÇÃO 2015-2016, CORSAN-SITEL, 2015-2016)

A primeira lagoa tem mantido um nível intermediário entre o mínimo e o normal na maior parte da sua operação, considerado um nível bastante satisfatório, tendo em vista a remoção de poluentes químicos e biológicos. A lagoa dois, em 2015, manteve valores entre o nível normal e o nível máximo, valores que devem ser evitados, visto que a eficiência de uma lagoa de polimento se dá através da elevada taxa fotossintética e, usualmente, se adotam valores próximos a 1 metro de profundidade. Em 2016 os valores melhoraram, ficando a maior parte do tempo entre o nível mínimo e o nível médio, com alguns picos acima do nível médio.

As lagoas 3 (três) e 4 (quatro), analisadas conjuntamente pelas planilhas de operação, demonstraram ficar aquém do esperado, tendo níveis d'água permanecendo a maior parte do tempo entre os valores normais e máximos, inclusive tendo picos acima do máximo, o que pode comprometer a estrutura das mesmas. A média ficou em 1,75 metros, bastante alta, especialmente considera a localização na Região Sul, onde espera-se que ocorram temperaturas mais baixas e níveis menores de irradiação solar. A mesma situação ocorreu nas lagoas 6 (seis) e 7 (sete), onde os níveis d'água permaneceram altos, com a mesma média das lagoas anteriores, e com picos que ultrapassavam o limite máximo, pondo em risco a estrutura das mesmas. É válido ressaltar que 25% dos valores permaneceram acima de 1,90 metros nas

quatro lagoas (três, quatro, cinco e seis), o que corrobora o fato de que essas lagoas estão operando acima do nível esperado.

As lagoas 7 (sete) e 8 (oito) seguiram o mesmo caminho das anteriores, tendo permanecido com uma média de 1,71 metros para o nível d'água, chegando a níveis máximos de 2,54 metros, 29 centímetros acima do nível considerado máximo. Em mais de 25% dos dias analisados, o nível dessas lagoas ficou acima de 1,87 metros, muito elevado para uma lagoa de polimento operar com boa eficiência.

Em relação ao TDH nas lagoas, a média de 29 dias é bastante satisfatória. Von Sperling (2002) situa o TDH para lagoas de polimento entre 3 e 40 dias, de acordo com a taxa de remoção de coliformes fecais que se quer atingir, porém, visto que esse não é um parâmetro que a licença de operação exige remoção, o critério pode ter sido baseado na remoção de DBO_5 remanescente dos tratamento secundário e/ou remoção de nutrientes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tomando como princípio que os efluentes industriais são muito perigosos para o meio ambiente, incluindo para os seres humanos, caso seu despejo seja irregular e fora dos padrões, esse trabalho visou avaliar a eficiência do tratamento terciário, com lagoas de polimento, da estação de tratamento da SITEL, que cuida dos efluentes industriais do Polo Petroquímico do Sul, através de análises de remoção dos principais poluentes que esse tipo de indústria produz nos seus efluentes.

Os dados obtidos e analisados foram de coletas do afluente bruto orgânico, afluente bruto inorgânico, afluente da primeira lagoa de polimento (dados trimestrais) e efluente final, além de dados operacionais, todos dos anos de 2015 e 2016. Os dados de efluente final também proporcionaram a comparação com os limites estabelecidos pela Licença de Operação da SITEL, de autoria da FEPAM, para aspersão em solo, conforme projeto da ETE.

Foi possível estabelecer, principalmente, que as lagoas têm boa eficiência de remoção de um número muito pequeno de parâmetros, como os compostos nitrogenados (nitritos e nitratos), além de remover mais uma parte de sólidos dissolvidos e fósforo e proporcionar uma diminuição, bem-vinda, de pH.

Considerando o principal papel de lagoas de polimento na remoção de nutrientes, coliformes fecais e ovos de nematelminto, e que a licença de operação não exige limitação para estes dois últimos parâmetros, nem para as concentrações de nitritos e nitratos (principais compostos removidos), podemos concluir que o sistema tem uma serventia muito limitada, funcionando mais como um sistema de controle de volume de efluente do que, de fato, para remoção de poluentes dos efluentes.

A remoção negativa de DQO pode ser explicada, como já descrito, pela complexidade da matéria orgânica remanescente das etapas de tratamento anteriores, que limitam a eficiência das lagoas de polimento, que não conseguem remover esse tipo de matéria orgânica, além da adição de matéria orgânica causada pelo crescimento de algas. Embora não citado nesse trabalho em função de um número muito pequenos de dados de entrada, as lagoas aparentam

ter uma pequena eficiência negativa também para a remoção de DBO_5 , deixando os valores bastante próximos ao limite.

Podemos concluir também, através das análises de concentrações de sólidos suspensos, ferro, cromo e alumínio, que pode estar havendo uma remobilização desses sólidos e metais, depositados junto ao lodo de fundo das lagoas. Idealmente, esse tipo de poluente deveria permanecer depositado até a remoção eventual deste lodo e sua disposição final controlada.

Como pode ser notado através da tabela 35, os valores obtidos na lagoa 1 (um) já atendem os requisitos para disposição no solo, com exceção do pH.

De acordo com as análises, não houve grande mudança na eficiência entre os anos analisados, havendo sim, para alguns poucos parâmetros, um aumento ou diminuição na concentração de entrada.

Entretanto, de acordo com Goettems et al. (1988, p. 153, tradução nossa), que chegou a conclusões muito semelhantes às presentes nesse trabalho:

“[...] Além disso, as lagoas de estabilização acrescentam carga orgânica e SST ao efluente (as eficiências de remoção são negativas) e não são muito eficazes na remoção de metais pesados. Uma análise precipitada como essa, baseada em parâmetros químicos isolados, podem levar à conclusão que a fase terciária de tratamento é inútil ou até mesmo prejudicial. Uma avaliação ecotoxicológica completa do objetivo e performance das mesmas, entretanto, revelam que não é bem o caso. Metais pesados têm baixas concentrações em todos as correntes, inclusive no afluente (inicial), o que dificulta a avaliação precisa de maiores remoções pelo tratamento terciário.

[...] De fato, Teixeira e Ferreira (1988) demonstram exatamente o contrário: a fase terciária de tratamento mitiga toxicidades subletais e crônicas. [...] Monitoramento microbiológico conduzido pela SITEL indica, também, a utilidade do tratamento terciário. A ocorrência de malformações em peixes e tartarugas que habitam as lagoas revelam perigos dos afluentes às lagoas de estabilização que não foram manifestados pelas características químicas dessa corrente. A redução destes perigos, num sentido amplo, foram exatamente o motivo de implantação de um tratamento terciário na SITEL”.

Uma das explicações possíveis para a diminuição dessas malformações, conforme citado anteriormente, é que concentrações altas de nitritos, nitratos e nitrogênio amoniacal podem ser letais aos peixes e esses parâmetros são justamente os que as lagoas de polimento apresentam boa taxa de remoção.

Maiores pesquisas do ponto de vista biológico devem ser feitas para atestar a utilidade do tratamento por lagoas de polimento na SITEL, pois apenas do ponto de vista de remoções de parâmetros físicos e químicos, o sistema tem sido bastante eficiente apenas na remoção de nitratos. Uma análise de impacto da aspersão do efluente final sem passar pelas lagoas de polimento também traria novos dados quanto à utilidade das lagoas.

Goettems et al. (1988) cita ainda que tempos mais altos de detenção hidráulica, na faixa de meses, auxiliam ainda mais a diminuição desses perigos ecotoxicológicos.

Do ponto de vista operacional, as lagoas de polimento têm operado com alturas acima das sugeridas pela bibliografia que vão, em média, de 0,8 a 1,2 metros, facilitando a entrada de irradiação solar e, conseqüentemente, o processo fotossintético na qual essas lagoas se baseiam. Além disso, as lagoas parecem estar tendo uma finalidade mais importante como niveladoras de volume d'água do que como removedoras de poluentes. No entanto, uma maior média de nível d'água resulta em maiores tempos de detenção hidráulica, o que é positivo, de acordo com o trabalho de Goettems et al. (1988).

Outro dado que requer atenção um pouco de atenção são os valores de entrada de volume na ETE. A vazão de projeto é de 18.750 m³/dia, e os valores médios, calculados para 2015 e 2016, foram de 14.858 e 15.504 m³/dia, respectivamente, e são valores que começam a se aproximar ao projetado.

Os tempos de detenção hidráulicas estão dentro dos padrões e em conformidade com o estabelecido em projeto.

Por último, deve haver um maior cuidado na retenção de volume acima do nível máximo de linha d'água, casos que ocorreram nas lagoas três, quatro, cinco, seis, sete e oito, com a finalidade de evitar que ocorra danos às estruturas das mesmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaixo se encontram todas as referências bibliográficas utilizadas, tanto para a revisão bibliográfica, quanto para a discussão de resultados.

ANDERSON, G. K. et al. **Treatment of Industrial Effluents**. Haltsted Press, a Divion of John Wiley e Sons Inc., Great Britain, 1976.

BAUR, L. **ESTUDO E IDENTIFICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM EFLUENTES DE CURTUME**. Porto Alegre, RS: 2012, dissertação de mestrado.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **MANUAL DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS**. Engenho Editora Técnica Ltda., São Paulo, SP: 2012, 2ª edição ampliada.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook Of Water And Wastewater Treatment Technologies**. Butterworth-Heinemann, United States of America, 2002.

ECKENFEDLER, W. E. **INDUSTRIAL WATER POLLUTION CONTROL**. The MacGraw-Hill Companies, Inc., USA: 2000, 3rd edition.

FARIA, D. C. **REUSO DAS CORRENTES DE EFLUENTES AQUOSOS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO**. Florianópolis, SC: 2004, dissertação de mestrado.

FEPAM. **DIRETRIZ TÉCNICA REFERENTE AO DESCARTE E AO REÚSO DE EFLUENTES LÍQUIDOS NO ÂMBITO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**. DIRETRIZ TÉCNICA N°. 05/2017.

FILHO, P. A. S. **DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO**. Natal, RN: 2007, dissertação de mestrado.

FROTA, T. B. **WETLANDS: APLICAÇÃO COMO TRATAMENTO COMPLEMENTAR PARA EFLUENTE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS CONDOMINIAIS**. Porto Alegre, RS: 2016, trabalho de conclusão de curso.

GIORDANO, G. **TRATAMENTO E CONTROLE DE EFLUENTES INDUSTRIAIS**. Revista ABES, 2004.

GIORGI, C. F. e WADA, L. M. **Tratamento de Efluentes Líquidos de Petroquímica**. São Paulo, SP: 2006.

GOETTEMS, E. M. P. et al. **SITEL: A SUCCESSFUL PETROCHEMICAL WASTEWATER TREATMENT SYSTEM**. Wat. Sci. Tech. Vol. 20, No. 10, pp. 141-162, 1988. Printed in Great Britain.

HACKBARTH, F. V. **REMOÇÃO DE METAIS DE EFLUENTES PETROQUÍMICOS UTILIZANDO BIOMASSA DE MACROALGA MARINHA PELVETIA CANALICULATA COMO ADSORVENTE**. Florianópolis, SC: 2014, tese de doutorado.

HARTMANN, C. C. **AVALIAÇÃO DE UM EFLUENTE INDUSTRIAL ATRAVÉS DE ENSAIOS ECOTOXICOLÓGICOS E ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS**. Porto Alegre, RS: 2004, dissertação de mestrado.

JORDÃO, E. J.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Editora ABES. Rio de Janeiro: 2011, 6ª edição.

KELLNER, E.; PIRES, E. C. **Lagoas de Estabilização: Projeto e Operação**. Editora ABES. Rio de Janeiro: 1998.

LUCENA, D. V. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LAGOAS DE POLIMENTO EM FLUXO CONTÍNUO E SEMICONTÍNUO NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR UASB**. Campina Grande, PB: 2016, trabalho de conclusão de curso.

MENDONÇA, L. C. **MICROBIOLOGIA E CINÉTICA DE SISTEMA DE LODOS ATIVADOS COMO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATOR ANAERÓBIO DE LEITO EXPANDIDO**. São Carlos, SP: 2002, tese de doutorado.

MENDONÇA, R. S. **Lagoas de Estabilização e Aeradas Mecanicamente: Novos Conceitos**. Editora Universitária UFPb. João Pessoa, PB: 1990.

METCALF e EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. AMGH Editora Ltda. São Paulo: 2016, 5ª edição.

MUSTAFA, G. S. **REUTILIZAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EM INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**. Salvador, BA: 1998, dissertação de mestrado.

MARA, D. D. & PEARSON, H. **Artificial freshwater environment: waste stabilization ponds**. In: REHM, H. J. & REED, G., ed. Biotechnology Weinheim, Germany: 1986.

NASCIMENTO, T. E. P. F. **LODO EM LAGOAS DE POLIMENTO: ACÚMULO E IMPLICAÇÕES NO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO E NO DESEMPENHO DO SISTEMA**. Belo Horizonte, MG: 2014, dissertação de mestrado.

NBR 12209: projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: 1992.

NETTO, J. M. A. **Aspectos construtivos de lagoas de estabilização**. Revista DAE, volume 45, número 140. Março de 1985.

PASSOS, R. G. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO POR MEIO DE DADOS DE MONITORAMENTO E MODELAGEM EM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)**. Belo Horizonte, MG: 2012, dissertação de mestrado.

PINTO, A. C. A. **EFEITO DA PROFUNDIDADE NA REMOÇÃO DE NUTRIENTES EM LAGOAS DE MATURAÇÃO TRATANDO EFLUENTE DE SUINOCULTURA.** Belo Horizonte, MG: 2013. III SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS.

POLLO, L. D. **Reaproveitamento de Águas e Efluentes Inorgânicos de uma Indústria Petroquímica.** Porto Alegre, RS: 2004, dissertação de mestrado.

RAINHO, J. **PÓS-TRATAMENTO DE ETE COMPOSTA POR RALF e LAGOA DE POLIMENTO, EMPREGANDO RESERVATÓRIO PROFUNDO DE ESTABILIZAÇÃO, VISANDO A FERTIRRIGAÇÃO: ESTUDO DE CASO.** Curitiba, PR: 2010, dissertação de mestrado.

RODRIGUES, R. S. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA LAGOA DE POLIMENTO DA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA AGRALE S/A, CAXIAS DO SUL – RS.** Porto Alegre, RS: 2005, dissertação de mestrado profissionalizante.

RODRIGUES, V. A. J. **INFLUÊNCIA DO SEDIMENTO NO PROCESSO DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO POR NITRIFICAÇÃO/DESNITRIFICAÇÃO EM LAGOAS DE POLIMENTO.** Belo Horizonte, MG: 2016, tese de doutorado.

SANTOS, F. S. **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO APLICADO AO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTE DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA.** Rio de Janeiro, R. ENGEVISTA, V. 16, n. 4, p. 404-413, dezembro, 2014.

SANTOS, V. P. **MODIFICAÇÕES DE SOLO E PLANTAS APÓS DUAS DÉCADAS DA APLICAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DA ETE DA SITEL DO POLO PETROQUÍMICO (TRIUNFO, RS).** Porto Alegre, RS: 2010, dissertação de mestrado.

SILVA, A. S.; MARA, D. D. **TRATAMENTOS BIOLÓGICOS DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS – lagoas de estabilização.** Editora ABES. Rio de Janeiro, RJ: 1979.

SILVEIRA, G. E. **SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS.** Porto Alegre, RS: 2010, trabalho de conclusão de curso.

SOUSA, T. A. T. **PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE ANAERÓBIO EM LAGOA DE POLIMENTO.** Campina Grande, PB: 2015, dissertação de mestrado.

SOUZA, F. B. **REMOCAO DE COMPOSTOS FENOLICOS DE EFLUENTES PETROQUIMICOS COM TRATAMENTOS SEQUENCIAIS E SIMULTANEOS DE OZONIZACAO E ADSORCAO.** Florianópolis, SC: 2009, dissertação de mestrado.

TERRA, N. R. et al. **Ecotoxicological assessment model to evaluate industrial effluents using different biological end-points and traditional chemical parameters.** Acta Limnol. Bras., 2009, vol. 21, no. 1, p. 1-10.

THE WORLD BANK. **Pollution Prevention and Abatement Handbook Toward Cleaner Production.** The International Bank for Reconstruction and Development, Washinton, D.C: 1998.

UEHARA, M.Y., VIDAL, W.L.. **Operação e Manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas**. São Paulo, CETESB. (Série Manuais), 1989.

VIEIRA, B. **REMOÇÃO DE NUTRIENTES DE EFLUENTES LÍQUIDOS ATRAVÉS DE LAGOAS DE LEMNAS COM CHICANAS**. Florianópolis, SC: 2013, trabalho de conclusão de curso.

VAN HAANDEL, A. C. et al. **TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS POR PROCESSO ANAERÓBIO E DISPOSIÇÃO CONTROLADA NO SOLO**. PROSAB. Rio de Janeiro, RJ: 1999.

VAN HAANDEL, A. C. et al. **PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS**. PROSAB. Belo Horizonte, MG: 2001.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora SEGRAC. Minas Gerais: 1996, 2ª edição, volume 1.

VON SPERLING, M. et al. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LAGOA DE POLIMENTO PARA PÓS-TRATAMENTO DE REATOR ANAERÓBIO DE MANTA DE LODO (UASB) NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE SUINOCULTURA**. Belo Horizonte, MG: 2009. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec., v.61, n.6, p.1428-1433, 2009.

WALTERS, J. K. e WINT, A. **INDUSTRIAL EFFLUENT TREATMENT**. APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD., London, UK: 1981.

ZEN, B. P. **CARACTERIZAÇÃO DA PURGA DA TORRE DE RESFRIAMENTO DE UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA E PROPOSTAS DE TRATAMENTO**. Porto Alegre, RS: 2013, trabalho de conclusão de curso.

ANEXO A – DADOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES

Os dados de:

- Afluente Orgânico Bruto, ano de 2015;
- Afluente Orgânico Bruto, ano de 2016;
- Afluente Inorgânico Bruto, ano de 2015;
- Afluente Inorgânico Bruto, ano de 2016;
- Efluente Bruto Lagoa 8, ano de 2015;
- Efluente Bruto Lagoa 8, ano de 2016;
- Relatórios Trimestrais Lagoas 1 e 8, anos de 2015 e 2016;
- Nível de linha d'água e Volume nas 8 lagoas, ano de 2015;
- Nível de linha d'água e Volume nas 8 lagoas, ano de 2016.

Os quais foram utilizados nas análises feitas neste trabalho podem ser encontrados no link abaixo:

<https://www.dropbox.com/sh/9n1ogkfx9qjcki3/AACsrCt7Jp3yw6aboXv13D-xa?dl=0>