

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO OPERACIONAL
DE ETES DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU**

MARCELO MACRUZ GARCIA

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II

Orientador: Prof. Dr. Paulo Belli Filho
Co-orientador: Prof.^a Dr.^a Maria Eliza Nagel Hassemer

FLORIANÓPOLIS, (SC)
AGOSTO/2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

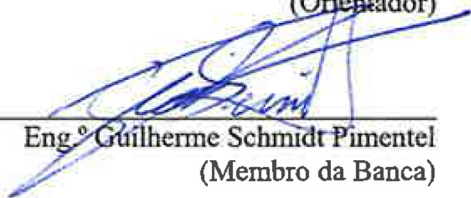
**AValiação Comparativa de Desempenho Operacional
de ETES do Município de Blumenau**

MARCELO MACRUZ GARCIA

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II



Prof. Pós-Dr. Paulo Bell Filho
(Orientador)



Eng.º Guilherme Schmidt Pimentel
(Membro da Banca)



Dr.ª Viviane Furtado Velho
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
AGOSTO/2016

“Tudo que está no plano da realidade
já foi sonho um dia”

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

À Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A, por fornecer e autorizar o uso dos dados analisados.

Ao engenheiro Guilherme Pimentel, pela solicitude, paciência e pela experiência compartilhada ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Paulo Belli, pelas orientações, pela atenção dispensada e por acreditar no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Pablo Sezerino, pela atenção dispensada como Coordenador do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Ao sr. Rubens Francisco Junior pela abertura e cordialidade em estabelecer o contato com a Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A. e pelo compartilhamento de sua vasta experiência no setor de tratamento de esgoto.

Aos meus pais pelos incontáveis incentivos, pelo suporte emocional e por terem me ensinado a perseguir meus sonhos com tenacidade e persistência.

Ao meu amigo e irmão Bruno pela parceria inigualável, pelo companheirismo e por ajudar a tornar possível este sonho.

À minha namorada Talicia, pelo amor, carinho, companhia em todos os momentos, principalmente naqueles de superação.

À minha família e aos amigos pela compreensão nos momentos de ausência e abdicção.

À todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu desenvolvimento pessoal.

À Deus por conceder a saúde e força necessárias para o atingimento deste objetivo.

RESUMO

Neste trabalho foram avaliados os desempenhos operacionais de duas estações de tratamento de esgoto, ETE Garcia e ETE Fortaleza, em funcionamento no município de Blumenau, Santa Catarina, Brasil. A avaliação foi realizada por meio de um sistema de indicadores de desempenho de estações de tratamento (Sistema ID-ETE) com base em dados operacionais do período de 2013 a 2015. A ETE Garcia tem seu sistema principal composto por um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) seguido de um reator de biofilme com leito móvel (MBBR) aeróbio e a ETE Fortaleza opera com sistema de lodos ativados aeração prolongada.

A aplicação do sistema de indicadores de desempenho (ID) consistiu no cálculo e comparação de 13 IDs componentes do Sistema ID-ETE, utilizando como referencial, metas estabelecidas com base em parâmetros regulatórios e na literatura. Para subsidiar a análise dos IDs, foi realizado levantamento em campo das características operacionais de cada ETE, além de uma avaliação estatística dos dados de vazão tratada, DBO, DQO e Fósforo Total, para o afluente e efluente. Foram realizados ainda: a avaliação da influência da sazonalidade e da implantação de melhorias no desempenho de cada ETE; o cálculo do percentual de atendimento às metas estabelecidas; e o cálculo da confiabilidade de cada sistema de tratamento.

Verificou-se neste trabalho que a ETE Garcia opera com menores vazões, mas seu afluente possui maior concentração de matéria orgânica que o da ETE Fortaleza. A ETE Garcia apresentou melhores resultados de desempenho operacional médio, mostrando-se superior nos indicadores relativos ao controle de monitoramento do afluente e ao atendimento às metas de lançamento de DQO e Fósforo Total, totalizando 07 IDs com resultados superiores em relação à ETE Fortaleza. A ETE Fortaleza por sua vez, foi superior em 05 indicadores, sendo estes relativos ao controle de monitoramento do efluente, atendimento global às metas estabelecidas e às eficiências de remoção dos parâmetros analisados. As ETEs apresentaram desempenho operacional similar no ID referente à utilização da capacidade hidráulica projetada, mostrando ainda incremento na vazão tratada ao longo do período do estudo. O desempenho geral das ETEs foi positivo, ficando próximo ao esperado para a eficiência de remoção de matéria orgânica e apresentando valores maiores que os esperados para eficiência de remoção de Fósforo Total.

A tecnologia MBBR como pós-tratamento de reatores UASB mostrou boa adaptabilidade operacional às condições climáticas do município de Blumenau e às características físico-químicas do esgoto doméstico tratado, tornando-se uma alternativa tecnológica aos sistemas de tratamento comumente utilizados no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: indicadores de desempenho, lodos ativados, reator de biofilme com leito móvel, tratamento de esgoto sanitário, UASB.

ABSTRACT

This study proposes to evaluate the operational performance of two wastewater treatment plants, Garcia WWTP and Fortaleza WWTP, operating in Blumenau, state of Santa Catarina, Brazil. The evaluation was carried out by means of a performance indicator system of wastewater treatment plants (*ID-ETE System*) with based on operational data collected from 2013 to 2015. The Garcia WWTP is composed of an upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) followed by an aerobic moving bed biofilm reactor (MBBR) and the Fortaleza WWTP operates an extended aeration activated sludge. Application of the indicator system consisted of the calculus and comparative assessment of 13 performance indicators that comprised the *ID-ETE System* using as reference, goals based on literature and regulatory parameters.

In order to support the performance indicators analysis, a field survey of each of the WWTP operational features was carried out, as well as a statistical evaluation of treated flow, BOD, COD and Total Phosphorus for both affluent and effluent. Furthermore, seasonality influence, improvements implementations in the outcome of each plant, as well as the calculus for goal achievement and reliability of each one of the treatment systems were also evaluated.

According to this study, Garcia WWTP was found to operate smaller flows, however its affluent was found to present higher concentration of organic matter compared to the Fortaleza WWTP. Garcia WWTP presented better average operational performance results, and better overall indicators for affluent monitoring control, achievement of COD and Total Phosphorus discharge goal, amounting to 07 indicators with superior outcome compared to that of Fortaleza WWTP. On the other hand, Fortaleza WWTP presented superior results in 05 indicators concerning effluent monitoring control, global achievement of goals as well as removal efficiency of the analyzed parameters. Both WWTPs presented similar operational performance in the indicator that refers to the use of projected hydraulic capacity, also displaying treated flow increase along the study period. The overall performance of both WWTPs was positive, displaying organic matter removal efficiency results close to the expected and higher values than expected for Total Phosphorus removal efficiency.

MBBR technology as an UASB post-treatment presented adequate operational adaptability to the Blumenau county climatic conditions and to the physical-chemical characteristics of treated domestic sewage, proving to be an alternative technology to the commonly treatment systems used in Brazil.

KEYWORDS: wastewater treatment, performance indicators, moving bed biofilm reactor, UASB, activated sludge.

ÍNDICE

PÁG.

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	5
1 - INTRODUÇÃO	7
2 - OBJETIVOS	9
2.1 - Objetivo Geral	9
2.2 - Objetivos Específicos	9
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 - Esgoto Sanitário	10
3.1.1 - Composição do esgoto sanitário	11
3.2 - Sistemas de tratamento de esgoto sanitário por processos biológicos	14
3.2.1 - Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> – UASB)	14
3.2.2 - Lodos Ativados	16
3.2.3 - Lodos Ativados Convencional (fluxo contínuo)	19
3.2.4 - Aeração Prolongada (fluxo contínuo)	20
3.2.5 - Lodos Ativados como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios (UASB)	21
3.2.6 - Reator de Biofilme com Leito Móvel (<i>Moving Bed Biofilm Reactor</i> – MBBR)	23
3.3 - Indicadores de Desempenho de Estações de Tratamento de Esgoto	32
4 - METODOLOGIA	36
4.1 - Materiais	36
4.2 - MÉTODOS	40
4.2.1 - Diagnóstico das Estações de Tratamento de Esgoto	41
4.2.2 - Análise estatística dos dados de concentração e eficiência de remoção	41
4.2.3 - Seleção dos Indicadores de Desempenho do Sistema ID-ETE	47
4.2.4 - Aplicação do Sistema ID-ETE	47
4.2.5 - Análise comparativa dos IDs pré-selecionados	52
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 - Diagnóstico e análise do desempenho operacional da ETE Fortaleza	52
5.1.1 - Diagnóstico	52
5.1.2 - Análise Estatística do desempenho operacional da ETE Fortaleza	62
5.2 - Diagnóstico e análise do desempenho operacional da ETE Garcia	81
5.2.1 - Diagnóstico	81
5.2.2 - Análise Estatística do desempenho operacional da ETE Garcia	89
5.3 - Aplicação do sistema de indicadores de desempenho ID-ETE	115
5.3.1 - Cálculo dos IDs das ETes	120
5.3.2 - Análise Comparativa dos IDs	138
6 - Conclusão	143

7 - Recomendações	145
8 - Referências Bibliográficas	146
APÊNDICE	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema típico de um projeto de reator UASB.....	15
Figura 2: Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional.	19
Figura 3: Esquema típico de sistema de tratamento com tratamento preliminar, reator de lodos ativados aeração prolongada e tratamento do lodo.....	21
Figura 4: Esquema típico de sistema de tratamento composto por tratamento preliminar, reator UASB, lodos ativados convencional e tratamento de lodo.....	22
Figura 5: Ilustração de suporte plástico para biofilme típico para MBBR disponível no mercado.	25
Figura 6: Características dos meios-suporte, para reator MBBR, disponíveis no mercado, conforme especificado pelos fabricantes.	26
Figura 7: Grades de retenção dos meios-suporte em reator MBBR.....	27
Figura 8: Fluxogramas típicos de sistemas de tratamento de esgoto sanitário com MBBR.....	30
Figura 9: Metodologia aplicada por Barros (2013).	34
Figura 10: Objetivos, critérios e IDs componentes do Sistema ID-ETE	35
Figura 11: Fluxograma das etapas de tratamento da ETE Fortaleza.	38
Figura 12: Fluxograma das etapas de tratamento da ETE Garcia.	39
Figura 13: Fluxo metodológico seguido no desenvolvimento do trabalho.....	40
Figura 14: Valores de referência de eficiência de remoção das cargas poluidoras de esgoto.....	43
Figura 15: Referência para amostragem dos parâmetros em função da classe da ETE.	44
Figura 16: Desenho técnico da unidade de pré-tratamento da ETE Fortaleza.....	54
Figura 17: Sistema de Gradeamento Mecanizado com peneiramento grosseiro e fino.	55
Figura 18: Tratamento de odores do tratamento preliminar.	55
Figura 19: Desarenador tipo vórtex em concreto armado.	55
Figura 20: <i>Air-lift</i> acoplado à caçamba para destinação da areia removida do preliminar.	55
Figura 21: Desenho técnico da unidade do reator aeróbio (Lodos Ativados Aeração Prolongada) - ETE Fortaleza.	56

Figura 22: Tanques de aeração do sistema de lodos ativados aeração prolongada	57
Figura 23: Tanque de aeração visto do passadiço	57
Figura 24: Difusor de bolhas finas utilizado no tanque de aeração	57
Figura 25: Desenho técnico da unidade de decantação secundária da ETE Fortaleza.....	58
Figura 26: Decantador secundário. Vista da edificação do reator de lodos ativados aeração prolongada.....	59
Figura 27: Desenho técnico da unidade de desidratação de lodo da ETE Fortaleza.....	60
Figura 28: Centrífuga de lodo.....	61
Figura 29: Dosador de polímero para tratamento do lodo.....	61
Figura 30: Adensador de lodo mecanizado em ambiente acusticamente isolado.....	61
Figura 31: Medianas, mínimos, máximos, percentis e metas de concentração de DBO, DQO e Ptotal efluente.....	65
Figura 32: Séries temporais da concentração dos parâmetros analisados na ETE Fortaleza.....	66
Figura 33: Valores médios de concentração afluente e efluente e de vazão tratada, em função da sazonalidade.....	68
Figura 34: Gráficos <i>box-whisker</i> (Statistica®) das concentrações do efluente, em função da sazonalidade.....	69
Figura 35: Percentuais de atendimento às metas de concentração no efluente da ETE Fortaleza.....	71
Figura 36: Percentuais de atendimento esperado em função dos dados analisados na ETE Fortaleza.....	71
Figura 37: Coeficientes de confiabilidade calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99% - ETE Fortaleza...	72
Figura 38: Medianas, mín., máx., percentis e metas de eficiência de remoção de DBO, DQO e Ptotal	74
Figura 39: Séries temporais das eficiências de remoção dos parâmetros analisados na ETE Fortaleza.....	75
Figura 40: Valores médios de eficiência de remoção de DQO, DBO e P total, em função da sazonalidade.....	76
Figura 41: Gráficos <i>box-whisker</i> (Statistica®) das eficiências de remoção, em função da sazonalidade.....	77
Figura 42: Percentuais de atendimento às metas de eficiência de remoção da ETE Fortaleza.....	78
Figura 43: Percentuais de atendimento esperado em função dos dados analisados na ETE Fortaleza.....	79

Figura 44: CDCs para as eficiências de remoção do sistema calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99%.....	80
Figura 45: Série temporal da utilização da capacidade tratamento instalada na ETE Fortaleza.....	81
Figura 46: Desenho técnico da unidade de pré-tratamento da ETE Garcia.....	82
Figura 47: Gradeamento mecanizado com peneiramento grosso e fino.	83
Figura 48: Desarenador do tipo vórtex	83
Figura 49: Desenho técnico do reator anaeróbio (UASB) e da unidade de desinfecção da ETE Garcia.....	84
Figura 50: Desenho técnico do reator aeróbio MBBR do tipo CMFF - ETE Garcia.....	85
Figura 51: Reator UASB com mantas de policarbonato	86
Figura 52: Reator CMFF – Tubulações de aeração e suportes plásticos em revolvimento. Vista do passadiço.....	86
Figura 53: Decantador secundário com homogeneizador	86
Figura 54: Efluente do decantador secundário	86
Figura 55: Tanque de acúmulo de lodo	87
Figura 56: Centrífuga de lodo.	87
Figura 57: Desenho técnico da casa de desidratação de lodo e do tanque de acúmulo de lodo da ETE Garcia.....	88
Figura 58: Medianas, mín., máx., percentis e metas de concentração de DBO, DQO e Ptotal efluente.....	92
Figura 59: Séries temporais da concentração dos parâmetros analisados na ETE Garcia.....	93
Figura 60: Valores médios de concentração afluente e efluente e de vazão tratada, em função da sazonalidade.....	96
Figura 61: Gráficos <i>box-whisker</i> (Statistica®) das concentrações do efluente, em função da sazonalidade.....	97
Figura 62: Gráficos <i>box-whisker</i> das concentrações do efluente, em função da implantação de melhorias.....	99
Figura 63: Percentuais de atendimento às metas de concentração no efluente da ETE Garcia, após a implantação de melhorias.	100
Figura 64: Percentuais de atendimento esperado em função dos dados analisados na ETE Garcia, após a implantação de melhorias.....	101
Figura 65: Coeficientes de confiabilidade calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99%.....	102
Figura 66: Medianas, mín., máx., percentis e metas de eficiência de remoção de DBO, DQO e Ptotal.	105

Figura 67: Séries temporais das eficiências de remoção dos parâmetros analisados.	106
Figura 68: Valores médios de eficiência de remoção de DQO, DBO e P total, em função da sazonalidade.....	107
Figura 69: Gráficos <i>box-whisker</i> (Statistica®) das eficiências de remoção, em função da sazonalidade.	108
Figura 70: Gráficos <i>box-whisker</i> das eficiências de remoção do efluente, em função da implantação de melhorias.....	110
Figura 71: Percentuais de atendimento às metas de eficiência de remoção da ETE Garcia.....	112
Figura 72: Percentuais de atendimento esperados em função dos dados analisados.	112
Figura 73: CDCs para as eficiências de remoção calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99%.....	113
Figura 74: Série temporal da utilização da capacidade tratamento instalada na ETE Garcia.	115
Figura 75: Séries históricas dos IDs EPA-01, 02 e 03 do critério Controle do Monitoramento da ETE Fortaleza.	124
Figura 76: Séries temporais dos IDs EPA-05 e 08 do critério de Eficiência de Remoção da ETE Fortaleza.	125
Figura 77: Séries temporais dos IDs EPA-11, 12, 15 e 17 do critério de Metas de Lançamento da ETE Fortaleza.	126
Figura 78: Séries temporais dos IDs EPA-18, 21 e 23 do critério de Metas de Lançamento da ETE Fortaleza.	127
Figura 79: Série temporal do ID ESI-01, do critério de Adequação com a Capacidade da ETE Fortaleza.....	128
Figura 80: Séries históricas dos IDs EPA-01, 02 e 03 do critério Controle do Monitoramento da ETE Garcia.....	132
Figura 81: Séries temporais dos IDs EPA-05 e 08 do critério de Eficiência de Remoção da ETE Garcia.	133
Figura 82: Séries temporais dos IDs EPA-11, 12, 15 e 17 do critério de Metas de Lançamento da ETE Garcia.	134
Figura 83: Séries temporais dos IDs EPA-18, 21 e 23 do critério de Metas de Lançamento da ETE Garcia.	135
Figura 84: Série temporal do ID ESI-01, do critério de Adequação com a Capacidade da ETE Garcia.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais parâmetros físicos de esgotos sanitários.....	11
Tabela 2: Principais parâmetros químicos de esgotos sanitários.....	12
Tabela 3: Principais micro-organismos presentes em esgotos sanitários.....	13
Tabela 4: Principais características operacionais dos sistemas de lodos ativados e suas variantes.	18
Tabela 5: Eficiências de remoção típicas de DBO5 e DQO em ETEs em operação na Noruega.....	31
Tabela 6: Eficiências de remoção típicas de Fósforo Total em ETEs em operação na Noruega.....	31
Tabela 7: Características básicas de um bom indicador.....	32
Tabela 8: Tecnologias utilizadas e capacidade de tratamento instalada em cada unidade de tratamento.	37
Tabela 9: Classificação de PRODES em função dos sistemas de tratamento empregados.	43
Tabela 10: Dados da estatística descritiva das concentrações do afluente e efluente da ETE Fortaleza.	62
Tabela 11: Metas de eficiência de remoção e para concentração dos parâmetros no efluente da ETE Fortaleza.	63
Tabela 12: Dados da estatística descritiva das eficiências de remoção da ETE Fortaleza.....	73
Tabela 13: Dados da estatística descritiva das concentrações do afluente e efluente da ETE Garcia.	90
Tabela 14: Metas de eficiência de remoção e para concentração dos parâmetros no efluente da ETE Garcia.....	91
Tabela 15: Estatística descritiva (1) da vazão tratada e das concentrações de DQO, DBO e Ptotal no efluente em função da implantação de melhorias.....	103
Tabela 16: Estatística descritiva (2) da vazão tratada e das concentrações de DQO, DBO e Ptotal no efluente em função da implantação de melhorias.....	103
Tabela 17: Dados da estatística descritiva das eficiências de remoção da ETE Garcia.....	104
Tabela 18: Estatística descritiva das eficiências de remoção de DQO, DBO e Ptotal em função da implantação de melhorias.....	114
Tabela 19: Fatores de contexto das ETEs Garcia e Fortaleza para aplicação do Sistema ID-ETE.	116
Tabela 20: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Proteção dos Corpos de Água.....	117

Tabela 21: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Sustentabilidade Ambiental.	119
Tabela 22: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Sustentabilidade de Infraestrutura.....	119
Tabela 23: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Sustentabilidade Econômica.	119
Tabela 24: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Relacionamento com a Comunidade.....	120
Tabela 25: Tabela-resumo da estatística descritiva dos IDs da ETE Fortaleza.	129
Tabela 26: Tabela-resumo da estatística descritiva dos IDs da ETE Garcia.	137
Tabela 27: Metas de eficiência de remoção e de concentração do efluente das ETES Garcia e Fortaleza.	138
Tabela 28: Tabela-resumo do comparativo das concentrações médias afluente e efluente; e atendimento às metas de concentração no efluente das ETES Garcia e Fortaleza.....	139
Tabela 29: Tabela-resumo do comparativo das eficiências de remoção e atendimento às metas das ETES Garcia e Fortaleza.	140
Tabela 30: Tabela-resumo das médias do IDs das ETES Fortaleza e Garcia.	142

1 - INTRODUÇÃO

Com a necessidade de investimentos massivos a serem empregados com objetivo de universalizar os serviços de esgotamento sanitário no Brasil e para atender ao aumento das exigências dos órgãos ambientais fiscalizadores, no sentido de garantir a preservação da qualidade dos recursos hídricos nacionais, as companhias de saneamento e empresas concessionárias brasileiras do setor de coleta e tratamento de esgoto sanitário e as prefeituras municipais (titulares destes serviços) sofrem pressão para preservar o equilíbrio financeiro, entre investimento para instalação, manutenção e operação dos sistemas e a arrecadação proveniente das taxas de prestação de serviço.

O aprimoramento das tecnologias de tratamento de esgoto sanitário consolidadas no campo técnico brasileiro e o desenvolvimento de novas tecnologias, no Brasil e no exterior, fornece para os engenheiros projetistas de estações de tratamento um rol diversificado de opções a serem consideradas quando da elaboração das concepções dos sistemas que melhor se adequem às características do esgoto, do ambiente onde este será tratado e à legislação ambiental pertinente em vigência. A configuração de sistemas de tratamento de esgoto constituída por reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo, seguida de um sistema do tipo lodos ativados; e a configuração composta por um sistema do tipo lodos ativados com aeração prolongada, tem se apresentado como soluções frequentes em sistemas de tratamento de esgoto no Brasil, pelo fato de estes sistemas apresentarem estabilidade e boa eficiência de tratamento dadas às condições climáticas do país. Existem, no entanto, tecnologias consolidadas em outros países ainda pouco utilizadas no Brasil, que podem apresentar boa adaptabilidade ao contexto climatológico e à qualidade do esgoto sanitário das cidades brasileiras. Uma destas tecnologias é o reator de biofilme com leito móvel (MBBR), desenvolvido no final da década de 80 na Noruega no intuito de permitir a ampliação de sistemas de lodos ativados sem exigir o aumento da área ocupada pelos reatores.

No Brasil, esta tecnologia e suas variantes ainda são pouco aplicadas no tratamento de esgoto sanitário, podendo-se citar os casos do município de Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro, ETE Paraíba e do município de Blumenau, estado de Santa Catarina, ETE Garcia.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente, por meio de indicadores de desempenho existentes,

o desempenho operacional de duas estações de tratamento de esgoto em operação no município de Blumenau, estado de Santa Catarina: a ETE Garcia, que opera com um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) seguido de um reator de biofilme com leito móvel (MBBR) e a ETE Fortaleza, que opera com sistema de Lodos Ativados com Aeração Prolongada.

Com a realização deste trabalho, foi possível verificar o desempenho operacional, no Brasil, de uma tecnologia amplamente empregada na Noruega (MBBR) e avaliar seu desempenho operacional quando comparado com um sistema de tratamento consolidado em território brasileiro há décadas.

Este trabalho se deu por meio de uma parceria entre o Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a empresa Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A., que cedeu gentilmente os dados operacionais das duas estações de tratamento, única e exclusivamente para desenvolvimento deste trabalho.

Este estudo contemplou a análise estatística dos dados operacionais das ETEs, a aplicação de um sistema de indicadores de desempenho existente e a avaliação comparativa dos indicadores calculados. Ao final do estudo, foram apresentados os resultados da avaliação dos indicadores de desempenho, de modo a explicitar de forma objetiva o resultado operacional entregue pelas duas estações de tratamento ao longo dos seus períodos de operação.

2 - OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar comparativamente o desempenho operacional de duas estações de tratamento de esgoto em operação no município de Blumenau/SC.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Analisar e comparar os parâmetros de eficiência de duas estações de tratamento de esgoto com diferentes sistemas de tratamento;
- Verificar a influência da sazonalidade e da implantação de melhorias no desempenho operacional das estações; e
- Avaliar comparativamente os indicadores de desempenho operacional das duas estações.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - ESGOTO SANITÁRIO

De acordo com von Sperling (1996) o esgoto sanitário é composto por esgoto doméstico, águas de infiltração e despejos industriais.

O esgoto doméstico origina-se da água de abastecimento utilizada nas residências, comércios e repartições públicas e posteriormente descartada, sendo o seu volume resultante da quantidade de água consumida, com uma taxa de retorno média de 80% desta (NUVOLARI, 2003; VON SPERLING, 2005).

Ainda segundo von Sperling (1996) as águas de infiltração são oriundas da infiltração na rede coletora de esgotos por meio de juntas defeituosas das tubulações, paredes de poços de visita, entre outros pontos. A taxa de infiltração varia de acordo com as juntas das tubulações utilizadas, o tipo de elementos de inspeção, o tipo de solo e a posição do lençol freático. Os valores médios são de 0,3 a 0,5 L/s.km.

Os despejos industriais são provenientes de indústrias que devido às características específicas, são admitidos na rede de esgoto. As contribuições dos esgotos industriais ocorrem em pontos específicos da rede coletora e suas características dependem do tipo da indústria.

Após coleta, transporte e tratamento do esgoto sanitário, a destinação final é realizada em cursos d'água, lagoas, oceano ou até mesmo solo, denominados corpos receptores (NUVOLARI, 2003).

Segundo von Sperling (2005) a poluição das águas é a adição de substâncias ou formas de energia que direta ou indiretamente alteram a natureza do corpo d'água de modo que seus usos são afetados negativamente. O esgoto doméstico consiste em aproximadamente 99,9% de água, sendo a fração residual de 0,01% composta por sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, e ainda, micro-organismos. Os elementos que compõem esta fração residual possuem potencial poluidor e daí advém a necessidade de tratamento do esgoto doméstico.

Para remoção dos compostos poluentes, ou de parte destes, de modo a tornar o esgoto passível de lançamento no corpo receptor, sem prejuízo da sua qualidade, utilizam-se estações de tratamento de esgoto. Uma estação de tratamento de esgoto é uma unidade ou estrutura projetada com o objetivo de tratar esgotos, na qual o homem, através de processos físicos e/ou biológicos, simula ou intensifica as condições de autodepuração que ocorrem na natureza, mas dentro de uma área

delimitada, onde supervisiona e exerce controle sobre os processos de depuração, antes de lançar o esgoto tratado no corpo receptor (LA ROVERE et. al., 2002 *apud* LINS, 2010)

3.1.1 - Composição do esgoto sanitário

A composição dos esgotos sanitários varia em função do uso ao qual a água foi submetida. Esses usos variam com o clima, as condições sociais e econômicas e os hábitos da população. No entanto, para o dimensionamento de Estações de Tratamento de Esgoto, normalmente não há interesse em determinar os vários compostos que formam o esgoto a ser tratado, pois os dados obtidos por meio de análises laboratoriais não serviriam como subsídio direto para a elaboração do projeto da estação e para sua operação, além do alto custo para realização destas análises. Assim, muitas vezes é preferível utilizar parâmetros indiretos para representar a qualidade do esgoto estudado. Estes parâmetros são divididos em três categorias: físicos, químicos e biológicos (VON SPERLING, 1996).

Da Tabela 1 à Tabela 3 são apresentados os principais parâmetros e as suas descrições com relação a esgotos sanitários.

Tabela 1: Principais parâmetros físicos de esgotos sanitários.

Parâmetro	Descrição
Temperatura	Superior à da água de abastecimento
	Varia conforme as estações do ano (mais estável que a temperatura do ar)
	Influencia a atividade microbiana
	Influencia a solubilidade dos gases
Cor	Influencia a viscosidade do líquido
	Esgoto fresco: cinza
Odor	Esgoto séptico: cinza escuro ou preto
	Esgoto fresco: odor oleoso, um pouco desagradável
	Esgoto séptico: odor fétido, bastante desagradável (devido ao gás sulfídrico e outros produtos da decomposição)
Turbidez	Esgoto industrial: odor característico
	Causada por grande variedade de sólidos em suspensão
	Esgotos mais frescos ou mais concentrados geralmente possuem maior turbidez

Fonte: Adaptado de von Sperling (2005).

Tabela 2: Principais parâmetros químicos de esgotos sanitários.

Parâmetro	Descrição
Sólidos Totais	Orgânicos e inorgânicos; suspensos e dissolvidos; sedimentáveis
<i>Suspensos</i>	Parte dos sólidos orgânicos e inorgânicos; ficam retidos quando passados em um filtro de papel com porosidade entre 0,45 e 2,0 µm
<i>Suspensos fixos</i>	Compostos minerais, não oxidáveis pelo calor, inertes, que compõem os sólidos suspensos
<i>Suspensos voláteis</i>	Compostos orgânicos, oxidáveis pelo calor, que compõem os sólidos suspensos
<i>Dissolvidos</i>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos não retidos em filtros de papel com porosidade entre 0,45 e 2,0
<i>Dissolvidos fixos</i>	Compostos minerais dos sólidos dissolvidos
<i>Dissolvidos voláteis</i>	Compostos orgânicos dos sólidos dissolvidos
<i>Sedimentáveis</i>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que sedimenta em 1 hora no cone Imhoff. Indicação aproximada da sedimentação em um tanque de sedimentação
Matéria Orgânica	Mistura heterogênea de diversos compostos orgânicos.
<i>DBO5</i>	Demanda Bioquímica de Oxigênio. Medida a 5 dias e a 20° C. Associada à fração biodegradável dos compostos orgânicos carbonáceos.
<i>DQO</i>	Demanda Química de Oxigênio. Representa a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea.
<i>DBO última</i>	Demanda Última de Oxigênio. Representa o consumo total de oxigênio, requerido pelos micro-organismos para a oxidação bioquímica da matéria orgânica.
<i>COT</i>	Carbono Orgânico Total. Medida direta da matéria orgânica carbonácea, determinada pela conversão do carbono orgânico em dióxido de carbono
Nitrogênio Total	Inclui o nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato. É um nutriente essencial para o crescimento microbiano em tratamento biológico de águas residuárias. O nitrogênio orgânico somado à amônia é chamado de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)
<i>Nitrogênio orgânico</i>	Nitrogênio na forma de proteínas, aminoácidos e ureia
<i>Amônia</i>	Produzida como primeiro estágio da decomposição do nitrogênio orgânico

Parâmetro	Descrição
<i>Nitrato</i>	Estágio intermediário da oxidação da amônia
<i>Nitrato</i>	Produto final da oxidação da amônia
Fósforo	Existe na forma orgânica e inorgânica. É um nutriente essencial para o crescimento microbiano em tratamento biológico de águas residuárias.
Fósforo orgânico	Combinado à matéria orgânica
Fósforo inorgânico	Ortofosfato e polifosfatos
pH	Indicador das características ácidas ou básicas do esgoto
Alcalinidade	Indicador da capacidade tampão do meio (resistência a variações do pH)
Cloretos	Provenientes da água de abastecimento e dos dejetos humanos
Óleos e Graxas	Fração da matéria orgânica solúvel em hexanos

Fonte: Adaptado de von Sperling (2005).

Tabela 3: Principais micro-organismos presentes em esgotos sanitários

Microrganismo	Descrição
Bactérias	Organismos unicelulares; presentes em diversas formas e tamanhos; principais responsáveis pela estabilização da matéria orgânica; algumas bactérias são patogênicas
Arqueas/Archaeas	Semelhantes às bactérias em tamanho e composição celular básica; diferentes das bactérias nos quesitos parede celular, material celular e composição do RNA; importantes em processos anaeróbios
Algas	Organismos autotróficos, contêm clorofila; importantes na produção de oxigênio nos corpos d'água e em alguns processos de tratamento, em lagos e reservatórios podem se proliferar em excesso, deteriorando a qualidade da água
Fungos	Organismos predominantemente aeróbios; importantes na decomposição da matéria orgânica; podem crescer sob condições de baixo pH
Protozoários	Organismos unicelulares, geralmente sem parede celular; majoritariamente aeróbios ou facultativos; se alimentam de bactérias, algas e outros micro-organismos; essenciais no tratamento biológico para manter o equilíbrio entre os diversos grupos; alguns são patogênicos

Microrganismo	Descrição
Vírus	Organismos parasitas formados por uma associação de material genético e estrutura proteica; patógenos e frequentemente de difícil remoção no tratamento de esgotos
Helmintos	Animais superiores; os ovos de helmintos presentes nos esgotos podem causar doenças

Fonte: Adaptado de von Sperling (2005).

Von Sperling (2005) destaca ainda os parâmetros de qualidade que merecem atenção especial no que se refere à qualidade dos esgotos sanitários: sólidos, indicadores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e indicadores de contaminação fecal.

3.2 - SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO POR PROCESSOS BIOLÓGICOS

3.2.1 - Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB)

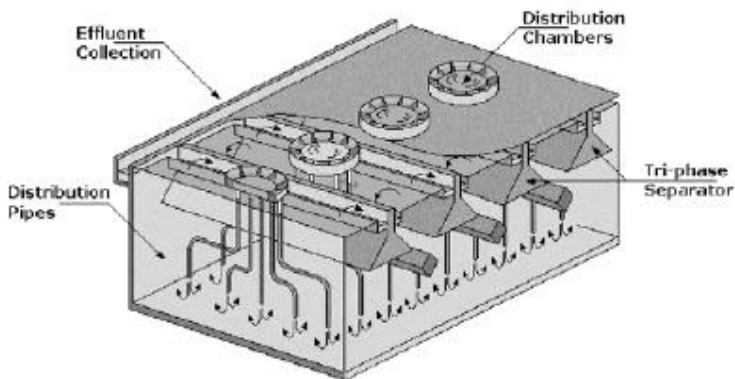
Os reatores anaeróbios tipo manta de lodo ou UASB tornaram-se consagrados no Paraná e no Brasil, ao serem utilizados de maneira extensiva no tratamento de esgotos para populações de 200 a 600.000 habitantes (AISSE; SOBRINHO, 2001). Os sistemas com reator UASB associado a processos de pós-tratamento tem sido projetados e operados como sistemas de alta taxa (alta capacidade), para os processos aeróbios. Assim, o objetivo concentra-se na remoção de compostos carbonáceos e de sólidos para posterior tratamento aeróbio.

Os reatores UASB possuem fluxo vertical e ascendente e são constituídos de uma câmara com volume dimensionado para acomodação, na parte mais inferior, de um leito de lodo com composição de 40 a 100gST/L, e de uma camada de manta de lodo, formada acima do leito de lodo, composta por concentrações de sólidos baixas e crescimento bacteriano disperso (concentração em torno de 1% a 3%), um separador trifásico. O separador é responsável pela destinação do efluente líquido, que sai pelas laterais superiores do reator, pela deflexão dos gases gerados no processo de digestão da matéria orgânica, que são destinados à tubulação específica de coleta no centro do reator UASB e para interceptação das partículas sólidas, de modo que estas percam energia e retornem para a camada de lodo. O esgoto afluente é distribuído por tubos instalados de modo a fornecer

uma distribuição uniforme no interior do reator (CHERNICHARO, 2010).

A Figura 1 mostra o esquema típico de um projeto de reator UASB.

Figura 1: Esquema típico de um projeto de reator UASB.



Fonte: Chernicharo (2007).

O funcionamento do reator UASB se dá da seguinte maneira: o esgoto afluente entra continuamente pelo fundo do reator através de um sistema de distribuição, ascende pela manta de lodo onde ocorre a digestão anaeróbia, alcançando finalmente o decantador. Abaixo do decantador o esgoto e gás são separados (separador trifásico), garantindo a sedimentação de partículas, permitindo que o lodo retorne para a parte inferior do reator, e a captação do biogás (CHERNICHARO, 2010).

Estudos experimentais demonstram que o tempo de detenção hidráulica mínimo a ser considerado em projetos de reatores UASB é de 4,8 h, recomendando-se a faixa de 6h a 16h, de modo a manter a taxa de aplicação volumétrica abaixo de $5,0 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{d}$.

Para tratamento de esgoto doméstico, o reator é dimensionado utilizando critérios hidráulicos, com cargas orgânicas volumétricas na faixa de $2,5$ a $3,5 \text{ kgDQO}/\text{m}^3.\text{d}$ (CAMPOS, 1999).

Segundo Chernicharo (2010), de forma geral, os reatores UASB apresentam as seguintes vantagens em relação aos sistemas aeróbios, especialmente quando aplicados em regiões de clima tropical:

- Sistema compacto;
- Custos de instalação e operação baixos;
- Baixa produção de lodo;
- Baixo consumo de energia;
- Eficiências de remoção de DBO e DQO consideráveis, na faixa de 65% a 75%; e
- Excesso de lodo gerado com alta concentração e bom nível de secagem.

Por outro lado, possuem desvantagens como:

- Possibilidade de emissão de odores desagradáveis;
- Baixa capacidade de tolerância a cargas tóxicas; e
- Necessita de uma etapa de pós-tratamento.

3.2.2 - Lodos Ativados

De acordo com Metcalf & Eddy (1991, tradução nossa), os objetivos do tratamento biológico de águas residuárias são a remoção de sólidos coloidais não sedimentáveis e a estabilização da matéria orgânica. Para esgoto sanitário, o principal objetivo é a redução da quantidade de matéria orgânica e, em muitos casos, de nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Esses objetivos são atingidos pela atividade de diversos micro-organismos, principalmente bactérias.

Entre os processos biológicos aeróbios, o sistema mais utilizado para tratamento de águas residuárias, a nível mundial, é o processo de lodos ativados. Este sistema é utilizado em situações em que é necessária alta qualidade do efluente e disponibilidade de área limitada, estando presente em torno de 90% das ETEs de médio e grande portes nos países desenvolvidos (CAMPOS, 1994 *apud* MENDONÇA, 2002; VON SPERLING, 1997). No entanto, o sistema de lodos ativados é mais mecanizado do que outros sistemas de tratamento, envolvendo uma operação mais sofisticada e gerando alto consumo de energia elétrica para aeração (VON SPERLING, 1997).

O processo de lodos ativados adveio da demonstração de que a simples aeração não possibilitava o completo tratamento dos esgotos, e que era necessário provocar a atividade dos micro-organismos. Assim descobriu-se que retornando o lodo sedimentado no decantador secundário para o tanque de aeração, a atividade dos micro-organismos era garantida (IMHOFF, 1966 *apud* SANTOS, 2012).

O sistema de lodos ativados fundamenta-se na capacidade de bactérias, protozoários, material orgânico dissolvido, coloides, pequenos particulados e material inorgânico se aglomerarem, formando flocos em suspensão no reator, de modo a facilitar o processo de degradação do material orgânico biodegradável presente nos esgotos sanitários. Para a obtenção de um efluente final clarificado, é essencial a conservação da biomassa em forma de flocos (BITTON, 2005 *apud* SANTOS, L. S., 2012).

As unidades componentes do sistema de lodos ativados de fluxo contínuo são um tanque de aeração, também chamado de reator, um decantador secundário, recirculação do lodo e remoção do excesso de lodo produzido no reator. O efluente do pré-tratamento ou do tratamento primário e o lodo de recirculação, são conduzidos para o tanque de aeração, onde é feita a aeração e mistura. Neste tanque ocorrem as reações de remoção de substrato. No decantador secundário ocorre a sedimentação de sólidos (biomassa), resultando na saída do efluente clarificado. A maior parte do lodo sedimentado no fundo do decantador secundário é recirculada ao tanque de aeração. A parcela residual do lodo (lodo excedente) é escoada para tratamento e/ou destinação final. A recirculação do lodo excedente garante elevada eficiência ao processo, devido à permanência dos sólidos em tempo superior à permanência da massa líquida, permitindo que a biomassa ativa metabolize praticamente toda a matéria orgânica do esgoto (VON SPERLING, 1997).

Segundo von Sperling (2005), o sistema de lodos ativados possui diversas variantes, de acordo com o critério de classificação utilizado. Dentre elas as principais são:

- De acordo com a idade de lodo ou relação Alimento/Microrganismo (A/M):
 - Lodos ativados convencional: idade de lodo reduzida (entre 4 e 10 dias) e alta relação A/M (entre 0,25 e 0,5 kgDBO₅/kgSSV.d); e
 - Aeração prolongada: idade de lodo elevada (entre 18 e 30 dias) e baixa relação A/M (entre 0,07 e 0,15 kgDBO₅/kgSSV.d);
- De acordo com o fluxo:
 - Fluxo contínuo; e
 - Fluxo intermitente (reator em bateladas sequenciais);
- De acordo com o estágio biológico do esgoto afluente:
 - Esgoto bruto;

- Efluente de decantador primário;
- Efluente de reator anaeróbio; e
- Efluente de outro processo de tratamento de esgoto.

Na Tabela 4 é apresentado um comparativo entre as principais características para diferentes aplicações de sistemas de lodos ativados. A idade de lodo e a existência de pré-tratamento são os fatores principais para diferenciação das variáveis entre as modalidades comparadas.

Tabela 4: Principais características operacionais dos sistemas de lodos ativados e suas variantes.

Item Geral	Item Específico	Modalidade		
		Lodos Ativados Convencional	Lodos Ativados Aeração Prolongada	UASB seguido de Lodos Ativados
Idade do Lodo	Idade do Lodo (d)	4-10	18-30	6-10
Relação A/M	Relação A/M (kg DBO/kg SSVTA.d)	0,25-0,5	0,07-0,15	0,25-0,4
	DBO (%)	85-95	93-98	85-95
Eficiência de Remoção	DQO (%)	85-90	90-95	83-90
	Sólidos em suspensão (%)	85-95	85-95	85-95
	Amônia (%)	85-95	90-95	75-90
	Nitrogênio (%)	25-30	15-25	15-25
	Fósforo (%)	25-30	10-20	10-20
	Coliformes (%)	60-90	70-95	70-95
Área requerida	Área (m ² /hab)	0,2-0,3	0,25-0,35	0,2-0,3
Volume total	Volume (m ³ /hab)	0,1-0,15	0,1-0,15	0,1-0,12
Energia	Potência Instalada (W/hab)	2,5-4,5	3,5-5,5	1,8-3,5
	Consumo Energético (kWh/hab.ano)	18-26	20-35	14-20

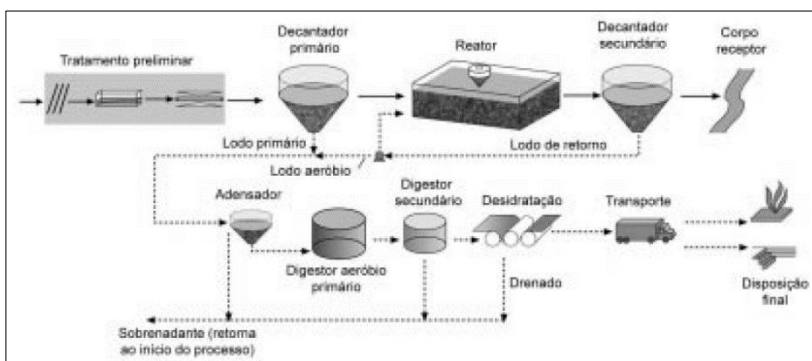
Item Geral	Item Específico	Modalidade		
		Lodos Ativos Convencional	Lodos Ativos Aeração Prolongada	UASB seguido de Lodos Ativos
Volume de Lodo	A ser tratado (L lodo/hab.dia)	3,5-8	3,5-5,5	0,5-1
	A ser disposto (L lodo/hab.dia)	0,1-0,25	0,1-0,25	0,05-0,15
Massa de lodo	A ser tratado (g ST/hab.dia)	60-80	40-45	20-30
	A ser disposto (g ST/hab.dia)	30-45	40-45	20-30

Fonte: Adaptado de von Sperling (2002).

3.2.3 - Lodos Ativos Convencional (fluxo contínuo)

O sistema de lodos ativados convencional é composto por um decantador primário, à montante do tanque de aeração, com a função de remover parcela da matéria orgânica (em suspensão) dos esgotos. Esta configuração proporciona economia de energia com aeração e reduz o volume do reator biológico. Assim, o sistema convencional tem como parte integrante o tratamento primário, como é apresentado na Figura 2 (VON SPERLING, 1997).

Figura 2: Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional.



Fonte: Adaptado de von Sperling et al. (2001).

A idade do lodo neste sistema é geralmente de 4 a 10 dias, o tempo de detenção hidráulica no reator oscila entre 6 e 8 horas e a relação A/M fica na faixa de 0,25 a 0,5 kgDBO/kgSSVTA.d. Para essa faixa de idade do lodo, a biomassa retirada do sistema no lodo

excedente exige uma etapa de estabilização no tratamento do lodo pelo fato de ainda conter elevada concentração de matéria orgânica. A instalação de digestores pode suprir esta função de estabilização. Para reduzir o volume de lodo a ser estabilizado separadamente, o lodo excedente deve ser previamente adensado, com objetivo de remover uma parcela da umidade, diminuindo assim o volume de lodo a ser tratado. (VON SPERLING, 1997).

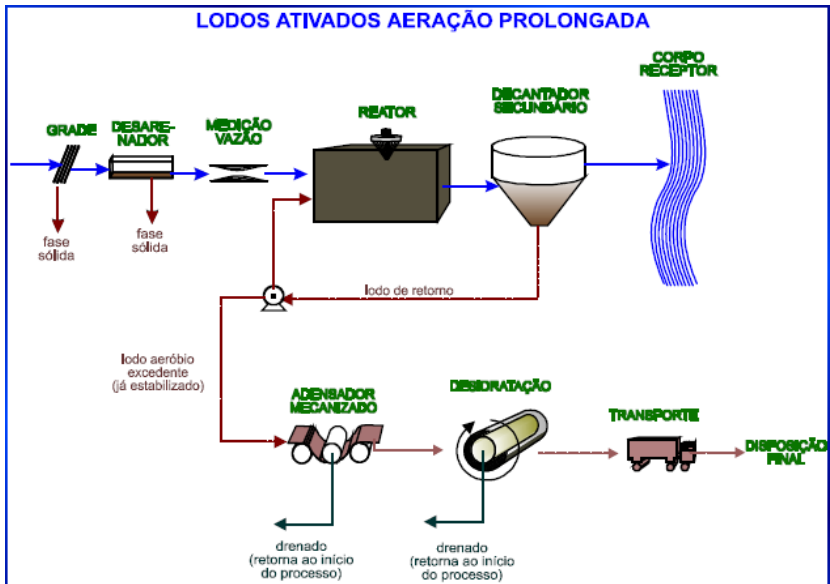
3.2.4 - Aeração Prolongada (fluxo contínuo)

Nesta variante, a biomassa permanece no tanque de aeração por um longo período, na ordem de 18 a 30 dias, mas recebe a mesma carga de DBO do esgoto bruto que o sistema de lodos ativados convencional. Assim, há menos substrato disponível para as bactérias, reduzindo a relação A/M para 0,07 a 0,15 kgDBO/kgSSVTA.d. Deste modo, o montante de biomassa é maior que no sistema convencional, o volume do reator deve ser maior e o tempo de detenção hidráulica fica em torno de 16 a 24 horas. Como há menos matéria orgânica disponível por unidade de volume do tanque de aeração e por unidade de biomassa no reator, as bactérias começam a usar matéria orgânica biodegradável própria para sobreviver. A matéria celular orgânica das bactérias é então transformada em dióxido de carbono e água, ou seja, o lodo passa por um processo de estabilização aeróbia, ainda no tanque de aeração. Deste modo, o sistema de aeração prolongada não necessita de unidade de estabilização de lodo. A unidade de decantação primária também costuma ser desnecessária, visto que sua instalação geraria lodo com características diferentes do lodo antigo no reator aerado, exigindo assim uma unidade de estabilização de lodo específica (VON SPERLING, 1997).

Na Figura 3 está ilustrado o esquema típico de um sistema de tratamento com reator de lodos ativados aeração prolongada.

A consequência da simplificação do sistema é o acréscimo de energia demandada no processo. Por outro lado, esta configuração permite que a biomassa seja praticamente toda consumida no reator aerado, reduzindo assim os custos com tratamento e disposição do lodo (VON SPERLING, 1997).

Figura 3: Esquema típico de sistema de tratamento com tratamento preliminar, reator de lodos ativados aeração prolongada e tratamento do lodo.



Fonte: von Sperling (2014).

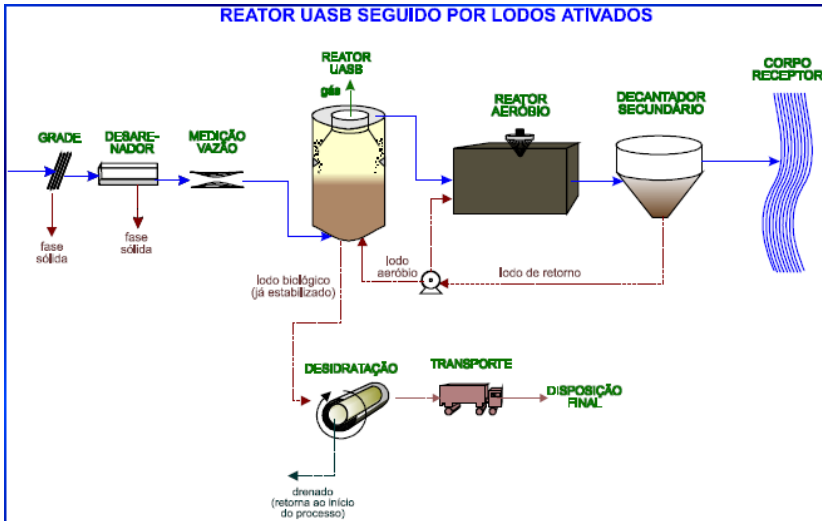
3.2.5 - Lodos Ativos como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios (UASB)

De acordo com von Sperling (1997) a aplicação do sistema de lodos ativados como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) tem se mostrado como uma boa alternativa para tratamento de esgoto em regiões de clima quente. Nesta variante é instalado um reator anaeróbio do tipo UASB no lugar do decantador primário. O excesso de lodo gerado no tanque de aeração, com uma idade de lodo na faixa de 6 a 10 dias, é recirculado para o reator UASB, onde sofre adensamento e digestão juntamente com o lodo anaeróbio. Como a produção do excesso de lodo é muito lenta se comparada com a entrada do afluente do reator UASB, o sistema não sofre pressão com a carga de lodo adicional. O sistema possui configuração simplificada e o lodo de saída do reator UASB possui características excelentes, não necessitando de adensamento ou

digestão adicional. Somente a etapa de desidratação do lodo continua sendo exigida.

Na Figura 4 pode-se observar o esquema típico de um sistema composto por reator UASB seguido de lodos ativados convencional.

Figura 4: Esquema típico de sistema de tratamento composto por tratamento preliminar, reator UASB, lodos ativados convencional e tratamento de lodo.



Fonte: von Sperling (2014).

Em comparação com o sistema de lodos ativados convencional, esta variante apresenta as seguintes vantagens (VON SPERLING, 1997):

- Redução na produção de lodo na faixa de 60 a 70%, com um lodo mais concentrado;
- Redução do consumo de energia, pois aproximadamente 70% da DBO é removida no reator UASB;
- O volume total das unidades de tratamento do sistema UASB seguido de lodos ativados é menor que o volume total das unidades requeridas no sistema de lodos ativados convencional;
- Redução no consumo de produtos químicos para desidratação do lodo em decorrência da redução do volume de lodo gerado;

- Simplificação do processo de tratamento e da operação com a exclusão do decantador primário, do adensador e digestor de lodo; e
- Menor necessidade de equipamentos a serem instalados, visto que com a instalação do reator UASB não há necessidade de equipamentos eletromecânicos nesta etapa, nem decantador primário, adensadores ou digestores de lodo.

Como desvantagem, destaca-se que o sistema possui menor capacidade de remover nutrientes (N e P). Isto se deve à alta remoção de matéria orgânica no reator UASB, com quase nenhuma remoção de nutrientes, a relação entre as concentrações de NTK e DQO; e fósforo e DQO não permitem a ocorrência da desnitrificação e da remoção de fósforo.

3.2.6 - Reator de Biofilme com Leito Móvel (*Moving Bed Biofilm Reactor* – MBBR)

Existem diversos tipos de sistemas de tratamento de esgoto com biofilme, como os biofiltros percoladores, biodiscos, biofiltros submersos de leito fixo, biofiltros de leito granular e reatores de leito fluidizado.

Os sistemas com biofilme apresentam as seguintes vantagens e desvantagens listadas abaixo (ØDEGAARD et al., 1994, 1999, tradução nossa).

Vantagens:

- Permitem a operação com concentração elevada de lodo;
- Possuem grande flexibilidade na seleção de métodos de separação de sólidos suspensos do efluente, pois, em geral, a concentração da biomassa a ser separada, é pelo menos 10 vezes menor que em um reator de lodos ativados convencional e ao mesmo tempo, dependendo da configuração utilizada, a taxa de aplicação do efluente será mais baixa, pois a recirculação de lodo, apesar de possível, não é necessária;
- A biomassa aderida aos meios-suporte pode ser mais específica e ativa, resultando em uma concentração de organismos relevantes mais elevada em qualquer ponto do sistema, por não haver retorno de biomassa e pelo fato de o

ambiente protegido do biofilme permitir o desenvolvimento de organismos que requerem alta idade de lodo.

Desvantagens:

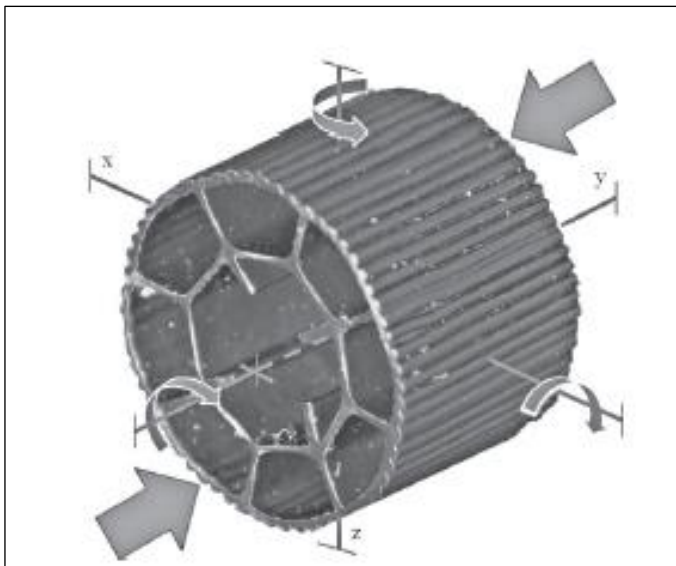
- Filtro percolador: solução barata com baixa capacidade volumétrica de tratamento e tendência de entupimento do leito filtrante, formação de canais preferenciais e problemas com odor;
- Biodiscos: apresentam falhas mecânicas frequentes e são mais adequados para aplicação em pequena escala;
- Biofiltros submersos de leito fixo: é difícil obter uma distribuição balanceada da carga por toda a superfície da biomassa, além da ocorrência de entupimento e formação de canais preferenciais;
- Biofiltros de leito granular: não são operados continuamente devido à necessidade de retrolavagem;
- Reatores de leito fluidizado: são hidráulicamente instáveis e notadamente difíceis de operar.

O reator de biofilme com leito móvel, ou MBBR, foi desenvolvido na Noruega no final da década de 80 e início da década de 90 com objetivo de unir as vantagens dos sistemas de tratamento com biofilme, minimizando suas desvantagens (RUSTEN, et al., 2005, tradução nossa). Atualmente, existem mais de 500 estações de tratamento de esgoto de larga escala que utilizam a tecnologia MBBR, em 50 diferentes países do mundo, tanto para tratamento de esgoto doméstico quanto para aplicação industrial (ADABJU, 2013, tradução nossa).

O MBBR utiliza como material suporte elementos plásticos de baixa densidade imersos na massa líquida para crescimento de biomassa, mantidos no reator pelo uso de grades ou peneiras. O suporte possui três eixos de rotação. O efluente a ser tratado flui pelos canais formados no interior do suporte e na camada superficial do seu exterior, como indicado na Figura 5. Pode ser aplicado tanto em ambiente anóxico (desnitrificação) quanto aeróbio (remoção de matéria orgânica), sendo a agitação dos reatores obtida, em tanques aeróbios, pelo sistema de aeração difusa utilizada para o fornecimento de ar para o processo, e as unidades anóxicas agitadas por meio de misturadores submersíveis de baixa velocidade. O sistema MBBR não depende de recirculação de biomassa em suspensão para alcançar a eficiência de tratamento objetivada. A quantidade de biomassa aderida aos suportes móveis é

suficiente para a degradação desejada dos compostos poluentes (FUJII, 2011).













Figura 5: Ilustração de suporte plástico para biofilme típico para MBBR disponível no mercado.






Fonte: McQuarrie; Boltz (2011).

Atualmente existem disponíveis no mercado internacional diversos tipos de meios-suporte para aplicação em reatores MBBR e suas variantes. Na Figura 6 estão apresentados os produtos oferecidos pelos principais fabricantes deste material no mundo.

Figura 6: Características dos meios-suporte, para reator MBBR, disponíveis no mercado, conforme especificado pelos fabricantes.

Fabricante	Nome	Área Específica Superficial Máx.(m ² /m ³)	Dimensões (Profundidade; Diâmetro) mm	Imagem do Meio Suporte
Veolia Inc.	AnoxKaldnes™ K1 ou K1Heavy	500	7; 10	
	AnoxKaldnes™ K3	500	12; 25	
	AnoxKaldnes™ Biofilm Chip (M)	1.200	2; 48	
	AnoxKaldnes™ Biofilm Chip (P)	900	3; 45	
	AnoxKaldnes™ Matrix™ Sol	800	4; 25	
Headworks BIO (Autorizado por Infilco Degremont, Inc.)	ActiveCell™ 450	402	15; 22	
	ActiveCell™ 515	485	15; 22	
	ActiveCell™ 920	680	15; 15; 10 (comprimento; largura; altura)	
AqWise	ABC4™	600	14; 14	
	ABC5™	650	12; 12	
Entex Technologies Inc.	Bioportz™	589	14; 18	
Siemens Water Technologies Corp.	CM-10D™	750	9; 13	

Fabricante	Nome	Área Específica Superficial Máx.(m ² /m ³)	Dimensões (Profundidade; Diâmetro) mm	Imagem do Meio Suporte
Biowater Technology	BWT15™	828	14,5; 14,5; 5 (comprimento; largura; altura)	
	BWTX™	640	14,5; 14,5; 8,2 (comprimento; largura; altura)	
	BWTS™	650	14,5; 18,5; 7,3 (compr.; larg.; alt.)	

Fonte: adaptado de McQuarrie, Boltz (2011).

Um MBBR pode ser um reator individual ou configurado na forma de diversos reatores em série. Geralmente, cada MBBR possui uma relação comprimento/largura na faixa de 0,5/1 a 1,5/1. Plantas com uma relação comprimento/largura maiores que 1,5/1 podem resultar em má distribuição dos suportes plásticos de biofilme no biorreator. Como resultado, o sistema fica sujeito à uma baixa taxa de transferência de oxigênio e baixa capacidade hidráulica nas telas de retenção dos suportes plásticos de biofilme (Figura 7) (MCQUARRIE; BOLTZ, 2011, tradução nossa).

Figura 7: Grades de retenção dos meios-suporte em reator MBBR



Fonte: McQuarrie; Boltz (2011).

Na imagem da esquerda pode-se observar telas de retenção cilíndricas horizontais instaladas sobre uma malha de difusão de ar de bolhas médias. Na imagem da direita, painel com telas de retenção verticais instaladas paralelamente à parede do reator, com aeração realizada por meio de um único tubo com diversos orifícios (MCQUARRIE; BOLTZ, 2011).

Um reator MBBR possui um volume de suportes plásticos máximo de 67% do volume líquido do reator. As telas de retenção dos suportes plásticos são instaladas geralmente por meio de uma parede e permitem que o efluente escoe para a próxima etapa de tratamento. A espessura da camada de biofilme é controlada pelo fluxo de ar ou pela energia mecânica da mistura, não necessitando de interrupções para manutenção do reator. As considerações necessárias para a seleção da configuração do sistema MBBR a ser utilizada incluem os objetivos específicos da planta, as características da água residuária, o layout da planta, a configuração do reator existente (no caso de uma melhoria operacional), a hidráulica do sistema, o design do tratamento existente (se aplicável), e o potencial de melhoramento dos tanques existentes (MCQUARRIE, J. P.; BOLTZ, J. P., 2011, tradução nossa).

As plantas de MBBR tem tido bom desempenho operacional para o tratamento de esgoto doméstico e industrial com elevada carga orgânica aplicada e altas concentrações de substrato (ØDEGAARD et al., 2004, tradução nossa). A turbulência causada pelo fluxo de ar elevado, necessário para manter uma concentração de 3 mg O₂/L em reatores aeróbios de alta taxa, tem sido mais que suficientes para manter uma camada de biofilme razoavelmente fina e prevenir o entupimento dos meios suportes (RUSTEN et al., 2005, tradução nossa).

Os reatores MBBRs projetados para realizar a oxidação do carbono podem ser classificados como reatores de baixa, média ou alta taxa. MBBRs de baixa taxa tem capacidade para promover nitrificação. Reatores de média taxa são geralmente dimensionados para uma aplicação de carga orgânica na faixa de 5 a 10 g DBO₅/m².d (temperatura de 10 C). Sistemas com taxas de aplicação maiores requerem separação da fase sólido-líquido com técnicas quimicamente avançadas e/ou flotação. Na ausência de dados decorrentes de observação de estações em escala piloto ou de modelos matemáticos representativos, MBBRs de alta taxa geralmente são projetados para receber cargas de DBO₅ filtrada na faixa de 15 a 20 g/m².d (temperatura de 15 C). Isso corresponde a uma carga de DBO₅ total na faixa de 45 a 60 g/m².d (temperatura de 15 C) (ØDEGAARD et al., 2006, tradução nossa). As altas taxas de aplicação resultam em biorreatores com tempo de detenção hidráulica (TDH) muito baixos, exigindo assim a consideração do risco de curto-circuito. Assim, reatores de alta taxa devem ser projetados com configuração tal que preveja dois reatores em série de modo a evitar o curto-circuito. Nestes casos, o TDH do sistema

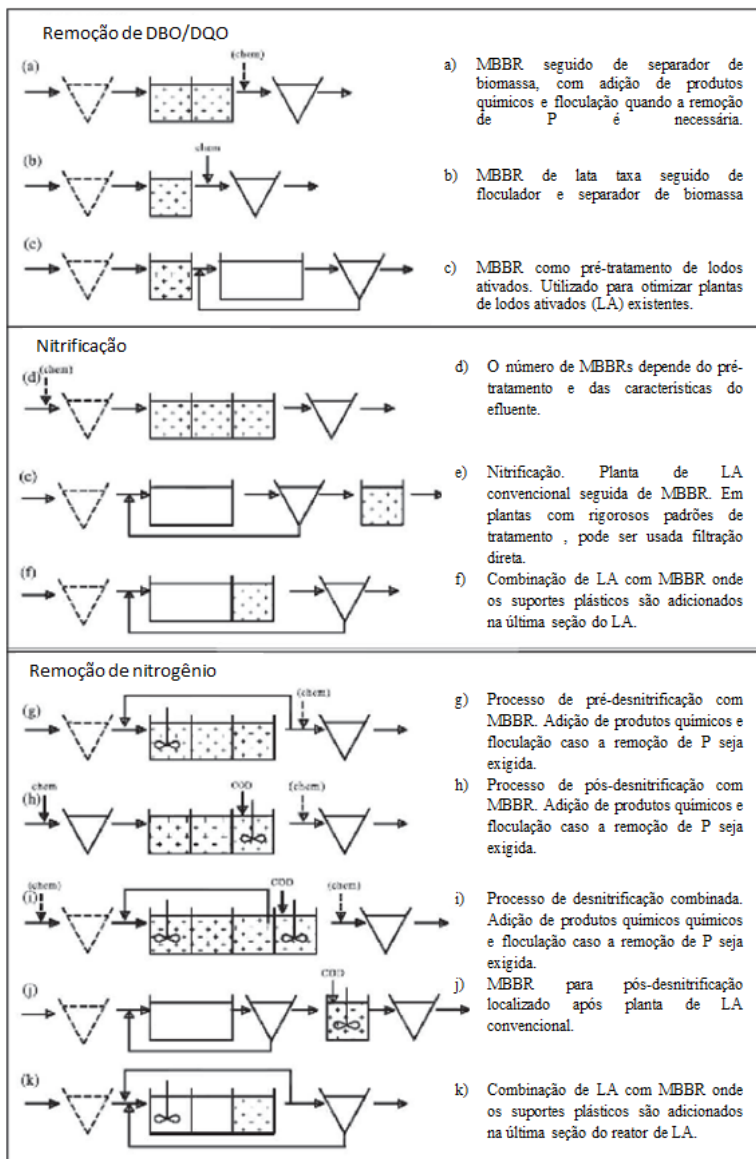
não deve ser menor que 30 minutos (MCQUARRIE; BOLTZ, 2011, tradução nossa).

No que se refere ao processo de nitrificação nos MBBRs, como em todos os reatores do tipo biofilme, a taxa de oxidação do nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) é influenciada pelos seguintes fatores: carga orgânica aplicada, concentração de $\text{NH}_3\text{-N}$ na fase líquida, concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida, temperatura, pH e alcalinidade. A oxidação do nitrogênio amoniacal ocorre nos reatores MBBR configurados nas formas *d*, *e* e *f* apresentadas na Figura 8 (MCQUARRIE; BOLTZ, 2011, tradução nossa). O processo de nitrificação é arbitrariamente definido como o processo de oxidação de $\text{NH}_3\text{-N}$ em um reator de biofilme tratando efluente secundário que obedeça ao seguinte critério: $\text{DBO}_5:\text{NTK} \leq 1$ e $\text{DBO}_5 \leq 12\text{g/m}^3$ (MCQUARRIE; BOLTZ, 2011 *apud* BOLTZ et al, 2010, tradução nossa).

Em relação à desnitrificação nos MBBRs, a taxa de desnitrificação no reator é influenciada pela área de biofilme, pelo tipo de fonte externa de carbono, pela relação carbono:nitrogênio na fase líquida, pela temperatura do efluente, pela concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida e pela concentração de macronutrientes na fase líquida. A remoção de nitrogênio utilizando MBBR pode ser atingida utilizando as configurações *g* até *k* da Figura 8, por meio de pré-desnitrificação ou pós-desnitrificação (MCQUARRIE; BOLTZ, 2011, tradução nossa).

Na Figura 8 os tanques retangulares com cruces são MBBRs e os retangulares com misturadores são anóxicos.

Figura 8: Fluxogramas típicos de sistemas de tratamento de esgoto sanitário com MBBR.



Fonte: adaptado de Ødegaard et al. (2004), tradução nossa.

Estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6 as eficiências de remoção típicas de estações de tratamento de esgoto em operação na Noruega, que utilizam o processo MBBR na remoção de matéria orgânica (DBO5 e DQO) e Fósforo Total. Importante frisar que a remoção de fósforo é efetuada principalmente por tratamento quimicamente avançado.

Tabela 5: Eficiências de remoção típicas de DBO5 e DQO em ETEs em operação na Noruega

ETE ¹	DBO5			DQO		
	Afluyente g/m ³	Efluyente g/m ³	Eficiência (%)	Afluyente g/m ³	Efluyente g/m ³	Eficiência (%)
Steinholt ²	342,28	8,6	97,5	833	46	94,5
Tretten ³	310,46	3,44	98,9	-	-	-
Svarstad ³	-	-	-	403	44	89,1
Frya ³	155,66	4,3	97,2	-	-	-

¹ Todas as ETEs listadas estão em operação na Noruega

² Dados de 1996 a 1997

³ Dados de 2000 a 2002

Fonte: adaptado de McQuarrie, Boltz (2011) *apud* Ødegaard et al. (2004), tradução nossa.

Tabela 6: Eficiências de remoção típicas de Fósforo Total em ETEs em operação na Noruega

ETE ¹	Fósforo Total		
	Afluyente g/m ³	Efluyente g/m ³	Eficiência (%)
Steinholt ²	7,1	0,3	95,8
Tretten ³	7,3	0,1	98,6
Svarstad ³	5,1	0,25	95,1
Frya ³	8,6	0,21	97,6

¹ Todas as ETEs listadas estão em operação na Noruega

² Dados de 1996 a 1997

³ Dados de 2000 a 2002

Fonte: adaptado de McQuarrie, Boltz (2011) *apud* Ødegaard et al. (2004), tradução nossa.

3.3 - INDICADORES DE DESEMPENHO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Os indicadores de desempenho aplicados ao setor de saneamento são medidas quantitativas da eficiência e da eficácia de um órgão gestor relativas a aspectos específicos da atividade desenvolvida ou do comportamento de sistemas. Estas medidas tangem até que ponto os recursos disponíveis são utilizados de modo otimizado para a produção do serviço e até que ponto os objetivos de gestão, definidos realisticamente, foram cumpridos (ALEGRE et al., 2000 *apud* BARROS, 2010).

De modo a terem uma aplicação adequada, cumprindo assim a função de permitir de fato a avaliação do desempenho das Estações de Tratamento de Esgoto, von Sperling (2010) apresenta as características mínimas que os indicadores devem possuir, conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7: Características básicas de um bom indicador.

Característica	Explicação
1. Claro, compreensível e de interesse	Evitar incertezas em relação ao que é bom ou ruim, fácil de entender, com unidades que tenham sentido, e sugestivos para possível utilização
2. Relevante e representativo	Politicamente relevante para todos os participantes do sistema
3. Viável	Custo adequado de aquisição e processamento de dados e comunicação
4. Suficiente	Fornecer a medida certa da informação
5. Fidedigno	Deve representar os aspectos de maneira fidedigna a fim de evitar distorções
6. Temporal	Oportuno temporalmente, integrado com o planejamento
7. Adequado na escala	Adequado aos diferentes usuários potenciais
8. Democrático	Não devem ser determinados apenas por um pequeno grupo de especialistas e sim por lideranças políticas e por pessoas da comunidade
9. Medida física	Balancear unidades físicas e monetárias
10. Preventivo e proativo	Deve conduzir para a mudança, fornecendo informação em tempo para a tomada de decisão
11. Não deve ser estanque	Deve estar inserido num processo de melhoria contínua, passível de discussão, aprendizado e mudança

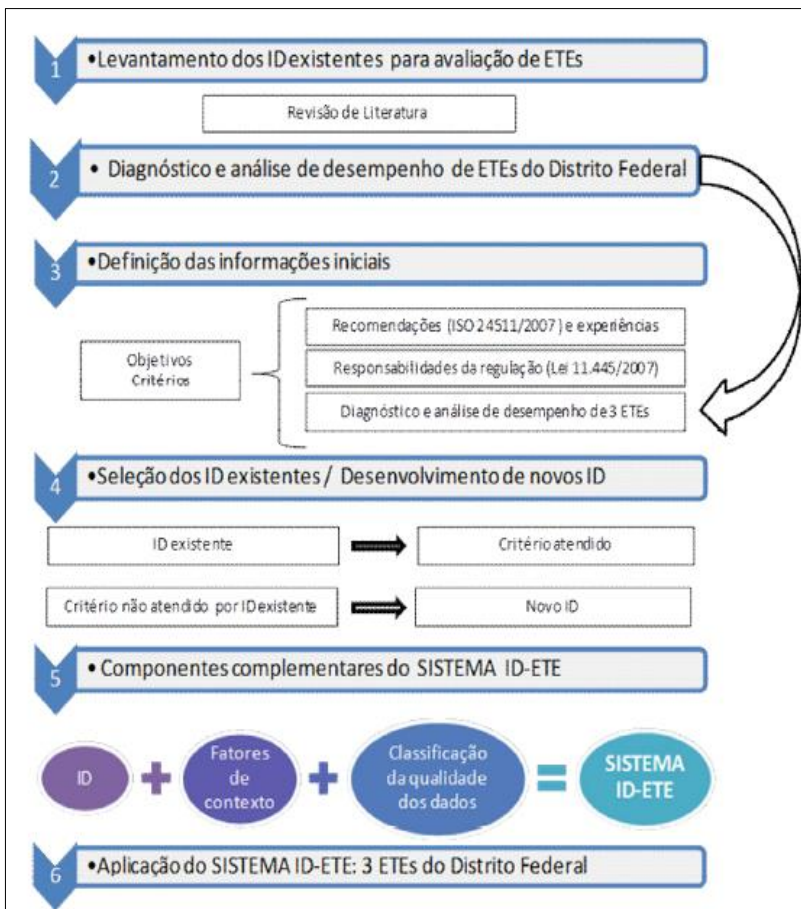
Fonte: adaptado de Meadows (1998), Malheiros et al. (2006), Molinari (2006) *apud* von Sperling (2010)

Em estudo realizado por Barros (2013), foi realizado um levantamento bibliográfico de indicadores de desempenho (IDs) existentes e consolidados por meio de pesquisas e aplicações práticas. Na sequência, foram definidos os objetivos do sistema de indicadores a ser criado e seus critérios de avaliação, com base no projeto denominado Desenvolvimento de Metodologia para a Avaliação de Desempenho de Estações de Tratamento de Água e Esgotos no Distrito Federal, desenvolvido pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA) em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e com a Universidade de Brasília (UnB). Os objetivos e critérios dos indicadores estão apresentados na lista abaixo.

- Proteção dos corpos de água: Controle do monitoramento, Eficiência de remoção, Controle de by-pass, Metas de lançamento;
- Sustentabilidade Ambiental: Controle de resíduos e gases, Eficiência no uso de recursos;
- Sustentabilidade da Infraestrutura: Adequação com a capacidade de operação;
- Sustentabilidade Econômica: Eficiência econômica; e
- Relacionamento com a comunidade: Informações.

Em seguida, Barros (2013) realizou a associação entre os IDs relevantes e os critérios estabelecidos. Assim, foram identificados os IDs que possibilitariam a avaliação de estações pelo viés de uma agência reguladora. A metodologia completa do estudo de Barros (2013) está apresentada na Figura 9.

Figura 9: Metodologia aplicada por Barros (2013).



Fonte: Barros (2013).

Como resultado da pesquisa de Barros (2013) foram organizados na forma do Sistema ID-ETE os indicadores apresentados na Figura 10.

Figura 10: Objetivos, critérios e IDs componentes do Sistema ID-ETE

Objetivo	Critério	ID – ETE	
		Nº de IDs	ID
Proteção dos corpos de água	Controle do monitoramento	4	EPA-01 / EPA-02 / EPA-03 / EPA-04
	Eficiência de remoção	5	EPA-05 / EPA-06 / EPA-07 / EPA-08 / EPA-9
	Controle de <i>by-pass</i>	1	EPA-10
	Metas de lançamento	13	EPA-11 / EPA-12 / EPA-13 / EPA-14 / EPA-15 / EPA-16 / EPA-17 / EPA-18 / EPA-19 / EPA-20 / EPA-21 / EPA-22 / EPA-23
Sustentabilidade Ambiental	Controle de resíduos e gases	3	ESA-01 / ESA-02 / ESA-03
	Eficiência no uso de recursos	3	ESA-04 / ESA-05 / ESA-06
Sustentabilidade da Infraestrutura	Adequação com a capacidade	2	ESI-01 / ESI-02
	Operação	1	ESI-03
Sustentabilidade Econômica	Eficiência econômica	5	ESE-01 / ESE-02 / ESE-03 / ESE-04 / ESE-05
Relacionamento com a comunidade	Informações	2	ERC-01 / ERC-02

Fonte: Barros (2013).

Cada ID é apresentado por meio de sua definição, nome, código relacionado ao objetivo, descrição de seu cálculo (numerador e denominador) e de sua unidade. Adicionalmente são incorporadas informações de frequência de cálculo do ID ou frequência de obtenção dos dados necessários em seu cálculo e o sentido de preferência do indicador, que traz a informação de como devem ser interpretados os valores dos IDs (crescente: quanto maior o valor do ID, melhor o desempenho da estação; decrescente: quanto menor, melhor o desempenho).

A codificação dos IDs é composta por uma sequência de três letras seguida por dois algarismos. A primeira letra representa o tipo de estação a que o ID se refere, sendo a letra “E” para “ETE”; a segunda e terceira letras relacionam-se com o objetivo do ID; e os dois algarismos compõem uma sequência numérica que identifica cada ID dentro de seu respectivo objetivo (BARROS, 2013).

4 - METODOLOGIA

4.1 - MATERIAIS

Os objetos deste estudo, as ETES Garcia e Fortaleza, localizam-se no município de Blumenau, respectivamente nos bairros Garcia e Fortaleza. As duas estações são operadas pela empresa Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A. A empresa forneceu autorização ao autor para utilização dos dados operacionais coletados e analisados em laboratório com frequência variável, em função dos parâmetros monitorados. As ETES contam com sistemas de monitoramento em tempo real para parâmetros como oxigênio dissolvido (OD), pH e vazão e a empresa que opera as unidades realiza análises dos outros parâmetros de controle operacional em laboratórios próprios e complementarmente, em laboratórios particulares certificados.

Os parâmetros operacionais controlados pela empresa, de forma geral são: vazão, pH, temperatura do efluente, oxigênio dissolvido, condutividade, DQO, DBO, carga orgânica, carga orgânica volátil, sólidos sedimentáveis, fósforo total, nitrogênio total, nitrogênio total Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, surfactantes aniônicos, cloro residual livre, coliformes totais, coliformes termotolerantes, óleos e graxas, turbidez, sólidos (totais, totais fixos e totais voláteis), sólidos suspensos (totais, fixos e voláteis), cor aparente, fenol e ferro total. Parte destes parâmetros é controlada majoritariamente no efluente, de forma a permitir o controle do impacto do lançamento no corpo receptor e para garantir o atendimento às normativas do órgão ambiental e à legislação vigente.

Também são controlados os parâmetros relativos ao funcionamento do tanque de aeração de lodos ativados da ETE Fortaleza, quais sejam: sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos (totais, fixos e voláteis), relação alimento/microrganismo, índice volumétrico de lodo e idade do lodo.

No final do ano de 2015, quando os dados deste trabalho foram levantados, o sistema de esgotamento sanitário do município de Blumenau era composto por duas ETES, Garcia e Fortaleza, as quais conjuntamente eram responsáveis pelo tratamento do esgoto sanitário coletado nos 316 km de rede coletora implantados na malha urbana do município e bombeados por meio de 33 estações elevatórias de esgoto até as ETES em operação. O índice de atendimento da população era de aproximadamente 33%, incluindo o sistema de coleta principal e os sistemas isolados de coleta existentes em loteamentos.

De acordo com informações fornecidas pela Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A., a ETE Garcia recebe os efluentes coletados nas bacias de esgotamento dos bairros Garcia, Valparaíso, Vila Formosa, Jardim Blumenau, Ribeirão Fresco, Bom Retiro, parte do bairro Centro, Ponta Aguda e Vorstadt. Por sua vez, a ETE Fortaleza recebe os efluentes coletados nos bairros Fortaleza, Tribess, Nova Esperança, Itoupava Norte, Itoupava Seca, Boa Vista, Vitor Konder, parte do Centro, Vila Nova, parte do Agua Verde e Velha.

O processo de tratamento utilizado em cada estação e as respectivas vazões de projeto estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Tecnologias utilizadas e capacidade de tratamento instalada em cada unidade de tratamento.

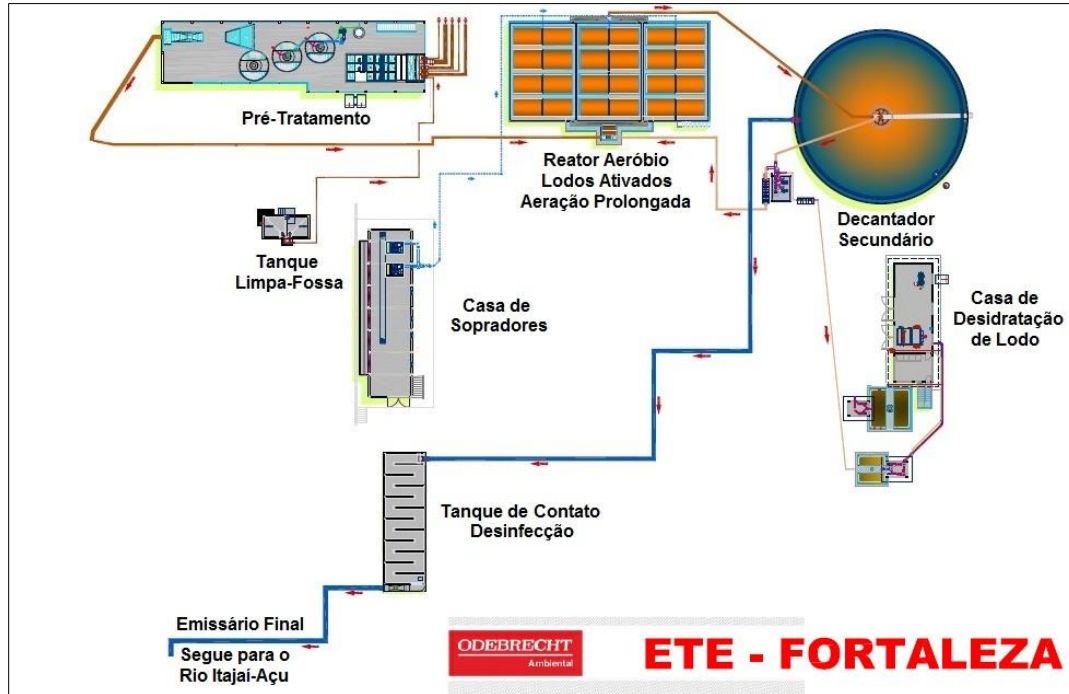
ETE	Processo	Vazão média de projeto
Garcia	UASB para remoção biológica de sólidos e de matéria orgânica; polimento em reator MBBR de mistura completa com filme fixo (ou CMFF, do inglês <i>Continuous Mix Fixed Film</i>); remoção de sólidos em decantador secundário; desinfecção química	44 L/s
Fortaleza	Lodos Ativados Aeração Prolongada para remoção biológica de sólidos e de matéria orgânica; remoção de sólidos em decantador secundário; desinfecção química	156 L/s

Fonte: elaborado pelo autor.

As características e condições operacionais detalhadas de cada estação foram levantadas em visita técnica realizada no mês de maio de 2015, sob supervisão e acompanhamento do Gerente de Operações da Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A., cujos dados e registro fotográfico serão expostos na seção 5 - Resultados e Discussão.

Na Figura 11 e na Figura 12 apresentam-se os fluxogramas de operação de cada estação.

Figura 11: Fluxograma das etapas de tratamento da ETE Fortaleza.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A; adaptado pelo autor.

Figura 12: Fluxograma das etapas de tratamento da ETE Garcia.

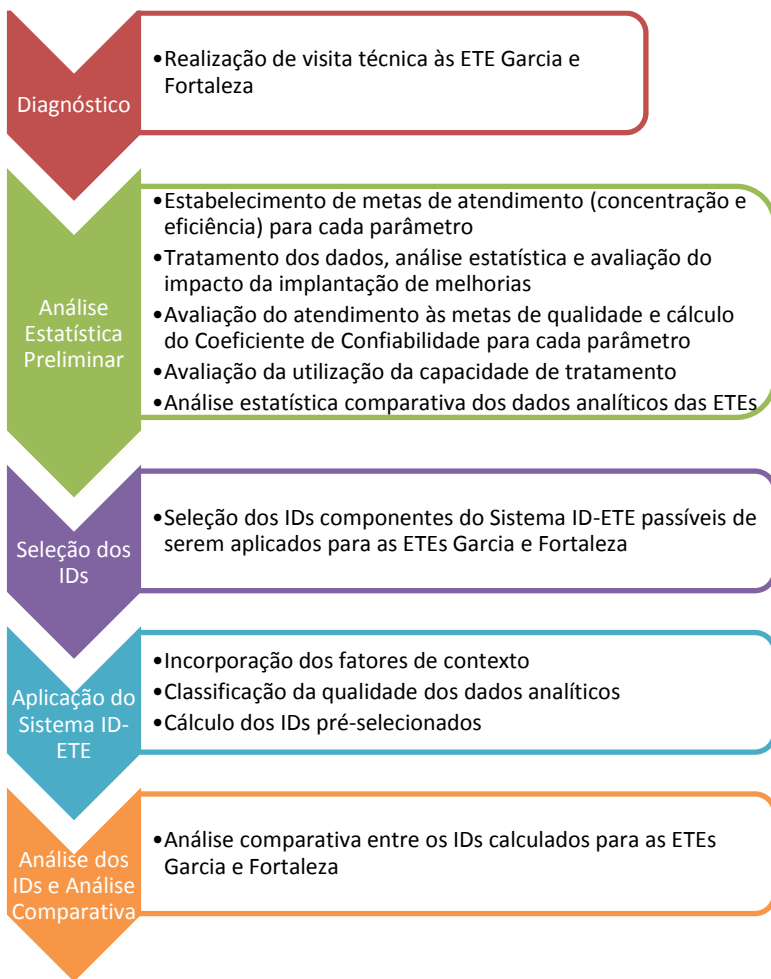


Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A; adaptado pelo autor.

4.2 - MÉTODOS

O fluxo metodológico obedecido neste trabalho é apresentado na Figura 13. Nos itens a seguir serão detalhadas as etapas seguidas para obtenção dos resultados objetivados.

Figura 13: Fluxo metodológico seguido no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.1 - Diagnóstico das Estações de Tratamento de Esgoto

Para permitir a contextualização da análise dos dados operacionais das duas estações de tratamento, foram realizadas visitas técnicas às ETEs Garcia e Fortaleza, durante as quais foi efetuado o registro fotográfico das unidades de cada estação e verificadas as condições operacionais dos equipamentos e etapas de tratamento. As visitas ocorreram com acompanhamento e supervisão da empresa Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A., no dia 29 de maio de 2015.

Foram cedidos pela Odebrecht Ambiental – Blumenau S.A., para utilização neste trabalho, os dados analíticos de vazão tratada, parâmetros físico-químicos de entrada e saída das ETEs, consumo médio de energia elétrica e consumo médio de produtos químicos do período compreendido entre 2011 a 2015 da ETE Garcia e entre 2013 e 2015 da ETE Fortaleza.

As duas ETEs foram selecionadas para este estudo por possuírem sistemas de tratamento biológico com filosofias distintas e capacidades de tratamento consideravelmente diferentes, tornando possível assim a verificação da eficácia do sistema ID-ETE desenvolvido por Barros (2013) para a análise do desempenho operacional de estações de tratamento de esgoto.

4.2.2 - Análise estatística dos dados de concentração e eficiência de remoção

Com o intuito de validar os resultados da aplicação do sistema ID-ETE foi realizado um conjunto de análises estatísticas nos dados operacionais. Para tanto, foram definidos os parâmetros físico-químicos mais relevantes para caracterização do desempenho operacional das estações, considerando-se a bibliografia nacional e internacional, assim como a legislação brasileira vigente.

Definidos os parâmetros de interesse, foram selecionados aqueles a serem analisados, em função da disponibilidade de dados operacionais. Os parâmetros definidos como passíveis de análise em função da disponibilidade e frequência de dados foram: vazão, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e fósforo total (P total). Apesar de os parâmetros Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), sólidos suspensos (SS) serem frequentemente utilizados para a caracterização da eficiência de sistemas de tratamento de esgotos, a medição regular de concentração de NTK é realizada somente no efluente final dos sistemas das ETEs Garcia e Fortaleza e a

disponibilidade de dados referentes à SS foi considerada insuficiente para realização de análise criteriosa. Estes fatos se dão em função de a legislação ambiental não especificar concentração do efluente final para estes parâmetros ou eficiência mínima de remoção destes ao longo dos sistemas de tratamento.

Na sequência foram calculados, para os valores de concentração e eficiência de remoção, os seguintes parâmetros estatísticos para interpretação preliminar dos resultados de desempenho: média, mediana, valores máximo e mínimo históricos, percentis, desvio-padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Com base nos parâmetros estatísticos supracitados, deu-se início à elaboração de outros cálculos estatísticos com base no trabalho de Barros (2013).

4.2.2.1. Estabelecimento de metas de qualidade

Para realização da estatística descritiva necessitou-se estabelecer metas de qualidade para a concentração do efluente tratado e para a eficiência de remoção para cada parâmetro, em função do tipo específico de tratamento utilizado nas ETEs. Como a legislação ambiental brasileira prevê, por meio da Resolução nº 430 de 2011 do CONAMA e da Lei Estadual de Santa Catarina nº 14.675 de 2009, critérios de eficiência pouco restritivos para sistemas com alta capacidade de remoção de matéria orgânica, foram consideradas as faixas de referência de eficiência de remoção definidas no Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES (Figura 14) e nos dados de referência apresentados na Tabela 4 deste trabalho, quando se tratavam de parâmetros não contemplados no PRODES.

As metas para a concentração efluente de P total e de eficiência de remoção deste parâmetro, foram definidas com base em valores médios de eficiência de remoção presentes na literatura, de acordo com a tecnologia de tratamento de cada ETE.

Os valores de referência de eficiência de remoção da carga poluidora do PRODES são definidos em função da classe da ETE, as quais são relacionadas com os sistemas de tratamento empregados por Oliveira (2006) conforme exposto na Tabela 9.

Tabela 9: Classificação de PRODES em função dos sistemas de tratamento empregados.

Classificação PRODES	Sistemas de Tratamento Equivalentes
Padrão A	Tratamento primário: TS, decantação primária convencional
Padrão B	Tratamento secundário de baixa eficiência na remoção de DBO: reatores UASB
Padrão C	Tratamento secundário de eficiência entre baixa e intermediária na remoção de DBO: LF, LA + LF, reatores UASB + PT, TS + filtros anaeróbios
Padrão D	Tratamento secundário de eficiência intermediária na remoção de DBO: escoamento superficial, reatores UASB + PT
Padrão E	Tratamento secundário de eficiência intermediária na remoção de DBO com remoção de organismos patogênicos: LE + LM, TS + infiltração, IL, IR
Padrão F	Tratamento secundário de alta eficiência na remoção de DBO: reatores UASB seguidos de alguns tipos de PT, LAC e variantes, filtros biológicos percoladores de baixa e alta taxa, biofiltros aerados submersos
Padrão G	Tratamento secundário de alta eficiência na remoção de DBO + remoção de organismos patogênicos: IR, TS + infiltração, LAC + filtração terciária, processos do Padrão F + desinfecção
Padrão H	Tratamento secundário de alta eficiência na remoção de DBO + tratamento terciário para remoção de nutrientes: IL, LAC + remoção biológica de N/P, UASB + flotação por ar dissolvido
Padrão I	Idem ao Padrão H + remoção de organismos patogênicos: processos do Padrão H + desinfecção

Obs.: TS = Tanque séptico; LAC = Lodos ativados convencional; LA = Lagoa anaeróbia; LF = Lagoa facultativa; LE = Lagoa de estabilização; LM = Lagoa de maturação; IL = Infiltração lenta; IR = Infiltração rápida; e PT = Pós-tratamento.

Fonte: adaptado de Oliveira (2006).

Figura 14: Valores de referência de eficiência de remoção das cargas poluidoras de esgoto.

Implantação de estações de tratamento de esgotos sanitários - ETE									
Indicador ⁽²⁾	Padrões de eficiência para tratamento de esgotos (em níveis mínimos de abatimento das cargas poluidoras afluentes)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
DBO	30%	60%	75%	85%	85%	90%	90%	90%	90%
SST	40%	60%	75%/60% ⁽¹⁾	85%/60% ⁽¹⁾	85%/60% ⁽¹⁾	90%	90%	90%	90%
CF					99,999%		99,999%		99,999%
PT								85%	85%
e/ou								e/ou	e/ou
NTK								80%	80%

Obs.: (1) 60% somente para os tratamentos que contemplem lagoas produtoras de algas.
(2) DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio; SST = Sólidos Suspensos Totais; CF = Coliformes. Termotolerantes; PT = Fósforo Total; NTK = Nitrogênio Total Kjeldahl.

Fonte: ANA, 2002.

Ainda no âmbito da caracterização dos padrões de referência estabelecidos pelo PRODES, são definidos os tipos de amostragem e a frequência de coleta a ser realizada em função da classe da ETE, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15: Referência para amostragem dos parâmetros em função da classe da ETE.

Classe	Frequência Mínima de Coleta	Tipo de Amostragem do Afluente	Tipo de Amostragem do Efluente
A	Semanal	Composta	Composta
B	Semanal	Composta	Composta
C	Quinzenal para lagoas	Composta	Simples ou Composta
	Semanal para o restante	Composta	Composta
D	Quinzenal para lagoas	Composta	Simples ou Composta
	Semanal para o restante	Composta	Composta
E	Quinzenal para lagoas	Composta	Simples ou Composta
	Semanal para o restante	Composta	Composta
F	2 x semana	Composta	Composta
G	2 x semana	Composta	Composta
H	2 x semana	Composta	Composta
I	2 x semana	Composta	Composta

Fonte: ANA, 2002.

4.2.2.2. Estatística descritiva e avaliação do percentual de atendimento

A estatística descritiva desenvolvida é composta pelo cálculo de medidas de tendência central, percentis e construção de gráficos do tipo *Box-and-Whisker*, utilizando o *software* Microsoft Excel®. A utilização deste tipo de gráfico permite a visualização da distribuição das amostras em escala de representação apropriada e posição da meta de qualidade estabelecida para cada parâmetro em relação a esta distribuição.

A elaboração e análise das séries temporais de cada parâmetro foram realizadas, por permitirem a fácil verificação do comportamento de suas variações ao longo do período de estudo.

A) Avaliação do Percentual de Atendimento

A avaliação do percentual de atendimento às metas de qualidade ao longo do tempo foi avaliada mensalmente tanto para as concentrações no efluente quanto para as eficiências de remoção, compondo assim as séries temporais de atendimento às metas.

Para verificar se os percentuais de atendimento às metas estabelecidas se encontram dentro de uma faixa esperada, de acordo com os dados disponíveis, foram calculados os percentuais esperados de

atendimento para cada parâmetro, a partir dos valores do coeficiente de variação (CV) seguindo a equação (1) proposta por Barros (2013), como adaptação das equações elaboradas por Oliveira e von Sperling (2007):

$$Z_{1-\alpha} = - \frac{\ln \left[\frac{m_x}{X_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{CV^2 + 1}} \right]}{\sqrt{\ln(CV^2 + 1)}} \quad (1)$$

Onde:

$Z_{1-\alpha}$ = variável normal central reduzida correspondente à probabilidade de não excedência (1- α). Ex.: para atendimento à meta em 90% do tempo ($\alpha = 0,90$), $1 - \alpha = 0,10$. O valor de Z é obtido aplicando a função DIST.NORMP.N do Microsoft Excel®, ou de livros texto de estatística tais como Snedecor e Cochran (1989) e Laponi (2005) (OLIVEIRA e VON SPERLING, 2007);

m_x = valor médio de concentração do parâmetro (mg/L);

X_s = meta de qualidade ou padrão fixado por alguma legislação ou norma (mg/L); e

CV = coeficiente de variação.

Graficamente, o valor do percentual de atendimento alcançado corresponde à área abaixo da curva normal central reduzida da distribuição das amostras.

B) Coeficiente de Confiabilidade (CDC)

O coeficiente de confiabilidade, proposto por Oliveira e von Sperling (2007), pode ser calculado a fim de se verificar a confiabilidade das estações de tratamento de esgoto. O CDC relaciona os valores das concentrações efluentes médias ao padrão de atendimento a ser alcançado, em uma base probabilística. Deste modo, se um padrão de 60 mg/L deve ser cumprido em 90% do tempo, o processo de tratamento deve ser projetado e operado para alcançar uma concentração média efluente tal que, considerando a variabilidade inerente à operação de sistemas de tratamento, este percentual seja alcançado. Segundo Oliveira e von Sperling (2007), o valor médio do parâmetro, definido como m_x , pode ser obtido a partir da equação (2):

$$m_x = (CDC)X_s \quad (2)$$

Onde:

m_x = valor médio de concentração do parâmetro (mg/L); e
 X_s = meta de qualidade ou padrão fixado por legislação ou norma (mg/L)

O valor de CDC pode ser calculado pela equação (3):

$$CDC = \sqrt{CV^2 + 1} \times \exp[-Z_{1-\alpha} \sqrt{\ln(CV^2 + 1)}] \quad (3)$$

A despeito da utilização da distribuição normal reduzida, o CDC é expresso em função dos dados originais (OLIVEIRA e VON SPERLING, 2007).

C) Avaliação da influência da sazonalidade e da implantação de melhorias

Como as redes de coleta de esgoto sanitário que contribuem para as estações de tratamento de esgotos recebem a contribuição de água pluvial, denominada infiltração, seja por encaminhamento acidental ou clandestino de águas pluviais ou por meio de infiltração das águas subterrâneas de redes executadas abaixo do nível do lençol freático (TSUTIYA; ALÉM SOBRINHO, 2011), durante os períodos chuvosos há alteração na caracterização do esgoto que chega às ETEs. Assim, foi estudada a influência da sazonalidade (períodos secos e chuvosos) nos resultados operacionais das duas ETEs, em relação às concentrações efluentes, eficiências de remoção e aos percentuais de atendimento às metas de concentrações no efluente e de eficiências de remoção. Para tanto, foi desenvolvida uma análise da distribuição das chuvas ao longo dos meses no município de Blumenau, utilizando os dados da estação meteorológica 32758, pertencente ao Sistema Integrado de Dados Ambientais e instalada no município de Blumenau/SC, latitude: -26.833, longitude: -49.050, altitude: 91m. Como resultado definiu-se a ocorrência do período chuvoso de junho a novembro e o período seco de dezembro a maio.

A verificação da influência da sazonalidade foi executada utilizando o teste de hipótese U de Mann-Whitney, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha=0,05\%$), por meio do *software* Statistica®.

Apesar de as amostras a serem comparadas nos estudos de interferência da sazonalidade e da implantação de melhorias apresentarem tamanho suficiente para aplicação do teste t de Student, a aplicação do teste U de Mann-Whitney se deu em função de as amostras

a serem comparadas possuírem tamanhos significativamente diferentes e heterogeneidade nas variâncias.

A avaliação de implantação de melhorias foi motivada pelo fato de a ETE Garcia ter passado por uma ampliação no final do ano de 2013. Esta análise foi executada utilizando o teste de hipótese U de Mann-Whitney, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha=0,05\%$), por meio do *software* Statística®, com o intuito de verificar a relevância estatística da diferença dos resultados do tratamento antes e após as melhorias.

D) Avaliação da utilização da capacidade instalada

A fim de analisar quantitativamente o uso da capacidade instalada de cada ETE ao longo do período de análise deste trabalho, foi calculada para cada mês a razão apresentada na equação (4).

$$\text{Uso da capacidade instalada} = \frac{\text{Vazão tratada média mensal}}{\text{Vazão de projeto}} \times 100 \quad (4)$$

Com estes valores foram construídos os gráficos das séries temporais da utilização da capacidade instalada em percentual para cada ETE.

A interpretação dos dados se dá da seguinte forma: valores menores que 100% indicam subutilização da capacidade de tratamento instalada; valores maiores que 100% indicam a sobrecarga do sistema.

4.2.3 - Seleção dos Indicadores de Desempenho do Sistema ID-ETE

Para a aplicação do sistema ID-ETE desenvolvido por Barros (2013), foram estudados os IDs componentes deste sistema e verificados quais poderiam ser aplicados às duas estações de tratamento em função da existência de dados analíticos e do atendimento à frequência de cálculo/análise dos parâmetros exigida por ID.

4.2.4 - Aplicação do Sistema ID-ETE

O Sistema ID-ETE é composto pelo cálculo dos IDs propriamente ditos, por fatores de contexto e considera ainda a classificação dos dados analíticos envolvidos no estudo, em função do tipo de amostragem e da frequência de cálculo ou de medição dos parâmetros.

Os fatores de contexto dizem respeito às condições inerentes do sistema avaliado, no que tange às questões físicas, espaciais e de gestão que auxiliem a interpretação dos resultados dos IDs calculados. Por sua vez, a classificação dos dados foi realizada de forma qualitativa, pelo fato de não haverem informações suficientes para uma classificação quantitativa (BARROS, 2013).

Os IDs selecionados para aplicação neste estudo, em função da disponibilidade de dados encontram-se relacionados abaixo, juntamente com sua descrição e método de cálculo, conforme apresentado por Barros (2013).

OBJETIVO 01: Proteção dos corpos de água

Critério 1.1: Controle do Monitoramento

<i>EPA-01 – Atendimento ao número requerido de análises de afluentes - Global</i>
Numerador: Somatório dos percentuais das análises realizadas no mês para cada parâmetro adotado pela classe (ex.: classe do PRODES) na qual a ETE se enquadra.
Denominador: Número de parâmetros adotados pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra.
Equação: $(\text{Numerador}/\text{Denominador}) \times 100$
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

<i>EPA-02 – Atendimento ao número requerido de análises de efluentes - Global</i>
Numerador: Somatório dos percentuais das análises realizadas no mês para cada parâmetro adotado pela classe (ex: PRODES) na qual a ETE se enquadra
Denominador: Número de parâmetros adotados pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra.
Equação: $(\text{Numerador}/\text{Denominador}) \times 100$
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

<i>EPA-03 – Atendimento ao número requerido de análises de DQO</i>
Numerador: Número de análises de DQO realizadas no mês
Denominador: Número de análises de DQO exigidas no mês
Equação: $(\text{Numerador}/\text{Denominador}) \times 100$
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

Critério 1.2: Eficiência de Remoção

<i>EPA-05 – Eficiência de remoção de DQO</i>
Numerador: [Concentração de DQO no afluente (mg/L) - Concentração de DQO no efluente (mg/L)]
Denominador: Concentração de DQO no afluente (mg/L)
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

Obs.: Em ETES onde ocorra substancial perda de água no processo (evapotranspiração), calcular este ID com base em carga.

<i>EPA-08 – Eficiência de remoção de P</i>
Numerador: [Concentração de P no afluente (mg/L) - Concentração de P no efluente (mg/L)]
Denominador: Concentração de P no afluente (mg/L)
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

Obs.: Utilizar quando P for um parâmetro adotado pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra ou quando o tratamento objetiva sua remoção.

Critério 1.4: Metas de Lançamento

<i>EPA-11 – Atendimento às metas de concentração efluente - Global</i>
Numerador: \sum das médias mensais dos percentuais de atendimento às metas de concentração de cada parâmetro adotado pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra no mês
Denominador: N° de parâmetros adotados pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

<i>EPA-12 – Atendimento às metas de concentração efluente de DQO</i>
Numerador: Número de análises de DQO com resultado inferior à meta no mês
Denominador: Número de análises de DQO realizadas no mês
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

<i>EPA-15 – Atendimento às metas de concentração efluente de P</i>
Numerador: Número de análises de P com resultado inferior à meta no mês
Denominador: Número de análises de P realizadas no mês
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

Obs.: Utilizar quando P for um parâmetro adotado pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra ou quando o tratamento objetiva sua remoção.

<i>EPA-17 – Atendimento às metas de eficiência de remoção pela ETE - Global</i>
Numerador: Somatório das médias mensais dos percentuais de atendimento às metas de eficiência de remoção de cada parâmetro adotado pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra no mês
Denominador: Número de parâmetros adotados pela classe (ex.: PRODES) na qual a ETE se enquadra
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

<i>EPA-18 – Atendimento às metas de eficiência de remoção de DQO pela ETE</i>
Numerador: Número de registros de eficiências de remoção de DQO com resultado superior à meta no mês
Denominador: Número de registros de eficiência de remoção de DQO realizados no mês
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

<i>EPA-21 – Atendimento às metas de eficiência de remoção de P pela ETE</i>
Numerador: Número de registros de eficiências de remoção de P com resultado superior à meta no mês
Denominador: Número de registros de eficiência de remoção de P realizados no mês
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Crescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

Obs.: Utilizar quando P for um parâmetro adotado pela classe (ex: PRODES) na qual a ETE se enquadra ou quando o tratamento objetiva sua remoção.

<i>EPA-23 – Efetividade do atendimento à meta de DQO pelo efluente - Média dos valores desconformes</i>
Numerador: Média de todas as concentrações de DQO superiores à meta no mês em mg/L
Denominador: Concentração da meta em mg/L
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Decrescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

Obs.: Para interpretação, recomenda-se a observação do número de dados obtidos em um ano. Ele se refere ao número de meses em que aconteceram concentrações de DQO superiores à meta. Recomenda-se também observar os meses de ocorrência para se identificar a interferência da sazonalidade.

OBJETIVO 3: Sustentabilidade da infraestrutura

Critério 3.1: Adequação com a capacidade

<i>ESI-01 – Adequação da capacidade hidráulica</i>
Numerador: Vazão média afluente no mês (m ³ /s)
Denominador: Capacidade média declarada pela prestadora de serviços (m ³ /s)
Equação: (Numerador/Denominador) x100
Unidade: %
Sentido de preferência: Valor inferior a 100% indica condição de subcarga e valor superior a 100% indica condição de sobrecarga. Na condição de subcarga, o sentido de preferência é indefinido. Na condição de sobrecarga, o sentido de preferência é decrescente
Frequência de cálculo do indicador: Mensal

4.2.5 - Análise comparativa dos IDs pré-selecionados

Após o cálculo dos IDs de cada ETE foram analisadas as variações temporais destes indicadores ao longo do período de estudo e calculados os parâmetros estatísticos básicos que permitiram a interpretação dos dados de saída.

A análise comparativa foi efetuada por meio das médias dos parâmetros de cada estação, a fim de verificar o desempenho operacional geral relativo dos dois sistemas de tratamento.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DO DESEMPENHO OPERACIONAL DA ETE FORTALEZA

5.1.1 - Diagnóstico

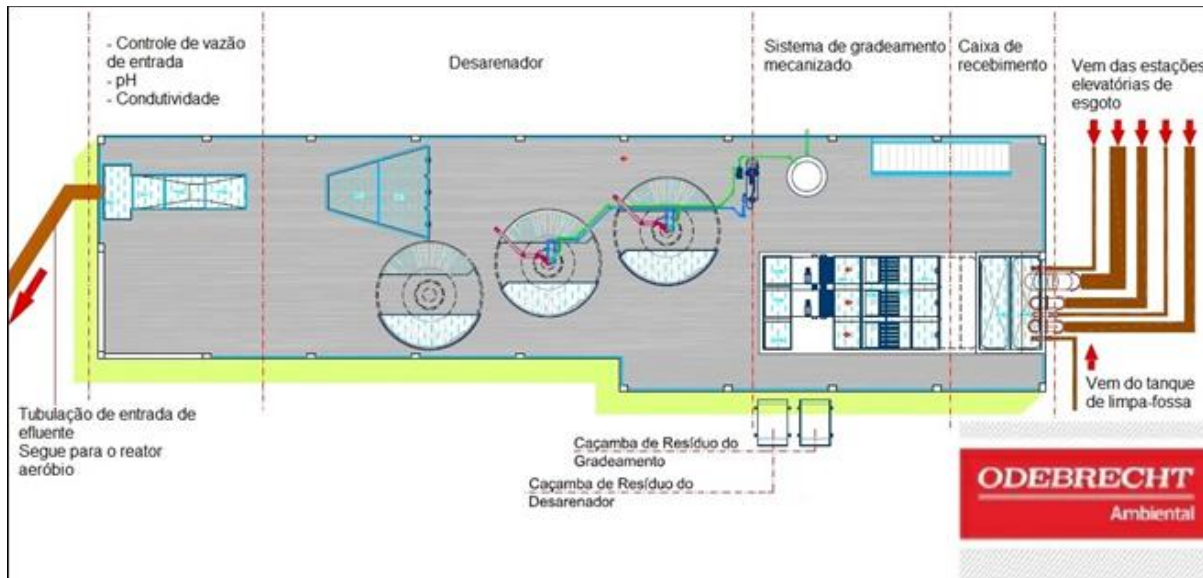
A ETE Fortaleza situa-se na Rua Adolfo Radunz, opera com sistema de lodos ativados com aeração prolongada, tendo entrado em funcionamento em fevereiro de 2013. A estação foi projetada para atingir uma capacidade de tratamento de 703,0 L/s em final de plano (2055). Até o final de 2015, quando foram coletados os dados para este trabalho, a capacidade de tratamento da estação era de 156 L/s. O efluente tratado nesta estação é encaminhado por meio de um emissário terrestre de 1,5 km de extensão ao Rio Itajaí-Açu.

A ETE Fortaleza possui a edificação do pré-tratamento executada em concreto armado, sendo composta, conforme esquematizado na Figura 16 e ilustrado na Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20, por: sistema de gradeamento mecanizado, realizando as funções de gradeamento grosseiro e fino, desarenador equipado com classificador de areia; e tratamento dos gases odorantes por meio de filtro de carvão ativado. O canal do tratamento preliminar é enclausurado e os gases são conduzidos ao filtro de carvão ativado por meio de tubulação específica. Os sólidos separados no gradeamento e no sistema desarenador são lançados por gravidade em uma caçamba, de onde são destinados para aterro sanitário industrial, controlado por empresa especializada.

Ao lado da edificação do tratamento preliminar identificou-se a existência de estrutura de concreto armado que será utilizada para a futura ampliação da capacidade de tratamento da ETE.

O tratamento secundário, realizado por sistema de lodos ativados aeração prolongada, é composto por um tanque de aeração com três módulos de 13,13m de largura por 19,70m de comprimento e profundidade útil de 5,5m (desconsiderando as espessuras das paredes e lajes), totalizando um volume de aproximadamente 1.423m³, por módulo (desenho técnico na Figura 21 e registros fotográficos na Figura 22 e Figura 23). Os módulos possuem canais de entrada independentes, derivados do canal de entrada principal, permitindo a interrupção operacional de cada módulo para manutenções e troca de peças. A aeração dos tanques é realizada por meio de difusores de bolhas finas (Figura 24) instalados no fundo dos tanques, em forma de malha. Verificou-se que, conforme esperado para sistemas deste tipo, não havia emissão de odor desagradável no reator de lodos ativados no dia da visita.

Figura 16: Desenho técnico da unidade de pré-tratamento da ETE Fortaleza.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura 17: Sistema de Gradeamento Mecanizado com peneiramento grosseiro e fino.



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 19: Desarenador tipo vórtex em concreto armado.



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 18: Tratamento de odores do tratamento preliminar.



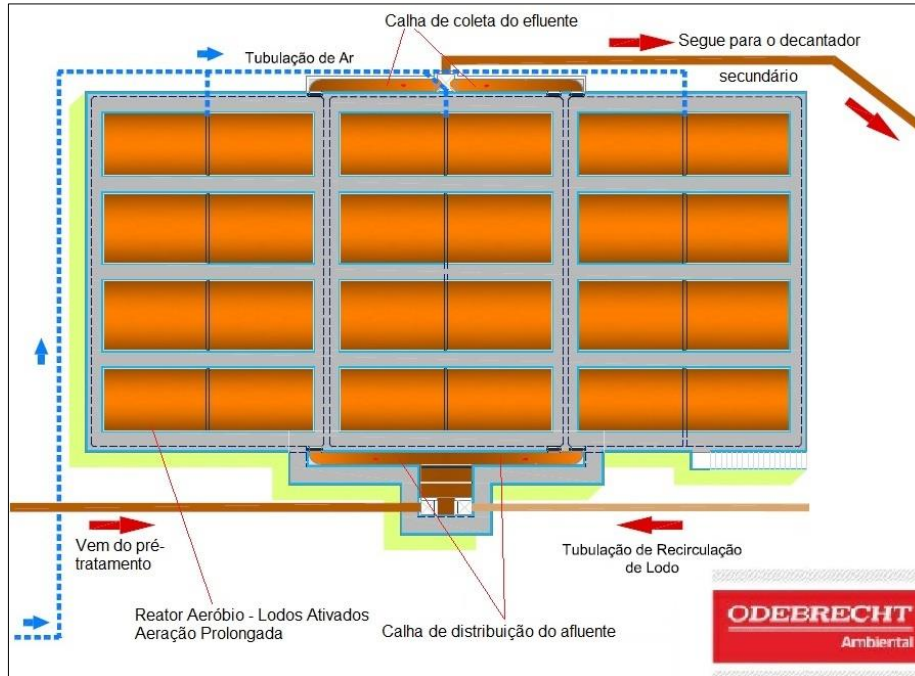
Fonte: registrado pelo autor.

Figura 20: Classificador de areia acoplado à caçamba para destinação da areia removida do preliminar.



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 21: Desenho técnico da unidade do reator aeróbio (Lodos Ativados Aeração Prolongada) - ETE Fortaleza.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura 22: Tanques de aeração do sistema de lodos ativados aeração prolongada



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 23: Tanque de aeração visto do passadiço



Fonte: registrado pelo autor.

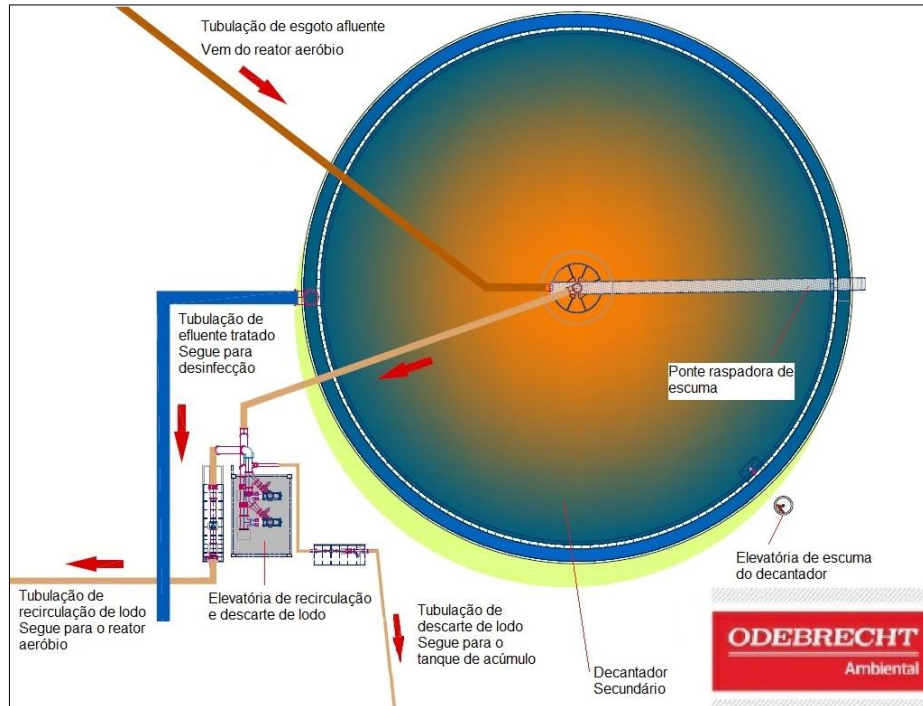
Figura 24: Difusor de bolhas finas utilizado no tanque de aeração



Fonte: registrado pelo autor.

O afluente do tanque de aeração segue por gravidade para o decantador secundário (Figura 25 e Figura 26), o qual possui 33,00m de diâmetro, 2,6m de profundidade útil no ponto mais raso (próximo às paredes) e 4,83m de profundidade útil no ponto mais profundo (centro).

Figura 25: Desenho técnico da unidade de decantação secundária da ETE Fortaleza.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura 26: Decantador secundário. Vista da edificação do reator de lodos ativados aeração prolongada.



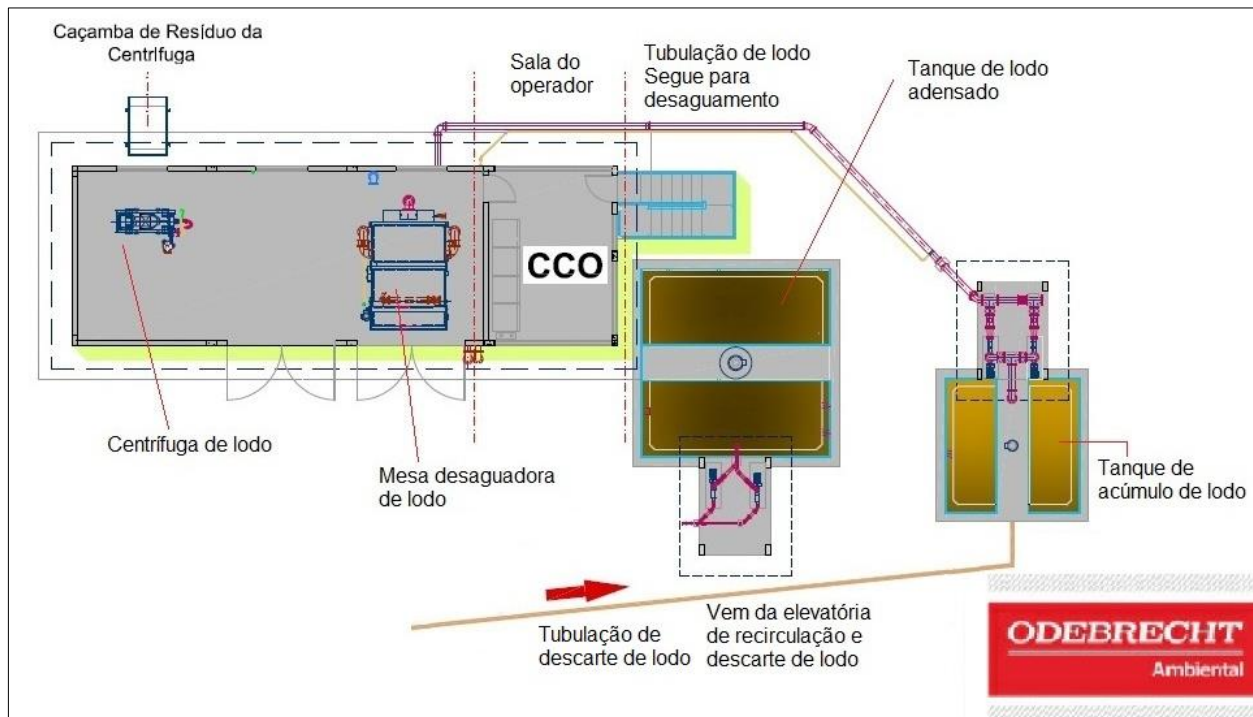
Fonte: registrado pelo autor.

O efluente líquido do decantador secundário é recalcado para um tanque de contato, onde recebe a adição de hipoclorito de sódio para desinfecção. Na sequência, o efluente passa por um medidor de vazão do tipo calha Parshall e então é encaminhado por gravidade ao corpo receptor.

O decantador conta com uma ponte raspadora de espuma que arrasta a espuma para um canal lateral. Deste canal, a espuma é encaminhada para a estação elevatória existente ao lado do decantador, a qual lança a espuma ao sistema de tratamento de lodo.

O lodo sedimentado no decantador secundário é encaminhado a uma estação elevatória de recirculação de lodo, que encaminha parte do lodo para o tanque de aeração e outra parte para o tanque de acúmulo de lodo. Deste tanque o lodo é bombeado para a casa de desidratação de lodo, instalada em uma edificação fechada e dotada de abafador de ruídos nas janelas, conforme desenho técnico ilustrado na Figura 27. Esta unidade é composta pelo adensador mecanizado de lodo (Figura 30) e pela centrífuga de lodo (Figura 28), sendo que cada equipamento de deságue possui um dosador de polímero com dosagens em separado (Figura 29). Após a saída do sistema de deságue, a torta formada é lançada em uma caçamba para destinação final em aterro sanitário industrial.

Figura 27: Desenho técnico da unidade de desidratação de lodo da ETE Fortaleza.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura 28: Centrífuga de lodo.



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 29: Dosador de polímero para tratamento do lodo.



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 30: Adensador de lodo mecanizado em ambiente acusticamente isolado.



Fonte: registrado pelo autor.

No Apêndice A estão apresentados os desenhos técnicos detalhados das unidades de tratamento componentes da ETE Fortaleza.

5.1.2 - Análise Estatística do desempenho operacional da ETE Fortaleza

5.1.2.1. Análise das concentrações

A) Estatística descritiva

Dentre os dados operacionais analisados, verificou-se que os parâmetros que possuíam frequência de monitoramento a montante e a jusante do sistema de tratamento, de modo a permitir a análise estatística proposta são: DBO, DQO e fósforo total.

O controle da concentração de sólidos suspensos não foi realizado no ano de 2013 e nos anos de 2014 e 2015 foi efetuado no efluente, impedindo a inclusão desta variável no estudo.

Por sua vez, a concentração de NTK foi analisada ao longo do ano de 2013 no afluente e no efluente, porém no ano de 2014 ocorreu o controle somente no efluente e em 2015 não houve monitoramento. Assim esta variável também foi excluída deste trabalho.

A análise de desempenho do sistema de desinfecção não foi efetuada neste trabalho, pois as análises da presença de coliformes totais e termotolerantes não eram efetuadas em 2013 e em 2014 e 2015 eram realizadas somente no efluente, conforme exigido pelo órgão ambiental.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados da estatística descritiva dos parâmetros de desempenho operacional analisados para a ETE Fortaleza.

Tabela 10: Dados da estatística descritiva das concentrações do afluente e efluente da ETE Fortaleza.

Estatística	Vazão (m ³ /d)	DQO (mg/L)		DBO (mg/L)		Ptotal (mg/L)	
		Afl.	Efl.	Afl.	Efl.	Afl.	Efl.
Nº dados	856	153	158	126	121	22	29
Média	4931,95	503,30	38,34	240,22	10,90	10,34	4,04
Mediana	5466,46	463,00	34,00	237,00	8,10	8,68	3,85
Mínimo	69,68	89,00	3,00	82,00	1,40	2,02	0,08
Máximo	13903,18	1434,00	188,00	548,00	73,00	21,60	11,50
DP	2629,51	231,43	29,01	96,28	9,29	6,42	2,38
CV	53,32%	45,98%	75,67%	40,08%	85,15%	62,09%	58,87%

Fonte: elaborado pelo autor.

Verifica-se que os parâmetros com maior coeficiente de variação são os de DQO efluente e DBO efluente, respectivamente, 75,67% e 85,15%, indicando uma variação significativa dos dados em relação à média. Esta variação pode ocorrer em função da oscilação na capacidade de o sistema degradar a matéria orgânica, seja por variações na disponibilidade dos micro-organismos mais específicos, pela

difficuldade de os micro-organismos presentes no reator aeróbio se adaptarem às oscilações de carga orgânica aplicada e também devido às variações na qualidade do afluente em consequência à existência de contribuição parasitária dos sistemas de drenagem urbana na rede de coleta de esgoto. Ressalta-se ainda que há uma diferença expressiva na quantidade de amostras analisadas para os parâmetros de DBO e DQO e a quantidade de amostras analisadas para P total, esta última em número muito menor tanto para o afluente quanto para o efluente.

Segundo Metcalf & Eddy (1991, tradução nossa), o esgoto afluente pode ser caracterizado como de concentração média em termos de concentração de DBO (220 a 300 mg/L) e DQO (aproximadamente 500 mg/L).

Com base na classificação dos sistemas de tratamento proposta por Oliveira (2006), a partir dos padrões de eficiência estabelecidos no PRODES, foram definidas metas de eficiência de remoção e de concentração no efluente para os parâmetros estudados. Por esta classificação enquadrou-se a ETE Fortaleza no padrão G, caracterizado por possuir tratamento secundário de alta eficiência na remoção de DBO com incorporação de remoção de organismos patogênicos. As metas de eficiências de remoção de DBO de estações com este padrão estão apresentadas na Tabela 11, juntamente com as eficiências de remoção de DQO e Fósforo Total, estabelecidas com base em valores apresentados na Tabela 4. Os valores de concentração no efluente foram calculados a partir dos valores medianos do afluente e da meta de eficiência de remoção definida para cada parâmetro. Por exemplo, como a mediana da DBO afluente é de 237,0 mg/L e a eficiência de remoção definida é de 90%, a meta da concentração da DBO efluente definida será de 23,7 mg/L.

De acordo com a referência estabelecida no PRODES, para sistemas com padrão G, seria necessária a realização de amostragem composta duas vezes por semana. Considerando o período utilizado neste estudo, nenhum dos parâmetros atende ao critério estabelecido em número e tipo de amostragens realizadas. Porém, o número e frequência de análises realizadas permite a aplicação do Sistema ID-ETE.

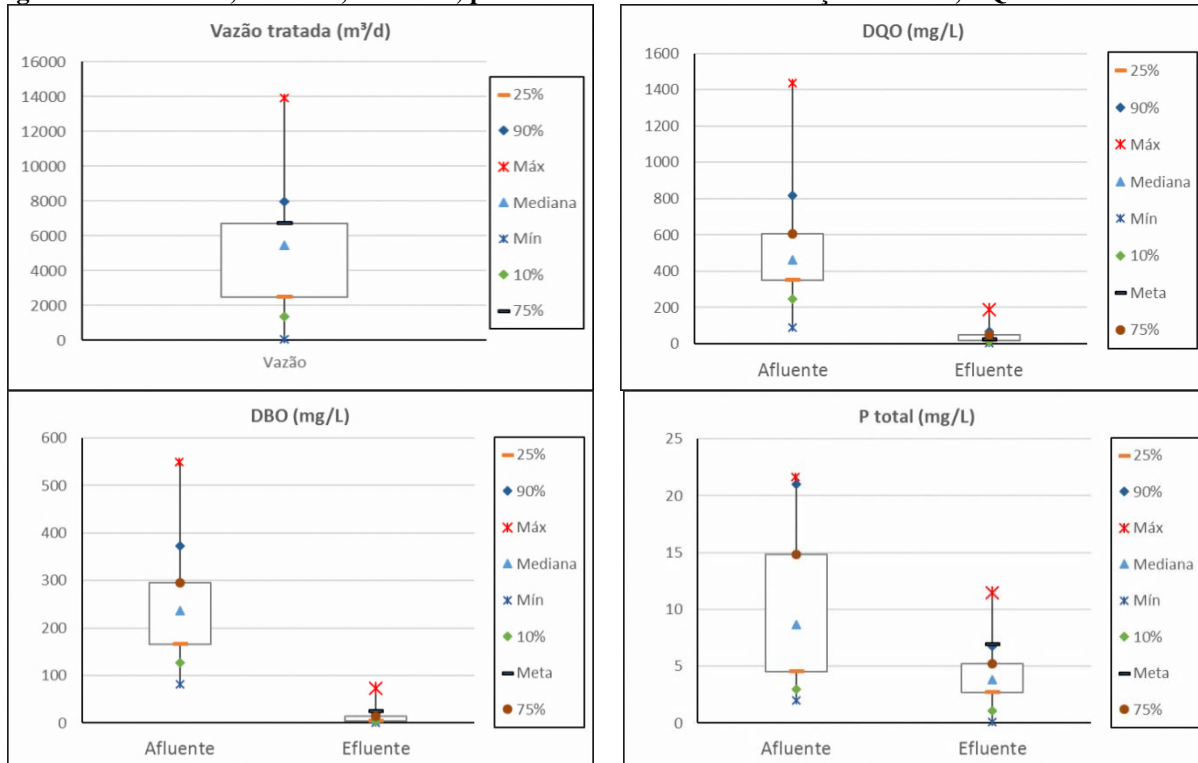
Tabela 11: Metas de eficiência de remoção e para concentração dos parâmetros no efluente da ETE Fortaleza.

Meta	DQO	DBO	Ptotal
Eficiência de Remoção (%)	95	90	20
Concentração Efluente (mg/L)	23,15	23,70	6,94

Fonte: elaborado pelo autor.

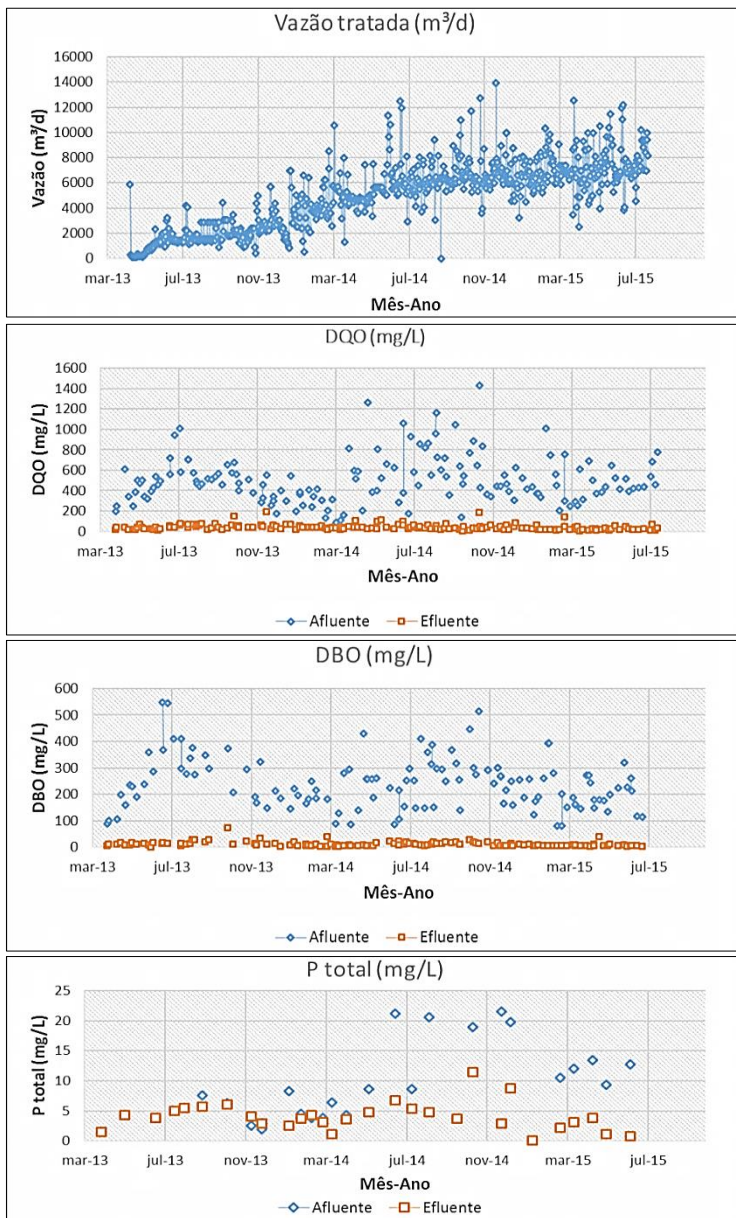
Com as metas de concentração no efluente estabelecidas, foram construídos gráficos do tipo *box-and-whisker*, apresentados na Figura 31, nos quais são apresentadas as distribuições dos valores de mediana, mínimo, máximo, meta e percentis das concentrações do efluente. As séries temporais dos valores de concentração de DQO, DBO e P total no efluente estão apresentadas na Figura 32.

Figura 31: Medianas, mínimos, máximos, percentis e metas de concentração de DBO, DQO e Ptotal efluente.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 32: Séries temporais da concentração dos parâmetros analisados na ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se uma variação expressiva dos valores de vazão tratada, oscilando entre o mínimo de 69,68 m³/d e o máximo de 13.903,18 m³/d, o que pode ser explicado pelo aumento da vazão de contribuição da estação entre os anos de 2013 e 2015, em função da ampliação gradual da rede coletora do município. Esta interpretação é corroborada pela série temporal da vazão tratada que apresenta uma linha de tendência crescente com o aumento do tempo.

Em relação à DBO e DQO, verificou-se uma redução considerável das cargas poluidoras, quando comparados os dados do afluente e do efluente, conforme esperado de um sistema de lodos ativados aeração prolongada. Para a DBO os valores do efluente mantiveram-se sempre menores que 100 mg/L e para DQO sempre menores que 200 mg/L. A maior parte das amostras do efluente de DBO e P total atingiu valores de concentração menor que a meta estabelecida. Por sua vez, menos de 50% das amostras de DQO efluente possuem valores de concentração menores que a meta estabelecida.

A redução na carga poluidora de P total foi observada, porém com menor intensidade do que para os outros parâmetros. Vale destacar que ocorreram valores de concentração de P total no efluente maiores que no afluente nos meses de novembro e dezembro de 2013. Porém, após esse período não se verificou mais ocorrência semelhante.

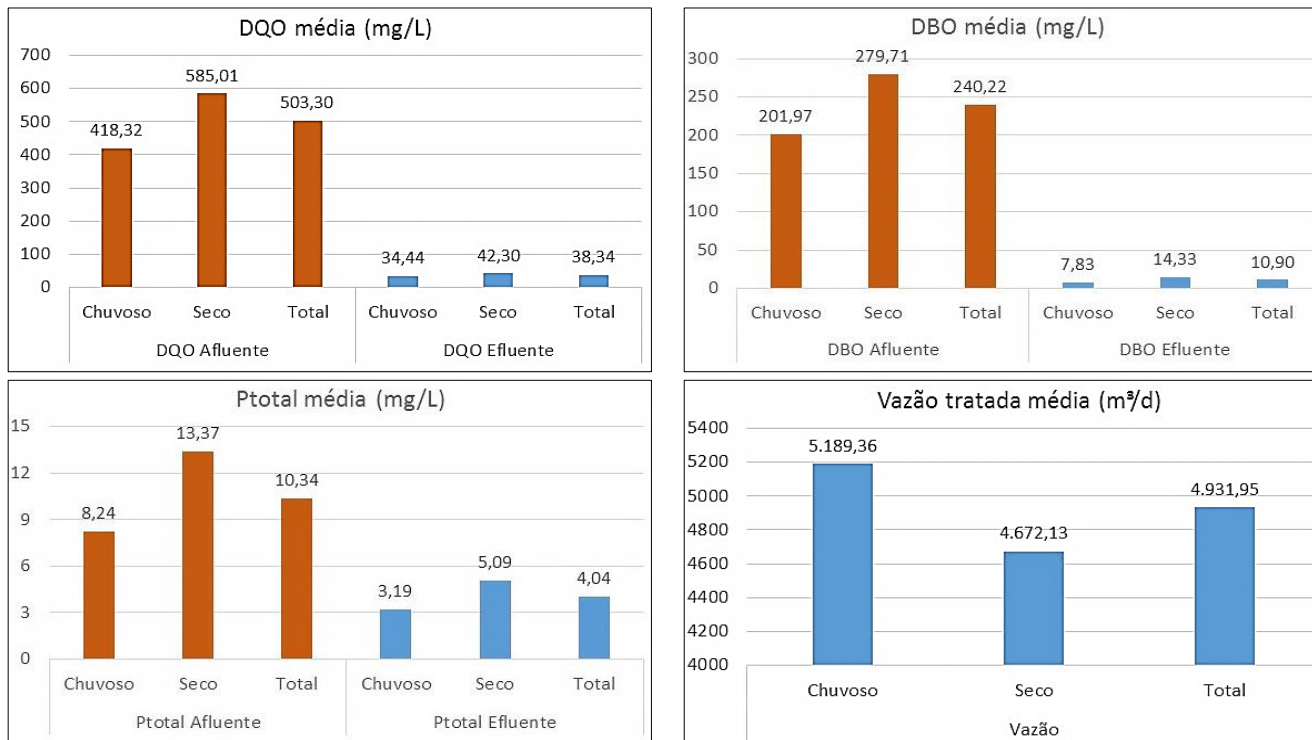
De forma geral, destaca-se a constância na redução das cargas poluidoras ao longo do tempo. Relacionando esta constância com o aumento da vazão ao longo dos anos, pode-se afirmar que o sistema apresentou uma boa capacidade de absorção da variação da vazão.

B) Análise da influência da sazonalidade nas concentrações do efluente

Para verificação da influência da sazonalidade no desempenho operacional da ETE Fortaleza foi aplicado o teste U de Mann-Whitney, conforme descrito na seção 4.2.2.2 Estatística descritiva e avaliação do percentual de atendimento.

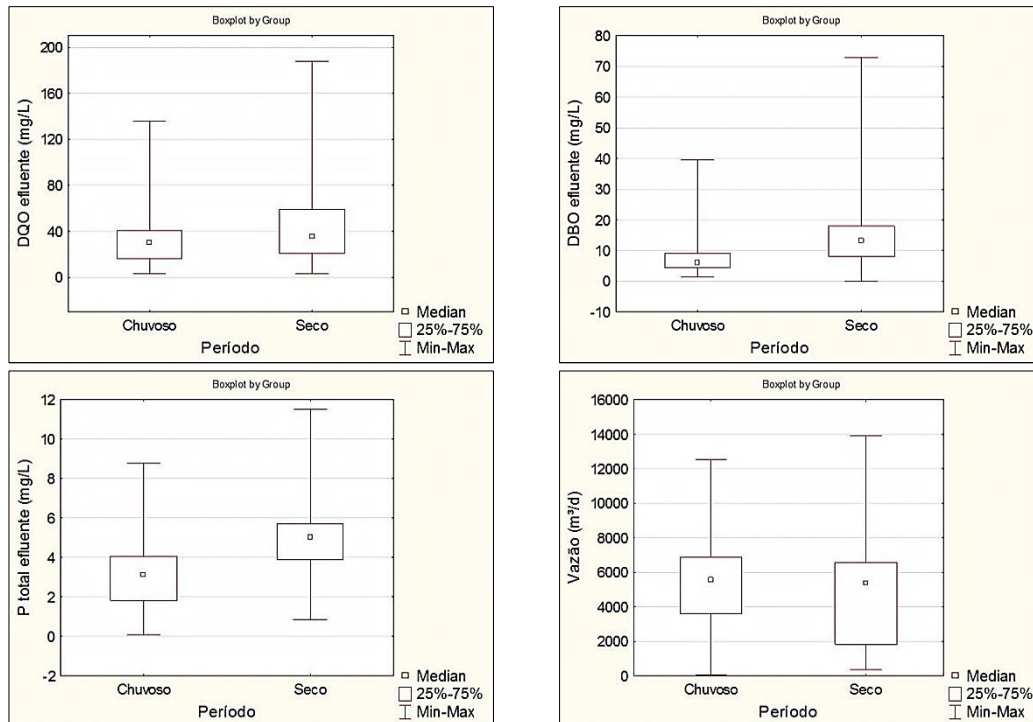
Na Figura 33 estão apresentados os gráficos com os valores médios dos parâmetros classificados em função dos períodos chuvoso e seco; e na Figura 34 estão apresentados os gráficos *box-whisker* criados no *software* Statística® e na sequência os resultados do teste U de Mann-Whitney efetuados utilizando o mesmo programa.

Figura 33: Valores médios de concentração afluente e efluente e de vazão tratada, em função da sazonalidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 34: Gráficos *box-whisker* (Statistica®) das concentrações do efluente, em função da sazonalidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

O teste U de Mann-Whitney retornou o valor-p igual a 0,0981 para DQO efluente. Sendo este valor maior que 0,05 conclui-se que a sazonalidade não interfere nos valores de concentração efluente para este parâmetro.

Para DBO efluente, obteve-se um valor-p igual a 2,0852E-07. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a sazonalidade tem influência estatisticamente significativa neste parâmetro.

Para P total concluiu-se que a sazonalidade interfere de forma significativa nos resultados de concentração efluente, sendo o valor-p para este parâmetro igual a 0,01168.

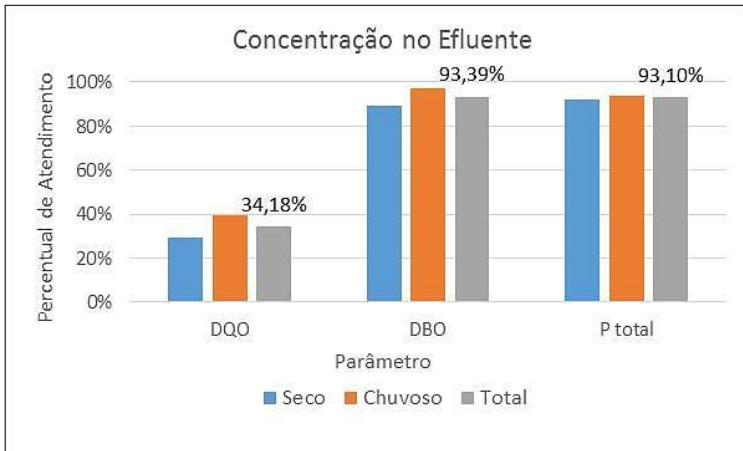
Para a vazão tratada, obteve-se o valor-p igual a 0,00443, sendo a influência da sazonalidade considerada estatisticamente significativa para este parâmetro.

No que tange à análise da sazonalidade na variação da vazão tratada, é possível atribuir esta variação à maior contribuição para a ETE em função do grande número de ligações irregulares de água de chuva na rede de esgoto, além do aumento da infiltração de água pluvial e do lençol freático na rede coletora e nos poços de visita componentes do sistema de coleta e transporte. Apesar de o valor máximo do período seco ser maior que o valor máximo do período chuvoso, observa-se que a área delimitada pelos percentis do gráfico *box-whisker* do período chuvoso ocupa uma posição superior no gráfico em relação à área delimitada pelos percentis do período seco, indicando uma concentração de valores de vazão maiores.

C) Cálculo dos percentuais de atendimento e dos Coeficientes de Confiabilidade (CDC)

Na Figura 35 estão apresentados os percentuais de atendimento às metas estabelecidas em função dos períodos chuvosos, secos e os percentuais no período total de estudo.

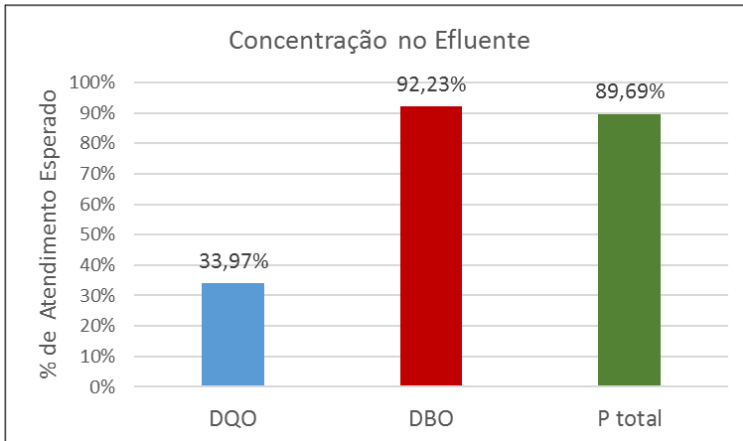
Figura 35: Percentuais de atendimento às metas de concentração no efluente da ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para efeito de verificação dos percentuais de atendimento atingidos foram calculados os percentuais de atendimento esperados (Figura 36).

Figura 36: Percentuais de atendimento esperado em função dos dados analisados na ETE Fortaleza.



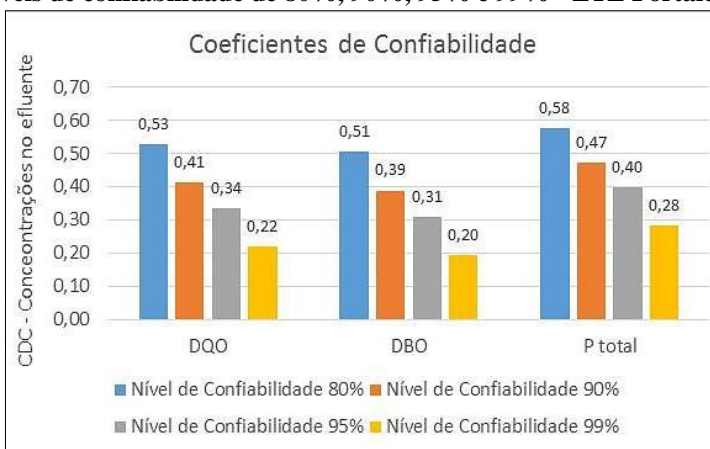
Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando os valores de percentual de atendimento esperados com os valores efetivos calculados para o período de estudo, verifica-se

que o cálculo da estimativa poderia ser utilizado sem grande perda na confiabilidade dos resultados. O parâmetro que apresentou maior desvio entre o percentual de atendimento e o percentual esperado foi o de P total, com 93,10% e 89,69% respectivamente.

Foram calculados na sequência os CDCs relativos às concentrações efluentes do sistema de tratamento para diferentes níveis de confiabilidade. Esta variável apresenta a possibilidade de se estabelecer um coeficiente que permita a obtenção de um valor referencial de concentração do efluente que norteie a operação dos processos de tratamento ou o cálculo do projeto de um sistema, de forma a atingir uma meta em uma base probabilística. Os valores de CDC podem ser visualizados na Figura 37.

Figura 37: Coeficientes de confiabilidade calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99% - ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.1.2.2. Análise das eficiências de remoção

A) Estatística descritiva

A análise da eficiência de remoção foi realizada para os mesmos parâmetros cujas concentrações foram analisadas, visto que os valores de eficiência foram calculados a partir das concentrações afluentes e efluentes.

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados da estatística descritiva das eficiências de remoção dos parâmetros analisados para a ETE Fortaleza.

Tabela 12: Dados da estatística descritiva das eficiências de remoção da ETE Fortaleza.

Estatística	DQO	DBO	Ptotal
Nº dados	151	116	19
Média	91,30%	95,21%	51,75%
Mediana	92,95%	95,97%	61,81%
Mínimo	66,06%	78,21%	-12,18%
Máximo	99,51%	99,02%	93,36%
DP	6,21%	3,60%	31,65%
CV	6,80%	3,78%	61,16%

Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores de eficiência de remoção apresentados são satisfatórios para o sistema de tratamento avaliado e os valores de coeficiente de variação são relativamente baixos, exceto para P total, que apresentou CV igual a 61,16%, indicando uma grande variabilidade nos valores de eficiência de remoção ao longo do tempo.

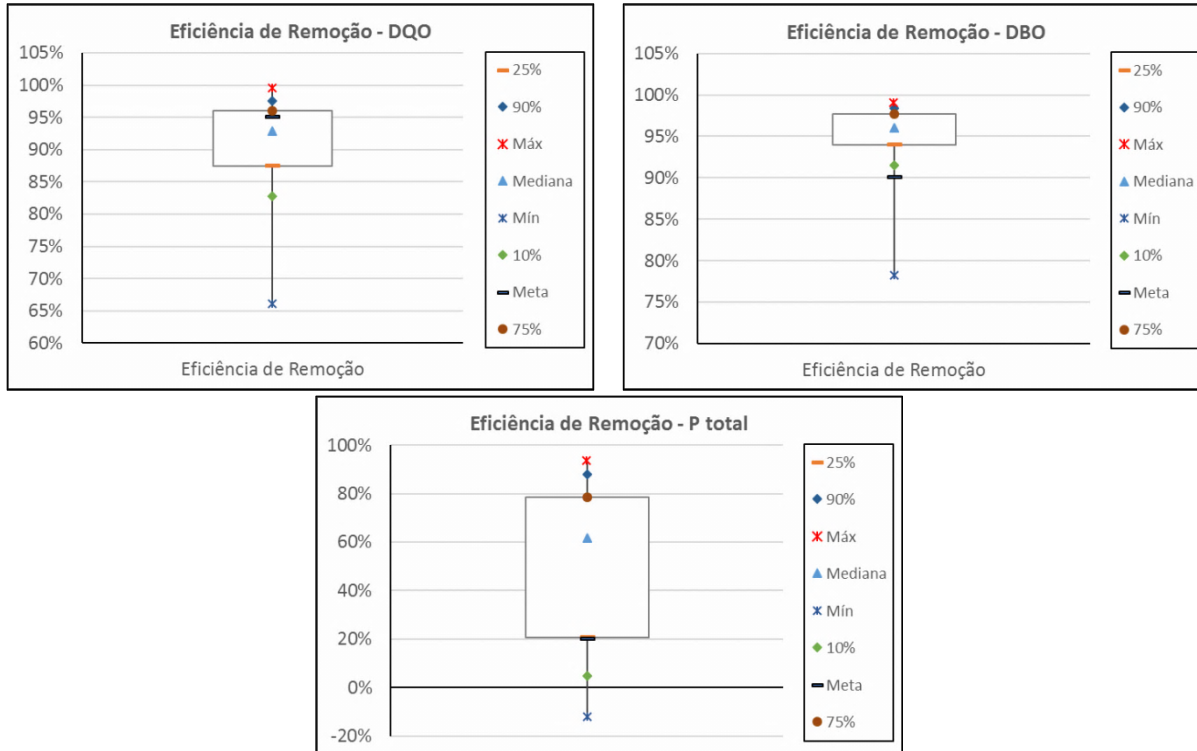
Ressalta-se o valor de eficiência de remoção de P total negativo, explicitando o aumento da concentração deste nutriente ao longo do processo de tratamento em pelo menos um dos dias analisados.

Conforme Tabela 11 apresentada na seção 5.1.2.1, foram estabelecidas metas para as eficiências de remoção com base nos critérios definidos pelo PRODES e na literatura.

A Figura 38 apresenta os gráficos *box-whisker*, nos quais são apresentadas as distribuições dos valores de mediana, mínimo, máximo, meta e percentis de 10%, 25%, 75% e 90% das eficiências de remoção de DBO, DQO e P total ao longo do processo de tratamento.

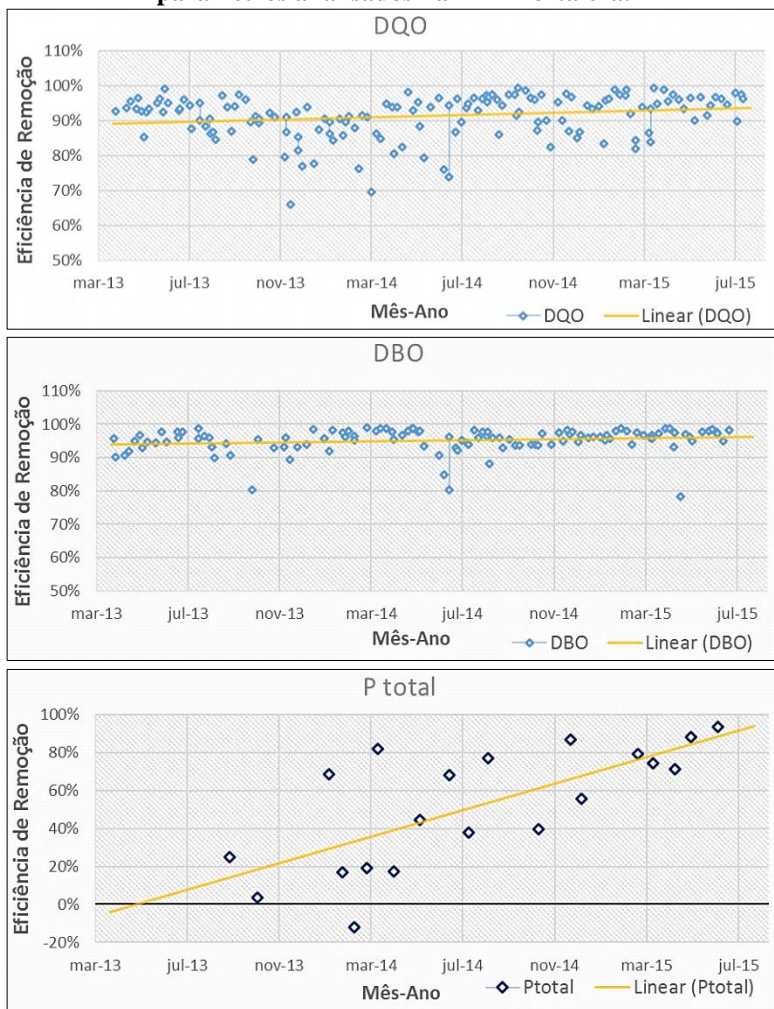
As séries temporais dos valores de eficiência de remoção estão apresentadas na Figura 39.

Figura 38: Medianas, mín., máx., percentis e metas de eficiência de remoção de DBO, DQO e Ptotal



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 39: Séries temporais das eficiências de remoção dos parâmetros analisados na ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota-se que menos da metade dos valores de eficiência de remoção de DQO atingiram a meta de eficiência estabelecida. Ainda assim, os valores de eficiência de remoção de DQO apresentaram leve crescimento ao longo dos anos, assim como os valores de DBO. A distribuição dos valores de DBO mostra que mais de 90% dos valores de DBO atenderam à meta estabelecida e para P total este valor foi de 75%.

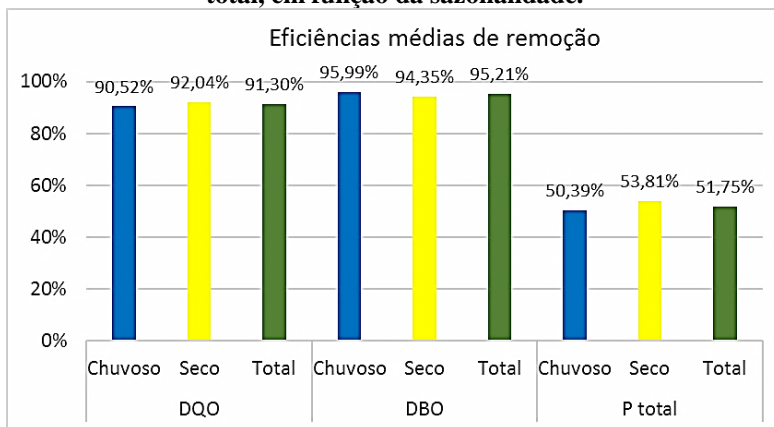
O aumento da eficiência de remoção de P total ao longo dos anos foi a mais expressiva, podendo indicar a formação de um sistema composto por micro-organismos com boa capacidade de remoção de fósforo no reator aeróbio.

B) Análise da influência da sazonalidade nas concentrações do efluente

Para verificação da influência da sazonalidade nos valores de eficiência de remoção foi aplicado o teste U de Mann-Whitney, conforme descrito na seção 4.2.2.2 Estatística descritiva e avaliação do percentual de atendimento.

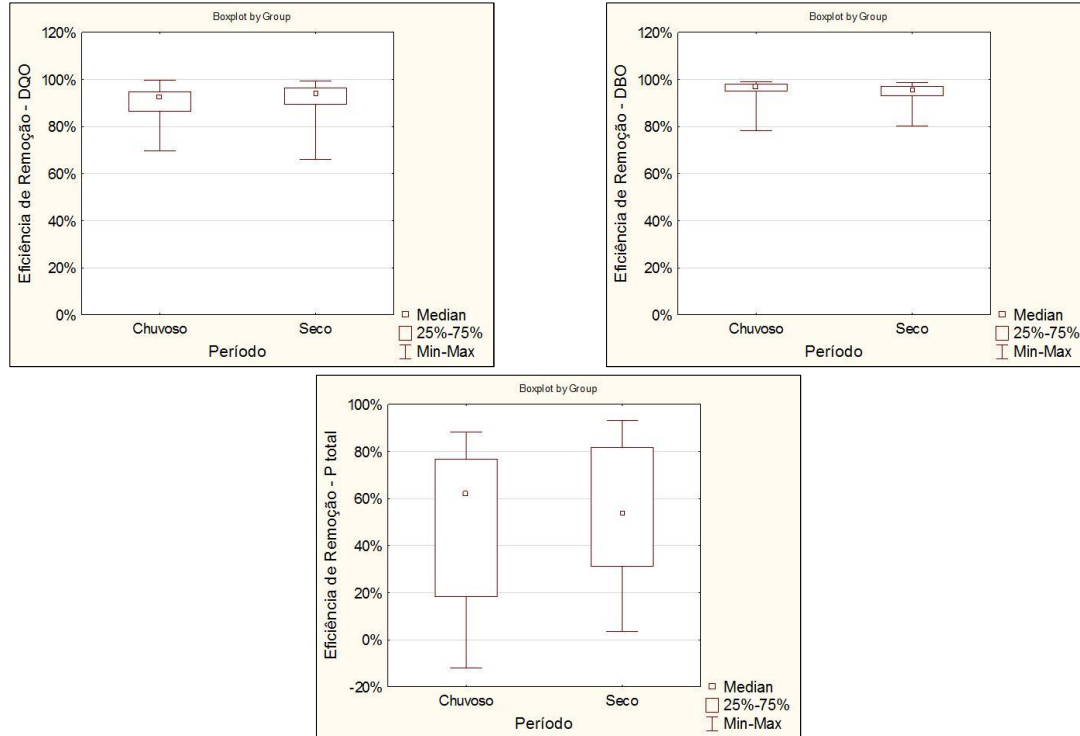
Na Figura 40 está apresentado o gráfico com os valores médios das eficiências de remoção classificados em função dos períodos chuvoso e seco; e na Figura 41 estão apresentados os gráficos *box-whisker* dos valores de eficiência de remoção criados no *software* Statistica® e na sequência os resultados do teste U de Mann-Whitney efetuados utilizando o mesmo programa.

Figura 40: Valores médios de eficiência de remoção de DQO, DBO e P total, em função da sazonalidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 41: Gráficos *box-whisker* (Statistica®) das eficiências de remoção, em função da sazonalidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

O teste U de Mann-Whitney retornou o valor-p igual a 0,06977 para eficiência de remoção de DQO. Sendo este valor maior que 0,05, conclui-se que a sazonalidade não interfere no comportamento desta variável.

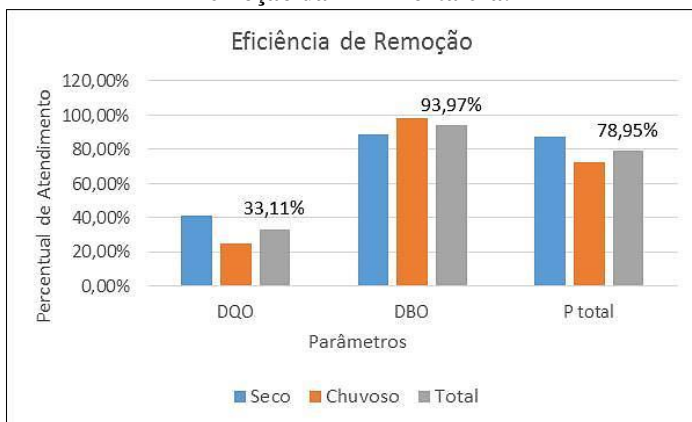
Para a eficiência de remoção de DBO, obteve-se um valor-p igual a 0,003068. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a sazonalidade tem influência estatisticamente significativa na remoção de DBO na ETE Fortaleza.

Para a eficiência de remoção de P total concluiu-se que a sazonalidade não influencia de forma significativa nos resultados, visto que o valor-p para este parâmetro é igual a 0,847054.

C) Cálculo dos percentuais de atendimento e dos Coeficientes de Confiabilidade (CDC)

Na Figura 42 estão apresentados os percentuais de atendimento às metas estabelecidas em função dos períodos chuvosos, secos e os percentuais no período total de estudo.

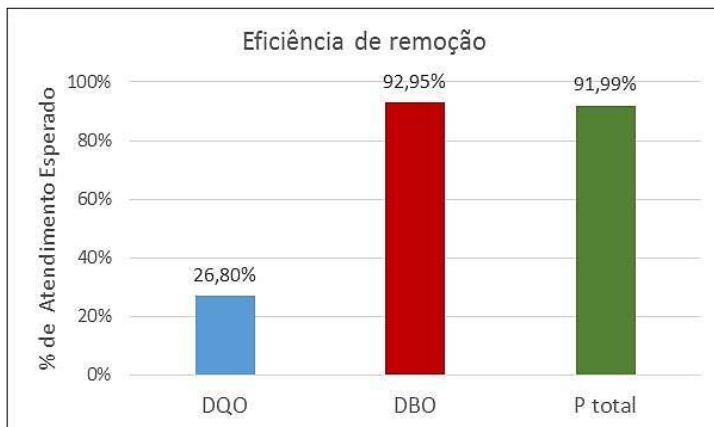
Figura 42: Percentuais de atendimento às metas de eficiência de remoção da ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para efeito de verificação dos percentuais de atendimento atingidos expostos na figura acima, foram calculados os percentuais de atendimento esperados de acordo com a destruição amostral dos valores de eficiência de remoção da ETE (Figura 43).

Figura 43: Percentuais de atendimento esperado em função dos dados analisados na ETE Fortaleza.



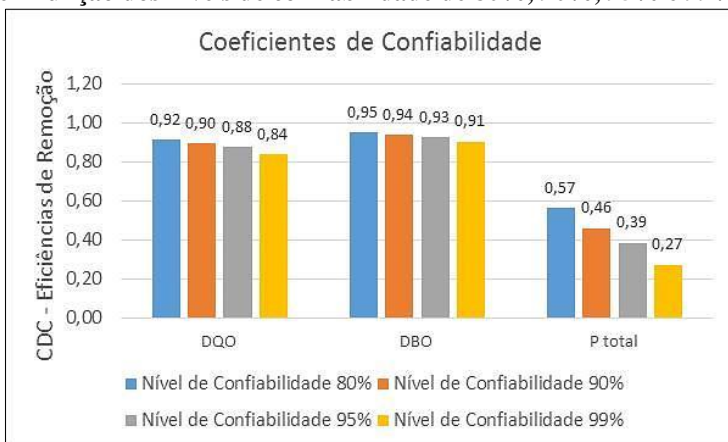
Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando os valores de percentual de atendimento esperados com os valores calculados de percentual de atendimento, verifica-se que o cálculo da estimativa poderia ser utilizado sem grande perda na confiabilidade dos resultados, exceto para P total.

Diferentemente dos resultados encontrados para o percentual de atendimento para as concentrações no efluente, a diferença entre o percentual de atendimento esperado da eficiência de remoção para o percentual atingido foi de 13,04%. Assim, para esta variável o cálculo estatístico apresentou-se pouco confiável.

Foram calculados na sequência os CDCs relativos às eficiências de remoção do sistema de tratamento, para diferentes níveis de confiabilidade. Os valores de CDC podem ser visualizados na Figura 44.

Figura 44: CDCs para as eficiências de remoção do sistema calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99%.



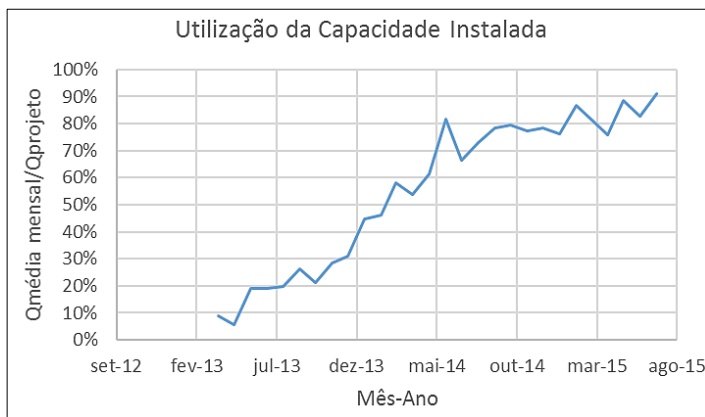
Fonte: elaborado pelo autor.

5.1.2.3. Avaliação da utilização da capacidade instalada

A ETE Fortaleza apresentou um crescimento quase constante no uso mensal da capacidade instalada, partindo 8,9% em abril de 2013 e atingindo 90,9% em julho de 2015. Desta forma, compreende-se que a estação trabalhou integralmente em regime de subutilização desde o início da operação. Extrapolando os valores de crescimento da utilização da capacidade projetou-se que a estação entraria em sobrecarga antes do final do ano de 2015, exigindo assim a ampliação do sistema, caso seja continuado o processo de implantação da rede de coleta do esgoto municipal. Com isso será possível manter a eficiência do tratamento nos padrões atuais.

Os resultados dos cálculos do uso mensal da capacidade instalada estão apresentados na Figura 45.

Figura 45: Série temporal da utilização da capacidade tratamento instalada na ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

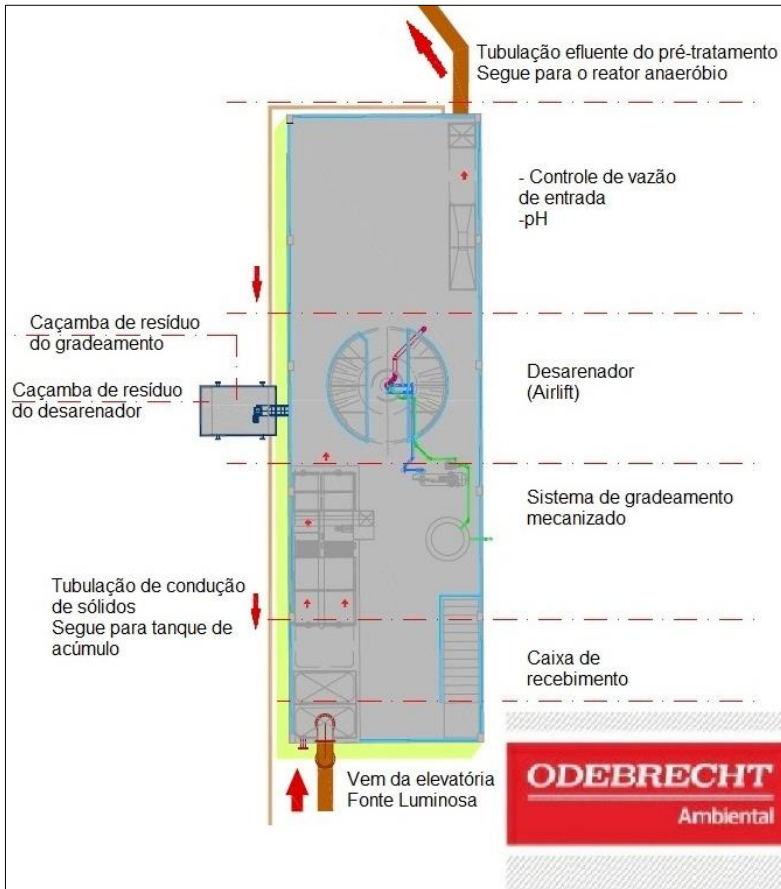
5.2 - DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DO DESEMPENHO OPERACIONAL DA ETE GARCIA

5.2.1 - Diagnóstico

A ETE Garcia localiza-se na Rua Lions Club, tendo entrado em operação em junho de 2011, com sistema de tratamento por reator UASB (ou Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado – RALF). Este sistema recebeu uma melhoria operacional no mês de novembro de 2013, quando foi implantado um reator CMFF (*Complete Mix Fixed Film*) para polimento aeróbio do reator UASB e um decantador secundário para aumento da eficiência de remoção dos sólidos. Esta estação possuía, quando da realização da visita técnica, capacidade de tratamento de 44 L/s e com projeção de ampliação para uma capacidade de 88 L/s em 2016 e potencial para ampliação até 160,1 L/s em final de plano, de acordo com o projeto da unidade.

A ETE Garcia possui a edificação do pré-tratamento executada em concreto armado, conforme representado no desenho técnico da Figura 46, sendo esta unidade composta por: sistema de gradeamento mecanizado, realizando as funções de gradeamento grosseiro e fino (Figura 47), desarenador (Figura 48) equipado com *air-lift*; tratamento de odor por meio de filtro de carvão ativado; e controle automatizado de vazão, de pH e de condutividade do efluente instalados em uma calha Parshall na entrada e saída do pré-tratamento.

Figura 46: Desenho técnico da unidade de pré-tratamento da ETE Garcia.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura 47: Gradeamento mecanizado com peneiramento grosseiro e fino.



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 48: Desarenador do tipo vórtex

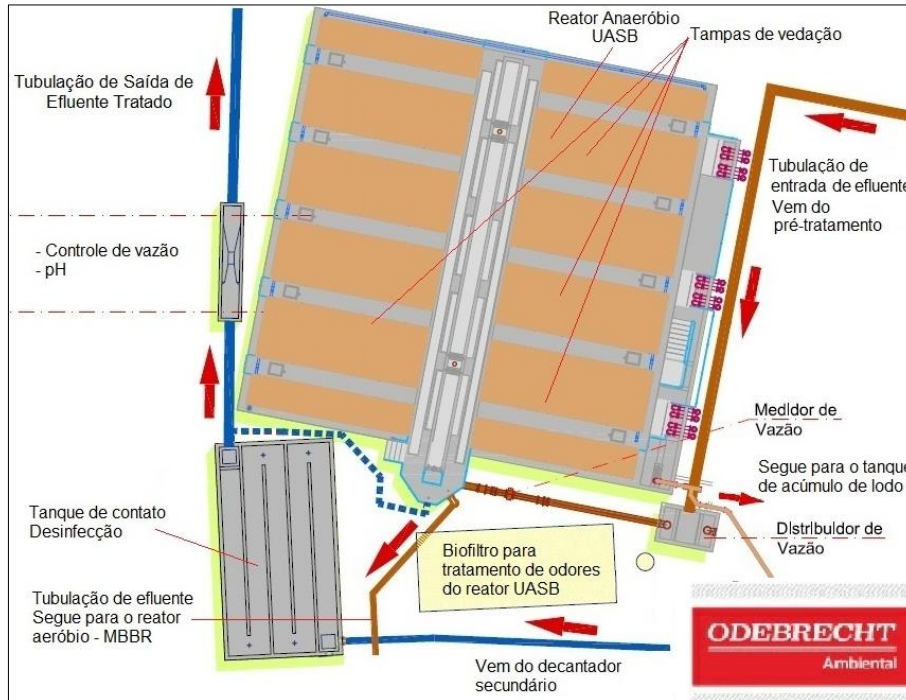


Fonte: registrado pelo autor.

O tratamento primário é efetuado em reator UASB (desenho técnico na Figura 49 e registro fotográfico na Figura 51) com dimensões aproximadas de 7,5m de altura, 19,5m de largura e 20,3m de comprimento, construído em concreto armado e dotado de medição de vazão e de oxigênio dissolvido do afluente e efluente. Este reator é dotado de cobertura de policarbonato alveolar para armazenamento dos gases emitidos pelo efluente em tratamento, os quais são captados e encaminhados por meio de tubulação de ventilação para um biofiltro para tratamento de odores instalado ao lado do reator.

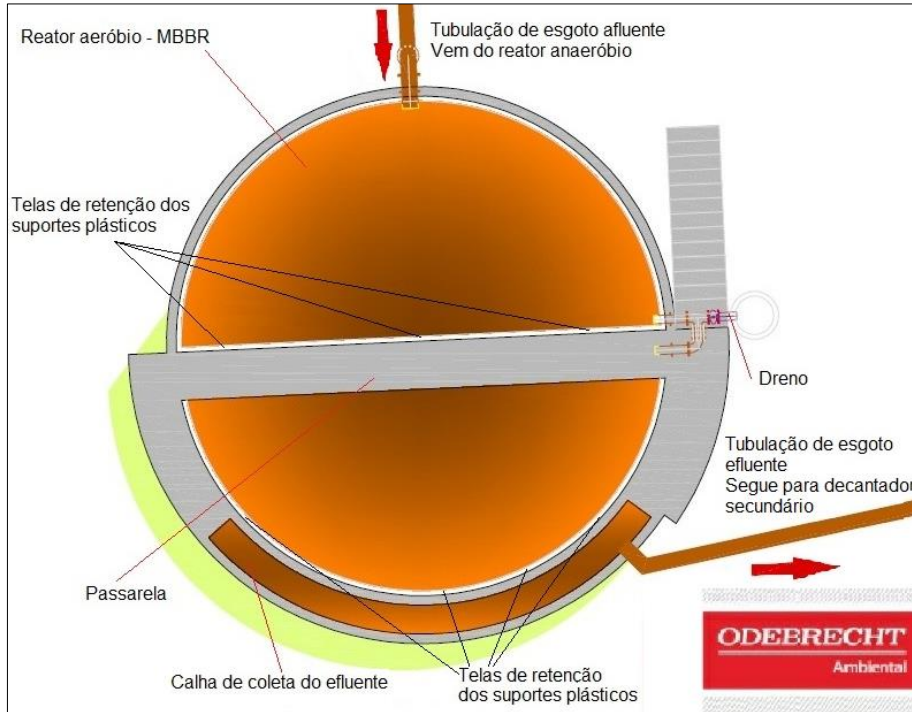
O esgoto efluente do UASB é direcionado para um reator MBBR do tipo CMFF circular aeróbio (desenho técnico na Figura 50 e registro fotográfico na Figura 52), com 6,0m de altura e 10,80m de diâmetro, construído em concreto armado e aerado por meio de sopradores. O efluente do reator MBBR é direcionado por gravidade para a unidade de decantação secundária (Figura 53) que possui 13,0m de diâmetro, 3,85m de altura no círculo externo e 5,21m de profundidade no centro do decantador. O esgoto tratado é então encaminhado para um tanque de contato, para desinfecção por hipoclorito de sódio, e desta unidade é encaminhado para o emissário final que lança o efluente no corpo receptor.

Figura 49: Desenho técnico do reator anaeróbio (UASB) e da unidade de desinfecção da ETE Garcia.



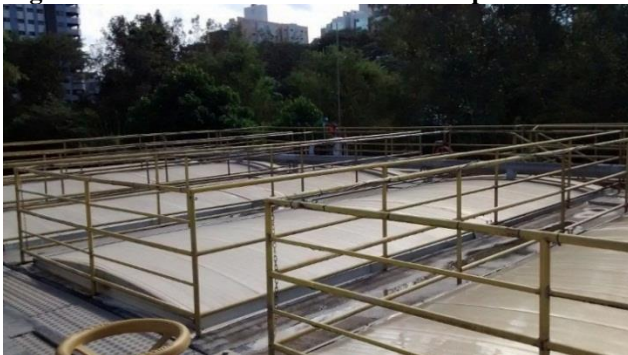
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura 50: Desenho técnico do reator aeróbio MBBR do tipo CMFF - ETE Garcia.



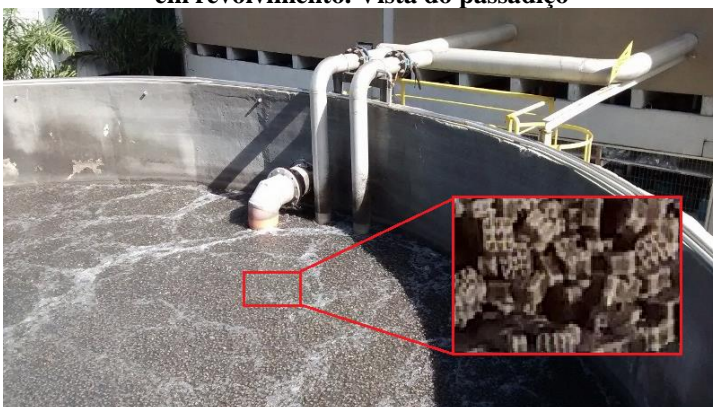
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura 51: Reator UASB com mantas de policarbonato



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 52: Reator CMFF – Tubulações de aeração e suportes plásticos em revolvimento. Vista do passadiço



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 53: Decantador secundário com homogeneizador



Fonte: registrado pelo autor.

Figura 54: Efluente do decantador secundário



Fonte: registrado pelo autor.

O lodo gerado no reator anaeróbico e no decantador secundário é encaminhado para um tanque de acúmulo lodo (Figura 55) e deste para a Casa de Desidratação de Lodo onde recebe a adição de polímero e passa por desaguamento por meio de uma centrífuga (Figura 56). O desenho técnico da Casa de Desidratação de Lodo e do tanque de acúmulo de lodo é apresentado na Figura 57.

Figura 55: Tanque de acúmulo de lodo



Fonte: registrado pelo autor.

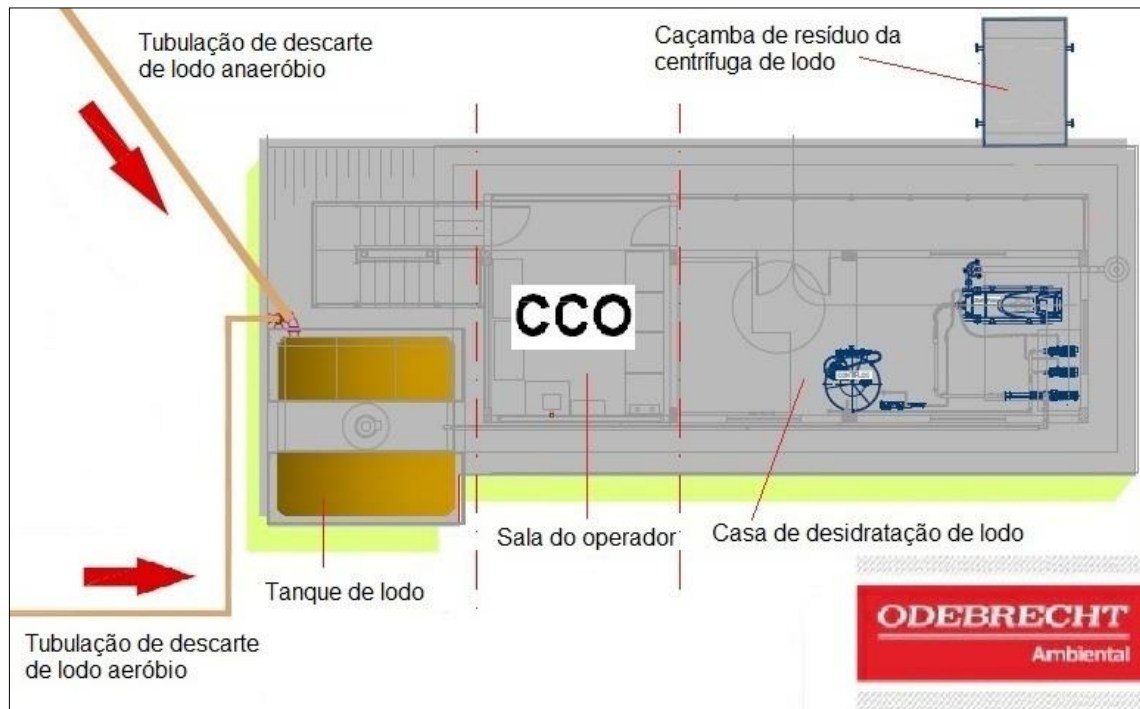
Figura 56: Centrífuga de lodo.



Fonte: registrado pelo autor.

No Apêndice B estão apresentados os desenhos técnicos detalhados das unidades de tratamento componentes da ETE Garcia.

Figura 57: Desenho técnico da casa de desidratação de lodo e do tanque de acúmulo de lodo da ETE Garcia.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

5.2.2 - Análise Estatística do desempenho operacional da ETE Garcia

5.2.2.1. Análise das concentrações

A) Estatística descritiva

Dentre os dados operacionais analisados, verificou-se que os parâmetros que possuíam frequência de monitoramento a montante e a jusante do sistema de tratamento, de modo a permitir a análise estatística proposta são os mesmos daqueles disponíveis no controle da ETE Fortaleza, quais sejam: DBO, DQO e fósforo total.

O controle da concentração de sólidos suspensos foi realizado em 2011, porém foi interrompido ao longo dos anos de 2012 e 2015, impedindo a sua análise estatística ao longo do período de estudo.

Por sua vez, a concentração de NTK foi analisada com frequência mensal ao longo dos anos de 2013, 2014 e 2015. Porém não foi contemplada no ano de 2011 e em 2012 foi realizada de forma esporádica. Assim, a análise estatística não poderia ser feita de forma completa e a análise da influência das melhorias pelas quais a ETE passou no final de 2013 não poderia ser efetuada. Assim esta variável também foi excluída deste trabalho.

A análise de desempenho do sistema de desinfecção não foi efetuada neste trabalho, pois as análises da presença de coliformes totais e termotolerantes não eram efetuadas em 2011 e 2012; e em 2013, 2014 e 2015 foram realizadas somente no efluente, conforme exigido pelo órgão ambiental.

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados da estatística descritiva dos parâmetros de desempenho operacional analisados para a ETE Garcia.

Tabela 13: Dados da estatística descritiva das concentrações do afluente e efluente da ETE Garcia.

Estatística	Vazão (m ³ /d)	DQO (mg/L)		DBO (mg/L)		Ptotal (mg/L)	
		Afl.	Efl.	Afl.	Efl.	Afl.	Efl.
Nº dados	1274	328	301	168	143	31	32
Média	1891,55	591,68	153,62	335,94	62,00	9,00	6,78
Mediana	1796,69	566,50	163,00	321,00	58,00	8,67	7,06
Mínimo	331,51	109,00	7,30	137,00	2,54	3,99	3,37
Máximo	6900,86	1407,00	522,00	770,00	236,00	16,43	9,49
DP	755,43	191,95	92,25	114,18	54,29	2,55	1,67
CV	39,94%	32,44%	60,05%	33,99%	87,56%	28,38%	24,68%

Fonte: elaborado pelo autor.

Verifica-se que os parâmetros com maior coeficiente de variação são os de DQO efluente e DBO efluente, respectivamente, 60,05% e 87,56%, indicando uma variação significativa dos dados em relação à média. A exemplo do que ocorreu para a ETE Fortaleza, há uma diferença expressiva na quantidade de amostras analisadas para os parâmetros de DBO e DQO e a quantidade de amostras analisadas para P total, esta última em número muito menor tanto para o afluente quanto para o efluente.

Segundo Metcalf & Eddy (1991, tradução nossa), o esgoto afluente pode ser caracterizado como de concentração média a forte em termos de concentração de DBO (220 a 300 mg/L para concentração média e 400 mg/L para forte) e DQO (500 mg/L para concentração média e 1.000 mg/L para forte).

Com base na classificação dos sistemas de tratamento proposta por Oliveira (2006), a partir dos padrões de eficiência estabelecidos no PRODES, foram definidas metas de eficiência de remoção e de concentração no efluente para os parâmetros estudados. Pela classificação proposta por Oliveira (2006) com base no PRODES, a ETE Garcia foi enquadrada no padrão G de tratamento. Os valores das metas de eficiência de remoção de DQO, DBO e Ptotal neste caso são os mesmos que foram apresentados na Tabela 11, em função de os padrões das duas ETES em análise serem iguais. Porém os valores de concentração efluente variaram em função dos dados analíticos da ETE Garcia.

Na Tabela 14 estão apresentadas as metas para eficiências de remoção de DBO e DQO e as metas para a concentração no efluente calculadas a partir dos valores medianos do afluente e da meta de eficiência de remoção definida para cada parâmetro.

De acordo com a referência estabelecida no PRODES, para sistemas com padrão G, seria necessária a realização de amostragem composta duas vezes por semana. Considerando o período utilizado neste estudo, nenhum dos parâmetros atende ao critério estabelecido em número e tipo de amostragens realizadas.

Tabela 14: Metas de eficiência de remoção e para concentração dos parâmetros no efluente da ETE Garcia.

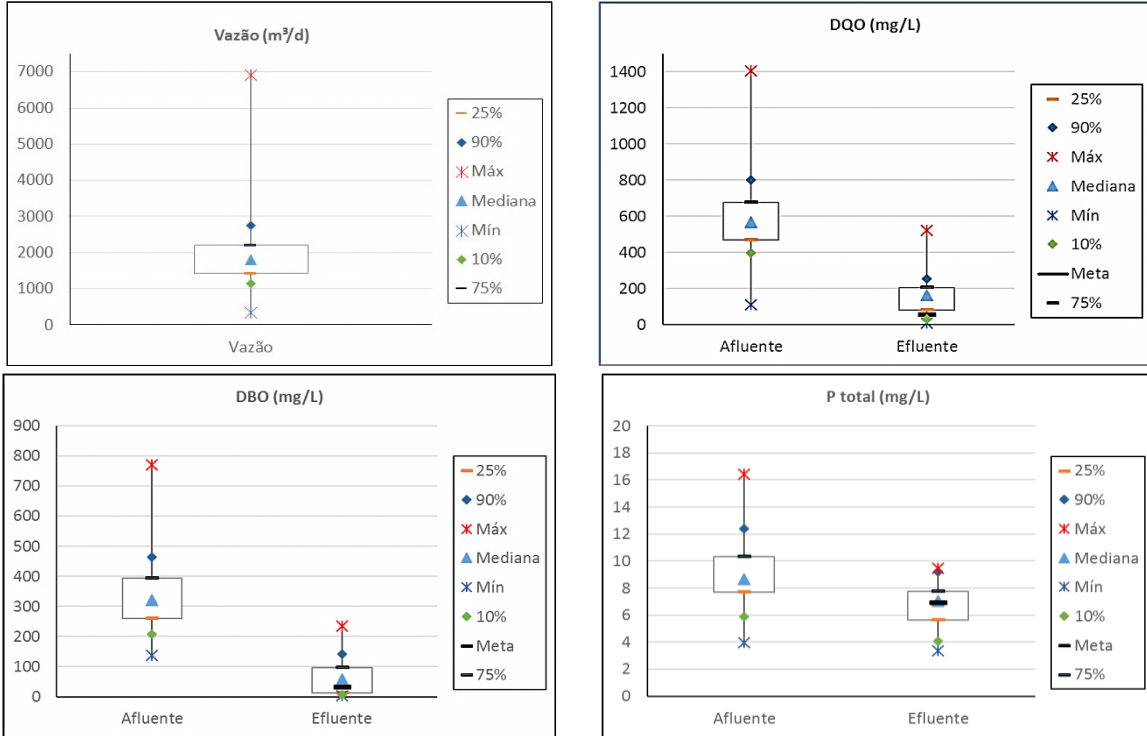
Meta	DQO	DBO	Ptotal
Eficiência de Remoção (%)	95	90	20
Concentração Efluente (mg/L)	56,65	32,10	6,94

Fonte: elaborado pelo autor.

Com as metas de concentração no efluente estabelecidas, foram construídos gráficos do tipo *box-and-whisker*, apresentados na Figura 58, nos quais são apresentadas as distribuições dos valores de mediana, mínimo, máximo, meta e percentis das concentrações do efluente.

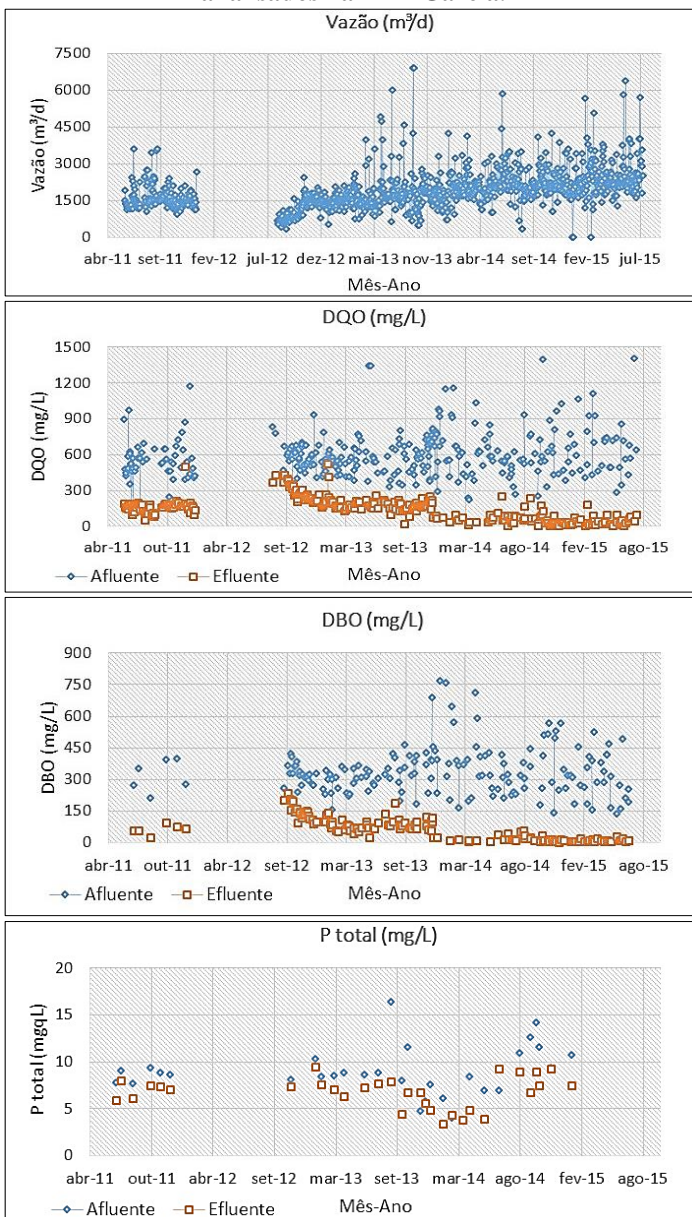
As séries temporais dos valores de concentração de DQO, DBO e P total no efluente estão apresentadas na Figura 58 e Figura 59. Vale frisar que no período compreendido entre janeiro de 2012 e agosto de 2012 não foram apresentados os dados analíticos dos parâmetros avaliados. Isso se deu em função de mudanças na metodologia de armazenamento das informações na forma de planilha eletrônica e por reestruturação da equipe envolvida nas atividades operacionais desta estação.

Figura 58: Medianas, mín., máx., percentis e metas de concentração de DBO, DQO e Ptotal efluente.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 59: Séries temporais da concentração dos parâmetros analisados na ETE Garcia.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se uma variação considerável dos valores de vazão, oscilando entre o mínimo de 331,51 m³/d e o máximo de 6.900,86 m³/d de esgoto tratado. Esta variação pode ser explicada, da mesma maneira que a variação de vazão da ETE Fortaleza, pela ampliação gradual da cobertura da rede coletora do município. Esta interpretação é corroborada pela série temporal da vazão tratada que apresenta uma linha de tendência crescente com o aumento do tempo. Porém, para a ETE Garcia vale ressaltar que a vazão em 2011 variou em torno de 1.000 e 1.500 m³/d e no segundo semestre de 2015 oscilou entre 2.000 e 3.000, mostrando que a vazão tratada dobrou ao longo do horizonte de análise.

Em relação à DBO e DQO, verificou-se uma redução considerável das cargas poluidoras, quando comparados os dados do afluente e do efluente, conforme esperado. Para a DBO, 75% das amostras do efluente apresentaram valores menores que 100 mg/L e para a DQO, este valor foi de 200 mg/L. Os 25% que excedem estes valores concentraram-se no segundo semestre de 2012, assim poder-se-ia verificar junto à operadora da unidade os eventos que geraram a queda na eficiência do sistema de tratamento.

É possível verificar a redução das concentrações de DBO e DQO efluente a partir de setembro de 2012 e em novembro de 2013. Porém, mais adiante será analisada neste trabalho a influência da implantação do reator MBBR e do decantador secundário nos resultados operacionais da ETE.

A redução na carga poluidora de P total foi observada, porém com menor intensidade do que para os outros parâmetros. Vale destacar que ocorreram esporadicamente nos anos de 2013 e 2014 valores de concentração de P total no efluente maiores que no afluente. Porém, pode-se afirmar que o sistema possui, na maior parte do tempo, capacidade de redução da carga poluidora de P total.

Comparando com as metas estabelecidas, verifica-se que analisando todo o período de operação, em mais de 75% das amostras a ETE não atingiu a meta de concentração de DQO no efluente; e que as metas de concentração de DBO no efluente foram atingidas em aproximadamente 50% das análises. Porém, a avaliação da influência da implantação de melhorias mostrará quantitativamente como se deu a mudança no padrão de atendimento às metas após novembro de 2013.

B) Análise da influência da sazonalidade nas concentrações do efluente

Para verificação da influência da sazonalidade no desempenho operacional da ETE Garcia foi aplicado o teste U de Mann-Whitney, conforme descrito na seção 4.2.2.2 Estatística descritiva e avaliação do percentual de atendimento.

Na Figura 60 estão apresentados os gráficos com os valores médios dos parâmetros classificados em função dos períodos chuvoso e seco; e na Figura 61 estão apresentados os gráficos *box-whisker* criados no *software* Statistica® e na sequência os resultados do teste U de Mann-Whitney efetuados utilizando o mesmo programa.

O teste U de Mann-Whitney retornou o valor-p igual a 0,00374 para DQO efluente. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a sazonalidade interfere de forma estatisticamente significativa neste parâmetro.

Para DBO efluente, obteve-se um valor-p igual a 0,000038. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a sazonalidade tem influência estatisticamente significativa neste parâmetro.

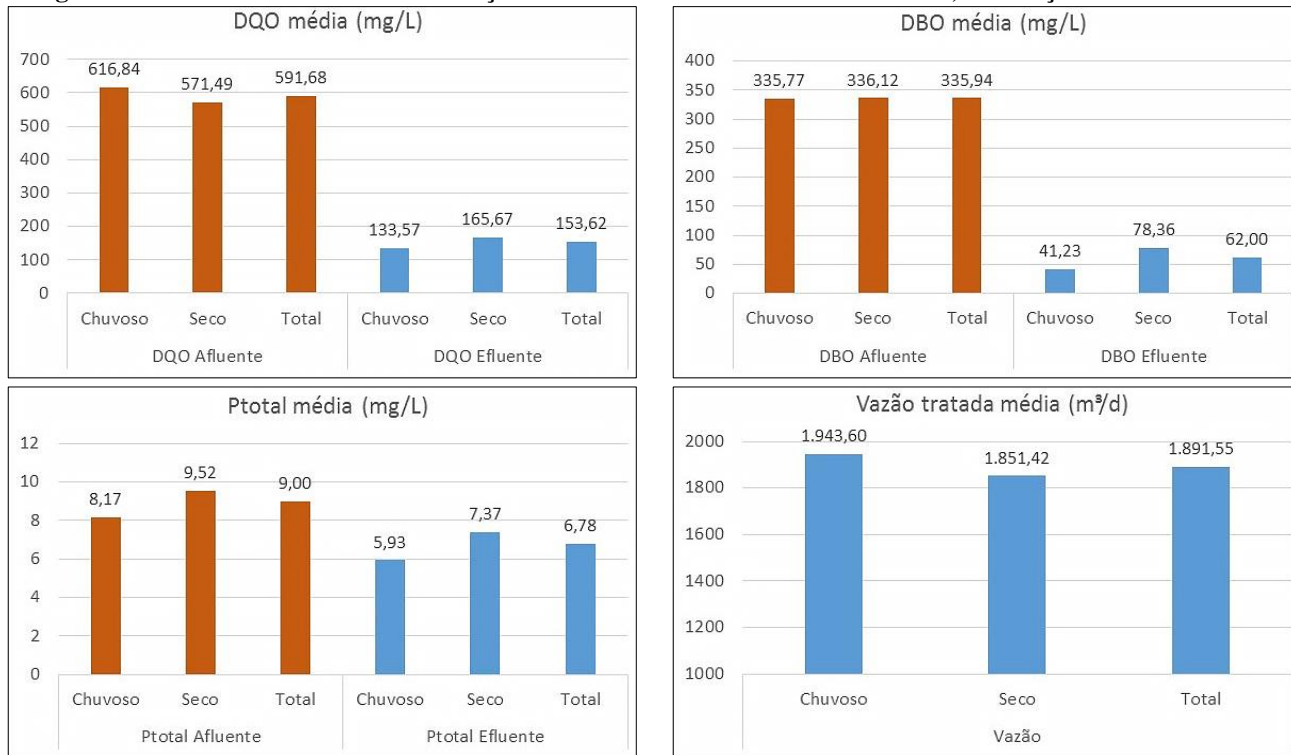
Para P total concluiu-se que a sazonalidade interfere de forma significativa nos resultados de concentração efluente, sendo o valor-p para este parâmetro igual a 0,0273.

Para a vazão tratada, obteve-se o valor-p igual a 0,00112, sendo a influência da sazonalidade considerada estatisticamente significativa para este parâmetro.

Assim, para todos os parâmetros verifica-se a influência da precipitação nos resultados do tratamento. Como o reator UASB da ETE possui cobertura para impedir a saída dos gases odorantes, entende-se que a interferência pode ocorrer devido à diluição do esgoto afluente, em função da contribuição das vazões de infiltração e ligações irregulares das redes de drenagem na rede de coleta de esgoto; ou devido à incorporação de água da chuva no reator MBBR e no decantador secundário.

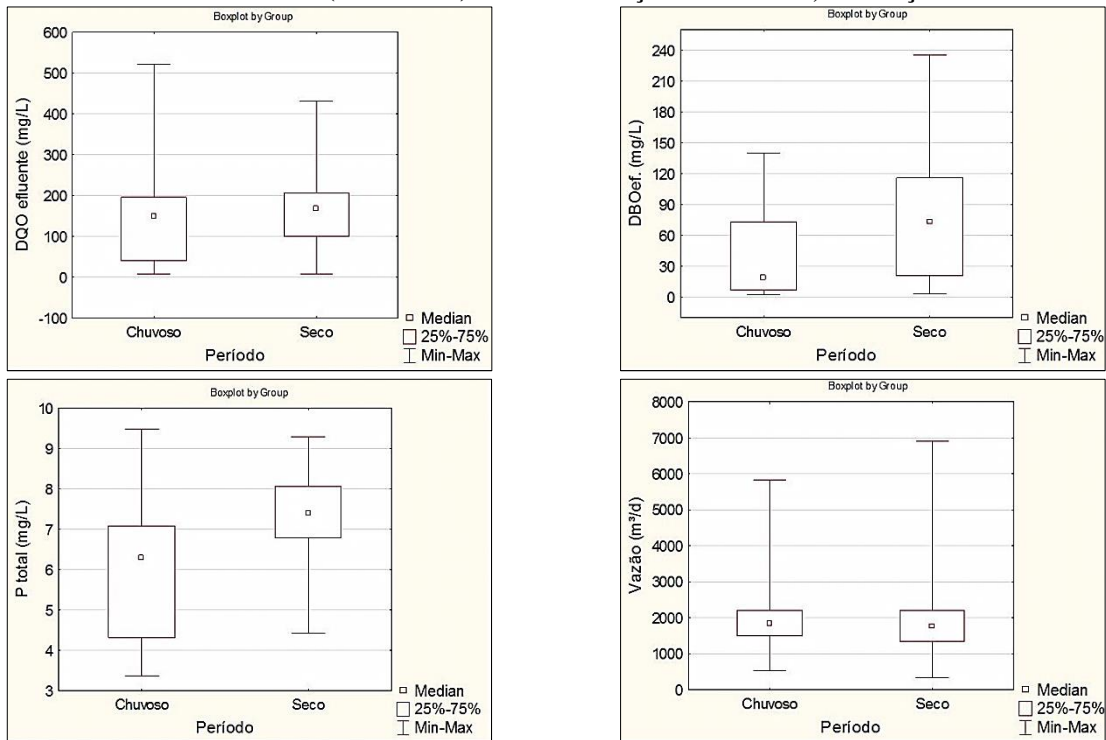
A variação dos valores de vazão, apesar de ser estatisticamente significativa, apresenta-se de forma discreta no gráfico *box-whisker*. Porém, verifica-se que há a concentração de valores maiores de vazão próximo à linha de permanência de 75% no período chuvoso em relação aos valores observados no período seco, corroborando para a interpretação de que há um incremento na vazão ao longo do período chuvoso.

Figura 60: Valores médios de concentração afluente e efluente e de vazão tratada, em função da sazonalidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 61: Gráficos *box-whisker* (Statística®) das concentrações do efluente, em função da sazonalidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

C) Avaliação do impacto da implantação de melhorias

No mês de novembro de 2013 a ETE Garcia passou por melhorias operacionais, recebendo a implantação da unidade MBBR (do tipo CMFF®) para polimento do efluente do reator UASB e da unidade de decantação secundária instalada após o reator MBBR na sequência do tratamento da ETE. Esta modificação no sistema de tratamento visou o aumento da capacidade de tratamento (em termos de vazão) e aumento da capacidade de remoção de matéria orgânica e de sólidos do efluente, podendo ter originado ainda o aumento na capacidade de remoção de nutrientes, apesar de este não ser o objetivo central das unidades CMFF® e de decantação secundária.

Para avaliar a influência da implantação das melhorias antes e após o mês de novembro de 2013 nas concentrações do efluente, foi aplicado o teste U de Mann-Whitney no grupo amostral de valores de concentração do efluente, para as variáveis em estudo. Adicionalmente, foram construídos os gráficos *box-whisker* destas variáveis (Figura 62).

O teste U de Mann-Whitney retornou o valor-p igual a 0,00 para concentração de DQO efluente. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a implantação do reator MBBR e do decantador secundário interferiu de forma estatisticamente significativa neste parâmetro.

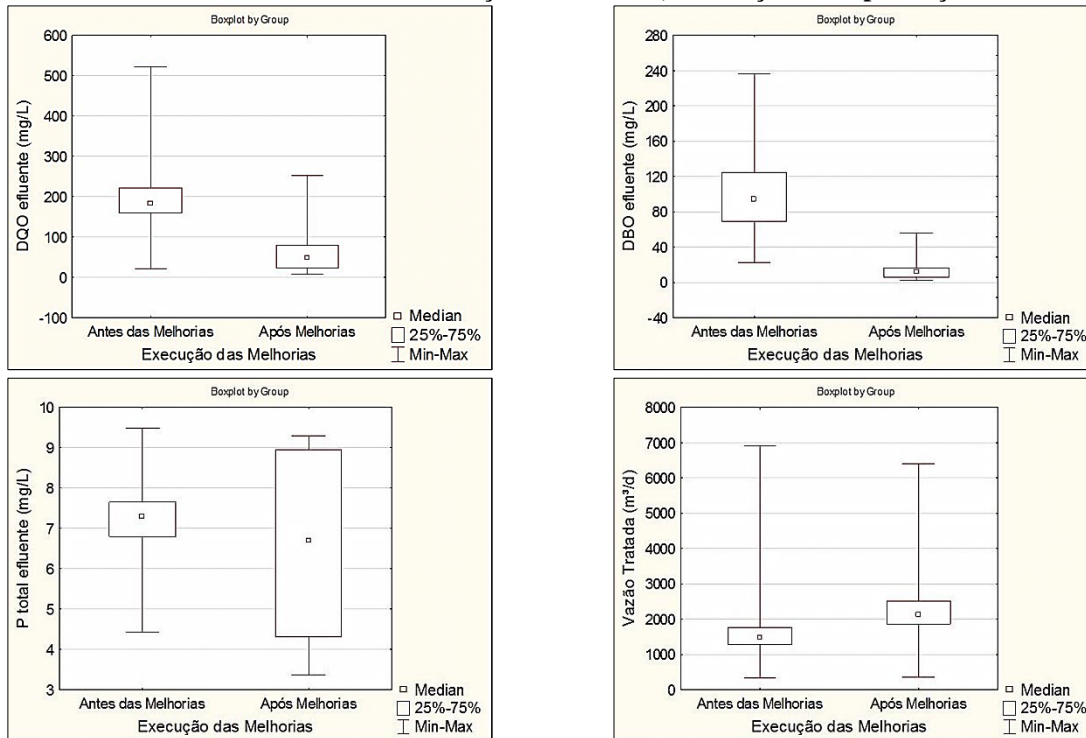
Para DBO efluente também se obteve um valor-p igual a 0,00. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a implantação das melhorias teve influência estatisticamente significativa neste parâmetro.

Para P total concluiu-se que as melhorias implantadas não interferiram de forma significativa nos resultados de concentração efluente, sendo o valor-p para este parâmetro igual a 0,26519.

Para a vazão tratada, o valor-p retornado foi igual a 0,00, sendo a influência da implantação das melhorias considerada estatisticamente significativa para este parâmetro, de forma diferente do que para os demais. O teste U aplicado para a vazão tratada foi útil para verificar que a vazão tratada após a execução das melhorias foi maior do que antes das melhorias, em função do aumento da cobertura da rede coletora municipal de coleta.

A despeito do aumento significativo das vazões, as concentrações no efluente de DBO e DQO foram significativamente menores após novembro de 2013, mostrando que o reator MBBR e o decantador secundário serviram para melhorar a qualidade do efluente e para aumentar a capacidade de tratamento, em termos de vazão.

Figura 62: Gráficos *box-whisker* das concentrações do efluente, em função da implantação de melhorias.



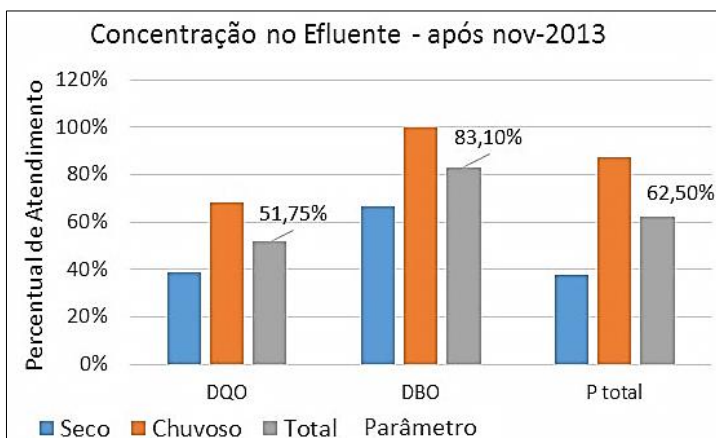
Fonte: elaborado pelo autor.

D) Cálculo dos percentuais de atendimento e dos Coeficientes de Confiabilidade (CDC)

Verificou-se que a implantação das melhorias realizadas impactou significativamente nos resultados da maioria dos parâmetros analisados, o cálculo dos percentuais de atendimento e dos coeficientes de confiabilidade neste estudo ficaram restritos ao período posterior a novembro de 2013, de modo a apresentar os resultados dos percentuais e coeficientes correspondentes à atual concepção da unidade de tratamento. Como o padrão da ETE (PRODES) foi definido com base nesta concepção, não houve prejuízo da análise estatística ao utilizar as metas pré-estabelecidas como referência.

Na Figura 63 estão apresentados os percentuais de atendimento às metas estabelecidas em função dos períodos chuvosos, secos.

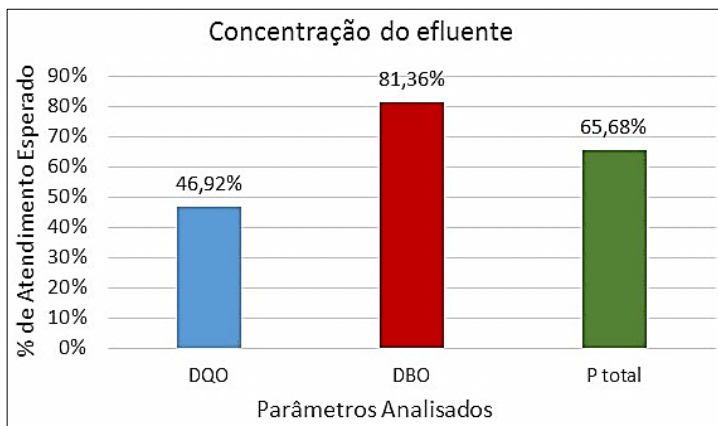
Figura 63: Percentuais de atendimento às metas de concentração no efluente da ETE Garcia, após a implantação de melhorias.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para efeito de verificação dos percentuais de atendimento atingidos foram calculados os percentuais de atendimento esperados (Figura 64).

Figura 64: Percentuais de atendimento esperado em função dos dados analisados na ETE Garcia, após a implantação de melhorias.

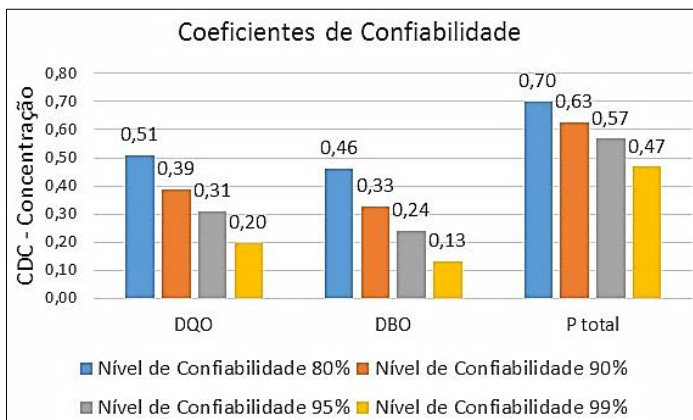


Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando os valores de percentual de atendimento esperados com os valores calculados para o período de estudo total, verifica-se que o cálculo da estimativa poderia ser utilizado sem grande perda na confiabilidade dos resultados. O parâmetro que apresentou maior desvio entre o percentual de atendimento e o percentual esperado foi o de concentração de DQO, com 51,75% e 46,92% respectivamente. Deste modo, o percentual real de atendimento foi maior que o percentual esperado.

Foram calculados na sequência os CDCs relativos às concentrações efluentes do sistema de tratamento para diferentes níveis de confiabilidade. Os valores de CDC podem ser visualizados na Figura 65.

Figura 65: Coeficientes de confiabilidade calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99%.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com objetivo de explicitar o impacto das melhorias realizadas na ETE incorporando a variável do percentual de atendimento, foram construídas as Tabelas 15 e 16 que sintetizam a estatística descritiva dos dados de concentração antes e após a implantação das melhorias.

Nos dados expostos nas tabelas ressalta-se o aumento da vazão média de 1.555,59 m³/d para 2.225,41 m³/d ao mesmo tempo em que a concentração média de DQO reduz de 199,23 mg/L para 78,8 mg/L, a de DBO reduz de 101,82 para 21,63 mg/L e a de Ptotal reduz de 7,14 mg/L para 6,42 mg/L.

Percebe-se ainda o aumento expressivo dos percentuais de atendimento às metas em função das melhorias. Porém, é importante lembrar que as metas foram estabelecidas em função da atual concepção da ETE e considerando níveis de exigência mais rigorosos que a legislação vigente. Assim, os baixos níveis de atendimento anteriores a novembro de 2013 são um indicativo de que as metas estabelecidas estavam em discordância com o sistema em operação. Os índices de atendimento calculados após novembro de 2013 são considerados adequados e devem ser interpretados como balizadores para a implantação de um sistema de melhorias contínuas e monitoramento do desempenho da ETE.

Tabela 15: Estatística descritiva (1) da vazão tratada e da concentração de DQO no efluente em função da implantação de melhorias.

Estatística	Vazão (m ³ /d)		DQO (mg/L)	
	Antes	Após	Antes	Após
Nº dados	635	639	187	114
Média	1555,59	2225,41	199,23	78,80
Mediana	1471,79	2116,86	183,00	53,50
Mínimo	331,51	352,44	21,00	7,30
Máximo	6900,86	6401,25	522,00	253,00
DP	666,88	687,57	73,92	67,16
CV	42,87%	30,90%	37,10%	85,22%
Atendimento à meta	-	-	1,07%	51,75%

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 16: Estatística descritiva (2) das concentrações de DBO e Ptotal no efluente em função da implantação de melhorias.

Estatística	DBO (mg/L)		Ptotal (mg/L)	
	Antes	Após	Antes	Após
Nº dados	72	71	16	16
Média	101,82	21,63	7,14	6,42
Mediana	93,00	12,00	7,35	6,75
Mínimo	23,00	2,54	4,42	3,37
Máximo	236,00	120,00	9,49	9,30
DP	44,25	26,61	1,11	2,07
CV	43,46%	123,03%	15,56%	32,20%
Atendimento à meta	2,78%	83,10%	31,25%	62,50%

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.2.2. Análise das eficiências de remoção

A) Estatística descritiva

A análise da eficiência de remoção foi realizada para os mesmos parâmetros cujas concentrações foram analisadas, visto que os valores de eficiência foram calculados a partir das concentrações afluentes e efluentes.

Na Tabela 17 estão apresentados os resultados da estatística descritiva das eficiências de remoção dos parâmetros analisados para a ETE Garcia.

Tabela 17: Dados da estatística descritiva das eficiências de remoção da ETE Garcia.

Estatística	DQO (%)	DBO (%)	Ptotal (%)
Nº dados	289	140	27
Média	72,08%	79,67%	24,37%
Mediana	70,76%	81,34%	19,87%
Mínimo	6,92%	22,31%	-8,27%
Máximo	99,07%	99,47%	51,67%
DP	17,15%	16,91%	15,90%
CV	23,79%	21,23%	65,25%

Fonte: elaborado pelo autor.

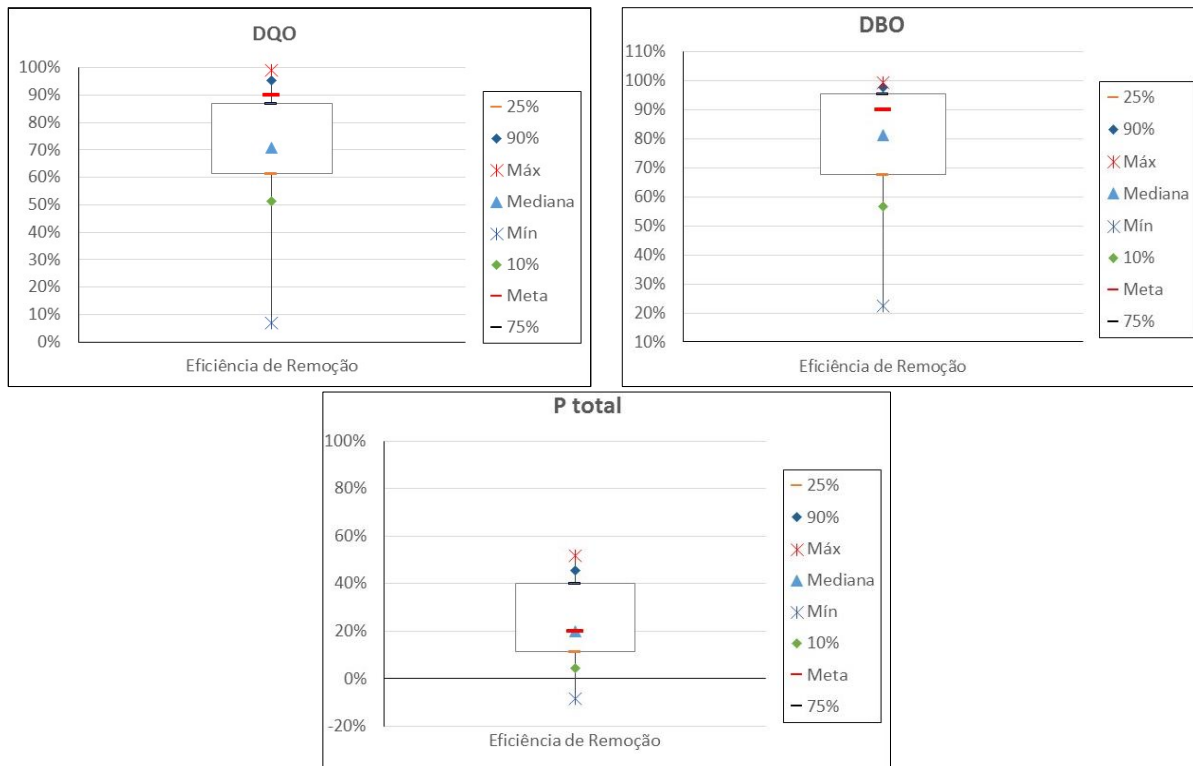
Os valores médios e medianos de eficiência de remoção apresentados são baixos considerando a atual concepção do sistema de tratamento da ETE Garcia. Porém, é necessário considerar que os dados dos anos de 2011 a 2013, quando a ETE operava somente com um reator UASB, estão incluídos na estatística apresentada, reduzindo as médias e medianas apresentadas. No item C desta seção será avaliado o impacto das melhorias realizadas em 2013 nos resultados das eficiências de remoção.

Dos valores da estatística descritiva, destacam-se os valores máximos de eficiência de remoção de DBO e DQO e o valor mínimo de eficiência de remoção de Ptotal, negativo em 8,27%.

Conforme Tabela 13, foram estabelecidas metas para as eficiências de remoção da ETE Garcia com base nos critérios definidos pelo PRODES e na literatura. A Figura 66 apresenta os gráficos *box-whisker* das distribuições estatísticas das eficiências de remoção de DBO, DQO e P total ao longo do processo de tratamento.

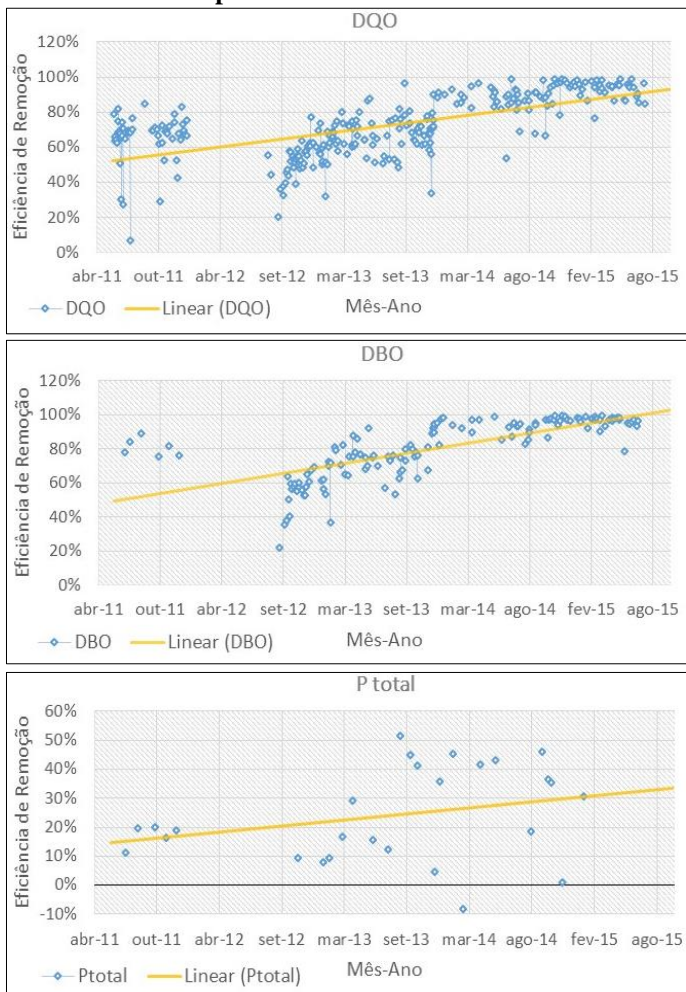
As séries temporais dos valores de eficiência de remoção estão apresentadas na Figura 67.

Figura 66: Medianas, mín., máx., percentis e metas de eficiência de remoção de DBO, DQO e Ptotal.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 67: Séries temporais das eficiências de remoção dos parâmetros analisados.



Fonte: elaborado pelo autor.

Mesmo considerando o período de operação da ETE Garcia somente com o UASB, a eficiência mediana de remoção de DQO manteve-se na faixa de 70%, a de DBO na faixa de 80% e a de Ptotal em torno de 20%.

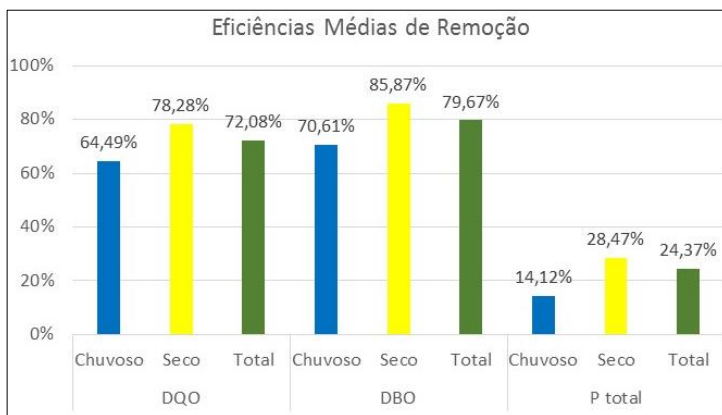
Em relação às metas estabelecidas, verificou-se que o melhor atendimento foi o da eficiência de remoção de Ptotal e o pior, de eficiência de remoção de DQO.

Nas séries temporais observou-se que há dois momentos ao longo do tempo em que há mudança no comportamento dos resultados: no último trimestre de 2012 (redução das eficiências de remoção) e em novembro de 2013 (aumento das eficiências de remoção). Não foi possível concluir a causa da redução das eficiências de remoção registradas em 2012. Em 2013 ocorreu a implantação das melhorias na ETE, o que justifica o aumento da eficiência do tratamento de forma geral.

B) Análise da influência da sazonalidade nas concentrações do efluente

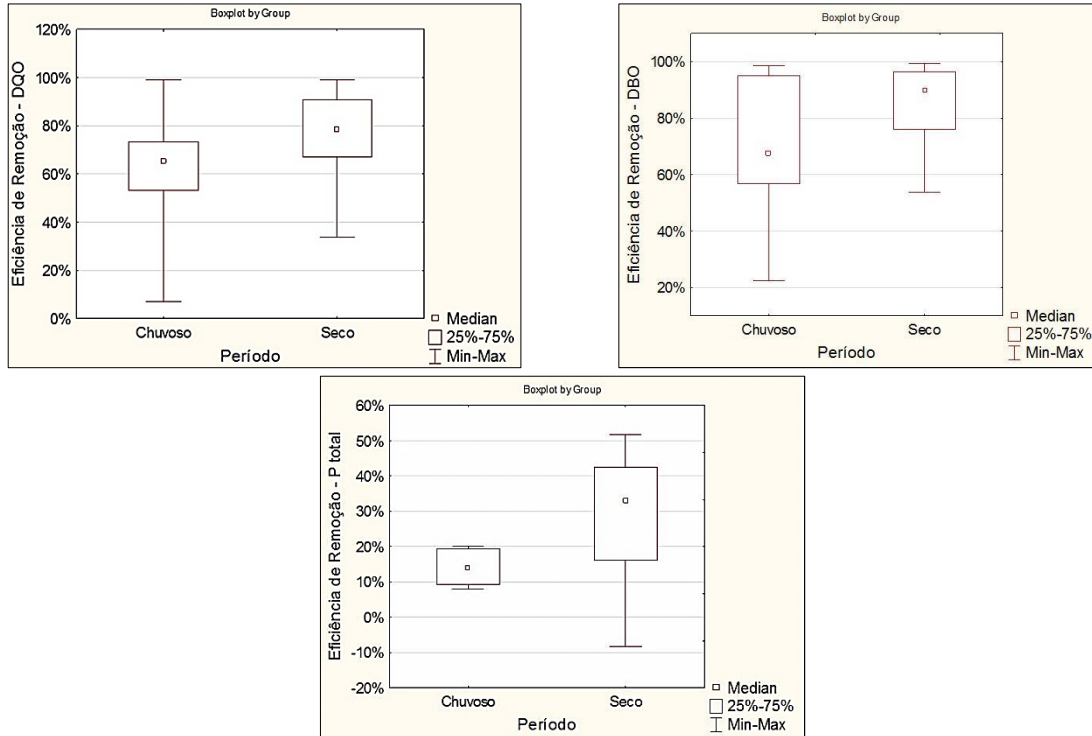
Na Figura 68 está apresentado o gráfico com os valores médios das eficiências de remoção classificados em função dos períodos chuvoso e seco; e na Figura 69 estão apresentados os gráficos *box-whisker* dos valores de eficiência de remoção criados no *software* Statistica® e na sequência os resultados do teste U de Mann-Whitney efetuados utilizando o mesmo programa.

Figura 68: Valores médios de eficiência de remoção de DQO, DBO e P total, em função da sazonalidade



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 69: Gráficos *box-whisker* (Statistica®) das eficiências de remoção, em função da sazonalidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

O teste U de Mann-Whitney retornou o valor-p igual a 0,00 para eficiência de remoção de DQO. Sendo este valor menor que 0,05, conclui-se que a sazonalidade influencia no comportamento desta variável.

Para a eficiência de remoção de DBO, obteve-se um valor-p igual a 0,000019. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a sazonalidade tem influência estatisticamente significativa na remoção de DBO na ETE Garcia.

Para a eficiência de remoção de P total concluiu-se que a sazonalidade influencia de forma significativa nos resultados, visto que o valor-p para este parâmetro é igual a 0,034818.

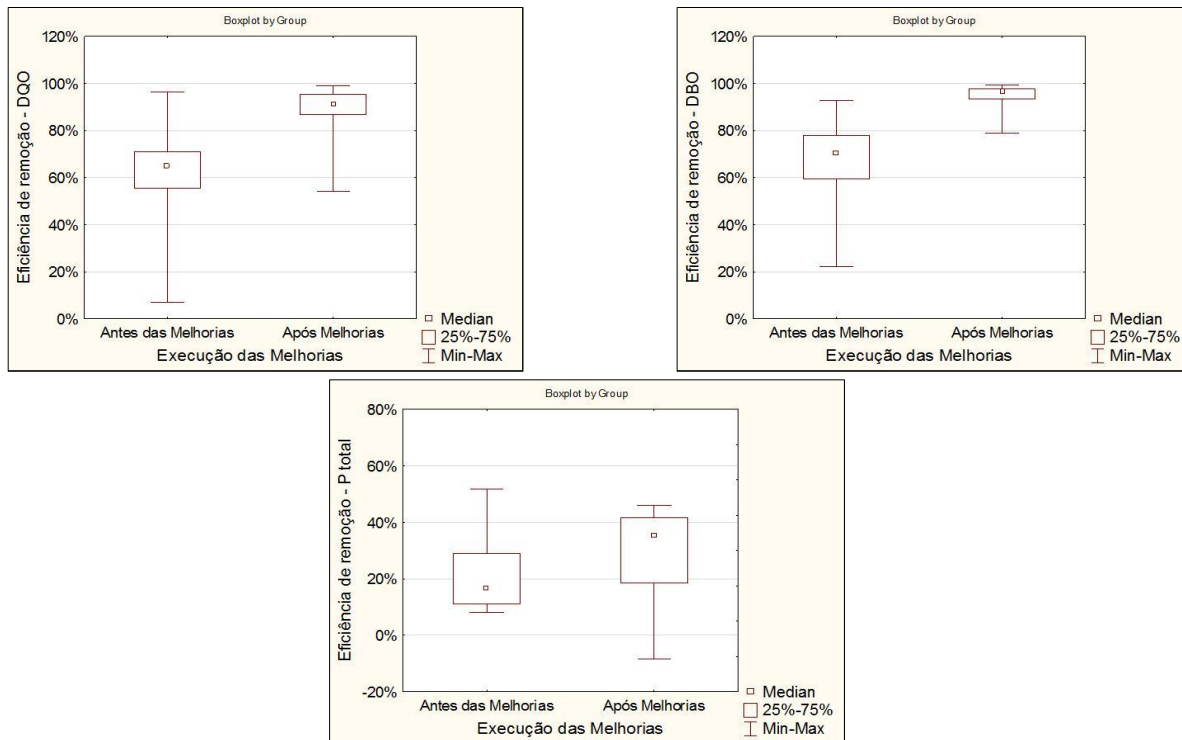
Em concordância com os resultados obtidos na análise da influência da sazonalidade nas concentrações de DBO, DQO e P total, todos os parâmetros de eficiência de remoção apresentaram diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso, apresentando de forma geral, eficiências menores nos períodos chuvosos. Pode-se afirmar que, dentre outros possíveis fatores, esta queda da eficiência ocorre devido à interferência nos processos de biodegradação, em função da maior diluição do esgoto afluente da ETE. Outro fato que pode ser investigado, é a interferência da água da chuva que precipita no reator MBBR e no decantador secundário, que não possuem cobertura.

C) Avaliação do impacto da implantação de melhorias

Para avaliar a influência da implantação das melhorias antes e após o mês de novembro de 2013 nas eficiências de remoção de DQO, DBO e Ptotal, foi aplicado o teste U de Mann-Whitney no grupo amostral de valores de eficiência de remoção, para as variáveis em estudo. Adicionalmente, foram construídos os gráficos *box-whisker* destas variáveis (Figura 70).

A avaliação do impacto da implantação das melhorias foi realizada antes do cálculo dos percentuais de atendimento e CDCs, a fim de restringir estes cálculos para o período de operação mais representativo, em caso de divergências significativas.

Figura 70: Gráficos box-whisker das eficiências de remoção do efluente, em função da implantação de melhorias.



Fonte: elaborado pelo autor.

O teste U de Mann-Whitney retornou o valor-p igual a 0,00 para eficiência de remoção de DQO. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a implantação do reator MBBR e do decantador secundário interferiu de forma estatisticamente significativa neste parâmetro.

Para a eficiência de remoção de DBO também se obteve um valor-p igual a 0,00. Sendo este valor menor que 0,05 conclui-se que a implantação das melhorias teve influência estatisticamente significativa neste parâmetro.

Para P total concluiu-se que as melhorias implantadas não interferiram de forma significativa nos resultados de eficiência de remoção, sendo o valor-p para este parâmetro igual a 0,28937.

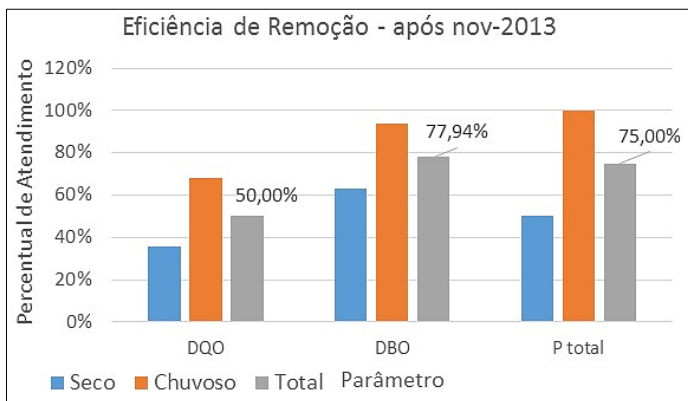
Os valores de eficiência de remoção de DBO e DQO após a implantação das melhorias apresentaram-se superiores em relação aos valores registrados antes das melhorias.

D) Cálculo dos percentuais de atendimento e dos Coeficientes de Confiabilidade (CDC)

Como no item C da seção 5.2.2.1, verificou-se que a implantação das melhorias realizadas impactou significativamente nos resultados da maioria dos parâmetros analisados, o cálculo dos percentuais de atendimento e dos coeficientes de confiabilidade relativos à eficiência de remoção do sistema neste estudo ficaram restritos ao período posterior a novembro de 2013, de modo a apresentar os resultados dos percentuais e coeficientes correspondentes à atual concepção da unidade de tratamento. Como o padrão da ETE (PRODES) foi definido com base nesta concepção, não houve prejuízo da análise estatística ao utilizar as metas pré-estabelecidas como referência.

Na Figura 71 estão apresentados os percentuais de atendimento às metas estabelecidas em função dos períodos chuvosos, secos e os percentuais no período total de estudo.

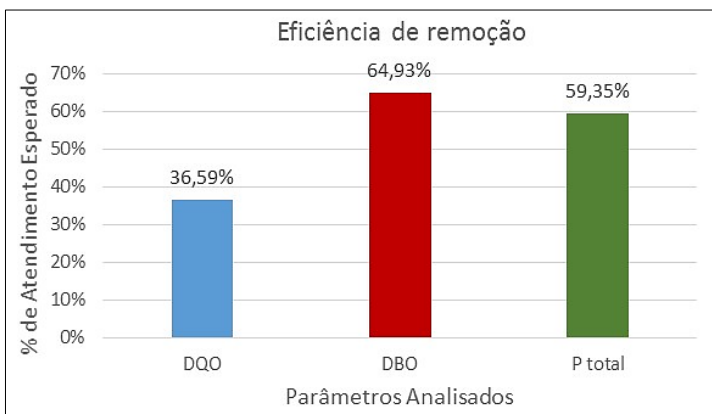
Figura 71: Percentuais de atendimento às metas de eficiência de remoção da ETE Garcia.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para efeito de verificação dos percentuais de atendimento atingidos foram calculados os percentuais de atendimento esperados (Figura 72).

Figura 72: Percentuais de atendimento esperados em função dos dados analisados.



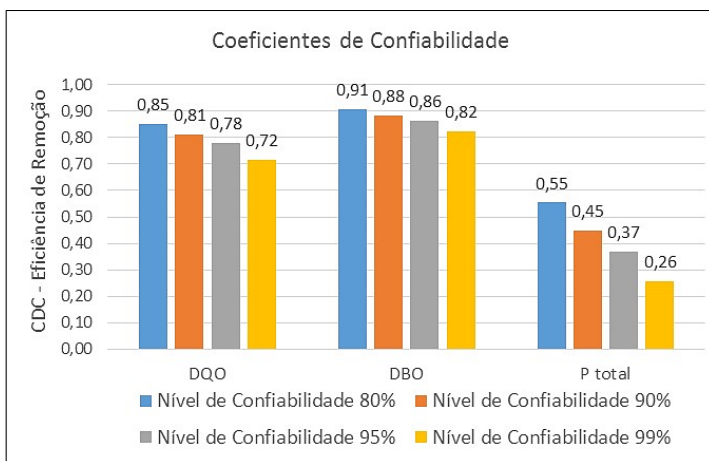
Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando os valores de percentual de atendimento esperados com os valores calculados de percentual de atendimento, verifica-se que o cálculo da estimativa não apresentou adesão aos valores reais do

desempenho da ETE. Neste caso, todos os valores reais de eficiência de remoção ficaram acima dos valores esperados.

Foram calculados na sequência os coeficientes de confiabilidade para as eficiências de remoção do sistema de tratamento, para diferentes níveis de confiabilidade. Os valores de CDC podem ser visualizados na Figura 73.

Figura 73: CDCs para as eficiências de remoção calculados em função dos níveis de confiabilidade de 80%, 90%, 95% e 99%.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com objetivo de explicitar o impacto das melhorias realizadas na ETE incorporando a variável do percentual de atendimento, foi construída a Tabela 18 que sintetiza a estatística descritiva dos dados das eficiências de remoção antes e após a implantação das melhorias.

Nos dados expostos na tabela ressalta-se o aumento expressivo da eficiência de remoção média de DBO, passando de 67,09% para 92,98%; e os aumentos das medianas relativas à DBO e DQO, para respectivamente 90,05% e 95,67%.

Por sua vez os coeficientes de variação da eficiência de remoção de DQO e de DBO sofreram redução substancial após novembro de 2013, indicando que além do aumento da capacidade de remoção da matéria orgânica, o sistema possivelmente teve um aumento em sua capacidade de amortecimento das variações de vazão e/ou da qualidade do esgoto a ser tratado.

A exemplo do que ocorreu para a análise dos percentuais de atendimento das concentrações de DQO, DBO e Ptotal no efluente,

verificou-se o aumento de todos os percentuais para as eficiências de remoção. Porém, novamente vale frisar que as metas estabelecidas neste estudo levaram em consideração o sistema UASB seguido de MBBR e decantador secundário, com desinfecção. Assim, os valores extremamente baixos para o período anterior a novembro de 2013 não são um indicativo de mau desempenho operacional ou de falhas no sistema de tratamento.

Tabela 18: Estatística descritiva das eficiências de remoção de DQO, DBO e Ptotal em função da implantação de melhorias.

Estatística	DQO (mg/L)		DBO (mg/L)		Ptotal (mg/L)	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
Nº dados	175	114	72	68	15	12
Média	62,51%	86,76%	67,09%	92,98%	21,62%	27,54%
Mediana	64,23%	90,05%	69,83%	95,67%	16,59%	35,34%
Mínimo	6,92%	33,77%	22,31%	67,57%	8,04%	-8,27%
Máximo	96,55%	99,07%	92,56%	99,47%	51,67%	46,03%
DP	12,92%	11,54%	13,45%	7,19%	13,82%	18,05%
CV	<u>20,67%</u>	<u>13,30%</u>	<u>20,05%</u>	<u>7,73%</u>	63,93%	65,52%
Atend. à meta	0,57%	50,00%	1,39%	77,94%	26,67%	75,00%

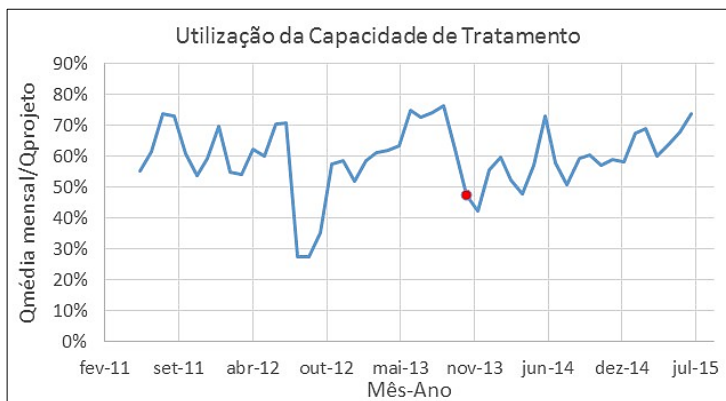
Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.2.3. Avaliação da utilização da capacidade instalada

A utilização da capacidade instalada da ETE Garcia apresentou um comportamento variável e não linear ao longo do período analisado. Destacam-se três pontos: a queda da utilização da capacidade entre julho de 2012 e agosto de 2012; o crescimento quase constante entre setembro de 2012 e setembro de 2013, quando foi atingido o ponto máximo de utilização (76%); e o mês de novembro de 2013 quando a capacidade de tratamento da ETE foi ampliada com a implantação do módulo MBBR. Deste ponto em diante ocorreu crescimento da utilização da capacidade que passou a ser calculada utilizando o novo valor de vazão de projeto.

Os resultados dos cálculos do uso mensal da capacidade instalada estão apresentados na Figura 74.

Figura 74: Série temporal da utilização da capacidade tratamento instalada na ETE Garcia.



Nota: período do aumento da vazão de projeto destacado em vermelho.

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 - APLICAÇÃO DO SISTEMA DE INDICADORES DE DESEMPENHO ID-ETE

Para aplicação do Sistema ID-ETE, foram incorporados os fatores de contexto à análise e realizada a classificação qualitativa dos dados analíticos, conforme metodologia proposta por Barros (2013). Desta maneira tornou-se possível compreender de forma abrangente a relação entre os resultados encontrados no cálculo dos IDs e os sistemas de tratamento em operação.

Devido ao fato de as duas ETES se localizarem na mesma cidade, há uma distância de aproximadamente 5km, e serem operadas pela mesma empresa, existem diversos fatores de contexto semelhantes para ambas as unidades tais como: taxa de infiltração na rede coletora, procedimentos operacionais e de manutenção das ETES e da rede coletora contribuinte, características do efluente a ser tratado (composição) em função dos hábitos da população média e características climáticas da região.

Os fatores de contexto mais relevantes das ETES Fortaleza e Garcia estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Fatores de contexto das ETEs Garcia e Fortaleza para aplicação do Sistema ID-ETE.

Fatores de contexto	ETE	
	Garcia	Fortaleza
Processo de Tratamento	UASB + polimento em MBBR tipo CMFF + decantação secundária + desinfecção química	Lodos ativados aeração prolongada + desinfecção química
Objetivos do Tratamento: remoção de	Sólidos, matéria orgânica, coliformes, N e P	Sólidos, matéria orgânica, coliformes, N e P
Tempo de Operação da Planta	6 anos	4 anos
Suscetibilidade a perdas/incorporação de água por evapotranspiração / precipitação	Possível, no reator CMFF e no decantador secundário	Possível, no reator aeróbio e no decantador secundário
Mudanças no Processo	Sim (em 2013)	Não
Recebimento de efluentes não domésticos e/ou outros	Não	Sim. Lodo de fossas sépticas e de loteamentos
Nº de produtos químicos utilizados	4	3

Fonte: elaborado pelo autor.

No que se refere à qualidade dos dados analisados, considerando que estes foram fornecidos pela empresa responsável pela operação e manutenção dos sistemas de tratamento; pela realização das análises padronizadas; e pela contratação de laboratórios especializados para realização de análises externas; pode-se afirmar que a fonte dos dados é confiável.

As análises periódicas dos parâmetros são realizadas em amostras coletadas por amostragem simples, sendo executadas por técnicos habilitados e seguindo as orientações do *Standard Methods for the examination of water and wastewater*.

Foram detectadas inconsistências pontuais nos dados analíticos das duas ETEs, sendo: dois valores para a ETE Fortaleza e cinco para a

ETE Garcia. Essas inconsistências, apesar de quantitativamente irrelevantes em relação ao número total de amostras analisadas, podem ser atribuídas ao fato de as análises serem realizadas em dados de amostragem simples que caracterizam o efluente de forma menos eficaz que a amostragem composta. Ainda assim, considera-se que os dados são regularmente adequados para a aplicação do sistema ID-ETE, visto que as coletas e análises foram realizadas por pessoal qualificado e seguindo o mesmo procedimento técnico. Além disso, observou-se homogeneidade nos resultados obtidos na análise estatística realizada neste trabalho.

Da Tabela 20 à Tabela 24 estão apresentados os IDs classificados de acordo com a disponibilidade dos parâmetros passíveis de análise por meio do sistema ID-ETE, conforme metodologia proposta por Barros (2013), para cada Objetivo componente do sistema.

Resumidamente, neste estudo serão avaliados somente os parâmetros pertencentes aos objetivos de Proteção dos Corpos de Água e de Sustentabilidade de Infraestrutura. Os demais objetivos são compostos por IDs cujos dados podem ser obtidos junto à empresa operadora das estações, com exceção dos IDs EPA-06, EPA-07, EPA-09, EPA-13, EPA-14, EPA-19, EPA-20, EPA-22 e ESA-02, que exigem a realização de análise de amostras que no período estudado não eram efetuadas.

Tabela 20: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Proteção dos Corpos de Água.

ID	Nome	Disponibilidade dos dados
EPA-01	Atendimento ao nº requerido de análises de afluentes - Global (%)	Disponível
EPA-02	Atendimento ao nº requerido de análises de efluentes - Global (%)	Disponível
EPA-03	Atendimento ao nº requerido de análises de DQO (%)	Disponível
EPA-04	Calibração dos equipamentos de monitoramento da qualidade dos esgotos e medição de vazão (nº calibrações/Equipamento de monitoramento)	Possível
EPA-05	Eficiência de remoção de DQO (%)	Disponível
EPA-06	Eficiência de remoção de SST (%)	Medição
EPA-07	Eficiência de remoção de NTK (%)	Medição
EPA-08	Eficiência de remoção de P (%)	Disponível

Tabela 20: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Proteção dos Corpos de Água.

ID	Nome	Disponibilidade dos dados
EPA-09	Eficiência de remoção de coliformes termotolerantes (unid. log removidas)	Medição
EPA-10	Percentual de by-pass de esgoto bruto (%)	Possível
EPA-11	Atendimento às metas de concentração efluente - Global (%)	Disponível
EPA-12	Atendimento às metas de concentração efluente de DQO (%)	Disponível
EPA-13	Atendimento às metas de concentração efluente de SST (%)	Medição
EPA-14	Atendimento às metas de concentração efluente de NTK (%)	Medição
EPA-15	Atendimento às metas de concentração efluente de P (%)	Disponível
EPA-16	Atendimento às metas de concentração efluente de coliformes termotolerantes (%)	Possível
EPA-17	Atendimento às metas de eficiência de remoção - Global (%)	Disponível
EPA-18	Atendimento às metas de eficiência de remoção de DQO (%)	Disponível
EPA-19	Atendimento às metas de eficiência de remoção de SST (%)	Medição
EPA-20	Atendimento às metas de eficiência de remoção de NTK (%)	Medição
EPA-21	Atendimento às metas de eficiência de remoção de P (%)	Disponível
EPA-22	Atendimento às metas de eficiência de remoção de coliformes termotolerantes (%)	Medição
EPA-23	Efetividade do atendimento à meta de DQO efluente - Média dos valores desconformes (%)	Disponível

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 21: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Sustentabilidade Ambiental.

ID	Nome	Disponibilidade dos dados
ESA-01	Lodo com destino final adequado (%)	Possível
ESA-02	Atendimento à meta de n° de ovos de helmintos no lodo (%)	Medição
ESA-03	Volume de biogás com destinação adequada (%)	Possível
ESA-04	Autonomia energética (%)	Possível
ESA-05	Consumo de energia (kWh/m ³ esgoto tratado)	Possível
ESA-06	Consumo de produtos químicos (kg ou L/m ³ esgoto tratado)	Possível

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 22: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Sustentabilidade de Infraestrutura.

ID	Nome	Disponibilidade dos dados
ESI-01	Adequação da capacidade hidráulica (%)	Disponível
ESI-02	Adequação da capacidade em termos de carga orgânica (%)	Possível
ESI-03	Interrupção do funcionamento de qualquer etapa do tratamento por mais de 30 min. devido a falhas (n° de interrupções/Mês)	Possível

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 23: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Sustentabilidade Econômica.

ID	Nome	Disponibilidade dos dados
ESE-01	Custo do tratamento de esgoto (R\$/m ³ esgoto tratado)	Possível
ESE-02	Custo de energia elétrica (R\$/m ³ esgoto tratado)	Possível
ESE-03	Custo de produtos químicos (R\$/m ³ esgoto tratado)	Possível
ESE-04	Custos de pessoal (R\$/m ³ esgoto tratado)	Possível
ESE-05	Custo de disposição final do lodo (R\$/m ³ esgoto tratado)	Possível

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 24: Classificação dos IDs do Sistema ID-ETE de acordo com a disponibilidade – Objetivo: Relacionamento com a Comunidade.

ID	Nome	Disponibilidade dos dados
ERC-01	Reclamações (nº de reclamações/m ³ esgoto tratado)	Possível
ERC-02	Reclamações relativas a odores (nº de reclamações/m ³ esgoto tratado)	Possível

Fonte: elaborado pelo autor.

Definidos os IDs a serem avaliados para cada ETE, foram então calculados os seus valores mensais e montadas as séries temporais de cada indicador.

5.3.1 - Cálculo dos IDs das ETEs

Para o cálculo dos IDs EPA-01, EPA-02 e EPA-03 as metas de quantidade de análises mensais foram estabelecidas com base nos critérios do PRODES, expostos na Figura 15. Assim, para DQO e DBO foram definidas as metas de 02 análises semanais (ou 08 análises mensais) e para P total, por se tratar de um composto cuja remoção não é o objetivo central dos sistemas de tratamento analisados, devido à adoção de metas progressivas pela concessionária, estabeleceu-se a meta de 01 análise mensal.

Para execução do cálculo dos IDs EPA-05 e EPA-08, foram consideradas as médias mensais das eficiências diárias, respectivamente para DQO e P total.

Com relação aos IDs EPA-11, EPA-12, EPA-15, EPA-17, EPA-18, EPA-21 e EPA-23 foram consideradas as metas de eficiência de remoção e de concentração do efluente estabelecidas de acordo com a classificação de sistemas de tratamento do PRODES e dos resultados médios observados em ETEs e apresentados na literatura, ou seja, as mesmas metas aplicadas para os cálculos estatísticos desenvolvidos nas seções 5.1.2 -e 5.2.2 -.

No cálculo do ID EPA-11, que avalia a eficiência global das ETEs foi incluída a análise de atendimento à meta de DBO, apesar de esta variável não ser avaliada por meio de IDs do sistema ID-ETE, mas ser objeto de cálculo de ID existentes em outros sistemas, tal qual o da *International Water Association* (IWA). Desta maneira, visou-se atribuir

maior peso ao fator de remoção de carga orgânica na análise do atendimento às metas de concentração de efluente das estações.

Como na seção 6.2.2.1, item C e na seção 6.2.2.2 item C, verificou-se que a implantação de melhorias na ETE Garcia acarretou em impacto significativo nos resultados de concentração de DBO e DQO no efluente; de eficiência de remoção de DBO e DQO ao longo do processo de tratamento; e que a vazão tratada antes e após a implantação das melhorias possui diferença quantitativamente significativa, para o cálculo dos IDs desta ETE, foram considerados os dados analíticos do período compreendido entre novembro de 2013 e junho de 2015, ou seja, após a implantação das melhorias. Desta foram, a análise de desempenho será referente ao sistema de tratamento atualmente em operação.

A) Cálculo dos IDs – ETE Fortaleza

Os gráficos das séries temporais relativos à ETE Fortaleza estão apresentados da Figura 75 a Figura 79.

Dentro do critério de Controle de Monitoramento, observa-se que os IDs EPA-01 e EPA-02 apresentaram crescimentos constantes ao longo do período de estudo, sendo o crescimento do EPA-02 menos expressivo que o do EPA-01. As médias para estes IDs foram respectivamente 69,6% e 78,24%. O comportamento destes IDs indica aumento do controle no monitoramento dos parâmetros operacionais.

O EPA-03 apresentou decréscimo ao longo do tempo, indicando uma redução na quantidade de análises de DQO realizadas ao longo do período de operação da ETE. A média calculada para este ID foi de 70,14%.

No critério de Eficiência de Remoção, analisando o EPA-05, relativo à DQO, notou-se que houve manutenção do seu valor sempre acima de 80%, tendo sofrido uma redução de seu valor entre os meses de setembro de 2013 e março de 2014, porém voltando a crescer para a faixa de 95% após esse período e apresentando crescimento constante até o último mês avaliado. Os valores do EPA-08, relativo à P total, demonstraram evolução positiva ao longo do período de estudo, crescendo de valores de 5% a 20%, entre junho de 2013 e março de 2014, até atingir valores na faixa de 70% a 95%, entre fevereiro e julho de 2015.

No critério de Metas de Lançamento, os IDs EPA-11, EPA-12, EPA-17, EPA-18, EPA-21 e EPA-23 apresentaram tendência de

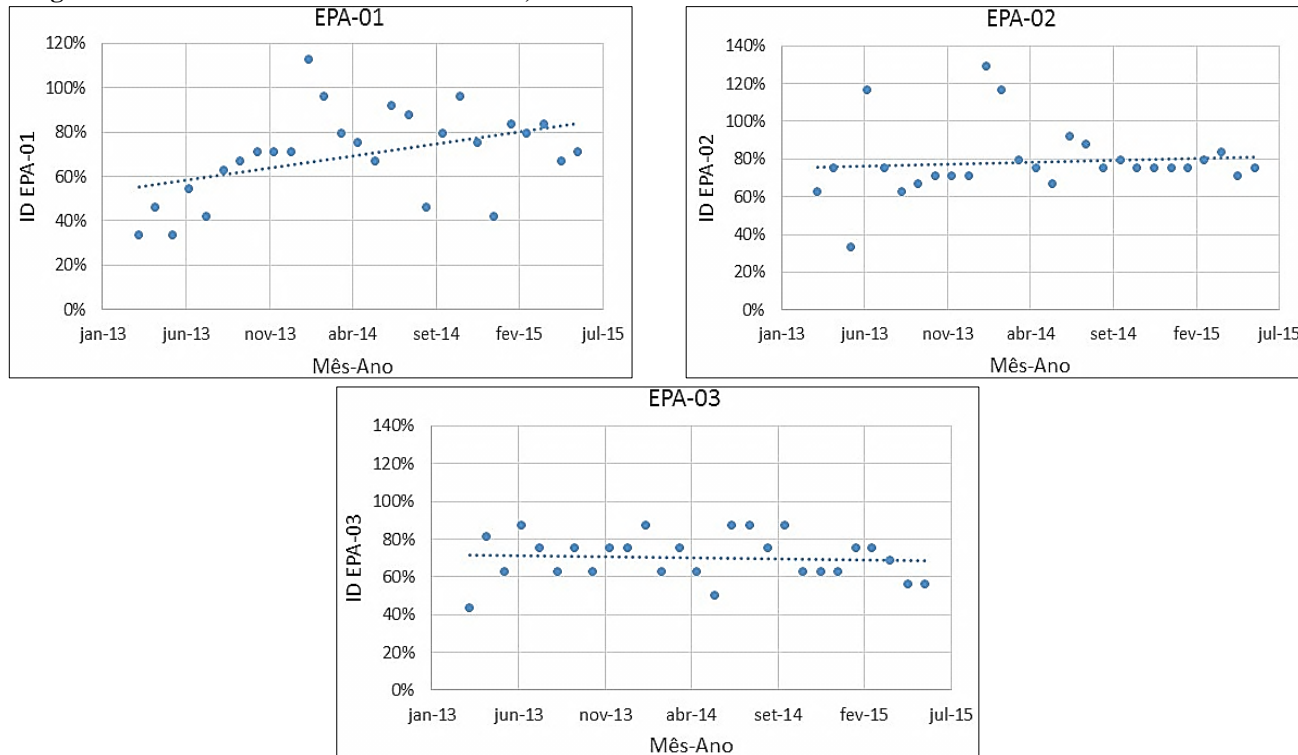
melhoria ao longo do período estudado, caracterizando aumento na eficiência de remoção e redução das concentrações efluentes ao longo do tempo. Porém, em relação ao comportamento do EPA-15, relativo ao atendimento à meta de concentração do efluente final, destaca-se que como foi realizada, em média, uma análise mensal para este parâmetro, o comportamento médio deste ID foi desviado pelo fato de outubro e dezembro de 2014 as análises terem atestado não atendimento à meta de concentração definida. Avaliando os outros meses, no entanto, verifica-se que além destes dois meses, somente no mês de junho de 2013 a meta não foi atendida. Nos outros períodos o atendimento foi de 100%. Ressalta-se, no entanto, que o baixo número de análises de P total prejudicou a análise mensal dos IDs EPA-15 e EPA-21, visto que o atendimento percentual acabou sendo representado sempre em 0%, quando a análise realizada no mês não atendeu à meta ou 100%., quando a análise realizada atendeu à meta.

No que diz respeito à efetividade no atendimento à meta de concentração de DQO no efluente, analisando o comportamento do EPA-23 nota-se que nos meses finais do período estudado houve redução no valor médio, indicando que os desvios dos valores de concentração aproximaram-se ao valor da meta estabelecida. Destaca-se o pico de 395,25% no mês de fevereiro de 2015 indicando possíveis anomalias no processo de tratamento com descarga de DQO quase quatro vezes acima da meta; e o valor de 103,67% no mês de junho de 2015 mostrando desvios muito baixos em relação à meta, sendo que somente uma amostra realizada apresentou este desvio. As demais análises de concentração de DQO realizadas no mês de junho de 2015 atenderam à meta.

Na avaliação do critério de Adequação com a Capacidade da ETE Fortaleza, o ID ESI-01 não atingiu 100% em nenhum dos meses, demonstrando que a ETE trabalhou dentro de sua capacidade ao longo do período estudado. Em junho de 2014, houve um aumento da utilização da capacidade hidráulica, que atingiu 81,54%, sendo este valor acima da linha de tendência. Isto se deveu à ocorrência de uma vazão tratada média de 7.044,85 m³/d, provavelmente em função de uma precipitação média mensal de 235,1 mm. Como referência, no ano de 2013 a precipitação média medida na região foi de 148,7 mm; a mínima de 77 mm, em abril; e a máxima de 256,4 mm em setembro. Após o mês de junho de 2013, a vazão tratada média reduziu para 5.734,91 m³/d e somente em fevereiro de 2015 atingiu novamente o patamar acima de 7.000 m³/d.

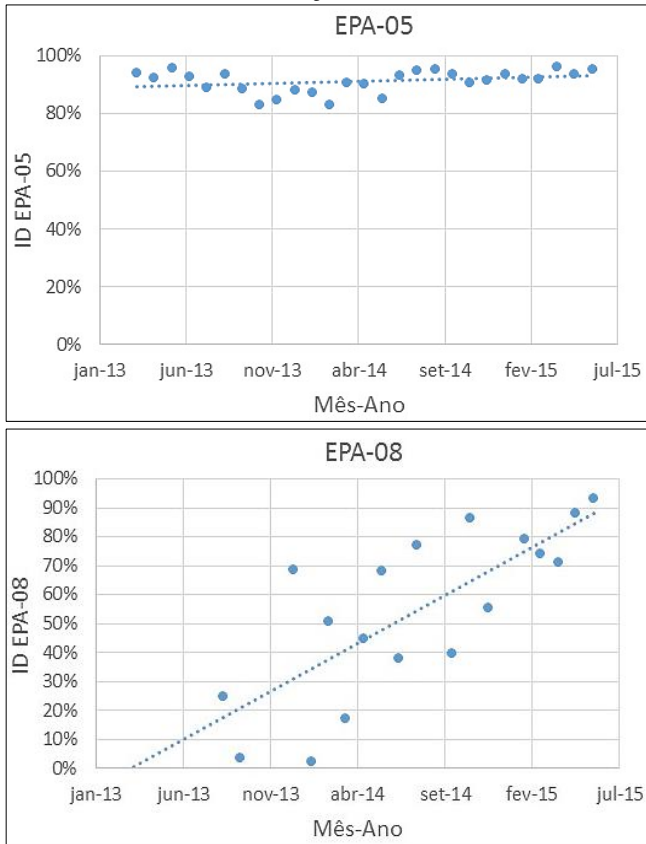
A variação dos valores do ID ESI-01, de 8,87% no mês de abril de 2013 a 90,92% em julho de 2015 é explicada pelos novos trechos de rede coletora que foram constantemente interligados ao sistema de tratamento. Quando da realização da coleta dos dados, foi informada a previsão de ampliação da unidade, de forma a manter o sistema com a folga operacional recomendada.

Figura 75: Séries históricas dos IDs EPA-01, 02 e 03 do critério Controle do Monitoramento da ETE Fortaleza.



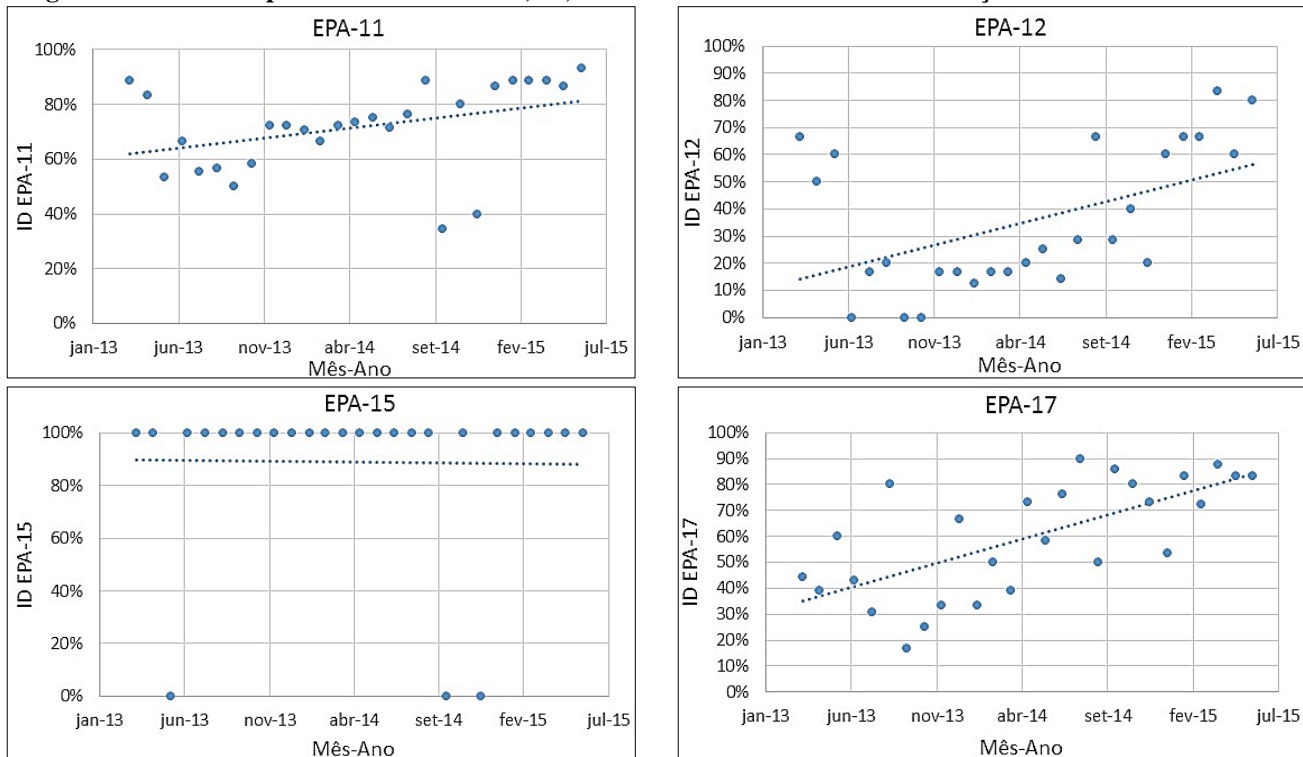
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 76: Séries temporais dos IDs EPA-05 e 08 do critério de Eficiência de Remoção da ETE Fortaleza.



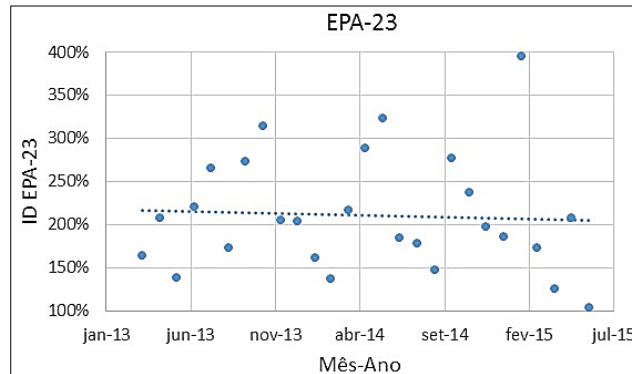
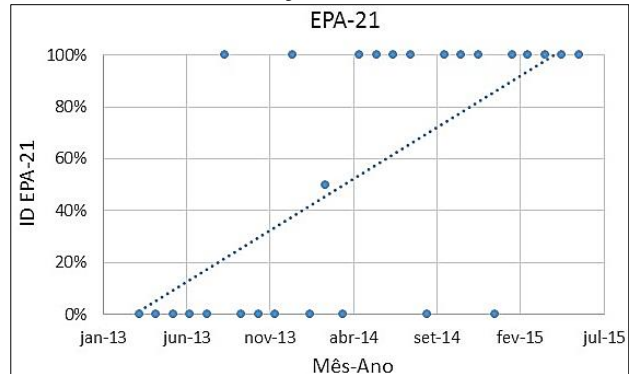
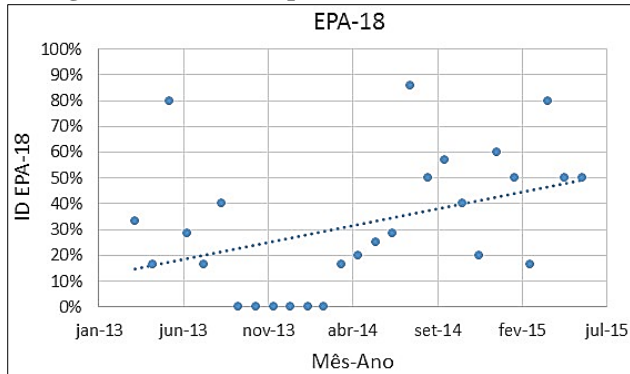
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 77: Séries temporais dos IDs EPA-11, 12, 15 e 17 do critério de Metas de Lançamento da ETE Fortaleza.



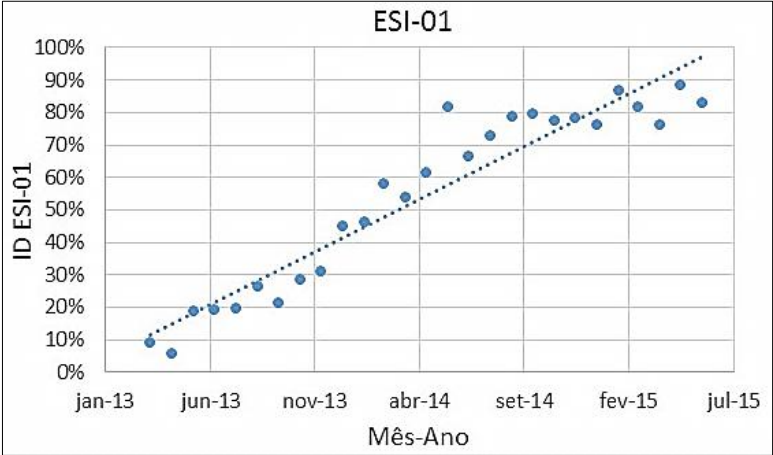
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 78: Séries temporais dos IDs EPA-18, 21 e 23 do critério de Metas de Lançamento da ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 79:Série temporal do ID ESI-01, do critério de Adequação com a Capacidade da ETE Fortaleza.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 25 está apresentada a estatística descritiva dos IDs calculados para a ETE Fortaleza.

Tabela 25: Tabela-resumo da estatística descritiva dos IDs da ETE Fortaleza.

ID	Descrição	Sentido de Preferência	Média	Mediana	Máx.	Mín.	CV	DP
Objetivo: Proteção dos Corpos d'Água			%					
EPA-01	Atend. ao nº requerido de análises de afluentes - Global	Crescente	69,60	70,83	112,50	33,33	19,60	28,17
EPA-02	Atend. ao nº requerido de análises de efluentes - Global	Crescente	78,24	75,00	129,17	33,33	18,19	23,25
EPA-03	Atend. ao nº requerido de análises de DQO	Crescente	70,14	75,00	87,50	43,75	11,83	16,86
EPA-05	Eficiência de remoção de DQO	Crescente	91,12	92,05	96,30	82,91	3,82	4,19
EPA-08	Eficiência de remoção de P total	Crescente	54,56	61,81	93,36	2,37	27,95	51,24
EPA-11	Atend. às metas de concentração efluente – Global	Crescente	71,84	72,22	93,33	34,52	15,57	21,67
EPA-12	Atend. às metas de concentração efluente de DQO	Crescente	35,27	25,00	83,33	0,00	25,56	72,48
EPA-15	Atend. às metas de concentração efluente de P total	Crescente	88,89	100,00	100,00	0,00	31,43	35,36
EPA-17	Atend. às metas de eficiência de remoção – Global	Crescente	59,65	60,00	89,68	16,67	21,62	36,25
EPA-18	Atend. às metas de eficiência de remoção de DQO	Crescente	32,04	28,57	85,71	0,00	25,66	80,10
EPA-21	Atend. às metas de eficiência de remoção de P total	Crescente	53,70	100,00	100,00	0,00	48,93	91,10
EPA-23	Efetividade do atendimento à meta de DQO pelo efluente	Decrescente	211,08	203,89	395,25	103,67	66,32	31,42
Objetivo: Sustentabilidade da Infraestrutura			%					
ESI-01	Adequação da capacidade hidráulica	*	55,717	63,84	90,92	5,5897	27,4	49,18

* >100%=Sobrecarga; <100% = Subcarga

Fonte: elaborado pelo autor.

B) Cálculo dos IDs – ETE Garcia

Os gráficos das séries temporais relativos à ETE Garcia estão apresentados da Figura 80 à Figura 84.

Observa-se que no critério de Controle de Monitoramento os IDs EPA-01 e EPA-02 apresentaram linha de tendência de redução ao longo do período de estudo, sendo que o EPA-02 manteve-se a maior parte do tempo na faixa compreendida entre 50% a 70%. As médias para estes IDs foram respectivamente 75,00% e 64,79%. O EPA-03 também apresentou decréscimo médio ao longo do tempo, indicando uma redução na quantidade de análises realizadas ao longo do período de operação da ETE. A média calculada para este ID foi de 80,00%. Pode-se afirmar que a tendência de redução no Controle de Monitoramento não indica neste caso piora no controle, pois verifica-se que no mês de novembro de 2013 foi realizado controle operacional muito acima da média, provavelmente em função da necessidade de avaliar o início da operação do reator MBBR e do decantador secundário. Após este período, verificada a estabilização do sistema de tratamento, o controle operacional passou a ser realizado de forma menos rigorosa, porém dentro de uma faixa razoável de controle, mantendo-se sem grandes oscilações, com exceção do mês de outubro de 2014, no qual verificou-se os valores de 125%, 125% e 112,5% respectivamente para os IDs EPA-01, EPA-02 e EPA-03.

Os IDs do critério de Eficiência de Remoção tiveram os seguintes comportamentos: o EPA-05, relativo à DQO, apresentou valores constantemente na faixa de 85% a 95%, tendo comportamento crescente ao longo do período estudado. No mês de novembro de 2013 verificou-se valor de 69,38%, estando abaixo da média. Novamente, este valor pode ser explicado pelo fato de o sistema de tratamento estar no início de sua operação, necessitando, como qualquer sistema biológico de tratamento, de um período de adaptação para desenvolvimento e estabilização da população de micro-organismos decompositores da matéria orgânica. Este comportamento foi verificado também no EPA-08, relativo à P total, porém este indicador manteve-se na faixa de 30% a 45% a maior parte do tempo. A média do ID-08 foi de 30,03%.

No critério de Metas de Lançamento, os IDs EPA-12 e EPA-18, ambos relativos à DQO apresentaram crescimento ao longo do tempo. Em consonância com estes resultados o indicador EPA-23, cujo sentido de preferência é decrescente, sofreu redução ao longo do período do estudo. Assim, de forma geral a ETE passou por uma melhoria constante nos resultados de redução da concentração de DQO no efluente,

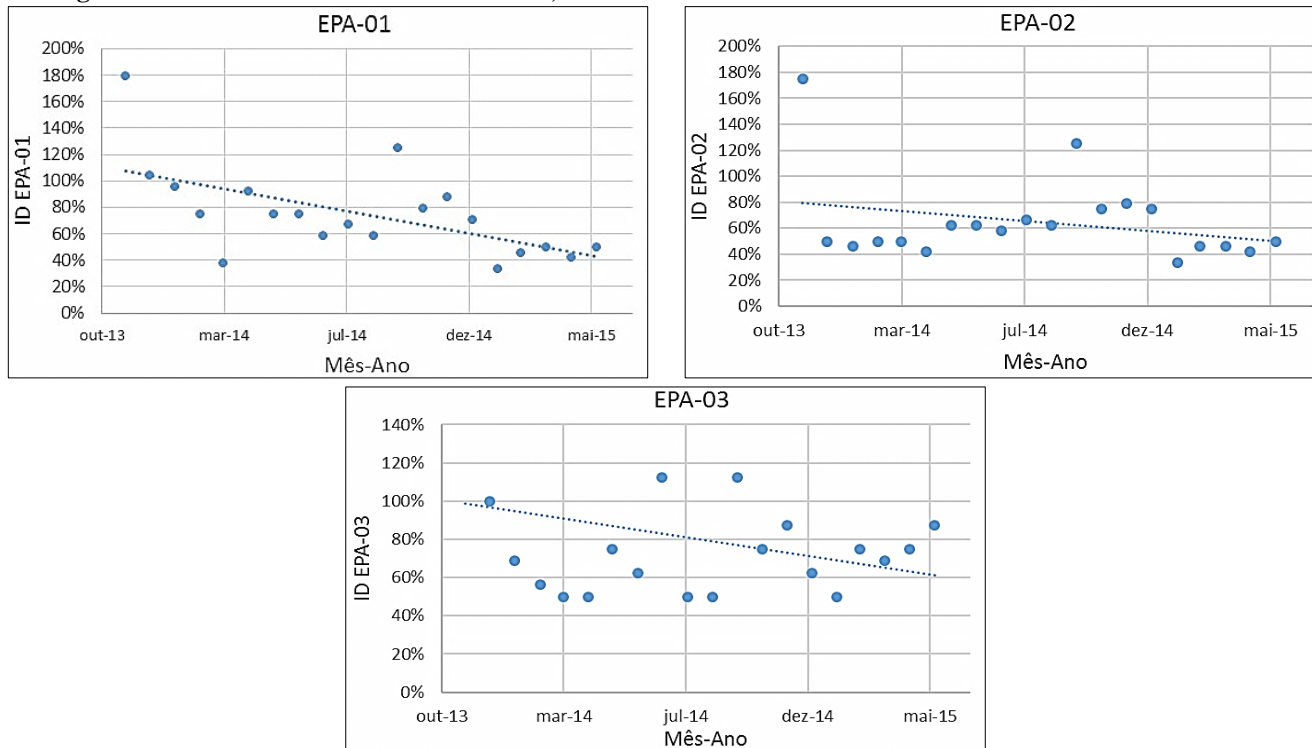
eficiência de remoção e presença de valores de concentração no efluente acima da meta estabelecida. Para os ID EPA-15 e EPA-21, relativos ao P total, verificou-se os seguintes comportamentos: avaliando o ID-EPA-21, o atendimento à meta de eficiência na remoção manteve-se a maior parte do tempo em 100%, apresentando três valores de 0%, distribuídos ao longo do tempo. Por outro lado, os valores de atendimento às metas de concentração efluente mantiveram-se em 100% até maio de 2014, com valores de 0% aparecendo com frequência a partir de então. Ressalta-se, no entanto, que o baixo número de análises de P total prejudicou a análise mensal dos IDs EPA-15 e EPA-21, visto que o atendimento percentual acabou sendo representado sempre em 0%, quando a análise realizada no mês não atendeu à meta ou 100%, quando a análise realizada atendeu à meta.

Em relação ao ID EPA-23, ressalta-se a constância e frequência de valores próximos a 150%, indicando um desvio relativamente baixo quando considerada a meta de concentração de DQO no efluente. O mês com EPA-23 mais alto foi novembro de 2013, dado este condizente com o fato de o sistema ter recebido as melhorias em outubro e estar em estabilização operacional.

Ainda em relação ao critério de Metas de Lançamento, no que diz respeito aos IDs que medem a eficiência global, quais sejam o EPA-11 e EPA-17, o primeiro apresentou valores dispersos (25% a 100%) até o mês de outubro de 2014, quando então manteve-se em uma faixa superior, oscilando entre 50% e 65%; o segundo apresentou valores dispersos (16,67% a 100%) até o mês de agosto de 2014 e a partir de agosto de 2014 manteve-se em um patamar superior, na faixa de 50% a 95%. As linhas de tendência destes ID acompanharam o comportamento dos IDs EPA-15 e EPA-21, devido à frequência de valores mensais de 0% e 100%. Este comportamento foi suavizado pela utilização de dois parâmetros relativos à remoção de matéria orgânica no cálculo de cada ID.

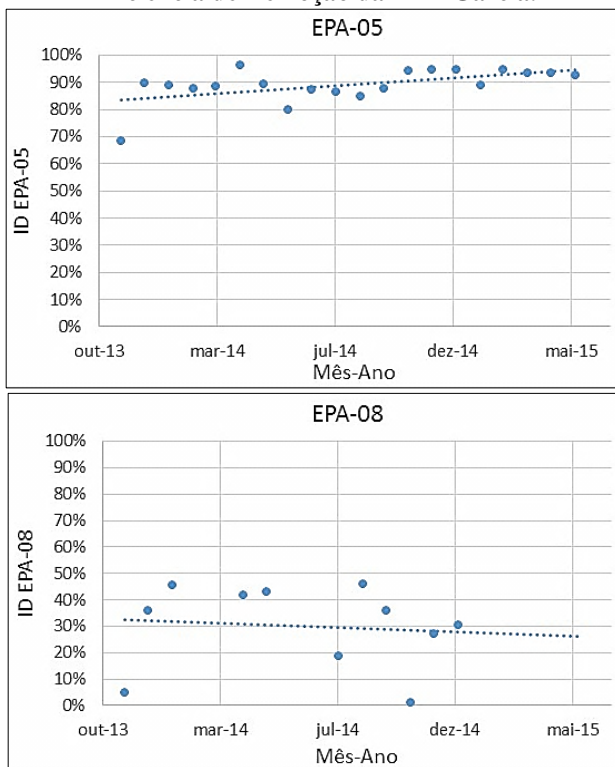
No critério de Adequação com a Capacidade Hidráulica verificou-se crescimento constante do ID ESI-01. No mês de junho de 2014 teve a ocorrência de um pico de vazão média tratada de 2.768,75 m³/d, atingindo uma utilização da capacidade hidráulica de 72,8%. Este aumento se deveu à mesma causa apontada no item A desta seção. Em julho de 2014 a utilização da capacidade atingiu 57,6% e em agosto 50,74%. A partir deste mês a oscilação retornou ao comportamento padrão de tendência de crescimento constante, até o mês de junho de 2015.

Figura 80: Séries históricas dos IDs EPA-01, 02 e 03 do critério Controle do Monitoramento da ETE Garcia.



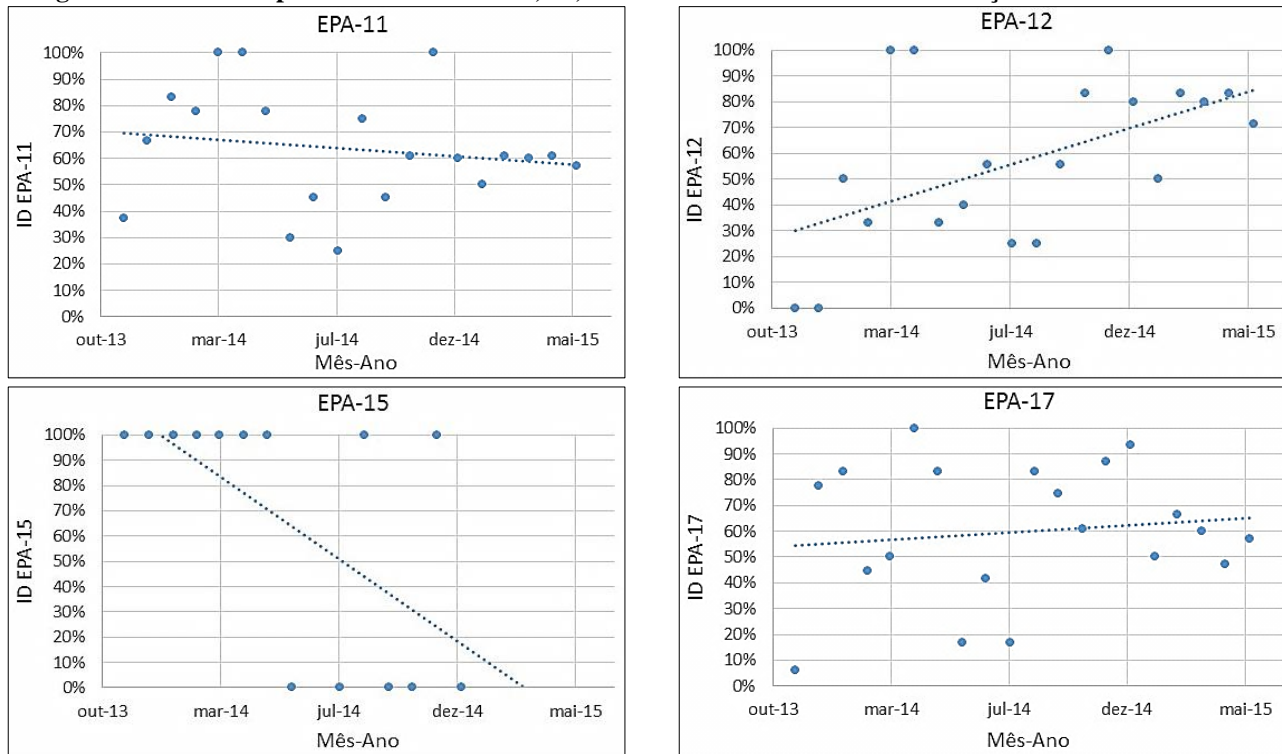
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 81: Séries temporais dos IDs EPA-05 e 08 do critério de Eficiência de Remoção da ETE Garcia.



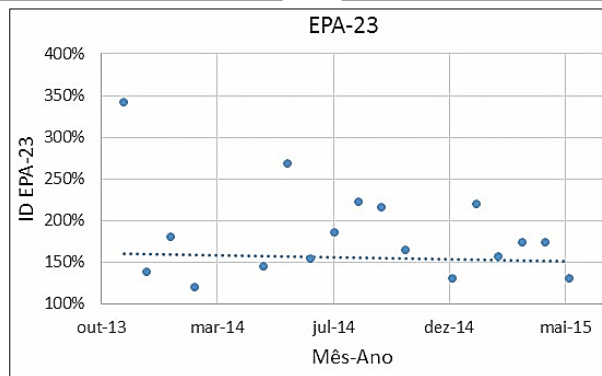
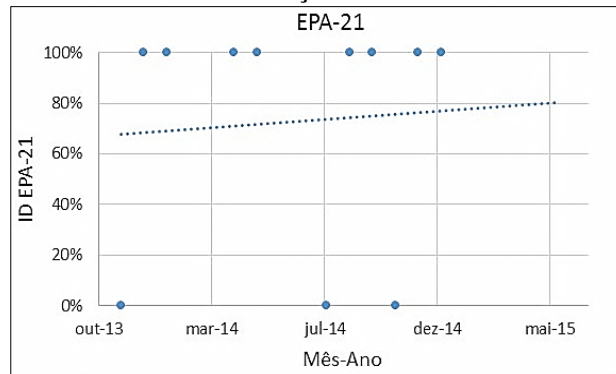
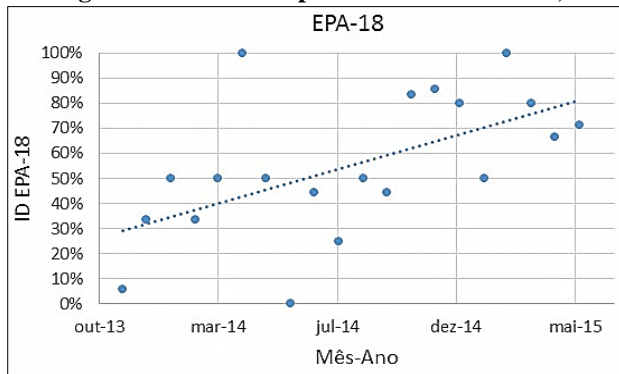
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 82: Séries temporais dos IDs EPA-11, 12, 15 e 17 do critério de Metas de Lançamento da ETE Garcia.



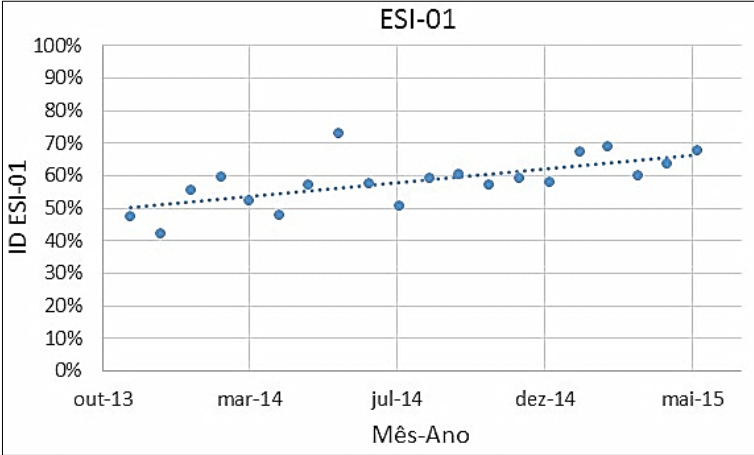
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 83: Séries temporais dos IDs EPA-18, 21 e 23 do critério de Metas de Lançamento da ETE Garcia.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 84: Série temporal do ID ESI-01, do critério de Adequação com a Capacidade da ETE Garcia.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 26 está apresentada a estatística descritiva dos IDs calculados para a ETE Garcia.

Tabela 26: Tabela-resumo da estatística descritiva dos IDs da ETE Garcia.

ID	Descrição	Sentido de Preferência	Média	Mediana	Máx.	Mín.	CV	DP
Objetivo: Proteção dos Corpos d'Água			%					
EPA-01	Atend. ao nº requerido de análises de afluentes - Global	Crescente	75,00	72,92	179,17	33,33	33,23	44,31
EPA-02	Atend. ao nº requerido de análises de efluentes - Global	Crescente	64,79	54,17	175,00	33,33	31,83	49,12
EPA-03	Atendimento ao nº requerido de análises de DQO	Crescente	80,00	71,88	231,25	50,00	39,71	49,63
EPA-05	Eficiência de remoção de DQO	Crescente	89,07	89,09	96,34	68,38	6,23	7,00
EPA-08	Eficiência de remoção de P total	Crescente	30,03	35,82	46,03	1,06	15,03	50,05
EPA-11	Atend. às metas de concentração efluente – Global	Crescente	63,70	61,11	100,00	25,00	21,40	33,59
EPA-12	Atend. às metas de concentração efluente de DQO	Crescente	57,46	55,56	100,00	0,00	30,78	53,57
EPA-15	Atend. às metas de concentração efluente de P total	Crescente	64,29	100,00	100,00	0,00	47,92	74,54
EPA-17	Atend. às metas de eficiência de remoção – Global	Crescente	60,01	60,56	100,00	6,02	25,76	42,93
EPA-18	Atend. às metas de eficiência de remoção de DQO	Crescente	55,16	50,00	100,00	0,00	27,48	49,82
EPA-21	Atend. às metas de eficiência de remoção de P total	Crescente	72,73	100,00	100,00	0,00	44,54	61,24
EPA-23	Efetividade do atendimento à meta de DQO pelo efluente	Decrescente	155,84	160,64	341,08	0,00	82,76	53,10
Objetivo: Sustentabilidade da Infraestrutura			%					
ESI-01	Adequação da capacidade hidráulica	*	58,19	58,50	72,83	42,14	7,48	12,86

* >100%=Sobrecarga; <100% = Subcarga

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.2 - Análise Comparativa dos IDs

No intuito de explicitar as metas de concentração do efluente e de eficiência de remoção das ETEs Garcia e Fortaleza, estes dados foram relacionados na Tabela 27.

Tabela 27: Metas de eficiência de remoção e de concentração do efluente das ETEs Garcia e Fortaleza.

Metas		
ETE	Fortaleza	Garcia
Parâmetro	Eficiência de Remoção (%)	
DQO	95	90
DBO	90	90
P total	20	20
Parâmetro	Concentração do efluente (mg/L)	
DQO	23,15	56,65
DBO	23,7	32,1
P total	6,94	6,936

Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores de metas de eficiência de remoção retirados do PRODES são iguais para as duas ETEs, excetuando-se a eficiência de remoção de DQO, sendo de 95% para a ETE Fortaleza e de 90% para a ETE Garcia. Vale ressaltar que a eficiência de remoção de P total estabelecida para a ETE Garcia é referente a estações do tipo UASB seguido de Lodos Ativados, devido à existência de poucos dados operacionais de sistemas de tratamento de esgoto doméstico compostos por UASB seguido de MBBR operando em escala real no Brasil ou em países de clima semelhante ao da região Sul do Brasil. Não foi possível utilizar os resultados operacionais das ETEs da Noruega como referencial comparativo, em função de as estações deste país geralmente utilizarem sistemas quimicamente avançados para remoção de fósforo e também devido às diferenças climáticas e, conseqüentemente, às diferenças nas populações de micro-organismos que compõem os sistemas de tratamento biológico.

As metas de concentração efluente de DBO e DQO, calculadas em função das metas de eficiência de remoção e dos valores medianos de cada parâmetro para cada ETE, foram significativamente maiores para a ETE Garcia do que para a ETE Fortaleza, mostrando que, apesar

de as estações localizarem-se no mesmo município e serem operadas pela mesma empresa, os afluentes recebidos pelas unidades de tratamento possuem características qualitativas relativamente distintas, conforme pode ser verificado na Tabela 28. Somente as metas de concentração efluente de P total das duas ETEs foram semelhantes, apresentando diferença de 0,004 mg/L.

Tabela 28: Tabela-resumo do comparativo das concentrações médias afluente e efluente; e atendimento às metas de concentração no efluente das ETEs Garcia e Fortaleza.

	Concentração Média no Afluente (mg/L)		Concentração Média no Efluente (mg/L)		Atendimento às Metas (%)	
	ETE					
Parâmetro	Fortaleza	Garcia	Fortaleza	Garcia	Fortaleza	Garcia
DQO	503,30	635,82	38,34	78,80	34,18	51,75
DBO	240,22	352,65	10,90	21,63	93,39	83,10
P total	10,34	8,63	4,04	6,42	93,10	62,50

Fonte: elaborado pelo autor.

As concentrações médias do efluente da ETE Garcia são respectivamente 105,56%, 98,32% e 58,82% mais altas que as da ETE Fortaleza. Porém, para DQO e DBO esta diferença se deve não somente a fatores operacionais, mas também pelo fato de as concentrações de DQO e DBO do afluente da ETE Garcia serem maiores que as concentrações da ETE Fortaleza (respectivamente, 20,84% e 31,88% maiores).

No que tange à concentração do efluente, a ETE Garcia obteve melhor desempenho para o parâmetro de DQO e pior desempenho para DBO e P total, sendo a diferença mais significativa para este último. Em termos de eficiência de remoção de carga poluidora, a ETE Fortaleza obteve melhor desempenho nos três parâmetros, porém avaliando o atendimento às metas de eficiência de remoção (Tabela 29) verificou-se que a ETE Garcia teve melhor desempenho para DQO e desempenho parecido ao da ETE Fortaleza para P total.

Tabela 29: Tabela-resumo do comparativo das eficiências de remoção e atendimento às metas das ETEs Garcia e Fortaleza.

Parâmetro	Eficiência de Remoção Média (%)		Atendimento às Metas (%)	
	ETE Fortaleza	ETE Garcia	ETE Fortaleza	ETE Garcia
DQO	91,30	86,76	33,11	50,00
DBO	95,21	92,98	93,97	77,94
P total	51,75	27,54	78,95	75,00

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 30 são apresentados os valores médios dos IDs do Sistema ID-ETE calculados para a ETE Fortaleza e ETE Garcia.

Importante frisar que os valores de atendimento às metas estabelecidas neste trabalho não dizem respeito à legislação vigente, utilizando como referencial o arcabouço fornecido pela literatura relativa à parâmetros operacionais, juntamente com os fatores de contexto levantados em visita técnica e a classificação dos dados analíticos das ETEs. Para os parâmetros de DBO e DQO as metas foram estabelecidas em um patamar mais exigente que a legislação, em função das tecnologias utilizadas nas ETEs. As metas visam ainda, de forma pragmática, estabelecer um referencial à empresa operadora das unidades, de forma que os resultados operacionais das unidades possam atender em dado percentual do tempo a uma determinada meta.

No objetivo de Proteção dos Corpos d'Água, os IDs relativos ao controle de monitoramento (EPA-01, EPA-02 e EPA-03) das duas unidades obtiveram desempenho sempre acima de 60%. Dentre estes IDs a ETE Garcia apresentou desempenho superior para o EPA-01 e EPA-03.

Para o critério de Eficiência de Remoção os IDs EPA-05 médios das duas unidades ficaram próximos, indicando que as duas ETEs possuem potenciais de remoção de DQO parecidos, a despeito da diferença de tecnologia. Para a eficiência de remoção de P total (EPA-08) ocorreu maior diferença entre os valores, sendo 54,56% da ETE Fortaleza e 30,03% da ETE Garcia. Ainda assim, a ETE Garcia apresentou boa eficiência média de remoção se considerarmos que a literatura apresenta eficiência média de remoção de 20% para sistemas compostos por UASB seguidos por lodos ativados. Este fato indica que o sistema UASB seguido de MBBR aeróbio pode apresentar maior potencial de remoção de fósforo do que sistemas UASB seguidos de lodos ativados.

Comparativamente, no critério Eficiência de Remoção a ETE Fortaleza mostrou desempenho superior ao da ETE Garcia.

No critério de Metas de Lançamento a ETE Fortaleza apresentou desempenho superior somente para os IDs EPA-11 (atendimento à meta de concentração global) e EPA-15 (atendimento à meta de concentração de P total). Assim, no que tange ao atendimento das metas propostas, a ETE Garcia mostrou-se superior no que se refere à concentração de DQO efluyente e em todos os IDs relativos à eficiência de remoção. Adicionalmente, destaca-se a diferença existente entre as médias do EPA-23, indicando a capacidade de manutenção da eficiência de remoção de DQO e de valores de concentração de DQO no efluyente próximos à meta, independente da flutuação na vazão.

Ainda sobre o EPA-23, é importante lembrar que a ETE Fortaleza opera com vazões mais altas do que a ETE Garcia. Assim, esta unidade está sujeita a variações de vazão mais intensas, podendo acarretar em dificuldades operacionais devido à variação na concentração de DQO afluente.

Em relação ao ID ESI-01, pertencente ao objetivo de Sustentabilidade da Infraestrutura, as duas ETEs tiveram desempenho semelhantes. Apesar do crescimento constante da vazão de contribuição, as duas unidades apresentaram folga em sua capacidade operacional e no período estudado operaram pouco acima da média das respectivas capacidades.

Tabela 30: Tabela-resumo das médias do IDs das ETEs Fortaleza e Garcia.

ID	Descrição	Sentido de Preferência	ETE Fortaleza	ETE Garcia
			Médias	
<i>Proteção dos Corpos d'Água</i>			%	
EPA-01	Atendimento ao nº requerido de análises de afluentes - Global	Crescente	69,60	75,00
EPA-02	Atendimento ao nº requerido de análises de efluentes - Global	Crescente	78,24	64,79
EPA-03	Atendimento ao nº requerido de análises de DQO	Crescente	70,14	80,00
EPA-05	Eficiência de remoção de DQO	Crescente	91,12	89,07
EPA-08	Eficiência de remoção de P total	Crescente	54,56	30,03
EPA-11	Atendimento às metas de concentração efluente – Global	Crescente	71,84	63,70
EPA-12	Atendimento às metas de concentração efluente de DQO	Crescente	35,27	57,46
EPA-15	Atendimento às metas de concentração efluente de P total	Crescente	88,89	64,29
EPA-17	Atendimento às metas de eficiência de remoção – Global	Crescente	59,65	60,01
EPA-18	Atendimento às metas de eficiência de remoção de DQO	Crescente	32,04	55,16
EPA-21	Atendimento às metas de eficiência de remoção de P total	Crescente	53,70	72,73
EPA-23	Efetividade do atendimento à meta de DQO pelo efluente	Decrescente	211,08	155,84
<i>Sustentabilidade da Infraestrutura</i>			%	
ESI-01	Adequação da capacidade hidráulica	*	55,72	58,19

* >100%=Sobrecarga; <100% = Subcarga

Fonte: elaborado pelo autor.

6 - CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu principalmente a apresentação comparativa do desempenho operacional das ETEs Garcia e Fortaleza, ambas atualmente em operação no município de Blumenau, estado de Santa Catarina.

A aplicação do Sistema ID-ETE mostrou-se viável e retornou resultados satisfatórios para análise do desempenho operacional e para o planejamento de implantação de metas progressivas de eficiência de tratamento.

A verificação da influência da sazonalidade permitiu a melhor interpretação dos dados, no que diz respeito à interferência do fator precipitação nos resultados de eficiência de remoção e concentração do efluente, assim como na análise quantitativa da vazão tratada. A verificação da influência das melhorias na ETE Garcia subsidiou a interpretação da estatística descritiva, evitando uma avaliação errônea que desconsiderasse a variação significativa dos resultados do tratamento antes e após as melhorias executadas em novembro de 2013. Conhecendo a influência das melhorias foi possível determinar qual o melhor período a ser analisado para caracterização do sistema atualmente em operação e aplicação do sistema ID-ETE.

Como resultado da avaliação comparativa dos indicadores de desempenho, verificou-se que a ETE Garcia apresentou desempenho superior nos critérios de Controle de Monitoramento e de Metas de Lançamento, enquanto a ETE Fortaleza mostrou-se superior nos dois indicadores de desempenho no critério de Eficiência de Remoção. No total, a ETE Garcia mostrou-se superior em 07 IDs, enquanto a ETE Fortaleza teve melhor desempenho em 05. No critério de Adequação com a Capacidade, as duas ETEs tiveram desempenho similar, operando constantemente dentro dos limites estabelecidos em projeto.

No entanto, as duas estações apresentaram resultados satisfatórios na maioria dos indicadores avaliados, considerando que as metas estabelecidas foram sempre superiores às estabelecidas pela legislação ambiental vigente, visando assim a melhoria contínua dos sistemas.

Pode-se afirmar assim, que o sistema MBBR, especificamente a sua variante CMFF®, apresenta boa aplicabilidade no tratamento de esgoto sanitário nas condições climatológicas do Sul do Brasil, sendo uma possível alternativa aos sistemas convencionalmente utilizados. Este sistema pode apresentar desempenho superior em relação a

sistemas de lodos ativados aeração prolongada e permitir a ampliação da capacidade hidráulica com uma necessidade reduzida ou nula de investimentos na construção civil.

7 - RECOMENDAÇÕES

Em relação à avaliação das ETEs Garcia e Fortaleza recomenda-se:

- A realização de amostragens compostas dos parâmetros DQO, DBO, fósforo total, NTK, sólidos suspensos totais e coliformes termotolerantes dos afluentes e efluentes;
- A aplicação do sistema ID-ETE de forma integral, principalmente os IDs relativos ao custo de implantação e operação das unidades; e
- Avaliar especificamente os parâmetros de projeto e operacionais do reator MBBR comparando esta unidade com outros sistemas MBBR em operação no Brasil e com unidades em operação da Noruega, onde existem dados operacionais em abundância, visando identificar as principais diferenças a serem consideradas na operação deste sistema de acordo com as faixas de temperatura e composição do esgoto.

No que tange ao sistema ID-ETE, recomenda-se:

- Aplicar o sistema em um número maior de estações no estado de Santa Catarina visando verificar a sua aplicabilidade como metodologia de avaliação para as agências reguladoras de saneamento.

Em relação ao sistema MBBR, recomenda-se:

- Verificar a relação entre o custo de implantação da tecnologia e o seu custo de operação/manutenção;
- Estudar a viabilidade técnico-econômica de implantação do sistema MBBR na forma de ampliação de estações de tratamento operando com sistemas de lodos ativados, localizadas em áreas urbanizadas e com baixa disponibilidade de área;
- Avaliar comparativamente mais ETEs operando com sistema MBBR com outras estações do tipo lodos ativados a fim de verificar se o comportamento de boa aplicabilidade da tecnologia e os seus custos de implantação, manutenção e operação se mantém relativamente competitivos.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADABJU, Sima. *Specific Moving Bed Biofilm Reactor For Organic Removal from Synthetic Municipal Wastewater*. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Engineering Department, University Of Technology, Sidney, 2013. Cap. 2.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Programa Nacional de Despoluição de Bacias Hidrográficas - [PRODES]:** despoluir para salvar: manual de operações: versão 2001.2. Brasília: ANA, 2001; 2001. 15 p.

AISSE, M.M.; LOBATO, M.B.; BONA, A.; GARBOSA, L.P.; JÜRGENSEN, D.; ALÉM SOBRINHO, P. Avaliação do Sistema Reator UASB e Filtro Biológico para o Tratamento de Esgoto Sanitário. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, João Pessoa, 2001. Anais. Rio de Janeiro, ABES, .8 p. II - 051, 2001a.

BARROS, I. P. A. F. **Proposta de um sistema de indicadores de desempenho para avaliação de estações de tratamento de esgotos do Distrito Federal**. 2013. 210p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 464 p. 1999.

CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores Anaeróbios**. 2^a ed. - Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. 588 p. (Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, 5).

FUJII, Fábio Yugo. **Análise Comparativa entre o Processo de Lodo Ativado e o Reator de Biofilme de Leito Móvel na Remoção de Nitrogênio de Esgoto Sanitário**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA. **INCC**. Disponível em: <<http://portalibre.fgv.br/main.jsp?lumChannelId=402880811D8E34B9011D92B7684C11DF>>. Acesso em: 08 abr. 2015.

LINS, Gustavo Aveiro. **Impactos Ambientais em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs)**. 2010. 285 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MCQUARRIE, J.P, BOLTZ, J. P., 2011. *Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design and Performance*. Water Environment Research, Volume 83, Number 6, p. 560 – 575. 2011.

MENDONÇA, L.C. (2002). **Microbiologia e Cinética de Sistema e Lodos Ativados como Pós-tratamento de Efluente de Reator Anaeróbio de Leito Expandido**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 219p., São Carlos, SP.

METCALF & EDDY, Inc. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., New York, 1991.

NUVOLARI, A et al. **Esgoto Sanitário: Coleta, Transporte, Tratamento e Reuso Agrícola**. 1ª ed. FATEC – SP, São Paulo, 2003

OLIVEIRA, Sílvia Corrêa; VON SPERLING, Marcos. **Análise da Confiabilidade de Estações de Tratamento de Esgotos**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, v. 12, n. 4, p.389-398, dez. 2007. Trimestral. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v12n4/a05v12n4.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

OLIVEIRA, Sílvia Maria Alves Corrêa. **Análise de Desempenho e Confiabilidade de Estações de Tratamento de Esgotos**. 2006. 231 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ENGD-6RFQ6F/silviamaria21.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 abr. 2016.

RUSTEN, Bjorn et al. *Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors*. Aquacultural Engineering, Oslo, Noruega, p.322-331, 18 abr. 2005.

SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo -; AESBE, Associação das Empresas Estaduais de Saneamento Básico. **Padrões de lançamento para Estações de Tratamento de Esgotos**

Domésticos: São Paulo: Anais, 2009. 26 slides, color. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/EFABF603/ApresEstacoesTratamEsgotosDomesticos.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2016.

SANTOS, Luciana Silva dos. **A influência da salinidade nos processos de tratamento de efluentes por lodos ativados.** 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki; ALÉM SOBRINHO, Pedro. **Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário.** 3^a. ed. Rio de Janeiro: Fundo Editorial, 2011. 548 p.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. v.2. 1996.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados.** 2^a ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1997.

VON SPERLING, M.; VAN HAANDEL, A. C.; Jordão, E. P.; Campos, J. R.; Cybis, L. F.; Aisse, M. M.; Sobrinho, P. A. **Pós- tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por lodos ativados.** In: Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. PROSAB 2. Segrac Editora e Gráfica Ltda, Belo Horizonte, MG. 544 p. 2001.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3^a ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados:** São Paulo: Marcos von Sperling, 2014. 175 slides, color.

ØDEGAARD, H., RUSTEN, B., WESTRUM, T., 1994. *A new moving bed bofilm reactor - applications and results.* Water Sci. Technol. 29 (10–11), 157–165.

ØDEGAARD, H., RUSTEN, B., SILJUDALEN, J., 1999. *The development of the moving bed biofilm process—from idea to commercial product.* Eur. Water Manage. 2 (3), 36–43.

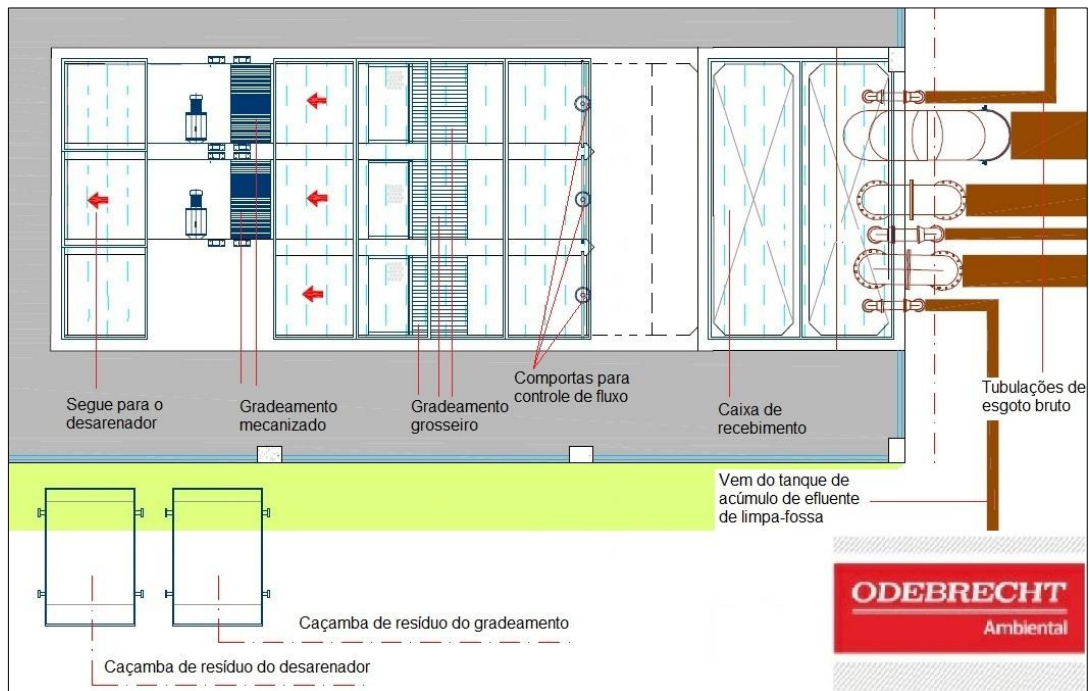
ØDEGAARD, H.; RUSTEN, B.; WESSMAN, F. (2004). *State of the Art in Europe of the Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Process*. Proceedings of the 77th Annual Water Environment Federation Technical Exposition and Conference, New Orleans, Louisiana, Oct. 2–6; Water Environment Federation: Alexandria, Virginia.

ØDEGAARD, H. (2006). *Innovations in Wastewater Treatment: The Moving Bed Biofilm Process*. *Water Sci. Technol.*, 53 (9), 7–33.

APÊNDICE

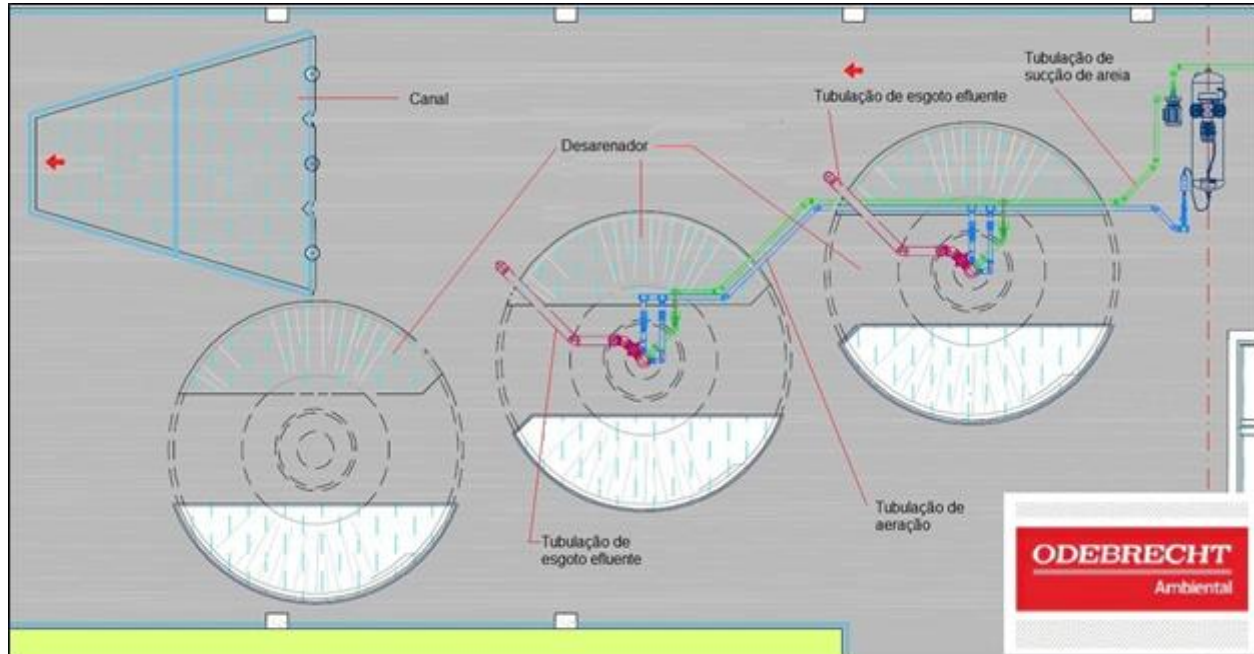
**APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS DAS UNIDADES DA
ETE FORTALEZA**

Figura A. 1: Detalhes do sistema de gradeamento da unidade de pré-tratamento da ETE Fortaleza.



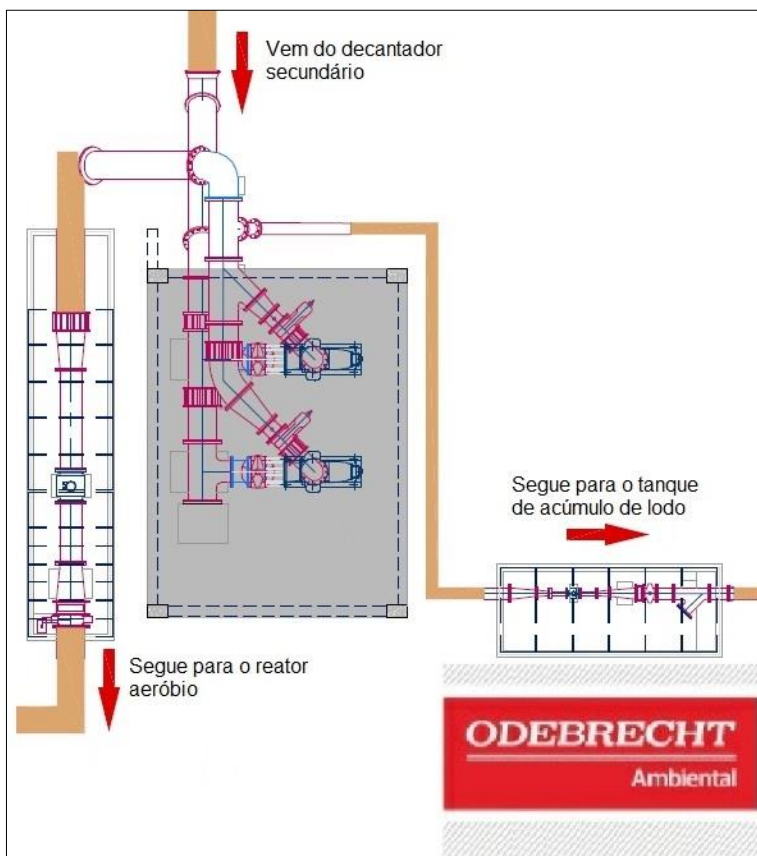
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura A. 2: Detalhes do sistema desarenador do tipo classificador de areia, da unidade de pré-tratamento da ETE Fortaleza.



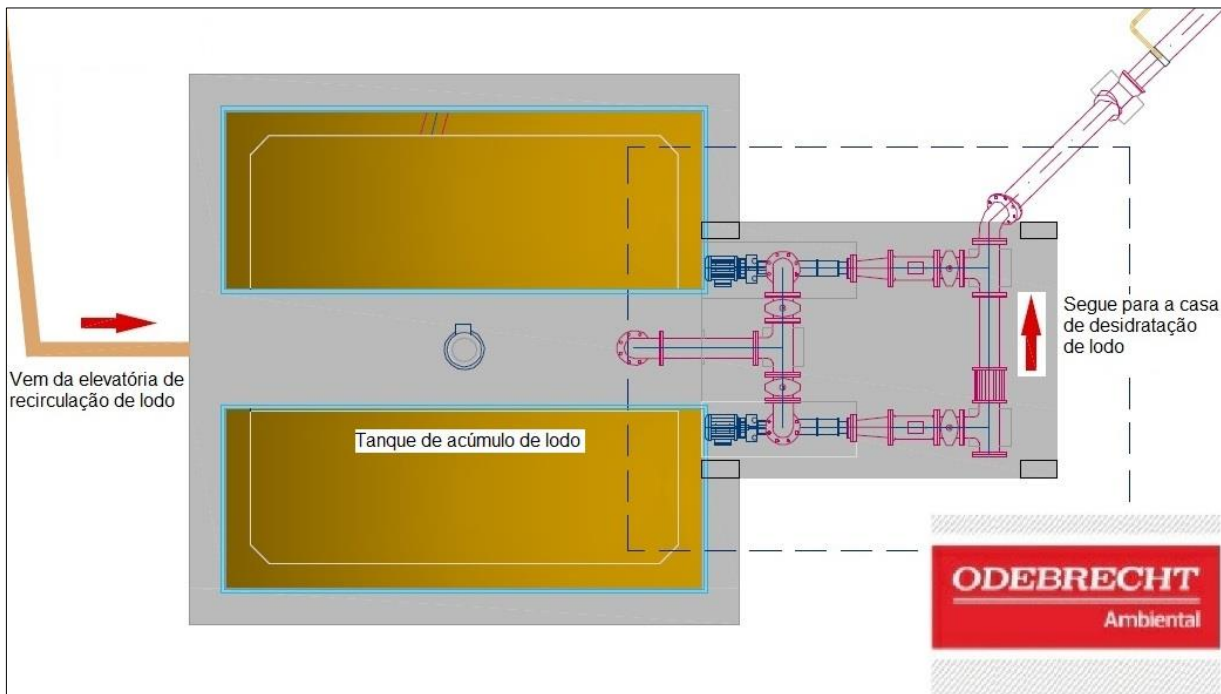
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura A. 3: Detalhes da unidade de recirculação de lodo da ETE Fortaleza.



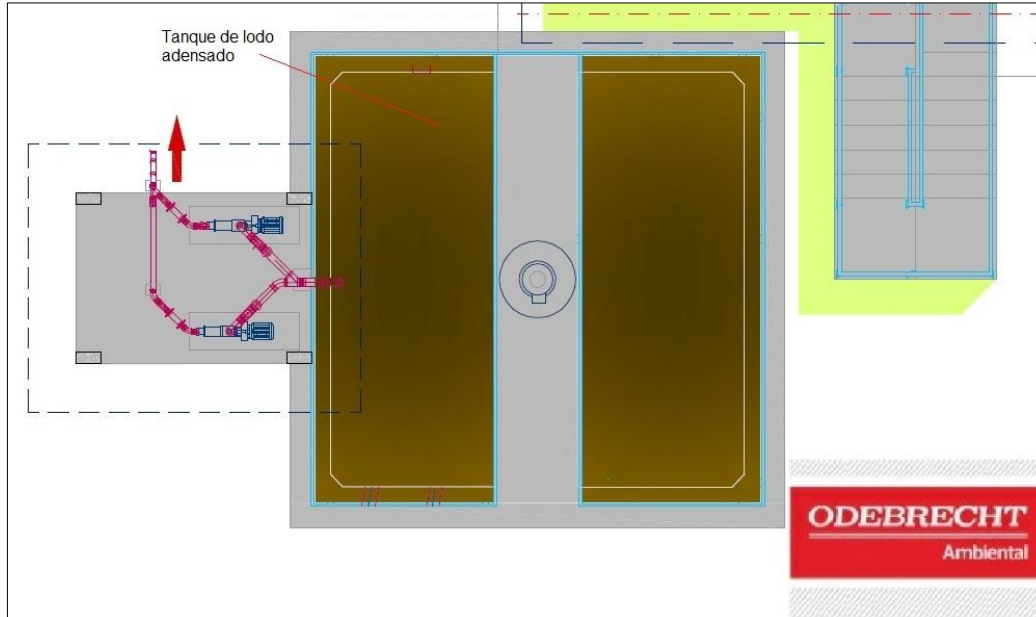
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura A. 4: Detalhes do tanque de acúmulo de lodo da ETE Fortaleza.



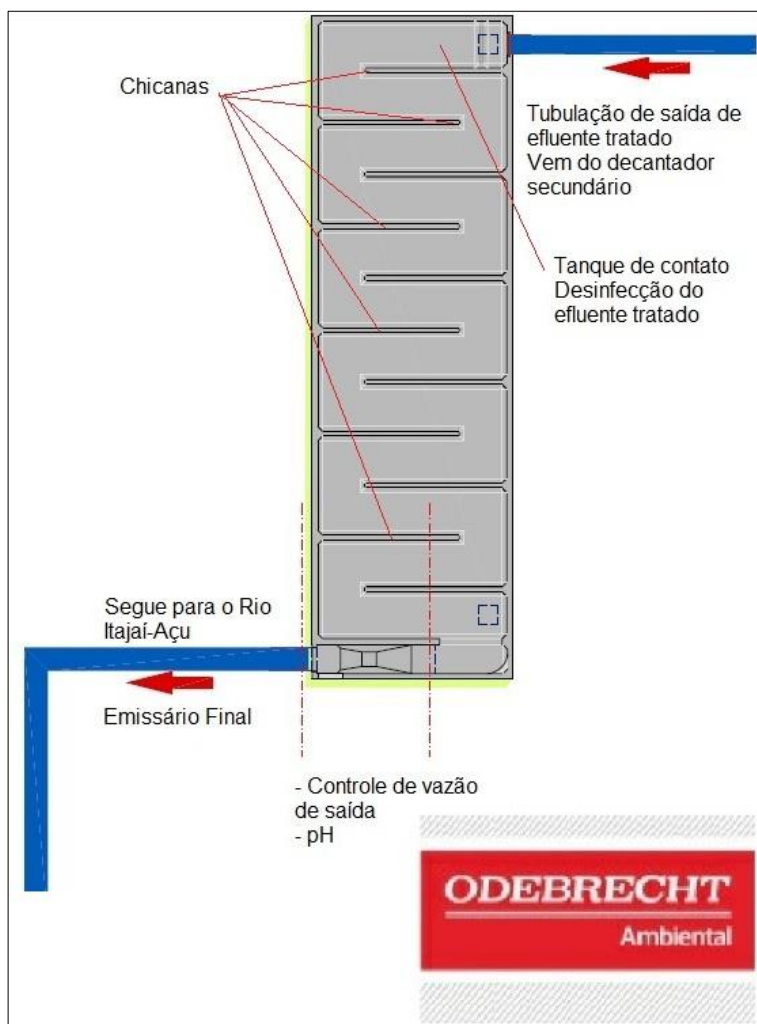
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura A. 5: Detalhes do tanque de acúmulo de lodo adensado da ETE Fortaleza.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

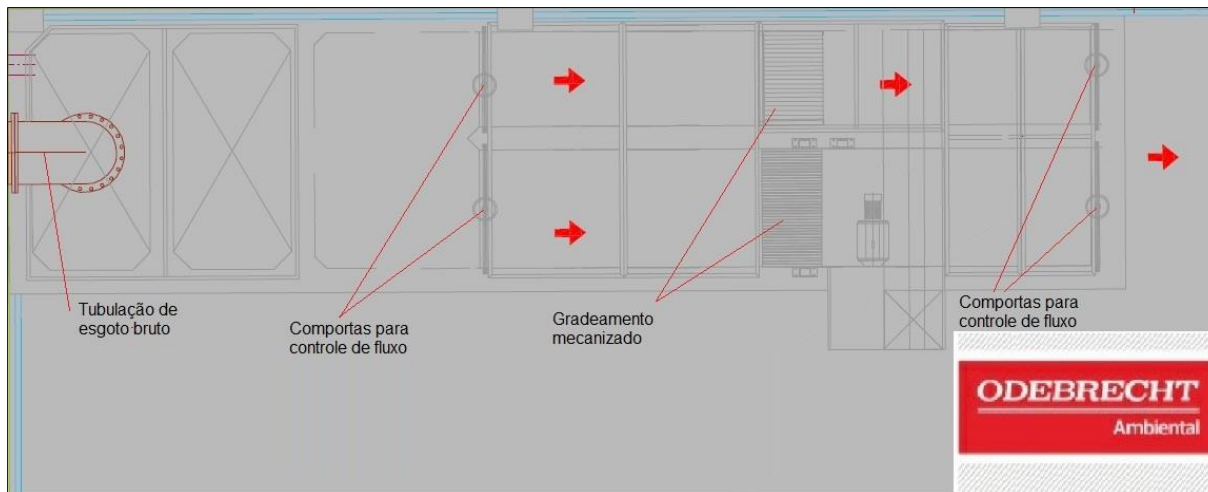
Figura A. 6: Detalhes do tanque de contato para desinfecção - ETE Fortaleza.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

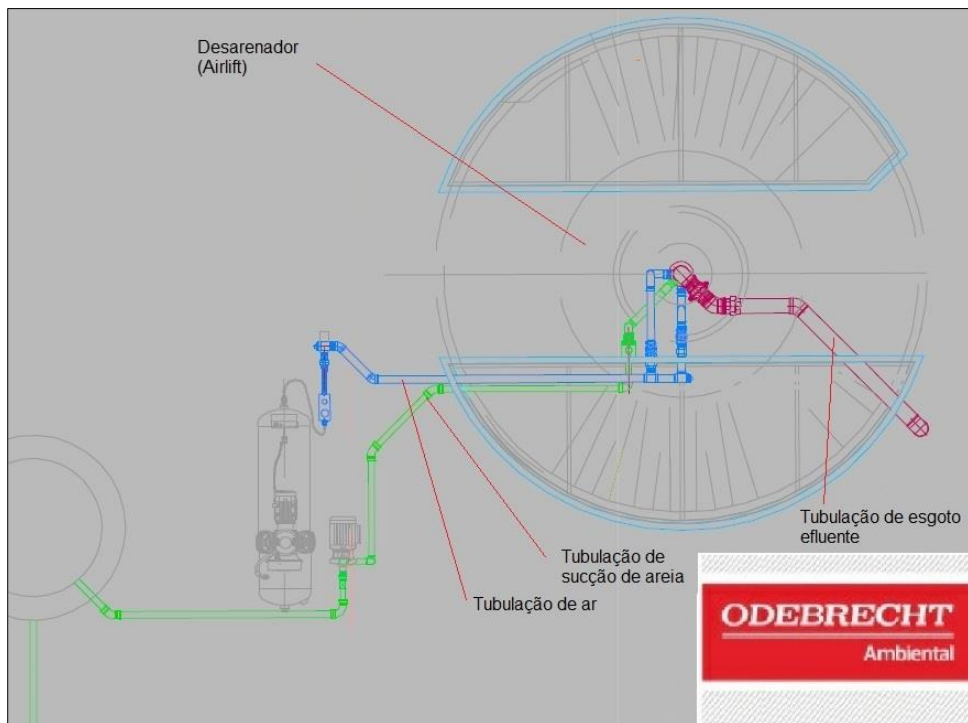
**APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DAS UNIDADES DA
ETE GARCIA**

Figura B. 1: Detalhes do sistema de gradeamento da unidade de pré-tratamento da ETE Garcia.



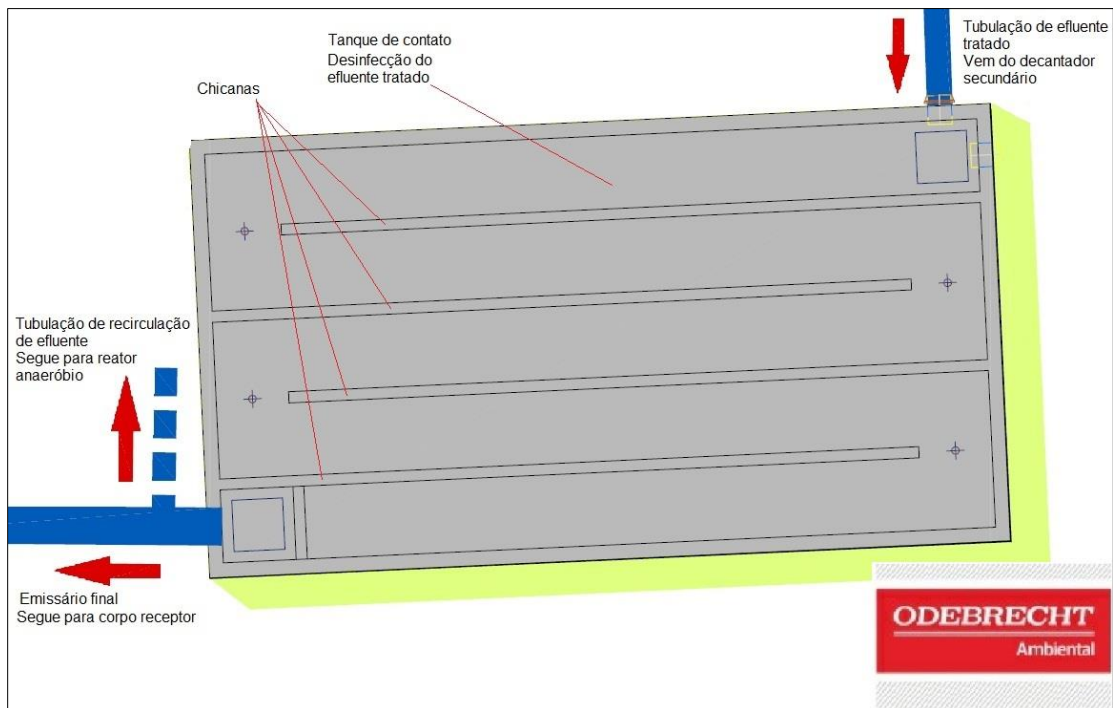
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura B. 2: Detalhes do sistema desarenador da unidade de pré-tratamento da ETE Garcia.



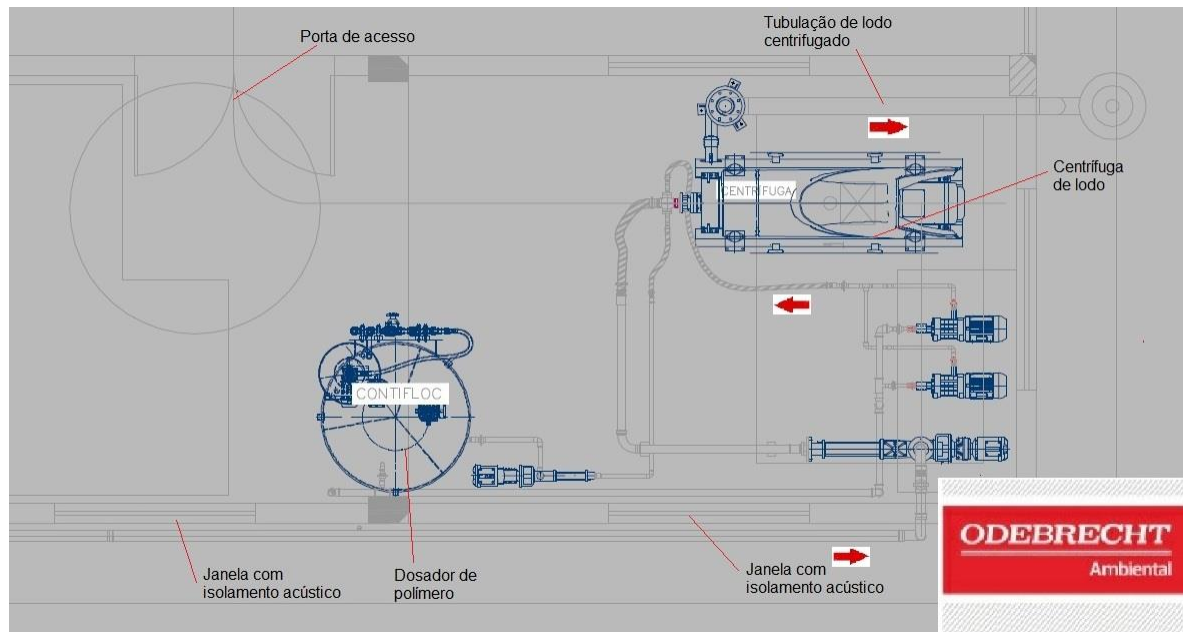
Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura B. 3: Detalhes do tanque de contato para desinfecção - ETE Garcia.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.

Figura B. 4: Detalhes do sistema de desidratação de lodo da ETE Garcia.



Fonte: acervo técnico da Odebrecht Ambiental S.A. Blumenau; adaptado pelo autor.