



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciência  
Faculdade de Engenharia

Shyrlene Lima de Aquino Oliveira

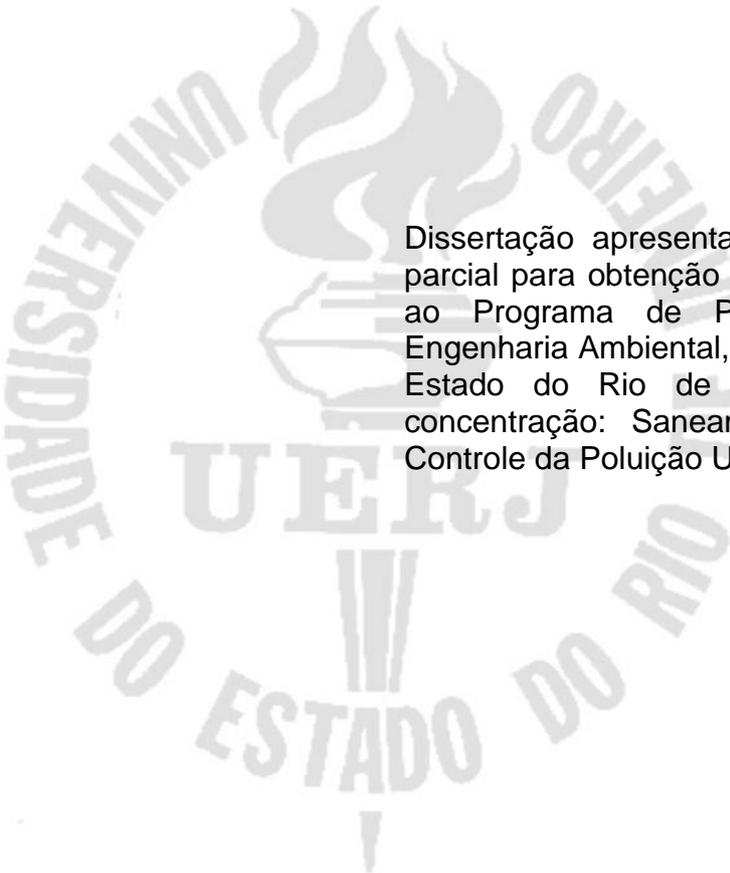
Confiabilidade operacional de Estação de Tratamento de Efluentes  
Industriais (ETEI) de refinaria de petróleo: estudo de caso

Rio de Janeiro  
2014



Shyrlene Lima de Aquino Oliveira

**Confiabilidade operacional de Estação de Tratamento de Efluentes Industriais  
(ETEI) de refinaria de petróleo: estudo de caso**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Olavo Barbosa Filho

Coorientador: Prof. Dr. Gandhi Giordano

Rio de Janeiro

2014

CATAGOLACÃO NA FONTE,  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

O48 OLIVEIRA, Shyrlene Lima de Aquino.  
Confiabilidade operacional de Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI) de refinaria de petróleo: estudo de caso / Shyrlene Lima de Aquino Oliveira. – 2014.  
189 p.

Orientador.: Olavo Barbosa Filho.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Efluentes industriais – Dissertações. I. Barbosa Filho, Olavo II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 628.51

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

---

Assinatura

---

Data

Shyrlene Lima de Aquino Oliveira

**Confiabilidade Operacional de Estação de Tratamento de Efluentes Industriais  
(ETEI) de Refinaria de Petróleo: estudo de caso**

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovado em 04 de abril de 2014.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Olavo Barbosa Filho (Orientador)  
Faculdade de Engenharia da UERJ

---

Prof. Dr. Gandhi Giordano (Coorientador)  
Faculdade de Engenharia da UERJ

---

Prof. Dr. Roberto de Barros Emery Trindade  
PETROBRAS

---

Prof. Dr. Ubirajara Aluizio de Oliveira Mattos  
Faculdade de Engenharia da UERJ

Rio de Janeiro  
2014



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por sempre me levar pelo caminho mais tortuoso, desafiador e por vezes mais longo, compensando-me com fé, força e muita paciência.

Por me fazer chorar e indagar por que eu? Mostrando-me em seguida que a dor passa e que o amanhã pode ser lindo e o foi pela provação passada.

Ao meu pai pela rigidez e ternura contida e a minha mãe pela ternura e rigidez contida, por ser meu exemplo de bom caráter e dignidade.

A minha irmã por ser meu porto seguro e pela união, mesmo quando distantes.

Aos meus orientadores pelos ensinamentos, conselhos e contribuição para meu crescimento profissional. Além do respeito e paciência com que sempre me trataram.

Aos meus colegas de trabalho pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos, por entenderem minhas recusas em prol deste desafio.

E a todos que me ajudaram a tornar concreto este trabalho.



Determine que algo possa e deve ser feito;  
então você achará o caminho para fazê-lo

*Abraham Lincoln (1809-1865), presidente dos EUA de 1860 a 1865.*



## RESUMO

OLIVEIRA, Shyrlene Lima de Aquino. *Confiabilidade operacional de Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI) de refinaria de petróleo: estudo de caso*. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

O projeto de Estações de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEIs) deve objetivar um desempenho médio, o qual não pode ser ultrapassado certo número de vezes durante seu tempo operacional. Este trabalho propõe a aplicação da metodologia conhecida como Coeficiente de Confiabilidade (CDC) para quantificação da confiabilidade das etapas de tratamento físico (flotação) e biológico (lodos ativados com aeração prolongada), considerando efluente oleoso proveniente de refino de petróleo. Tal metodologia, entretanto, não possibilita a identificação das prováveis causas do baixo desempenho na tratabilidade. Por isso também é proposta a aplicação da ferramenta de gestão riscos conhecida como FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*), que permite a quantificação das observações qualitativas de campo, tornando os valores comparáveis para definir a hierarquização dos riscos e criticidade das etapas de tratamento estudadas. A etapa biológica para o parâmetro NH<sub>3</sub> apresentou a maior confiabilidade, ainda que a análise de risco tenha apontado esta etapa como mais crítica. Ou seja, um sistema confiável não necessariamente apresenta menor criticidade, pois uma má gestão implicará em possíveis infrações às metas pré-fixadas ou à própria legislação ambiental.

Palavras-chave: Confiabilidade. Efluentes industriais. Refinaria.



## ABSTRACT

OLIVEIRA, Shyrlene Lima de Aquino. *Industrial Wastewater Treatment Plant (WTP) operational reliability of petroleum refinery: case of study* 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

The design of Wastewater Treatment Plants (WTP) should target an average performance, which can't exceed certain number of times during its operating time. This paper proposes the application of the methodology known as Coefficient of Reliability (CR) for quantifying the reliability of the stage of physical treatment (flotation) and biological (extended aeration activated sludge), whereas oily wastewater from oil refining. This methodology, however, doesn't manage to identify the likely causes of poor performance in treatability. So it is also proposed the implementation of risk management tool known as FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis), which allows the quantification of qualitative field observations, making comparable values to define a hierarchy of risk and criticality of studied treatment steps. The biological stage for NH<sub>3</sub> parameter showed the highest reliability, even if the risk analysis has pointed this step as critical. Meaning, a reliable system does not necessarily have lower criticality because mismanagement will result in possible violations of preset targets or environmental legislation itself.

Key-words: Reliability. Industrial effluents. Refineries.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gestão ambiental empresarial – Influências. ....	33
Figura 2 - Modelo de gestão de riscos. ....	38
Figura 3 - Processo de análise de riscos. ....	41
Figura 4 - Matriz de riscos .....	42
Figura 5 - Classes de impacto, probabilidade e níveis de tratamento. ....	43
Figura 6 - Estratégia de tratamento de riscos.....	44
Quadro 1 - Exemplo de Lista de Verificação. ....	49
Figura 7 - Etapas para a execução de uma análise de MCC completa.....	57
Figura 8 - Curva da banheira.....	59
Quadro 2 - Estrutura das tabelas aplicadas à FMECA. ....	63
Figura 9 - Faixa de criticidade: matriz de criticidade .....	70
Figura 10 - Principais tipos de biorreatores empregados nos processos aeróbios de tratamento em refinarias.....	94
Figura 11 - Etapas do tratamento de efluentes na refinaria. ....	115
Figura 12 - Esquema simplificado do tratamento de efluentes.....	116
Figura 13 - Sistemas principais da ETEI. ....	125
Figura 14 - Sistema e subsistemas da ETEI. ....	126
Figura 15 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de NH <sub>3</sub> na CAO .....	132
Figura 16 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de DQO na CAO .....	132
Figura 17 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de DQO na CAC .....	133
Figura 18 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de NH <sub>3</sub> na saída do SAO.....	134
Figura 19 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de DQO na saída do SAO.....	135
Figura 20 - Histograma de frequência relativa (%) de temperatura nas bacias de floculação .....	136
Figura 21 - Histograma de frequência relativa (%) de pH nas bacias de floculação.....	137

Figura 22 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de DQO na saída do flotor	138
Figura 23 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de O&G na saída do flotor	139
Figura 24 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de DQO na entrada do tratamento biológico	140
Figura 25 - Histograma de frequência relativa (%) da relação DBO/DQO na entrada do tratamento biológico	141
Figura 26 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de SSTA nos reatores biológicos	142
Figura 27 - Histograma de frequência relativa (%) da relação SSVTA/SSTA nos reatores biológicos	142
Figura 28 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de OD nos reatores biológicos	144
Figura 29 - Histograma de frequência relativa (%) dos valores de pH nos reatores biológicos	145
Figura 30 - Histograma de frequência relativa (%) dos valores de TLD	146
Quadro 3 - Planilha FMECA – Grades	149
Quadro 4 - Planilha FMECA – Desarenador	151
Quadro 5 - Planilha FMECA – SAO	153
Quadro 6 - Planilha FMECA – Equalizador	156
Quadro 7 - Planilha FMECA – Flotor	158
Quadro 8 - Planilha FMECA – Coagulação/floculação	160
Quadro 9 - Planilha FMECA – Reator biológico	162
Quadro 10 - Decantador secundário	165
Quadro 11 - Planilha FMECA – Reciclo do lodo	168

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais métodos de levantamento de riscos e seus tipos de análise ...	48
Tabela 2 - Índice de riscos (RPN) .....	66
Tabela 3 - Índice de probabilidade de ocorrência.....	67
Tabela 4 - Classe de consequências por área de interesse.....	68
Tabela 5 - Índice de severidade .....	68
Tabela 6 - Índice de detecção .....	69
Tabela 7 - Correntes líquidas geradas em refinarias.....	83
Tabela 8 - Principais contaminantes de efluentes hídricos em refinarias.....	108
Tabela 9 - Dados de projeto da ETEI .....	118
Tabela 10 - Parâmetros para acompanhamento operacional na saída do SAO .....	119
Tabela 11 - Acompanhamento operacional na caixa de passagem A.....	121
Tabela 12 - Parâmetros analisados antes do descarte .....	122
Tabela 13 - Dados básicos e eficiência dos tratamentos .....	128
Tabela 14 - Dados básicos e confiabilidade dos tratamentos .....	128
Tabela 15 - Estatística básica dos principais parâmetros operacionais da ETEI ...	130
Tabela 16 - Hierarquia dos riscos do sistema de tratamento de efluentes.....	169



## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/M	Alimento/Microrganismo
API	<i>American Petroleum Institute</i>
CAC	Canaleta de Águas Contaminadas
CAO	Canaleta de Águas Oleosas
CDC	Coeficiente de Confiabilidade
CF	Constituição Federal
CMK	Índices de Capacidade de Máquinas
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DAF	<i>Dissolved Air Flotation</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPS	Substância Polimérica Extracelular
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETA	<i>Event Tree Analysis</i>
ETEI	Estação de Tratamento de Efluentes Industriais
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FAD	Flotação de Ar Dissolvido
FCC	Craqueamento Catalítico Fluido
FMECA	<i>Failure Modes, Effects and Criticality Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HAZOP	<i>Hazard and Operability Analysis</i>
HCC	Hidrocraqueamento
HDT	Hidrotratamento
IEH	Indicador de Efluentes Hídricos
IL	Idade do Lodo
MBBR	<i>Moving Bed Biofilm Reactors</i>
MBR	<i>Membrane Biological Reactors</i>

MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
PMI	<i>Project Management Institute</i>
POAs	Processos Oxidativos Avançados
PRA	<i>Preliminary Risk Analysis</i>
PT	Fósforo Total
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SAO	Separadores Água-Óleo
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SS	Sólidos Suspensos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSTA	Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SSVTA	Sólidos Suspensos Voláteis no Tanque de Aeração
TLD	Total de Lodo Decantado
TRH	Tempo de Retenção Hidráulico
UV	Ultravioleta

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
cm	Centímetro
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
m	Metro
m <sup>3</sup> /dia	Metro cúbico por dia
mg/L	Miligramma por litro
mL/L	Mililitro por litro
m/s	Metro por segundo
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
O <sub>2</sub>	Oxigênio
ppm	Partes por milhão
s <sup>-1</sup>	Segundo elevado a menos 1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato
%	Porcentagem



# SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	25
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	27
1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	27
1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	27
1.3	<b>Organização da dissertação</b> .....	27
2	<b>INTRODUÇÃO À QUESTÃO AMBIENTAL</b> .....	29
2.1	<b>Crise ambiental</b> .....	29
2.2	<b>Gestão ambiental</b> .....	30
2.3	<b>Gestão ambiental empresarial</b> .....	32
2.4	<b>Modelos de gestão ambiental</b> .....	33
3	<b>GESTÃO DE RISCOS</b> .....	35
3.1	<b>Conceitos gerais sobre gestão de riscos</b> .....	35
3.2	<b>Estrutura da gestão de riscos</b> .....	37
3.2.1	<u>Processo de avaliação de riscos</u> .....	39
3.2.1.1	Identificação de riscos .....	39
3.2.1.2	Análise de riscos .....	40
3.2.1.3	Avaliação de riscos.....	41
3.2.1.4	Apreciação de riscos .....	42
3.2.1.5	Tratamento dos riscos .....	43
3.2.1.6	Monitoramento e revisão .....	45
3.2.1.7	Comunicação e consulta .....	46
3.3	<b>Principais métodos de análise de riscos</b> .....	46
3.3.1	<u>Análises de riscos quantitativas e qualitativas</u> .....	46
3.3.2	<u>Análise de riscos por Lista de Verificação (Check List Analysis)</u> .....	48
3.3.3	<u>Análise Preliminar de Riscos (Preliminary Risks Analysis – PRA)</u> .....	49
3.3.4	<u>Análises de Perigo e Operacionalidade (Hazard and Operability Analysis – HAZOP)</u> .....	50
3.3.5	Análise por Árvore de Eventos ( <i>Event Tree Analysis – ETA</i> ) .....	50
3.3.6	Análise por Árvore de Falhas ( <i>Fault Tree Analysis – FTA</i> ).....	51
4	<b>CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO INDUSTRIAL</b> .....	53
4.1	<b>Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)</b> .....	55

4.2	<b>Falhas</b> .....	58
4.3	<b>Análise por Modo de Falhas, Efeitos e Criticidade (Failures Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA)</b> .....	60
4.3.1	<u>Etapas da FMEA/FMECA</u> .....	62
4.3.2	<u>Estimativa do índice de criticidade</u> .....	65
4.4	<b>Confiabilidade de tratamento de efluentes</b> .....	71
5	<b>DEMANDA DE ÁGUA E GERAÇÃO DE EFLUENTES NUMA REFINARIA DE PETRÓLEO</b> .....	79
5.1	<b>Demanda hídrica e geração de efluentes</b> .....	79
5.2	<b>Segregação das drenagens</b> .....	81
6	<b>TRATAMENTO DE EFLUENTES EM REFINARIAS DE PETRÓLEO</b> ...	85
6.1	<b>Tratamento Físico</b> .....	85
6.2	<b>Tratamento Químico</b> .....	89
6.3	<b>Tratamento Biológico</b> .....	91
6.3.1	<u>Lagoas de oxidação</u> .....	94
6.3.2	<u>Reatores com Membrana (MBR)</u> .....	95
6.3.3	<u>Contactores biológicos rotativos</u> .....	96
6.3.4	<u>Filtros biológicos</u> .....	97
6.3.5	<u>Reator de Leito Móvel com Biofilme (MBBR)</u> .....	98
6.3.6	<u>Lodos ativados</u> .....	100
7	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS DA POLUIÇÃO HÍDRICA</b> .....	107
8	<b>ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS</b> .....	111
9	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	113
9.1	<b>Caracterização da área de estudo</b> .....	113
9.2	<b>Etapas do tratamento de efluentes</b> .....	113
9.2.1	<u>Unidades da ETEI e frequência de amostragem</u> .....	117
9.2.1.1	Sistemas de drenagem, gradeamento e desarenação .....	118
9.2.1.2	Operação dos SAOs .....	119
9.2.1.3	Operação do sistema de equalização .....	119
9.2.1.4	Operação do sistema de coagulação/floculação.....	120
9.2.1.5	Operação do Sistema de Flotação.....	120
9.2.1.6	Operação do Sistema Biológico.....	121
9.3	<b>Metodologia de trabalho</b> .....	122
9.3.1	<u>Coeficiente de confiabilidade</u> .....	122
9.3.2	<u>Análise de Riscos Aplicada</u> .....	123
9.3.3	<u>Etapas FMECA</u> .....	124

10	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	127
10.1	<b>Coeficiente de confiabilidade</b> .....	127
10.2	<b>Análise de Risco Aplicada</b> .....	129
10.2.1	<u>Índice de ocorrência</u> .....	131
10.2.1.1	Sistema de Drenagem .....	131
10.2.1.2	Separador Água-óleo .....	133
10.2.1.3	Coagulação/floculação .....	135
10.2.1.4	Flotador (Célula de flotação) .....	137
10.2.1.5	Entrada do Tratamento Biológico .....	139
10.2.1.6	Reatores Biológicos .....	141
10.2.1.7	Reciclo do Lodo .....	145
10.2.2	<u>Índice de criticidade</u> .....	146
10.2.3	<u>Hierarquia dos riscos</u> .....	169
	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	171
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	175
	<b>ANEXO I</b> .....	187



## INTRODUÇÃO

O impacto do lançamento de efluentes de Estações de Tratamento de Efluentes Industriais (ETELs) em corpos d'água sempre foi um motivo de grande preocupação, muito embora, atualmente exista uma série de legislações ambientais que procura influir tanto nas condições de descarga, quanto no nível de tratamento exigido para minimizar os impactos ambientais negativos provocados pelo despejo de efluentes líquidos (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005a).

Apesar das imposições legais, observa-se que algumas indústrias preocupam-se prioritariamente com os elementos de suas plantas que permitem a obtenção de seus produtos finais para serem comercializados e com isso obtenção de lucros, ficando em segundo plano a gestão dos rejeitos de suas atividades produtivas.

Diante deste panorama, este trabalho parte do reconhecimento do Sistema de Tratamento de Efluentes como uma planta industrial, que assim como as unidades de produção devem ter um processo de gestão efetivo, provido de controles que garantam eficiência do tratamento e atendimento à legislação.

Essa gestão se faz necessária, uma vez que, em geral, o dimensionamento de ETEIs é baseado em normas e documentos técnicos que fornecem indicação do nível de segurança operacional, mas não garantem a eficiência do tratamento, além disso, as técnicas usualmente empregadas para a definição da eficiência de projeto de estação de efluentes não considera a variabilidade inerente a cada processo, que está diretamente associada à confiabilidade.

As técnicas de análise de riscos, incluindo as de manutenção centrada na confiabilidade, garantem atendimento aos padrões mínimos de segurança, eficiência de equipamentos, máxima disponibilidade operacional e custos de manutenção apropriados, desempenham, portanto, uma importante função na avaliação dos sistemas de controle implantados e proporcionam um melhor entendimento das instabilidades das etapas de tratamento, bem como das frequências destes eventos (LAFRAIA, 2001).

Esses estudos que visam avaliar o desempenho de estações de tratamento de efluentes e seus elementos críticos, se mostram fundamentais para o alcance dos padrões de lançamento que estão associados a um bom desempenho na tratabilidade

do efluente e frequência adequada de manutenção, demonstrando seu potencial como ferramenta de gestão ambiental.

Nesse sentido, propõe-se a utilização de metodologias que auxiliem na operação estável de ETEIs, centradas no conceito de confiabilidade. Para tal, será utilizada técnica de análise de riscos conhecida como Análise de Modo de Falhas, Efeitos e Criticidade (*Failure mode Effect and Criticality Analysis – FMECA*) para diagnóstico dos riscos operacionais e o Coeficiente de Confiabilidade (CDC) como indicador de desempenho dos tratamentos.

Trata-se de um estudo realizado em um Complexo Industrial de Refino de Petróleo, localizado à margem um corpo receptor de grandes dimensões. Optou-se por uma indústria de refino, pois este ramo por muitos anos opera utilizando basicamente o tratamento com lodos ativados, por atender em eficiência e economicidade, não sendo encontrados muitos estudos sobre confiabilidade do tratamento de efluentes oleosos.

Além disso, os poucos estudos publicados abordam apenas o tratamento biológico, não abrangendo todas as etapas de tratamento de efluentes.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo geral**

Propor a aplicação de metodologias existentes, de fácil acesso que auxiliem na operação estável de ETEIs, centradas no conceito de confiabilidade.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Identificar riscos operacionais em ETEIs, avaliar a influência dos mesmos no tratamento e indicar meios para sua mitigação/eliminação;
- Elaborar ficha de campo para coleta e sistematização das observações;
- Hierarquizar os riscos do sistema, de modo a priorizar seu tratamento;
- Obter indicadores de desempenho das ETEIs;
- Correlacionar os resultados obtidos pelas metodologias propostas;
- Fornecer suporte quantitativo e qualitativo para os gestores das indústrias de refino de petróleo.

### **1.3 Organização da dissertação**

A seguir será mostrado que o presente trabalho está dividido em onze seções:  
*Seção 1* – Esta primeira parte destina-se a estabelecer informações introdutórias sobre o tema estudado e os objetivos desta pesquisa.

*Seções 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8* – Realizam um levantamento bibliográfico, expondo os fundamentos teóricos que subsidiaram esta pesquisa, através de conceitos e aspectos relacionados à confiabilidade de ETEIs, bem como o impacto dos elementos críticos de processo e aspectos legais.

*Seção 9* – Apresenta a área de estudo, dados de monitoramento de efluente, dados de projeto, características dos sistemas de tratamento, bem como discrimina os pontos de coleta, tratamento estatístico de dados e o pessoal envolvido.

*Seção 10* – Esta seção busca exibir os resultados obtidos em campo e na análise estatística dos dados, suas correlações e demais discussões pertinentes.

## 2 INTRODUÇÃO À QUESTÃO AMBIENTAL

### 2.1 Crise ambiental

A Revolução Industrial surgida no século XVIII é um marco na história das relações humanas e o meio ambiente, principalmente, devido à mudança completa do processo produtivo até então existente, bem como das características físicas do planeta. Nesse viés, que ganha grande destaque a mecanização, na qual o homem transforma a matéria-prima em utilidades para si (produção de bens e serviços) com o despejo de materiais (resíduos) e energia não aproveitados para o meio ambiente (CAMPOS, 2011; FELLEBERG, 1980).

Acompanhando da Revolução Industrial, que deu a tônica da série de problemas ambientais modernos, notou-se, no século XX, uma transformação na percepção que os seres humanos tinham da natureza e dos problemas ambientais e sociais: anteriormente, erroneamente, pensava-se que a Terra tinha capacidade infinita de prover recursos naturais e que as atividades antrópicas causavam apenas efeito local no meio ambiente, ignorando os efeitos regional e global (BAIRD; CANN, 2011; BARBIERI, 2007; MOTA, 2006; COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991). As décadas que se seguiram à Segunda Guerra Mundial foram fortemente marcadas pela discussão sobre o modelo de desenvolvimento e crescimento econômico predominante (FLAVIN, 2002).

Assim, em 1972, foi realizada a Conferência de Estocolmo com o objetivo de conscientizar a sociedade sobre a importância da relação homem e meio ambiente, com vistas a atender as necessidades da população presente sem comprometer as gerações futuras.

Esta foi a primeira atitude mundial de preservação do meio ambiente, promovida pelas Nações Unidas que aconteceu na capital da Suécia, Estocolmo.

Nesse novo cenário, as Nações Unidas, em 1983, novamente tiveram a iniciativa de formar uma comissão especial para estudar os conflitos entre a crescente degradação ambiental e as necessidades das nações em desenvolvimento. Como resultado, em 1987, foi publicado o relatório denominado “Nosso Futuro Comum” ou

“Relatório *Brundtland*” (BAIRD; CANN, 2011; BRAGA et al., 2005), onde as seguintes definições de desenvolvimento sustentável são encontradas:

O desenvolvimento sustentável é mais que crescimento, ele exige uma mudança no teor do crescimento, a fim de torná-lo menos intensivo de matérias-primas e energia, e mais equitativo em seu impacto. Tais mudanças precisam ocorrer em todos os países, como parte de um pacote de medidas para manter a reserva de capital ecológico, melhorar distribuição de renda e reduzir o grau de vulnerabilidade às crises econômicas. (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991, p. 56).

Entretanto, a definição mais conhecida e utilizada é a “O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades dos presentes sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades (p. 46)”. Nesses conceitos notam-se três áreas que se intersectam: a sociedade, a economia e o meio ambiente. O consumo de recursos naturais pela sociedade e em paralelo a produção de resíduos são problemas centrais (BAIRD, CANN, 2011).

O Relatório *Brundtland* assegura que a humanidade é capaz de tornar o desenvolvimento sustentável – não num sentido de um estado permanente de harmonia, mas num processo contínuo de empenho, de aprimoramento e de mudança. Trata-se de ir ao cerne das questões ambientais nas dimensões da interação homem-natureza, estudá-las e compreendê-las integralmente, para então empreender as ações necessárias para concretizar um desenvolvimento sustentável, o qual, necessariamente, envolve sistemas humanos, sistemas ambientais e ecologia.

## 2.2 Gestão ambiental

A resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 306/2002, que estabelece os requisitos mínimos e o termo de referência para realização de auditorias ambientais, define gestão ambiental como “Condução, direção e controle do uso dos recursos naturais, dos riscos ambientais e das emissões para o meio ambiente, por intermédio da implementação do sistema de gestão ambiental”.

A idealização, implantação e implementação de um sistema de gestão ambiental resultam de um processo dinâmico e iterativo. Diz-se que o sistema é eficiente, quando a partir da estruturação, definição de responsabilidades, procedimentos e recursos alocados para implementação da política da organização,

os objetivos e as metas ambientais conseguem ser atingidos (D'AVIGNON; LA ROVERE, 2002).

A implantação da gestão ambiental em uma ETEI incorpora a definição de uma política, objetivos, metas, planos de ação e o controle das fases de gestão por meio de indicadores apropriados. Esses preceitos são definidos na norma ISO 14001.

Barbieri (2007) iguala os termos administração e gestão ambiental, os quais são entendidos como diretrizes e atividades administrativas e operacionais, que englobam planejamento, controle, direção, recursos alocados em melhorias e quaisquer benefícios sobre o meio ambiente, quer reduzindo ou eliminando danos devido às ações humanas. A gestão ambiental é parte integrante do sistema de gestão global de uma organização.

Ainda de acordo com este autor, qualquer proposta de gestão ambiental inclui pelo menos três dimensões:

1. Dimensão espacial: diz respeito à área ou local, no qual se pretende efetivar as ações de gestão. Exemplo: global, regional, local, empresarial, etc.
2. Dimensão temática: delimita as questões de cunho ambiental às quais as ações se destinam. Exemplo: ar, águas, solo, fauna e flora, recursos minerais, etc.
3. Dimensão institucional: concerne aos agentes que desempenham iniciativas de gestão. Exemplo: empresa, governo, sociedade civil, etc.

Ainda que seja possível propor definições como as acima, seu conteúdo e o sentido de sua incorporação evoluíram ao longo das últimas décadas. O grande fator indutor da emergência da gestão ambiental foi, sem dúvida, o crescimento da consciência ambiental pelos amplos setores da sociedade, tendo como um dos marcos a década de 60, na qual o livro "Primavera Silenciosa" (*Silent Spring*), de autoria de Rachel Carson foi publicado nos Estados Unidos, expondo os efeitos negativos dos agrotóxicos em ambientes naturais, principalmente do uso indiscriminado de DDT na natureza (DIAS, 2009).

Na mesma década, foi realizada a reunião do Clube de Roma, a qual gerou o documento "Limites da Natureza" (*The Limits to Growth*), alertando para os problemas de crescimento populacional e escassez de recursos naturais. Este documento foi muito importante para despertar a consciência ecológica mundial, pois colaborou para que, em 1972, ocorresse Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em Estocolmo, na Suécia.

A década de 1970 ficou conhecida como a década da regulamentação e do controle ambiental, ou seja, a época do “comando-controle”. Nesse período as nações começaram a estruturar seus órgãos ambientais e a estabelecer suas legislações, visando ao controle da poluição ambiental (NASCIMENTO, 2008).

Desde então, a preocupação ambiental atingiu amplos setores da sociedade de todo o mundo, principalmente devido às constatações de degradação observada em todas as partes do planeta. As catástrofes ambientais, tais como Seveso, Minamata, *Three Miles Island*, Bophal, Exxon Valdez, Cubatão, Baía de Guanabara e tantas outras, contribuíram sobremaneira para ampliar o nível de conscientização, que deram contorno aos mecanismos de gestão ambiental e sua incorporação nas organizações empresariais (BARBIERI, 2007).

### **2.3 Gestão ambiental empresarial**

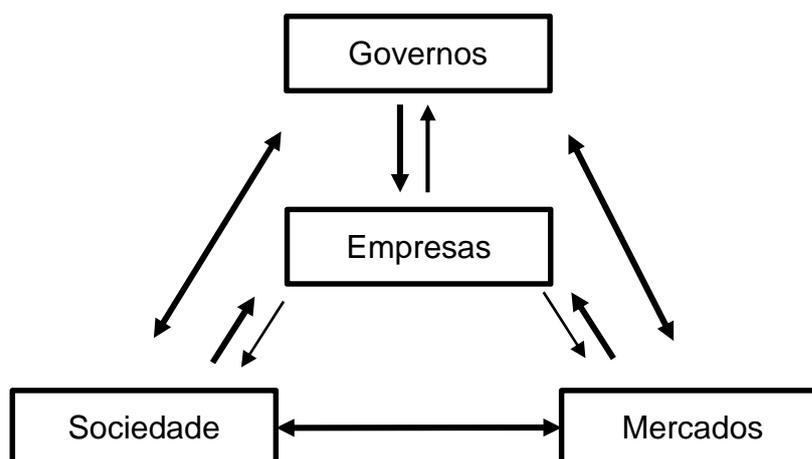
A minimização ou solução para os problemas de cunho ambiental depende de uma nova atitude das empresas e indústrias, que antes de qualquer decisão, devem adotar concepções administrativas e tecnológicas que permitam a ampliação da capacidade suporte do planeta (BARBIERI, 2007).

A gestão ambiental se tornou uma importante ferramenta de modernização e competitividade para as organizações. O setor produtivo, cada vez mais, está incorporando em seus custos aqueles relacionados com a questão ambiental, com mudanças significativas nos padrões de produção, comercialização e consumo (SAO PAULO, 2008).

Essa nova percepção, dá-se pela necessidade de sobrevivência das empresas, principalmente perante o aumento da competitividade e por ter suas práticas gerenciais sendo progressivamente questionadas pelo público. A imagem negativa da indústria percebida pela sociedade vem provocando uma crescente pressão sobre os órgãos oficiais de controle ambiental, produzindo as leis ambientais cada vez mais severas e exigindo soluções complexas para atendimento às normas legais. Se não existisse pressão da sociedade e medidas governamentais, não se observaria o envolvimento crescente das empresas na disciplina ambiental (BARBIERI, 2007; MARTINI JÚNIOR; GUSMÃO, 2003).

As principais influências e pressões sobre as empresas, no sentido de implementação de sistemas de gestão ambiental estão ilustradas na Figura 1.

**Figura 1 - Gestão ambiental empresarial – Influências.**



Fonte: BARBIERI, 2007.

Levando em consideração o conceito de desenvolvimento sustentável, apresentado anteriormente, uma empresa sustentável seria aquela que cria valor de longo prazo aos acionistas e coopera para buscar soluções ambientais e sociais (BARBIERI, 2007).

## 2.4 Modelos de gestão ambiental

O modelo de gestão deve objetivar à melhoria contínua, direcionando a empresa a revisitar cada passo da implementação do modelo, além de demonstrar uma atitude mais proativa. Para se chegar ao desenvolvimento sustentável, devem-se estabelecer os objetivos e estratégias para que o planejamento seja realizado de maneira mais produtiva (SANTOS; PORTO, 2008).

As organizações podem desenvolver seu próprio modelo de gestão ambiental ou ainda se valer dos diversos modelos genéricos que se encontram disponíveis no mercado. Seguem alguns:

- Atuação Responsável: padronização de normas de segurança, saúde e controle ambiental, com difusão para todos os membros da empresa de práticas gerenciais relativas aos seus processos de produção, distribuição e utilização dos produtos, abordando à prevenção da poluição (BARBIERI, 2007);
- Produção Mais Limpa: estratégia ambiental integrada em processos, produtos e serviços, com emprego mais eficiente de recursos naturais e com geração mínima de resíduos e poluição, além de gestão de riscos para a saúde humana e segurança (FURTADO, 2003);
- Emissão Zero – ZERI: transformação de todas as entradas (*inputs*) em produtos e aproveitamento de todas as saídas (*outputs*) com valor agregado para produção de outros bens e serviços, através da aplicação de ciência, tecnologia e outros instrumentos, envolvendo governo, universidade e demais setores sociais (FURTADO, 2003);
- Análise ou Avaliação de Riscos: um importante instrumento para a identificação de riscos em uma unidade produtora, com objetivo de identificar os riscos presentes no sistema e fornecer informações sobre as ocorrências potencialmente perigosas e suas possíveis consequências (MEYER, 2005).

### 3 GESTÃO DE RISCOS

#### 3.1 Conceitos gerais sobre gestão de riscos

O risco pode ser considerado como a probabilidade de um evento indesejado ocorrer em um período de tempo específico ou em determinada circunstância, podendo ser expresso como uma frequência ou uma probabilidade, dependendo das circunstâncias. Em termos matemáticos, frequentemente, é expresso considerando falha e consequência (SKELTON, 1997).

De Gracia (1998), por sua vez, define risco como sendo o produto da probabilidade de ocorrência de um evento pelas consequências/danos esperados.

$$R = P \cdot D \quad (1)$$

Onde:

*R*: Risco;

*P*: Probabilidade de ocorrência de um evento;

*D*: Valor dos danos associados.

Por fim, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009) conceitua risco como o efeito da incerteza nos objetivos. O efeito é um desvio em relação ao esperado e os objetivos podem ter aspectos financeiros, ambientais ou relativos à saúde e segurança.

O risco pode ser classificado de diversas maneiras. Casal et al. (1999) qualificam o risco sob duas ópticas, uma mais geral e outra mais particular, esta última tendo como base as atividades industriais:

- Geral: são classificados em *risco de categoria A*, aquele que é inevitável e aceito, sem mitigação (por exemplo: morrer atingido por um raio); *risco de categoria B*, aquele que é evitável, contudo, deve ser considerado inevitável,

caso haja necessidade de integração à sociedade moderna (por exemplo: morrer em um acidente aéreo); e *risco categoria C*, que é normalmente evitável, voluntário e com mitigação (por exemplo: praticar um esporte perigoso);

- Particular: podem ser classificados em *risco convencional*, está relacionado às atividades e equipamentos existentes em um determinado setor; *risco específico*, aquele relacionado ao manuseio de produtos, que por sua natureza, podem causar danos; e *risco maiores*, relacionados a acidentes e situações excepcionais, com consequências graves e de grandes proporções.

D'Avignon & La Rovere (2002), por sua vez, classificam o risco em *risco tecnológico*, definido como a probabilidade de ocorrência de falha em um equipamento e *risco ambiental*, sendo a junção do risco tecnológico e do impacto ambiental, ou seja, a probabilidade de ocorrência de impacto ambiental, por falha de equipamento ou de processo.

Uma vez que as organizações, cada vez mais, aplicam processos de gestão de riscos e adotam uma abordagem mais ampla para tal assunto, alguns conceitos devem ser entendidos.

Utilizaram-se as terminologias proposta pela ABNT (2009), que abrangem todas as aplicações e setores, são elas:

- Perigo: é a fonte de potencial dano, podendo ser considerado uma fonte de riscos;
- Vulnerabilidade: condição intrínseca de algo, resultando em suscetibilidade dos seus componentes que pode levar a um evento com consequências;
- Probabilidade: refere-se à chance de algo acontecer, podendo ser medida quantitativa ou qualitativamente;
- Incerteza: é a falta de informações a respeito de um evento, seu conhecimento, suas consequências ou sua probabilidade.

Ter ferramentas para minimizar incertezas, ou seja, identificar e avaliar o que poderá ocorrer durante o andamento de um projeto ou operação de um sistema é fundamental. O processo que guia o gerente pelas múltiplas tomadas de decisões é o gerenciamento de riscos.

As incertezas não podem ser totalmente eliminadas, mas podem ser reduzidas a um grau considerado tolerável, ou seja, o gerenciamento de risco não garante que não haverá eventos indesejados no projeto, mas poderá reduzir as incertezas, uma vez que estima a probabilidade de ocorrência de riscos, avalia as consequências e determina as causas que podem fazer o risco se materializar.

A gestão de riscos, portanto, é um processo de identificação e mensuração de riscos, desenvolvimento e escolha das opções de gerenciamento para controle destes riscos (KERZNER, 1998).

Smith & Merritt (2002) entendem que o gerenciamento de riscos está diretamente relacionado ao desenvolvimento do modelo de riscos que tenha foco nas principais causas do risco. Este modelo permite a quantificação do impacto do risco, de modo a comparar com outros riscos e hierarquizá-los e permite aos gestores a formulação de planos efetivos para sanar as causas.

Esses mesmos autores consideram que o processo de gerenciamento de riscos tem cinco passos fundamentais:

1. Identificação dos Riscos;
2. Análise dos Riscos;
3. Mapear e Priorizar os Riscos;
4. Solucionar os Riscos;
5. Monitorar os Riscos.

A seguir, serão apresentadas em maiores detalhes, as etapas que compõem a estrutura geral da gestão de riscos.

### **3.2 Estrutura da gestão de riscos**

De uma forma geral, a gestão de riscos visa ao controle dos riscos e engloba um conjunto de atividades específicas que tem como intuito a boa governança de uma organização ou processo, sem que eventos indesejáveis e não planejados desvirtuem os seus objetivos e metas (DANTAS, 2010).

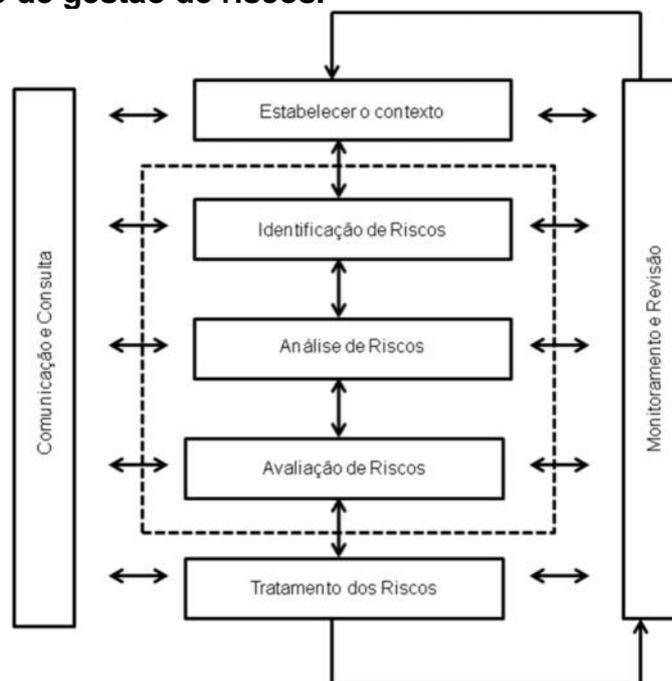
Ainda de acordo com Dantas (2010), um dos principais benefícios da gestão de riscos é o desenvolvimento das atividades inerentes a uma organização em um ambiente que controla permanentemente seus riscos, garantindo assim vantagens competitivas, além do atendimento aos aspectos legais e boa imagem da empresa perante os *stakeholders*<sup>1</sup>.

Antes de abordarmos as etapas do processo de gestão de riscos, é importante que fique clara a diferença entre os termos *análise de riscos* e *avaliação de risco*, uma vez que é comum a utilização desses termos como sinônimos. Entender essa diferença é primordial para o sucesso do processo de gestão.

Segundo Dantas (2010), a avaliação é um termo mais amplo do que a análise, sendo esta última mais restrita. A ABNT (2009) emprega a expressão avaliação de riscos como um processo global de identificação de riscos, análise de riscos e avaliação de riscos, já a análise de riscos é o processo sistemático para compreender a natureza do risco e inferir sobre o nível de risco.

A Figura 2, relativa ao modelo de gestão adotado pela ABNT (2009) ilustra bem esta diferença.

**Figura 2 - Modelo de gestão de riscos.**



Fonte: ABNT, 2009.

<sup>1</sup> *Stakeholders*: O PMI® no PMBOOK® 3. ed. define *stakeholders* como as partes interessadas (clientes, patrocinadores e sociedade) que estejam envolvidas no processo.

Neste modelo, a linha pontilhada envolve todo o macro processo de avaliação de riscos, conforme definições acima.

Como a aplicação da gestão de riscos pode se dar em uma gama de organizações, negócios, atividades ou processos, o estabelecimento do contexto no topo da estrutura permite aos gestores a identificação de suas particularidades, percepções e critérios, conforme a natureza de suas atividades ou serviços.

### 3.2.1 Processo de avaliação de riscos

#### 3.2.1.1 Identificação de riscos

De uma forma geral, antes da utilização de técnicas de análise e avaliação de riscos, é necessária a etapa de identificação dos riscos. Esta etapa envolve estudo e revisão de sistemas com o intuito de vislumbrar os possíveis perigos e todas as consequências negativas advindas deles (GRANTT, 2004; OLIVEIRA, 1991).

O objetivo principal é o entendimento dos riscos, suas fontes e possíveis eventos que possam influenciar de forma adversa as atividades de uma organização. Os componentes que devem ser foco da identificação dos riscos são: a fonte, o evento, a consequência, a causa, os controles e seus aspectos temporal e espacial.

A confiabilidade das informações presentes nos registros de eventos passados também deve ser verificada para um levantamento eficaz dos riscos, além da busca de informações, através de pesquisas sobre riscos específicos dos sistemas/processos objeto da avaliação de riscos (DANTAS, 2010).

A utilização de listas de verificação (*check lists*), estudos relativos ao comportamento durante a vida útil das unidades de processo em uma indústria e de fatores humanos, inspeções, auditorias e preparação de diagramas das falhas dos sistemas permitem a identificação dos perigos e eventos (PEREIRA, 2009).

Para Kolluru (1994), a identificação de perigos precisa:

- Definir limites analíticos;
- Identificar os perigos associados ao empreendimento e sua operação;

- Identificar os eventos iniciantes de situações anormais;
- Revisar procedimentos de segurança de engenharia e administrativos.

### 3.2.1.2 Análise de riscos

Esta etapa tem como objetivo definir o nível de risco e de sua natureza, fornecendo subsídios para a definição de prioridades e opções de mitigação dos perigos identificados. Através dela, é possível conhecer a probabilidade dos riscos virem a se concretizar e calcular os impactos na organização, sob os enfoques operacional, financeiro, legal e de sua imagem (BRASILIANO, 2009).

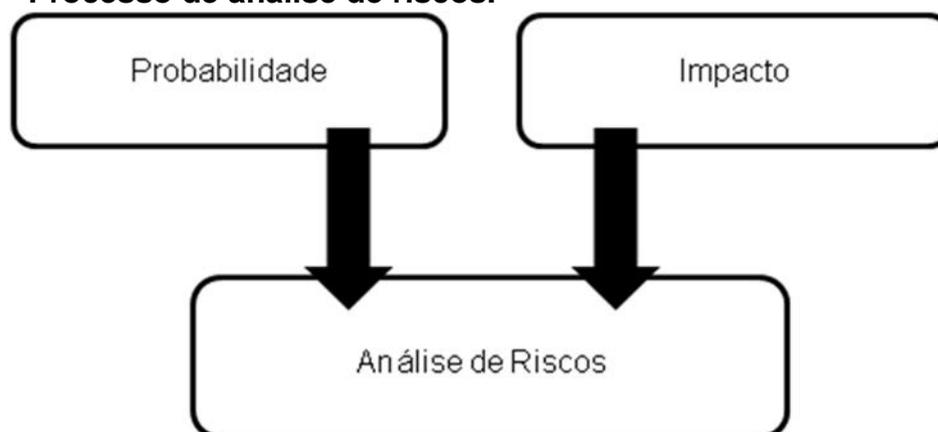
Segundo Dantas (2010), três fatores são fundamentais numa análise de riscos, são eles:

- *Controles*: reduzem a concretização do risco e possuem interconexão direta com o nível de vulnerabilidade das ferramentas de proteção de uma organização ou processo. A eficácia dos controles é avaliada geralmente por meio de auditorias, combinadas com inspeções e vistorias;
- *Probabilidade*: fornece informações acerca da possibilidade da ocorrência de uma ameaça, a qual pode ser aferida por métodos quantitativos ou qualitativos, este último utilizado com maior frequência; para determinar esse parâmetro, faz-se necessária a obtenção de dados de eventos anteriores, das falhas operacionais e suas causas, além de laudos técnicos. De posse dessas informações, chega-se ao cenário dos acidentes, quantifica-se a frequência dos cenários, suas causas e consequências (PARDO, 2009);
- *Consequências*: são os impactos/danos que uma ameaça pode causar. Para sua análise, devem-se levar em conta os critérios escolhidos para avaliação dos impactos, tais como, financeiros, legais, imagem organizacional etc.

É conveniente que a combinação entre probabilidade e consequência utilizada para determinar o nível de risco reflita o tipo de risco, as informações disponíveis e a finalidade a que se destina o resultado da avaliação de risco (ABNT, 2009).

A Figura 3 ilustra os elementos constantes em uma análise de riscos.

**Figura 3 - Processo de análise de riscos.**



Fonte: BRASILIANO, 2009 (adaptado).

### 3.2.1.3 Avaliação de riscos

Dantas (2010) define avaliação de riscos como um processo geral que combina análise e avaliação, gerando ao final uma relação com seus principais riscos e indicação da necessidade de tratamento específico para cada um deles. Tem como objetivo a identificação, análise e avaliação dos riscos.

Para essa etapa é realizado o cálculo do risco de modo a avaliá-lo de acordo com critérios previamente definidos. Para tal, vários parâmetros são utilizados na escolha dos critérios, tais como financeiros, de imagem organizacional, social e ambiental etc. Tais parâmetros dizem respeito ao tipo de atividade e criticidade da organização e tornam o processo de segregação de riscos mais objetivo.

A relevância dos riscos possui como parâmetro uma matriz de riscos, exemplificada na Figura 4. O resultado dessa ferramenta é o grau de criticidade, ou seja, indica para a empresa a priorização para tratamento de cada risco. É nessa fase que se estabelece o grau de risco dos processos ou unidades estudadas (BRASILIANO, 2009).

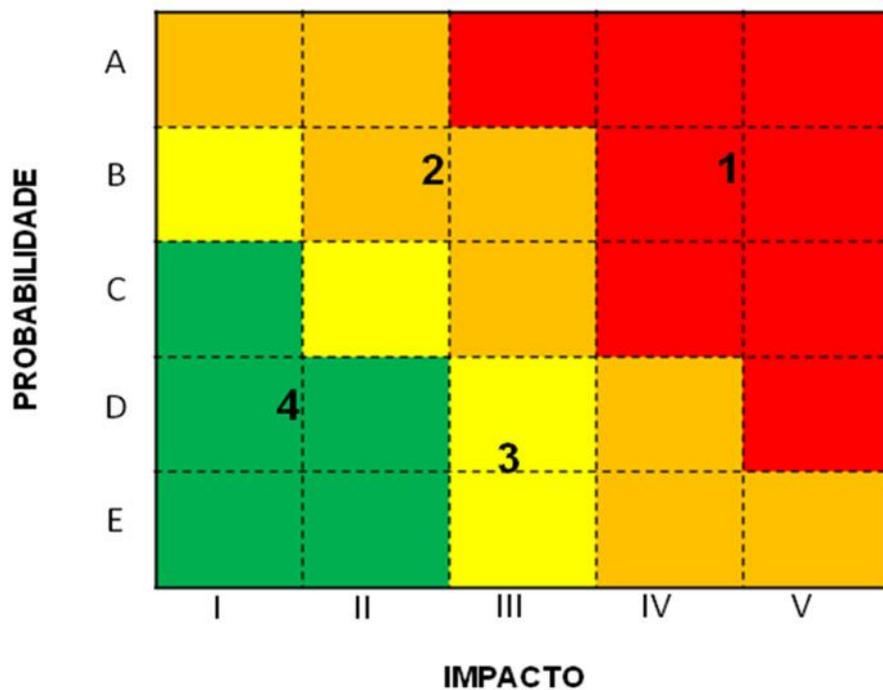
### 3.2.1.4 Apreciação de riscos

De acordo com Santos (2007), a apreciação de risco é a etapa na qual se ponderam os riscos avaliados nas análises, levando-se em conta aspectos como valores sociais, legislação vigente, os regulamentos e orientações normativas, configurando-se uma escala relativa de relevância dos riscos.

Frequentemente, fazem-se uso de indicadores para se chegar aos critérios de aceitabilidade dos riscos. Para tal, utilizam-se matrizes de riscos, que associam os riscos com suas probabilidades de ocorrência. Essa forma de representação define as áreas de criticidade, que envolve a tolerabilidade dos riscos e que depende do julgamento subjetivo do analista.

Pela divisão da matriz em níveis de criticidade, é possível avaliar o nível de vulnerabilidade e sua influência nos objetivos do processo. Os riscos plotados em cada nível deverão possuir tratamentos específicos (BRASILIANO, 2009).

**Figura 4 - Matriz de riscos**



Fonte: BRASILIANO, 2009 (adaptado).

As matrizes de riscos são construídas com base nas classes de impacto e probabilidade de ocorrência, tendo como resultado o nível de risco, o qual estabelece os prazos para intervenção nos riscos identificados, conforme Figura 5.

**Figura 5 - Classes de impacto, probabilidade e níveis de tratamento.**

IMPACTO	
V	Catastrófico
IV	Severo
III	Moderado
II	Leve
I	Insignificante

PROBABILIDADE	
A	Elevada
B	Muito Alta
C	Alta
D	Média
E	Baixa

NÍVEIS DE TRATAMENTO	
1	Ação Imediata
2	Ação Média e Curto Prazo
3	Monitoramento e Gestão
4	Risco Controlável

Fonte: BRASILIANO, 2009.

### 3.2.1.5 Tratamento dos riscos

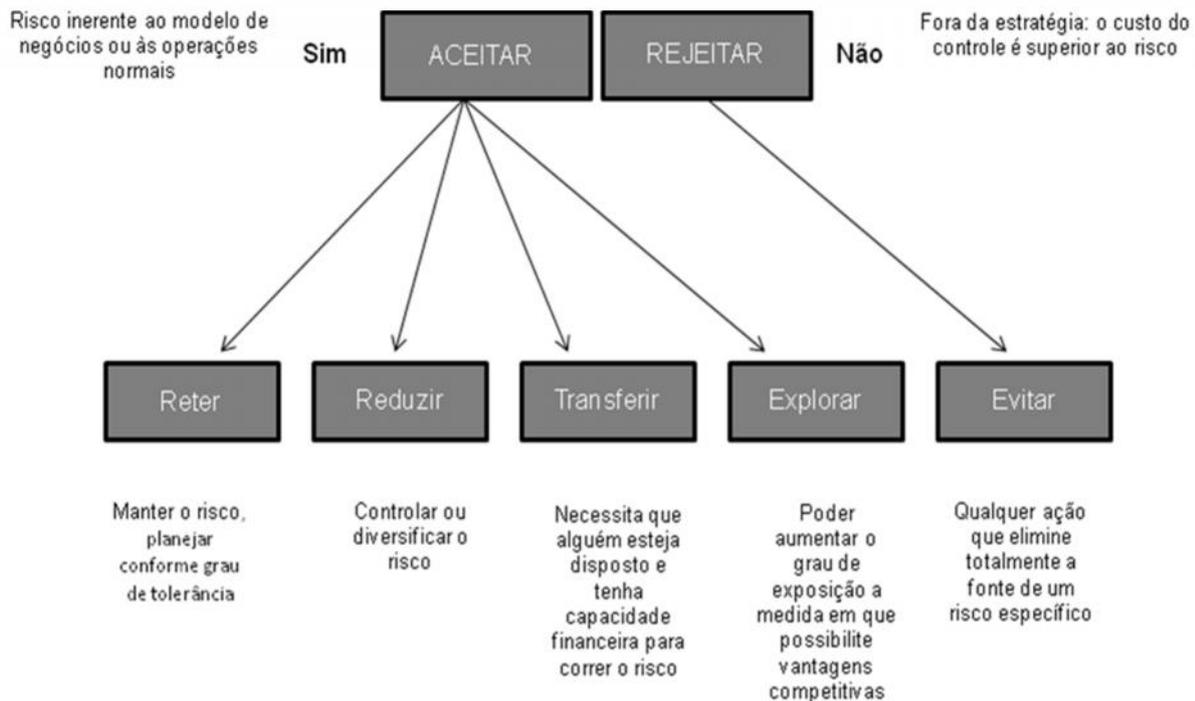
É o processo que visa à modificação do risco. Pode envolver a ação de evitar o risco pela tomada de decisão de descontinuar a atividade que dá origem ao risco; assumir ou aumentar o risco em busca de uma oportunidade; modificação na probabilidade ou consequência; e remoção dos riscos (ABNT, 2009).

Após as etapas de identificação, avaliação e mensuração, os riscos devem sofrer tratamento. De fato, não existe a eliminação total dos riscos, pois é muito difícil identificar a totalidade de riscos inerentes às atividades. Por isso as técnicas que apoiam a priorização dos riscos devem ser utilizadas para direcionar os esforços

relativos a novos projetos e planos de ação elaborados, com vistas a minimizar os eventos negativos e maximizar aqueles benéficos à organização (BRASILIANO, 2009).

É importante que fique claro que esta etapa faz parte do gerenciamento de risco e não do processo de avaliação de riscos.

**Figura 6 - Estratégia de tratamento de riscos.**



Fonte: BRASILIANO, 2009.

Na escolha das opções de tratamento, deve-se atentar para os aspectos de prevenção e reação. Algumas ações de prevenção são fundamentais, principalmente quando se consideram os riscos relativos a fenômenos da natureza.

Além disso, tem-se a relação custo *versus* benefício da medida escolhida, cuja análise é financeira, devendo o custo total da escolha ser menor que o custo do impacto calculado para o risco em estudo (DANTAS, 2009).

No que diz respeito à opção de transferir riscos, não parece ético tal posicionamento, uma vez que cabe aos gestores prezar pela integridade dos funcionários, sociedade, meio ambiente e imagem empresarial. Tal atitude deve ser evitada no tratamento de riscos, pois corroboram a manutenção do risco.

De acordo com Brasiliano (2009), os recursos necessários para mitigar a possibilidade dos riscos levantados virem a se concretizar podem ser:

- *Meios humanos*: pessoal qualificado tecnicamente, responsável por resguardar determinado processo de modo preventivo e contingencial;
- *Meios técnicos*: apoiam os meios humanos e têm como finalidade a detecção e intervenção nos eventos. Podem ser divididos em ativos, baseados na tecnologia e que reagem na identificação e detecção dos riscos; e passivos, são as barreiras físicas ou mecânicas que objetivam dificultar ou impedir a concretização dos riscos;
- *Meios organizacionais*: surgem como os procedimentos e as normas que norteiam os meios humanos e os integram aos meios técnicos. Podem incluir os Planos de Prevenção, Plano de Emergência, Plano de Manutenção e Plano de Auditoria.

#### 3.2.1.6 Monitoramento e revisão

O *Project Management Institute* (PMI, 2004) define esta etapa como os processos necessários para o acompanhamento, revisão e controle do progresso e desempenho do projeto, além de identificação de todas as áreas que necessitarão de mudanças nos planos. A principal vantagem é que o desempenho do projeto ou sistema é observado e mensurado periodicamente e de maneira uniforme para possibilitar a identificação de variações em relação ao plano de gerenciamento do mesmo. O monitoramento contínuo permite uma visão melhor sobre a saúde da unidade objeto de estudo e identifica quaisquer áreas que requeiram atenção adicional.

Segundo Smith & Merrit (2002), existe uma série de métodos para monitorar o progresso dos planos de gerenciamento de riscos:

- Monitorar as perdas esperadas para os seus riscos gerenciados (se os planos de ação estão funcionando, as perdas esperadas devem estar em declínio);

- Analisar o número de riscos evitados com sucesso, que é um método confiável para determinar a eficácia do plano de prevenção;
- Analisar o número de impactos negativos mitigados;
- Observar novos riscos identificados nas análises.

Em resumo, esta etapa envolve 02 procedimentos básicos: verificar se o plano de ação proposto está sendo executado, bem como acompanhar os resultados das ações e medidas propostas; e acompanhar a evolução das condições dos riscos identificados e estudados (BRASILIANO, 2009).

#### 3.2.1.7 Comunicação e consulta

A comunicação e a consulta, de acordo com a ABNT (2009) “São processos contínuos e iterativos que uma organização conduz para fornecer, compartilhar ou obter informações e se envolver no diálogo com as partes interessadas e outros, com relação a gerenciar riscos”.

A comunicação é necessária a todos os membros da organização, pois garante que todos terão entendimento sobre as estratégias aplicadas e decisões tomadas em relação ao gerenciamento de riscos, por isso é importante desenvolver um plano de comunicação a ser divulgado para as partes interessadas internas e externas (comunidade) logo no início do processo (BRASILIANO, 2009; SMITH; MERRIT, 2002).

### 3.3 Principais métodos de análise de riscos

#### 3.3.1 Análises de riscos quantitativas e qualitativas

Os métodos de análise de riscos visam o entendimento profundo dos potenciais problemas em projetos. As técnicas podem abranger estimativas quantitativas e

medidas para cada risco ou informações qualitativas que classificam os riscos em faixas e categorias (KENDRICK, 2003).

Em muitos casos, podem-se aplicar os dois métodos conjuntamente no processo de identificação e estimação dos riscos do sistema em estudo e, neste caso, a metodologia é denominada de semi-quantitativa.

Os dois métodos, portanto, podem ser complementares e integrados, a partir da identificação de suas especificidades. Os métodos qualitativos fornecem compreensão dos fenômenos e os quantitativos dão valores numéricos das probabilidades e das consequências dos eventos (PARDO, 2009; PEDROSO, 2007).

Técnicas qualitativas são mais fáceis de aplicar e geralmente exigem menos esforços, contudo, não são capazes de fornecer valores numéricos dos riscos e assim não avaliam a importância relativa entre os vários riscos identificados. As técnicas qualitativas são frequentemente suficientes para a priorização dos riscos e possibilitam gerenciar os riscos que merecem mais atenção naquele momento (KENDRICK, 2003; PEDROSO, 2007).

Métodos quantitativos permitem maior precisão e conhecimento sobre cada um dos riscos; são capazes, inclusive, de avaliar a confiabilidade do sistema. Seguem procedimentos padronizados e objetivos, onde as hipóteses e as variáveis dos problemas estão bem definidas, através de dados quantitativos (KENDRICK, 2003; PARDO, 2009; PEDROSO, 2007).

A escolha do tipo de uma análise a ser utilizada, qualitativa, semi-quantitativa ou quantitativa, está relacionada à qualidade e quantidade dos dados disponíveis, à natureza do problema e à exatidão desejada. Quando a informação for muito pobre, aconselha-se utilizar métodos qualitativos ou semi-quantitativos por meio da observação direta dos itens do sistema, por outro lado, se existir informação que permita uma aproximação da realidade, é recomendável fazer análises quantitativas (PARDO, 2009; PEDROSO, 2007).

A Tabela 1 ilustra as principais técnicas de levantamento de riscos e seu tipo de análise (qualitativa, quantitativa ou semi-quantitativa).

**Tabela 1 - Principais métodos de levantamento de riscos e seus tipos de análise**

Métodos de análise de riscos	Tipos de análises
Análise por Lista de Verificação ( <i>Check List Analysis</i> )	Qualitativa
Análise Preliminar de Riscos ( <i>Preliminary Risk Analysis – PRA</i> )	Qualitativa
Análise de Perigo e Operacionalidade ( <i>Hazard and Operability Analysis – HAZOP</i> )	Qualitativa
Análise por Árvore de Eventos ( <i>Event Tree Analysis – ETA</i> )	Semi-quantitativa
Análise por Árvore de Falhas ( <i>Fault Tree Analysis – FTA</i> )*	Semi-quantitativa
Análise de Modos de Falha e Efeitos ( <i>Failure Modes and Effects Analysis – FMEA</i> )*	Qualitativa
Análise de Modos de Falhas, seus Efeitos e sua Criticidade ( <i>Failure modes, Effects and Criticality Analysis – FMECA</i> )*	Semi-quantitativa

\*Manutenção Centrada na Confiabilidade

Fonte: Pardo 2009.

Nos itens seguintes, são apresentadas as principais características destes métodos de análise de risco, sendo o método FMECA mais detalhado por constituir a técnica aplicada ao estudo de caso, objeto desta dissertação.

### 3.3.2 Análise de riscos por Lista de Verificação (*Check List Analysis*)

A análise por listas de verificação é feita para identificação de riscos, baseada em dados históricos e no conhecimento do processo em estudo ou similares, além de outras fontes de informação e inspeções de campo. É considerada uma das mais simples ferramentas para identificação de riscos e pode ser aplicada para o gerenciamento de todo tipo de sistema e em todas as etapas de um projeto (MANNAN, 2005; PMI, 2004).

O documento deve possuir uma listagem detalhada de todos os elementos a serem inspecionados, a sequência de observação, as possíveis ocorrências detectáveis e espaço adicional para quaisquer comentários. São muito utilizadas para comprovar o cumprimento de normas e legislações.

**Quadro 1 - Exemplo de Lista de Verificação.**

I - Identificação				
Razão Social: CNPJ: CNAE: Grau de Risco: Endereço:				
II – Horário de Funcionamento				
III – Identificação da Equipe de Inspeção				
IV – Data e Hora da Inspeção				
Itens do Sistema	Legislação	Sim	Não	Observação
Item 1				
Componente 1.1				
Item 2				
Componente 2.1				

Fonte: Pardo, 2009.

### 3.3.3 Análise Preliminar de Riscos (Preliminary Risks Analysis – PRA)

A Análise Preliminar de Riscos (APR) é utilizada durante a fase de concepção ou desenvolvimento de um novo sistema, ou seja, quando se tem poucas informações ou baixo nível de detalhe sobre determinado processo. Tem como objetivo a determinação dos riscos que poderão ocorrer na fase operacional.

Trata-se de uma análise qualitativa, cuja metodologia baseia-se no levantamento das causas e efeitos de cada risco, medidas preventivas ou corretivas e categorização dos riscos para hierarquização, segundo a gravidade que representam para o sistema (TAVARES, 1996).

### 3.3.4 Análises de Perigo e Operacionalidade (*Hazard and Operability Analysis – HAZOP*)

O conceito básico da Análise de Perigo e Operacionalidade, também conhecida como HAZOP, é fornecer uma descrição completa do processo e analisar cada subsistema para descobrir possíveis desvios do projeto e as causas e consequências que esses desvios podem provocar. Esta análise é feita sistematicamente, através da aplicação de palavras guias (MANNAN, 2005).

Abaixo seguem algumas características da técnica:

- a) Objetivo do projeto: o modo como a planta foi projetada para operar;
- b) Desvios do objetivo do projeto: qualquer desvio do objetivo do projeto;
- c) Causas dos desvios: as causas dos desvios observados;
- d) Consequências: as consequências dos desvios observados:

- Perigo;
- Problemas na operação.

A HAZOP facilita a tomada de decisão para implementar ações necessárias para eliminar ou reduzir os riscos. Contudo, é apenas uma técnica de identificação e não se aplica à resolução de problemas. Embora seja uma técnica meramente qualitativa, pode ser utilizada para identificar áreas que devem ser submetidas a uma análise quantitativa (SKELTON, 1997).

### 3.3.5 Análise por Árvore de Eventos (*Event Tree Analysis – ETA*)

A ETA é uma técnica qualitativa e quantitativa. Qualitativamente é empregada para identificar ocorrências de cenários e quantitativamente estima frequência ou probabilidade de ocorrências dos mesmos (MANNAN, 2005).

Esta técnica é utilizada para entendimento das consequências de eventos indesejados, que podem ocorrer devido a falhas em equipamentos, perturbações em sistemas ou desvios operacionais.

Segundo De Gracia (1998), tem como principais objetivos:

- Análise qualitativa dos eventos ou eventos de falhas em sistemas complexos;
- A partir de eventos de base, que podem ser considerados como causa iniciadora de acidentes, prever eventos subsequentes, que quando combinados resultam na consequência do acidente;
- Fornecer ferramentas necessárias para desenvolvimento de análise quantitativa de riscos;

Suas principais vantagens englobam: a definição de cenários de acidentes com a proposição de alternativa para cada um dos eventos iniciadores; ilustra a relação entre falhas, eficácia dos sistemas de segurança e as consequências dos acidentes; e determina a sequência de eventos preponderantes.

Como desvantagens: as árvores de eventos crescem muito rapidamente, portanto, para se ter um tamanho razoável, é necessário priorizar as necessidades (SKELTON, 1997).

### 3.3.6 Análise por Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis – FTA*)

Trata-se de uma ferramenta *top-down*, cuja análise parte de um evento topo e vai desdobrando uma série de eventos que pode desencadear o evento topo.

A causa fundamental, ou seja, os eventos mais básicos e que se encontram no extremo inferior da árvore são também denominados de causa-raiz ou causa primária do problema topo.

Pode-se ainda aprimorar a ferramenta, a partir de um estudo de confiabilidade na árvore de falha, de modo a identificar a probabilidade do evento topo pelo cálculo das probabilidades dos eventos de causa (HELMAN; ANDERY, 2005).

No que diz respeito a sua forma gráfica, de acordo com o observado na literatura, os símbolos mais frequentemente usados são o retângulo, o círculo e os operadores lógicos “OU” e “E”.

O retângulo representa um evento particular; o círculo representa a falha primária de um ramo ou série; a porta lógica E nos diz que o evento de saída só

ocorrerá se todos os de entrada também ocorrerem; já a porta lógica OU implica que evento de saída só ocorre se pelo menos um dos de entrada ocorrer.

## 4 CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

A Confiabilidade está associada à operação bem sucedida de um produto ou sistema, sem ocorrência de quebras ou falhas. A análise de confiabilidade permite avaliar a probabilidade do risco ou falha nesses sistemas ou produtos, tornando possível um bom desempenho funcional com baixo índice de falhas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011; LAFRAIA, 2001).

Em engenharia, é primordial uma definição quantitativa de confiabilidade, principalmente em termos de probabilidade e estatística: confiabilidade de um item é, portanto, a sua probabilidade de funcionar de acordo com o especificado no projeto, sem falhas durante o período de tempo previsto e sob determinadas condições ambientais.

Sendo assim, pode-se analisar a confiabilidade a partir do objeto de interesse (item), que pode ser um sistema constituído de diversos componentes ou em casos em que se objetiva uma análise detalhada, pode ser um componente do arranjo a ser analisado individualmente (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Outros fatores básicos a serem entendidos nessa definição são ainda os requisitos e propósitos do sistema, o período de tempo e as condições ambientais: um mesmo sistema pode ser projetado para tratar efluentes com características diferentes, por exemplo, um flotador pode ser fabricado para remover sólidos de efluentes industriais com aspecto oleoso, como pode ser estruturado para tratamento de efluentes domésticos; o período de tempo deve estar associado à duração de missão, além de considerar que o tempo de uso reduz a sua confiabilidade; e as condições ambientais devem se enquadrar numa faixa razoável (especificada conforme projeto do sistema/produto).

De acordo com Lafraia (2001), as principais vantagens da confiabilidade são:

- Aumento dos lucros, pois haverá:
  - Menos paradas programadas;
  - Menores custos de manutenção e operação;
  - Menores chances de acidentes;
- Fornecer soluções às necessidades atuais das indústrias:

- Cumprir com a legislação ambiental, de segurança e higiene.
- Permitir a aplicação de investimentos a partir de informações quantitativas:
  - Segurança;
  - Continuidade operacional;
  - Meio ambiente.
- Atuação nas causas básicas de paradas não programadas, através de:
  - Histórico de falhas nos equipamentos;
  - Identificação das causas básicas das falhas;
  - Prevenção de falhas em equipamentos similares.

O termo *manutenção* está relacionado ao setor industrial e seu conceito sofreu diversas alterações à medida que as necessidades das indústrias se tornaram cada vez maiores. Anteriormente, a manutenção representava o restabelecimento das condições dos equipamentos ou sistemas, contudo, seu conceito dominante hoje é o de procedimento que garante a disponibilidade da função dos equipamentos ou instalações, permitindo a continuidade do processo de produção, com respeito ao meio ambiente, normas de segurança e custos adequados (GURSKI, 2002). Seguem abaixo os principais tipos de manutenção, segundo Gurski (2001) e Nunes (2001):

- Manutenção corretiva: corresponde a todas as ações para a correção da falha ou desempenho aquém do esperado. Pode ser subdividida em manutenção paliativa, com medidas provisórias para colocar o equipamento em funcionamento; e curativa, quando são feitas intervenções definitivas para restaurar a função do equipamento ou sistema;
- Manutenção preventiva: é a que ocorre baseada em um plano, com intervalos definidos de tempo. Esse tipo de manutenção permite reter o sistema em estado operacional ou disponível, de modo a se antecipar a falha;
- Manutenção preditiva: os controles dos equipamentos são analisados durante sua operação normal, sendo assim, não interfere na disponibilidade do sistema;
- Manutenção detectiva: contemplam as manutenções preventivas ou testes periódicos na função oculta. Detectam falhas não perceptíveis aos olhos dos operadores e técnicos de manutenção;

- Engenharia de manutenção: procura determinar as causas básicas das falhas, com possibilidades de melhora na performance nos equipamentos.

A engenharia de manutenção foca em modificações no projeto do componente que evitem a falha, sendo esta monitorada continuamente para sua eliminação.

Nunes (2001) enfatiza que tanto a manutenção preditiva quanto a detectiva são subdivisões da manutenção preventiva.

A *disponibilidade*, segundo Lafraia (2001) é a “Medida do grau em que um item estará em estado operável e confiável no início da missão”. A missão é o ato realizado por meio de uma tarefa, com vistas a atingir um objetivo.

Outro conceito que merece atenção é o de *manutenibilidade*, que difere de manutenção. Aquele é uma característica do projeto que indica a facilidade de manutenção por pessoal de média especialização, sob condições de uso especificadas, considerando o tempo de manutenção e custos. A manutenibilidade é garantida desde que a manutenção seja realizada sob condições determinadas e mediante procedimentos prescritos.

#### **4.1 Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)**

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), segundo Gurski (2002), é o processo capaz de identificar as ações necessárias para assegurar que qualquer item físico continue a desempenhar sua função desejada, dentro do seu contexto operacional. Assim sendo, esta definição possui as seguintes características chave: enfoque sistemático, planejamento de manutenção, confiabilidade e contexto operacional.

A origem da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) está relacionada aos processos tecnológicos e industriais que se desenvolveram após a Segunda Guerra Mundial. Nesse contexto, foram decisivas as pesquisas no setor tecnológico realizadas pela indústria bélica americana, seguida pela automação industrial, principalmente para sistemas mecânicos e elétricos, pautada nos avanços da informática e telecomunicações (SIQUEIRA, 2005).

Com o aumento da mecanização da indústria, a partir da década de 50, as máquinas cada vez mais complexas e numerosas necessitavam de maiores cuidados

para seu desempenho. Começa, então, a aflorar a ideia de prevenção de falhas, em detrimento das ações corretivas para reparos em equipamentos, culminando nos anos 60 com a prática de revisões periódicas nas indústrias (RAPOSO, 2005).

Nos últimos 20 anos, a MCC disseminou-se em outras áreas da engenharia, e hoje é considerado um método estruturado e sistemático para definição de estratégias de manutenção industrial.

Lafraia (2001) salienta que a ênfase deve ser dada na manutenção preventiva que permite ao sistema o seu funcionamento, e não na tentativa de restauração do equipamento ou sistema a uma condição ideal, até porque tecnicamente é impossível evitar todas as falhas, e mesmo se possível, seria inviável financeiramente.

A MCC tem início a partir da identificação das funções ou do desempenho requerido pelos itens que compõem o sistema, difere, portanto, da manutenção tradicional, cujo enfoque é a característica técnica da falha. Posteriormente há a determinação dos modos de falha e as causas prováveis e, então, o detalhamento dos efeitos e consequências da falha. Com isso, haverá subsídio para avaliar a criticidade das falhas e serem identificadas as consequências relevantes que afetam a segurança, a disponibilidade, o meio ambiente ou custo do sistema em estudo (LAFRAIA, 2001; PARDO, 2009).

As vantagens da aplicação desta técnica estão no decréscimo das rotinas e custos de manutenção preventiva; redução de 30 a 40% nos custos de mão-de-obra e materiais; garantia de que os recursos da manutenção serão aplicados onde o efeito é maior; melhoria das condições ambientais e de segurança; aumento de vida útil do equipamento; compartilhamento dos problemas da manutenção; senso de equipe e motivação de pessoal, entre outros.

Existem vários métodos de MCC, que podem ser baseados em manutenção reativa, preventiva, preditiva ou proativa. Essas estratégias podem ser utilizadas integradas para melhor aproveitamento de seus pontos fortes de modo a otimizar as instalações e equipamentos e minimizar custos do ciclo de vida (PARDO, 2009).

Neste trabalho, será usado um processo de manutenção proativa, usando técnicas de análises de risco detalhadas como a FMECA.

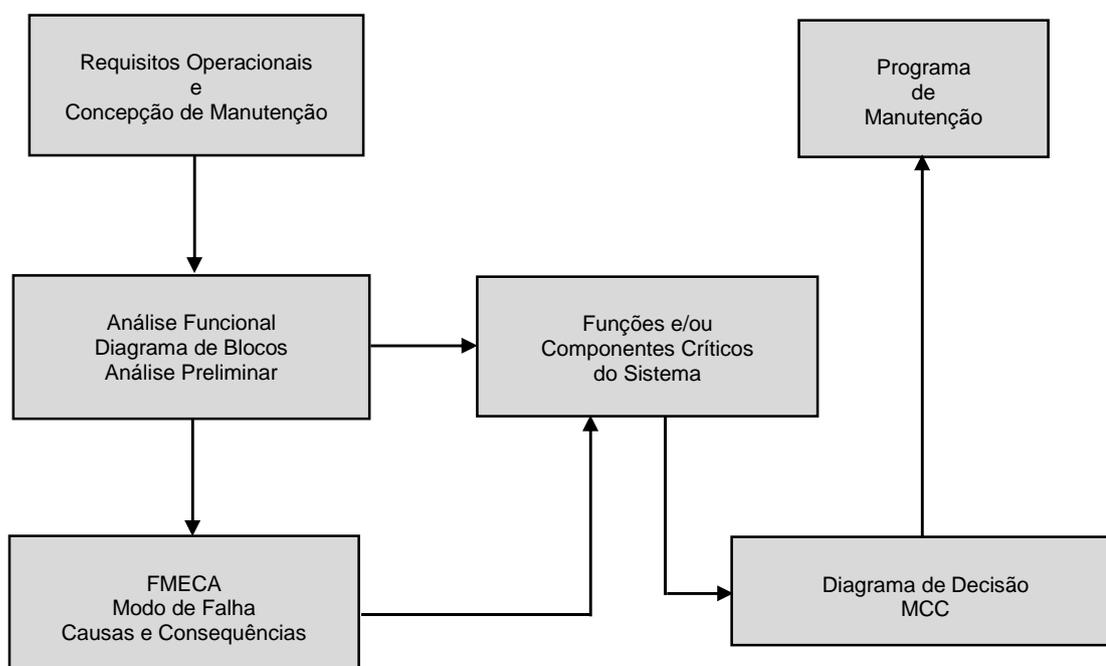
A MCC quando corretamente conduzida deverá responder a sete perguntas (BRITO, 2007):

1. Quais as funções do item do contexto operacional atual?
2. Como o item falha ao cumprir sua função?
3. O que causa cada falha operacional?
4. O que acontece quando uma falha ocorre?
5. Quais as consequências das falhas?
6. Quais as medidas preventivas para as falhas?
7. O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa preventiva adequada?

Basicamente, as etapas e ferramentas que são utilizadas para execução de uma MCC completa estão ilustradas na Figura 7.

Uma vez que esteja documentado e implementado, este processo será um sistema efetivo para assegurar operações confiáveis e seguras de um sistema ou equipamento.

**Figura 7 - Etapas para a execução de uma análise de MCC completa.**



Fonte: LAFRAIA, 2001.

## 4.2 Falhas

De acordo com Pinto & Xavier (2001), todo equipamento tem uma especificação técnica para seu projeto. Logo, será projetado de acordo com a função básica que irá desempenhar. Esse conceito também se aplica à análise de falhas em outros níveis: sistemas, subsistemas, componentes e até peças.

A manutenção possibilita reaver o desempenho inerente, ou seja, aquele que o equipamento é capaz de fornecer.

Quando o equipamento não apresenta o desempenho previsto, diz-se que ocorreu uma falha. As falhas podem estar associadas à parada da produção, instabilidade na operação, perda da qualidade do produto final, entre outros.

Para os fins da MCC, as falhas podem ser classificadas em (SIQUEIRA, 2005):

1. Falha funcional: também denominada de estado de falha. É a incapacidade de um item desempenhar sua função, de acordo com os especificados no projeto;
2. Falha potencial: falha possível de ser identificada e mensurada, pois está em processo de ocorrência ou é uma falha funcional pendente.

Quanto mais falhas, menos confiabilidade de um item e quanto maior a confiabilidade, melhores resultados para os *stakeholders*.

O termo *modo de falha* faz referência às possibilidades de um item falhar. Um item pode ter um ou mais modos de falhas. O *modo de falha potencial* é a maneira como o processo potencialmente falharia em atender os seus requisitos técnicos previamente definidos, e pode estar associado a uma não conformidade relacionada a um modo de falha de uma operação subsequente ou de uma operação anterior (MOURA, 2000; SCAPIN, 2007).

A *taxa de falhas* é conceituada como a probabilidade de um item falhar em um intervalo finito de tempo ou simplesmente, a frequência com que a falha ocorre. (SCAPIN, 2007; SLACK; CHAMBER; JOHNSTON, 1999).

Os *mecanismos de falhas*, também merecem abordagem neste subtópico, uma vez que estão relacionados às taxas de falhas de um item ao longo do tempo.

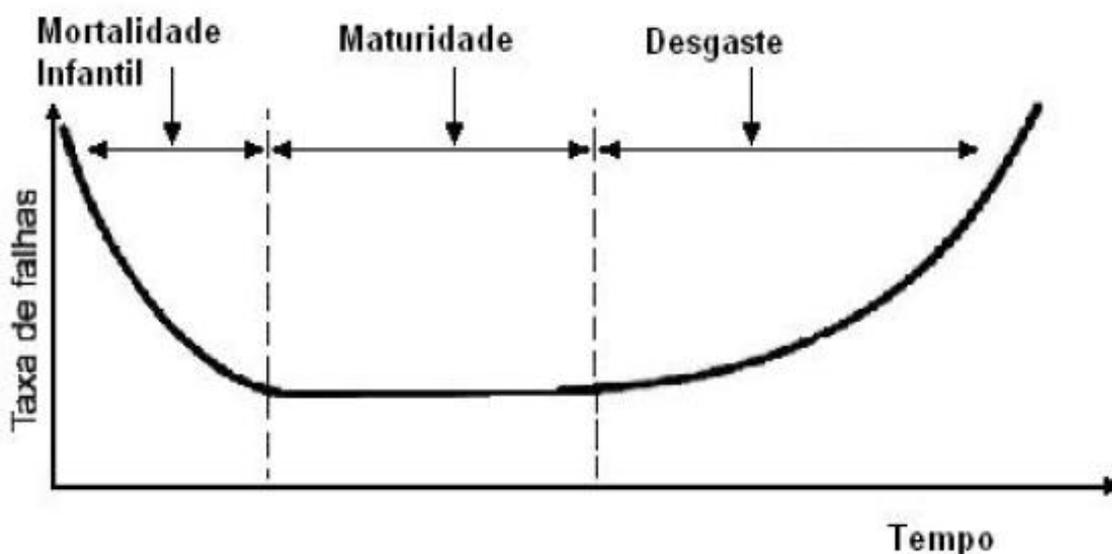
Em diferentes etapas da vida de qualquer coisa, a possibilidade de falhas será diferente. A Figura 8 apresenta o comportamento típico da vida de um sistema ou equipamento. Essa curva também é conhecida como *curva de banheira*, devido ao

seu formato. É válida para componentes elétricos, mecânicos e sistemas, cuja determinação é feita por meio de estudos estatísticos.

A curva de banheira permite a identificação de três períodos distintos, quais sejam:

- Mortalidade infantil ou vida inicial: falhas iniciais ocorrem devido a peças defeituosas ou uso inadequado;
- Vida útil ou maturidade: taxa de falhas de um modo geral, baixa, constante e devido a fatores aleatórios normais;
- Envelhecimento ou desgaste: as falhas acentuam conforme o item se aproxima do fim de sua vida útil e as falhas acontecem devido ao envelhecimento do equipamento.

**Figura 8 - Curva da banheira.**



Fonte: BLANCHARD; FABRYCKY, 2003.

Com base na manutenção, deve-se considerar que a vida inicial será mais afetada quando ocorrer um trabalho ruim nas etapas que antecedem à operação do sistema. Nesse caso, a equipe de manutenção arca com todos os prejuízos do trabalho mal executado nas etapas antecessoras, assim sendo, as consequências são a baixa confiabilidade e lucro cessante na planta.

Assim, apesar dessa curva ser considerada padrão para o comportamento de sistemas, caso haja uma boa atuação nas fases anteriores à operação, não deverá ser considerada com tal (PINTO; XAVIER, 2001).

#### **4.3 Análise por Modo de Falhas, Efeitos e Criticidade (Failures Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA)**

A técnica FMECA surgiu em 1949 para uso militar das Forças Armadas dos EUA com o desenvolvimento da norma militar MIL-STD-1629, utilizada para controle e melhoria da qualidade das armas e equipamentos militares. As falhas eram classificadas de acordo com os impactos que as mesmas teriam nas missões militares (FMEA, 2013).

Na década de 60, foi utilizada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administrations*), no projeto espacial Apollo, com vistas a eliminar falhas em equipamentos que ficariam impossibilitados de serem reparados, após lançamento.

Ainda nesta década, a metodologia FMECA foi usada com propósitos industriais, tais como nos sistemas elétricos e/ou mecânicos. Na década de 70, foi implementada pela *Ford Motor Company*, para identificar as falhas ainda no projeto, impedindo que os defeitos chegassem ao cliente final (FMEA, 2013; PARDO, 2009).

Orientações sobre a FMECA são dadas na norma BS 5760 (*Reliability of System, Equipment and Components, Part 5: 1991- Guide to Failure, Modes, Effects and Criticality Analysis*). Tal técnica também é descrita na norma brasileira ABNT NBR 31010: 2012 (Técnicas para o Processo de Avaliação de Riscos), idêntica à ISO/IEC 31010:2009 (*Risk Assessment Techniques*), que fornece orientações sobre a seleção e aplicação de técnicas sistemáticas para o processo de avaliação de riscos.

O método FMECA possibilita uma análise de como podem falhar os componentes de um equipamento ou sistema, estimativa de taxas de falhas, seus efeitos e estabelecimento de práticas que permitam aumentar a probabilidade de um equipamento ou sistema funcionar de acordo com o esperado (DE CICCIO; FANTAZZINI, 1988).

Trata-se de uma técnica indutiva, estruturada e lógica para diagnóstico (identificação) e prognóstico (antecipação) das causas e efeitos de cada modo de

falha de um sistema, produto ou equipamento. Como resultado, devem ser planejadas ações corretivas a serem praticadas de acordo com sua criticidade (LAFRAIA, 2001).

Os autores mencionados nos parágrafos acima e Brito (2007) elencam os principais objetivos da FMECA, quais sejam:

- Método sistemático para antecipar modo de falhas conhecidos ou prováveis, além de recomendar ações corretivas;
- Meio documentado de revisão de projetos;
- Sistema lógico para avaliação de mudanças em projetos, processos ou materiais;
- Determinação dos efeitos que as falhas identificadas terão em outros componentes do sistema;
- Determinação dos componentes, cujas falhas poderiam ter efeito crítico na operação do sistema (Falha de Efeito Crítico);
- Cálculo de probabilidades de falhas em montagens, sistemas e subsistemas, através do cálculo das probabilidades individuais de seus componentes;
- Redução das probabilidades de falhas em sistemas, a partir do uso de componentes de alta confiabilidade e/ou redundância no projeto;
- Desenvolvimento de uma lista de falhas potenciais, classificadas de acordo com seus efeitos, de modo a priorizar as melhorias do projeto;
- Rever controles atuais;
- Determinar quais os itens do sistema que necessitam de controles adicionais.

A FMECA é um aprimoramento da FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), na qual a análise crítica é realizada. A criticidade é uma função da severidade, do efeito e da frequência de um evento ocorrer (MANNAN 2005).

A análise se baseia na identificação das características do sistema que são críticas para vários tipos de falhas e que permite identificá-las antes que aconteçam, por meio de lista de verificação (*check list*); seu objetivo é responder três perguntas chaves (SLACK; CHAMBER; JOHNSTON, 1999):

1. Qual a probabilidade da falha acontecer?
2. Qual seria a consequência da falha?
3. Qual a probabilidade dessa falha ser detectada antes de afetar o meio?

É uma técnica que pode ser utilizada tanto para projetos (em todas as suas fases, para identificação das possíveis consequências sobre os componentes ou sobre o sistema, em virtude das falhas hipotéticas do componente) ou para operação (revisão de sistemas já operacionais, revelando falhas de projeto que não foram identificadas). A FMECA não é eficiente para identificar combinações de falhas que resultem em acidentes (PETROBRAS, 199-).

Os resultados, num primeiro momento são qualitativos, contudo, dados quantitativos podem ser utilizados para expressar uma probabilidade.

Autores com Kume (1999) e Stamatis (1995) afirmam que uma FMEA deve ser executada por uma equipe. Contudo, Palady (1997) diz que uma FMEA pode e tem sido desenvolvida como um esforço individual, mas concorda que é mais eficiente quando feita em equipe.

Durante a pesquisa bibliográfica, não foi verificada a utilização da FMECA para ETEIs, contudo, por se tratar de método que adota ações preventivas, baseado em prioridades, mostra-se indispensável dentro da estratégia de confiabilidade, principalmente no que tange à prevenção da poluição de recursos hídricos e política de gestão ambiental.

#### 4.3.1 Etapas da FMEA/FMECA

Antes da descrição das etapas para se realizar uma FMECA, é necessário o conhecimento do conceito de sistemas, que pode ser definido como: “um arranjo ordenado de componentes que estão inter-relacionados e que atuam e interatuam com outros sistemas, para cumprir uma missão, num determinado ambiente” (DE CICCO; FANTAZZINI, 1981).

A FMEA/FMECA precisa de informações dos elementos do sistema em detalhes suficientes para uma análise significativa dos modos nos quais cada elemento pode falhar. Logo, é evidente, que antes da aplicação de qualquer método de análise é necessário conhecer minuciosamente a missão do sistema, o ambiente no qual irá operar e os limites que representam potenciais falhas (DE CICCIO; FANTAZZINI, 1981).

O quadro 2 ilustra a estrutura típica de FMECA, similar ao modelo que será utilizado para registrar todas as informações relevantes aos sistemas ou subsistemas da ETEI em estudo. Esta tabela apresenta os itens básicos que devem constar numa FMECA, cabendo a cada analista identificar o que melhor se adapta as suas necessidades.

**Quadro 2 - Estrutura das tabelas aplicadas à FMECA.**

<b>Identificação da FMECA</b> (Campo 1)	Produto ou processo ou ainda identificação da fase da obra: projeto ou operação
<b>Dados de registro</b> (Campo 2)	Facilitam a identificação do processo e da FMECA realizada
<b>Item</b> (Campo 3)	Termo geral que se refere a qualquer parte, subsistema, sistema ou equipamento que possa ser considerado de forma individual
<b>Etapa do processo</b> (Campo 4)	Elementos que compõem um item
<b>Função do processo</b> (Campo 5)	Atividade que o item desempenha
<b>Modo de falha</b> (Campo 6)	Identifica a maneira pela qual um item falha
<b>Efeitos da falha</b> (Campo 7)	Consequências que o modo de falha tem sobre a função ou operação de um item

Continua

<b>Causa das falhas</b> (Campo 8)	Identificam o processo físico ou químico, defeito ou uso indevido que seja o motivo básico para a falha
<b>Meio de detecção</b> (Campo 9)	Avalia as chances de a falha ser detectada antes de afetar o sistema
<b>Detecção</b> (Campo 10)	Registram as medidas de controle no acompanhamento do processo
<b>Ocorrência</b> (Campo 11)	Indica a probabilidade de ocorrência de um risco, numa escala de 1 a 10
<b>Severidade</b> (Campo 12)	Reflete a gravidade do efeito da falha sobre o meio, numa escala de 1 a 10
<b>Índice de riscos</b> (Campo 13)	Produto da (s) severidade, (o) ocorrência e (d) detecção, permitindo adotar determinadas medidas para minimizar ou eliminar os riscos
<b>Ações corretivas/ preventivas adotadas</b> (Campo 14)	Medidas efetivamente aplicadas e adotadas
<b>Ações corretivas/ preventivas recomendadas</b> (Campo 15)	Maneiras para reduzir a severidade das consequências, aumentar a detecção e reduzir a ocorrência

Fonte: LAFRAIA, 2001.

O nível de resolução definirá o detalhe a ser incluído na tabela FMECA. A análise pode ater-se à alimentação de um sistema de tratamento biológico de efluentes ou vários outros sistemas de suporte que compõem a planta estudada.

Quando um sistema vulnerável a algum risco está no alvo, a FMECA deve levantar os equipamentos individuais que caracterizem esse sistema, bem como as falhas e efeitos que afetarão o sistema como um todo. Ou seja, um perigo devido à perda de controle na temperatura de um reator biológico, ensejaria que a FMECA enfocasse sobre a bomba de alimentação e sensor de temperatura, a título de exemplo (PETROBRAS, 199-).

De uma forma geral, as análises de riscos elaboradas a partir dos métodos FMEA/FMECA, devem seguir de forma detalhada todas as suas etapas. A forma padrão FMECA permite consistência de informação contida na tabela FMECA e dá suporte no nível de resolução.

Os campos 10 a 13 fornecem elementos que possibilitam hierarquizar as falhas, de acordo com critérios específicos. Por isso, terão abordagem detalhada no item seguinte.

Além da tabela preenchida, é importante elencar alguns documentos que facilitem o entendimento do resultado da análise, bem como do próprio preenchimento da tabela, tais como: tabelas de escalas para determinar a criticidade; diagramas funcionais de blocos, para compreensão das conexões entre os itens que compõem o sistema; esquema lógico do sistema; além de série de dados históricos; análises laboratoriais; relatório de vistoria de campo; fotografias etc. (PARDO, 2009).

Os diagramas funcionais de blocos e fluxogramas facilitam a análise dos sistemas com uma melhor percepção do problema. São etapas que aparecem formalmente nos procedimentos descritos por Stamatis (1995), sendo que este sugere o uso do diagrama funcional de blocos para as FMEAs de sistema e projeto e o fluxograma para o FMEA de processo.

A FMECA é muito eficiente quando aplicada a sistemas mais simples. As inadequações do método foram sanadas pelo desenvolvimento de outras técnicas, como a FTA, que a completa otimamente e que já foi descrita neste trabalho (DE CICCIO; FANTAZZINI, 1981).

#### 4.3.2 Estimativa do índice de criticidade

Em Estações de Tratamento de Efluentes é possível, com procedimentos de controle adequados, tais como registros de manutenção, controles laboratoriais etc., através de análises estatísticas, implementar técnicas quantitativas de riscos. Contudo, quando não existem dados suficientes e nem tempo hábil, pode-se investir em análises semi-quantitativas, que coletam informações pertinentes e que permitem determinar a severidade e a probabilidade de ocorrência dos eventos analisados.

Nesse sentido, com vistas a hierarquizar o impacto do risco sobre o desempenho do sistema, a FMECA possibilita a determinação da criticidade do risco ou Índice de Risco.

A criticidade pode ser obtida, através do conceito de RPN (*Risk Priority Number*), que nada mais é que o produto dos índices de (o) ocorrência, (s) severidade e (d) detecção, conforme equação 2 (LAFRAIA, 2001).

O índice de risco ou criticidade (Tabela 2) é estimado com base nos critérios e valores apresentados nas Tabela 3 (índice de ocorrência), Tabela 5 (índice de severidade) e Tabela 6 (índice de detecção).

$$RPN = O \cdot S \cdot D \quad (2)$$

**Tabela 2 - Índice de riscos (RPN)**

Índice de riscos (RPN)	Valor
Baixo	1 – 50
Médio	50 – 100
Alto	100 – 200
Muito Alto	200 – 1000

Fonte: PINTO; XAVIER; 2001.

Outra possibilidade é a representação do modo de falhas, através de uma matriz bidimensional, também denominada de *Matriz de Criticidade*, que abrange apenas os índices de (o) ocorrência e (s) severidade (PARDO, 2009).

O índice de ocorrência é usado para avaliar as chances (probabilidades) de a falha ocorrer, já a severidade avalia a gravidade dos efeitos.

Todos os autores relacionam a severidade aos efeitos dos modos de falha. Porém, a ocorrência é relacionada, a depender do autor, ao modo de falhas ou às causas do modo de falhas. Palady (1997) afirma que independente da abordagem, os resultados obtidos são os mesmos.

Com as informações de cada possível modo de falha, a criticidade só está de fato definida com a avaliação da probabilidade de ocorrência. Nas análises envolvendo sistemas mecânicos e elétricos, através da FMECA, a probabilidade é baseada em taxa de falhas (*failure rate*) de cada componente, fornecidas pelo fabricante para condições definidas (temperatura, umidade, manutenção etc.) (PEREIRA, 2009). Outra abordagem utilizada na FMECA de processo é a utilização de *Índices de Capacidade de Máquina* (CPK), que também possibilita a determinação do índice de ocorrência (TOLEDO; AMARAL, 2005).

Sempre que possível, a falha deve ser estimada com base em análise estatística de dados históricos coletados no próprio processo, ou em caso de projetos, em dados estatísticos ou relatório de falhas de componentes similares (LAFRAIA, 2001).

A Tabela 3 ilustra as 05 classes de ocorrência, bem como os critérios para identificação do índice de probabilidade de ocorrência de riscos.

**Tabela 3 - Índice de probabilidade de ocorrência**

Classe de Ocorrência	Ocorrência	Índice	Taxa de Falhas	Crítérios
A	Remota	1	1:1.000.000	Falha improvável, nenhuma ocorrência histórica
B	Pequena	2	1:20.000	Muitas poucas falhas podem ocorrer
		3	1:4.000	
C	Moderada	4	1:1.000	Algumas falhas podem ocorrer
		5	1:400	
		6	1:80	
D	Alta	7	1:40	Alto número de falhas. Ocorre com frequência
		8	1:20	
E	Muito Alta	9	1:8	Falhas historicamente quase certas
		10	1:2	

Fonte: TOLEDO; AMARAL, 2005 (modificado).

As classes de consequências, que irão refletir no índice de severidade, devem refletir um conjunto de circunstâncias, desde a mais catastrófica a mais insignificante. A escolha das classes deve ser cuidadosa, para que seja definida as suas correspondentes atribuições aos efeitos globais dos modos de falhas (PEREIRA, 2009).

Uma falha poderá ter tantos índices de gravidade quanto forem os seus efeitos. As consequências dos modos de falha, inclusive, podem ser agrupadas em diferentes áreas de interesse, conforme Tabela 4.

**Tabela 4 - Classe de consequências por área de interesse**

Classes de Criticidade	Áreas de Interesse			
	Saúde e Segurança	Impacto na Mídia	Meio Ambiente	Econômicas (R\$)
I	Desprezível	Desprezível	Sem Impacto	Impacto baixo (100 mil)
II	Primeiros socorros	Baixo	Violação à legislação	Impacto médio (100 mil – 1 milhão)
III	Pequenos ferimentos	Moderado	Prejuízo local reversível	Impacto médio - alto (1 – 10 milhões)
IV	Incapacidade	Severo	Impacto significativo reversível	Impacto alto (10 – 100 milhões)
V	Ocorrência de fatalidade	Extremo	Impacto catastrófico irreversível	Alta Destruição (>100 milhões)

Fonte: PEREIRA, 2009 (adaptado).

A severidade de ocorrência também pode ser classificada de 1 a 10, conforme Tabela 5:

**Tabela 5 - Índice de severidade**

Classe de Severidade	Severidade	Valor	Critérios
I	Marginal	1	A falha não teria efeito real sobre o sistema
II	Baixa	2 – 3	Degradação inicial do sistema/menor transtorno no processo/leve variação no desempenho do sistema

Continua

III	Moderada	4 – 6	Resulta em falha sobre componente não vital, que demanda reparo
IV	Alta	7 – 8	Sistema fortemente afetado, mas ainda operacional. A falha não envolve riscos ao descumprimento a requisitos legais
V	Muito Alta	9 – 10	A falha envolve riscos a segurança do sistema e/ou descumprimento de requisitos legais

Fonte: LAFRAIA, 2001; PETROBRAS, [199-]; PARDO, 2009 (adaptado).

A detecção é a estimativa da capacidade de controle e monitoramento do sistema em identificar os modos potenciais de falhas considerados, antes que o evento indesejado ocorra. O índice de detecção deve ser definido, olhando-se para o conjunto *modo de falha-efeito* e para os mecanismos atuais de controle (LAFRAIA, 2001; PARDO, 2009). A Tabela 6 apresenta os níveis de detecção e critérios de escolha.

**Tabela 6 - Índice de detecção**

Detecção	Valor	Critérios
Muito grande	1 – 2	Certamente será detectado
Grande	3 – 4	Grande probabilidade de ser detectado
Moderada	5 – 6	Provavelmente será detectado
Pequena	7 – 8	Provavelmente não será detectado
Muito pequena	9 – 10	Certamente não será detectado

Fonte: TOLEDO; AMARAL, 2005.

Na *Matriz de Criticidade*, as linhas representam as classes de ocorrência e as colunas, as classes de severidade, tal que:

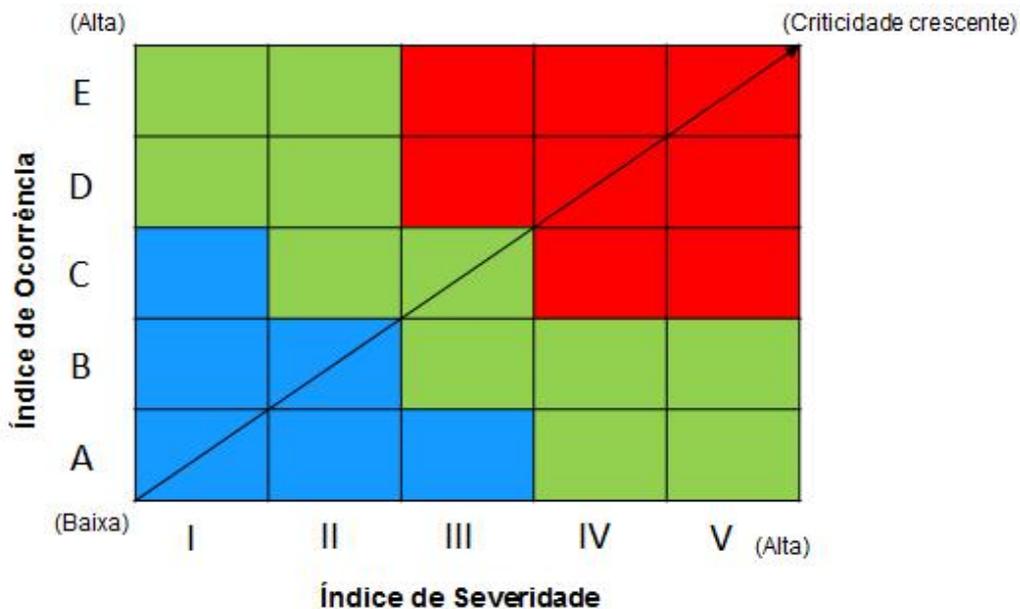
$$C_r = C_r \cdot o, s \quad (3)$$

Ou ainda:

E, I	E, II	E, III	E, IV	E, V	(4)
D, I	D, II	D, III	D, IV	(D, V)	
C, I	C, II	C, III	C, IV	(C, V)	
B, I	B, II	B, III	B, IV	(B, V)	
A, I	A, II	A, III	A, IV	(A, V)	

A matriz de criticidade (Figura 9), para uma melhor compreensão, pode ser representada graficamente. Desta forma, apresenta de maneira mais didática os modos de falhas mais importantes e que necessitam de plano de ação mais urgente.

**Figura 9 - Faixa de criticidade: matriz de criticidade**



Fonte: PARDO (2009).

As falhas com maior índice de risco deverão ser tratadas de maneira prioritária, agregando a elas um plano de ação. De acordo com Silva, Fonseca & Brito (2006), o ideal é considerar o par de valores índice de criticidade e RPN de cada modo de falha para melhor tomada de decisões.

#### 4.4 Confiabilidade de tratamento de efluentes

A qualidade e variabilidade do efluente de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) dependem de alguns fatores, tais como: variações na carga afluente; condições ambientais; natureza do efluente a ser tratado; presença de substâncias tóxicas e recalcitrantes; especificidades dos processos de tratamento biológicos; falhas mecânicas, elétricas e humanas no sistema. Todos estes fatores podem trazer efeitos adversos, como instabilidade nos processos, o que ocasionará possível saída de especificação do efluente tratado (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005b).

Devido às incertezas inerentes ao projeto e à operação de estações de tratamento, os riscos de falha são quase sempre inevitáveis, portanto, faz-se premente a elaboração de projeto de ETEs com base em uma medida aceitável de risco (NIKU; SCHROEDER; SAMANIEGO, 1979).

Em termos de desempenho de uma estação de tratamento, a confiabilidade é a porcentagem de tempo em que as concentrações esperadas no efluente cumprem com os padrões de lançamento estabelecidos legalmente. Assim, uma ETE será completamente confiável se não houver violação dos limites preconizados pelas legislações ambientais. A falha do processo de tratamento ocorrerá sempre que o padrão de lançamento for excedido (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2007).

Eisenberg et al. (2001), relacionam a confiabilidade de ETEs a dois aspectos: a confiabilidade mecânica e a confiabilidade do processo.

A confiabilidade mecânica é determinada a partir da identificação dos componentes mecânicos da planta, cujas falhas podem comprometer a qualidade do efluente final a ser lançado no corpo receptor. Em seguida, determina-se a probabilidade de falhas desses componentes. Com essa avaliação, é possível quantificar a dependência mecânica de uma ETE em termos operacionais e os pontos críticos no processo de tratamento, que podem, posteriormente, ser melhorados para aumentar a confiabilidade do processo.

Da-Hin et al. (2008) do ponto de vista dos equipamentos, caracterizam o funcionamento de uma ETE como um conjunto de instalações elétricas, hidráulicas e mecânicas, capaz de proporcionar a operação de tratamento de efluentes. As falhas verificadas nos equipamentos costumam ser as mais diversas, porém, grosso modo,

pode-se identificá-las como vibração excessiva, elevação da temperatura, ruídos anormais, corrosão e sujeira.

Eisenberg et al. (2001) aplicaram a ferramenta “Análise de Componente Crítico” para avaliar a confiabilidade mecânica em instalações piloto de tratamento de efluentes.

O objetivo da análise do componente crítico é determinar quais componentes mecânicos na estação de tratamento teriam o impacto mais imediato na qualidade do efluente devido à ocorrência de falhas. Para tal, coletaram dados de todos os eventos de manutenção planejada e não planejada e as estatísticas de desempenho (descrevem o tempo de espera entre falhas das unidades de tratamento, o tempo médio entre falha global de componentes e a fração de tempo que uma unidade ou componente estava operando) dos componentes individuais do sistema de tratamento.

Os resultados sinalizaram que a variação na concentração do efluente decorrente das falhas ou da manutenção de componentes mecânicos não tem sido muito significativa (97 % do tempo os componentes das unidades estudadas estavam disponíveis). Ou seja, a ETE teria uma disponibilidade operacional de, aproximadamente 100% do tempo, observada em um período de longo prazo (01 ano), e sua confiabilidade pode ser definida apenas utilizando-se seus dados de performance.

A confiabilidade do processo ou confiabilidade inerente, segundo o autor acima, engloba a quantificação da variabilidade do efluente final e a sua determinação pode ser feita com o uso de fundamentos estatísticos associados à análise de frequência.

Ou seja, a probabilidade de falha é bastante sensível à função de distribuição da concentração efluente. Sabendo-se a distribuição, uma expressão matemática pode ser utilizada para determinação do tempo em que uma dada concentração foi excedida no passado e, então, prever seu comportamento futuro (DEAN; FORSYTHE, 1976a apud OLIVEIRA, VON SPERLING, 2007).

Segundo Metcalf & Eddy (2002), a confiabilidade ( $C_f$ ) de uma ETE pode ser definida como a probabilidade de falhas ( $P$ ), conforme equação:

$$C_f = 1 - P_{falha} \quad (5)$$

Na qual:

$$1 - P(\text{falha}) = 1 - P(\text{concentração efluente} > \text{concentração requerida})$$

Ou seja, quanto menos ocorrência de extrapolação dos valores da legislação ambiental, maior será a confiabilidade de uma ETE, logo, a probabilidade da falha fica associada à distribuição da concentração do efluente.

Com esse raciocínio, que Niku, Schroeder & Samaniego (1979) avaliaram a confiabilidade de 43 ETEs, operando com processo de lodos ativados nos Estados Unidos. Para tal, desenvolveram o Coeficiente de Confiabilidade (CDC) a partir da distribuição lognormal, que desde então, tem sido utilizada para predizer a qualidade do efluente, com base na análise de alguns de seus constituintes, como DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e SST (Sólidos Suspensos Totais).

Oliveira & Von Sperling (2007) aplicaram testes estatísticos para verificação da normalidade de dados para os parâmetros: DBO, DQO (Demanda Química de Oxigênio), SST, NT (nitrogênio total), PT (Fósforo Total) e Coliformes Fecais presentes em esgoto, tendo sido aplicados testes de aderência à função normal, lognormal, gama, exponencial e retangular. Como resultado, verificou-se que a função lognormal pode ser adotada como representante do comportamento de todos os constituintes efluentes, pois apresentou um percentual maior de ajuste em relação ao conjunto de dados fornecidos pelas ETEs estudadas. Tais resultados são, portanto, condizentes com os encontrados por Niku, Schroeder e Samaniego (1979).

Dessa forma, a distribuição da probabilidade de um conjunto de dados de um sistema de esgoto não parece depender da modalidade de tratamento empregado, mas sim da qualidade e quantidade de dados disponíveis (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2007).

Além dos pressupostos acima, deve-se levar em consideração que devido às variações na qualidade do efluente tratado, a estação de tratamento deve ser projetada para produzir uma concentração média efluente que não transgrida os padrões de lançamento. Assim, o método desenvolvido relaciona a concentração média do constituinte com os valores limites a serem cumpridos, baseando-se em análises probabilísticas.

Isso significa que uma meta ou padrão deve ser cumprido na maior parte do tempo, por exemplo, em 90% do tempo, mesmo com a variabilidade presente. Essa metodologia permite determinar uma concentração média que garante que a concentração do efluente estará abaixo de certo valor (legislação ambiental ou meta pré-fixada), com um determinado nível de confiabilidade (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2007). O valor médio poderá ser obtido, conforme equação (6):

$$m_x = CDC \cdot X_s \quad (6)$$

Onde:

$m_x$ : concentração média do constituinte na saída;  
 $X_s$ : meta de qualidade ou padrão fixado por legislação;  
 $CDC$ : coeficiente de confiabilidade.

O CDC é expresso com base nos dados originais e não nos logaritmos dos dados, de acordo com a equação abaixo:

$$CDC = \frac{1}{\sqrt{CV^2 + 1}} \times \exp \left[ -Z_{1-\alpha} \frac{1}{\sqrt{CV^2 + 1}} \right] \quad (7)$$

Onde:

$CV$ : coeficiente de variação (desvio padrão dividido pela média da distribuição existente);

$Z_{1-\alpha}$ : variável normal central reduzida correspondente à probabilidade não excedência (1- $\alpha$ ).

Para o cálculo do percentual de atendimento às metas de alcance desejadas, parte-se dos valores de concentração média efluente e  $CV$ . Para tal, Niku, Schroeder

& Samaniego (1979) utilizaram as relações existentes entre as distribuições normal e lognormal, algumas manipulações algébricas e o coeficiente de variação (CV) para se chegar a equação (8). Com o valor de  $(1 - \alpha)$  resultantes, utiliza-se a distribuição normal padronizada (distribuição z) por meio da função DIST.NORMP do Excel (OLIVEIRA, VON SPERLING, 2007). As equações abaixo são utilizadas em ETEs já em operação.

$$CDC = \text{Distr. Normal Padrão } Z_{1-\alpha} \quad (8)$$

$$Z_{1-\alpha} = \frac{-\ln \left( \frac{m_x}{X_s} \times \frac{1}{V_x + 1} \right)}{\sqrt{\ln V_x + 1}} \quad (9)$$

Em que:

$m_x$ : média da concentração do constituinte na saída;

$X_s$ : concentração padrão requerida para o constituinte;

$V_x$ : coeficiente de variação (CV) definido como desvio padrão dividido pela média;

$Z_{1-\alpha}$ : número de desvios-padrão a partir da média de distribuição normal.

A determinação da confiabilidade operacional, tanto a mecânica quanto a de processo, permite uma reflexão sobre os métodos mais comumente utilizados para definição da eficiência de projeto das ETEs, os quais normalmente não consideram a variabilidade de cada processo de tratamento, que está diretamente associada à confiabilidade (BROSTEL; SOUZA, 2005).

De acordo com Santos (2006) há outros indicadores que permitem inferir o nível e eficiência do tratamento de efluentes, os quais estão relacionados à capacidade de remoção de poluentes e ao atendimento aos padrões de qualidade exigidos, conforme equação:

$$E = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} \cdot 100 \quad (10)$$

Em que:

$E$ : eficiência (%);

$C_0$ : concentração inicial (mg/L);

$C_f$ : concentração final (mg/L).

O Manual Técnico de Avaliação de Desempenho de Estações de Tratamento de Esgoto da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1989) também ratifica a equação acima, além de mencionar que o projeto de uma ETE tem a finalidade de fornecer um efluente com valores absolutos bem especificados, ou seja, com características bem definidas em termos quantitativos diários, aos quais também está inerente à qualidade do esgoto afluente.

Dessa forma, o tratamento objetiva um desempenho médio, o qual não pode ser ultrapassado.

O desempenho médio corresponde a um determinado período de tempo (dia, mês ou ano), de acordo com o número de amostras disponíveis.

Em geral, usam-se dados médios mensais e anuais de modo a propiciar uma avaliação mais representativa, uma vez que a análise é feita por um período prolongado.

A equação para o desempenho médio segue abaixo. É comum avaliar o desempenho para o tratamento primário e secundário, devendo ser feita uma análise também para cada unidade da ETE para melhor caracterizar seu desempenho.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^m E_i}{n} \quad (11)$$

$$S = \frac{\overline{E_m - E_i^2}}{n} \quad (12)$$

Onde:

$E_m$ : eficiência ou desempenho médio para o período;

$E_i$ : eficiência ou desempenho individual medido no período;

$n$ : número de determinações medidas para o período;

$S$ : desvio padrão.

A avaliação de desempenho do processo, portanto, poderá contemplar a estação como um todo; as etapas típicas: primária e secundária; e cada unidade que compõe a estação.

O processo de tratamento deve atender às normas ambientais de eficiência e de lançamento no corpo receptor. Este indicador só é válido com um número considerável de amostras.

Assim, a gestão em uma ETE, no que diz respeito ao controle operacional deve considerar (D'AVIGNON; LA ROVERE, 2002):

- Controle de equipamentos: equipamentos essenciais à operação de uma ETE devem existir em duplicata. Tais equipamentos devem operar em alternância para evitar falhas ou mau funcionamento decorrentes de falta de uso e manutenção (Ex.: bombas, dosadoras de produtos químicos, aeradores etc.);
- Prevenção de sobrecarga dos equipamentos e do sistema: a distribuição do fluxo nas unidades de remoção de poluentes deve ser prevista para operar com flexibilidade. A capacidade das unidades operarem em paralelo, em série ou em alternância deverá ser flexível de modo a suportar eventuais sobrecargas de vazão ou carga, de modo a garantir o tratamento de todo o efluente que entra na estação de tratamento;

- Programa de manutenção preventiva: devem existir procedimentos de manutenção escritos, bem como definição das responsabilidades. Deve-se ter um sistema de manutenção e de reposição de peças desgastadas ou danificadas.

## 5 DEMANDA DE ÁGUA E GERAÇÃO DE EFLUENTES NUMA REFINARIA DE PETRÓLEO

### 5.1 Demanda hídrica e geração de efluentes

As refinarias de petróleo são consideradas indústrias que consomem um volume considerável de água – média de 0,9 m<sup>3</sup> de água/m<sup>3</sup> de petróleo processado (AMORIM, 2005) e geram, portanto, grandes quantidades de efluentes líquidos (alguns requerem um tratamento mais complexo).

Há que se destacar que existe diferença entre o uso de água e o consumo de água em uma refinaria: de acordo com CH<sub>2</sub>M Hill (2003), o uso representa a quantidade de água utilizada pelas operações da refinaria, como o sistema de geração de vapor, as torres de resfriamento, as unidades de Craqueamento Catalítico Fluido (FCC), Hidrocraqueamento (HCC) e o Hidrotratamento (HDT) – caso a refinaria possua tais unidade de processo. Já o consumo de água se refere à quantidade efetivamente retirada dos corpos hídricos, ou seja, desconsidera as recirculações, como o *blowdown* das torres de resfriamento e do sistema de geração de vapor, que podem ser reusados.

A água é empregada em praticamente todo o processo de refino e os efluentes gerados variam em função do tipo de petróleo, das unidades de processo e o modo de operação da refinaria. De um modo geral, pode-se dizer que as refinarias geram uma quantidade de efluentes líquidos que é relativamente proporcional ao óleo refinado (MARIANO, 2005).

Braile (1979) afirma que a evaporação, lançamento de vapor gasto na atmosfera, perda devido à influência dos ventos nas torres de resfriamento constituem o maior consumo de água. Drenagem das torres de resfriamento, água para refrigeração e descarga do vapor condensado são alguns usos típicos das refinarias e não estão relacionados ao emprego da água no processo.

Mundialmente, de acordo com Peres apud Pombo (2011), dentre os principais consumidores de uma refinaria destacam-se o sistema de resfriamento, englobando torre de resfriamento e tanques de armazenamento e o sistema de geração de vapor, demandando, respectivamente, 60-70% e 20-30%.

No Brasil, Amorim (2005) menciona as seguintes demandas das refinarias da PETROBRAS:

- Reposição de água de resfriamento – 46%;
- Água de caldeira – 26%;
- Água de combate a incêndio – 9%;
- Água potável e serviços – 19%.

O resfriamento e o uso de circuitos fechados, os quais recirculam a água, acarretam a redução da captação de água em aproximadamente 90%. Dessa forma, reduzem também a produção de efluentes. Contudo, faz-se necessária a disponibilidade de água de elevada qualidade.

O vapor gerado nas caldeiras é usado nos processos conhecidos como *stripping* ou retificação com vapor e destilação. Nesses casos, o vapor tem contato direto com frações de hidrocarbonetos com possibilidade do condensado gerado apresentar alguma contaminação (MARIANO, 2005).

Os efluentes do processo são quaisquer águas ou condensados que tenham sido contaminados, devido ao contato direto com óleo. Podem ser soluções ácidas, soda gasta, lavagens do petróleo cru, águas de dessalinização, condensados do *stripping*, águas provenientes da regeneração dos catalisadores de algumas unidades e águas pluviais contaminadas, a depender dos locais da planta de refino (MARIANO, 2005; BRAILE, 1979).

De um modo geral, Lora (2002) e Braile (1979) apontam os seguintes compostos que podem ser encontrados em uma indústria petroquímica:

- Hidrocarbonetos livres e emulsionados;
- Fenóis;
- Mercaptanas;
- Sulfetos;
- Amônia;
- Ácidos;

- Sólidos dissolvidos e em suspensão;
- Cianetos.

Em virtude da variabilidade dos efluentes gerados ao longo do tempo em refinarias de petróleo, é difícil o estabelecimento de sua composição típica. Todavia, pode-se afirmar que o contaminante característico dos seus despejos industriais é o óleo. Por isso, a ETEI de uma refinaria deve ser flexível o suficiente para atender satisfatoriamente às variações nas vazões e concentração de contaminantes sem comprometer sua performance (VANELLI, 2004).

A quantidade e qualidade dos despejos líquidos dessas indústrias dependem da: propriedade do petróleo refinado, tipo de unidade de processo, o método de tratamento empregado e sua disposição.

## **5.2 Segregação das drenagens**

Em geral, as refinarias utilizam sistemas separadores de efluentes para segregar as águas oleosas, as águas de processo, as águas pluviais, as águas de refrigeração servidas e os esgotos sanitários. Essa separação é importante, já que os efluentes passarão por etapas diferentes de tratamento, além disso, proporciona maior economia e efetividade ao tratamento dos despejos industriais (MARIANO, 2005).

Nas refinarias brasileiras existe a norma técnica PETROBRAS N-38E (Critérios para projetos de drenagem, segregação, escoamento e tratamento preliminar de efluentes líquidos de instalações terrestres). Essa norma classifica os diversos tipos de efluentes petroquímicos e especifica a construção, drenagem e escoamento (PETROBRAS apud OLIVEIRA, 2010).

Assim, as refinarias possuem sistemas de drenagens, os quais coletam os efluentes produzidos, de acordo com o tipo de efluente:

- Sistema de drenagens contaminadas: é formado, em tempo seco, pela descarga das torres de resfriamento; em tempo chuvoso terá as contribuições das precipitações sobre as áreas das tubovias, bacias dos diques de tanque e áreas de processos que possuem o efluente segregado. São as águas que eventualmente podem apresentar óleo, pois tem sua origem de processos e áreas com ~~este~~ potencial de contaminação (FERREIRA et al., 2000).
- Sistemas de drenagens oleosas: é formado, em tempo seco, pelas vazões de águas oleosas das unidades de processo; em período chuvoso terá as contribuições das precipitações sobre as áreas confinadas dessas unidades. É caracterizada pela presença constante de óleo (FERREIRA et al., 2000).
- Sistema de drenagens pluviais: é formado por correntes líquidas que não possuem contaminação, com a presença de substâncias em concentrações que permitem o lançamento dessas águas diretamente no corpo receptor. Suas principais contribuições são as águas de chuva, de controle de emergência, lavagens de piso de áreas administrativas, bacias de tanque de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e outros gases refrigerados e áreas terraplenadas destinadas a futuras ampliações.
- Sistema de drenagens de esgoto sanitário: proveniente do uso de água para fins higiênicos, tais como de lavatórios e banheiros.

Os efluentes dos sistemas de drenagens contaminado e oleoso podem conter sólidos suspensos e dissolvidos, além de contaminantes em concentrações tais que impossibilitam o seu lançamento no corpo receptor. Ou seja, até mesmo os efluentes do sistema contaminado, que em geral, apresentam baixas concentrações de hidrocarbonetos devem passar por tratamento.

Como barreira de segurança, para evitar possíveis contaminações do corpo hídrico próximo, as refinarias possuem, normalmente, sistema de partição de fluxos e bacias de acúmulo para receber o excesso de vazão de chuva. Trata-se, portanto, de um sistema de regularização de vazão dentro da planta industrial, mais precisamente, dentro da ETEI.

Na Tabela 7 são apresentadas as drenagens (correntes líquidas) geradas em refinarias com sua respectiva origem e formas de tratamento.

**Tabela 7 - Correntes líquidas geradas em refinarias**

Drenagens	Origem	Tratamento
Sistema Oleoso	Áreas contidas de unidades de processo, centrais termoelétricas e bombas; Lavagens e oficinas; Áreas de carga e descarga de Caminhões; <i>Landfarming</i> ; Drenagem de fundo dos tanques de petróleo e derivados, exceto GLP e outros gases liquefeitos ou refrigerados	Separador Água-óleo; Tratamento primário/secundário
Sistema Contaminado	Purgas de torre de resfriamento; Áreas não contidas das unidades de processo e das bombas; Bacias de tanques, exceto GLP e outros gases refrigerados; Áreas contidas de tubovias; Áreas contidas de ETEI; Áreas de <i>manifolds</i>	Tratamento primário/secundário
Esgoto Sanitário	Lavatórios, banheiros, Vasos sanitários, mictórios, pias e drenos da cozinha	Planta de esgoto sanitário ou ETEI

Fonte: NIEAD/COPPE, 2002; PETROBRAS apud OLIVEIRA, 2010.



## 6 TRATAMENTO DE EFLUENTES EM REFINARIAS DE PETRÓLEO

Em estudos de concepção de projetos, alguns aspectos, tais como: impacto ambiental do lançamento no corpo receptor; objetivos do tratamento, com base nos principais constituintes do efluente; nível de tratamento e eficiência de remoção desejada devem ser definidos com clareza (VON SPERLING, 2005).

De um modo geral, todas as correntes originadas nos limites das indústrias devem sofrer algum tipo de tratamento, a depender da vazão e qualidade do efluente. Após a separação das correntes pelos diversos sistemas de drenagens e após análise dos seus constituintes, deve-se estabelecer o tipo e o nível de tratamento (COELHO, 2002).

Os requisitos de qualidade de efluente são em função da legislação específica, a qual define padrões de qualidade para o efluente e para o corpo receptor, conforme detalha a seção 8 deste trabalho.

A remoção de constituintes indesejados no tratamento, de modo a adequar o efluente aos padrões de qualidade exigidos, está associada aos conceitos de nível de tratamento e eficiência do tratamento (VON SPERLING, 2005).

Em refinarias, existem correntes que devido a sua alta toxicidade, necessitam de tratamentos especiais, os quais ocorrem *in locu*, é o caso das Unidades de Tratamento de Soda Gasta e Unidade de Tratamento de Águas Ácidas, que não são objetos da análise deste estudo (COELHO, 2002).

Os efluentes dos sistemas de coleta e drenagem são direcionados para ETEI, dotada de métodos físicos, químicos e biológicos, envolvendo operações e processos unitários para remoção dos contaminantes presentes nos efluentes industriais.

### 6.1 Tratamento Físico

Quando há o predomínio de forças físicas nos métodos de tratamento, dá-se o nome de operações unitárias. Os mecanismos físicos são os predominantes e atuam na promoção da separação de fases, de forma que cada parte segregada sofra tratamento específico ou complementar. Incluem sistema de gradeamento,

equalização, separação por gravidade diferencial, sedimentação, flotação e filtração (CAVALCANTI, 2009).

As grades são os equipamentos constituídos de barras, utilizadas com maior frequência na remoção dos sólidos grosseiros, mas podem ser empregadas peneiras rotativas, estáticas ou trituradores. A remoção se dá através da retenção de materiais de dimensões maiores que o espaçamento entre as barras. As barras são dispostas paralelas, podem ser verticais ou inclinadas, para reter o material com baixa perda de carga (JORDÃO; PESSOA, 2005).

As grades podem ter barras grossas, médias e finas e ter limpeza manual ou mecanizada (VON SPERLING, 2005). Atualmente, a tendência é a utilização de grades ultrafinas para remoção de sólidos menores já no tratamento preliminar.

No sistema de gradeamento, deve-se atentar para as perdas de carga, sendo admitida para a manutenção da velocidade e perfil hidráulico a obstrução de 50% da lamina d'água no canal da grade de limpeza manual. Para perdas de carga, os seguintes valores mínimos são indicados: 0,15 m para grades de limpeza manual e 0,10 m para grade de limpeza mecanizada.

Assim, as barras deverão ser bem robustas para suportar os esforços e impactos dos procedimentos operacionais e acúmulos de material retido.

Cabe ressaltar ainda a importância da remoção dos sólidos retidos o mais rápido possível, evitando com isso perda de carga provocada pelo acúmulo de sólidos a montante das grades e aumento da velocidade do efluente entre as barras, deslocando materiais que deveriam permanecer retidos (AZEVEO NETO; HESPANHOL, 1977).

Para identificação do funcionamento hidráulico das grades, Jordão e Pessoa (2005) recomendam, para vazão máxima de projeto, velocidade mínima de 0,60 m/s e máxima de 1,00 m/s.

Após as grades, há um alargamento brusco na seção transversal, com o objetivo de diminuir a velocidade do afluente. Tal controle de velocidade se dá por meio de vertedores proporcionais, uso de canais retangulares ou calhas de controle tipo *Parshall*. Este último é mais indicado, pois é autolimpante, não se perdendo carga hidráulica devido à retenção de sólidos.

O desarenador (caixa de areia) tem como objetivo a remoção de areias, pós, pedras e terras filtrantes (diatomita e similares), através do mecanismo de sedimentação. Esse equipamento é fundamental, pois estes materiais têm potencial

de desgastar bombas e entupir tubulações e tanques de processo (GIORDANO, 2012). A matéria orgânica não é tratada nessa unidade, permanecendo em suspensão, seguindo para as unidades subsequentes.

Em geral, para caixas de areia convencionais retangulares por gravidade, adotam-se valores de velocidade em torno de 0,30 m/s. Velocidades acima desse valor possibilitarão arraste de partículas e valores em torno de 0,15 m/s causarão deposição de matéria orgânica, provocando odores desagradáveis.

Devido à retenção contínua de areia, é necessário um dispositivo de remoção, dotando o sistema de condições de armazenagem. A remoção de areia pode ser manual ou mecanizada. Essa última, geralmente, em instalações maiores, acontece por meio de dispositivos de transporte de areia, que removem a areia de depósitos especificamente projetados (JORDÃO; PESSOA, 2005; D'AVIGNON; LA ROVERE, 2002).

Em ETEIs, pode ser necessária a inclusão de um *equalizador* após o tratamento preliminar, cuja principal finalidade é regularizar vazões, já que a vazão afluyente varia bastante ao longo do dia. A redução dessas variações é muito importante para as unidades subsequentes, de modo que passam a operar com uma vazão próxima à média (VON SPERLING, 2005).

A regularização de vazões é fundamental, uma vez que variações bruscas impossibilitam o funcionamento de tanques de correção de pH, floculadores e decantadores, causando cargas de choque em tanques de aeração de lodos ativados (NUNES, 2004).

Os equalizadores podem ser em linha ou em tanque de espera. Neste último caso, afluem fluxos acima da vazão de projeto, a exemplo de águas pluviais não segregadas geradas no período de grandes precipitações. Além disso, podem afluir para essas unidades correntes de despejos com concentração de poluentes superiores a previstas em projeto (CAVALCANTI, 2009). Em projeto de ETEIs de refinaria de petróleo essa unidade é imprescindível.

Os Separadores Água-Óleo (SAO) são unidades destinadas a remover óleos do efluente por diferença de densidade entre o óleo e água, contudo, não separam óleos emulsionados. A separação deve ser em regime hidráulico não turbulento para não ocorrer arraste de óleo ou destruição das emulsões coalescidas (FEEMA; COPPETEC, 2003). O óleo é coletado por um tubo flauta (tubo ranhurado que trabalha no nível do óleo).

Existem diversos tipos de SAOs, mas no caso de refinarias, os mais utilizados são o tipo API (*American Petroleum Institute*).

O SAO não separa apenas o óleo da água, como também separa sólidos que se depositam no fundo do tanque. Esses sólidos são relativamente finos e são removidos por raspadores montados sobre uma ponte rolante que perpassam os extremos do separador: em um sentido, raspa o óleo da superfície, no outro, os sólidos depositados no fundo. Adicionalmente, na entrada do SAO há um cilindro rotativo para retirada do óleo sobrenadante; existe ainda uma faca sempre em contato com o cilindro, que raspa o óleo deste para o poço de coleta de óleo. Necessita de várias células para facilitar a manutenção, sem prejudicar o tratamento.

O tipo API funcionando bem, apresenta 40 ppm ou menos de óleo na saída e mal operado resulta em 150 ppm. (COELHO, 2002).

Assim, a remoção de óleo no efluente tem como principal finalidade minimizar o impacto do óleo nas etapas seguintes, como o tratamento biológico (JORDÃO; PESSOA, 2005).

A operação consiste na limpeza periódica e remoção dos óleos retidos, para evitar arraste desse constituinte para as etapas seguintes do tratamento. A limpeza depende da capacidade de retenção e esta não pode ultrapassar 75% do seu volume.

Os decantadores funcionam pelo princípio da sedimentação, que consiste em um processo natural de separação de fases (líquido-sólido) pela ação da gravidade. A sedimentação é útil para separar areia, sólidos sedimentáveis, lodos biológicos e lodos químicos, após floculação.

Os decantadores podem ser do tipo convencional ou lamelar. Esses últimos baseiam-se em módulos lamelares ou tubulares que admitem velocidades críticas de sedimentação mais elevadas que os primeiros. Isso é muito importante, uma vez que a eficiência dessas unidades é função da velocidade de sedimentação e não da profundidade do tanque.

O processo Actiflo (patente Veolia®) possibilita uma sedimentação acelerada, sendo uma otimização dos decantadores lamelares. Trata-se de tanques em linha, nos quais o efluente é clarificado, sofre injeção de microareia, formação de flocos com grande superfície, devido às “pontes” entre os polímeros e as partículas coaguladas e no último tanque segue para decantação lamelar. Neste tanque os flocos sedimentam rapidamente, enquanto o líquido tratado passa pelas lamelas, sendo extraído pela canaletta superior (CAVALCANTI, 2009).

Os flotadores são uma alternativa ao processo de sedimentação, com vistas a separar os flocos formados pela coagulação e floculação, processos químicos. É destinado para remoção de sólidos suspensos e óleos e graxas, sendo um processo físico para clarificar efluentes e concentrar lodos.

Consiste em pressurizar uma fração do efluente já coagulada e floculada e dissolver parte do oxigênio no líquido. A seguir o efluente pressurizado é liberado no interior de um dispositivo próprio e com isso, formam-se diminutas bolhas de ar pela expansão do oxigênio, que adere às partículas e as fazem flutuar. Na superfície há um sistema que remove o material sólido flotado e o líquido sai pelo fundo (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

A flotação deve ser aplicada para sólidos com altos teores de óleos e graxas, como as indústrias petroquímicas, pescado e frigoríficas, ou seja, efluentes com matéria orgânica natural ou sintética (GIORDANO, 2012).

A Flotação por Ar Dissolvido (FAD) ou *Dissolved Air Flotation (DAF)*, tem sido muito empregada na indústria petroquímica e de petróleo. Nesse caso, o ar é dissolvido sob pressão no efluente a tratar em um tanque de pressurização, sendo então liberado no tanque de flotação à pressão atmosférica.

Em estações com grandes vazões, apenas uma parcela da vazão de efluentes é pressurizada, por meio de uma recirculação do efluente. Assim, a parcela recirculada se mistura a parcela do efluente não pressurizado para então seguir para o tanque de flotação.

Mesmo após passagem pelo flotador, permanecem ainda partículas em suspensão que não puderam ser removidas devido a sua baixa velocidade de flotação, assim, pode-se adotar um processo complementar de separação, tal como a filtração (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

## **6.2 Tratamento Químico**

Os processos químicos têm como intuito remover sólidos em suspensão e coloidais, nutrientes e metais pesados. Adicionalmente, por meio de reações, transformam a estrutura de compostos orgânicos mais persistentes, possibilitando maior facilidade para degradação biológica (CAVALCANTI, 2009).

Dentre os processos unitários, citam-se a precipitação química, através de fenômenos sequenciais de coagulação e floculação; Processos Oxidativos Avançados (POAs); processos de troca iônica, entre outros.

A coagulação e a floculação são etapas anteriores à flotação, permitindo assim uma boa remoção de sólidos em suspensão. Esses sólidos são partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos que, em geral, apresentam carga superficial negativa e devido à força de repulsão criada entre essas cargas de mesmo sinal, os sólidos não se aproximam para formação de flocos e permanecem em suspensão (GIORDANO, 2012; MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

A principal finalidade da coagulação é neutralizar as cargas elétricas das partículas em suspensão, através da adição de compostos químicos, tais como sais de ferro, sais de alumínio e polímeros. A mistura desses coagulantes com o efluente forma hidróxidos, produzindo na reação íons positivos (MIERZWA; HESPANHOL, 2005; NUNES, 2004).

O processo de floculação, após a desestabilização das cargas negativas dos colóides e sólidos suspensos, promove o contato entre as partículas desestabilizadas, permitindo a aglomeração das partículas e formação do floco.

Na prática, o que importa nos processos de coagulação e floculação é a dosagem e a condição ótima para aplicar o coagulante, uma vez que as reações químicas envolvidas são muito rápidas e estão condicionadas a energia de agitação, concentrações de coagulantes e pH do efluente (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

A coagulação ocorre num tanque específico de mistura rápida, por meio de misturadores mecânicos (tempo de detenção entre 0,5 e 1,5 minuto e gradiente de velocidade entre 800 e 1500  $s^{-1}$  ou hidráulicos (gradiente de velocidade igual ou acima de 1000  $s^{-1}$ ).

Após a etapa acima, o efluente segue para o tanque de mistura lenta para formação de flocos, cujo gradiente de velocidade deve situar-se entre 20 e 80  $s^{-1}$ . A formação de bons flocos, ou seja, com tamanho e densidade ideais para flotação ou sedimentação depende da dosagem de coagulante, que sofre influência de pH e outros fatores (NUNES, 2004).

A utilização de polímeros ou polieletrólitos, como auxiliar de floculação garante a estabilidade do floco nos processos de sedimentação ou flotação, pois aumentam a velocidade de sedimentação e a resistência às forças de cisalhamento.

O polímero adequado deverá ser definido em laboratório, por meio de *jar test*. No caso de haver pequena turbidez, pode ser utilizada sílica ativada, argila ou lodo fresco como formadores de núcleo de floco para facilitar a floculação (GIORDANO, 2012; NUNES, 2004).

Os POAs se baseiam na geração de radicais hidroxilas, através de peróxido de hidrogênio com ozônio, ultravioleta (UV) ou outros oxidantes energéticos, com função de degradar quimicamente compostos orgânicos recalcitrantes.

A troca iônica visa remover substâncias inorgânicas dissolvidas, principalmente compostos iônicos, os quais são transferidos para uma fase sólida insolúvel chamada de resina de troca iônica (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

### **6.3 Tratamento Biológico**

O principal objetivo deste tratamento é a degradação biológica de compostos carbonáceos. Esta etapa se dá através de microrganismos, os quais oxidam constituintes biodegradáveis particulados e dissolvidos, capturam e incorporam sólidos coloidais não sedimentáveis e suspensos, além de promoverem a transformação ou remoção de nutrientes, tais como, nitrogênio e fósforo. Para tal, os despejos devem passar por um tratamento químico prévio e a biomassa deve estar aclimatizada (CAVALCANTI, 2009).

Por meio de mecanismos biológicos, ocorre a decomposição de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas, óleos e graxas) em compostos mais simples e produtos mineralizados inertes. As reações bioquímicas que fornecem energia para os microrganismos e que resultam produtos estáveis são denominadas de catabolismo. O outro processo, que ocorre de forma simultânea, o anabolismo, consiste na síntese da nova massa celular. De modo geral, dá-se o nome de metabolismo à utilização de substrato pelos microrganismos, os quais podem ser matéria orgânica (organismo heterotrófico) ou dióxido de carbono (organismo autótrofo).

Esses fenômenos se baseiam nos processos naturais de autodepuração que acontecem num corpo receptor, após lançamento de despejos no mesmo. A diferença está na introdução de tecnologias que permitem reproduzir as reações em condições

controladas e com taxas mais elevadas, uma vez que há aporte de nutrientes e energia adequados, com elevada concentração microbiana. Nesse sistema artificial atuam microrganismos diversos e complexos, com taxas de crescimento específicas e dependentes de fatores ambientais, dimensionamento das estações e rotinas operacionais (DEZOTTI, 2008).

O metabolismo oxidativo ocorre em microrganismos heterotróficos em sistema aeróbio. Assim, a reação catabólica é a oxidação do material orgânico através de oxigênio, também conhecida como respiração aeróbia e a reação anabólica é a síntese do material celular (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

A respiração aeróbia implica em transformar matéria orgânica em glicose, que será “queimada”, com produção de calor útil. A retirada de hidrogênio é o principal fenômeno que ocorre na oxidação biológica, e neste contexto, a função do oxigênio é a de “acceptor de hidrogênio”.

Reações similares podem ocorrer biologicamente, utilizando outras substâncias como aceptores de hidrogênio. Neste caso, trata-se de respiração anaeróbia, as quais ocorrem em ambientes com ausência de oxigênio dissolvido na água. O nitrato ( $NO_3^-$ ) e o sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) substituem o oxigênio dissolvido como oxidantes do material orgânico e passam a funcionar como aceptores de hidrogênio: nitratos são reduzidos a nitritos, sulfatos são reduzidos a sulfetos e  $CO_2$  pode ser reduzido a metano. Contudo, os processos de respiração em presença de oxigênio (fermentação), típicos de algumas bactérias, não se fazem presentes, uma vez que o oxigênio é extremamente tóxico aos chamados anaeróbios obrigatórios. Já os anaeróbios facultativos optam por oxigênio como acceptor, por ser uma oxidação mais completa, na qual toda a matéria orgânica é transformada em  $CO_2$ , com o máximo rendimento térmico (COELHO, 2002; VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

O óleo, componente típico de efluentes de indústrias petroquímicas, é de difícil metabolização. Os microrganismos, em geral, não fazem sua assimilação, conseguindo apenas uma transformação parcial, que converte o óleo para compostos orgânicos oxigenados e possibilita, dessa forma, a total degradação por outros organismos.

Quanto à qualidade nutritiva dos efluentes hídricos, pode-se dizer que, dentre os três nutrientes básicos para qualquer organismo – nitrogênio, fósforo e potássio – ao lado de nutrientes secundários e micronutrientes, os efluentes de refinaria já

possuem, normalmente, o nitrogênio e até o potássio, necessitando apenas da adição de fósforo (COELHO, 2002).

Os tratamentos biológicos aeróbios são os mais econômicos atualmente, além disso, em refinarias, os compostos fenólicos são os principais contaminantes, juntamente com outros traços de hidrocarbonetos, sendo prática internacional o emprego de processos bio-oxidativos para remoção dessas substâncias orgânicas.

Existem, atualmente, no mercado diversos tipos de biorreatores biológicos empregados no tratamento aeróbio de efluentes. Sua classificação se baseia na forma predominante de aglomeração microbiana, podendo ser na forma de flocos (biomassa em suspensão) ou biofilme (biomassa fixa).

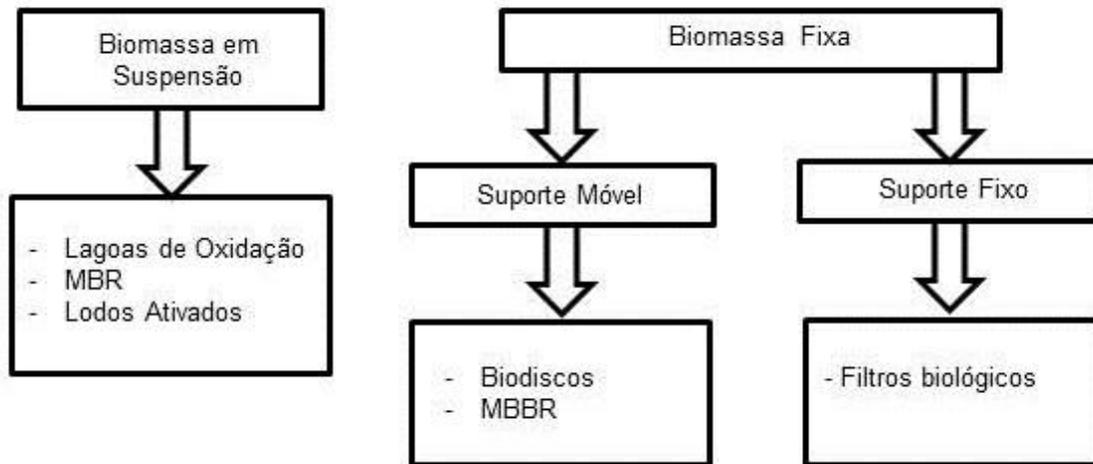
Os processos de tratamento de efluentes com biofilme são aqueles onde está presente nas reações uma estrutura complexa de células, que também pode ser considerada um hidrogel (substância polimérica com quantidade de água que corresponde a várias vezes o seu peso seco). A formação do biofilme se dá por processos de natureza física, química e biológica, nos quais uma comunicação química entre as células permite às bactérias se agruparem com inúmeros benefícios, configurando-se como uma comunidade funcional coordenada.

Os biofilmes geralmente se desenvolvem fixados em superfícies e as bactérias são capazes de compartilhar nutrientes e se protegerem de fatores ambientais prejudiciais (TORTORA; FUNKE; CASE, 2010). Adicionalmente, pode-se dizer que, de modo geral, os processos com biofilme apresentam maior desempenho de depuração de matéria orgânica, principalmente devido à elevada atividade e diversidade microbiana existente nessas comunidades.

As principais vantagens dos reatores com biofilmes, se comparados aos processos convencionais de biomassa dispersa são: alta concentração de biomassa, o que possibilita operar o reator com maior carga; maior estabilidade quando submetido a variações na composição do afluente e a choques de carga, temperatura e toxicidade; menor passagem de sólidos para etapa a jusante do reator; estações mais compactas; e não reciclo do lodo (DEZOTTI; SANT'ANNA JR; BASSIN, 2011).

A Figura 10 mostra os diversos tratamentos biológicos, subdividindo-os de acordo com a distribuição da biomassa nos reatores. As subseções a seguir detalham cada um dos tratamentos.

**Figura 10 - Principais tipos de biorreatores empregados nos processos aeróbios de tratamento em refinarias.**



Fonte: SANT'ANNA J; LIPPEL, 2010 (adaptado).

### 6.3.1 Lagoas de oxidação

As lagoas via fotossintética são algumas vezes empregadas; muito embora, requeiram muita área, possuem o mais baixo custo. Apresentam ainda como vantagem capacidade tampão para horas de vazão máxima e efluentes altamente tóxicos.

As algas mortas devem ter remoção periódica e algumas vezes há a necessidade de transformá-las em lagoas aeradas (BRAILE,1993). Nesta, a aeração é feita por unidades mecânicas, tais como, aeradores de superfície e podem ainda ser submetidas a diferentes regimes:

- Regime de mistura completa: reduz o volume da lagoa aerada, uma vez que o nível de aeração maior é capaz de manter todos os sólidos em suspensão no meio líquido, além de promover a oxigenação. Recomenda-se a instalação de uma lagoa de decantação a jusante para a remoção de sólidos em suspensão que são carregados pelo efluente na saída da lagoa (VON SPERLING, 2005).

- Lagoas facultativas: nível de turbulência menor que as de mistura completa. A agitação promovida é insuficiente para manter em suspensão homogênea todos os sólidos, logo, parte desses sólidos sedimenta no fundo da lagoa e devido à falta de oxigênio, sofre decomposição anaeróbia (DEZOTTI, 2008).

De acordo com Jordão & Pessoa (2005), os principais problemas operacionais das lagoas de oxidação são: presença de espuma, devido ao superflorescimento de algas; lançamento de material estranho na lagoa; pouca atuação do vento; desprendimento de odores desagradáveis pela sobrecarga de esgoto e conseqüente abaixamento de pH e O<sub>2</sub>; substâncias tóxicas; vegetação aquática no interior da lagoa etc.

### 6.3.2 Reatores com Membrana (MBR)

Os biorreatores com membranas, mais conhecidos pela sigla inglesa MBR (*Membrane Biological Reactors*), surgiram do desenvolvimento de processos com membranas (filtração, microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa), principalmente a partir de década de 60. Nesta época surgiram os primeiros trabalhos sobre biorreatores com membranas para retenção de sólidos, voltados para o tratamento de esgoto.

Os MBRs aplicados em tecnologia ambiental, de um modo geral, são biorreatores convencionais, aeróbios ou anaeróbios, com sistemas de micro ou ultrafiltração, instalados ou associados a tanques, nos quais acontecem reações microbiológicas e permeação de substâncias através das membranas.

O MBR não necessita de um decantador secundário e resulta em concentração de biomassa muito maior do que em sistemas de lodos ativados convencionais. Adicionalmente, apresenta como vantagem a geração de efluentes tratados que, além de atender aos padrões legais de lançamento, enquadram-se para reuso (DEZOTTI, 2008; DEZOTTI; SANT'ANNA JR; BASSIN, 2011; SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

Nestes sistemas, os módulos de membranas funcionam como um obstáculo, permitindo o controle do tempo de retenção da biomassa de forma independente do tempo de detenção hidráulica (VIANA, 2004).

De acordo com Viana (2004), os principais parâmetros que afetam o desempenho das membranas em MBR são:

- Pressão transmembrana;
- Velocidade tangencial do lodo ativado no módulo de membranas;
- Inserção de ar juntamente com a corrente de alimentação do módulo;
- Concentração de sólidos suspensos no tanque de aeração;
- Frequência e a pressão de retrolavagem;
- Polarização de concentração e *fouling*;
- Limpeza química, entre outros fatores.

Cabe lembrar que, apesar das variáveis citadas acima, os danos nas membranas são facilmente detectáveis durante a operação, pois seu processo construtivo permite o bloqueio do módulo defeituoso, no caso de detecção de alterações na qualidade do permeado, permitindo a continuidade operacional do sistema com os demais módulos (DEZOTTI, 2008).

Muito embora, a utilização do MBR para tratamento industrial venha crescendo nos últimos anos e esteja consolidada para alguns ramos industriais (alimentos, farmacêuticos, celulose e papel), os efluentes de refinaria de petróleo por apresentarem maior complexidade, constituem-se em desafios para sua correta operação e desempenho (DEZOTTI; SANT'ANNA JR; BASSIN, 2011).

### 6.3.3 Contactores biológicos rotativos

O processo consiste num conjunto de discos rotativos (biodiscos) montados em um eixo horizontal, espaçados aproximadamente 2 cm, os quais funcionam como meio suporte para o crescimento do biofilme.

Os discos giram com uma velocidade lenta e alternam cerca da metade da área superficial imersa no efluente a ser tratado, enquanto o restante fica exposto à atmosfera. Isso permite que a biomassa entre em contato com a matéria orgânica e com o ar de forma alternada.

Quando o biofilme sobre os discos atinge uma espessura excessiva, este se desprende e parte dos microrganismos se mantém em suspensão no efluente, devido à movimentação dos discos, aumentando a eficiência do sistema. Contudo, é necessária a instalação de um decantador secundário a jusante para a remoção dos organismos em suspensão (VON SPERLING, 2007).

A compartimentação ou a segmentação dos biodiscos permite diferentes condições operacionais, o que propicia o desenvolvimento de diferentes microrganismos em cada estágio. Dessa forma, pode-se atingir a nitrificação com a adição de mais estágios, tendo nos últimos estágios menor concentração de matéria orgânica e favorecimento do consórcio microbiano nitrificante (DEZOTTI, 2008).

As variáveis operacionais que afetam os biodiscos são: a velocidade de rotação dos discos, Tempo de Retenção Hidráulico (TRH), número de estágios, temperatura, área e submersão dos discos.

#### 6.3.4 Filtros biológicos

Tratamento através de oxidação biológica, sendo a denominação considerada imprópria, pois não envolve fenômenos de peneiramento ou filtração (JORDAO; PESSOA, 2005).

Os filtros biológicos são dotados de mecanismos, tais como distribuidores rotativos que propiciam a aplicação uniforme do efluente (na maioria das vezes decantado) sobre o biofilme que se forma agregado a um meio altamente permeável (brita ou material plástico).

A matéria orgânica sofre degradação na camada superficial do biofilme e com o aumento da espessura dessa camada biológica, o oxigênio fica impossibilitado de penetrar; a parte inferior, portanto, se comporta anaerobicamente. Diante do fato, alguns filtros possuem aeração por meio de injeção de ar soprado, no caso da nitrificação do efluente.

O efluente que percola o meio filtrante promove uma “lavagem” da biomassa em excesso, de tal forma que há sempre renovação do biofilme. Essa remoção é função das cargas hidráulicas e orgânicas aplicáveis, podendo os filtros serem classificados como de alta e baixa taxa.

O sistema possui ainda drenos para coleta do efluente tratado e para os sólidos biológicos desprendidos do meio suporte (CAVALCANTI, 2009; JORDAO; PESSOA, 2005).

O desempenho operacional dos filtros biológicos depende basicamente da carga hidráulica ou taxa de aplicação hidráulica superficial e da carga orgânica volumétrica (DEZOTTI, 2008).

#### 6.3.5 Reator de Leito Móvel com Biofilme (MBBR)

O MBBR, da sigla em inglês *Moving Bed Biofilm Reactors*, surgiu com base na premissa de congregar em um único sistema as principais vantagens dos lodos ativados e as melhores características dos processos com biofilmes já existentes, tais como biodiscos, filtros biológicos de percolação e os biofiltros submersos de leito fixo, excluindo as desvantagens de cada processo (RUSTEN et al., 2006).

Trata-se de um reator de leito expandido, biomassa fixa e suporte móvel, cujo princípio é o crescimento de um biofilme fixo sobre elementos plásticos, também conhecidos como *biomedias*, que se movem livremente no reator biológico. As *biomedias* têm um diâmetro de cerca de 1 a 2 cm e densidade muito próxima à da água.

O MBBR utiliza todo o volume útil do reator para o crescimento do consórcio microbiano. Em comparação com outros sistemas de biomassa fixa (filtros biológicos e biofiltros submersos), estes sistemas não apresentam problemas de entupimento ou colmatção do meio filtrante, além de apresentarem reduzida perda de carga.

Comparado com sistemas de lodos ativados, o MBBR pode operar com reatores em série em proporções mais elevadas de relação A/M (Alimento/Microrganismo) e com uma biomassa selecionada para cada etapa do tratamento (RUSTEN; KOLKINN; DEGAARD, 1997).

O MBBR apresenta como vantagens a possibilidade de aplicação em ETEs já existentes; não necessidade de reciclo do lodo, já que a biomassa cresce aderida a suportes móveis; dispensa ciclo de limpezas, pois não há colmatação do leito; e possibilita a utilização de sistemas mais compactos.

Como desvantagens citam-se os custos elevados durante a operação, devido ao consumo de energia, necessidade de aeradores ou agitadores mecânicos para aeração e movimentação dos suportes móveis, o que contribui ainda mais para o encarecimento do processo. Essa tecnologia pode ainda ser empregada em sistemas aeróbios, anóxicos ou anaeróbios (DEZOTTI; SANT'ANNA JR.; BASSIN, 2011).

Os principais aspectos operacionais dos MBBRs, segundo Dezotti et al. (2011), são:

- Razão de recheio ( $V_s/V_r$ ) ou fração de enchimento (%): é a quantidade de suporte adicionado ao reator (razão entre o volume ocupado pelos suportes e o volume total do reator). É recomendável uma razão  $V_s/V_r$  de 0,55 (SOKÓL, 2003). Porém, alguns estudos indicam que os MBBRs podem operar com razões de recheio entre 0,6 e 0,7. Rusten et al. (2006), contudo, observam que altas frações de enchimento podem prejudicar a hidrodinâmica do reator.
- Hidrodinâmica (turbulência no reator): o fluxo de ar possibilita o desprendimento natural do biofilme, cedendo lugar para que o suporte seja preenchido por outras bactérias. Contudo, quanto maior a turbulência aplicada, maior será o desprendimento do biofilme, podendo levar a uma elevada concentração de sólidos suspensos na fase líquida. Assim, é importante que sejam asseguradas boas condições hidrodinâmicas, que incluem análises de campo de velocidade dentro do reator, de segregação do suporte e surgimento de zonas estagnadas.
- Oxigênio dissolvido (OD): por se tratar de um processo biológico de tratamento, o OD apresenta-se como fator limitante. MBBRs requerem maior concentração de OD se comparados a outros reatores biológicos, devido às limitações difusivas inerentes aos processos com biofilme.
- Formação do biofilme nos suportes móveis do MBBR: a presença simultânea de bactérias heterotróficas e nitrificantes prejudica o crescimento desta última. Além disso, no início da operação, o crescimento do biofilme é muito lento,

devido, principalmente, à turbulência proveniente da aeração, aumentando com isso o cisalhamento e fixação dos microrganismos nas *biomedias*.

- Exopolímeros ou Substâncias Poliméricas Extracelulares (EPS): muito embora os exopolímeros atuem positivamente no processo biológico, principalmente como agentes cimentantes (auxiliam a fixação dos microrganismos no meio suporte), sua presença em excesso interfere no valor da Demanda Química de Oxigênio (DQO) bruta, além de aumentar a turbidez do efluente tratado.

### 6.3.6 Lodos ativados

O processo de lodos ativados é amplamente utilizado e efetivo para remoção de matéria orgânica biodegradável dissolvida e coloidal. É uma técnica de tratamento recomendada para efluentes contaminados com compostos orgânicos, por isso é utilizada por uma variedade de indústrias, entre as quais, refinaria de petróleo, indústrias têxteis, bem como tratamento de efluentes municipais (CHEREMISSINOFF, 1987).

Nesse processo, o esgoto afluente é misturado e aerado com o lodo biológico (microrganismos em forma de flocos) em tanques de aeração. A aeração pode ser por meio de aeradores, compressores ou sistema de oxigênio puro e tem por objetivo proporcionar oxigênio aos microrganismos, mantê-los em suspensão e promover a mistura homogênea do lodo ativado ao afluente (chamada “licor”). A matéria orgânica presente no esgoto entra em contato com os microrganismos e é utilizada como alimento, sendo assim oxidadas a  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (CHEREMISSINOFF, 1987).

O licor é enviado de maneira contínua a um decantador (clarificador) para separar o lodo ativado do efluente final por meio de sedimentação do primeiro. A grande parte do lodo decantado retorna ao tanque de aeração por bombeamento, com vistas a manter uma proporção adequada entre concentração de microrganismos e a carga orgânica afluente, enquanto uma pequena parcela é retirada para tratamento e posterior disposição final sempre que a concentração de licor ultrapassa as condições de projeto, já que o crescimento da biomassa é contínuo (JORDÃO; PESSOA, 2005).

A população microbiana é fundamental para o bom funcionamento do sistema e está condicionada à eficiência da operação, quantidade e qualidade do efluente que alimenta o processo, de tal forma que a avaliação microbiológica do lodo pode fornecer informações sobre o desempenho da ETE (POOLE, 1984).

Os microrganismos encontrados nos lodos ativados são bactérias, fungos, protozoários e rotíferos. No caso do tratamento de efluentes derivados de hidrocarboneto de petróleo, os principais microrganismos encontrados são mais de 200 espécies de bactérias, leveduras e fungos (CHEREMISSINOFF, 1987).

Como principais vantagens tem-se boa eficiência de tratamento e grande flexibilidade operacional e como desvantagem, citam-se operação mais delicada e necessidade de completo controle laboratorial (JORDÃO; PESSOA, 2005).

Ao longo do processo de lodos ativados poderá também ocorrer a nitrificação da amônia em nitrato, sendo necessário o provimento de oxigênio para atender a demanda nitrogenada já no tanque de aeração. Nessa situação, a amônia é removida, porém não o nitrogênio, uma vez que ocorreu apenas uma conversão da forma de nitrogênio.

A remoção biológica do nitrogênio é alcançada apenas em condições de ausência de oxigênio dissolvido, mas na presença de nitratos, ou seja, em condições anóxicas. Assim, bactérias específicas utilizam nitratos para sua respiração, transformando-os em nitrogênio gasoso (desnitrificação), lançando-o para atmosfera. Para que ocorra a desnitrificação são necessárias condições anóxicas e recirculações (JORDÃO; PESSOA, 2004; VON SPERLING, 2005).

As principais variáveis do processo de lodos ativados, segundo Von Sperling, (2002) são: de entrada (não podem ser diretamente controladas, como Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, vazão, etc.), de controle (necessitam de controle, como OD, Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração – SSTA, etc.), medidas (fornecem parâmetros que definirão a ação e o controle) e manipuladas (são alteradas com vistas a manter as variáveis de controle nos níveis desejados, como vazão de recirculação do lodo, nível de aeração, etc.).

- Taxa Específica de Utilização do Substrato (U): é a velocidade com que os microrganismos consomem o substrato orgânico (U), representada pela equação abaixo (JORDÃO; PESSOA, 2005):

$$U = \frac{Q \cdot S_0 - S}{V \cdot X_{av}} \quad (13)$$

Onde:

$U$ : Taxa de utilização do substrato (kg DBO/kg SSVTA.dia);

$Q$ : Vazão afluyente (m<sup>3</sup>/dia);

$S_0$ : Concentração de DBO<sub>5</sub> afluyente (kg/m<sup>3</sup>);

$S$ : Concentração de DBO<sub>5</sub> efluente (e no tanque de aeração), solúvel (kg/m<sup>3</sup>);

$V$ : Volume do reator biológico ou tanque de aeração (m<sup>3</sup>);

$X_{av}$ : Concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) (kg/m<sup>3</sup>);

- Relação Alimento/Microrganismo (A/M): a relação A/M mede a razão entre o substrato, expresso em kg DBO<sub>5</sub>/dia e os microrganismos no tanque de aeração (SSVTA), expressos em kg SSVTA/dia, conforme equação:

$$\frac{A}{M} = \frac{Q \cdot S_0}{X_{av} \cdot V} \quad (14)$$

A norma brasileira NBR 12209 recomenda 0,7 a 1,1 kg DBO<sub>5</sub> aplicado/kg SSVTA.dia para sistemas de alta taxa; 0,20 a 0,70 kg DBO<sub>5</sub> aplicado/kg SSVTA.dia para sistemas de taxa convencional; e menor ou igual a 0,15 kg DBO<sub>5</sub> aplicado/kg SSVTA.dia para sistemas de aeração prolongada.

- Fator de Carga: muito similar à A/M, contudo, mede a razão entre o alimento presente no despejo afluyente e sólidos em suspensão no efluente aerado (SSTA). A concentração ótima de SSTA está entre 1.500 e 4.500 mg/L (ABNT, 2011).

O principal objetivo do controle durante a operação dos SSTA é mantê-los constante. No que diz respeito à DBO solúvel no estado estacionário, o controle da concentração de SSTA por meio da remoção de lodo em excesso remete também ao controle da relação A/M e da Idade do Lodo (IL). Contudo, o sistema opera, em sua maioria, no estado dinâmico, devido às variações nas vazões e concentrações afluentes (VON SPERLING, 2002).

- Idade do Lodo (IL) ou Tempo Médio de Detenção Celular ( $\theta$ ): representa o tempo médio (dias) em que uma partícula em suspensão permanece sob aeração. Pode ser estimada dividindo-se a massa de sólidos em suspensão voláteis no tanque de aeração e a massa de sólidos em suspensão voláteis descartada por dia.

$$\theta = \frac{V \cdot X_{av}}{Q' \cdot X_{uv} + Q'' \cdot X_{ev}} \quad (15)$$

Onde:

- $Q'$ : Vazão efluente (m<sup>3</sup>/dia);
- $Q''$ : Vazão de descarte do lodo;
- $X_{ev}$ : Concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) no efluente;
- $X_{uv}$ : Concentração de SSV no lodo em excesso, descartado do decantador secundário.

Para um valor desprezível de  $X_{ev}$  e para o caso da retirada do lodo em excesso diretamente do tanque de aeração, tem-se:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (16)$$

A norma brasileira especifica IL de 2 a 4 dias para sistemas de alta taxa; 4 a 15 dias para sistemas de taxa convencional e acima de 18 dias para sistemas de aeração prolongada.

- Total de Lodo Decantado (TLD): o TLD é um teste que indicará o volume ocupado pelo lodo (mL/L) num cilindro graduado de 1000 mL, após 30 minutos de decantação.
- Oxigênio Dissolvido (OD): é uma variável de controle e sua quantidade é definida em função da DBO afluente ao tanque de aeração, sua eficiência de remoção desejada, forma e dimensão do tanque de aeração e mecanismos de distribuição do ar (JORDÃO; PESSOA, 2005). O valor de OD para o qual a nitrificação é limitada pode ser de 0,5 a 2,5 mg/L, tanto em sistemas de crescimento de lodo suspenso como sistemas de meio fixo. Podemos concluir que a taxa de crescimento das bactérias nitrificantes não está limitada em níveis de OD acima de 1,0 mg/L, mas na prática, é requerido um OD maior do que 2,0 mg/L (Ferreira, 2000; Derks, 2007).
- Descarte e Recirculação do Lodo: parâmetro influenciado pela IL, uma vez que após definido, deve ser mantido constante por meio da descarga de lodo em excesso. Tal descarga poderá ser feita diretamente no tanque de aeração ou feita na linha de recirculação, a partir do decantador secundário, onde a vazão de descarte será em função das concentrações de sólidos no lodo recirculado e no tanque de aeração.

Esta última alternativa é mais utilizada, pois proporciona um lodo mais concentrado, o que demanda um volume menor de lodo de retorno (recirculação do lodo) (JORDÃO; PESSOA, 2005; VAN HAADEL; MARAIS, 1999).

Há diversas modalidades de lodos ativados destinados ao tratamento de efluente, que variam com o tempo de residência e concentração da biomassa no reator. As principais modalidades são:

- Convencional: é comum usar nesta modalidade relação A/M mais elevada (0,2 a 0,7 kg DBO<sub>5</sub>/kg SSVTA.dia) com idade de lodo de 4 a 15 dias e baixos tempos

de detenção hidráulica (4 a 8 horas). O teor de SSVTA atinge faixa entre 1.500 a 4.500 mg/L. Contudo, o lodo necessita de estabilização (ABNT, 2011; CAVALCANTI, 2009).

- Sistema de Alta Taxa: apresenta elevado fator de carga e relação A/M (0,70 a 1,10 kg DBO<sub>5</sub>/kg SSVTA.dia), baixa idade do lodo (2 a 4 dias) e tempo de detenção de 1 a 2 horas. Ou seja, recebe carga de DBO elevada em presença de concentração elevada de sólidos (ABNT, 2011; JORDÃO; PESSOA, 2005).
  
- Aeração Prolongada: muito utilizada para despejos industriais, uma vez que possibilita maiores períodos de detenção. Opera na fase de respiração endógena, onde os microrganismos metabolizam seu próprio protoplasma, gerando um lodo já estabilizado. Requer baixa carga orgânica (menor ou igual a 0,15 kg DBO<sub>5</sub>/kg SSVTA.dia), concentração de SSTA acima de 4.000 mg/L e até 800 mg/L e um longo período de aeração. A baixa carga orgânica e o abastecimento com suficiente oxigênio garantem o processo de nitrificação em paralelo com a estabilização aeróbia do lodo. (ABNT, 2011; CAVALCANTI, 2009; JORDÃO; PESSOA, 2005).



## 7 IMPACTOS AMBIENTAIS DA POLUIÇÃO HÍDRICA

A indústria de refino, cada vez mais, está se empenhando para minimizar os impactos de seu processo produtivo sobre o meio ambiente. Este controle é feito para atendimento à legislação ambiental, questões de segurança, economia de combustíveis e outras vantagens econômicas do bom gerenciamento e manutenção constantes das plantas industriais (GARY; HANDWERK; KAISER, 2007).

A poluição das águas, segundo Von Sperling (2005) é “a adição de substâncias ou formas de energia que, direta ou indiretamente, alterem a natureza do corpo d’água de uma maneira tal que prejudique os legítimos usos que dele são feitos”.

Para minimizar tais efeitos, os efluentes passam pela ETEI, porém, apesar do tratamento minimizar os impactos sobre o ambiente aquático, os efluentes tratados ainda provocam consideráveis alterações, devido à elevada carga de orgânicos e produtos tóxicos que eventualmente não são removidos.

Os efluentes de uma refinaria ainda apresentam algumas especificidades e necessitam de um controle adicional, como as águas resultantes da lavagem de gases, as quais podem conter amônia, H<sub>2</sub>S e fenóis em concentrações superiores a capacidade de tratamento da ETEI e com isso poderiam pôr em riscos os ecossistemas hídricos receptores e a saúde pública. Logo, estes efluentes devem passar por um tratamento preliminar antes de atingir a ETEI.

Em geral, os impactos gerados pelas ETEI podem ser positivos e negativos. Os positivos estão relacionados aos objetivos de uma estação de tratamento, no que diz respeito à remoção ou diminuição de substâncias nocivas, como matéria sólida que assoreia cursos d’água; aspectos sanitários prejudiciais à saúde humana e os de depleção da biota aquática (D’AVIGNON; LA ROVERE, 2002; MOTA, 1997).

Os principais problemas ambientais dos efluentes de uma refinaria são devido aos seguintes parâmetros, conforme tabela abaixo:

**Tabela 8 - Principais contaminantes de efluentes hídricos em refinarias**

<b>Contaminante</b>	<b>Origem</b>	<b>Efeitos</b>
Óleos e graxas	Todos os estágios de processamento; Perda de óleo aceitável para o efluente líquido 0,1 a 0,4 %	Tóxicos; Inibem os processos biológicos
Fenóis	Unidade de processo que trabalham com temperaturas altas e possuem fonte de oxigênio	Mau gosto (50 a 100 ppb); Mau cheiro (50 a 100 ppb); Tóxicos; Concentrações acima de 5 ppm são tóxicas aos peixes; Concentrações acima de 1000 ppm alteram o crescimento de ratos
Mercaptanas	Petróleo; Unidades de processamento; Substituição de um hidrogênio dos hidrocarbonetos pelo radical SH	Tóxicos; Mau cheiro; Reagem imediatamente com o oxigênio; Correntes contendo altas concentrações, se descartadas em canaletas de drenagem emanam gases deste composto que são prejudiciais à saúde humana
Sulfetos	Petróleo; Podem estar presentes na forma de sal devido à substituição do hidrogênio por um radical positivo	O gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S) é tóxico, corrosivo e causa sérios problemas de odor e sabor; Letal aos peixes em concentração acima de 1 ppm; Demanda imediata de oxigênio que irá diminuir o oxigênio dissolvido nos cursos de água; Correntes contendo altas concentrações, se descartadas em canaletas de drenagem, emanam gases deste composto prejudiciais à saúde humana, podendo ser letais
Cianetos	Unidades de processo que trabalham com temperaturas altas a partir do nitrogênio orgânico	Em condições de pH baixo, liberam gás cianídrico (HCN), altamente tóxico; não deve, por isso, ser descartado em canaletas de drenagem (pode ser letal)
Chumbo	Petróleo; Etilação da gasolina (processo eliminado em todas as refinarias)	Acumulativo; Toxidez aguda: queimaduras na boca, sede intensa, inflamação do trato gastrointestinal, ocasionando diarreias e vômitos; Toxidez crônica: náuseas, vômitos, dores abdominais diversas, paralisia, confusão mental, distúrbios visuais, anemias e convulsões
Mercúrio	Petróleo	-

Continua

Contaminante	Origem	Efeitos
Cromo	-	Cancerígeno quando na valência +6.
Zinco	Água de refrigeração (controle de corrosão)	Essencial e benéfico para o metabolismo humano, pois a atividade da insulina e de diversos compostos enzimáticos depende da sua presença; A deficiência nos animais conduz ao atraso do crescimento; O teor é limitado na água devido ao sabor
Amônia	Unidades de processo que trabalham com temperaturas elevadas, que rompem as moléculas do composto nitrogenado e fazem com que o nitrogênio orgânico ligue-se ao hidrogênio.	Nutriente básico; Favorece o crescimento de algas em detrimento de outras espécies, provocando a eutrofização dos corpos d'água; aderem à guelra dos peixes; Tóxica aos peixes, quando na forma não ionizada; Correntes contendo altas concentrações descartadas em canaletas de drenagem emanam gases deste composto que são prejudiciais à saúde humana, podendo ser letal
Fosfatos	Água de refrigeração e água de caldeira.	Nutriente básico; Eutrofização dos corpos d'água
Nitrito e nitrato	Sistemas de tratamento biológico do efluente hídrico (nitrificação)	Alterações sanguíneas nas crianças (até três meses de idade). A hemoglobina alterada não transporta adequadamente o oxigênio, o que provoca a asfixia

Fonte: COELHO, 2002.

De acordo com Braile (1979), muitos compostos tóxicos dos efluentes de refinarias, apesar de presentes em concentrações inferiores às letais podem causar efeitos negativos à biota aquática devido à toxicidade da interação entre os diversos compostos.

Além dos aspectos associados à tratabilidade dos efluentes e seus efeitos aos corpos hídricos, é importante destacar a possibilidade de contaminação do solo por subprodutos do tratamento, como o lodo, que deve ter uma disposição adequada; geração de gases explosivos; atração de vetores; saúde ocupacional dos operadores e geração de maus odores (BOLZANI, 2011).

Além do impacto ao meio ambiente, os efluentes tratados de maneira inadequada e principalmente o descarte *in natura* podem causar sérios problemas à saúde, já que antes de chegar ao consumo humano, a água percorre um longo caminho desde sua nascente até o rio, represa ou outra rede qualquer de distribuição e está sujeita a essas fontes de poluição (ÁGUA..., 2013).

A água impactada pode ser veículo de transmissão de contaminantes e/ou patógenos e pode chegar ao homem por meio de contato dérmico, inalação e ingestão, através de atividades corriqueiras, como ingestão direta, preparação de alimentos e uso na higiene pessoal, nas atividades de limpeza e no contato primário.

É fundamental, portanto, a análise da confiabilidade de ETEIs, de modo a preservar a saúde da população do entorno desses empreendimentos e evitar ações públicas de saúde, cujos custos tangíveis e intangíveis são bastante elevados.

## 8 ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS

Devido à importância inquestionável da água para o desenvolvimento das atividades humanas, o Brasil possui um arcabouço legal que disciplina a utilização dos recursos hídricos pela sociedade, principalmente as indústrias.

O primeiro documento legal federal, que demonstrava a preocupação com as constantes descargas líquidas das indústrias foi o Decreto nº 23.777/1934, que dispunha sobre o lançamento de resíduo industrial das usinas açucareiras nas águas fluviais. Posteriormente, foi publicado o Código das Águas (Decreto nº 24.643/1934), cujo objetivo era permitir ao Poder Público controlar e incentivar o aproveitamento industrial das águas.

Na década de 80, no que diz respeito às questões ambientais, foi instituída a lei nº 6.938/1981, considerada um dos documentos mais importantes da legislação ambiental brasileira. Esta dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente e introduz conceitos de meio ambiente, poluição e poluidor.

Por muito tempo, a Resolução Conama nº 20/1986 destacou-se como principal instrumento de controle da poluição hídrica, a qual foi revogada pela Resolução CONAMA nº 357/05, que da mesma forma classifica as águas de acordo com sua utilização e padrões de qualidade.

Por fim, a Constituição Federal (CF) de 1988 dedicou inúmeros artigos ao tema recursos hídricos e o Artigo 225 foi dedicado inteiramente ao tema meio ambiente. No âmbito federal, as diversas normas que versam sobre recursos hídricos são amparadas pela CF.

Na década de 90, destacam-se as leis nº 9.433/1997, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei das Águas) e o Sistema Nacional de Recursos Hídricos, marcando a descentralização da gestão de recursos hídricos e introduzindo questões como outorga de direito de uso e cobrança do uso de recursos hídricos e a Lei nº 9.605/1998, Lei de Crimes Ambientais, que embora não seja específica sobre gerenciamento hídrico, dispõe sobre penalidades impostas pela conduta e atividades lesivas ao meio ambiente.

Como afirmado acima, a Lei das Águas dispõe a cobrança pelo uso da água na captação, no lançamento e no consumo. De modo a facilitar a implantação desse e

outros instrumentos de gestão, foi criada a Lei nº 9.984/2000, ~~que criou a~~ Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de coordenação e apoio ao Sistema Nacional de Gerenciamento Hídrico.

A legislação mais recente sobre o tema é a Resolução CONAMA nº 430/11, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357/2005.

Todas as normas incorporam o conceito “comando e controle”, cabendo aos órgãos federais, estaduais e municipais definirem padrões de qualidade para os recursos hídricos e lançamento de efluentes, os quais devem ser seguidos pelas indústrias e outras atividades. Posteriormente, o cumprimento é monitorado (CAVALCANTI, 2009; MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

## **9 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **9.1 Caracterização da área de estudo**

Esse estudo foi aplicado num Complexo Industrial de Refino de Petróleo, próximo a um corpo receptor de grandes dimensões, cuja produção atende a uma ampla parcela da região metropolitana de um país.

A refinaria tem aproximadamente 20 anos de operação e alta capacidade de processamento de petróleo, respondendo por 15% da produção de derivados de petróleo nesse País.

Os principais derivados produzidos são: gás combustível, gás de refinaria, gás liquefeito de petróleo (GLP), propeno, nafta petroquímica, nafta reformada (ou reformado), isooctano, gasolina, querosene, óleo diesel, asfalto, coque de petróleo, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), enxofre e hidrogênio.

Devido à necessidade de adequação de seus produtos, em especial, o óleo diesel, gasolina, óleo combustível e GLP às novas especificações de mercado, a refinaria passou por uma modernização. Após a modernização, mantém sua capacidade de processamento de petróleo, contudo, possui novas unidades (entre estas, uma nova ETEI – unidade auxiliar às de processo de refino) que permitem, entre outros, adequar o teor de enxofre dos combustíveis às novas especificações ambientais.

### **9.2 Etapas do tratamento de efluentes**

A antiga ETEI da refinaria (antes da modernização) apresenta o modelo recomendado pelo API, organismo internacional que determina padrões para refinarias do mundo. O sistema é composto por:

- Sistema de coleta e encaminhamento para ETEI;
- Sistema de gradeamento (efluentes contaminados e oleosos);
- Sistema de desarenamento (efluente contaminado);
- Caixa de partição, extravasores e mistura (equalizador);
- 02 Separadores água-óleo (tipo API);
- 02 Bacias de floculação e flotação;
- 04 Reatores biológicos – 08 aeradores mecânicos de superfície;
- 02 Clarificadores;
- *Decanter* para desague do lodo e borras oleosas.

Algumas melhorias no sistema de drenagem foram implementadas, tais como, a construção de um tanque “dreneiro”, para o qual foram direcionadas as drenagens de tanques de petróleo e produtos e deste para o SAO da nova ETEI. Isso reduziu sobremaneira o teor de óleos e outros contaminantes no efluente contaminado encaminhado para antiga ETEI.

O tanque “dreneiro” também passou a receber a vazão de salmoura gerada no processo, atuando como pulmão para o amortecimento de variações bruscas na vazão e qualidade da salmoura, permitindo maior estabilidade na operação das ETEIs.

A modernização no tratamento de efluentes considerou premissas, tais como, melhoria na performance global das estações e aumento do tratamento de efluentes em tempo de chuvas.

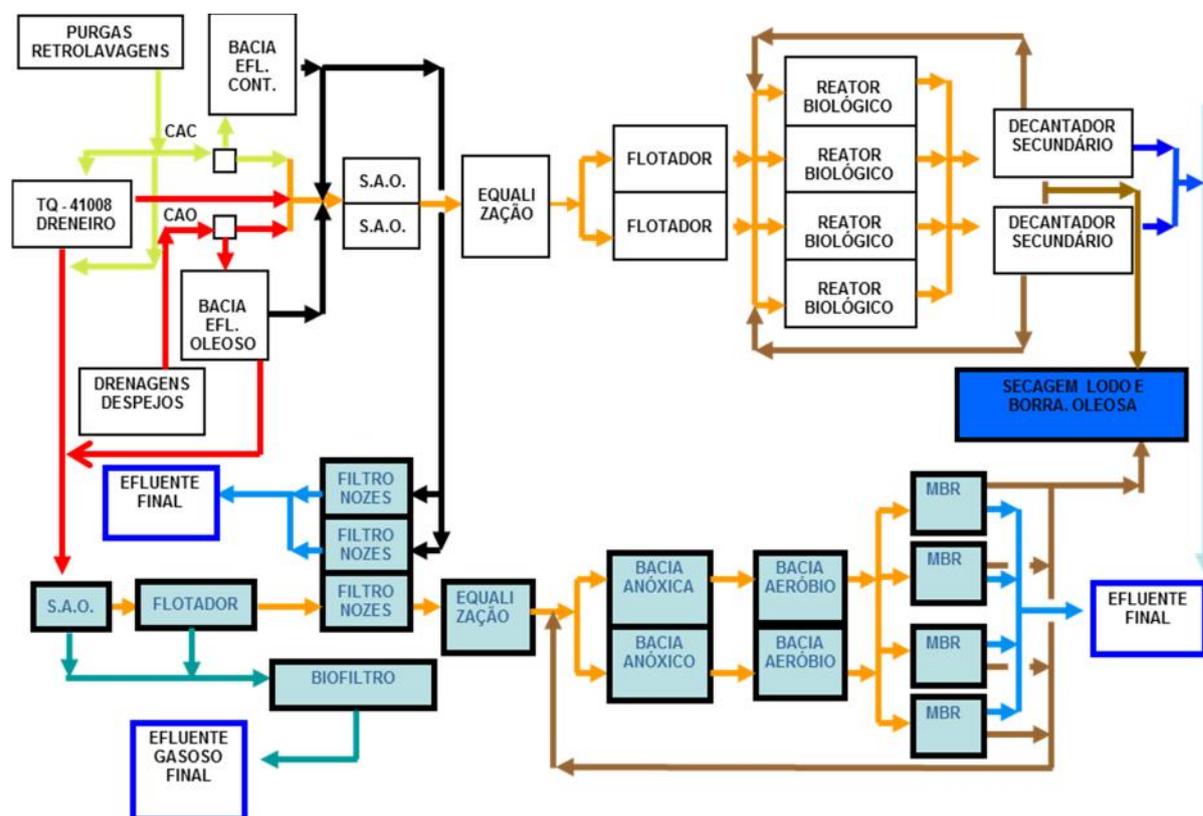
Para atendimento a tais premissas, houve segregação do efluente do tanque “dreneiro” para as ETEIs. Esta corrente representa a fonte de maior carga orgânica e de contaminantes dentre os efluentes da refinaria. A maior parte desta corrente segregada é enviada para o sistema de reatores a membranas (MBR), sistema biológico da nova estação de tratamento.

Contudo, o sistema novo não consegue atender sozinho à vazão proveniente do tanque “dreneiro”, sendo enviada 10% desta para o sistema de lodos ativados. Adicionalmente, parte do efluente contaminado (55 % da vazão) foi direcionada para o MBR, de forma a garantir vazão constante na estação e consequente estabilidade.

Com essa configuração, a ETEI antiga passou a tratar 45% das vazões das canaletas de água contaminada (CACs) e canaletas de água oleosa (CAOs).

O fluxograma a seguir (vide Figura 11) mostra as etapas do tratamento de efluente na refinaria com a unidade que opera com Lodos Ativados e com MBR.

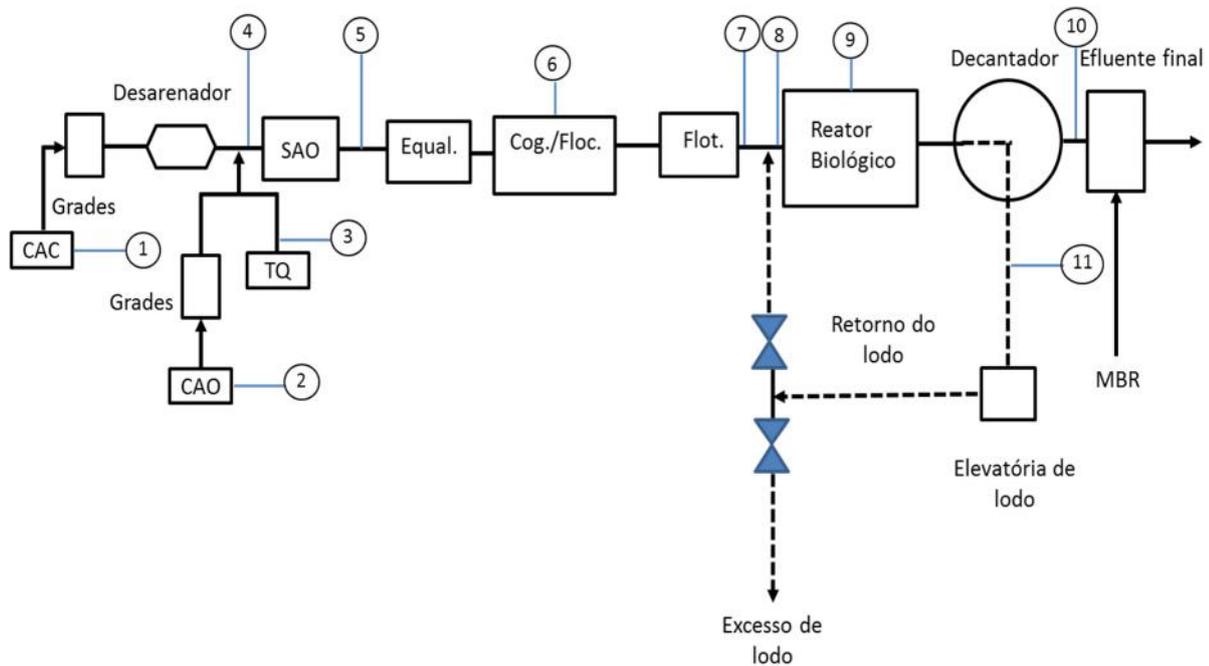
**Figura 11 - Etapas do tratamento de efluentes na refinaria.**



Fonte: O autor, 2104.

Este trabalho focará apenas na avaliação da confiabilidade da unidade que opera com lodos ativados, conforme fluxograma simplificado na Figura 12:

**Figura 12 - Esquema simplificado do tratamento de efluentes.**



Fonte: O autor, 2014.

A codificação utilizada corresponde ao esquema da Figura 12.

- Pontos 1, 2 e 3 – afluente à ETEI: os pontos 1 e 2 caracterizam o efluente coletado no sistema de drenagem distribuído por toda área da refinaria, exceto drenagem pluvial. Estes pontos somado ao ponto 3, proveniente do tanque “dreneiro”, representam todo efluente contribuinte à ETEI.
- Ponto 4 – afluente ao SAO: o efluente está isento de material grosseiro e de areia e em condições favoráveis aos sistemas a jusante, porém com elevadores teores de óleo, DBO e DQO.
- Ponto 5 – saída do SAO: o efluente apresenta baixos valores de O&G e alguma redução nas concentrações de DBO e DQO.
- Ponto 6 – bacias de coagulação/floculação: caracteriza-se pelo acréscimo de produtos químicos, no sentido de viabilizar a clarificação do efluente.
- Ponto 7 – saída do flotador: efluente clarificado, com considerável redução de sólidos, DBO, DQO e óleos emulsionados.

- Ponto 8 – entrada no biológico: é a combinação do efluente do flotador e do lodo de recirculação.
- Ponto 9 – reator biológico: representa um dos pontos mais importantes para determinação de índices e parâmetros necessários para avaliação de desempenho do processo.
- Ponto 10 – saída do decantador: representa o desempenho total do processo representado no fluxograma da figura 12.
- Ponto 11 – lodo da bacia de reciclo: massa de substâncias semi-sólidas provenientes do decantador. Este lodo é recirculado ao reator biológico.
- CAC – Canaleta de água contaminada.
- CAO – Canaleta de água oleosa.
- TQ – Tanque “dreneiro”.
- MBR – reatores com membranas.

#### 9.2.1 Unidades da ETEI e frequência de amostragem

A Tabela 9 apresenta as unidades que compõe a ETEI e as subseções seguintes descrevem os principais parâmetros químicos amostrados para controle do processo. Estes parâmetros servem de subsídio para avaliar a eficiência da unidade, quando comparados com as metas de qualidade definidos pela empresa, através do Indicador de Efluentes Hídricos (IEH) – meta mais restritiva que valores da legislação ambiental vigente estabelecida pela própria indústria.

A operação da refinaria é realizada por turno, num total de 03 (três), sendo as amostras coletadas diariamente.

**Tabela 9 - Dados de projeto da ETEI**

Unidade	Dados
Grade	Limpeza manual
Caixa de Areia	Retangular
Equalizador	Misturadores submersos
Flotador	Número de unidades: 02 02 raspadores de superfície e fundo 03 bombas de reciclo de água 02 bacias de sucção das bombas 02 vasos de pressurização 02 misturadores estáticos com chicanas
Separador água-óleo	Número de unidades: 02; Grades, rolos, flautas e ponte móvel com raspadores de superfície e de fundo 02 bombas centrífugas para bombear óleo coletado para tanque de armazenamento
Reator biológico	Número de unidades: 04 Formato: retangular Volume: 4.400 m <sup>3</sup> Aeração: 08 aeradores mecânicos de superfície, 08 sopradores e injeção de oxigênio puro Vazão média: 400 m <sup>3</sup> /h
Decantador secundário	Número de unidades: 02 Formato: retangular tipo tubular Volume: 1.600 m <sup>3</sup>

Fonte: O autor, 2014.

### 9.2.1.1 Sistemas de drenagem, gradeamento e desarenação

Na CAC existe uma caixa de junção dos 02 (dois) canais existentes. Esses canais são utilizados alternadamente para possibilitar a sua limpeza e manutenção. Após a caixa de junção existe a caixa de desarenamento, onde deve ser feita a limpeza de grades.

As amostras na CAC e na CAO são feitas diariamente no último turno. Os parâmetros analisados são sulfeto, amônia e DQO.

### 9.2.1.2 Operação dos SAOs

Para evitar a emissão de gases de hidrocarbonetos para a atmosfera, as bacias que constituem o SAO possuem cobertura (enclausuramento dos gases) e sistema para lavagem dos mesmos. O SAO representa uma condição de espaço confinado e tal situação dificulta a detecção de possíveis problemas na unidade, quando da inspeção visual.

É instrução operacional que o efluente da saída do SAO seja monitorado no mínimo duas vezes por turno para a inspeção visual da qualidade da água e quantidade de óleo. As amostras laboratoriais são do tipo composta e são realizadas coletas em todos os turnos.

Os parâmetros para acompanhamento operacional da saída do SAO são os apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Parâmetros para acompanhamento operacional na saída do SAO**

Análise	Parâmetro (mg/L)	Frequência (vezes/semana)
DQO*	800	5
Cianeto	0,2	2
Amônia*	60	5
Fenol	30	3

\*Análise prioritária

Fonte: O autor, 2014.

### 9.2.1.3 Operação do sistema de equalização

Nesta unidade, o operador verifica principalmente a presença de odores e ocorrência de óleos, além da manutenção do funcionamento dos misturadores.

#### 9.2.1.4 Operação do sistema de coagulação/floculação

Há uma caixa de passagem, onde é verificada as condições do afluente à coagulação/floculação, como pH e óleo emulsionado. Assim, o efluente passa para uma câmara, na qual são adicionados coagulantes (sulfato férrico, cloreto férrico, tanino ou outro) e é efetivada a mistura rápida. Desta, passa para a câmara de mistura lenta para formação e crescimento de flocos.

O controle é feito através da verificação, a cada turno, dos seguintes parâmetros:

- Tamanho do floco (aproximadamente 2 mm de diâmetro);
- Temperatura do efluente em torno de 39 °C; e
- pH do efluente (7 a 9).

#### 9.2.1.5 Operação do Sistema de Flotação

Nesta unidade há uma bacia de sucção de bombas (caixa de passagem A), que recebe o efluente do flotador (isento de sólidos e óleo). O efluente da bacia de sucção das bombas além do reciclo para o sistema de flotação, também é direcionado para o tratamento biológico.

Após a caixa de passagem A, o efluente transborda para a caixa de passagem B. Esta bacia recebe o despejo sanitário e dosagem de um nutriente a base de fósforo.

O efluente da caixa de passagem B é direcionado para caixas distribuidoras, onde é efetuada a mistura com o lodo biológico proveniente do canal de reciclo e posterior tratamento biológico.

Os parâmetros de controle prioritários para caixa de passagem A são os apresentados na

**Tabela 11.** As amostras são a cada turno.

**Tabela 11 - Acompanhamento operacional na caixa de passagem A**

Análise	Parâmetro (mg/L)	Frequência (vezes/semana)
DQO	<450	5
DBO	<250	2
O&G	<40	5

Fonte: O autor, 2014.

#### 9.2.1.6 Operação do Sistema Biológico

Trata-se de um sistema de lodos ativados com operação contínua na modalidade aeração prolongada com nitrificação, sendo a massa biológica continuamente recirculada dos decantadores finais, através de bombas.

As amostras coletadas no tanque de aeração são realizadas 03 vezes por semana, no último turno para os parâmetros SSTA, SSVTA, alcalinidade e amônia; e nos decantadores são coletadas amostras por turno, 05 vezes por semana para DQO e amônia. Também são feitas análises na bacia de reciclo do lodo, sendo amostrados SSTA e alcalinidade no último turno, 03 vezes por semana.

Ao final do tratamento, o efluente é encaminhado para uma bacia final (saída do biológico). Para esta são encaminhados os efluentes das duas ETEIs da refinaria e posterior descarte no corpo receptor.

Na Tabela 12 encontram-se os parâmetros analisados antes do lançamento no corpo receptor.

**Tabela 12 - Parâmetros analisados antes do descarte**

Análise	Parâmetro máximo	Unidade	Frequência (vezes/semana)
pH	5 - 9	-	Contínua
Temperatura	40	°C	Contínua
O&G	20	mg/L	2
SS	60	mg/L	1
DBO	60	mg/L	1
DQO	120	mg/L	1
Fenol	0,5	mg/L	2
Sulfetos	1	mg/L	2
Amônia	5	mg/L	2
Cianeto	0,1	mg/L	2
Chumbo	0,5	mg/L	Mensal

Fonte: O autor, 2014.

### 9.3 Metodologia de trabalho

#### 9.3.1 Coeficiente de confiabilidade

Para avaliação do desempenho da ETEI, em termos de tratabilidade, foi utilizada a metodologia proposta por Niku, Schroeder & Samaniego (1979).

Contudo, para sua adoção, fez-se premente a obtenção de uma amostra representativa de dados, relativa ao ano de 2012. Por existir grande quantidade de amostras, com coletas diárias, foram considerados no mínimo três meses de monitoramento contínuo.

Assim, conforme CETESB (1989), quando há quantidade de dados suficiente e qualidade satisfatória, poderá ser feito um tratamento estatístico dos dados, conforme objetivo almejado (quanto maior o número de amostras investigadas, melhor será o conhecimento da variabilidade).

Para tal, supõe-se uma distribuição normal da variável qualidade, amostras aleatórias e independentes e 90% de confiança para um grau de incerteza de, no máximo 13% em relação à meta prefixada para cada parâmetro da ETEI. Adotou-se, portanto, o fator *t Student* para (n-1) graus de liberdade, de modo a obter o número ideal de amostras.

Esse tratamento estatístico foi utilizado para minimizar os erros decorrentes do número de amostras ou problemas durante a coleta.

Foram considerados como metas prefixadas, os valores do IEH, mais restritivos que a legislação ambiental vigente. Na indefinição deste, utilizaram-se dados de projeto ou literatura.

### 9.3.2 Análise de Riscos Aplicada

Para a condução da FMECA, inicialmente, foram recolhidas todas as informações essenciais referentes à ETEI:

- Fluxogramas e diagramas de bloco dos processos;
- Manual de operação, de manutenção e de equipamentos;
- Relatórios de supervisão de turno;
- Relatórios de levantamento de campo;
- Registros de manutenção;
- Registros de problemas operacionais nos processos.

Com base nas informações dos principais problemas operacionais das etapas de tratamento de efluentes, obtidas em pesquisa bibliográfica e descritas nas Planilhas FMECA (seção 10), pode-se identificar, de forma geral, os principais modos potenciais de falha. Essa identificação também foi feita *in locu* e por meio de entrevistas com operadores e técnicos.

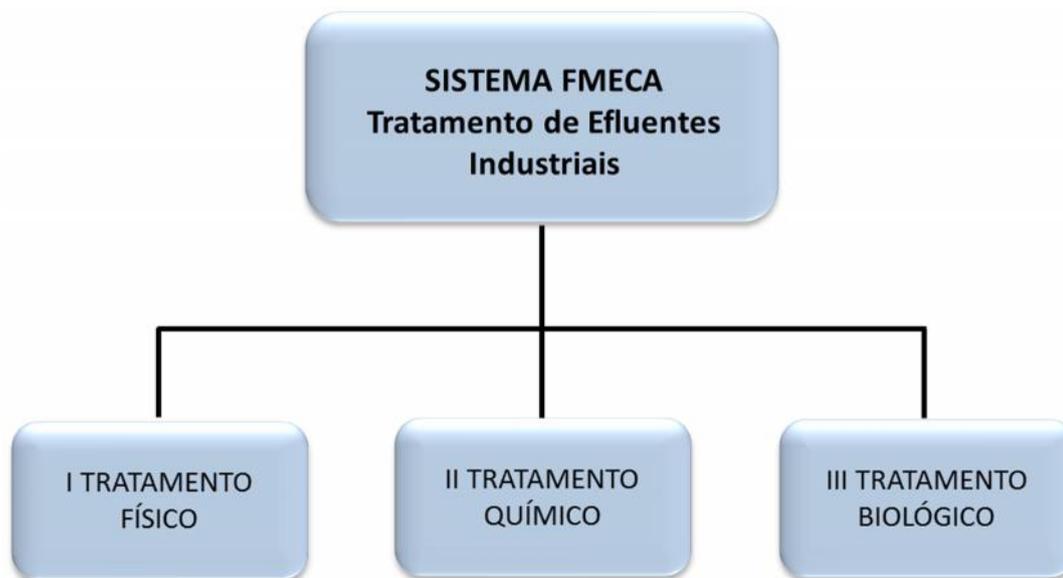
Para elaboração de um sistema para ETEI, o método obedeceu à seguinte estrutura básica:

1. Estruturar o sistema;
2. Definir funções de cada componente do sistema;
3. Identificar os modos potenciais de falha associados a cada função;
4. Identificar as causas potenciais;
5. Descrever os efeitos diretos nos outros componentes e no sistema;
6. Verificar o número e frequência de ocorrência dos principais modos de falhas levantados;
7. Levantar meios para detecção dos modos de falha ou suas causas e medidas para mitigação ou controle dos seus efeitos.

### 9.3.3 Etapas FMECA

O sistema foi subdividido em estruturas, de modo a facilitar a compreensão dos modos de falhas possíveis para os seus vários componentes. No contexto de uma ETEI, o sistema FMECA foi considerado com três sistemas principais: tratamento físico, químico e biológico (Figura 13):

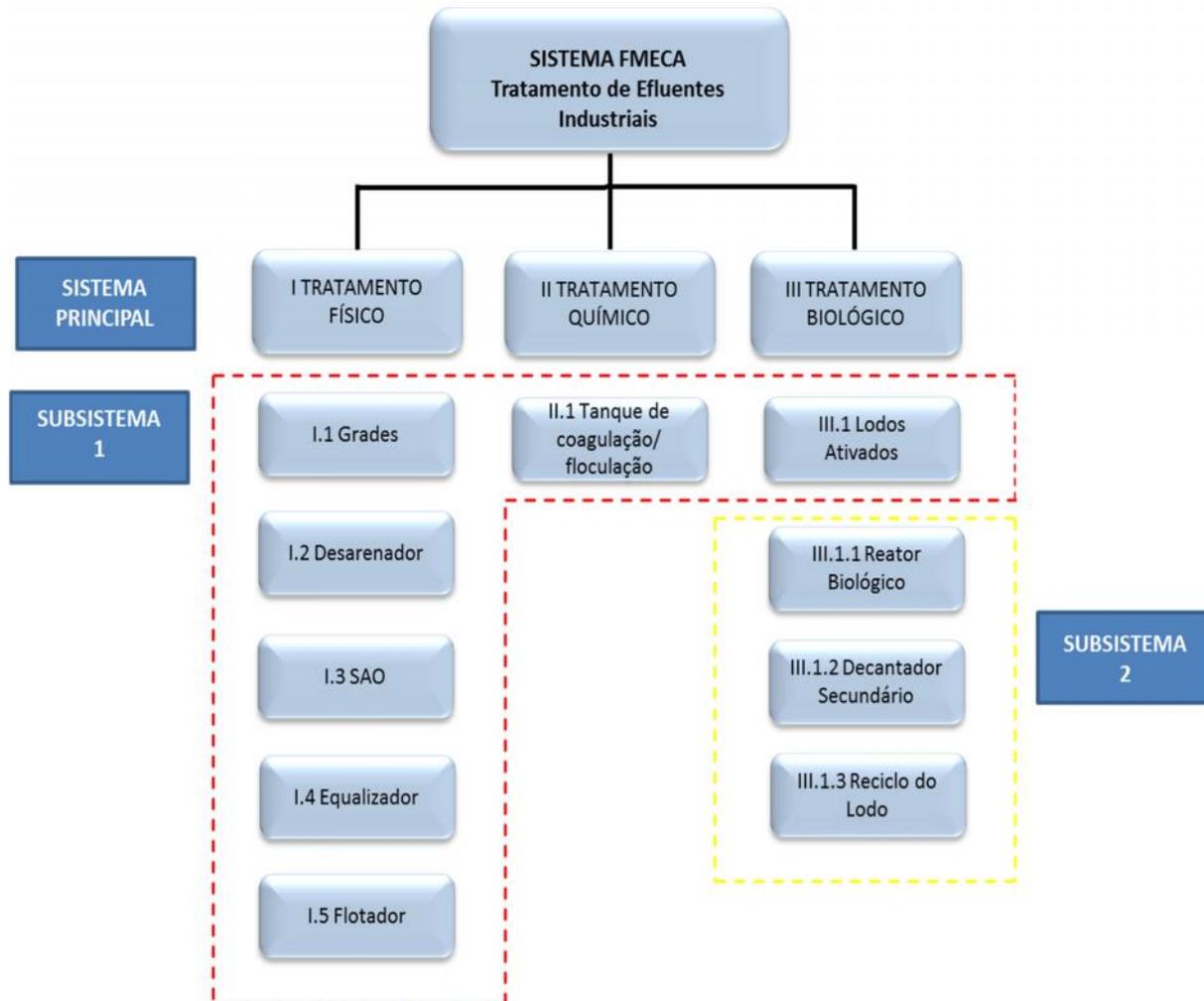
**Figura 13 - Sistemas principais da ETEI.**



Fonte: O autor, 2014.

Para facilitar a identificação dos sistemas principais e subsistemas, foi adotado um código numérico: cada sistema principal possui uma numeração romana e o subsistema é identificado com acréscimo de um algarismo arábico, separado por ponto, e assim por diante (Figura 14).

**Figura 14 - Sistema e subsistemas da ETEI.**



Fonte: O autor, 2014.

As funções de cada subsistema, alguns modos de falhas, causas, efeitos e formas de mitigação ou eliminação dos modos de falha foram levantados na bibliografia; outros modos de falhas, causas e efeitos foram identificados no Padrão de Operação da ETEI, elaborado pela equipe responsável pelo seu gerenciamento.

Para identificação de formas de detecção e tratamento de riscos, foi aplicada uma *check list* (Anexo I) direcionada aos operadores, com vistas a preencher os campos detecção e ações corretivas/preventivas da planilha FMECA. Algumas medidas de controle também estavam descritas no Padrão de Operação da ETEI.

Para mensurar o índice de ocorrência foram analisados os relatórios de supervisão e resultados de laboratório, disponível em programa específico.

## 10 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 10.1 Coeficiente de confiabilidade

Os coeficientes de confiabilidade foram definidos para as unidades e poluentes apresentados na Tabela 13.

Como não houve acesso aos dados de O&G na entrada do SAO, optou-se por não incluí-lo na análise, uma vez que sua principal função é a remoção desse parâmetro.

A determinação das metas de concentração adotadas se deu da seguinte maneira:

A ETEI é muito antiga e a refinaria não dispõe mais dados do projeto original, portanto, foram considerados valores encontrados na instrução operacional da estação definidos para o flutador: concentrações de DQO e O&G inferiores a 450 e 40 mg/L respectivamente.

É importante ressaltar que os valores presentes na instrução operacional são baseados na experiência da operação, representado o máximo aceitável. Nesse caso, a meta da operação é não ultrapassar este valor crítico.

Para o sistema de lodos ativados, foram considerados como metas os valores de IEH.

O resumo da análise estatística aplicada às unidades analisadas encontra-se na Tabela 14.

**Tabela 13 - Dados básicos e eficiência dos tratamentos**

Unidade	Flotador		Lodo Ativado	
	DQO	O&G	NH <sub>3</sub>	DQO
Concentração média afluente (mg/L)	596	58	27	451
Concentração média efluente (mg/L)	467	46	1,4	81
Eficiência de remoção (%)	-	20,7	94,8	-
Eficiência de redução (%)	21,6	-	-	82,0

Fonte: O autor, 2014.

**Tabela 14 - Dados básicos e confiabilidade dos tratamentos**

Unidade	Flotador		Lodo Ativado	
	DQO	O&G	NH <sub>3</sub>	DQO
Meta de concentração adotada (mg/L)	450	40	5,0	120
Concentração média efluente (mg/L)	467	46	1,4	81
Desvio padrão (mg/L)	195	36,6	4,1	67,5
Coefficiente de variação (CV) – (%)	42	80	294	84
Valor (Z <sub>1-</sub> )	0,235	0,159	1,673	0,902
Confiabilidade (%)	59	56	95	82
Intervalo de confiança da amostra (%)	90	90	90	90
Erro admitido (mg/L)	18	5	0,5	10
Nº de amostras necessárias	317	145	182	123
Nº de dados	321	218	693	152

Fonte: O autor, 2014.

Pela análise das tabelas acima, podem-se fazer as seguintes observações:

- No que diz respeito à confiabilidade do processo biológico, este se mostra coerente com as metas de concentração adotadas. Contudo, não se mostra coerente quando considerada a variabilidade das amostras para os parâmetros analisados, principalmente  $\text{NH}_3$ , uma vez que quanto maior o CV, menor a precisão dos dados;
- Ainda sobre o tópico acima, é o valor do CV para  $\text{NH}_3$  está muito alto (há muitas variações na concentração desse composto no efluente). Assim, é importante que durante a elaboração de projetos, seja considerada a variabilidade para definição da meta de eficiência, de forma que ela possa ser alcançada durante a operação
- O flotador apresenta confiabilidade acima de 50% para os parâmetros analisados. No entanto, os valores considerados como meta são inferiores aos dados fornecidos por literatura, a qual considera o valor mínimo de remoção de DQO de 30% e para O&G 20 mg/L.  
A confiabilidade baixa para O&G pode ser devido a má coagulação, deficiência na limpeza de borra do fundo e má saturação dos vasos de pressão. Porém, apenas os dados da tabela acima não são suficientes para tais suposições.

## 10.2 Análise de Risco Aplicada

A operação da refinaria é realizada por turno, num total de 03 (três), sendo as amostras coletadas diariamente pelo operador, além de algumas unidades possuírem analisadores *online*. O número de amostras ao longo do período investigado é, portanto, bastante elevado, dando consistência às análises efetuadas no presente trabalho.

A forma de detecção de possíveis modos de falha nas unidades é através de inspeção visual e utilização de automação, como o Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD), que é muito utilizado no controle de processos industriais. O SDCD é conectado a sensores e atuadores e usam controle por *set point* para

controlar o fluxo de material através da planta. Com esta informação e com base na aplicação da *check list* (ANEXO I) foram obtidos os índices de detecção.

A estatística básica das variáveis analisadas para identificação do índice de ocorrência, no que diz respeito aos aspectos químicos, encontra-se abaixo. A numeração subsequente corresponde ao fluxograma de Figura 12.

**Tabela 15 - Estatística básica dos principais parâmetros operacionais da ETEI**

Componente do processo	Parâmetros	Nº de dados	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
CAC (1)	DQO (mg/L)	250	36	1.434	126,5	171,6
CAO (2)	DQO (mg/L)	306	371	3.400	855	451,3
CAO (2)	NH <sub>3</sub> (mg/L)	416	8,10	117	42,60	18,03
Saída do SAO (5)	DQO (mg/L)	259	207	1.880	594	252,51
Saída do SAO (5)	NH <sub>3</sub> (mg/L)	262	5,30	90,10	28,30	12,42
Tanque de floculação (6)	pH	94	4	10	6,8	0,66
Tanque de floculação (6)	Temperatura (°C)	94	29	40	34	2,56
Saída do flotador (7)	DQO (mg/L)	321	75	1.420	466,6	195,07
Saída do flotador (7)	O&G (mg/L)	218	5,1	304,5	45,72	36,55
Entrada do biológico (8)	DQO (mg/L)	475	132	1.366	451	232,21
Entrada do biológico (8)	DBO/DQO	129	0,10	0,93	0,43	0,16
Reatores biológicos (9)	SSVTA/SSTA	577	0,33	0,76	0,60	0,04
Reatores biológicos (9)	SSTA (mg/L)	577	1490	14.990	6.250	1.616
Reatores biológicos (9)	OD (mg/L)	376	0	5	1,17	0,84
Reatores biológicos (9)	pH	367	6,06	7,81	6,88	0,27
Bacia de reciclo de lodo (11)	TLD (mL/L)	376	450	980	900	99,66

Fonte: O autor, 2014.

### 10.2.1 Índice de ocorrência

Para melhor visualização e interpretação dos dados estatísticos discriminados na Tabela 15, foram construídos histogramas de frequências para cada parâmetro químico. Para os modos de falhas, cujo aspecto é mecânico, foram analisados os relatórios de supervisão e registros de manutenção.

#### 10.2.1.1 Sistema de Drenagem

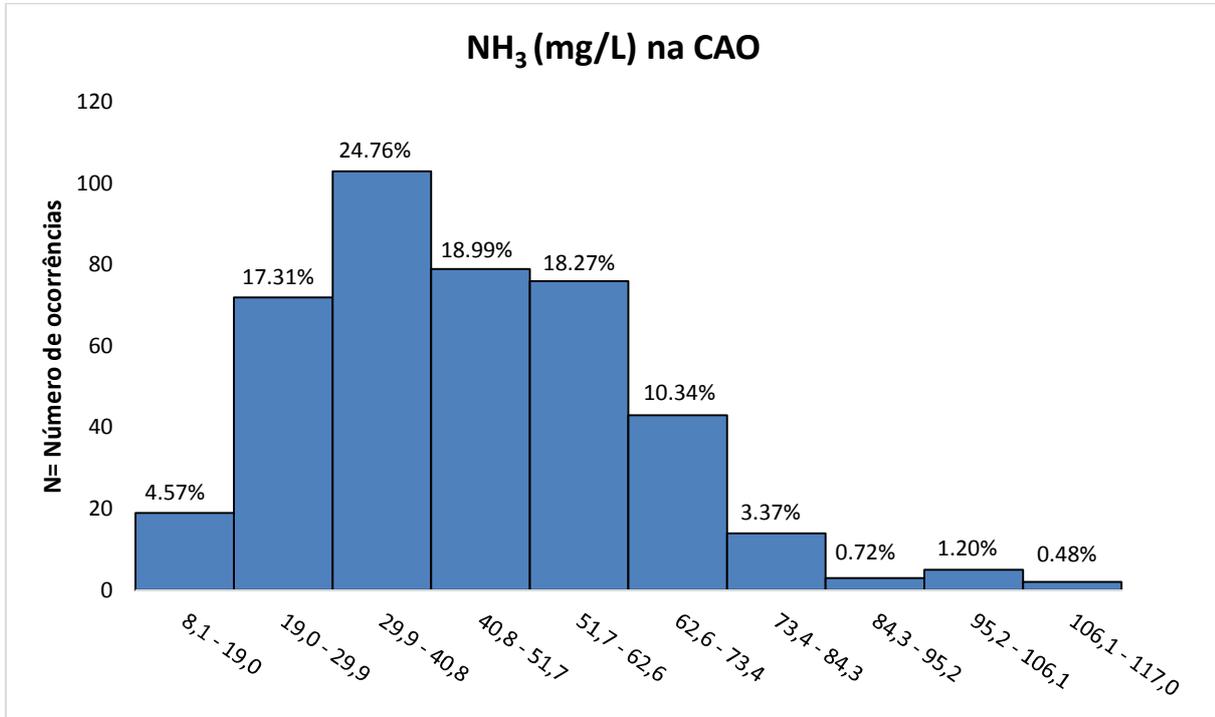
As Figura 15, Figura 16 e Figura 17 apresentam os histogramas de frequência de ocorrência de concentrações de  $\text{NH}_3$  e DQO na CAO e de DQO na CAC respectivamente: valores altos desses parâmetros indicam problemas operacionais com descarte para as canaletas de drenagem de produtos com alta concentração de poluentes.

Deve-se, nestes casos, desviar estas contribuições para as bacias de acumulação, de modo a não prejudicar o tratamento pela possível carga de choque (acima de 100 mg/L de  $\text{NH}_3$ ) afluente à ETEI.

A partir da Figura 15, nota-se que no período analisado foram poucas as ocorrências de valores acima de 100 mg/L, predominando valores entre 19,0 e 62,6 mg/L (62%). Esses valores apresentam-se baixos, pois as drenagens da salmoura (tanque “dreneiro”) são enviadas diretamente para o SAO, não sendo direcionadas para a CAO.

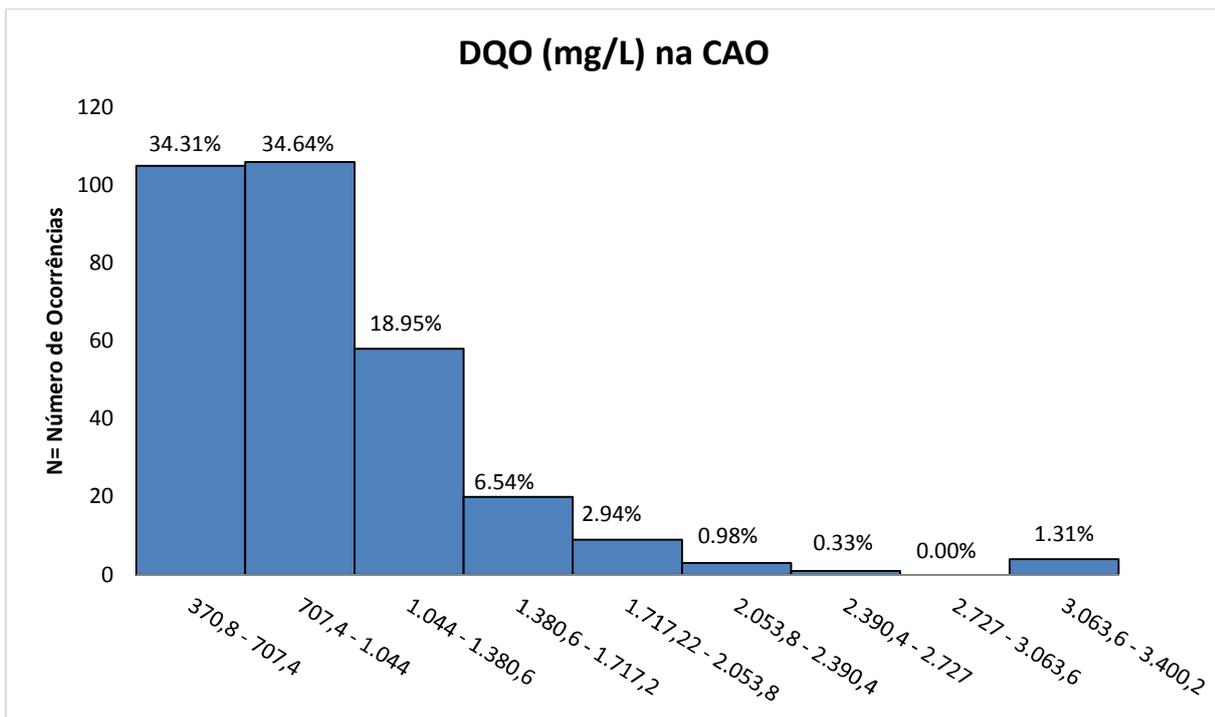
A Figura 16 indica que 87,9 % das amostras encontram-se no intervalo entre 370,8 a 1.380,6 mg/L de DQO na CAO. Valores muito altos, acima de 2.000 mg/L são esporádicos.

**Figura 15 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de NH<sub>3</sub> na CAO**



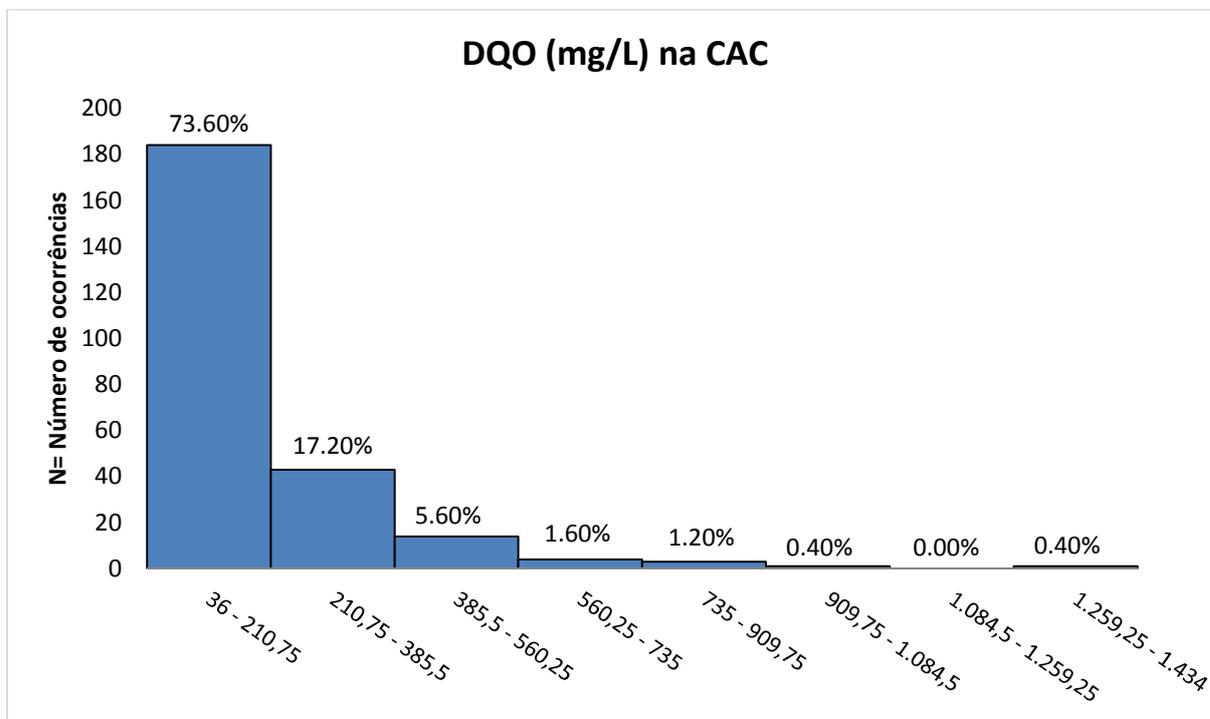
Fonte: O autor, 2014.

**Figura 16 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de DQO na CAO**



Fonte: O autor, 2014.

**Figura 17 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de DQO na CAC**



Fonte: O autor, 2014.

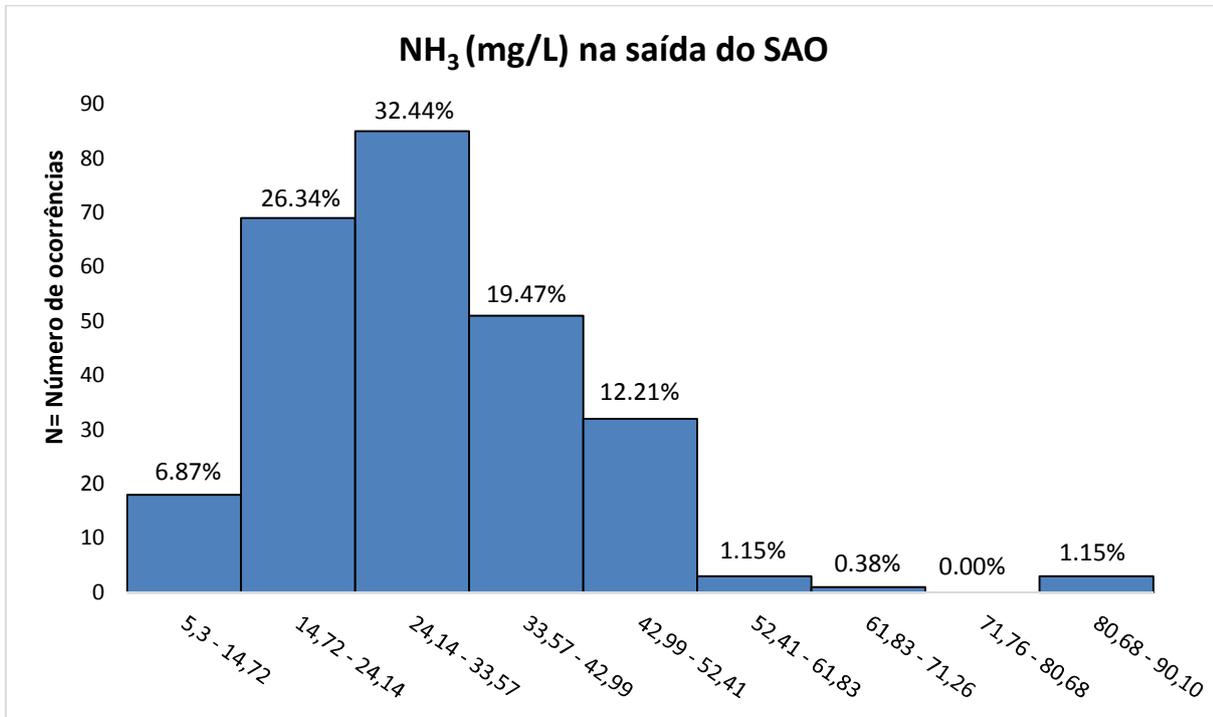
Na CAC, conforme Figura 17, 90% das concentrações de DQO estão entre 36 a 385,5 mg/L. Estes valores mais baixos em relação aos valores da CAO são em decorrência do recebimento apenas eventual de correntes oleosas.

Por predominarem valores de poluentes baixos, parte das contribuições da CAC é desviada para filtros casca de nozes da planta da ETEI nova para remoção de óleo livre e lançamento no corpo receptor.

#### 10.2.1.2 Separador Água-óleo

As Figura 18 e Figura 19 apresentam os histogramas das análises dos principais parâmetros de processo obtidas na saída do SAO.

**Figura 18 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de NH<sub>3</sub> na saída do SAO**

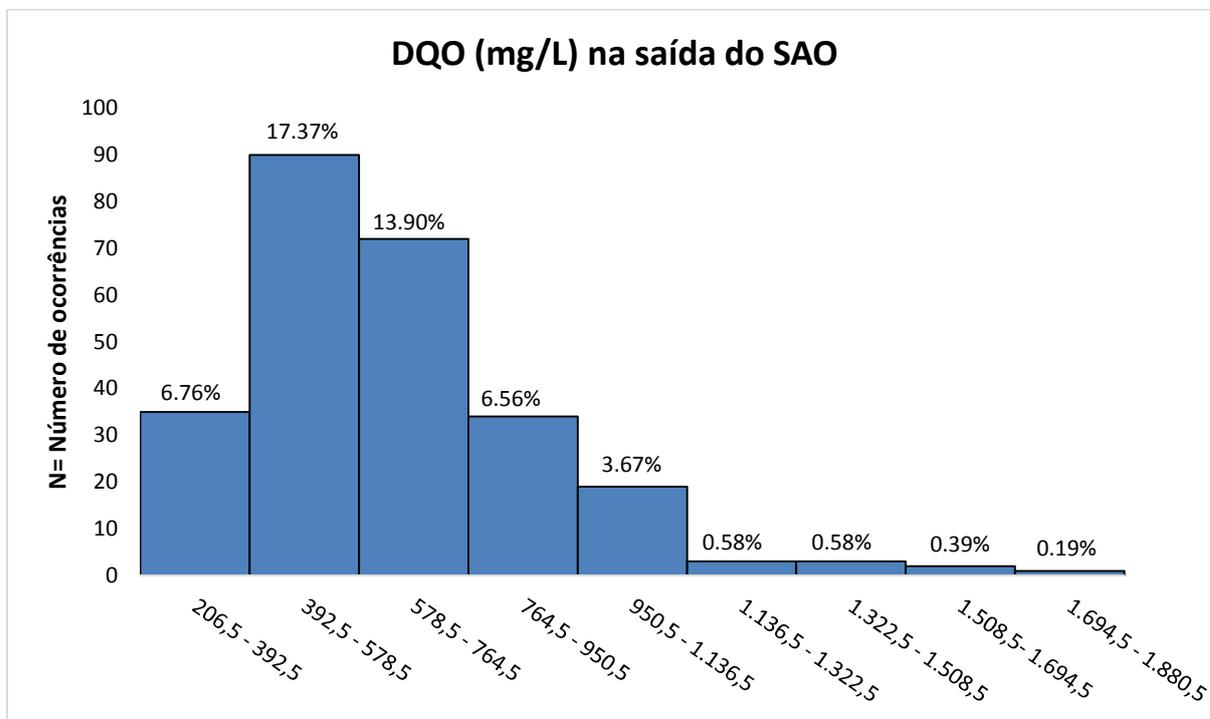


Fonte: O autor, 2014.

A figura acima, para o parâmetro amônia possui basicamente a mesma tendência apresentada na Figura 15 (CAO), uma vez que a amônia é proveniente das correntes oleosas. Como esse poluente só sofrerá degradação na etapa biológica, nesta fase do tratamento sofre poucas alterações, em sua maioria relacionadas aos acréscimos das correntes contaminadas e do tanque dreneiro.

Valores de NH<sub>3</sub> acima de 60 mg/L indicam a necessidade de redução da vazão para minimizar impactos nos demais sistemas. Logo, o histograma da Figura 18 mostra tendência à normalidade operacional.

**Figura 19 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de DQO na saída do SAO**



Fonte: O autor, 2014.

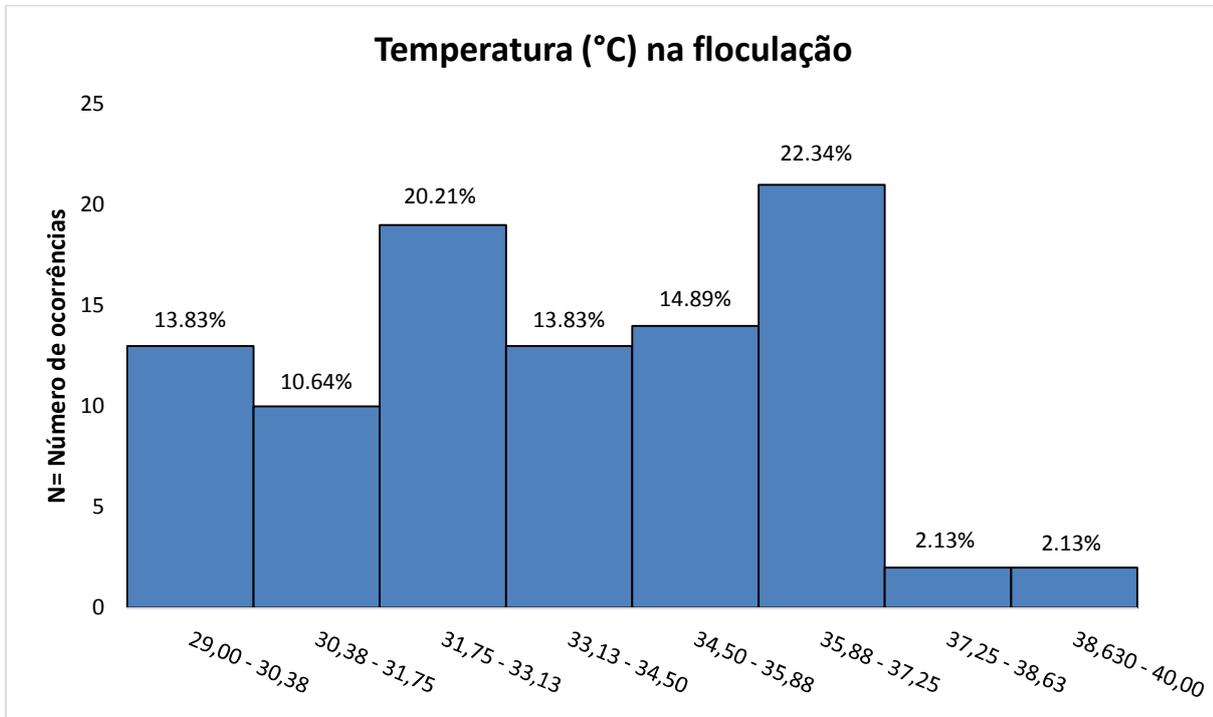
A observação da Figura 19 também sugere a mesma tendência do histograma de concentrações de DQO na CAO. Contudo, predominam valores mais baixos, já que o SAO, além de remover óleo livre, também atua na remoção de sólidos suspensos.

Para acompanhamento operacional na saída do SAO, valores acima de 800 mg/L são considerados críticos. Pela figura, representam aproximadamente 10% de ocorrência para o período analisado.

### 10.2.1.3 Coagulação/floculação

As bacias de floculação são monitoradas diariamente a cada turno. As ocorrências relativas aos parâmetros temperatura e pH encontram-se nas figuras a seguir:

**Figura 20 - Histograma de frequência relativa (%) de temperatura nas bacias de floculação**

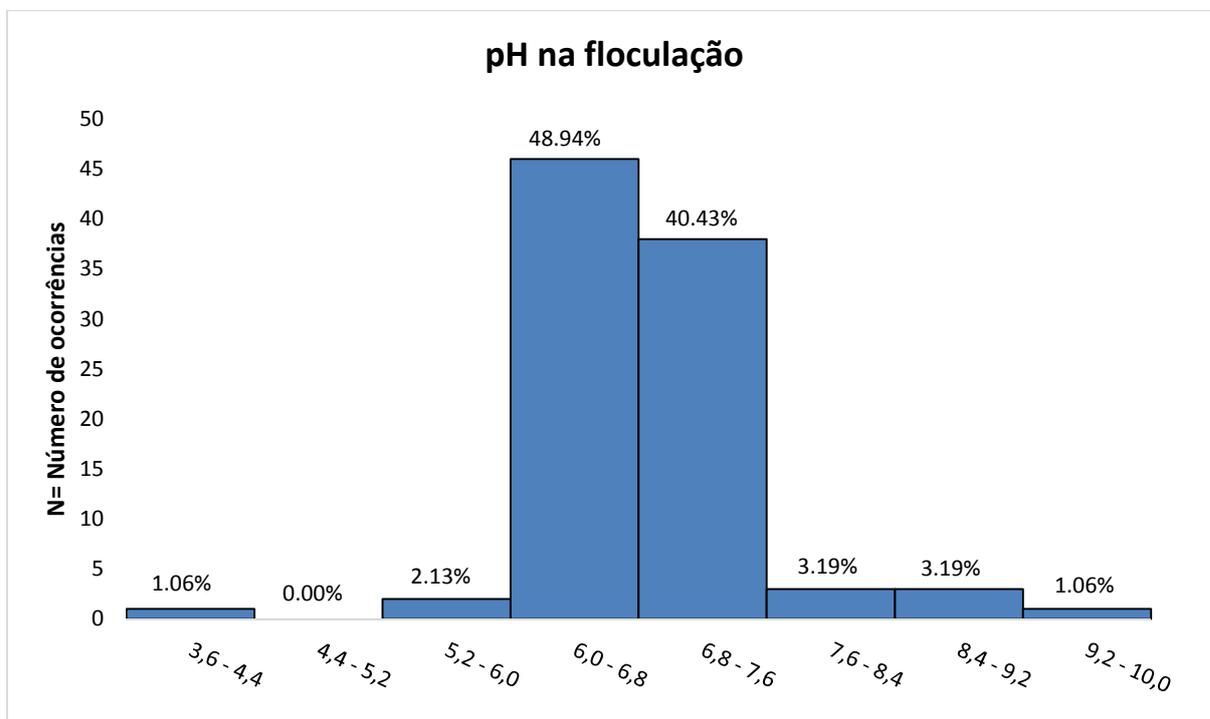


Fonte: O autor, 2014.

Nota-se que a ETEI não apresenta uma faixa predominante de temperatura, mas fica claro o esforço da operação em não ultrapassar o valor crítico de 39 °C, apresentando poucas ocorrências de valores acima deste máximo.

O histograma de pH, contudo, evidencia grande dificuldade de manutenção de valores na faixa ótima de 7 a 9, com aproximadamente 50% de ocorrência na faixa de 6 a 6,8.

**Figura 21 - Histograma de frequência relativa (%) de pH nas bacias de floculação**



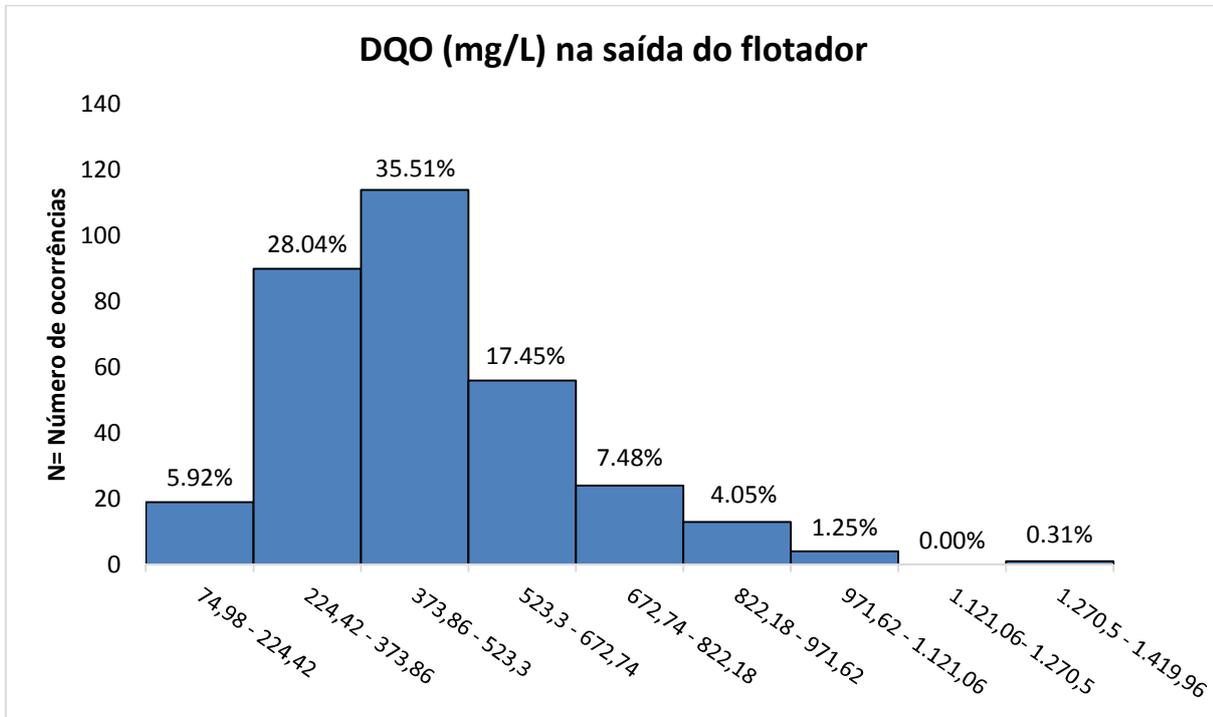
Fonte: O autor, 2014.

Tanto os valores de pH como de temperatura devem estar adequados para melhor atuação dos produtos químicos adicionados nesta etapa do tratamento, de modo a maximizar a clarificação do efluente.

#### 10.2.1.4 Flotador (Célula de flotação)

Avançando no tratamento, são monitorados, para melhor desempenho e controle operacional, os parâmetros DQO e O&G na saída do flotador, sendo considerados aceitáveis valores menores que 450 mg/L e 40 mg/L respectivamente.

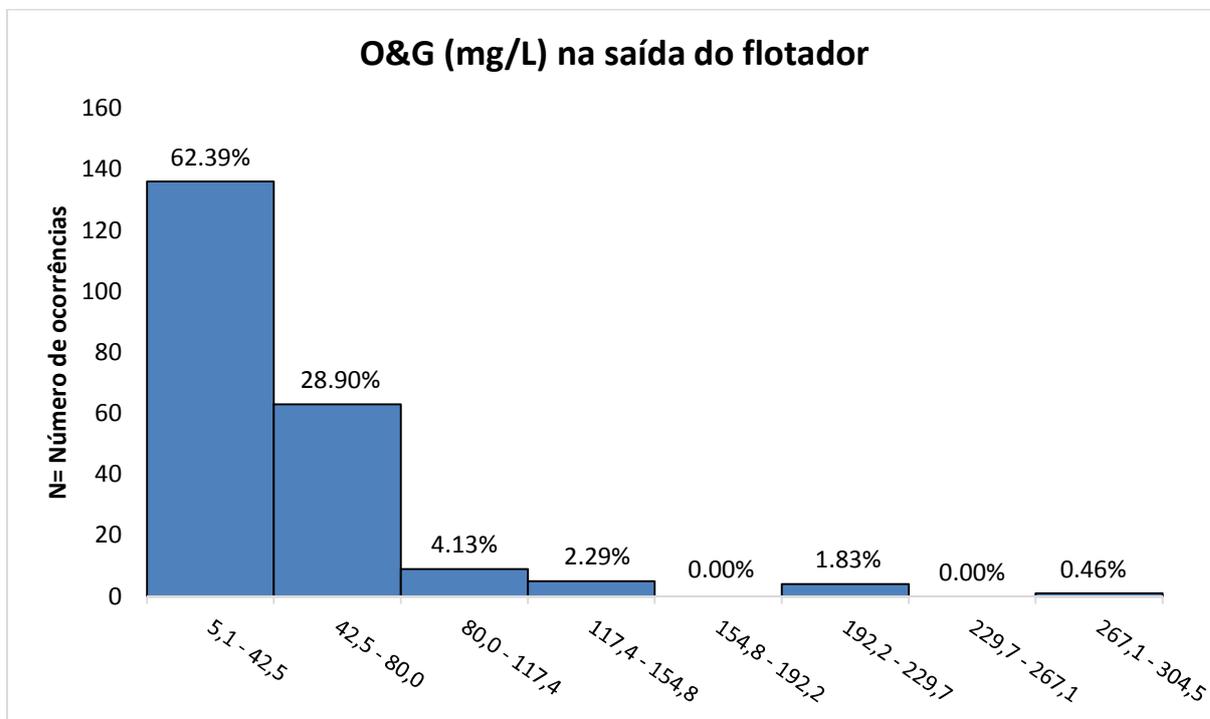
**Figura 22 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de DQO na saída do flotador**



Fonte: O autor, 2014.

Pela Figura 22, observa-se que há muitas ocorrências, cujos valores ultrapassam 450 mg/L de DQO na saída do flotador. De 321 análises laboratoriais, 171 ultrapassam tal valor, o que representa 50% do período analisado.

**Figura 23 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de O&G na saída do flotador.**



Fonte: O autor, 2014.

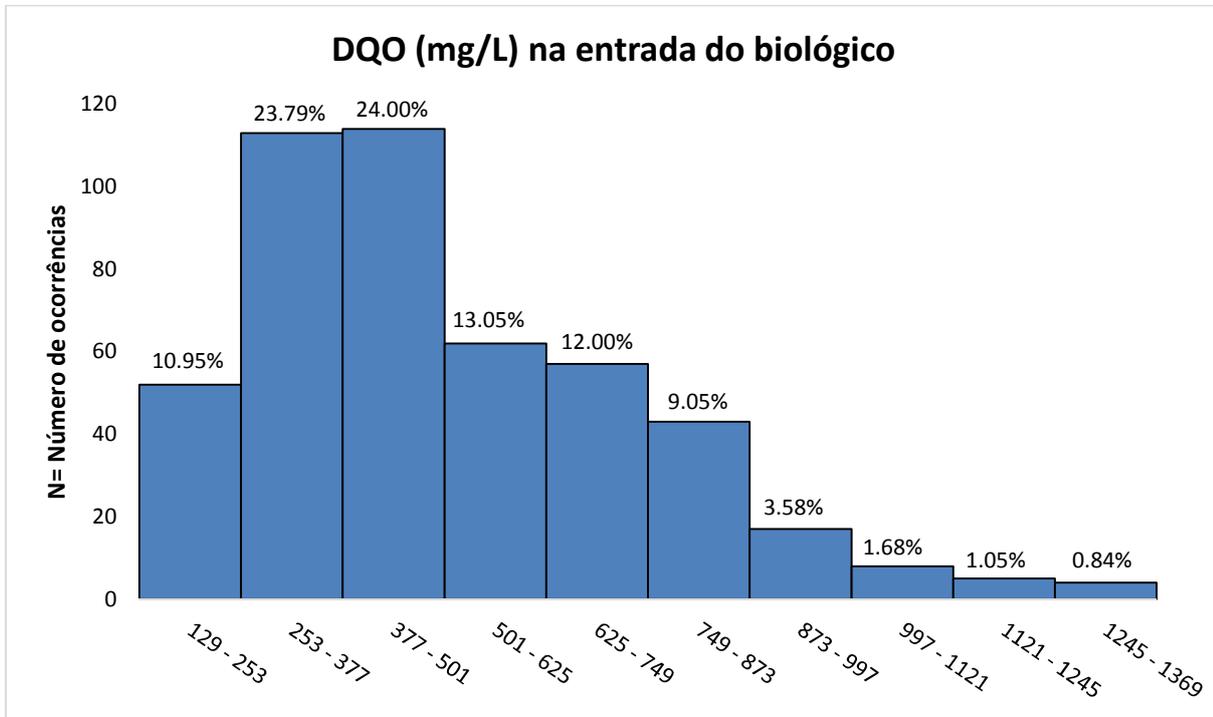
No que diz respeito aos resultados dos parâmetros de O&G, muito embora, haja predominância de valores abaixo de 40 mg/L (62,39%), em 37,61% do período analisado este valor é ultrapassado.

Esses resultados indicam que a floculação não está sendo efetiva. Os valores de pH fora da faixa ótima (7 a 9) corroboram com essa hipótese.

#### 10.2.1.5 Entrada do Tratamento Biológico

O histograma da Figura 24 mostra os valores de DQO na entrada do tratamento biológico.

**Figura 24 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de DQO na entrada do tratamento biológico.**

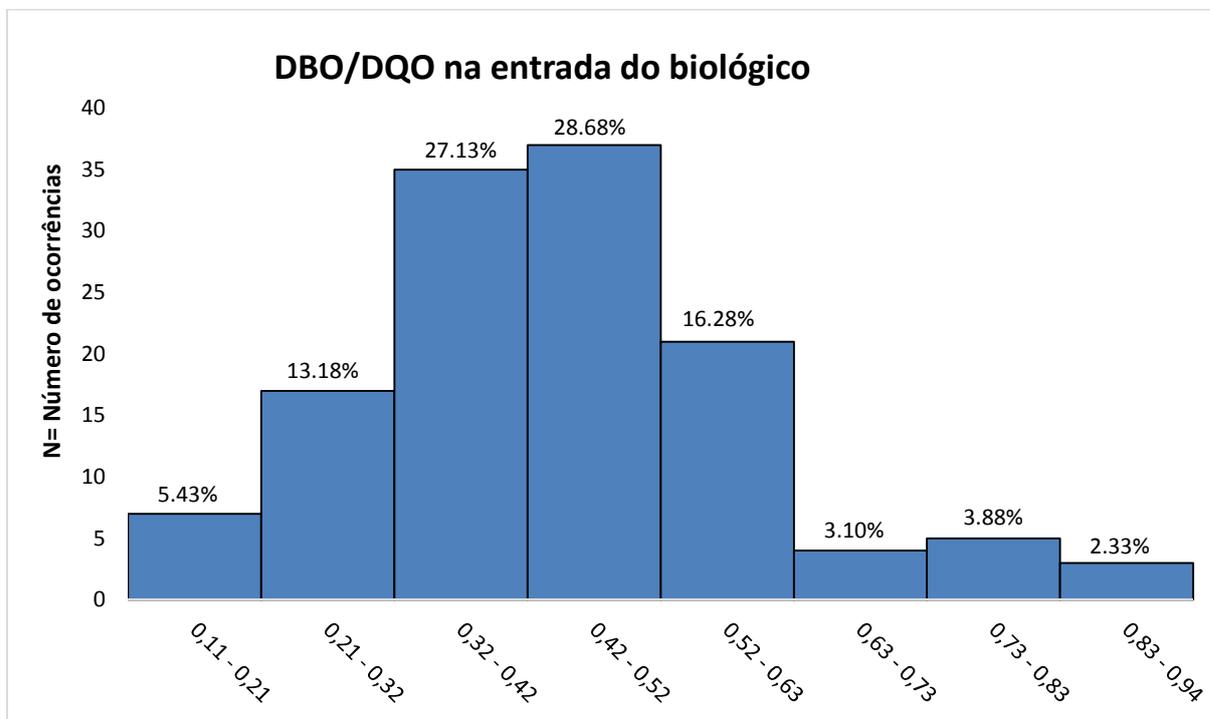


Fonte: O autor, 2014.

Predominam valores de DQO entre 253 a 501 mg/L. Contudo, valores até 873 mg/L são frequentes. Tais valores são justificáveis, pois de forma geral, efluentes de refino de petróleo apresentam baixos valores de DQO.

O histograma abaixo ilustra melhor as condições de biodegradabilidade do efluente analisado ao relacionar DBO e DQO.

**Figura 25 - Histograma de frequência relativa (%) da relação DBO/DQO na entrada do tratamento biológico**



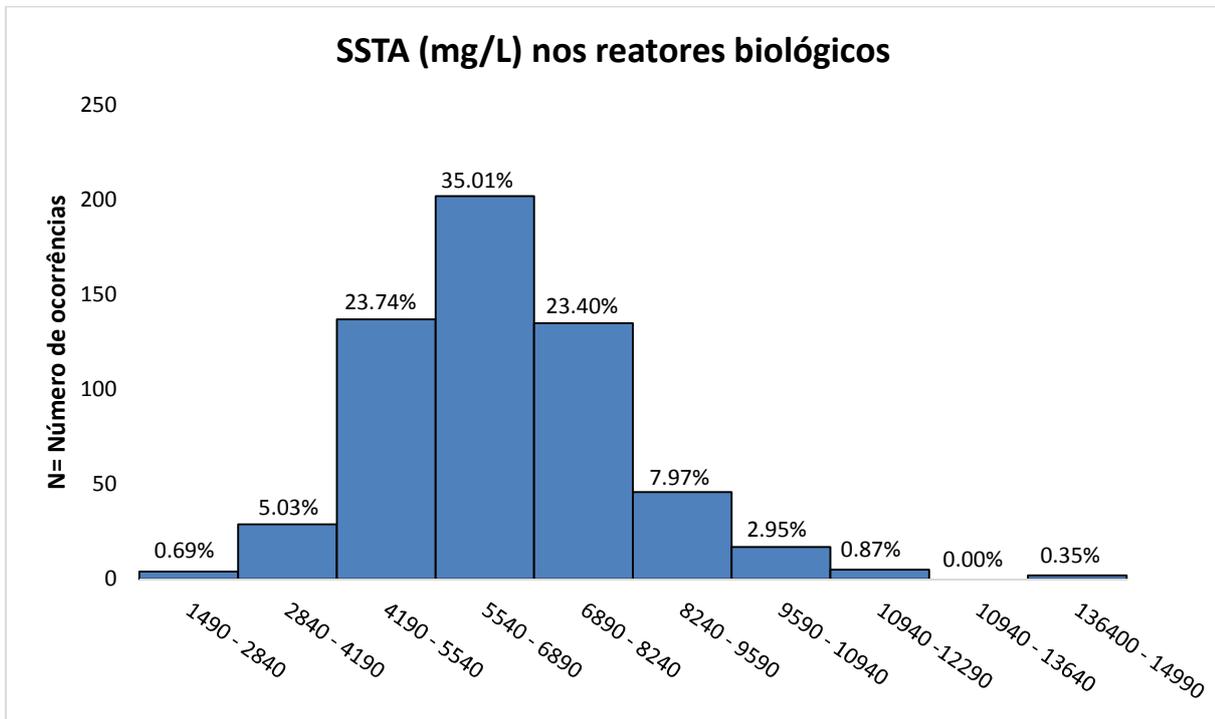
Fonte: O autor, 2014.

Este histograma apresenta mais valores desta relação próximos ao limiar inferior (74,42%), caracterizando um efluente com matéria orgânica de baixa degradabilidade e presença de compostos tóxicos ao microrganismo como, por exemplo, compostos fenólicos, sulfetos e cianetos.

#### 10.2.1.6 Reatores Biológicos

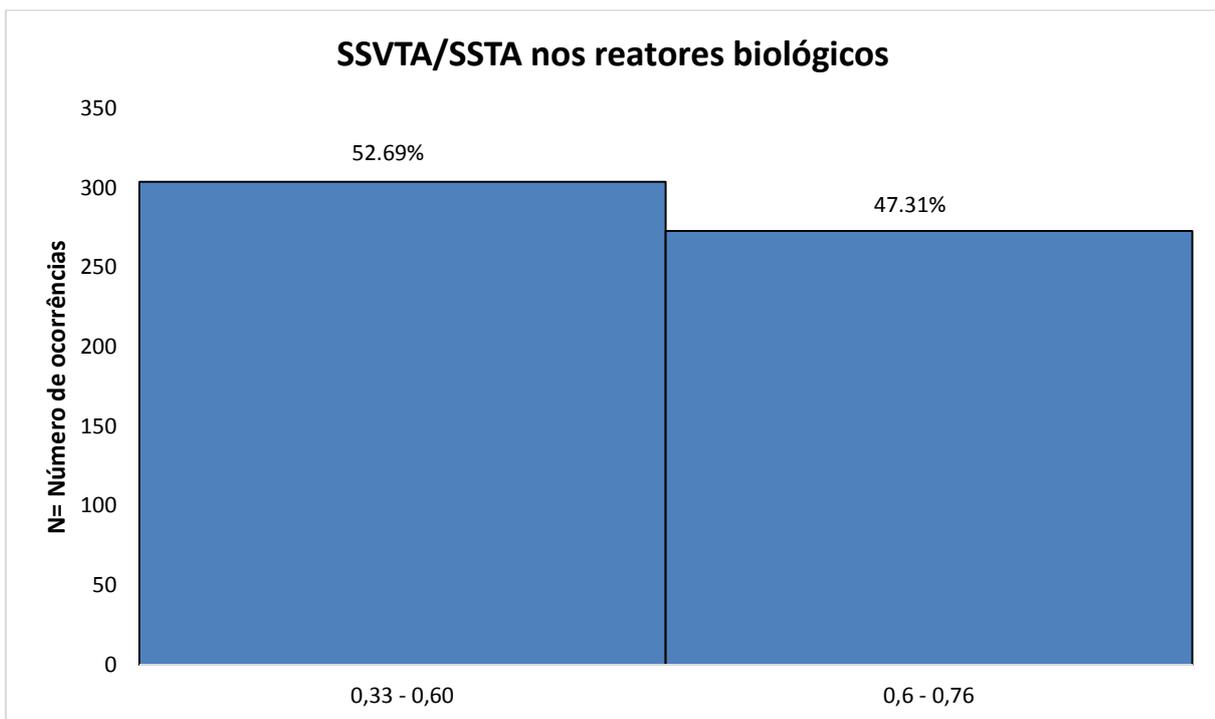
Para análise do tratamento biológico foram tomadas amostras nos reatores biológicos para SSTA, valores da relação SSVTA/SSTA, OD e pH, conforme seguem abaixo.

**Figura 26 - Histograma de frequência relativa (%) da concentração de SSTA nos reatores biológicos.**



Fonte: O autor, 2014.

**Figura 27 - Histograma de frequência relativa (%) da relação SSVTA/SSTA nos reatores biológicos**



Fonte: O autor, 2014.

Com a experiência prática da operação, concluiu-se que a faixa ótima de operação dos reatores biológicos para SSTA situa-se entre 3.500 a 5.000 mg/L.

Valores abaixo de 3.500 mg/L podem dificultar o enquadramento à legislação de DQO e  $\text{NH}_3$ . Valores maiores que 5.000 mg/L podem ser prejudiciais à transferência de oxigênio para a biomassa, além de provocar entupimento dos tubos dos decantadores.

Através da Figura 26, a segunda situação mostra-se crítica com frequências de ocorrências elevadas no período analisado. Tal fato ocorre, pois a refinaria tem limitação de descarte do lodo, uma vez que a centrífuga também recebe lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA).

A relação SSVTA/SSTA nos reatores biológicos, com valor médio de 0,60, é típica de aeração prolongada. Nessa modalidade, um dos objetivos é a maior estabilização do lodo.

Os histogramas de distribuição de frequência de OD e o pH nos reatores biológicos estão apresentados nas Figura 28 e Figura 29. A avaliação de ambos os histogramas, à primeira vista, indica que possivelmente não há nitrificação total, típica na modalidade de aeração prolongada.

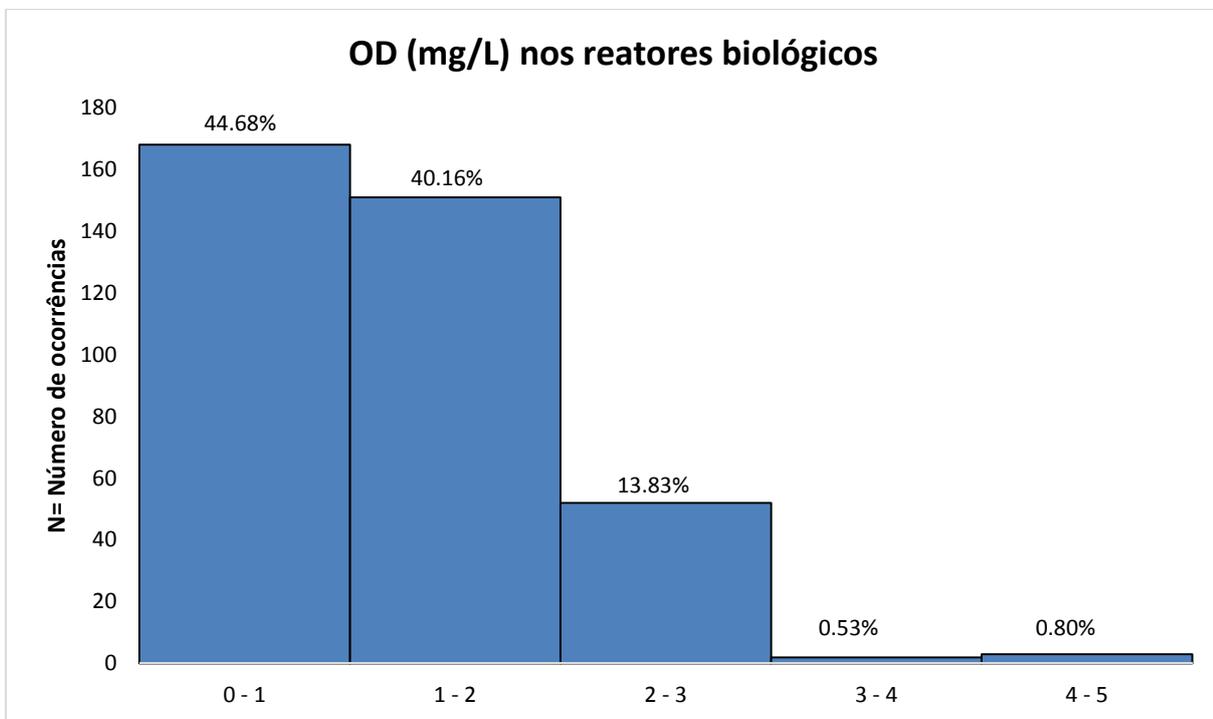
O padrão de operação para a ETEI recomenda a manutenção das concentrações de OD na faixa de 1 a 2 mg/L. Abaixo desse valor, a eficiência de degradação de matéria orgânica e inorgânica ( $\text{NH}_3$ ) pode ser prejudicada. A manutenção de valores acima de 2,0 mg/L, configura desperdício no consumo de oxigênio puro.

Cabe ressaltar, que mesmo valores mais baixos de oxigênio, na faixa até de 0,5 mg/L, não significa necessariamente, desenquadramento do efluente final em seus parâmetros legais, ou seja, a demanda do sistema em termos de oxigênio pode estar equiparada a capacidade de fornecimento, tornando-o, entretanto, mais vulnerável.

Há uma frequência relativamente elevada de valores de pH inferiores a 7 (44,41%), sendo recomendável a faixa de 7 a 8 para uma nitrificação eficiente.

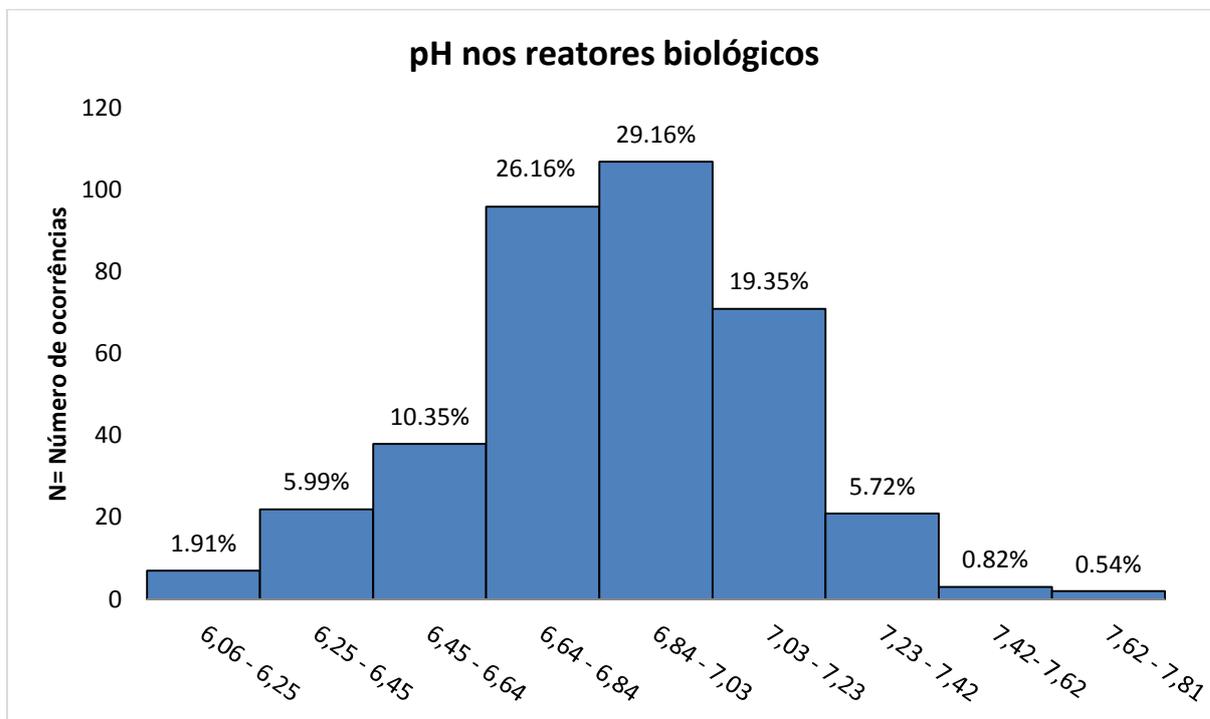
A nitrificação pode ocorrer com valores menores a estes citados, porém em taxas mais lentas e a influência mútua dos fatores limitantes (pH e OD) pode colaborar ainda mais para a baixa eficiência da nitrificação. Von Sperling & Lumbers (1989) apud Von Sperling & Fróes (1998) reconheceram em algumas modalidades de aeração prolongada na Inglaterra, como a principal causa de reduzida eficiência de nitrificação, os baixos valores de OD causados pela alta concentração de SSTA.

**Figura 28 - Histograma de frequência relativa (%) das concentrações de OD nos reatores biológicos.**



Fonte: O autor, 2014.

**Figura 29 - Histograma de frequência relativa (%) dos valores de pH nos reatores biológicos.**



Fonte: O autor, 2014.

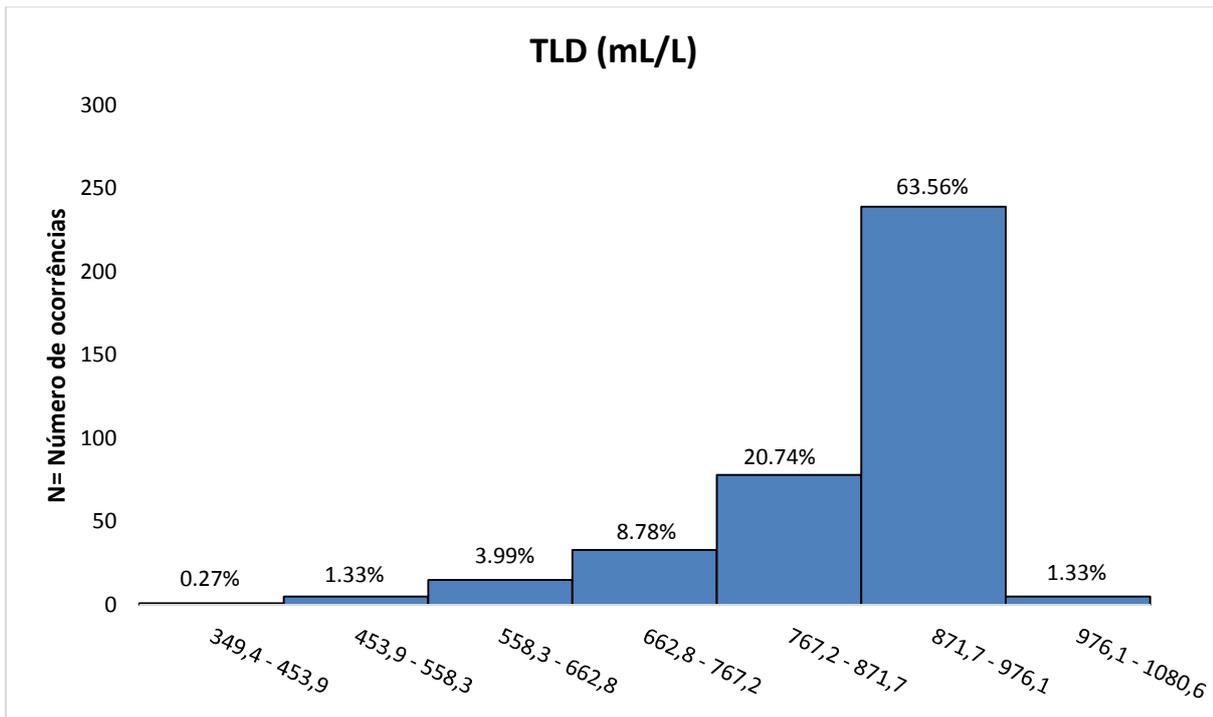
#### 10.2.1.7 Reciclo do Lodo

Por fim, são amostrados uma vez por turno o TLD, embora o IVL seja mais representativo, já que considera a massa do lodo (SSTA). Valores extremamente baixos (menores que 150 mL/L) ou altos (maiores que 800 mL/L), em geral, indicam problemas no tratamento. O IVL pode ser calculado, conforme equação abaixo:

$$IVL = \frac{TLD \cdot 1000}{SSVTA} \text{ (mL g)} \quad (17)$$

Esse parâmetro não é ajustado normalmente, principalmente quando o seu aumento é reflexo de cargas poluentes mais elevadas no sistema, sendo na verdade um indicador das condições de sedimentabilidade do lodo.

**Figura 30 - Histograma de frequência relativa (%) dos valores de TLD .**



Fonte: O autor, 2014.

A predominância de valores acima de 800 mL/L pode estar associada ao intumescimento do lodo. Esta característica pode ser notada *in locu*, com grande quantidade de lodo flotado nos decantadores.

### 10.2.2 Índice de criticidade

A partir da identificação das causas dos modos de falha associados a cada função do subsistema, foi possível avaliar a ocorrência (índice de ocorrência). Os efeitos dos modos de falhas permitiram a avaliação da severidade (índice de

severidade) e os controles e formas de detecção (índice de detecção) permitiram avaliar a detecção.

É importante mencionar que quando da avaliação de um índice, os demais não foram levados em consideração, pois a avaliação de cada índice é independente.

Com base nestes três índices, foi obtido o RPN, o qual simboliza o risco potencial de cada falha e tem com o objetivo priorizar as ações de trabalho para itens de maior risco calculado. Foi utilizada a classificação proposta por Pinto & Xavier (2001) – Tabela 2 da seção 4.

Assim, a partir da estrutura hierárquica proposta e apresentada na seção 9 foi estabelecida análise FMECA para cada etapa do tratamento de efluentes integrante da ETEI, consolidando-se os dados relativos às tabelas discriminadas abaixo por componente de processo.

Optou-se por uma abordagem específica, englobando e explicitando os principais modos de falhas da ETEI em análise, contudo, as tabelas a seguir podem ser adaptadas e associar elementos de análise de cunho geral, aplicáveis a quaisquer estações de tratamento, com emprego da metodologia em situações diversas.

Os principais riscos tecnológicos ou modo de falhas, suas causas, bem como soluções, de acordo com a literatura (AQUA ENGENHARIA, 2010; BOLZANI, 2011; JORDÃO; PESSOA, 2005; LUIZI, 2012; D'AVIGNON; LA ROVERE, 2002; VON SPERLING, 2005), estão detalhados abaixo.

Foram sistematizados os problemas relativos ao Sistema Principal, constituído por: Tratamento físico (I), Tratamento químico (II) e Tratamento biológico (III) com os seguintes subsistemas/modo de falhas associados:

- I.1 – *Grades*

O maior RPN está classificado como médio, relacionado ao bloqueio excessivo da grade, seguido de problemas como excesso de areia nas câmaras das grades (risco baixo), cuja maior influência se deve ao maior índice de detecção.

Todos os demais riscos inerentes aos modos de falha levantados para o componente em análise foram considerados baixos, pouco influenciando nas funções do item analisado, bem como no desempenho global da ETEI.

Como forma de evitar acúmulo de sólidos grosseiros, recomenda-se restringir a válvula que controla a vazão na CAC até a normalização da mesma, quando da rotina de limpeza.

**Quadro 3 - Planilha FMECA – Grades**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do Componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
I (Tratamento físico)	I.1 Grades	1. Proteção de dispositivos de transporte do efluente nas fases líquida e lodo, como bombas e tubulações; 2. Proteção de dispositivos inerentes ao tratamento, como raspadores, aeradores e filtros; 3. Proteção de corpos receptores, no que diz respeito ao aspecto estético; 4. Remoção de parte da carga poluidora, contribuindo para um melhor desempenho das unidades a jusante.	Existência de marcas de fricção metal com metal	Desgaste do material da grade (metal)	Grade mal posicionada	Monitoramento visual	2	3	2	12	Ajustar posição da grade Substituição de peças desgastadas
			Bloqueio excessivo das grades	Aumento do nível do canal a montante da grade e "pico" na vazão da ETEI durante a limpeza	Quantidade de detritos excessiva em relação ao previsto no projeto	Restrição da válvula de controle da vazão da CAC até a normalização da vazão	6	7	2	84	Determinar a origem do efluente que causa o problema e evitar sua descarga
			Excesso de areia na câmara das grades	Acúmulo de matéria orgânica	Velocidade de escoamento baixa (< 0,45 m/s para vazões mínimas)	Limpezas diárias	6	2	1	12	Manter controle atual
			Elevada perda de carga	Deslocamento de material já retido	Velocidade do efluente elevada	-	4	4	3	48	Aumentar a velocidade e a frequência de lavagem da câmara
						As grades são posicionadas de modo a acompanhar nível do canal	4	4	3	48	Ajustar velocidade (máxima 1,20 m/s)
						Limpezas diárias	4	3	2	24	Lançar jato de água com mangueira para retirar todos os detritos
		<b>Severidade</b>	<b>Ocorrência</b>		<b>Deteção</b>	<b>RPN</b>					
Marginal	1	Remota	1		Muito Grande	1-2	Faixa Azul (1 a 50)			Baixo	
Baixa	2-3	Pequena	2-3		Grande	3-4	Faixa verde (51 a 100)			Médio	
Moderada	3-4	Moderada	4-6		Moderada	5-6	Faixa Amarela (101 a 200)			Alto	
Alta	7-8	Alta	7-8		Pequena	7-8	Faixa Vermelha (201 a 1000)			Muito Alto	
Muito Alta	9-10	Muito Alta	9-10		Muito Pequena	9-10					

Fonte: O autor, 2014

- 1.2 – *Desarenador*

Todos os riscos levantados para essa etapa do tratamento foram considerados baixos, sendo o maior RPN associado ao arraste de areia no efluente, tendo poucos impactos no sistema como um todo, principalmente por ser um item presente apenas na CAC.

**Quadro 4 - Planilha FMECA – Desarenador**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do Componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
I (Tratamento físico)	I. 2 Desarenador	1. Evitar abrasão nos equipamentos e tubulações; 2. Evitar obstruções nas unidades da ETEI, como canalizações, poços de elevatórias, tanques, sifões, calhas, etc.; 3. Facilitar o manuseio e transporte da fase líquida e lodo, ao longo das unidades da ETEI; 4. Reter areia.	Baixa eficiência na remoção de areias	Prejuízos mecânicos nas unidades a jusante	Velocidade excessiva no canal	Ajuste da velocidade (controle calha Parshall)	4	4	2	3 2	Manter velocidade próxima a 0,3 m/s
					Frequência inadequada de limpeza	Limpezas diárias	4	3	1	1 2	Aumentar frequência e/ou velocidade do sistema de remoção de areia
			Excesso de matéria orgânica no material removido	Odores desagradáveis pela decomposição do lodo	Velocidades muito baixas ( 0,3 m/s), com tempo de retenção muito alto	Limpezas diárias e controle da velocidade	1	4	2	8	Lavar câmara com água e hipoclorito
											Diminuir número de câmaras usadas
											Aumentar a frequência de lavagem da câmara
			Arraste de areia no efluente	Impactos nas unidades a jusante (abrasão nos equipamentos e tubulações)	Velocidades muito altas (>0,3 m/s), com tempo de retenção muito baixo	Limpezas diárias e controle da velocidade	6	4	2	4 8	Remover com maior frequência a areia acumulada Aumentar a área da seção transversal da câmara
			Falha no raspador	Impactos nas unidades a jusante (abrasão nos equipamentos e tubulações)	Falta de energia elétrica	-	1	3	1	3	Acionar gerador
					Falha mecânica	Encaminha para manutenção	5	5	1	2 5	Troca dos equipamentos
<b>Severidade</b>		<b>Ocorrência</b>			<b>Deteção</b>			<b>RPN</b>			
Marginal	1	Remota	1	Muito Grande	1-2	Faixa Azul (1 a 50)		Baixo			
Baixa	2-3	Pequena	2-3	Grande	3-4	Faixa verde (51 a 100)		Médio			
Moderada	3-4	Moderada	4-6	Moderada	5-6	Faixa Amarela (101 a 200)		Alto			
Alta	7-8	Alta	7-8	Pequena	7-8	Faixa Vermelha (201 a 1000)		Muito Alto			
Muito Alta	9-10	Muito Alta	9-10	Muito Pequena	9-10						

Fonte: O autor, 2014.

- I.3 – SAO

Para evitar a emissão de gases de hidrocarbonetos para a atmosfera, as bacias que constituem o SAO possuem cobertura (enclausuramento dos gases) e sistema para lavagem dos mesmos. O SAO representa uma condição de espaço confinado e tal situação dificulta a detecção de possíveis problemas na unidade quando da inspeção visual, sendo que para quaisquer serviços nessa área devem ser verificadas as recomendações de segurança.

Apesar desta medida, ainda há constantes reclamações da vizinhança, em virtude do mau cheiro emanado pela vaporização excessiva de hidrocarbonetos, daí esse modo de falha ter sido classificado como moderado para o índice de severidade.

Predominam riscos classificados entre médio a alto, os quais se devem, na maioria, pelos altos índices de detecção que corroboram com o exposto acima, e não necessariamente por baixo desempenho do SAO.

**Quadro 5 - Planilha FMECA – SÃO**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito(s)	Causa(s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
I (Tratamento Físico)	I.3 SAO (Separador Água-óleo)	1. Evitar obstruções nas canalizações; 2. Evitar aderências em peças do sistema; 3. Evitar perturbações nos dispositivos de tratamento químico e biológico; 4. Evitar aspectos desagradáveis nos corpos receptores.	Passagem de óleo livre para unidades a jusante	Sobrecarga das unidades a jusante	Rolos desligados e/ ou com velocidade inadequada	Ajuste da velocidade	2	5	2	20	A velocidade deve ser regulada de acordo com a viscosidade do óleo
					Lâminas desgastadas	Solicitação de troca das lâminas	4	4	6	96	Troca das lâminas
					Obstrução da linha para descarte no tanque de acúmulo de óleo	Desobstrução da linha	4	5	3	60	Manter controle atual
					Flauta operando fora do nível de óleo	Ajuste das flautas	5	4	4	80	Manter controle atual
			Grande quantidade de borra no fundo	Baixa eficiência da unidade	Grade de barras para reter material grosseiro e corpos flutuantes na entrada do SAO suja	Limpeza das grades	4	6	4	96	Limpeza das grades
					Raspadores mecanizados de lodo de fundo defeituosos	Drenagem para bacia de acúmulo de borra ou uso de caminhão a vácuo	4	9	2	72	Manutenção de raspadores mecanizados Em caso extremo, liberar a bacia para remoção de borra
			Presença de óleo em grande quantidade	Impactos nos tratamentos químicos e biológico	Problemas na unidade de processo da refinaria	Atuar nas vazões dos canais impactantes, até que se normalize o sistema	9	6	2	108	Manter controle atual
			Lenta queda de vazão da ETDI	Transbordamento de uma das câmaras do SAO	Grades na entrada do SAO obstruídas	Limpeza diária	5	5	2	50	Aumentar frequência de limpeza

Continua

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
			Cavitação das bombas de óleo	Danos às bombas e interrupção do movimento do fluido	Filtros sujos	Operar em modo manual ou local (SDCD)					A velocidade deve ser regulada de acordo com a viscosidade do óleo
						Pressostato de sucção desliga a bomba com pressão de - 0,125 kgf/cm <sup>2</sup> ; Transmissor de nível: Liga/desliga a bomba conforme níveis (predefinidos) máximos mínimos respectivamente	6	7	2	84	Manutenção periódica dos instrumentos automáticos
			Vaporização excessiva de hidrocarbonetos	Não atendimentos a requisitos de saúde e higiene ocupacional; reclamação da vizinhança	Problemas nas flautas e raspadores	Enclausuramento do SAO por lonas plásticas	8	10	1	80	Prever sobressalentes
			<i>Severidade</i>		<i>Ocorrência</i>		<i>Deteção</i>		<i>RPN</i>		
			Marginal	1 Remota	1 Muito Grande	1-2	Faixa Azul (1 a 50)		Baixo		
			Baixa	2-3 Pequena	2-3 Grande	3-4	Faixa verde (51 a 100)		Médio		
			Moderada	3-4 Moderada	4-6 Moderada	5-6	Faixa Amarela (101 a 200)		Alto		
			Alta	7-8 Alta	7-8 Pequena	7-8	Faixa Vermelha (201 a 1000)		Muito Alto		
			Muito Alta	9-10 Muito Alta	9-10 Muito Pequena	9-10					

Fonte: O autor, 2014.

- 1.4 – *Equalizador*

O sistema de equalização está localizado antes do flotador. Assim é primordial a promoção de uma boa mistura para evitar deposição de lodo e uma boa aeração para evitar a formação de odores.

Por ser uma das unidades facilitadoras do tratamento biológico, quaisquer impactos nas suas funções irão afetar diretamente à atividade biológica com grande probabilidade de desenquadramento de parâmetros de descarte.

Um exemplo é o impacto no tratamento biológico causado pela baixa remoção de sulfetos no equalizador: a presença desse poluente produz intumescimento filamentososo do lodo, devido, principalmente, à presença da bactéria *Thiothrix*, que é químio-autotrófica, obtendo energia através da oxidação dos sulfetos.

Os valores mais elevados de RPN, portanto, se devem ao índice de severidade.

Uma boa prática da operação seria a verificação da cor na bacia para identificação de carga de choque, contudo, a medida emergencial para minimização de odores que consistiu na adição de “esferas plásticas” na superfície do equalizador, impede tal procedimento.

**Quadro 6 - Planilha FMECA – Equalizador**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
I (Tratamento Físico)	I. 4 Equalizador	1. Oxidação de sulfetos, mercaptans e amônia; 2. Estabilização química 3. Homogeneização da massa líquida, tornando uniformes pH, temperatura, turbidez, sólidos, DBO, DQO, etc.; 4. Regularizar vazões; 5. Proteger bombas para que não funcionem a seco; 6. Neutralização de efluentes.	Presença de incrustações	Geração de odores	Falta de limpeza das paredes e do fundo do equalizador	Limpezas periódicas	1	5	2	10	Limpezas periódicas por esguicho de água
			Misturadores (aeradores) não operam	Interferência das reações químicas a jusante	Indisponibilidade	Aciona manutenção	9	4	3	108	Trocar aeradores
			Forte odor na região	Reclamação da vizinhança	Carga de choque (NH <sub>3</sub> , DQO, H <sub>2</sub> S, etc.) devido a problemas no processo	Esferas plásticas adicionadas à superfície para dificultar a emanação de gases; Monitoramento do SAO e das CAC e CAO	9	6	2	108	Desligar aeradores e reduzir vazão da estação
					Desvio das torres para o efluente oleoso no sistema de água ácida		9	3	2	54	Segregar correntes responsáveis pela carga de choque para bacias de acumulação
Presença de óleo	Compromete os sistemas a jusante (floculação/flocação/biológico)	Falta de limpeza do SAO	Verificação de odor do efluente para detectar a ocorrência de cargas choque (alto teor de amônia, sulfeto e DQO)	9	5	2	90	Aumento da frequência de coleta de óleo no SAO			
<b>Severidade</b>			<b>Ocorrência</b>			<b>Deteção</b>			<b>RPN</b>		
Marginal	1	Remota	1	Muito Grande	1-2	Faixa Azul (1 a 50)			Baixo		
Baixa	2-3	Pequena	2-3	Grande	3-4	Faixa verde (51 a 100)			Médio		
Moderada	3-4	Moderada	4-6	Moderada	5-6	Faixa Amarela (101 a 200)			Alto		
Alta	7-8	Alta	7-8	Pequena	7-8	Faixa Vermelha (201 a 1000)			Muito Alto		
Muito Alta	9-10	Muito Alta	9-10	Muito Pequena	9-10						

Fonte: O autor, 2014.

- I.5 – Flotador

Os modos de falhas relativos ao flotador, em sua maioria, são devido à má coagulação e floculação, o que pode ser constatado pelo histograma da figura 21, onde em 50% do tempo o pH está fora da faixa ótima para floculação.

Os problemas relacionados à turbulência no interior do flotador também têm impacto na baixa eficiência de remoção de DQO e O&G, conforme histogramas das figuras 22 e 23 respectivamente.

Altas ocorrências de turbidez e óleo se devem às metas de concentração com valores muito altos, que não correspondem aos valores observados na literatura e também utilizados em projetos, o que pode sobrecarregar o flotador.

As metas inadequadas escolhidas pela refinaria acabam por mascarar a confiabilidade do tratamento e não condizem com a baixa eficiência de remoção dos parâmetros amostrados.

Uma alternativa seria não acrescentar produtos químicos, de forma a aproveitar a carga negativa da superfície de partículas de óleo e os valores de pH ácido ( $H^+$ ), reduzindo o potencial zeta e neutralizando as cargas.

**Quadro 7 - Planilha FMECA – Flotador**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários		
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices					
							S	O	D		R	
I (Tratamento físico)	1.5 Flotador	1. Separar os flocos formados pela coagulação e floculação; 2. Remoção de sólidos suspensos e óleos e graxas; 3. Clarificar efluentes; 4. Concentrar lodos.	Acúmulo de sólidos sedimentáveis no flotador	Entope difusores	Falta de limpeza do fundo e acúmulo dos sólidos flotados	Limpeza com caminhão vácuo	7	8	2	112	Manutenção e troca dos removedores de espuma e lodo	
			Turbulência no interior do flotador	Quebra de flocos e emulsão no efluente	Nível baixo nos vasos de pressurização	Atuar nas válvulas de controle de pressão e nível	5	5	3	75	Manter controle atual	
			Baixa eficiência das bombas de drenagem da lama e de reciclo	Acúmulo de lama e entupimento de difusores; e baixa pressão no sistema de reciclo	Filtros das sucções sujos	Limpeza dos filtros	6	6	2	72	Rodízio de bombas	
			Efluente com turbidez e óleo	Prejuízo ao tratamento biológico e inibição da atividade microbiana	Baixa eficiência das câmaras de mistura e do flotador	Dosar coagulante e floculante	9	8	2	144	Parar a dosagem de produtos químicos	
			Flotação ineficiente	Prejuízo ao tratamento biológico	Floculação ruim	Verificação visual e ajuste da dosagem de produtos químicos, de acordo com as condições de turbidez e vazão	6	6	2	72	Parar a dosagem de produtos químicos	
					Saturação com ar do efluente de reciclo "fora do ponto desejado"	Válvula controladora de nível e pressão	Atuar na válvula de controle de nível e pressão	4	5	3	60	Verificar dreno sob o vaso
						Injeção de ar de serviço suficiente, na entrada dos vasos de saturação, para manter a saturação de água						

Severidade	Ocorrência	Deteção	RPN
Marginal	1 Remota	1 Muito Grande	1-2 <b>Faixa Azul (1 a 50)</b>
Baixa	2-3 Pequena	2-3 Grande	3-4 <b>Faixa verde (51 a 100)</b>
Moderada	3-4 Moderada	4-6 Moderada	5-6 <b>Faixa Amarela (101 a 200)</b>
Alta	7-8 Alta	7-8 Pequena	7-8 <b>Faixa Vermelha (201 a 1000)</b>
Muito Alta	9-10 Muito Alta	9-10 Muito Pequena	9-10

Fonte: O autor, 2014.

## II.1 – Coagulação/floculação

Prevalecem RPNs baixos, em grande parte por influência da fácil detecção.

Os riscos mais altos são relativos à má formação de flocos, por dificuldades na manutenção de pH, dosagens inadequadas de produtos químicos, alta turbidez e coagulação má processada.

Todas as causas dos modos de falhas se devem, provavelmente, a não realização de *jar tests* para dosagem ideal de produtos.

**Quadro 8 - Planilha FMECA – Coagulação/floculação**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
II (Tratamento químico)	II.1 Tanque de Coagulação/floculação	1. Desestabilizar cargas negativas dos coloides e sólidos em suspensão; 2. Elevar o pH (mistura rápida); 3. Formação de flocos (mistura lenta)	Formação de grande massa de precipitado	Reversão dos sinais das cargas, restabilizando-as	Quantidade excessiva de coagulantes	Adição de polieletrólitos	5	4	2	40	Fazer <i>jar test</i> ou não adicionar químicos
			Má formação de flocos	Impactos nos tratamentos a jusante	Par de valores "concentração de coagulante x pH inapropriado"	Adição de químicos, conforme turbidez e vazão	8	10	1	80	Fazer <i>jar test</i> ou não adicionar químicos
					Mistura inadequada do coagulante	Adição de químicos, conforme turbidez e vazão	8	3	2	48	Aplicação da solução de coagulante no ponto de maior turbulência da hélice do agitador
			Avarias nas bombas dosadoras	Prejudica a remoção de sólidos	Presença de incrustações nas válvulas e diafragmas	Carga manual	3	6	1	18	Manutenção periódica Bombear solução de 5 % de ácido clorídrico industrial por 5 minutos aproximadamente
			Grande quantidade de óleo	Sobrecarga do flotador	Escape de óleo do SAO e/ou unidade de processo de refino	Desligar misturador do equalizador; acionar caminhão-vácuo para remover o óleo e identificar a fonte de óleo	6	6	1	36	Remover óleo
			Temperatura superior à especificada	Pior diluição dos produtos químicos (coagulante/floculante) e maior consumo	Mau desempenho da equalização	Ajuste no equalizador	6	2	1	12	Estabilizar temperatura abaixo de 39° C
			Consumo excessivo de floculante	Má formação de flocos	Alta turbidez	Adição de polímeros	6	6	1	36	Manter controle atual
					Coagulação má processada	Adição de polieletrólitos	6	8	1	48	Fazer <i>jar test</i>
<b>Severidade</b>			<b>Ocorrência</b>			<b>Deteccção</b>			<b>RPN</b>		
Marginal			1 Remota			1 Muito Grande			1-2 Faixa Azul (1 a 50) Baixo		
Baixa			2-3 Pequena			2-3 Grande			3-4 Faixa verde (51 a 100) Médio		
Moderada			3-4 Moderada			4-6 Moderada			5-6 Faixa Amarela (101 a 200) Alto		
Alta			7-8 Alta			7-8 Pequena			7-8 Faixa Vermelha (201 a 1000) Muito Alto		
Muito Alta			9-10 Muito Alta			9-10 Muito Pequena			9-10		

Fonte: O autor, 2014.

- III.1 – Lodos Ativados
  
- III.1.1 – Reator Biológico

Predominam valores de RPN considerados altos, sendo o maior valor concernente às elevadas cargas poluentes, principalmente DQO, afluyente ao tratamento biológico. Este RPN alto se deve pela severidade deste modo de falha, que a depender da carga tóxica poder inviabilizar todo o tratamento.

A falta de um tipo desejável de microrganismo e a manutenção de uma taxa adequada de oxigênio também apresenta a mesma causa descrita acima, sendo, portanto, o principal ponto de alerta.

Ainda sobre os microrganismos estes podem estar adaptados a baixos valores de pH, já que valores entre 6,45 e 6,47 representam 36,51 % da frequência. Mesmo assim, a estrutura dos flocos pode se destruir pela acidez liberada.

Os demais RPNs altos têm relação com as elevadas concentrações de SSTA, e neste caso, se devem ao alto índice de ocorrência.

No que diz respeito a este modo de falha, cabem ressaltar dois aspectos (VON SPERLING, 2002):

- A concentração de SSTA acima de um determinado limite exige decantadores de maiores dimensões para suportar grandes cargas de SS afluyente às mesmas.

A transferência de oxigênio a toda biomassa é dificultada na presença de valores elevados de SSTA.

As considerações acerca dos decantadores será feita no próximo tópico, já no tange ao segundo ponto, a injeção de oxigênio puro compensa possíveis deficiências na transferência de ar pelos aeradores.

Embora, o histograma da Figura 23 indique frequentes valores entre 0 e 1 mg/L, são poucas as ocorrências desses valores simultaneamente nos dois reatores.

Tais fatos podem explicar a elevada eficiência obtida no processo de nitrificação: elevada idade do lodo e quantidades adequadas de oxigênio.

**Quadro 9 - Planilha FMECA – Reator biológico**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
III.1(Lodos Ativados)	III.1.1 Reator biológico	1. Oxidação do carbono orgânico para fornecer energia para a síntese bacteriana; 2. Nitrificação; 3. Manter uma agitação completa no tanque de aeração; 4. Dispersão e incorporação de ar no meio líquido; 5. Evitar a sedimentação e manter os flocos em contato íntimo com os organismos presentes no meio; 6. Retirada de vários produtos voláteis de metabolismo; 7. Transferência de oxigênio atmosférico para o licor misto	Baixo O.D e/ou presença de odores sépticos no licor misto	Prejuízos à nitrificação e degradação orgânica; Perda da massa biológica com morte de microrganismos	Sub-aeração	Analísadores de oxigênio	9	4	1	36	Queda abaixo de 0,5 mg/L em 02 tanques: reduzir a vazão da ETDI
					Concentração de SSTA elevada	Atua na faixa de operação de SSTA	6	5	2	60	Ajustar SSTA para taxa adequada de A/M. Se A/M estiver adequada, aumentar a aeração no tanque
			Dificuldade para manter taxa de O.D. adequada	Sistema saindo do equilíbrio	Transferência de oxigênio ou agitação insuficiente ou inadequada	Injeção de oxigênio puro	9	4	1	36	Acrescentar mais aeradores mecânicos (valores de oxigênio entre 0,45 a 0,55 Kg de O <sub>2</sub> / Kg de DBO removida) e manutenção preventiva dos mesmos
					Alta taxa de carga orgânica (DBO, DQO, material suspenso) do efluente bruto	A vazão da ETDI é reduzida se a DQO > 450 mg/L	9	5	2	90	Otimizar operação ou melhorar processos na ETEI
			Espuma marrom escura e brilhante na superfície do tanque de aeração	Dificuldade na transferência de oxigênio para os microrganismos e sobrecarga do decantador secundário	Tanque de aeração aproximando-se de condições de baixa carga (baixa A/M) devido a insuficiente descarte de lodo no processo	Não há flexibilidade para atuação em A/M: atuação na faixa de operação do SSTA e na vazão da estação	6	6	2	72	Aumentar taxa de descarga até aproximar-se dos valores normais de operação

Continua

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
			Relação SSVTA/SSTA baixa	Lodo mais estabilizado	Entrada de inertes no sistema e idade do lodo muito alta	Atuação na faixa de operação do SSTA e na vazão da estação	7	9	2	126	Aumentar descarte de lodo, mas sem perder o manto de lodo no decantador
											Observar no microscópio
			Alto valor de SSTA	Dificulta transferência de oxigênio para biomassa; entope tubos dos decantadores	Elevada carga orgânica	Acionamento do caminhão a vácuo ou ajuste de SSTA de forma gradual	7	9	2	126	Redimensionar centrífuga
			Falta de um tipo desejável e/ou quantidade de microrganismos	Mudanças a nível microbiológico e consequente desestabilização do sistema	Abundância de filamentosas	Verificação do aspecto do lodo, clarificação e TLD	6	7	3	126	Ajustar A/M aumentando o reciclo
					Carga de choque tóxica	Redução de vazão da ETEI	9	5	3	135	Parar ou reduzir a entrada dos despejos.
			Baixos valores de pH	Interrupção da nitrificação	Baixa alcalinidade do afluente	Adição de cal	5	9	2	90	Manter pH entre 7 e 8
											Corrigir alcalinidade
			Elevada carga poluente (DQO acima de 450 mg/L) afluente ao Tanque de Aeração ou amônia acima de 60 mg/L no SAO	Prejuízo ao processo biológico	Possíveis ocorrências anormais no processo de Refino	Redução de vazão da ETEI	10	5	3	150	Reduzir vazão da ETEI
											Atuar no controle do processo de refino
<b>Severidade</b>			<b>Ocorrência</b>			<b>Deteção</b>			<b>RPN</b>		
Marginal			1	Remota		1	Muito Grande	1-2	Faixa Azul (1 a 50)		Baixo
Baixa			2-3	Pequena		2-3	Grande	3-4	Faixa verde (51 a 100)		Médio
Moderada			3-4	Moderada		4-6	Moderada	5-6	Faixa Amarela (101 a 200)		Alto
Alta			7-8	Alta		7-8	Pequena	7-8	Faixa Vermelha (201 a 1000)		Muito Alto
Muito Alta			9-10	Muito Alta		9-10	Muito Pequena	9-10			

Fonte : O autor, 2014.

- III.1.2 – Decantador Secundário

Este componente, por ser etapa final do tratamento apresenta elevados índices de severidade, os quais influenciam nos valores RPNs.

Os maiores RPNs têm relação com a presença de lodo filamentosos, devido a baixo pH, já explicitado no item anterior e idade do lodo incorreta.

Neste último caso, quando ocorre uma elevação exagerada no IVL, pode ser necessário o seu ajuste através do descarte do lodo. Essa manobra normalmente é evitada para não se reduzir a concentração média de SSTA nos reatores biológicos.

Em casos excepcionais (TLD muito alto associado à turbidez repentina da água, escurecimento repentino do lodo, odor não característico do lodo ou da água, TLD muito baixo associado à elevação repentina da turbidez da água) a operação de turno pode elevar o descarte.

Há que se destacar ainda a sobrecarga da centrífuga (equipamento para remoção de umidade do lodo e posterior destinação), que também recebe o lodo da ETA.

**Quadro 10 - Decantador secundário**

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
III.1 (Lodos Ativados)	III.1.2 Decantador Secundário	1. Remover sólidos (lodo) facilmente decantáveis	Lodo filamentoso	Baixa sedimentabilidade	OD baixo em 02 reatores	Elevação do descarte do lodo, apenas em casos de TLD muito alto ou muito baixo associado à elevação repentina da turbidez da água	9	4	2	72	Aumentar aeração nos tanques de aeração e usar polieletrólitos para aumentar a densidade dos flocos (usar <i>jar test</i> ).
					Deficiência de N e P		9	2	3	54	Introduzir nutrientes: Nitrogênio e fosforo
					pH baixo		9	8	2	144	Adicionar alcalinidade
			Aumento do manto de lodo no decantador	Entupimento/obstrução das linhas/tubo e baixa no SSTA	Falha nos removedores de lama	Desobstrução através de ar de serviço e inspeção contínua dos removedores	8	9	1	72	Operação contínua dos removedores de lama, com a previsão de sobressalentes
				Atividade biológica tende a mudar de aeróbica para anaeróbica	OD baixo	Acionamento dos removedores de lama	9	4	2	72	Ajustar A/M aumentando o reciclo; adicionar flocculantes temporariamente; aumentar a aeração no tanque de aeração

Continua

Item	Nome do componente ou Processo	Função do componente ou Processo	Falhas Possíveis			Atual				Controles Necessários	
			Modo	Efeito (s)	Causa (s)	Controles Atuais	Índices				
							S	O	D		R
			Efluente turvo, com sólidos	Saída de sólidos com o efluente final	Elevado manto de lodo	Verificação da carga e IL	9	4	2	72	Aumentar reciclo de lodo ou o descarte
					Sobrecarga hidráulica ou de sólidos		9	4	2	72	Checar vazões; Acrescentar polímero ou sulfato alumínio como medida temporária, após verificar <i>jar test</i>
					Idade de lodo incorreta		9	4	2	108	Checar idade do lodo: se velho, diminuir SSTA; se novo, aumentar SSTA
			Escuma superficial	Baixa eficiência de tratamento	Produção anaeróbia de CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S e outros produtos da fermentação (lodo anaeróbio)	A espuma removida do sistema não é recirculada	6	7	2	84	Diminuir SSTA e aumentar descarte de lodo; idade do lodo muito alta: verificar se há superdosagem de nutrientes
					Possível início de desnitrificação						Aplicações de jatos de água na superfície do decantador para a ruptura mecânica da espuma
<b>Severidade</b>			<b>Ocorrência</b>			<b>Deteção</b>			<b>RPN</b>		
Marginal	1	Remota	1	Muito Grande	1-2	Faixa Azul (1 a 50)		Baixo			
Baixa	2-3	Pequena	2-3	Grande	3-4	Faixa verde (51 a 100)		Médio			
Moderada	3-4	Moderada	4-6	Moderada	5-6	Faixa Amarela (101 a 200)		Alto			
Alta	7-8	Alta	7-8	Pequena	7-8	Faixa Vermelha (201 a 1000)		Muito Alto			
Muito Alta	9-10	Muito Alta	9-10	Muito Pequena	9-10						

Fonte: O autor, 2014.

- III.1.3 – Reciclo do Lodo

Todos os modos de falha, exceto a diminuição da taxa de reciclo decorrem das condições do reator biológico e do decantador. Dessa forma, o reciclo de lodo é um componente que funciona para detecção dos possíveis modos de falha do tratamento biológico e pouco influencia na tratabilidade.



### 10.2.3 Hierarquia dos riscos

Pela Tabela 16 abaixo, notam-se que os modos de falha relativos ao processo apresentam maiores RPNs, evidenciando maior criticidade do tratamento biológico, principalmente no reator biológico.

Isso se deve aos efluentes característicos do refino, com substâncias potencialmente tóxicas aos microrganismos depuradores do efluente, o que exige maiores mecanismos de detecção e mitigação de falhas.

**Tabela 16 - Hierarquia dos riscos do sistema de tratamento de efluentes**

<b>Sistema Principal</b>	<b>Subsistema 1</b>	<b>Subsistema 2</b>	<b>Modos de Falha</b>	<b>RPN</b>
Tratamento biológico	Lodos Ativados	Reciclo do lodo	Espuma ou borra na superfície do reciclo	162
Tratamento biológico	Lodos Ativados	Reator biológico	Elevada carga poluente (DQO acima de 450 mg/L) afluente ao Tanque de Aeração ou amônia acima de 60 mg/L no SAO	150
Tratamento biológico	Lodos Ativados	Decantador secundário	Lodo filamentososo	144
Tratamento físico	Flotador	-	Turbulência	144
Tratamento biológico	Lodos Ativados	Reator biológico	Falta de um tipo desejável e/ou quantidade de microrganismos	135

Continua

<b>Sistema Principal</b>	<b>Subsistema 1</b>	<b>Subsistema 2</b>	<b>Modos de Falha</b>	<b>RPN</b>
Tratamento biológico	Lodos Ativados	Reator biológico	Alto valor de SSTA	126
Tratamento biológico	Lodos Ativados	Reator biológico	Relação SSVTA/SSTA baixa	126
Tratamento físico	Flotador	-	Acúmulo de sólidos sedimentáveis	112
Tratamento biológico	Lodos Ativados	Decantador secundário	Efluente turvo, com sólidos	108
Tratamento físico	SAO	-	Presença de óleo em grande quantidade	108
Tratamento físico	Equalizador	-	Misturadores (aeradores) não operam	108
Tratamento físico	Equalizador	-	Forte odor na região	108
Tratamento físico	Grades	-	Bloqueio excessivo das grades	84
Tratamento químico	Coagulação/floculação	-	Má formação de flocos	80

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, realizou-se um estudo da confiabilidade de uma ETEI que recebe efluentes oleosos, englobando todas as etapas de tratamento com a utilização de dois métodos: análise centrada na confiabilidade, envolvendo a ferramenta de análise semi-quantitativa FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) e pela aplicação do Coeficiente de Confiabilidade (CDC).

Acerca da análise individual de cada método, seguem as seguintes conclusões:

O CDC é uma ferramenta acessível, de fácil inserção nas rotinas de monitoramento de estações de tratamento de efluentes e permite quantificar o tempo de atendimento às metas pré-fixadas, sejam estas de atendimento ao projeto da unidade, à legislação ambiental ou aos padrões desenvolvidos pela política da empresa.

Esta última característica apresenta elevada sensibilidade, uma vez que ETEIs que adotam metas equivocadas, diferentes, por exemplo, das especificações do projeto, podem mascarar a confiabilidade, tendo como consequência má operação e baixo desempenho.

Ressalta-se, contudo, que a definição da concentração desejável de determinados poluentes no efluente final em projeto é feita, em geral, considerando valores médios, portanto, é ponto vital considerar a variabilidade ou confiabilidade para definição da meta de eficiência, de forma que ela possa ser alcançada durante a operação.

Neste trabalho, a unidade de flotação teve sua confiabilidade mascarada pela adoção equivocada de metas que fogem ao praticado em projetos: para o parâmetro O&G na saída do SAO é esperada 20 mg/L. No que diz respeito à DQO, espera-se eficiência de 30 a 60 % de redução (METCALF; EDDY, 2002). A meta pré-fixada não corresponde a esses percentuais (40 mg/L para O&G e 20% de redução de DBO).

Ainda sobre a escolha das metas, nota-se que, com a análise de uma amostra representativa de valores de concentração na entrada e saída das unidades de tratamento é possível verificar se as metas estão bem definidas.

A grande desvantagem da utilização individual deste método é a não identificação das prováveis causas da baixa confiabilidade.

Quanto à ferramenta de análise de riscos, os estudos que a utilizam para avaliar o desempenho de ETEIs ainda são bastantes escassos, mesmo sendo sistemas que necessitam ser monitorados pela obrigatoriedade de atendimento à legislação ambiental.

Os resultados obtidos por este método corroboram com o exposto por Eisenberg et al. (2001), pois embora os modos de falha mecânica tenham sido numerosos, têm baixo potencial de desenquadramento do efluente. Sendo a maior frequência de valores altos do RPN relativa aos modos de falha de processo.

Ainda sobre o parágrafo acima, verificou-se, por exemplo, que a indisponibilidade da centrífuga afeta a estabilidade do tratamento biológico, embora não impacte os parâmetros de lançamento.

Os dados laboratoriais, bem como os dados históricos de manutenção registrados nos relatórios de supervisão de turno são ferramentas imprescindíveis para determinar a frequência de ocorrências e têm relação direta com as causas dos modos de falha. Apenas a análise individual desses dados permite elencar várias hipóteses que afetam o desempenho do tratamento.

Como limitação evidencia-se a subjetividade da técnica, que pode ser amenizada pelo envolvimento de uma equipe técnica multidisciplinar.

Através deste método, os reatores biológicos se mostraram mais críticos para o desempenho da ETEI.

Ao correlacionarmos os resultados, concluímos que, embora o tratamento biológico tenha apresentado maior CDC, a FMECA aponta esta etapa como mais crítica, principalmente no reator biológico, uma vez que apresenta maior número de variáveis de controle e elevados índices de severidade. Acrescenta-se a fragilidade dos microrganismos a cargas tóxicas, devendo, portanto, ser ponto de atenção na gestão do sistema.

A correlação dos métodos permite ainda verificar as principais causas da baixa confiabilidade e eficiência dos tratamentos, como demonstrado para o flotador.

Assim, pode-se concluir que um sistema confiável, não necessariamente apresenta menor criticidade, pois uma má gestão implicará em possíveis infrações à legislação ambiental.

Sobre o estudo de caso, a ETEI demonstrou um desempenho global satisfatório, em grande parte pelos numerosos e sofisticados mecanismos de detecção dos possíveis modos de falha.

Como recomendação, para uma avaliação mais robusta do desempenho de estações de tratamento, é aconselhável a utilização conjunta destas ferramentas.



## REFERÊNCIAS

Água e Saúde. Disponível em: <<http://www.usp.br/gpqa/ Disciplinas/qfl3201/aguaSaude.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2013.

ACQUA ENGENHARIA. *Manual de Operação Lodos Ativados*. Pirassununga, São Paulo. 2010. Disponível em: <<http://www.acquaeng.com.br/wp-content/uploads/2010/01/manuallodosativados1.pdf>>. Acesso em 15 out. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ISO/IEC Guia 73: gestão de riscos: vocabulário*. 1. ed. Rio de Janeiro, 2009. 12 p.

\_\_\_\_\_. *NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários*. 2. ed. Rio de Janeiro, 2011. 53 p.

AMORIM, R.S., *Abastecimento de água de uma refinaria de petróleo - Caso REPLAN*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistema de Gestão). Universidade Federal Fluminense. Niterói. RJ, 2005.

AZEVEDO NETTO, J. M; HESPANHOL, I. *Sistemas de esgotos sanitários*. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1977. 467 p.

BAIRD, C.; CANN, M. *Química ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p.

BARBIERI, J. C. *Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos*. 2. ed. atual. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2007. 382 p.

BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. *Logistics Engineering and Management*. 6 th ed. New Jersey: Printice Hall, 2003.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado, 1988. 140 p.

BRASIL. Decreto nº 23.777, de 23 de janeiro de 1934. Decreta o Código das Águas. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 31 jan. 1934. Seção 1, p.2114.

BRASIL. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Regulariza o lançamento do resíduo industrial das usinas açucareiras nas águas fluviais. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 20 jan. 1934. Seção 1, p.14738.

BRASIL. Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Seção 1, p.470.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2 set. 1981. Seção 1, p.16509.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 17 fev. 1998. Seção 1, p.1.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Água - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 18 jul. 2000. Seção 1, p.1.

BOLZANI, H. R. *O efeito da manutenção e das condições operacionais no desempenho de estação de tratamento de esgoto*. 2011. 156 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

BRAGA, B. *et al. Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo (SP): Prentice Hall, 2005. 305 p.

BRAILE, P.M., *Manual de Tratamento de águas residuárias industriais*. São Paulo: CIA Estadual Tecnol. Saneamento Ambiental, 1979.

BRAILE, P. M; CAVALCANTI, J. E. *Manual de tratamento de aguas residuarias industriais*. São Paulo: CETESB, 1993. 764 p.

BRASILIANO, A. C. R. *Gestão e análise de riscos corporativos: método brasileiro avançado*. 1. ed. São Paulo: Sicureza, 2009.

BRITO, J. N. *Planejamento e Controle da Manutenção*. Apostila do Curso Planejamento e Controle da Manutenção. ABEMEC-MG. Belo Horizonte, 2007.

BROSTEL, R. C.; SOUZA, M. A. A. Determinação da confiabilidade operacional de estações de tratamento de esgoto do Distrito Federal. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23., 2005, Campo Grande (MS).

CAMPOS, L. M. S.; MELO, D. A. Indicadores de desempenho dos sistemas de Gestão ambiental (SGA): uma pesquisa teórica. *Produção*, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 540-555, set./out. 2001.

CASAL, J. *et al. Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona: Edicions UPC, 1999. 361 p.

CAVALCANTI, J.E.W.A., *Manual de Tratamento de Efluentes Industriais*. Editora ABES, 2009.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. *Manual técnico de avaliação de desempenho de estações de tratamento de esgoto*. São Paulo, 1989. 58 p.

CHEREMISINOFF. N. P. *Practical Statistics for Engineers and Scientists (Hardback)*. vol. 16. CRC Press, 1987.

CH2M Hill. *Water use in industries of the future*. Portland, 825 NE Multnomah, Suite 1300, 2003.

COELHO, E. B. A. P. *Aspectos ambientais de uma refinaria e respectivas formas de controle*. Apostila do Curso de Formação de Operadores de Refinaria. Curitiba, 2002.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. *Nosso Futuro Comum*. 2. ed. Rio de Janeiro (RJ): FGV, 1991.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n<sup>o</sup> 20 de 18 de junho de 1986. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, p. 11356-11361, jul. 1986.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n<sup>o</sup> 306 de 5 de julho de 2002. Estabelece os requisitos mínimos e o termo de referência para realização de auditorias ambientais. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 38, p. 75-76, jul. 2002.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n<sup>o</sup> 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, mar. 2005.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n<sup>o</sup> 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n<sup>o</sup> 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 92, p. 89, mai. 2011.

DANTAS, M. L. *Avaliação de riscos em instalações portuárias*. Olinda (PE): Livro Rápido, 2010. 134 p.

D'AVIGNON, A., LA ROVERE, E. L. (Coord.) *Manual de auditoria ambiental de estações de tratamento de esgotos*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 152 p.

DA-RIN, B. P. et al. *Tratamento de esgotos*. 2. ed. Rio de Janeiro: SENAI, 2008. 249 p.

DE CICCO, F.; FANTAZZINI, M.L. *Introdução à Engenharia de Segurança de Sistemas*. 3. ed. São Paulo: FUNDACENTRO, 1988. 109 p.

DE GRACIA, J. M. S. *Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras: fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*. Madrid: McGraw Hill/Interamericana de España, 1998. 651 p.

DERKS, Y. M. *Uso da respirometria para avaliar a influência de fatores operacionais e ambientais sobre a cinética de nitrificação*. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

DEZOTTI, M. [coord.]. *Processos e técnicas de controle ambiental de efluentes líquidos*. Rio de Janeiro: E-papers, 2008. 360 p.

DEZOTTI, M.; SANT'ANNA JR, G. L.; BASSIN, J. P. (orgs.). *Processos biológicos avançados para tratamento de efluentes e técnicas de biologia molecular para o estudo da diversidade microbiana*. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

DIAS, R. *Marketing ambiental: ética, responsabilidade social e competitividade nos negócios*. 1. ed. São Paulo: Altas, 2009.

EISENBERG, D. et al. A methodology to evaluate water and wastewater treatment plant reliability. *Water Science and Technology*. v. 43, n. 10, p. 91-99. 2001.

FEEMA/SEMADS/COPPETEC. Programa de Capacitação Técnica e Gerencial de Órgãos Ambientais Fase II. Modulo 8: Controle de Efluentes Líquidos em Atividades Potencialmente Poluidoras de Pequeno Porte. Rio de Janeiro, 2003.

FELLENBERG, G. *Introdução aos problemas da poluição ambiental*. São Paulo: Pedagógica e Universitária, 1980. 196 p.

FERREIRA, E. F. T. et al. *Ampliação da Estação de Despejos Industriais (ETDI) da refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) da Petrobras*. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. 27, 2000, Porto Alegre, RS.

FERREIRA, E. S. (2000). Cinética química e fundamentos dos processos de nitrificação e desnitrificação biológica. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27, 2000, Porto Alegre. Anais. ABES: Rio de Janeiro, CD-ROM.

FLAVIN, C. Planeta rico, planeta pobre. In: *Estado do mundo 2001: relatório de Worldwatch Institute sobre o avanço em direção a uma sociedade sustentável*. Salvador (BA): UMA, 2000. p. 3-21.

FMEA, 2013. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Failure\\_mode\\_and\\_effects\\_analysis#cite\\_ref-MIL-P-1629\\_1-0](http://en.wikipedia.org/wiki/Failure_mode_and_effects_analysis#cite_ref-MIL-P-1629_1-0)>. Acesso em: 3 fev. 2013.

FOGLIATTO, F. S.; DUARTE, J. L. R. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011. 261 p.

FURTADO, J.S. *Gestão com responsabilidade socioambiental: ferramentas e tecnologias*. 2003. Disponível em: <[www.intertox.com.br](http://www.intertox.com.br)>. Acesso em: 06 de Abr. 2013.

GARY, J.; HANDWERK, G.; KAISER, M. *Petroleum refining: technology and economics*. 5th ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007. 465 p.

GIORDANO, G. *Tratamento de efluentes industriais*. Apostila do Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro: UERJ, 2012.

GRANTT, L. *Glossary of risk analysis terms*. Society for risk analysis. 2004. Disponível em <[http://www.sra.org/resources\\_glossary.php](http://www.sra.org/resources_glossary.php)>. Acesso em: 15 out. de 2012.

GURSKI, C. A. *Noções de confiabilidade e manutenção industrial*. Apostila do Curso de Formação de Operadores de Refinaria. Curitiba: PETROBRAS: UnicenP, 2002.

HELMAN, H.; ANDERY, P. R. P. *Análise de falhas (aplicação dos métodos de FMEA e FTA)*. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 1995.

JORDÃO, E. P., PESSOA, C.A. *Tratamento de esgotos domésticos*. ABES, 3. Ed. Rio de Janeiro, 2005.

KENDRICK, T. *Identifying and managing project risk: essential tools for failure – proofing your project*. New York: American Management, 2003.

KERZNER, H. *Project Management: a systems approach to planning, scheduling and controlling*. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

KOLLURU, R. V. *Environmental Strategies Handbook: A Guide to Effective Policies and Practices*. McGraw Hill. New York, 1994.

KUME, H. *Quality Management in New-Product Development: FMEA (Failure Mode and Effect Analyses)*. University of Tokyo, 1999.

LORA, L. E. S. *Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 481p.

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobras, 2001. 388 p.

LUIZI, R. P. S. L. *Operação de sistemas de tratamento de águas residuais por lamas activadas com arejamento prolongado*. 2012. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

MACHADO, J. C.V.; CARVALHO, M. F. B.; PEREIRA JUNIOR, O. A. *Análise, monitoramento e tratamento de efluentes líquidos*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. SEREC. CEN-SUD, [199-].

MANNAN, S. (Ed.). *Lee's Loss prevention in the process industries: hazard identification, Assessment and Control*. 3rd ed. Volume 1. New York: Elsevier, 2005. 307 p.

MARIANO, Jacqueline. *Impactos Ambientais do Refino do Petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 228 p.

MARTINI JÚNIOR, L. C.; GUSMÃO, A. *Gestão ambiental na indústria*. Rio de Janeiro: Destaque, 2003. 212 p.

METCALF, L.; EDDY, H. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

MEYER, M. C. *Análise de risco qualitativa em projeto industrial de unidade de cogeração de vapor*. 2005. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade do Vale do Itajaí, 2005.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. *Água na indústria: uso racional e reuso*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MONTEIRO, J. P. *et al.* Gerenciamento de água na indústria do refino de petróleo. *Meio Filtrante*. 29. ed. 2007. Disponível em: <[www.meiofiltrante.com.br](http://www.meiofiltrante.com.br)>. Acesso em: 13 out. 2013.

MOTA, S. *Introdução à engenharia ambiental*. 4. ed. Rio de Janeiro (RJ): ABES, 2006. 388 p.

MOURA, C. *Análise de modo de efeito e falha potencial (FMEA): manual de referência*. Fev. 2000. Disponível em: <[www.estgv.ipv.pt](http://www.estgv.ipv.pt)>. Acesso em: 14 out. 2012.

NASCIMENTO, L. F. *Gestão ambiental e a sustentabilidade*. Sistema Universidade Aberta do Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.agracadaquimica.com.br/quimica/arealegal/outros/205.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2013.

NIEAD/COPPE. *Curso de Tratamento de Efluentes na Indústria de Petróleo*. Núcleo Interdisciplinar de Estudos Ambientais e Desenvolvimento - NIEAD, COPPE/UFRJ 2002.

NIKU, S.; SCHROEDER, E. D.; SAMANIEGO, F. J. Performance of activated sludge processes and reliability - based design. *Journal Water Pollution Control Association*. v. 51, n. 12, p. 2841-2857. 1979.

NUNES, E. L. *Manutenção centrada na confiabilidade (MCC): análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada*. 2001. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

NUNES, J.A. *Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais*. 4. ed. Rev. Aracaju, SE: J. Andrade, 2004.

OLIVEIRA, P. M. *Índice de geração de efluentes aplicado a uma refinaria de petróleo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, SP: [s.n.], 2010.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1: análise de desempenho. *Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES)*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 4, p. 347-357. 2005a.

\_\_\_\_\_ Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: influência de fatores de projeto e operação. *Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES)*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 4, p. 358-368. 2005b.

\_\_\_\_\_ Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: influência de fatores de projeto e operação. *Eng. Sanit. Ambiental*, Rio de Janeiro. v. 10, n. 4, p. 358-368. 2005b.

\_\_\_\_\_ Análise da confiabilidade de estações de tratamento de esgoto. *Eng. Sanit. Ambiental*, Rio de Janeiro. v. 12, n. 4, p. 389-398. 2007.

OLIVEIRA, W. B. *Programas de segurança baseados na prevenção e controle de perdas*. Apostila do curso de Segurança, Saúde e Meio Ambiente. CURSSAMA. Petrofertil, 1991.

PALADY, P. *Análise dos Modos de Falhas e Efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram*. Instituto IMAM, São Paulo, 1997.

PARDO, J. A. R. *Metodologia para análise e gestão de riscos em projetos de pavimentos rodoviários*. 2009. 187 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

PEDROSO, L. H. *Uma sistemática para a identificação, análise qualitativa e análise quantitativa dos riscos em projetos*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Naval). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

PEREIRA, F. M. S. *Gestão de riscos e planos de ações emergenciais aplicados a barragens de contenção de rejeitos Casa de Pedra/CSN*. 2009. 159 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2009.

PERES, A. L. *Avaliação dos impactos da Política Nacional de Recursos Hídricos na gestão ambiental da água e efluentes na indústria*. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE)-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

PETROBRAS. *Critérios para Projetos de Drenagem, Segregação, escoamento e Tratamento Preliminar de Efluentes Líquidos de Instalações Terrestres*. CONTEC Comissão de Normas Técnicas. Norma 38 rev. E. PETROBRAS Petróleo Brasileiro S/A. Rio de Janeiro, 2000.

PETROBRAS. *Técnicas de análise de riscos: A.M.F.E.* Rio de Janeiro. [199-].

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A.N. *Manutenção: função estratégica*. 2. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 341 p.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. *Um guia do conjunto de conhecimentos em gerenciamentos de projetos*. Guia PMBOK®. 3ª ed. Newton Square: PMI, 2004.

POOLE, J.E.P.A. A study of the relationship between the mixed liquor fauna and plant performance for a variety of activated sludge sewage treatment works. *Water Research*, v. 18 (3), p. 281-287, 1984.

POMBO, F. R. *Gestão da demanda de água na indústria de refino de petróleo: desafios e oportunidades de racionalização*. 2011. 152 f. Tese de Doutorado (Doutor em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

RAPOSO, J. L. O. *Manutenção centrada na confiabilidade de sistemas elétricos: uma proposta para uso de análise de riscos no diagrama de decisão*. 2005. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

RUSTEN, B.; EIKEBROKK, B.; ULGENES, Y.; LYGREN, E. Design and operation of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*. v. 34, nº 3, p. 322-331, 2006.

RUSTEN, B.; KOLKINN, O.; DEGAARD, H. Moving bed biofilm reactors and chemical precipitation for high efficiency treatment of wastewater from small communities. *Water Science Technology*, v.35, nº 6, p. 71-79, 1997.

SANT'ANNA JR., LIPPEL, G. *Tratamento Biológico de efluentes: fundamentos e aplicações*. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 418p.

SANTOS, A. B. *Avaliação técnica de sistemas de tratamento de esgotos*. Banco do Nordeste, Fortaleza, 2007, 206 p.

SANTOS, M. C.; PORTO, G. S. Um estudo sobre modelos de gestão ambiental adotados pelas empresas. *Revista Eletrônica de Administração*, vol. 7, n. 1, jan./jul. 2008.

SANTOS, R. N. C. *Enquadramento das Análises de Risco em Geotecnia*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC: Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Lisboa, 2007.

SÃO PAULO (Estado). Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. *Licenciamento ambiental e as micro e pequenas empresas*. 3. ed. São Paulo, v.1, jul. 2008.

SCAPIN, C. A. *Análise sistêmica de falhas*. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2007. 166 p.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso*. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. 234 p.

SILVA, S.; FONSECA, M.; BRITO, J. Metodologia FMEA e sua Aplicação à Construção de Edifícios. In: SEMINÁRIO DE QUALIADE NA CONCEPÇÃO, EXECUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE EMPREENDIMENTO, 2006, Lisboa.

SIQUEIRA, I. P. *Manutenção Centrada na Confiabilidade: manual de implementação*. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005. 408 p.

SKELTON, B. *Process Safety Analysis: an introduction*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1997. 213 p.

SOKÓL, W. Treatment of refinery wastewater in three-phase fluidized bed bioreactor with a low density biomass support. *Biochemistry Engineering Journal*, v. 15, p. 1-10, 2003.

SLACK, N., CHAMBER, S.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. 1. ed. São Paulo: Editora Atlas, 1999. 526 p.

SMITH, P. G.; MERRIT, G. M. *Proactive risk management: controlling uncertainty in product development*. New York: Productivity Press, 2002.

STAMATIS, D. H. *Failure Mode and Effects Analysis: FMEA from Theory to Execution*. ASQC Quality Press Milwaukee, Wisconsin, 1995.

TAVARES, J. *Noções de Prevenção e Controle de Perdas em Segurança do Trabalho*. 8. ed. São Paulo: Senac, 1996.

TOLEDO, J. C.; AMARAL, D. C. *Análise do tipo e efeito de falha*. Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade. Universidade Federal de São Carlos, 2005.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. *Microbiologia*. 10 ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. O comportamento do sistema de lodo ativado: teorias e aplicações para projeto e operação. Campina Grande: Epgraf, 1999. 472 p.

VANELLI, C. A. *Conservação de água em refinaria de petróleo: o caso da REVAP*. 2004. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia da Energia). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2004.

VIANA, P. Z. *Biorreator com membrana aplicado ao tratamento de esgoto doméstico: avaliação do desempenho de módulos de membranas com recirculação externa*. 162 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Programa de Engenharia Civil. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e o tratamento de esgoto*. 3. ed. v. 1. Belo Horizonte (MG): UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. *Lodos ativados*. 2. ed. v.4. Belo Horizonte (MG): UFMG, 2002.

VON SPERLING, M., FRÓES, C.M.V. *Avaliação de desempenho de uma ETE tipo aeração prolongada com base em três anos de monitoramento intensivo*. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98), Lima, 1-5 nov. 1998.

VON SPERLING, M.; LUMBERS, J. P. Control objectives and the modelling of MLSS in oxidation ditches. *Water Science and Technology*, Inglaterra, v.21, p. 1173-1183, 1989.

## ANEXO I

### CHECK LIST – FORMAS DE DETECÇÃO E TRATAMENTO DOS RISCOS<sup>2</sup>

1. Os critérios de acompanhamento e avaliação das metas de desempenho da ETEI estão sendo observados e há definições de responsabilidade?
2. Há cumprimento e divulgação das metas, dos prazos e resultados obtidos?
3. Há previsão de recursos para implementar e monitorar as metas de desempenho da ETEI?
4. As entradas e saídas dos efluentes são monitoradas em cada etapa do processo?
5. Qual a alternativa utilizada, no caso de falta de energia?
6. Os procedimentos operacionais ou sistemas instalados para monitoramento são capazes de prover informações robustas de conformidade sobre o requerido legalmente?
7. A localização e frequência dos pontos de coleta resultam em amostragens representativas?
8. A gerência responsável pela ETEI tem acesso a todas as legislações ambientais relativas à qualidade e classificação do corpo receptor e sobre a qualidade do efluente?
9. Os responsáveis pela manutenção e operação da ETEI possuem conhecimento sobre os procedimentos operacionais?

---

<sup>2</sup> O *check list* foi elaborado com base em D'Avignon & La Rovere (2002).

10. Como se dá o planejamento e aplicação (local, abrangência, periodicidade) dos treinamentos relativos à segurança dos processos de tratamento?
11. Qual a rotina de trabalho para os riscos potenciais ao tratamento identificados? Há procedimentos escritos e garantia de que serão seguidos?
12. As avaliações de riscos decorrentes dos processos de tratamento estão bem dimensionadas? Existe gestão por ações neutralizadoras ou minimizadoras?
13. As instalações apresentam *tags* nos equipamentos, sinalização de segurança, procedimentos operacionais afixados e instrumentos de segurança válidos?
14. Qual a sistemática adotada (relatórios gerenciais, auditoria interna ou externa) para identificação e registro de adequações e inadequações (aumento de incidentes, impacto na qualidade do efluente, etc.) na ETEI?
15. Existe Plano de Emergência para ETEI? As ações deste para minimizar os danos são seguidas?
16. Os funcionários conhecem o Plano de Emergência?
17. Os programas de inspeção e manutenção são cumpridos?
18. As instruções presentes nos planos de inspeção e manutenção são suficientemente claras em caso de indisponibilidade de equipamentos, de modo a garantir o padrão de qualidade dos efluentes?
19. A ETEI está protegida contra choques de carga orgânica, vazão e toxidade?
20. Existe monitoramento dos choques acima mencionados, no caso da impossibilidade de sua ocorrência?

- 21.** Os procedimentos operacionais são capazes de promover o controle efetivo das unidades?
- 22.** Os registros de monitoramento contem informações como locais de coleta, hora de coleta, métodos de coleta e de análises utilizadas e os respectivos resultados?