

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ESTATÍSTICAS
PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E
CONFIABILIDADE DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ÁGUA

Lívia Duarte Ventura Melo

Belo Horizonte

2014

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ESTATÍSTICAS PARA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E CONFIABILIDADE
DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Lívia Duarte Ventura Melo

Lívia Duarte Ventura Melo

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ESTATÍSTICAS PARA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E CONFIABILIDADE
DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento.

Linha de pesquisa: Qualidade e tratamento de água para consumo humano

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2014

M528a

Melo, Livia Duarte Ventura.

Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de água [manuscrito] / Livia Duarte Ventura Melo. – 2014.
xiii, 78 f., enc.: il.

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui apêndices.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento- Teses. 3. Água – Estações de tratamento – Teses. 4. Confiabilidade (Engenharia) – Métodos estatísticos - Teses. I. Oliveira, Sílvia Maria Alves Correa. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo exemplo, paciência, amor e apoio a qualquer hora.

Ao meu irmão, Vi, pelo companheirismo e por me proporcionar o privilégio de conviver com mais uma irmã de coração, Lidi!

À Analu, que me mostrou um novo sentido a vida! Renovando a cada dia minha alegria e vontade de viver.

À Bia, companheira fiel, pela alegria e amor incondicional, principalmente por me acalmar nos dias de estresse.

À Sílvia, por ser muito mais que minha orientadora. Não tenho como retribuir ou expressar o quão grata sou a tudo o que ela fez e faz por mim.

À Elizangela e à Bela pela seriedade nas atividades desenvolvidas e apoio... Sem vocês tudo seria muito mais difícil.

Aos funcionários do DESA e aos professores.

À CONCREMAT, nas pessoas do Fenando e do Vinício pela experiência de aprendizado e o reconhecimento da importância da ciência.

Ao Felipe, por decifrar todas as minhas ideias. Ao Leo meu “desorientador”, por me socorrer sempre no último minuto. Ao Tilico pelo apoio constante. À Dani, que, mesmo tão longe, está sempre presente! À Taianne, a rainha da formatação! À Lívia por não me deixar desistir!

Ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG pela oportunidade.

Aqueles que porventura não foram citados e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

E por meio de minha fé, de minhas orações e de meu amor, agradeço a Deus por tudo que fui, sou e ainda serei!

RESUMO

Neste trabalho é proposta uma metodologia de avaliação de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento (ETAs), considerando ferramentas estatísticas pouco usuais na área, aplicada a seis estações de tratamento de água. Foi efetuada uma caracterização da qualidade da água bruta e da água tratada no período de 2001 a 2011, considerando os dados de turbidez, cor aparente, concentrações de cloro e de flúor residuais, pH e coliformes totais. As análises estatísticas foram efetuadas para os períodos predominantemente seco e chuvoso e consideraram diversas etapas: avaliação do desempenho individual das diversas estações de tratamento, considerando o atendimento a padrões de potabilidade e metas de qualidade para a água tratada; estudo comparativo do desempenho das diversas tecnologias de tratamento analisadas; análise comparativa do desempenho das ETAs, em função do porte; análise de confiabilidade das estações de tratamento. A comparação de desempenho das ETAs em função da tecnologia de tratamento adotada mostrou que a dupla filtração apresentou valores de turbidez da água tratada menores que os mostrados por todos os outros tratamentos. A cor, no entanto, foi removida de maneira mais eficiente pela tecnologia de dupla filtração, quando comparada com a convencional e flotação seguida de filtração direta, mas de maneira equivalente ao processo de filtração direta. Para o parâmetro residual de cloro, observou-se que todas as tecnologias de tratamento são significativamente diferentes entre si, tanto no período predominantemente seco quanto no período predominantemente chuvoso. A avaliação de desempenho das estações de tratamento agrupadas por porte mostrou que a ETA de médio porte apresentou os menores valores de turbidez e cor em ambos os períodos. Os resultados da análise de confiabilidade mostraram que os valores médios de turbidez observados na água tratada por quase todas as ETAs seriam insuficientes para garantir 95% de atendimento aos padrões de 0,3 e 0,5 uT. À medida que os padrões se tornam mais flexíveis, mais ETAs conseguem atendê-los e, no caso do padrão de 5,0 uT, todas as ETAs garantiriam facilmente o percentual de 95% de atendimento. Todas as estações de tratamento de água atendem a meta imposta pela Portaria 2914/2011, que define valores inferiores a 15,0 uH para o parâmetro cor.

ABSTRACT

This paper proposes a methodology for evaluating the performance of treatment plants (WTP), considering unusual statistical tools in the area, applied to six water treatment stations. A characterization of the quality of raw water and treated water in the period 2001-2011, considering the data of turbidity, apparent color, concentrations of residual chlorine and fluoride, pH and total coliforms was performed. Statistical analyzes were performed for the dry and rainy seasons and considered several steps: assessing individual performance of the various treatment plants, considering the standards of potability and quality targets for treated water; comparative study of the performance of various treatment technologies analyzed; comparative analysis of the performance of water treatment plants, according to the size, reliability analysis of treatment plants. On the WTPs performance comparison as a function of technology adopted, the double filtration showed smaller values of turbidity of the treated water than the others process. The color, however, was more efficiently removed by double filtration technology than by the conventional, flotation followed by direct filtration, but it was equivalent to direct filtration process. Parameter for the residual chlorine, it was observed that all treatment technologies are significantly different, both in the dry season and in the rainy season. Performance evaluation of treatment plants grouped by size showed that the WTPs Midsize had the lowest turbidity and color in both periods. The results of the reliability analysis showed that the mean turbidity values observed in the treated water for almost all WTPs would be insufficient to ensure 95% compliance with the standards of 0,3 and 0,5 NTU. As the patterns become more flexible, WTPs can serve them and, in the case of default of 5,0 NTU, all WTPs easily guarantee the percentage of 95 % attendance. All water treatment plants meet the goal imposed by brazilian Ordinance 2914/2011, which defines values less than 15,0 HU for the color parameter.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xii
1 INTRODUÇÃO / JUSTIFICATIVA	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos.....	3
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1 Técnicas de tratamento de água para abastecimento	4
3.2 Padrões de Potabilidade	6
3.3 Avaliação de desempenho de estações de tratamento de água	8
4 METODOLOGIA.....	16
4.1 Estações de Tratamento de Água (ETA) avaliadas	17
4.1.1 CICLO COMPLETO COM FLOTAÇÃO.....	17
ETA A.....	17
4.1.2 CONVENCIONAL	19
ETA B.....	19
ETA C.....	19
ETA D.....	20
4.1.3 FILTRAÇÃO DIRETA.....	21
ETA E.....	21
4.1.4 DUPLA FILTRAÇÃO	22
ETA F.....	22
4.2 Levantamento dos dados	23
4.3 Tratamento estatístico preliminar	24
4.4 Avaliação de desempenho das ETAs	26
4.4.1 Avaliação de desempenho das estações de tratamento agrupadas por tecnologia de tratamento e porte	26
4.4.2 Avaliação do atendimento a padrões e metas de qualidade para a água tratada.....	27

4.4.3	Análise de confiabilidade das estações de tratamento	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	<i>Levantamento dos dados</i>	31
5.2	<i>Tratamento estatístico preliminar</i>	31
5.2.1	CICLO COMPLETO COM FLOTAÇÃO.....	34
5.2.2	CONVENCIONAL	36
5.2.3	FILTRAÇÃO DIRETA.....	41
5.2.4	DUPLA FILTRAÇÃO	43
5.3	<i>Avaliação de desempenho das ETAs</i>	45
5.3.1	Avaliação de desempenho das estações de tratamento agrupadas por tecnologia de tratamento e porte	45
5.3.1.1	Turbidez.....	45
5.3.1.2	Cor	52
5.3.1.3	Residual de cloro	57
5.3.1.4	Residual de flúor.....	59
5.3.2	Avaliação do atendimento a padrões e metas de qualidade para a água tratada	61
5.3.2.1	Turbidez.....	61
5.3.2.2	Demais parâmetros	63
5.3.3	Análise de confiabilidade das estações de tratamento	66
5.3.3.1	Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC)	66
5.3.3.2	Valores de projeto necessários para o alcance dos padrões ou metas especificados	68
5.3.3.3	Percentual esperado de atendimento a metas de lançamento adotadas	71
5.3.3.4	Testes para comprovação da validade do modelo de confiabilidade.....	73
6	CONCLUSÕES.....	76
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE 1	86
	APÊNDICE 2.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Turbidez da água decantada, para turbidez da água bruta acima de 10, 20 e 40 uT, períodos P2 e P4.....	9
Figura 4.1 – Fluxograma – Metodologia do trabalho	16
Figura 5.1 – Fluxograma da estrutura de apresentação dos resultados de estatísticas descritivas	33
Figura 5.2 – Turbidez da água bruta por tecnologia de tratamento	46
Figura 5.3 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em negrito) em relação às mesmas (em itálico), para o parâmetro turbidez	47
Figura 5.4 – Box-Whisker para a turbidez por unidade de tratamento	48
Figura 5.5 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada ETA (em negrito) em relação às demais (em itálico), para o parâmetro turbidez.....	49
Figura 5.6 – Cor da água bruta por tecnologia de tratamento.....	52
Figura 5.7 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em negrito) em relação às mesmas (em itálico), para o parâmetro cor.....	53
Figura 5.8 – Box-Whisker para a cor por unidade de tratamento, cor	54
Figura 5.9 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada ETA (em negrito) em relação às demais (em itálico), para o parâmetro cor	55
Figura 5.10 – Residual de cloro na água tratada.....	57
Figura 5.11 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em negrito) em relação às mesmas (em itálico), para o parâmetro residual de cloro	58
Figura 5.12 – Residual de flúor na água tratada	59
Figura 5.13 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em negrito) em relação às mesmas (em itálico), para o parâmetro residual de flúor.....	59
Figura 5.14 – Percentuais de atendimento às diversas metas para turbidez no período predominantemente seco	61

Figura 5.15 – Percentuais de atendimento às diversas metas para turbidez no período predominantemente chuvoso.....	62
Figura 5.16 – Percentuais de atendimento às metas para diversos parâmetros no período predominantemente seco	64
Figura 5.17 – Percentuais de atendimento às metas para diversos parâmetros no período predominantemente chuvoso.....	64
Figura 5.18 – Valores dos coeficientes de confiabilidade e de variação.....	67
Figura 5.19 – Valores dos coeficientes de confiabilidade e de variação - Cor da água tratada ($\alpha = 5\%$)	68
Figura 5.20 – Valores médios de turbidez efluente observados e necessários para 95% de atendimento aos padrões de (a) 0,1; (b) 0,3, (c) 0,5, (d) 1,0 e (e) 5,0 uT ($\alpha = 5\%$).....	69
Figura 5.21 – Valores médios de cor efluente observados e necessários para 95% de atendimento aos padrões de 15 uH ($\alpha = 95\%$)	70
Figura 5.22 – Percentual esperado de atendimento aos padrões de turbidez de 0,1, 0,3, 0,5, 1,0 e 0,5 uT ($\alpha = 95\%$)	72
Figura 5.23 – Percentual esperado de atendimento ao padrão de cor de 15 uH ($\alpha = 95\%$).....	73
Figura 5.24 – Percentual de atendimento projetado pelo modelo de confiabilidade e efetivamente observado para os padrões de turbidez: (a) 0,1, (b) 0,3, (c) 0,5, (d) 1,0 e (e) 5,0 Ut ($\alpha = 95\%$)	74
Figura 5.25 – Percentual de atendimento projetado pelo modelo de confiabilidade e efetivamente observado para o padrão de cor de 15 uH.....	75
Figura A 1 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e <i>Probability-Probability Plot</i> para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA A.....	87
Figura A 2 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e <i>Probability-Probability Plot</i> para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA B.....	88

Figura A 3 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA C	89
Figura A 4 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA D	90
Figura A 5 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA E.....	91
Figura A 6 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA F.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características das águas naturais em função da tecnologia de tratamento recomendada	6
Tabela 3.2 – Comparação de padrões de potabilidade do Brasil, Estados Unidos e OMS	8
Tabela 4.1 – Relação das ETAs avaliadas	23
Tabela 4.2 – Padrões estabelecidos pela Portaria 2914/2011	28
Tabela 5.1 – Estações de tratamento analisadas, período de monitoramento e número de dados de cada parâmetro avaliado	31
Tabela 5.2 - <i>Outliers</i> identificados na ETA que utiliza a tecnologia de tratamento ciclo completo com flotação	34
Tabela 5.3 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA A - período predominantemente seco.....	35
Tabela 5.4 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA A - período predominantemente chuvoso	35
Tabela 5.5 – <i>Outliers</i> identificados nas ETAs que utilizam a tecnologia de tratamento convencional.....	36
Tabela 5.6 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA B - período predominantemente seco.....	37
Tabela 5.7 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA B – período predominantemente chuvoso	37
Tabela 5.8 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA C - período predominantemente seco	38
Tabela 5.9 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA C - período predominantemente chuvoso.....	38
Tabela 5.10 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA D – período predominantemente seco.....	39
Tabela 5.11 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA D – período predominantemente chuvoso.....	39

Tabela 5.12 - <i>Outliers</i> identificados na ETA que utilizam a tecnologia de tratamento de filtração direta	41
Tabela 5.13 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA E – período predominantemente seco.....	42
Tabela 5.14 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA E - período predominantemente chuvoso	42
Tabela 5.15 - <i>Outliers</i> identificados na ETA que utilizam a tecnologia de tratamento de dupla filtração.....	43
Tabela 5.16 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA F - período predominantemente seco.....	44
Tabela 5.17 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA F - período predominantemente chuvoso	44
Tabela 5.18 – Tabela das eficiências de remoção de turbidez	51
Tabela 5.19 – Tabela das eficiências de remoção de cor	56
Tabela 5.20 – Valores dos coeficientes de variação e de confiabilidade dos parâmetros –.....	66
Tabela 5.21 – Valores dos coeficientes de variação e de confiabilidade dos parâmetros –.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultados teste de Aderência - p-valor da distribuição estatística86

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AB	Água bruta
AIQ	Amplitude inter-quartis
ANA	Agência Nacional das Águas
AT	Água tratada, coletada na saída da estação de tratamento de água
CF	Ciclo completo com flotação
Cl	Cloro
CN	Convencional
CPRM	Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais
CQACH	Controle de qualidade da água para consumo humano
CV	Coefficiente de variação
DESA	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
DF	Dupla Filtração
DP	Desvio-padrão
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de Tratamento de Água
EUA	Estados Unidos da América
FD	Filtração Direta
F	Flúor
GDWQ	<i>Guidelines for Drinking Water Quality</i>
HU	<i>Hazen units</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPAGRO	Instituto da Pesquisa Agropecuária
IQETA	Índice de Qualidade de Estações de Tratamento de Água
mg/L	Miligrama por litro
MS	Ministério da Saúde
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
pH	Potencial hidrogeniônico
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
uH	Unidade de cor
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
uT	Unidade de turbidez

VMP	Valor Máximo Permitido
WHO	<i>World Health Organization</i>
WTP	<i>Water treatment plants</i>

1 INTRODUÇÃO / JUSTIFICATIVA

O abastecimento de água, quando comparado a outros serviços do setor de saneamento básico, possui uma posição de destaque, devido à grande dinâmica desse processo e à associação direta de riscos à saúde humana. Nesse cenário, as estações de tratamento (ETAs) tomam posição de relevo pela função primária de adequar a água bruta ao padrão de potabilidade, não excluindo as demais etapas do sistema fundamentais para o controle de qualidade da água para consumo humano (CQACH).

O CQACH deve ser entendido como algo mais abrangente que a sistemática análise laboratorial de amostras de água, devendo ser percebido como a adoção de boas práticas em todo o processo de produção e fornecimento de água para consumo, englobando a proteção de mananciais, a operação adequada da estação de tratamento, a manutenção periódica das adutoras, dos reservatórios e da rede de distribuição, o controle de qualidade dos produtos químicos utilizados no tratamento da água e a capacitação técnica dos responsáveis pela operação do sistema (BASTOS *et al.*, 2004).

Ainda que o foco seja apenas na análise de desempenho, esta não é tarefa fácil. À medida que a qualidade da água varia e o desempenho de uma unidade da estação afeta o desempenho das etapas seguintes, a avaliação do desempenho de ETAs torna-se um problema complexo (ZHANG *et al.*, 2012). A avaliação pode ser feita tanto em nível de processo, considerando a eficiência de cada etapa do tratamento, quanto em nível de sistema, com a análise apenas do afluente e do efluente da estação. A primeira vertente tende a ser empregada pelas companhias de saneamento, principalmente para controle do tratamento, enquanto a análise global pelas agências reguladoras.

Surge então a necessidade de métodos para avaliar o desempenho de ETAs tanto no que diz respeito ao atendimento às normas quanto à eficiência no uso de recursos (físicos, financeiros e humanos) para a produção de água potável.

Sob o ponto de vista de qualidade da água, o ponto de partida é o atendimento ao padrão de potabilidade, no Brasil, representado pela Portaria 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). Todavia, a imposição de valores limite para os parâmetros de qualidade de água nem sempre é regulamentada em critérios técnicos.

O uso de métodos probabilísticos para estabelecer padrões é uma abordagem realista e prática do ponto de vista operacional (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2008). Nesse sentido, exemplo mais evidente é o padrão de turbidez da água após filtração estabelecido na Portaria 2914/2011, definido por valores absolutos acompanhados dos respectivos percentuais de atendimento, os quais estabelecem metas progressivas a vigorar a partir do final de 2012.

A adoção de limites acompanhados de percentuais de atendimento exige o conhecimento detalhado do comportamento dos parâmetros considerados. As ETAs devem ser projetadas de forma a acomodar a variabilidade esperada das características do efluente para que as metas sejam satisfeitas dentro do percentual exigido (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2008). Nesse contexto, a análise de confiabilidade pode ser empregada para a avaliação conjunta dos limites e dos percentuais de atendimento de forma simples, a partir de estatísticas básicas obtidas de dados representativos de monitoramento.

A confiabilidade pode ser entendida como a fração de tempo em que se conseguem valores esperados no efluente para cumprir as metas de qualidade (NIKU *et al.*, 1981). Partindo da premissa de que amostragem dos parâmetros é realizada com frequência regular e em intervalos relativamente curtos, proporcionando número de dados que garanta a representatividade do processo, é possível assumir que o percentual de amostras dentro do padrão é igual à fração do tempo em que a operação é satisfatória e, portanto, igual à confiabilidade para o aspecto avaliado.

O presente trabalho propõe a avaliação do desempenho e da confiabilidade de estações de tratamento de água, o que permitirá a verificação do percentual do tempo em que os padrões de qualidade são atendidos e a estabilidade dos processos. Pode-se destacar que existem muito poucos trabalhos que versam sobre a análise de confiabilidade de ETAs no contexto brasileiro, tratando-se de uma iniciativa inovadora e que contribui para a evolução do conhecimento no setor.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar estatisticamente, o desempenho e a confiabilidade, de estações de tratamento de água a partir de dados secundários.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar o desempenho das estações de tratamento agrupadas por tecnologia de tratamento (e por porte;
- Avaliar o desempenho individual de estações de tratamento, considerando o atendimento a padrões de potabilidade e metas de qualidade para a água tratada;
- Efetuar a análise de confiabilidade das estações de tratamento de água pesquisadas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Técnicas de tratamento de água para abastecimento

A escolha da tecnologia mais adequada para ser empregada na potabilização da água de determinado manancial é função de vários fatores, tais como: características da água bruta; tipo de manancial (lótico ou lântico); custos de implantação, manutenção e operação; manuseio e confiabilidade dos equipamentos; flexibilidade operacional; localização geográfica e características da comunidade; e disposição final do lodo. Ressalta-se a importância de uma caracterização completa da água bruta, considerando também sua variabilidade ao longo do tempo, na escolha da técnica.

As principais técnicas utilizadas no Brasil incluem o tratamento convencional e a filtração direta, sendo também encontradas, em um menor número de estações, a filtração lenta, a flotação e a separação em membrana (HELLER E PÁDUA, 2006).

O tratamento convencional foi assim denominado em 1890 no estado de Ohio (EUA) quando foi recomendada por George Fuller a etapa de clarificação precedendo a filtração para as águas turvas do rio Ohio. A partir daí, nas décadas seguintes a tecnologia que abrangesse aplicação de coagulante na unidade de mistura rápida, floculação, sedimentação e filtração passou a ser denominada convencional. (LOGSDON, G.; HESS, A. & HORSLEY, 1999). O principal objetivo deste, como de qualquer tratamento, é produzir água por um preço acessível e cuja qualidade satisfaça a um conjunto de padrões que a torne adequada para o consumo humano.

O tratamento convencional predomina no país (LIBÂNIO, 2008), devido principalmente às características da água bruta e à variação sazonal que altera estas ao longo do ano, demandando um tratamento mais robusto. O tratamento convencional contempla a etapa de clarificação, composta pela coagulação, floculação e decantação, ou flotação (se houver presença de algas ou elevada cor na água bruta) e filtração rápida, usualmente descendente (HELLER E PÁDUA, 2006).

Segundo Heller e Pádua (2006) deve-se ressaltar que, como o tratamento convencional possui sempre as unidades do tratamento em série, o desempenho de cada uma das unidades pode afetar o funcionamento das demais subsequentes, sendo necessário avaliar sempre o tratamento como um todo e não somente em unidades individuais.

Heller e Pádua (2006) consideram as técnicas de filtração direta como aquelas nas quais a água bruta é coagulada e encaminhada aos filtros rápidos, que são as unidades responsáveis pela remoção de sólidos. Nessa classificação estão incluídas a filtração direta ascendente e descendente, a filtração direta descendente precedida de floculação e a dupla filtração (filtração ascendente seguida de filtração descendente).

A filtração direta apresenta vantagens em relação aos custos, por dispensar unidades de decantação onerosas, além de operar com taxas superiores aos filtros do tipo lento, resultando em sistemas mais compactos (LIBÂNIO, 2008). A técnica/tecnologia deixa a desejar no quesito de flexibilidade operacional e bom desempenho quando da variação da qualidade da água bruta e elevada turbidez e cor verdadeira. A dupla filtração é a técnica de filtração direta que permite o tratamento de água bruta de qualidade inferior, suportando um maior aporte de sólidos (em suspensão e dissolvidos), segundo Heller e Pádua (2006).

Nos casos em que o manancial possui uma floração acentuada de algas, nem mesmo a técnica de dupla filtração mostra-se eficiente (LIBÂNIO, 2008). O uso de uma unidade de flotação torna-se necessária para remover as algas, aliada à técnica de filtração direta (CEZAR, 2005; ANGELIS, 2007) ou mesmo o tratamento convencional em quando a flotação substitui a decantação.

Para a definição da tecnologia de tratamento a ser implantada é fundamental a análise das características da água bruta. Destaca-se que não existem parâmetros consolidados para essa escolha. Várias publicações, da ABNT (1992) à Resolução 357 do Conama (2005), passando por diversos autores, discute-se a imposição de intervalos das principais características da água bruta e às respectivas tecnologias de tratamento associadas aos mesmos.

Libânio (2008) apresenta de forma sucinta, a Tabela 3.1 adaptada, demonstrando intervalos de valores para quatro características físicas e microbiológicas. Tais características são utilizadas como norteadoras à aplicação das principais tecnologias de potabilização.

Tabela 3.1 – Características das águas naturais em função da tecnologia de tratamento recomendada

Característica \ Tecnologia	Convencional	Dupla Filtração	Filtração Direta**	Filtração Lenta*	Filtração Direta em Linha**
Turbidez (uT)	< 3.000	< 50	< 20	< 10	< 5
Cor Aparente (uH)	< 1.000	< 50	< 20	< 20	< 15
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	< 10 ⁶	< 10 ³	< 10 ³	< 10 ³	< 100
Algas (UPA/mL)	< 10 ⁵	< 5.000	< 10 ³	< 250	< 100

* Sem o emprego de pré-filtros; **Esta distinção refere-se à unidade de floculação a montante dos filtros (Filtração Direta) e quando tal operação unitária não se faz presente (Filtração Direta em Linha).

Fonte: adaptado de LIBÂNIO, 2008.

3.2 Padrões de Potabilidade

A metodologia para a elaboração de uma norma de qualidade da água deve cumprir algumas etapas básicas, no que se refere ao conhecimento sobre o estado da arte dos diversos aspectos inerentes à qualidade da água para consumo humano, ou seja, deve-se fazer um diagnóstico consistente sobre a capacitação técnica do país para o tratamento, distribuição e consumo de água; um reconhecimento da qualidade da água dos mananciais, produtos químicos mais utilizados, além dos aspectos epidemiológicos e toxicológicos (BASTOS *et al.*, 2001; SOLSONA, 2002).

Sob o ponto de vista de qualidade da água, o ponto de partida é o atendimento ao padrão de potabilidade, representado no Brasil pela Portaria 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). Todavia, a imposição de valores limite para os parâmetros de qualidade de água nem sempre é pautada em critérios técnicos ou está completamente clara nas Normas. Vale destacar, por exemplo, que para os valores-guia propostos pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) não é mencionado se o limite se refere à saída da estação ou à rede de distribuição.

Nos Estados Unidos da América (EUA) a regulação da qualidade da água para consumo humano iniciou-se em 1914 quando o Serviço de Saúde Pública (United States Public Health Service) determinou o padrão de qualidade microbiológica, direcionado exclusivamente aos sistemas que forneciam água potável aos veículos de transporte interestadual, abarcando apenas contaminantes capazes de causar doenças contagiosas (USEPA, 2000b).

O Serviço de Saúde Pública revisou e expandiu diversas vezes a legislação chegando a um padrão considerado como mais restritivo e, conseqüentemente, mais eficaz. A USEPA estabelece o padrão de potabilidade considerando os riscos à saúde associados a cada

contaminante, seu padrão de ocorrência na água, as tecnologias de tratamento disponíveis e o custo. Adicionalmente, a USEPA compila dados sobre a qualidade da água, fornece informação ao público, disponibiliza orientação, assistência e inspeciona os programas estaduais de controle de qualidade da água (USEPA, 2004).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) foi criada posteriormente, em 1956, e tinha como premissa a iniciativa de elaboração de diretrizes relativas à potabilidade da água, direcionada ao continente europeu, onde houve diversas publicações de manuais.

Atualmente a OMS baseia-se nas quatro edições do *Guidelines for Drinking Water Quality* (GDWQ), um guia com orientações relativas à qualidade da água para consumo humano, direcionado a todos os países, sem distinção econômica ou tecnológica (WHO, 2011).

Desta forma, os guias objetivam embasar as iniciativas de estabelecimento de padrões e práticas para obtenção de água potável nos diversos países, dando suporte ao desenvolvimento e à implementação de estratégias para o gerenciamento dos riscos à saúde associados à água para consumo humano (WHO, 2004).

A Tabela 3.2 apresenta um resumo comparativo dos padrões de potabilidade propostos para o Brasil, Estados Unidos e pela OMS. Destaca-se que a USEPA será utilizada como referência neste estudo por ser a organização pioneira em estipular parâmetros de potabilidade e também por ser uma das legislações mais restritivas, enquanto a OMS deverá ser avaliada por se tratar do padrão mundial.

Vale ressaltar que existe também a influência dos métodos de medição na determinação dos parâmetros de qualidade da água tratada e no atendimento destes aos padrões de potabilidade. Por exemplo, no caso da turbidez, principal parâmetro na avaliação de desempenho de ETAs, diferentes tipos de aparelhos utilizados na medição podem apresentar resultados variáveis para uma mesma água (TEIXEIRA *et al.*, 2004). Teixeira *et al.* (2004) obtiveram resultados de turbidez de água filtrada consistentemente menores em turbidímetros de escoamento contínuo em comparação com os de bancada. Entretanto, a padronização do princípio de funcionamento desses equipamentos, ou a equiparação dos resultados obtidos por equipamentos distintos, ainda não é uma realidade, principalmente em um país no qual a precariedade do saneamento básico em muitas regiões ainda deve ser solucionada.

Tabela 3.2 – Comparação de padrões de potabilidade do Brasil, Estados Unidos e OMS

Parâmetro	Brasil	Estados Unidos	Organização Mundial da Saúde ^(c)
Coliformes totais	Ausência em 100 mL ⁽¹⁾	95 % das amostras ausentes (> 40 amostras) ^(a) Uma amostra positiva (\leq 40 amostras) ^(a)	Ausência em 100 mL
Turbidez da água filtrada	Máximo de 1,0 uT ⁽²⁾ 25 % < 0,5 uT em 2013 50 % < 0,5 uT em 2014 75 % < 0,5 uT em 2015 95 % < 0,5 uT em 2016	Máximo de 1,0 uT ^(a) 95 % < 0,3 uT ^(a)	5,0 uT
Cloro livre	0,2 mg L ⁻¹ ⁽³⁾ a 2 mg L ⁻¹ ⁽⁴⁾ Máximo de 5 mg L ⁻¹ ⁽⁷⁾	4 mg L ⁻¹ ^(a)	5 mg L ⁻¹
Cor aparente	15 uH ⁽⁵⁾	15 uH ^(b)	15 uH
Fluoreto	0,7 mg L ⁻¹ a 1,0 mg L ⁻¹ ⁽⁶⁾ Máximo de 1,5 mg L ⁻¹ ⁽⁷⁾	2 mg L ⁻¹ ^(b) Máximo de 4 mg L ⁻¹ ^(a)	1,5 mg L ⁻¹
pH	Entre 6 e 9,5 ⁽⁸⁾	6,5 a 8,5 ^(b)	- ^(d)

(1) Na saída do tratamento, estabelecido no anexo I da Portaria 2914 (BRASIL, 2011b).

(2) Estabelecido no anexo III da Portaria 2914.

(3) No sistema de distribuição, estabelecido no artigo 34 da Portaria 2914.

(4) Recomendação no parágrafo segundo do artigo 39 da Portaria 2914.

(5) No sistema de distribuição, estabelecido no anexo X da Portaria 2914.

(6) Intervalo recomendado, quadro 1 da Portaria 635 (BRASIL, 1975).

(7) No sistema de distribuição, estabelecido no anexo VII da Portaria 2914.

(8) Intervalo estabelecido no parágrafo primeiro do artigo 39 da Portaria 2914.

(a) Padrão Primário (National Primary Drinking Water Regulations) (USEPA, 2009).

(b) Padrão Secundário (National Secondary Drinking Water Regulations).

(c) WHO (2011).

(d) Não é considerado como de risco à saúde nos níveis usualmente encontrados na água potável.

3.3 Avaliação de desempenho de estações de tratamento de água

Diferentes métodos podem ser utilizados na avaliação do desempenho de ETAs. Alguns autores fazem a avaliação a partir da geração da estatística descritiva e da distribuição de frequência de diferentes variáveis dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Também são calculadas, a partir desses dados, as eficiências de remoção desses parâmetros.

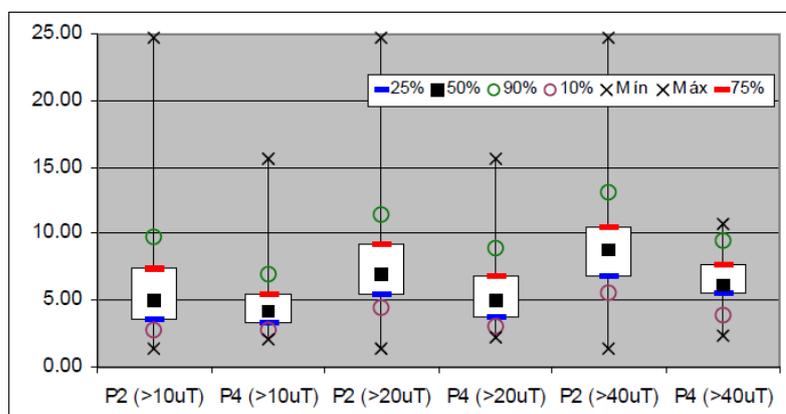
No trabalho de Rocha *et al.* (2009) foi avaliada a ETA automatizada de Itapetinga-BA, localizada na região sudoeste do estado. Foram acompanhados diferentes parâmetros físico-químicos da água bruta, decantada e filtrada com coletas três vezes ao dia no ano de 2007. A partir dos dados foram calculadas as médias mensais dos parâmetros e, para cor e turbidez, foram também calculadas as eficiências de remoção médias. Todos os parâmetros atenderam aos padrões da legislação e a remoção apresentou elevadas eficiências.

Nesse contexto, Bastos *et al.* (2000, 2003) avaliaram o desempenho de duas ETAs utilizando, além da avaliação estatística e eficiências de remoção, a simulação da eficiência das estações em escala laboratorial (*Jar Test*) e a verificação dos parâmetros hidráulicos atuais em comparação com os valores de projeto. Todas essas informações, em conjunto, possibilitam uma análise mais dinâmica do desempenho de ETAs, verificando não somente a qualidade final da água produzida, mas também o estado de manutenção das unidades e equipamentos. Esse diagnóstico estatístico e hidráulico das estações de tratamento permite também identificar quais são os problemas mais frequentes e a causa destes.

Os trabalhos de Bastos *et al.* (2000, 2003) identificaram alguns problemas de funcionamento na ETA de Viçosa-MG, servindo de subsídio para uma série de intervenções que essa ETA sofreu em 2004. O desnivelamento do decantador e o mau estado de conservação dos leitos filtrantes contribuíam para que a ETA tivesse pior desempenho quando ocorriam elevações bruscas na turbidez da água bruta.

Em 2006, após modificações nos filtros (instalação de blocos Leopold e fundos falsos, renovação dos leitos filtrantes) e nos decantadores (instalação de bordas vertedouras ajustáveis), o desempenho da ETA de Viçosa pôde ser melhorado (BASTOS *et al.*, 2006). Foram avaliadas a turbidez da água decantada e filtrada, para os períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso, antes e após a reforma. Para a água decantada do período chuvoso, com turbidez da água bruta acima de 40 uT, foi identificada uma diferença maior das medianas antes e após a reforma, além de um estreitamento entre o primeiro e terceiro quartil da análise gráfica dos resultados Figura 3.1, que são indicadores do aumento da eficiência do tratamento com as intervenções.

Figura 3.1 – Turbidez da água decantada, para turbidez da água bruta acima de 10, 20 e 40 uT, períodos P2 e P4.



Obs: P2 – período de chuva antes das reformas e P4 – período de chuva após as reformas
 Fonte: adaptado de BASTOS *et al.*, 2006.

Makungo *et al.* (2011) avaliaram o desempenho da ETA de Mutshedzi, localizada na África do Sul, visando agregar informações para o estudo de caso dessa estação e para ETAs de pequeno porte em geral, uma vez que a literatura indica que aproximadamente 50 % dessas estações não produzem água potável com qualidade e quantidade adequadas. Neste estudo foram coletadas amostras, entre julho e dezembro de 2009 para a determinação de pH, condutividade elétrica, turbidez e vários parâmetros químicos (metais e não-metais). Os dados foram avaliados com gráficos de série temporal e estatística descritiva, sendo comparados com as recomendações para qualidade da água da África do Sul. O atendimento para a água tratada dos diversos parâmetros variou entre 86 % e 93% para o período avaliado, com turbidez e fluoreto excedendo os limites recomendados.

Recentemente Ali *et. al.* (2012) avaliaram o desempenho de duas ETAs com captação superficial de Islamabad, no Paquistão, país que possui 64 % de seus mananciais de água potável contaminados com coliformes totais. Foram coletadas amostras com frequência aproximadamente quinzenal por um ano e conduzidas análise de alguns parâmetros físicos e químicos, sendo focados os parâmetros de turbidez e coliformes totais e termotolerantes. Os resultados foram avaliados a partir da estatística descritiva, comparados com dados da *World Health Organization* (WHO), além de serem calculadas as eficiências de remoção de turbidez e coliformes. Os resultados indicaram atendimento às recomendações da WHO e que a qualidade dos mananciais em termos de turbidez e coliformes devem ser adaptadas a partir da proteção principalmente das ações antropogênicas e de animais.

A avaliação das eficiências de remoção nos processos de tratamento de água é um método amplamente utilizado, mas que sozinho não permite avaliar o atendimento aos padrões de potabilidade. A associação desse método com a comparação dos resultados da estatística descritiva (média, mediana, máximo, mínimo, etc.) com limites de potabilidade melhora a investigação do desempenho das ETAs. Mesmo assim, a qualidade dessa comparação depende dos padrões com que os resultados são comparados, como no caso do estudo de Makungo *et al.* (2011), que não usou padrões restritivos de turbidez, ou seja, baseou-se apenas nas recomendações da WHO.

Além da verificação da estatística e de eficiência também são empregados modelos matemáticos de simulação para avaliar o funcionamento de ETAs durante a concepção destas (TOWLER *et al.*, 2009; RAO SRINIVASA; SHRIHARI, 2010; LAMRINI *et al.*, 2011; MOSTAFA *et al.*, 2013; JUNTUNEN *et al.*, 2013).

A modelagem matemática permite simular o desempenho de uma ETA projetada e otimizar seu processo antes de sua implantação, avaliando a influência de cada unidade no desempenho das demais, por exemplo.

Para avaliar a remoção de matéria orgânica natural via coagulação, Towler *et al.* (2009) compararam o uso de dois métodos de regressão tradicionais – linear e não-paramétrico – utilizando como variáveis o carbono orgânico total (COT), indicativo da matéria orgânica, pH e alcalinidade, dois parâmetros que influenciam o processo de coagulação. Foi utilizado o banco de dados da USEPA de ETAs convencionais com captação superficial. Todos os parâmetros avaliados adequaram-se bem ao modelo não-paramétrico em comparação com o linear, especialmente o pH.

Rao Srinivasa e Shrihari (2010) realizaram a análise de sensibilidade de uma ETA indiana como estudo de caso, a partir do uso de programação dinâmica e do banco de dados da ETA em estudo. Foram consideradas variáveis de diferentes unidades da estação, com destaque para a unidade de mistura lenta (ou floculação), sendo calculados os coeficientes de sensibilidade para esses parâmetros. O modelo obtido foi estável, sendo as principais limitações indicadas pelos autores, a não variação da qualidade da água bruta dos parâmetros pH, alcalinidade; tal fato era decorrente da adição de coagulantes.

Gupta e Shrivastava (2010) utilizaram uma associação de modelos estocásticos de algoritmos genéticos com a simulação de Monte Carlo para encontrar soluções ideais de funcionamento de uma ETA teórica. Os autores utilizaram os algoritmos genéticos com o intuito de avaliar as incertezas associadas ao funcionamento de uma ETA, que usualmente não são levadas em consideração em outros modelos. Um desses casos de incerteza seria o dos sólidos em suspensão na água bruta (GUPTA E SHRIVASTAVA, 2006) que, se não considerados devidamente, podem levar a resultados de efluentes que descumprem os padrões de qualidade.

Em outro estudo de modelagem, Lamrini *et al.* (2011) desenvolve um tipo de rede neural artificial denominado mapa de auto-organização, com o objetivo de aprimorar dados de monitoramento contínuo em uma ETA de Marrakech, Marrocos. Ao permitir a detecção e diferenciação de dados atípicos, tais como negativos e *outliers*, esse tipo de programação permite melhorar a entrada de dados de qualidade de água bruta em sistemas automáticos de controle de coagulação. Esse tipo de modelagem se aplica também à reconstrução do banco de dados, além do aprimoramento deste, sendo interessante, por exemplo, para complementar os

dados muitas vezes esparsos temporalmente pela falta de análises contínuas. Dados negativos, nulos, dentre outros, atrapalham o processo de análise em diferentes *softwares* estatísticos, e podem gerar grande trabalho em sua correção.

Juntunen *et al.* (2013) utilizaram também um mapa de auto-organização em seu estudo para modelar a qualidade da água de uma ETA localizada em Kuopio, Finlândia, como estudo de caso. Após a geração do mapa foram utilizados algoritmos para avaliá-los. As conclusões deste estudo também indicam positivamente o uso desse método para avaliar bancos de dados amplos e com dados faltantes, além de citar que no futuro os mapas de auto-organização poderiam ser utilizados como gráficos de controle para monitorar e prever o funcionamento de ETAs.

O uso de programação dinâmica em estudo de desempenho de unidades de estação de tratamento de água também foi realizado recentemente por Mostafa *et al.* (2013) para avaliar a variação dos custos de ETAs a partir da variação do desempenho. Também foi utilizada a análise de sensibilidade dos parâmetros avaliados.

Outra forma bastante utilizada para avaliação de desempenho de ETAs é a elaboração de indicadores. Lopes em 2005 propôs um Índice de Qualidade de Estações de Tratamento de Água (IQETA) para avaliar o desempenho de estações de tecnologia convencional de tratamento. O índice desenvolvido incluiu parâmetros agrupados de acordo com as diferentes unidades do tratamento, além do grupo referente à operação de ETAs, para avaliar a qualidade da equipe de operação. Essa divisão foi realizada visando obter um índice global do tratamento a partir de índices parciais que permitem, por exemplo, identificar se uma unidade específica é responsável por abaixar o índice do processo todo. Cada parâmetro e cada grupo de parâmetros teve um peso atribuído. Os índices foram aplicados a 10 ETAs de diferentes portes, sendo em seguida correlacionados à turbidez da água filtrada das estações, de modo a comparar um elevado IQETA com um bom desempenho em relação à turbidez.

Com o intuito de aperfeiçoar o índice desenvolvido por Lopes (2005), Almeida (2009) propôs a redução do número de parâmetros do IQETA, devido aos problemas associados à obtenção por longo prazo de dados ambientais frequentes. Ao final, foi reduzido o número de parâmetros de 19 para 12, obtendo mesma correlação do indicador com a *performance* das ETAs.

Quando se deseja analisar a variabilidade de uma tecnologia de tratamento, os gráficos de controle de qualidade podem ser utilizados para o controle e a melhoria da qualidade de sistemas e processos. Eles possibilitam, ainda, a detecção de fontes não usuais de variabilidade nos processos, o que permite que ações corretivas possam ser tomadas para remoção das alterações ou falhas presentes. Apesar de poucos usuais para avaliação de desempenho de estações de tratamento de água, são ferramentas válidas e simples que podem ser utilizadas (SMETI, 2007).

Honorato e Costanzi (2013) utilizaram gráficos de controle de Shewhart e índice de capacidade do processo para verificar ocorrências de variações específicas nos parâmetros de turbidez e pH da água tratada na ETA da cidade de Londrina-PR, avaliando dados de 2007 a 2009. Foram realizados testes de verificação da normalidade dos dados, para aplicação dos gráficos de controle. Os resultados obtidos demonstraram que os testes aplicados podem acompanhar com facilidade os limites de controle estatísticos adequados aos dados e, dessa forma, são viáveis para uso no monitoramento de parâmetros de processos de ETAs (como a turbidez), principalmente em sistemas automatizados.

O uso de métodos probabilísticos para estabelecer padrões é uma abordagem realista e prática do ponto de vista operacional (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2008). Nesse sentido, exemplo mais evidente é o padrão de turbidez da água após filtração estabelecido na Portaria 2914/2011, definido por valores absolutos acompanhados dos respectivos percentuais de atendimento, os quais estabelecem metas progressivas que passaram a vigorar a partir do final de 2012.

A adoção de limites acompanhados de percentuais de atendimento exige o conhecimento detalhado do comportamento dos parâmetros considerados. As ETAs devem ser projetadas de forma a acomodar a variabilidade esperada das características do efluente para que as metas sejam satisfeitas. Neste sentido, ferramentas como o modelo de confiabilidade, desenvolvido para avaliação de desempenho de estações de tratamento de água (ETA), podem contribuir de maneira muito relevante para a análise de desempenho de estações de tratamento.

A confiabilidade de um sistema pode ser definida como a probabilidade de se conseguir um desempenho adequado por um período específico de tempo, sob determinadas condições.

Em termos de desempenho de uma estação de tratamento, seja de água ou esgoto, a confiabilidade pode ser entendida como a porcentagem de tempo em que se conseguem as

concentrações esperadas no efluente para cumprir com os padrões de distribuição ou de lançamento. Assim, uma ETA será completamente confiável se não houver falha no desempenho, ou seja, se não houver violação dos limites preconizados pelas legislações. A falha do processo de tratamento ocorrerá sempre que o padrão de distribuição não for cumprido.

Dean & Forsythe (1976) comentam que a probabilidade de falha é extremamente sensível à função de distribuição da concentração do parâmetro analisado. Conhecida esta distribuição, uma expressão pode ser utilizada para definir a fração do tempo em que uma dada concentração foi excedida no passado e, desta forma, predizer o comportamento futuro de uma ETE, desde que as variáveis do processo continuem as mesmas. Devido às variações na qualidade da água tratada, a estação de tratamento deve ser naturalmente projetada para produzir uma concentração média efluente abaixo dos padrões. Para determinar uma concentração média que garanta que a concentração do efluente estará abaixo de certo valor, com um determinado nível de confiabilidade, Niku *et al.* (1979) desenvolveram um método que relaciona a concentração média do constituinte (valor de projeto) com os valores limites a serem cumpridos, baseando-se em análises probabilísticas. Este método tem sido muito utilizado para avaliação de desempenho de ETES (Niku *et al.*, 1981, 1982, Niku e Schroeder, 1981, Metcalf & Eddy, 2003; Oliveira, 2006; Oliveira e Sperling, 2006; Oliveira e Sperling, 2007; Oliveira e Sperling, 2008), mas não para ETAs, mas nada impede que a metodologia seja aplicada, caso os pressupostos sejam cumpridos.

A distribuição de água com qualidade satisfatória para a manutenção da saúde pública tem se tornado um desafio cada vez maior para as concessionárias. Diversas intervenções humanas nas bacias hidrográficas têm provocado impactos diretos e indiretos, tornando cada vez mais escassos os mananciais com boa qualidade de água. Exemplos dos impactos decorrentes de ações antrópicas seria o aumento do escoamento superficial devido a impermeabilizações, que causam enchentes e erosão com carreamento de resíduos sólidos para os corpos d'água, a contaminação da chuva por poluentes lançados na atmosfera e o uso de produtos químicos como agrotóxicos, óleos e graxas.

Com a intenção de proteger a saúde pública, as legislações que estabelecem padrões de potabilidade estão se tornando cada vez mais rígidas. No Brasil, a Portaria 2914/2011 estabeleceu padrões para turbidez, considerando metas progressivas: 25% de atendimento no primeiro ano, 50% no segundo ano, 75% no terceiro ano e 95% no quarto ano após a

promulgação. No entanto, não se tem conhecimento se as ETAs do país estão prontas para atender aos padrões mais restritivos adotados e qual é a confiabilidade das tecnologias de tratamento, medida pela probabilidade de desempenho satisfatório de uma estação, considerando o atendimento aos padrões de potabilidade.

4 METODOLOGIA

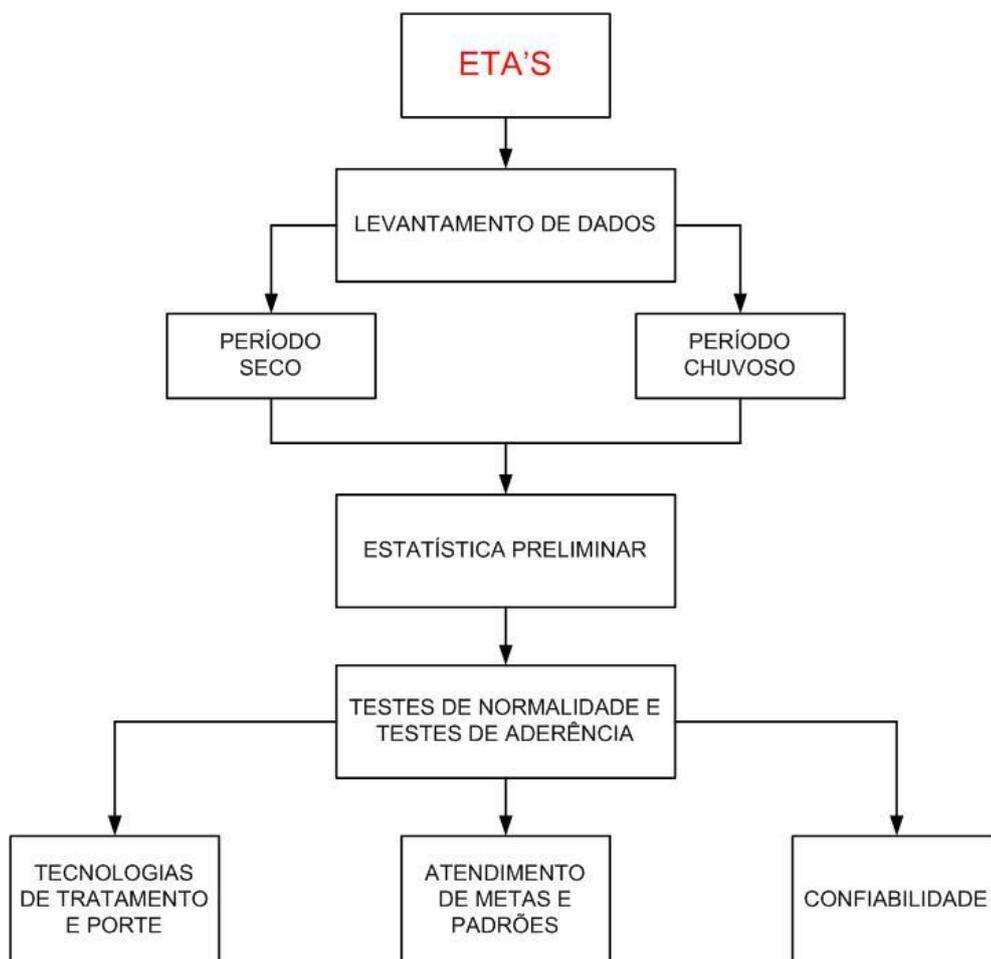
Em um primeiro momento, realizou-se uma coleta de dados das características da água bruta e da água tratada de seis estações de tratamento de água. Os dados obtidos foram turbidez, cor aparente, concentrações de cloro e de flúor residuais, pH e coliformes totais.

Em seguida, os dados coletados foram segregados em período predominantemente seco e período predominantemente chuvoso para, na sequência, proceder-se à análise estatística preliminar.

Por fim, de posse da estatística preliminar, os dados analisados foram submetidos a novos testes estatísticos, os quais serviram de base para as avaliações das diversas formas de desempenho, a saber: das estações de tratamento agrupadas por tecnologia, por porte, por padrões e metas de qualidade para a água tratada e, enfim, da análise de confiabilidade.

Com intuito de facilitar o entendimento da estrutura do trabalho, segue a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Fluxograma – Metodologia do trabalho



4.1 Estações de Tratamento de Água (ETA) avaliadas

Na sequência é apresentada uma breve descrição em forma de tabela para cada estação de tratamento de água avaliada, discriminadas por tecnologia de tratamento.

4.1.1 CICLO COMPLETO COM FLOTAÇÃO

ETA A

1. Descrição da ETA		
Ano de início de operação: 1959		Vazão de projeto (Ls ⁻¹): 2.800
Tempo diário médio de operação (horas): -		Número de funcionários: -
Tecnologia de tratamento: tratamento convencional com flotação		
Mistura rápida	<input checked="" type="checkbox"/> Hidráulica (Parshall) <input type="checkbox"/> Mecanizada	Coagulante: -
Floculação	<input type="checkbox"/> Hidráulica <input checked="" type="checkbox"/> Mecanizada	Número de câmaras: 6 (duas séries de três câmaras em paralelo)
Outros processos	<input checked="" type="checkbox"/> Flotação	Dois tanques em paralelo. No período em que a água bruta apresenta melhor qualidade, há a possibilidade proceder ao tratamento apenas com a coagulação/floculação seguida pela filtração.
Filtração	<input type="checkbox"/> Pré-filtração <input checked="" type="checkbox"/> Rápida	Número de filtros: 24
	<input type="checkbox"/> Ascendente <input checked="" type="checkbox"/> Descendente <input type="checkbox"/> Dupla filtração	Taxa de filtração (md ⁻¹): -
		Material do leito: -
Cloração		Desinfetante: -
		Dose média aplicada (mgL ⁻¹): -
		Tempo de contato (min): -
Correção de pH		Composto: cal hidratada
		Dose média aplicada (mgL ⁻¹): -
Fluoretação		Composto: -
		Dose média aplicada (mgL ⁻¹): -
2. Características do manancial		
Tipo de captação:		<input checked="" type="checkbox"/> Reservatório de acumulação <input checked="" type="checkbox"/> Curso d'água

3. Descrição das reformas	
Reforma 1	
Data de início (mm/aaaa): 05/1986	Data de conclusão (mm/aaaa): 05/1986
Motivo (justificativa para a reforma): -	
<p>Tipo de modificação: 24 filtros foram reformados e passaram a funcionar com o sistema de vigas californianas e filtração com taxa declinante variável, com vazão máxima limitada por placa de orifício instalada na saída da tubulação de água filtrada de filtro.</p>	
Reforma 2	
Data de início (mm/aaaa): 1996	Data de conclusão (mm/aaaa): 1996
Motivo (justificativa para a reforma): -	
<p>Tipo de modificação: Reforma na base de todos os filtros com a implantação do sistema de drenagem por tubulações perfuradas. A partir desse ano foi adotada a lavagem com ar e água.</p>	
Reforma 3	
Data de início (mm/aaaa): 2006	Data de conclusão (mm/aaaa): 2006
Motivo (justificativa para a reforma): Reduzir a carga de sólidos, principalmente algas, afluentes aos filtros e aumentar a eficiência.	
<p>Tipo de modificação: Mudança da tecnologia de filtração direta (coagulação, floculação e filtração) para a convencional com flotação. A reforma compreendeu a implantação de um bloco hidráulico com unidades de pré-tratamento.</p>	
Reforma 4	
Data de início (mm/aaaa): 2006	Data de conclusão (mm/aaaa): 2006
Motivo (justificativa para a reforma): -	
<p>Tipo de modificação: Mudança do leito filtrante dos 24 filtros, com a substituição do leito de maior granulometria por leito duplo de areia com granulometria mais fina (0,5 a 0,6 mm) e de antracito (0,95 a 1,05 mm). Todavia, o leito de granulometria grossa foi repostado em 18 filtros em vista da perda considerável de leito filtrante que houve após a primeira modificação. Foi também realizada a substituição do sistema coletor de água filtrada e do distribuidor de ar e água para lavagem dos filtros para blocos Leopold e a eliminação poço de visita.</p>	
4. Destino final de resíduos	
<p>Descrição de operações e processos unitários de tratamento do efluente da lavagem de filtros (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. A água de lavagem dos filtros é enviada para uma caixa de passagem e segue por gravidade até o reservatório de recirculação. Este é provido de misturadores com hélice para impedir a sedimentação. A água então retorna para câmara de chegada de água bruta.</p>	
<p>Descrição de operações e procesos unitários de tratamento do lodo (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. O lodo oriundo da flotação é destinado a dois decantadores centrífugos e a torta produzida coletada em çaçambas e disposta em uma cascalheira desativada.</p>	

4.1.2 CONVENCIONAL

ETA B

1. Descrição da ETA	
Ano de início de operação: -	Vazão de projeto (Ls ⁻¹): 165
Tempo diário médio de operação (horas): -	Número de funcionários: -
Tecnologia de tratamento: tratamento convencional	
2. Características do manancial	
Tipo de captação:	<input type="checkbox"/> Reservatório de acumulação <input checked="" type="checkbox"/> Curso d'água
3. Descrição das reformas	
A estação não sofreu modificações relevantes desde sua construção.	
4. Destino final de resíduos	
Descrição de operações e processos unitários de tratamento do efluente da lavagem de filtros (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. Não disponível.	
Descrição de operações e processos unitários de tratamento de lodo (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. Não disponível.	

ETA C

1. Descrição da ETA	
Ano de início de operação: 1990	Vazão de projeto (Ls ⁻¹): 60
Tempo diário médio de operação (horas): -	Número de funcionários: -
Tecnologia de tratamento: tratamento convencional	
2. Características do manancial	
Tipo de captação:	<input type="checkbox"/> Reservatório de acumulação <input checked="" type="checkbox"/> Curso d'água
3. Descrição das reformas	
A estação não sofreu modificações relevantes desde sua construção.	
4. Destino final de resíduos	
Descrição de operações e processos unitários de tratamento do efluente da lavagem de filtros (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. Não disponível.	

ETA D

1. Descrição da ETA		
Ano de início de operação: 1988		Vazão de projeto (L s-1): 36
Tempo diário médio de operação (horas): -		Número de funcionários: -
Tecnologia de tratamento: tratamento convencional		
Mistura rápida	<input checked="" type="checkbox"/> Hidráulica (Parshall) <input type="checkbox"/> Mecanizada	Coagulante: -
Floculação	<input checked="" type="checkbox"/> Hidráulica <input type="checkbox"/> Mecanizada	Floculador de bandejas perfuradas com oito câmaras, de 1,30 m de diâmetro e 2,90 m de altura, e cinco bandejas em cada.
Decantação	<input type="checkbox"/> Convencional	Número de decantadores: 2
	<input checked="" type="checkbox"/> Alta taxa	Taxa de aplicação superficial (m d-1): 196
Filtração	<input type="checkbox"/> Pré-filtração	Número de filtros: 8
	<input checked="" type="checkbox"/> Rápida	Taxa de filtração (m d-1): 260
	<input type="checkbox"/> Ascendente <input checked="" type="checkbox"/> Descendente <input type="checkbox"/> Dupla filtração	Material do leito: -
Cloração		Desinfetante: -
		Dose média aplicada (mg L-1): -
		Tempo de contato (min): -
Correção de pH		Composto: -
		Dose média aplicada (mg L-1): -
Fluoretação		Composto: -
		Dose média aplicada (mg L-1): -
2. Características do manancial		
Tipo de captação:	<input type="checkbox"/> Reservatório de acumulação <input checked="" type="checkbox"/> Curso d'água	
3. Descrição das reformas		
A estação não sofreu modificações relevantes desde sua construção.		
4. Destino final de resíduos		
Descrição de operações e processos unitários de tratamento do efluente da lavagem de filtros (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. Não disponível.		
Descrição de operações e processos unitários de tratamento do lodo (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. Não disponível.		

4.1.3 FILTRAÇÃO DIRETA

ETA E

1. Descrição da ETA	
Ano de início de operação: 1986	Vazão de projeto (L s-1): 5.500
Tempo diário médio de operação (horas): -	Número de funcionários: -
Tecnologia de tratamento: filtração direta com pré-floculação	
Mistura rápida	<input checked="" type="checkbox"/> Hidráulica (Parshall) <input type="checkbox"/> Mecanizada Coagulante: sulfato de alumínio
Floculação	<input type="checkbox"/> Hidráulica <input checked="" type="checkbox"/> Mecanizada Duas unidades de floculação mecanizada de eixo vertical, cada uma dotada de quatro câmaras de seção quadrada de 8,35 m de lado e 4,40 m de profundidade.
Filtração	<input type="checkbox"/> Pré-filtração <input checked="" type="checkbox"/> Rápida Número de filtros: associada a cada unidade de floculação, há uma bateria de sete filtros.
	<input type="checkbox"/> Ascendente <input checked="" type="checkbox"/> Descendente Taxa de filtração (m d-1): -
	<input type="checkbox"/> Dupla filtração Material do leito: -
Cloração	Desinfetante: cloro gasoso
	Dose média aplicada (mg L-1): -
	Tempo de contato (min): -
Correção de pH	Composto: cal virgem
	Dose média aplicada (mg L-1): -
Fluoretação	Composto: ácido fluossilícico
	Dose média aplicada (mg L-1): -
2. Características do manancial	
Tipo de captação:	<input checked="" type="checkbox"/> Reservatório de acumulação <input type="checkbox"/> Curso d'água 4. Descrição das reformas
3. Descrição das reformas	
Reforma 1	
Data de início (mm/aaaa): 1996	Data de conclusão (mm/aaaa): 1996
Motivo (justificativa para a reforma): -	
Tipo de modificação: A capacidade de tratamento foi ampliada de 4.000 L s-1 para 6.000 L s-1. Porém o limite real situa-se em 5.500 L s-1.	

4. Destino final de resíduos

Descrição de operações e processos unitários de tratamento do efluente da lavagem de filtros (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. A água de lavagem dos filtros é encaminhada para um tanque de acumulação, a partir do qual segue para adensadores, com aplicação de polímero aniônico. Dos adensadores, o concentrado segue para um tanque de equalização e, por fim, para os decantadores. O sobrenadante dos adensadores e decantadores retorna à unidade de mistura rápida à razão inferior a 5 % da vazão de água bruta. Após desidratação em duas centrífugas, o lodo dos decantadores é encaminhado para uma cascalheira desativada.

Descrição de operações e processos unitários de tratamento do lodo (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades.

-

4.1.4 DUPLA FILTRAÇÃO

ETA F

1. Descrição da ETA		
Ano de início de operação: 2000		Vazão de projeto (L s-1): 640
Tempo diário médio de operação (horas): -		Número de funcionários: -
Tecnologia de tratamento: dupla filtração		
Mistura rápida	<input checked="" type="checkbox"/> Hidráulica (injetor) <input type="checkbox"/> Mecanizada	Coagulante: sulfato de alumínio
Floculação	<input type="checkbox"/> Hidráulica <input checked="" type="checkbox"/> Mecanizada	Duas unidades de floculação mecanizada de eixo vertical, cada uma dotada de quatro câmaras de seção quadrada de 8,35 m de lado e 4,40 m de profundidade.
Filtração	<input type="checkbox"/> Pré-filtração <input checked="" type="checkbox"/> Rápida	Número de filtros: seis módulos de dupla filtração de seção circular. As unidades de escoamento ascendente apresentam diâmetro de 5,50 m e as de escoamento descendente de 4,50 m.
	<input type="checkbox"/> Ascendente <input type="checkbox"/> Descendente <input checked="" type="checkbox"/> Dupla filtração	Taxa de filtração (m d-1): 194 (ascendete) e 290 (descendente) Material do leito: -
Cloração		Desinfetante: cloro gasoso
		Dose média aplicada (mg L-1): -
		Tempo de contato (min): -
Correção de pH		Composto: cal hidratada
		Dose média aplicada (mg L-1): -
Fluoretação		Composto: ácido fluossilícico
		Dose média aplicada (mg L-1): -

2. Características do manancial	
Tipo de captação:	<input type="checkbox"/> Reservatório de acumulação <input checked="" type="checkbox"/> Curso d'água 4
3. Descrição das reformas	
Tipo de modificação: Não disponível.	
4. Destino final de resíduos	
<p>Descrição de operações e processos unitários de tratamento do efluente da lavagem de filtros (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades. O dispêndio de água de lavagem dos filtros descendentes e o efluente das descargas de fundo intermediárias dos filtros de escoamento ascendente são desprezíveis em relação à vazão afluente. Esses efluentes são encaminhados para um tanque de equalização e posteriormente para adensadores onde a clarificação dá-se com a aplicação auxiliar de polímero. O sobrenadante dos adensadores e efluente da desidratação são retornados para um ponto à montante da unidade de mistura rápida. Após desidratação em centrífugas, também com o uso de polímeros, a torta é destinada para recuperação da área degradada em uma cascalheira desativada.</p>	
<p>Descrição de operações e processos unitários de tratamento do lodo (quando o processo ocorrer na estação) e descrição física das unidades.</p> <p>-</p>	

O resumo destas informações estão expostas na Tabela 4.1, ou seja, são apresentadas as características principais destas ETAs, acompanhadas da tecnologia de tratamento utilizada, da vazão nominal de projeto e do tipo de manancial.

Tabela 4.1 – Relação das ETAs avaliadas

Denominação	Tecnologia de tratamento	Vazão média em 2011 (L s ⁻¹)	Porte
ETA A	Ciclo completo com flotação	1.790	Grande
ETA B	Convencional	93	Pequeno
ETA C	Convencional	33	Pequeno
ETA D	Convencional	32	Pequeno
ETA E	Filtração Direta	4.400	Grande
ETA F	Dupla Filtração	320	Médio

4.2 Levantamento dos dados

A avaliação de desempenho baseou-se em dados de monitoramento e de informações relativas a cada estação, fornecidos na forma de planilhas e textos eletrônicos. Os dados operacionais foram disponibilizados em médias diárias e consistiram, basicamente, de seis parâmetros: turbidez, cor aparente, concentrações de cloro e flúor residuais, pH e coliformes totais. No

entanto, decidiu-se não inserir o pH e os coliformes totais da água tratada nas análises de desempenho, uma vez que o primeiro apresenta significativa amplitude nas recomendações da Portaria 2914/2011 (6,0 a 9,5 no sistema de distribuição) e o segundo não apresentava dados de monitoramento em todas as estações de estudo.

A turbidez efluente, por se tratar de um parâmetro rotineiramente monitorado pela quase totalidade das estações de tratamento no Brasil e no mundo, será analisada mais detalhadamente.

Também, ressalta-se as premissas estabelecidas pela Portaria 2914 (BRASIL, 2011), que considera metas progressivas de 0,5 uT, a saber: 25% de atendimento no primeiro ano, 50% no segundo ano, 75% no terceiro ano e 95% no quarto ano após a promulgação.

Outro parâmetro que será analisado com maior detalhamento é a cor. As ETAs avaliadas, da mesma forma que quase a totalidade das estações brasileiras, não realizam o monitoramento da cor verdadeira, sendo necessário avaliar o desempenho na remoção de partículas dissolvidas por meio da cor aparente.

A avaliação de desempenho contemplará também as concentrações de cloro e flúor residuais, responsáveis, respectivamente, por minimizar a presença de organismos microbiológicos na rede de distribuição e reduzir a incidência da cárie dentária. Para identificar o efeito da sazonalidade na qualidade da água, a análise dos dados foi efetuada para o período predominantemente seco e o predominantemente chuvoso separadamente.

4.3 Tratamento estatístico preliminar

O tratamento estatístico preliminar dos dados consistiu, inicialmente, de identificação de valores extremos (*outliers*), inconsistentes ou ainda falhas no preenchimento das planilhas. Para a identificação dos *outliers* foi utilizada a técnica de amplitude interquartis, que é dada pela diferença entre Q75 e Q25, respectivamente, o terceiro e o primeiro quartis, ou seja, foi considerado como *outlier* superior todo valor maior que $(Q75+1,5AIQ)$ e como *outlier* inferior todo valor menor que $(Q25-1,5AIQ)$ (NAGHETTINI; PINTO, 2007). A investigação da presença de *outliers* se restringiu aos parâmetros cloro livre, fluoreto e pH. Não foi avaliada a presença de *outliers* para os parâmetros turbidez e cor aparente das águas bruta e tratada por serem fortemente afetados por eventos pluviométricos, resultando em valores extremos, em geral, não pontuais e de ocorrência sazonal. O parâmetro coliforme totais

também não passou por esta etapa devido a pequena quantidade de dados, apenas duas das seis estações tinham dados a cerca desse parâmetro.

Posteriormente, fez-se a análise da sazonalidade, que consistiu na avaliação dos dados de precipitação pluviométrica da série histórica de 2002 a 2012, a partir da base de dados hidroweb, que se encontra no site da Agência Nacional das Águas (ANA).

Neste site foram obtidas todas as informações referentes às 99 estações pluviométricas situadas majoritariamente na área de estudo. Dentre as informações disponíveis, constava o nome da estação, seu código, a sub-bacia em que está inserida, o órgão responsável pela sua manutenção e operação, o período de abrangência das coletas de dados efetuadas, altitude, coordenadas geográficas, entre outros.

Em seguida, efetuou-se uma triagem nos dados dessas 99 estações a fim de obter aquelas que correspondiam ao período de análise, compreendido entre janeiro de 2002 a dezembro de 2012. Apenas cinco estações pluviométricas atendiam a esse critério.

Após efetuar o procedimento supra descrito, os dados obtidos foram segregados entre período predominantemente seco e período predominantemente chuvoso, a partir do registro de precipitação pluviométrica no dia analisado. Assim, todos os dados foram analisados individualmente e, se em três ou mais estações pluviométricas houvesse o registro de chuva, o dia era considerado chuvoso.

Na sequência, foi calculada a estatística descritiva dos dados de vazão e dos parâmetros de qualidade da água bruta e tratada de todas ETAs, que incluíam a turbidez, cor aparente, concentrações de cloro e flúor residuais, pH e coliformes totais. Na estatística descritiva foram calculados o número de dados disponíveis, a média, a mediana, o mínimo, o máximo, os percentis 10, 25, 75 e 90%, o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

Posteriormente, a normalidade dos dados foi verificada por meio da execução dos testes de normalidade Shapiro Wilk e o teste gráfico “Normal Probability Plot”, executados pelo pacote estatístico Statistica 6.1 (STATSOFT, INC., 2003).

Optou-se por apresentar todos os resultados por tecnologia de tratamento separadamente e considerando o período predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

4.4 Avaliação de desempenho das ETAs

A avaliação de desempenho das estações de tratamento foi efetuada em diversas etapas, visando extrair o máximo de informação dos dados disponibilizados. As etapas de avaliação seguiram a seguinte ordem: (i) avaliação de desempenho das estações de tratamento agrupadas por tecnologia de tratamento e por porte; (ii) avaliação do atendimento a padrões e metas de qualidade para a água tratada; (iii) análise de confiabilidade das estações de tratamento. Todas as etapas serão descritas detalhadamente a seguir. As análises foram efetuadas para o período predominantemente seco e para o período predominantemente chuvoso, com o propósito de identificar a influência da sazonalidade, exceto a análise de Confiabilidade.

4.4.1 Avaliação de desempenho das estações de tratamento agrupadas por tecnologia de tratamento e porte

A avaliação de desempenho das diversas ETAs agrupadas por tecnologia de tratamento foi efetuada por meio de testes de hipóteses não paramétricos (Kruskal-Wallis, seguido de teste de comparações múltiplas), que analisam múltiplas amostras independentes. A comparação considerou o desempenho das tecnologias de tratamento: convencional, flotação seguida de filtração direta, filtração direta e dupla filtração, e os seguintes parâmetros: a turbidez, a cor aparente, o cloro e o flúor residual. Os parâmetros turbidez e cor foram analisados tanto para água bruta quanto para água tratada. Já os residuais, cloro e flúor, por serem produtos introduzidos durante o tratamento, foram analisados apenas para água tratada. Considerar dados de eficiência de remoção de turbidez e cor em função da tecnologia.

A qualidade da água tratada será também comparada em função do porte de cada estação, considerando os parâmetros: turbidez e a cor. Da mesma maneira, a avaliação de desempenho por porte da estação de tratamento será efetuada por meio de testes de hipóteses não paramétricos (Kruskal-Wallis, seguido de teste de comparações múltiplas), que analisam múltiplas amostras independentes.

Para definir se uma dada estação atenderia a uma cidade de pequeno, de médio ou de grande porte, lançou-se mão da referência de classificação adotada pelo IBGE para o referido fim, a saber:

- Municípios de pequeno porte: até 50.000 habitantes;
- Municípios de médio porte: de 50.001 a 100.000 habitantes;
- Município de grande porte: acima de 100.001 habitantes.

A fim de determinar a vazão máxima requerida pelo município e, assim, classificar a estação de tratamento de água quanto ao porte, utilizou-se como base a equação abaixo:

$$Q = \frac{P \cdot q_m \cdot K_1 \cdot K_2}{86400} \quad (1)$$

Onde:

Q = Vazão máxima (l/s);

P = População a ser abastecida;

q_m = Consumo per-capita (l /hab.dia);

K_1 = Coeficiente de máxima vazão diária;

K_2 = Coeficiente de máxima vazão horária;

Quanto ao consumo *per capita*, adotou-se o valor de 200 L/hab x dia, o qual é recomendado em Di Bernardo e Sabogal (2008). Os coeficientes adimensionais K_1 e K_2 seguiram valores amplamente adotados em bibliografias referentes ao tema, para quando não há uma série de dados disponíveis para o seu cálculo, sendo 1,2 e 1,5, respectivamente. Assim, têm-se as seguintes vazões máximas aproximadas para os três portes em questão:

- Municípios de pequeno porte: até 85 L/s;
- Municípios de médio porte: de 86 até 210 L/s;
- Município de grande porte: acima de 211 L/s.

4.4.2 Avaliação do atendimento a padrões e metas de qualidade para a água tratada

Nesta etapa será verificado o atendimento às metas dos parâmetros (turbidez, cor, residual de cloro e flúor) referentes à Portaria 2914/2011. O parâmetro turbidez foi analisado mais

detalhadamente, avaliando o atendimento às metas de diversos meios legais balizadores, sendo eles: a OMS, a USEPA e a Portaria 2914/2011, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Padrões estabelecidos pela Portaria 2914/2011

Parâmetro	Padrão	Referência
<i>Turbidez da água filtrada</i>		
Turbidez da água filtrada por filtração direta	0,5 uT em 95 % das amostras ¹	Art. 30; § 2º
Recomendação para a Turbidez da água filtrada por filtração (quando a média aritmética da concentração de oocistos de <i>Cryptosporidium</i> spp. for maior ou igual a 3,0 oocistos/L no(s) ponto(s) de captação de água)	0,3 uT em 95 % das amostras mensais	Art. 31; § 2º
Turbidez da água filtrada por filtração	1,0 uT para qualquer amostra pontual dentre os 5% das amostras que podem ultrapassar o VMP no Art. 30; § 2º	Art. 31; § 3º

¹ A portaria estabelece metas progressivas: 25% no primeiro ano, 50% no segundo ano, 75% no terceiro ano e 95% no quarto ano após a promulgação.

Salienta-se que a referida portaria (2914/2011) leva em conta as metas progressivas estabelecidas por meio do cálculo dos percentuais de atendimento à turbidez, também apresentados na Tabela 4.2.

4.4.3 Análise de confiabilidade das estações de tratamento

A análise de confiabilidade será efetuada considerando as porcentagens de atendimento esperado aos padrões estabelecidos pela Portaria 2914/2011, OMS e USEPA para turbidez, ou seja, 0,1; 0,3, 0,5, 1,0 e 5,0 uT, e ao padrão de 15 uH para cor.

O coeficiente de confiabilidade relaciona valores das concentrações efluentes médias ao padrão a ser alcançado, em uma base probabilística. Se, por exemplo, um padrão de 0,5 uT deve ser cumprido em 90% do tempo, o processo deve ser projetado e operado para alcançar uma concentração média efluente tal que, mesmo com a variabilidade presente, este percentual seja alcançado. O valor médio do constituinte, m_x , poderá ser obtido a partir da equação:

$$m_x = (\text{CDC}) X_s \quad (2)$$

Onde

m_x = concentração média do constituinte;

X_s = meta de qualidade ou padrão fixado por alguma legislação ou norma;

CDC= coeficiente de confiabilidade.

O coeficiente de confiabilidade (CDC) é calculado a partir da seguinte equação:

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

Onde

CV = coeficiente de variação (desvio padrão dividido pela média da distribuição existente)

$Z_{1-\alpha}$ = variável normal central reduzida correspondente à probabilidade de não excedência (1- α)

Assim, serão calculados os valores dos coeficientes de confiabilidade (CDC) para todas as ETAs analisadas e, com os resultados obtidos, será possível a determinação dos valores de projeto de turbidez efluente que serão necessários para o alcance de vários padrões especificados. A equação (1) será utilizada para o cálculo das concentrações.

O estudo de confiabilidade foi desenvolvido para dados distribuídos segundo um modelo lognormal, sendo necessário, portanto, verificar a distribuição de frequência dos dados de turbidez efluente, antes da aplicação do modelo. Os coeficientes de assimetria e curtose foram utilizados para uma verificação preliminar da normalidade dos dados efluentes das ETAs, como sugerido por Helsel e Hirsch (1992) e, posteriormente, a distribuição de frequência dos dados foi verificada por meio da execução do teste de aderência do Qui-Quadrado e do teste gráfico “Probability-Probability Plot”, executados pelo pacote estatístico Statistica 6.1 (STATSOFT, INC., 2003).

Outra etapa consistiu no cálculo do percentual esperado de atendimento a alguns padrões de potabilidade, partindo dos valores de turbidez efluente e CV das diversas ETAs. Para isto foi utilizada a equação (4) proposta por Niku *et al.* (1979), mostrada na equação (3):

$$Z_{1-\alpha} = \frac{\ln X_s - \left[\ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln(1 + CV^2_x) \right]}{\sqrt{\ln(1 + CV^2_x)}} \quad (4)$$

De posse dos valores de (1- α) resultantes foram obtidos os valores correspondentes à probabilidade cumulativa da distribuição normal padronizada (distribuição Z). Estes valores foram determinados por meio da função DIST.NORMP do Excel, mas são facilmente

encontrados em livros texto de estatística (exemplo: Snedecor e Cochran, 1989, Lapponi, 2005). Estes valores, correspondentes à área subentendida pela curva normal central reduzida, são equivalentes ao percentual de atendimento alcançado.

A etapa de validação do modelo de confiabilidade consistirá da comparação entre os percentuais de atendimento esperado e os percentuais de atendimentos efetivamente obtidos pelas ETAs.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Levantamento dos dados

Conforme explicado no item metodologia, os dados analisados no presente capítulo são relativos aos parâmetros turbidez, cor aparente, concentrações de cloro e flúor residuais, pH e coliformes totais, tanto para água bruta quanto para água tratada. Também foi feita a distinção entre períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso. O nome das estações de tratamento, o período de monitoramento, que se deu entre 2001 e 2011, e o número de dados analisados por parâmetro e por ETA, cerca de 116 mil no total, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Estações de tratamento analisadas, período de monitoramento e número de dados de cada parâmetro avaliado

Nome da estação	Período de monitoramento	Vazão (L/s)	pH	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	Cloro livre (mg/L)	Flúor (mg/L)	Colimetria (UFC/100mL)
ETA A	01/01 a 12/11	132	5065	6349	6367	3215	3242	3013
ETA B	01/03 a 12/11	2091	4192	4199	4188	2100	2098	-
ETA C	05/11 a 12/11	144	2176	4351	4327	2177	2174	1162
ETA D	01/01 a 09/11	127	6641	6642	6564	3325	3308	398
ETA E	01/01 a 09/11	127	3450	3450	3450	1751	1751	-
ETA F	01/01 a 07/11	127	1763	3530	3527	1765	1764	-
TOTAL	116.222	2.748	23.287	28.521	28.423	14.333	14.337	4.573

A frequência de monitoramento foi variável e se deu em função de cada parâmetro analisado, sendo que sua medição ocorreu em frequências diferentes, a saber: diariamente, duas vezes por semana, três vezes por semana, semanalmente e, por fim, mensalmente.

5.2 Tratamento estatístico preliminar

No que se refere ao tratamento estatístico preliminar, efetuou-se a verificação da presença de *outliers* e, como resultado, viu-se que a grande maioria dos parâmetros apresentou valores considerados extremos. Um breve resumo da análise de *outliers* é apresentado junto das estatísticas descritivas, discriminadas por tecnologia de tratamento na sequência.

Cabe destacar que a maior proporção de valores extremos foi verificada para a ETA C, o parâmetro residual de cloro, atingiu 16%. Já as estações ETA E e ETA F obtiveram as menores proporções, permanecendo abaixo de 2% para os parâmetros considerados. Com

base nas proporções de dados excluídos pode-se afirmar que os resultados da avaliação de desempenho não serão afetados de forma prejudicial.

Na análise estática, a remoção de *outliers* reduz a incidência de indicadores com desempenho aquém das metas, já que se trata de uma comparação direta entre valores observados e estabelecidos.

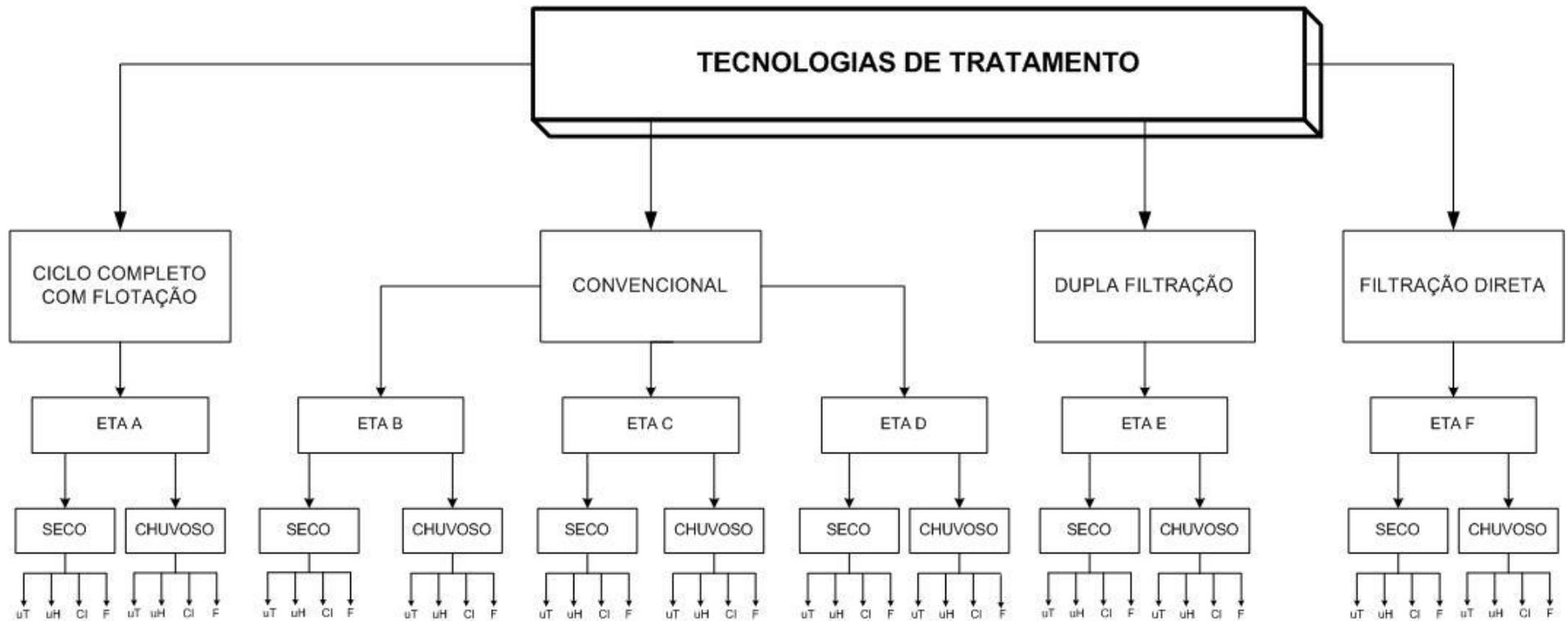
Conforme já explicitado anteriormente os *outliers* dos dados de turbidez e cor não foram avaliados nem tanto excluídos das análises, uma vez que não foi comprovada a sua inconsistência ou improbabilidade de ocorrência, sendo possível que eles representassem a influência da sazonalidade na qualidade da água.

Após a verificação de *outliers*, procedeu-se a análise da sazonalidade descrita na Metodologia, e na sequência a estatística descritiva já contemplou os dados relativos aos períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso separadamente.

A estatística descritiva de todos os dados mencionados na Tabela 5.1 é efetuada com maior nível de detalhamento no item seguinte. O fluxograma apresentado na Figura 5.1 mostra a estrutura de apresentação dos resultados, já identificando as ETAs e suas respectivas tecnologias de tratamento e os parâmetros analisados, considerando os períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Os testes de normalidade de Shapiro-Wilk aplicados a todos os parâmetros de qualidade em ambos os períodos para todas as ETAs; mostrou que nenhum desses dados apresentou aderência à distribuição normal (valor $p < 0,01$) ao nível (α) de 5 % de significância (Apêndice 2 e 3). Estes resultados foram determinantes para a escolha dos testes estatísticos empregados na avaliação de desempenho das ETAs.

Figura 5.1 – Fluxograma da estrutura de apresentação dos resultados de estatísticas descritivas



uT = Unidade de Turbidez; uH = Unidade de cor; Cl = Cloro e F = Flúor

5.2.1 CICLO COMPLETO COM FLOTAÇÃO

A Tabela 5.3 e a Tabela 5.4 apresenta as estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade das águas bruta e tratada, nos períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso para a ETA A que utiliza a tecnologia de tratamento de ciclo completo com flotação.

Com auxílio das estatísticas descritivas (percentil 25% e percentil 75%, valores mínimo e máximo) foi verificada a existência de *outliers*, resultados esses que podem ser conferidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - *Outliers* identificados na ETA que utiliza a tecnologia de tratamento ciclo completo com flotação

ETA	Estatística	Número de <i>outliers</i>		
		Cloro livre	Fluoreto	pH
ETA A	Limite mínimo	172	29	40
	Limite máximo	167	132	34
	Total	339	161	74
	Percentual	11%	4,5%	2,3%

A análise dos dados de turbidez e cor da água bruta da tecnologia de ciclo completo com flotação, utilizada na ETA A, demonstra que a escolha de tecnologia está coerente com os valores recomendados na Tabela 3.1, usados para a escolha da melhor tecnologia de tratamento em função dos parâmetros de água bruta.

Para os valores de cor na água tratada, as tendências observadas são muito similares nos períodos predominantemente secos e predominantemente chuvosos. Praticamente em 100% das amostras os índices-referência (menores que 15 uH) foram alcançados.

Por meio da Tabela 5.3 e da Tabela 5.4, percebe-se que o limite máximo de 1,5 mg/L estabelecido pela Portaria 2914/2011 para o parâmetro flúor não é respeitado no período predominantemente chuvoso (máximo igual a 1,54 mg/L). Já o valor preconizado por essa Portaria, de 1,0 mg/L, não é respeitado nem no período predominantemente seco nem no período predominantemente chuvoso (máximos iguais a 1,18 e 1,54 mg/L). Se a avaliação for baseada na média e/ou na mediana, o valor recomendado pela Portaria em questão é atendido.

Tabela 5.3 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA A - período predominantemente seco

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	91	1.214	2.183	2.083	2.193	2.096	2.183	2.180	2.189	679	1.317
Média	1.551	6,72	7,42	2,87	0,92	12,26	3,90	1,72	0,77	1,12E+03	3,42E-03
Mediana	1.553	6,68	7,45	2,37	0,80	11,88	2,75	1,80	0,77	5,00E+02	0,00E+00
Mínimo	1.060	5,51	5,23	0,97	0,01	3,58	0,98	0,04	0,35	1,80E+00	0,00E+00
Máximo	2.072	9,25	9,00	14,45	3,05	38,17	15,64	2,30	1,18	9,61E+03	2,50E+00
Percentil 10%	1.216	6,13	7,08	1,55	0,47	7,69	1	1,68	0,69	2,58E+01	0,00E+00
Percentil 25%	1.330	6,40	7,25	1,84	0,63	9,42	1,04	1,75	0,72	1,18E+02	0,00E+00
Percentil 75%	1.759	7,10	7,61	3,14	1,15	15,00	5,92	1,84	0,81	2,40E+03	0,00E+00
Percentil 90%	1.885	7,32	7,74	4,26	1,61	17,35	9,42	1,90	0,86	2,42E+03	0,00E+00
DP ¹	258	0,47	0,30	1,87	0,48	3,84	3,31	0,37	0,08	1,31E+03	8,82E-02
CV ²	0,17	0,07	0,04	0,65	0,52	0,31	0,85	0,22	0,11	1,17E+00	2,58E+01

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.4 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA A - período predominantemente chuvoso

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	41	615	1.054	1.019	1.054	1.034	1.054	1.035	1.053	334	683
Média	1.508	6,52	7,42	3,38	1,03	13,21	4,09	1,77	0,78	9,97E+02	3,61E-01
Mediana	1.503	6,54	7,44	2,78	0,92	13,38	3,00	1,80	0,77	3,00E+02	0,00E+00
Mínimo	1.041	5,32	5,50	0,97	0,01	2,39	1,00	0,07	0,52	1,00E+00	0,00E+00
Máximo	1.869	7,78	9,23	16,70	3,88	43,00	15,75	2,40	1,54	6,59E+03	2,40E+02
Percentil 10%	1.267	5,91	7,03	1,64	0,54	7,59	1	1,70	0,69	1,10E+01	0,00E+00
Percentil 25%	1.398	6,23	7,22	1,98	0,68	9,34	1,08	1,75	0,73	3,23E+01	0,00E+00
Percentil 75%	1.676	6,85	7,61	3,74	1,36	16,21	6,07	1,85	0,81	2,40E+03	0,00E+00
Percentil 90%	1.730	7,11	7,74	5,59	1,76	18,99	9,81	1,95	0,87	2,42E+03	0,00E+00
DP ¹	200	0,45	0,32	2,27	0,52	4,52	3,38	0,32	0,09	1,15E+03	9,18E+00
CV ²	0,13	0,07	0,04	0,67	0,50	0,34	0,83	0,18	0,12	1,16E+00	2,54E+01

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

5.2.2 CONVENCIONAL

As estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade das águas bruta e tratada das ETAs que adotam a tecnologia de tratamento convencional do estudo (ETA B, ETA C e ETA D) são apresentadas na Tabela 5.6 a Tabela 5.11.

Com auxílio das estatísticas descritivas (percentil 25% e percentil 75%, valores mínimo e máximo) foi verificada a existência de *outliers*, resultados esses que podem ser conferidos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – *Outliers* identificados nas ETAs que utilizam a tecnologia de tratamento convencional

ETA	Estatística	Número de <i>outliers</i>		
		Cloro	Flúor	pH
ETA B	Limite mínimo	25	61	39
	Limite máximo	59	61	40
	Total	84	122	79
	Percentual	4,0%	5,8%	3,8%
ETA C	Limite mínimo	4	19	2
	Limite máximo	343	18	16
	Total	347	37	18
	Percentual	16%	1,7%	0,83%
ETA D	Limite mínimo	20	52	54
	Limite máximo	108	56	42
	Total	128	108	96
	Percentual	3,8%	3,3%	2,9%

Salienta-se que a ETA C, a cerca do parâmetro cloro obteve o maior número de *outliers* atingindo o valor percentual de 16.

Pode-se observar o reduzido número de dados de vazão, pois esse parâmetro foi analisado com frequência mensal. A exceção é referente à ETA B, a qual apresenta um elevado número de dados, o que aumenta bastante a confiabilidade das análises a serem efetuadas.

Tabela 5.6 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA B - período predominantemente seco

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	1420	1.420	1.425	1.425	1.426	1.419	1.426	1.426	1424	0	0
Média	102	5,67	7,35	11,51	0,50	16,86	1,06	1,27	0,81	-	-
Mediana	101	5,70	7,34	4,87	0,47	13,29	1,00	1,26	0,80	-	-
Mínimo	45	4,92	6,00	2,00	0,21	2,00	0,93	0,89	0,20	-	-
Máximo	170	9,53	9,55	1063,14	3,48	453,20	4,90	1,76	1,11	-	-
Percentil 10%	89	5,39	7,05	2,65	0,33	5,00	1,00	1,21	0,76	-	-
Percentil 25%	94	5,53	7,20	3,46	0,39	7,14	1,00	1,23	0,78	-	-
Percentil 75%	109	5,79	7,47	7,74	0,56	19,33	1,00	1,30	0,83	-	-
Percentil 90%	114	5,87	7,61	15,74	0,67	28,46	1,17	1,35	0,87	-	-
DP ¹	12	0,25	0,29	41,91	0,20	22,75	0,22	0,07	0,06	-	-
CV ²	0,12	0,04	0,04	3,64	0,41	1,35	0,21	0,06	0,07	-	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.7 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA B – período predominantemente chuvoso

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	671	673	674	674	674	669	674	674	674	-	-
Média	98	5,62	7,30	46,35	0,70	38,74	1,29	1,26	0,79	-	-
Mediana	98	5,63	7,33	16,53	0,61	27,33	1,00	1,26	0,79	-	-
Mínimo	40	5,12	6,00	2,97	0,17	3,50	1,00	0,66	0,50	-	-
Máximo	143	7,36	8,03	1338,00	2,42	570,00	5,30	1,80	1,11	-	-
Percentil 10%	86	5,33	7,04	5,77	0,39	14,70	1	1,21	0,72	-	-
Percentil 25%	91	5,46	7,18	8,52	0,48	20,00	1,00	1,23	0,77	-	-
Percentil 75%	105	5,77	7,45	43,16	0,80	41,67	1,33	1,30	0,82	-	-
Percentil 90%	111	5,88	7,57	101,55	1,08	75,00	1,92	1,34	0,86	-	-
DP ¹	11	0,21	0,27	99,57	0,34	41,81	0,53	0,07	0,06	-	-
CV ²	0,12	0,04	0,04	2,15	0,49	1,08	0,41	0,05	0,08	-	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.8 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA C - período predominantemente seco

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	100	0	1.462	1.461	1.462	1.453	1.452	1.462	1.461	58	679
Média	30	-	7,09	2,65	0,43	6,34	1,02	1,45	0,80	0,00E+00	2,95E-03
Mediana	34	-	7,07	0,91	0,41	3,00	1,00	1,38	0,80	0,00E+00	0,00E+00
Mínimo	0	-	5,29	0,21	0,18	1,00	1,00	0,72	0,60	0,00E+00	0,00E+00
Máximo	54	-	8,62	18,92	1,17	39,00	6,00	2,00	0,97	0,00E+00	2,00E+00
Percentil 10%	0	-	6,60	0,68	0,29	2,00	1	1,27	0,74	0,00E+00	0,00E+00
Percentil 25%	19	-	6,81	0,77	0,33	3,00	1,00	1,30	0,77	0,00E+00	0,00E+00
Percentil 75%	46	-	7,34	1,97	0,50	7,00	1,00	1,60	0,83	0,00E+00	0,00E+00
Percentil 90%	51	-	7,61	8,44	0,59	18,00	1,00	1,79	0,87	0,00E+00	0,00E+00
DP ¹	18	-	0,40	3,36	0,14	6,12	0,20	0,20	0,05	0,00E+00	7,68E-02
CV ²	0,6	-	0,06	1,27	0,32	0,97	0,19	0,14	0,06	0,00E+00	26,06

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.9 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA C - período predominantemente chuvoso

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	44	0	714	714	714	711	711	715	713	48	377
Média	35	-	7,02	2,56	0,46	6,63	1,02	1,39	0,80	0,00E+00	5,57E-02
Mediana	38	-	6,97	1,43	0,45	5,00	1,00	1,35	0,80	0,00E+00	0,00E+00
Mínimo	0	-	6,04	0,01	0,21	1,36	1,00	1,00	0,60	0,00E+00	0,00E+00
Máximo	53	-	8,66	27,70	1,50	31,00	4,50	2,00	0,95	0,00E+00	1,60E+01
Percentil 10%	0	-	6,57	0,88	0,31	3,00	1	1,27	0,74	0,00E+00	0,00E+00
Percentil 25%	27	-	6,76	1,03	0,36	3,00	1,00	1,30	0,77	0,00E+00	0,00E+00
Percentil 75%	51	-	7,25	2,57	0,53	8,00	1,00	1,40	0,83	0,00E+00	0,00E+00
Percentil 90%	53	-	7,52	6,25	0,62	13,20	1,00	1,50	0,86	0,00E+00	0,00E+00
DP ¹	18	-	0,38	3,01	0,14	4,95	0,16	0,15	0,05	0,00E+00	8,63E-01
CV ²	0,50	-	0,05	1,17	0,30	0,75	0,16	0,11	0,06		1,55E+01

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.10 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA D – período predominantemente seco

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	88	2.285	2.290	2.287	2.291	2.255	2.259	2.291	2.274	272	-
Média	31	5,84	7,73	7,76	0,72	19,86	2,35	1,32	0,81	1,57E+03	-
Mediana	31	5,81	7,72	5,15	0,61	17,33	2,08	1,31	0,80	1,73E+03	-
Mínimo	21	5,07	5,46	1,54	0,22	8,00	1,00	0,37	0,60	0,00E+00	-
Máximo	36	7,33	8,88	696,29	10,63	405,42	11,50	1,76	1,34	2,60E+03	-
Percentil 10%	27	5,63	7,44	3,42	0,40	10,17	2	1,23	0,76	1,70E+02	-
Percentil 25%	30	5,72	7,58	4,12	0,49	13,00	2,00	1,26	0,79	8,45E+02	-
Percentil 75%	32	5,95	7,88	7,04	0,77	20,67	2,75	1,38	0,83	2,42E+03	-
Percentil 90%	34	6,13	8,05	9,41	0,97	29,27	3,08	1,44	0,86	2,42E+03	-
DP ¹	3	0,25	0,26	23,86	0,79	17,67	0,93	0,11	0,04	9,15E+02	-
CV ²	0,09	0,04	0,03	3,08	1,09	0,89	0,40	0,08	0,05	5,83E-01	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.11 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA D – período predominantemente chuvoso

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	39	1.031	1.035	1.030	1.034	1.023	1.027	1.034	1.034	126	-
Média	31	5,85	7,72	19,39	1,02	39,68	3,38	1,42	0,81	1,81E+03	-
Mediana	31	5,84	7,70	8,03	0,86	25,67	2,92	1,40	0,81	2,40E+03	-
Mínimo	25	5,09	5,62	1,67	0,25	8,00	1,00	1,15	0,66	0,00E+00	-
Máximo	36	6,60	8,48	624,59	4,28	575,42	12,33	1,81	0,98	2,42E+03	-
Percentil 10%	28	5,57	7,47	4,29	0,53	15,00	2	1,26	0,77	2,70E+02	-
Percentil 25%	30	5,72	7,57	5,56	0,68	18,75	2,25	1,33	0,79	1,23E+03	-
Percentil 75%	32	5,96	7,85	13,97	1,15	42,50	3,83	1,49	0,84	2,42E+03	-
Percentil 90%	33	6,19	8,01	31,56	1,79	68,31	5,65	1,60	0,87	2,42E+03	-
DP ¹	2	0,24	0,23	46,94	0,55	49,02	1,75	0,13	0,04	8,65E+02	-
CV ²	0,07	0,04	0,03	2,42	0,54	1,24	0,52	0,09	0,05	4,79E-01	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Pela comparação dos valores amostrados com aqueles recomendados na Tabela 3.1, usados para a escolha da melhor tecnologia de tratamento em função dos parâmetros de água bruta, percebe-se a boa relação entre eles.

Para os valores de cor na água tratada, as tendências observadas são muito similares nos períodos predominantemente secos e predominantemente chuvosos. Em 100% das amostras os índices-referência (menores que 15 uH) foram alcançados.

Para as três ETAs de tecnologia convencional de tratamento, os coeficientes de variação (CV) dos residuais de cloro e de flúor apresentaram-se estáveis. Mais uma vez, a ETA C mostrou-se diferente das demais ETAs, visto que seu coeficiente de variação do parâmetro residual de cloro é o mais alto dentre as três estações em questão.

5.2.3 FILTRAÇÃO DIRETA

A Tabela 5.13 e a Tabela 5.14 apresentam as estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA E, com tecnologia de tratamento de filtração direta.

Com auxílio das estatísticas descritivas (percentil 25% e percentil 75%, valores mínimo e máximo) foi verificada a existência de *outliers*, resultados esses que podem ser conferidos na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - *Outliers* identificados na ETA que utilizam a tecnologia de tratamento de filtração direta

ETA	Estatística	Número de <i>outliers</i>		
		Cloro livre	Fluoreto	pH
ETA E	Limite mínimo	0	1	6
	Limite máximo	17	14	15
	Total	17	15	21
	Percentual	0,97%	0,86%	1,2%

A estatística descritiva apresentada na Tabela 5.13 e Tabela 5.14 denota variações pouco significativas no cloro livre, no flúor e no pH. No caso do cloro livre e do flúor, seus baixos coeficientes de variação podem ser justificados pelo fato de a adição destes elementos na dosagem adequada ser efetuada quando do tratamento.

O pH da água tratada manteve-se restrito ao intervalo de 6,64 a 7,80. Também houve pleno atendimento ao padrão de potabilidade o parâmetro fluoreto, com valor máximo de 1 mg/L.

Tabela 5.13 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA E – período predominantemente seco

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	87	1.171	1.220	1.171	1.220	1.171	1.220	1.220	1220	0	0
Média	3.946	6,83	7,21	7,87	0,69	17,72	1,45	1,60	0,79	-	-
Mediana	3.859	6,86	7,21	5,82	0,46	15,08	1,00	1,60	0,79	-	-
Mínimo	3.422	6,12	6,64	2,20	0,19	4,82	1,00	1,26	0,60	-	-
Máximo	4.571	7,46	7,80	32,80	5,85	50,67	14,33	2,34	0,99	-	-
Percentil 10%	3.487	6,52	7,01	3,56	0,33	9,58	1,00	1,42	0,71	-	-
Percentil 25%	3.617	6,68	7,10	4,41	0,38	10,58	1,00	1,50	0,75	-	-
Percentil 75%	4.302	6,99	7,32	9,84	0,62	22,92	1,00	1,69	0,83	-	-
Percentil 90%	4.387	7,11	7,41	14,48	1,18	30,33	1,33	1,76	0,87	-	-
DP ¹	358	0,23	0,16	5,08	0,71	8,47	1,86	0,14	0,06	-	-
CV ²	0,09	0,03	0,02	0,65	1,03	0,48	1,29	0,09	0,08	-	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.14 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA E - período predominantemente chuvoso

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	40	528	531	528	531	528	531	531	531	0	0
Média	3.952	6,66	7,15	12,00	0,73	24,12	1,21	1,64	0,79	-	-
Mediana	3.954	6,67	7,14	10,79	0,55	23,58	1,00	1,66	0,78	-	-
Mínimo	3.439	6,14	6,63	3,24	0,28	8,08	1,00	1,36	0,64	-	-
Máximo	4.430	7,38	7,74	35,95	5,78	49,92	12,08	2,44	1,00	-	-
Percentil 10%	3.577	6,41	6,95	5,24	0,36	12,60	1,00	1,49	0,72	-	-
Percentil 25%	3.745	6,54	7,04	7,93	0,43	17,75	1,00	1,57	0,74	-	-
Percentil 75%	4.171	6,78	7,26	15,10	0,78	30,42	1,00	1,72	0,82	-	-
Percentil 90%	4.238	6,89	7,36	20,22	1,26	36,22	1,33	1,76	0,86	-	-
DP ¹	276	0,19	0,17	5,70	0,57	8,55	0,92	0,11	0,06	-	-
CV ²	0,07	0,03	0,02	0,48	0,79	0,35	0,76	0,07	0,07	-	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

5.2.4 DUPLA FILTRAÇÃO

Na sequência são apresentadas as estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água, na Tabela 5.16, para a ETA F, que adota a tecnologia de dupla filtração.

Com auxílio das estatísticas descritivas (percentil 25% e percentil 75%, valores mínimo e máximo) foi verificada a existência de *outliers*, resultados esses que podem ser conferidos na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - *Outliers* identificados na ETA que utilizam a tecnologia de tratamento de dupla filtração

ETA	Estatística	Número de <i>outliers</i>		
		Cloro livre	Fluoreto	pH
ETA F	Limite mínimo	28	6	-
	Limite máximo	3	12	-
	Total	31	18	-
	Percentual	1,8%	1,0%	-

Observa-se o elevado número de dados, o que aumenta bastante a confiabilidade das análises a serem efetuadas. A exceção é para a vazão, pois este parâmetro foi analisado apenas mensalmente.

A partir da verificação da ausência dos registros do pH da água tratada, salienta-se que a falta de monitoramento deste dado pode gerar consequências como a elevação da turbidez caso o monitoramento ocorra na saída do tanque de contato, após a aplicação da cal secundária.

Analogamente às considerações efetuadas para as outras ETA, no que se refere aos coeficientes de variação para o cloro e para o flúor, seus baixos valores podem ser justificados pelo fato de a adição destes elementos na dosagem adequada ser efetuada quando do tratamento.

Em relação à cor aparente, a totalidade dos registros médios diários está abaixo do limite recomendado pela Portaria 2914/2011.

Tabela 5.16 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA F - período predominantemente seco

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	87	1.181	0	1.182	1.182	1.179	1.179	1.182	1181	-	-
Média	246	7,17	-	7,13	0,16	17,06	1,02	1,29	0,78	-	-
Mediana	233	7,16	-	6,31	0,15	14,67	1,00	1,29	0,77	-	-
Mínimo	137	6,87	-	3,15	0,01	0,18	1,00	0,78	0,48	-	-
Máximo	369	7,89	-	59,19	2,00	119,00	2,50	1,52	1,31	-	-
Percentil 10%	161	7,05	-	4,38	0,10	10,20	1,00	1,23	0,73	-	-
Percentil 25%	178	7,11	-	4,96	0,12	12,00	1,00	1,26	0,75	-	-
Percentil 75%	309	7,22	-	7,77	0,19	19,19	1,00	1,31	0,80	-	-
Percentil 90%	339	7,28	-	10,44	0,23	26,44	1,00	1,34	0,83	-	-
DP ¹	71	0,10	-	3,94	0,09	8,95	0,10	0,05	0,05	-	-
CV ²	0,29	0,01	-	0,55	0,56	0,52	0,10	0,04	0,06	-	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

Tabela 5.17 – Estatísticas descritivas da vazão e dos parâmetros de qualidade da água da ETA F - período predominantemente chuvoso

Estatística	Vazão	pH	pH	Turbidez	Turbidez	Cor aparente	Cor aparente	Cloro livre	Flúor	Colimetria AB	Colimetria AT
	AT (L/s)	AB ³	AT ⁴	AB (uT)	AT (uT)	AB (uH)	AT (uH)	AT (mg/L)	AT (mg/L)	(UFC/100mL)	(UFC/100mL)
Nº dados	40	582	0	583	583	583	583	583	583	-	-
Média	244	7,16	-	13,69	0,25	31,03	1,11	1,26	0,78	-	-
Mediana	266	7,16	-	11,24	0,21	27,20	1,00	1,26	0,78	-	-
Mínimo	138	6,70	-	3,30	0,08	6,91	1,00	1,08	0,39	-	-
Máximo	352	7,66	-	77,40	1,45	151,00	3,55	1,40	0,90	-	-
Percentil 10%	184	7,01	-	5,94	0,14	14,84	1,00	1,20	0,73	-	-
Percentil 25%	197	7,08	-	8,10	0,17	19,75	1,00	1,23	0,76	-	-
Percentil 75%	294	7,23	-	16,54	0,28	38,10	1,10	1,30	0,81	-	-
Percentil 90%	311	7,30	-	24,07	0,40	49,96	1,40	1,33	0,83	-	-
DP ¹	56	0,12	-	8,88	0,15	16,59	0,26	0,05	0,04	-	-
CV ²	0,23	0,02	-	0,65	0,58	0,53	0,24	0,04	0,05	-	-

DP¹: desvio-padrão; CV²: coeficiente de variação; AB³: água bruta; AT⁴: água tratada.

5.3 Avaliação de desempenho das ETAs

5.3.1 Avaliação de desempenho das estações de tratamento agrupadas por tecnologia de tratamento e porte

O estudo comparativo das tecnologias de tratamento adotadas foi embasado nos parâmetros comuns as seis ETAs: turbidez, cor aparente, residual de cloro e residual de flúor, na água tratada. A partir de testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, seguido de testes de comparações múltiplas, ao nível de significância de 5%, verificou-se a existência de diferenças significativas entre os parâmetros supracitados, em função do tipo de tecnologia de tratamento empregado.

Após a análise de desempenho das estações de tratamento agrupadas por tecnologia procedeu-se a avaliação individual de cada ETA, seguindo a mesma metodologia a fim de verificar o comportamento agrupado, isso aplicado aos parâmetros turbidez e cor.

A avaliação individual ainda foi utilizada como suporte para a avaliação da influência/consequência do porte em uma estação. A definição do porte de uma estação foi imposta a partir da metodologia já explanada; porém, a título de lembrança, as ETAs B, C e D são classificadas como pequeno porte; já a ETA F é de médio porte e as ETAs A e E de grande porte.

Vale ressaltar que para a avaliação dos parâmetros, turbidez e cor, foram utilizados os dados tanto da água bruta como da água tratada a fim de verificar se os possíveis desempenhos diferenciados justificavam-se pela qualidade da água bruta.

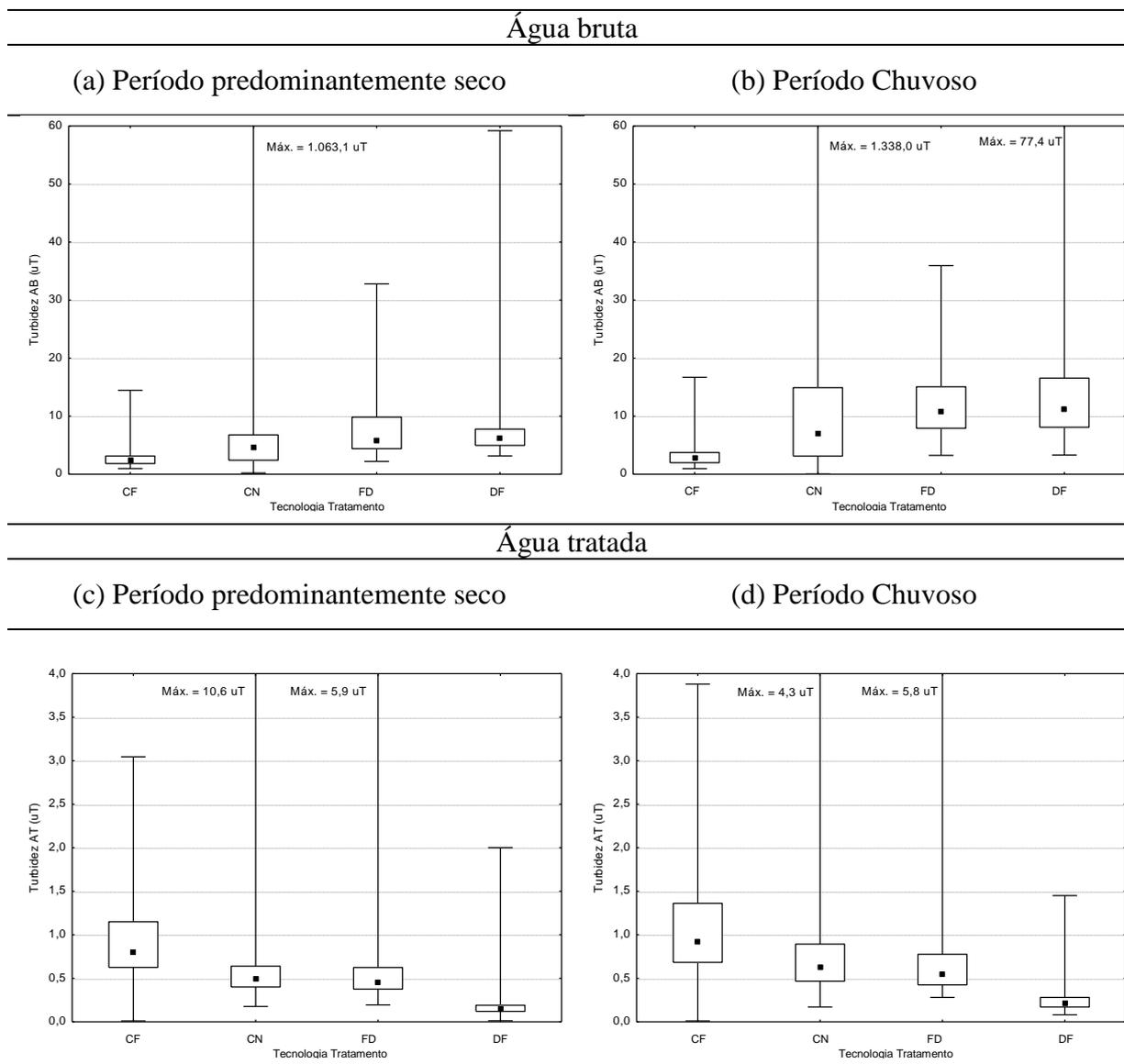
Ainda neste item serão verificadas as eficiências de remoção dos parâmetros - turbidez e cor - durante o tratamento. As eficiências serão apresentadas em tabelas. Destaca-se que os resultados serão apresentados por parâmetro.

5.3.1.1 Turbidez

As diferenças significativas entre os valores de turbidez foram avaliadas entre os dados das ETAs agrupadas por tecnologia de tratamento, ou seja, ciclo completo com flotação, convencional, dupla filtração e filtração direta.

A Figura 5.2 apresenta os gráficos box-whisker dos valores de turbidez da água bruta e tratada, nos períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso, agrupados por tecnologia.

Figura 5.2 – Turbidez da água bruta por tecnologia de tratamento



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Com intuito de facilitar a interpretação dos resultados dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido dos testes de comparações múltiplas; foi elaborada a Figura 5.3, que mostra uma representação das diferenças significativas de cada tecnologia de tratamento (em **negrito**) em relação às demais (em *itálico*), para o parâmetro turbidez da água bruta e da água tratada no período predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Como esperado, existe uma elevação da turbidez no período predominantemente chuvoso, principalmente na água bruta. As diferenças significativas foram avaliadas entre os dados de turbidez das ETAs agrupadas por tecnologia de tratamento, ou seja, ciclo completo com flotação, convencional, dupla filtração e filtração direta.

Figura 5.3 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em negrito) em relação às mesmas (em itálico), para o parâmetro turbidez

Água bruta				
(a) Período predominantemente seco		(b) Período predominantemente chuvoso		
CF	CN	FD	DF	
↓	↑	↑	↑	<i>CF</i>
↓	↓	↑	↑	<i>CN</i>
↓	↓	=	=	<i>FD</i>
↓	↓	=	=	<i>DF</i>
Água tratada				
(c) Período predominantemente seco		(d) Período predominantemente chuvoso		
CF	CN	FD	DF	
↑	↓	↓	↓	<i>CF</i>
↑	=	=	↓	<i>CN</i>
↑	↑	=	↓	<i>FD</i>
↑	↑	↑	=	<i>DF</i>

CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Legenda: ↑ Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/superior à estação em itálico (coluna à direita)
 ↓ Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/inferior à estação em itálico (coluna à direita)
 = Estação em negrito (acima) sem diferenças significativas em relação à estação em itálico (à direita)

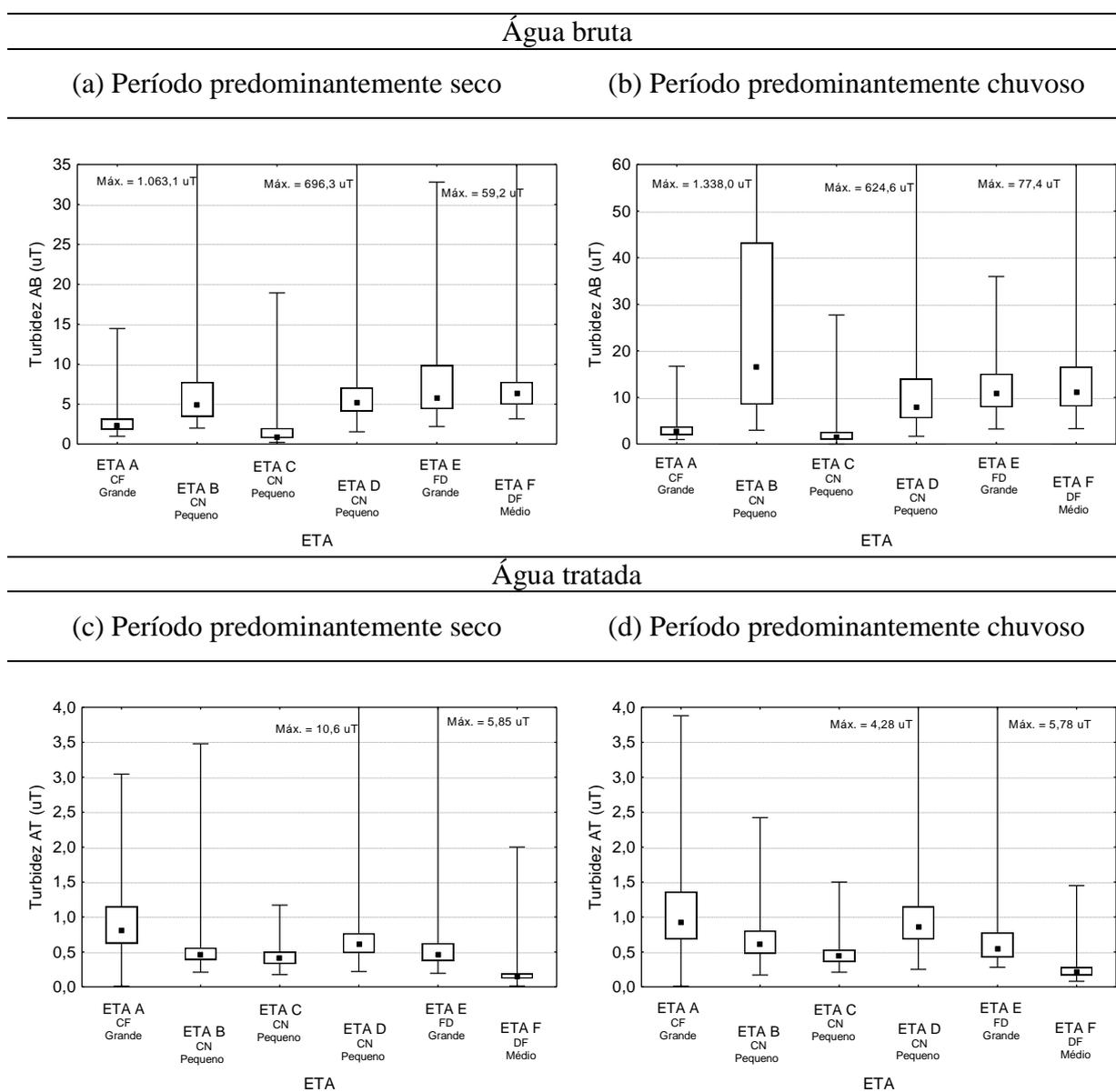
Ainda na análise dos gráficos da Figura 5.2, percebe-se que nas amostras de água tratada no período predominantemente seco, quadros comparativo (c), a turbidez apresenta uma tendência central (ora verificado por sua mediana) próxima ao valor estipulado como meta na Portaria 2914/2011, com valor fixado em 0,5 uT para a tecnologia convencional de tratamento.

Verifica-se ainda que a tecnologia de dupla filtração apresentou menores valores de turbidez remanescente em ambos os períodos apesar da turbidez da água bruta ser a maior também tanto no período predominantemente seco como no período predominantemente chuvoso, fato que comprova um bom desempenho da tecnologia.

A tecnologia de ciclo completo com flotação, contrapondo a tecnologia de dupla filtração, demonstra os maiores valores para a turbidez remanescente e os menores valores para a turbidez da água bruta, tal assertiva demonstra que o desempenho da tecnologia não é favorável. As tecnologias de tratamento convencional e de filtração direta se mantiveram em valores intermediários tanto nos valores de turbidez da água bruta como da água tratada.

Após a análise estatística agrupada por tecnologia de tratamento, procedeu-se à análise individual de cada ETA, uma vez que estações que adotam mesma tecnologia de tratamento podem apresentar desempenhos diferentes.

Figura 5.4 – Box-Whisker para a turbidez por unidade de tratamento



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

A título de lembrança, conforme apresentado na Tabela 4.1, as ETAs B, C e D, seguem a tecnologia de tratamento convencional; a ETA A é dotada de tecnologia de ciclo completo com flotação; a ETA E opera por filtração direta e a ETA F por dupla filtração. Na Figura 5.4 é apresentado o Box-Whisker da turbidez discriminada por estação de tratamento.

Com intuito de facilitar a interpretação dos resultados dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido dos testes de comparações múltiplas; foi elaborada a Figura 5.5, que mostra uma representação das diferenças significativas de cada ETA (em **negrito**) em relação às demais (em *itálico*), para o parâmetro turbidez da água bruta e da água tratada no período predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Figura 5.5 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada ETA (em **negrito**) em relação às demais (em *itálico*), para o parâmetro turbidez

Água bruta						
(a) Período predominantemente seco			(b) Período predominantemente chuvoso			
ETA A	ETA B	ETA C	ETA D	ETA E	ETA F	
↓	↑	↓	↑	↑	↑	<i>ETA A</i>
↑	↑	↓	=	↑	↑	<i>ETA B</i>
↓	=	↓	↑	↑	↑	<i>ETA C</i>
↓	↓	↓	↓	↑	↑	<i>ETA D</i>
↓	↓	↓	↓	=	=	<i>ETA E</i>
↓	↓	↓	↓	=	↓	<i>ETA F</i>
↓	↑	↓	↑	↑	↑	<i>ETA A</i>
↑	↑	↓	↓	↓	↓	<i>ETA B</i>
↑	↑	↓	↑	↑	↑	<i>ETA C</i>
↓	↑	↓	↓	↑	↑	<i>ETA D</i>
↓	↑	↓	↓	↓	=	<i>ETA E</i>
↓	↑	↓	↓	=	↓	<i>ETA F</i>
Água tratada						
(c) Período predominantemente seco			(d) Período predominantemente chuvoso			
ETA A	ETA B	ETA C	ETA D	ETA E	ETA F	
↑	↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA A</i>
↑	↑	↓	↑	=	↓	<i>ETA B</i>
↑	↑	↓	↑	↑	↓	<i>ETA C</i>
↑	↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA D</i>
↑	=	↓	↑	↓	↓	<i>ETA E</i>
↑	↑	↑	↑	↑	↓	<i>ETA F</i>
↑	↓	↓	=	↓	↓	<i>ETA A</i>
↑	↑	↓	↑	=	↓	<i>ETA B</i>
↑	↑	↓	↑	↑	↓	<i>ETA C</i>
=	↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA D</i>
↑	=	↓	↑	↓	↓	<i>ETA E</i>
↑	↑	↑	↑	↑	↓	<i>ETA F</i>

Legenda: ↑ Estação em **negrito** (acima) estatisticamente diferente/superior à estação em *itálico* (coluna à direita)
 ↓ Estação em **negrito** (acima) estatisticamente diferente/inferior à estação em *itálico* (coluna à direita)
 = Estação em **negrito** (acima) sem diferenças significativas em relação à estação em *itálico* (à direita)

Quando as estações de tratamento convencional são analisadas entre si para água bruta, percebe-se que há diferença significativa de turbidez entre as mesmas, com exceção da

ETA B em relação à ETA D em período predominantemente seco, conforme quadros comparativos (a) e (b) da Figura 5.5. A priori, era de se esperar que o parâmetro turbidez apresentasse valores próximos entre si, visto que a escolha de uma determinada tecnologia de tratamento a ser empregada na ETA também está intimamente ligada ao valor da turbidez do manancial. Porém, há de se lembrar de que é vasta a gama de valores para a qual a tecnologia de tratamento convencional pode operar.

Para a análise da água tratada, houve diferença entre todas as estações de tratamento convencional. Tal fato pode ser creditado às diferentes maneiras de operação que há em cada uma delas. Dentre as estações que utilizam a tecnologia de tratamento convencional à que possui os menores valores de turbidez é a ETA D, porém isso não quer dizer que esta tenha o melhor desempenho logo que possui os menores valores de turbidez na água bruta.

Cabe salientar que a água de menor turbidez dentre todas as estações é referente à tecnologia de tratamento de dupla filtração em ambos os períodos, o que é coerente com a análise estatística agrupada. A partir dessa análise verificamos que a ETA F, dotada da tecnologia de tratamento de dupla filtração é a que possui melhor desempenho com relação à remoção de turbidez.

Da análise individual de cada ETA ainda pode-se verificar a questão do porte da estação. Quando as estações de tratamento de pequeno porte são analisadas entre si para água tratada, percebe-se que há diferença significativa de turbidez entre as mesmas. Verifica-se o mesmo comportamento para a análise das ETAs de grande porte, conforme quadros comparativos (c) e (d) da Figura 5.5.

Por análise da Figura 5.4 verifica-se que a água tratada da ETA F de médio porte apresenta a menor turbidez em ambos os períodos, comportamento este que não condiz com o esperado. O comum seria que as estações de tratamento de água de grande porte tivessem um melhor desempenho. Este desempenho para as ETAs de grande porte seria justificado, na sua maioria, pelo fato delas possuírem sistemas automatizados, o que reduz a probabilidade de erros ou desvios na operação.

A cerca da eficiência das ETAs é apresentado na Tabela 5.18 um resumo de remoção do parâmetro turbidez. No que tange à eficiência das ETAs de tecnologia de tratamento convencional, as ETAs B e D possuem comportamento condizente com o esperado, ou seja, a eficiência de remoção de turbidez no período predominantemente chuvoso foi superior àquela

apresentada no período predominantemente seco. Já a ETA C mostrou um comportamento anômalo: a eficiência de remoção de turbidez no período predominantemente chuvoso foi inferior àquela apresentada no período predominantemente seco.

Tabela 5.18 – Tabela das eficiências de remoção de turbidez

Tecnologias de tratamento →	Ciclo completo com flotação	Convencional			Filtração Direta	Dupla Filtração
Porte →	Grande	Pequeno	Pequeno	Pequeno	Grande	Médio
ETA →	ETA A	ETA B	ETA C	ETA D	ETA E	ETA F
Turbidez média total	68,74%	97,07%	82,90%	92,73%	92,57%	97,96%
Turbidez média Período predominantemente seco	67,94%	95,66%	83,77%	90,72%	91,23%	97,76%
Turbidez média Período predominantemente chuvoso	69,53%	98,49%	82,03%	94,74%	93,92%	98,17%

Diferentemente do resultado verificado para as ETAs convencionais, a tecnologia de tratamento por meio de flotação seguida de filtração direta apresenta baixos valores de eficiência de remoção do parâmetro turbidez, mantendo-se em torno de 68%.

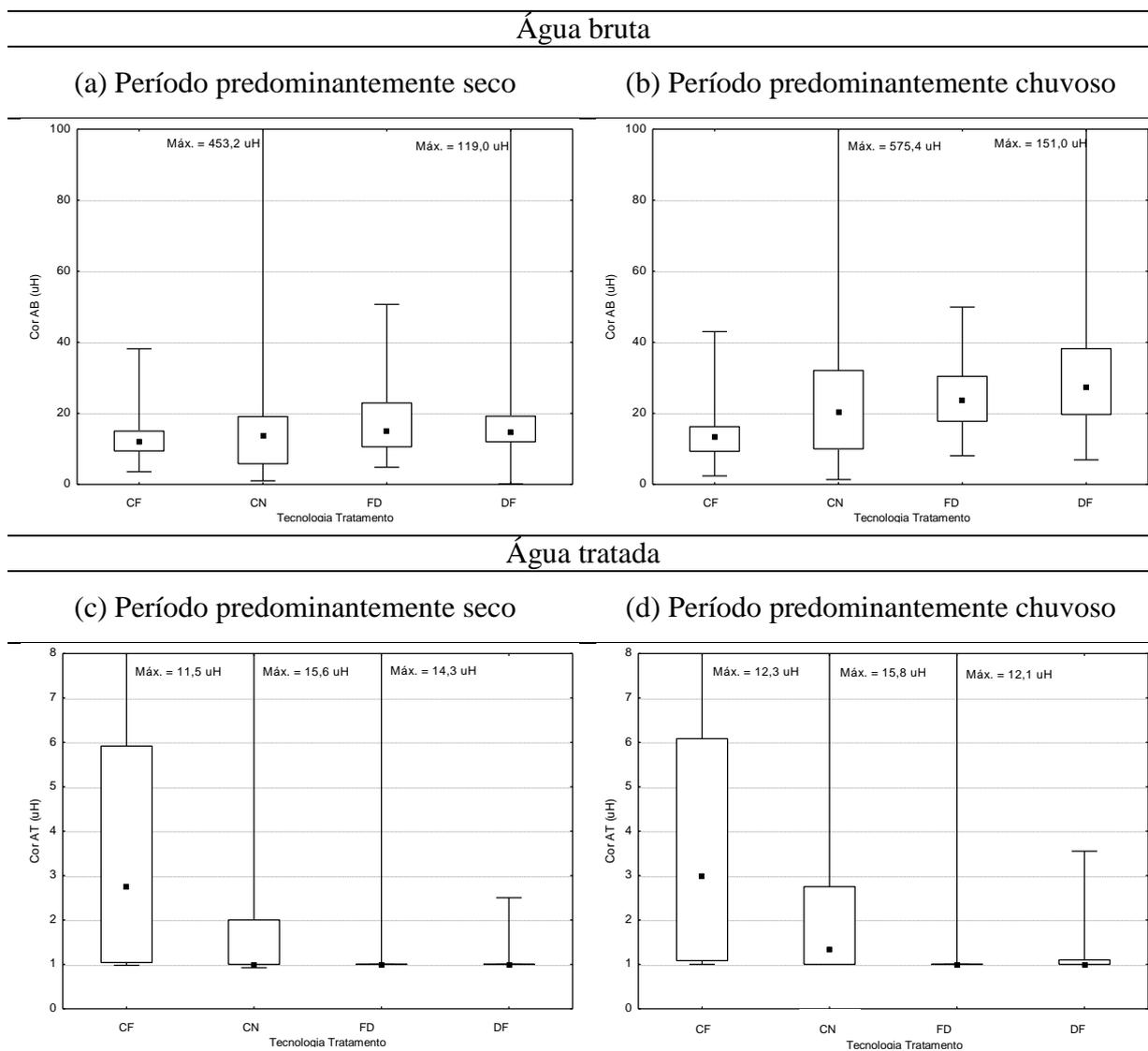
Nota-se que a tecnologia de filtração direta possui eficiência de remoção equivalente àquela encontrada na tecnologia de tratamento convencional. Da mesma forma que as estações de tratamento de água ETA B, ETA D e ETA A, a ETA E também apresentou eficiência de remoção de turbidez no período predominantemente chuvoso de valor superior ao apresentado no período predominantemente seco.

Assim como as ETAs de tecnologia convencional e de filtração direta tiveram um bom desempenho na remoção de partículas, a estação de tratamento de água de tecnologia de tratamento por dupla filtração - ETA F - manteve o mesmo padrão. Mais uma vez, mantendo-se a tendência observada para as ETAs das tecnologias supracitadas, a eficiência de remoção de turbidez no período predominantemente chuvoso foi superior à apresentada no período predominantemente seco.

5.3.1.2 Cor

A Figura 5.6 apresenta os gráficos box-whisker dos valores referentes a cor da água bruta e tratada, nos períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Figura 5.6 – Cor da água bruta por tecnologia de tratamento



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Para facilitar a interpretação dos resultados dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido dos testes de comparações múltiplas; foi elaborada a Figura 5.7, que mostra uma representação das diferenças significativas de cada tecnologia de tratamento (em **negrito**) em relação às demais (em *itálico*), para o parâmetro cor da água bruta e da água tratada no período predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Figura 5.7 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em negrito) em relação às mesmas (em itálico), para o parâmetro cor

Água bruta				
(a) Período predominantemente seco		(b) Período predominantemente chuvoso		
CF	CN	FD	DF	
↓	↑	↑	↑	<i>CF</i>
↓	↓	↑	↑	<i>CN</i>
↓	↓	=	=	<i>FD</i>
↓	↓	=	=	<i>DF</i>

Água tratada				
(c) Período predominantemente seco		(d) Período predominantemente chuvoso		
CF	CN	FD	DF	
↓	↓	↓	↓	<i>CF</i>
↑	↓	↓	↓	<i>CN</i>
↑	↑	=	=	<i>FD</i>
↑	↑	=	=	<i>DF</i>

CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Legenda: **↑** Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/superior à estação em itálico (coluna à direita)
↓ Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/inferior à estação em itálico (coluna à direita)
= Estação em negrito (acima) sem diferenças significativas em relação à estação em itálico (à direita)

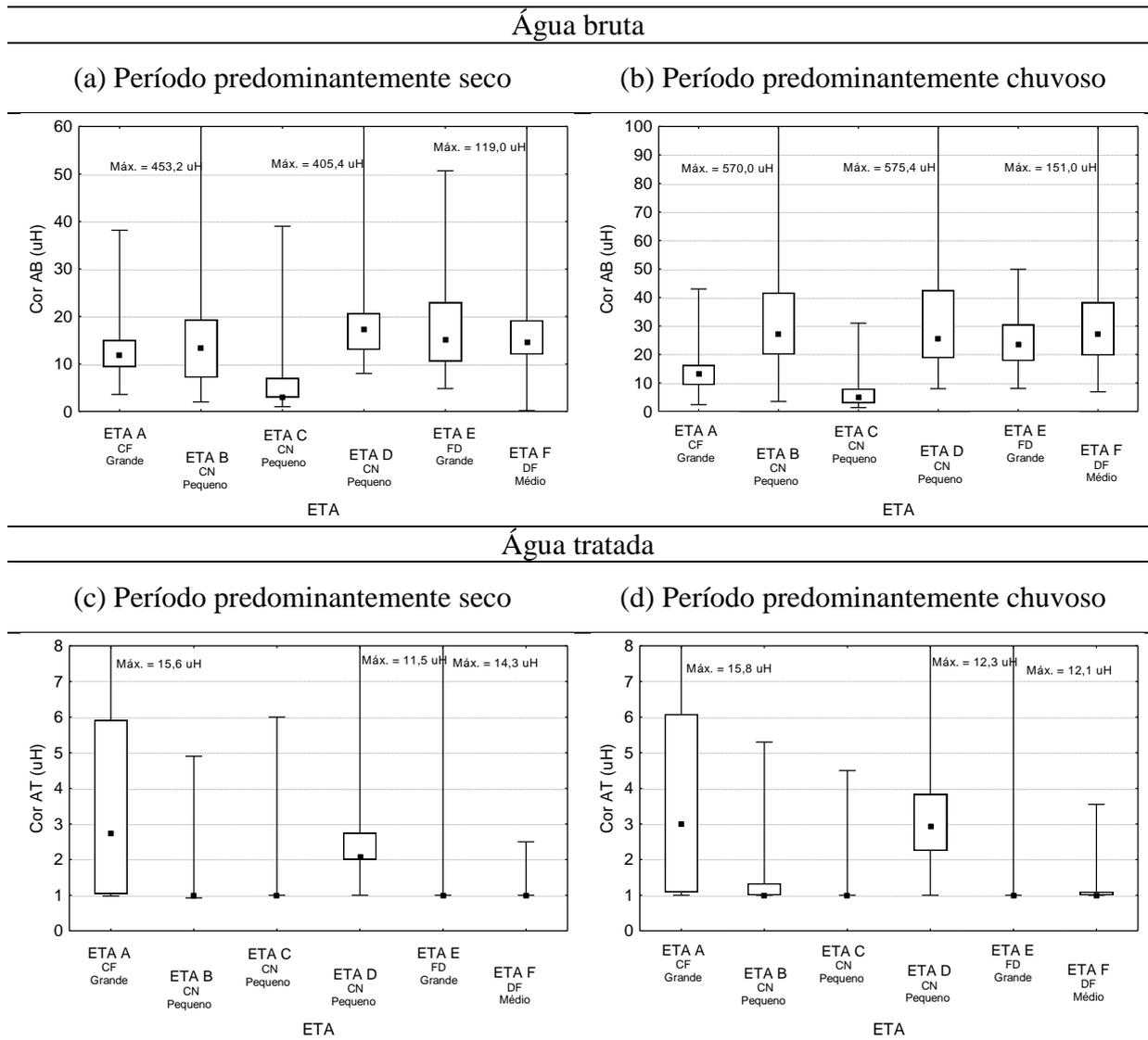
O período predominantemente chuvoso ocasionou a elevação dos valores de tendência central (mediana) para o parâmetro cor da água bruta em todas as tecnologias de tratamento e esse raciocínio pode ser estendido para os outros quartis. Essa alteração pode ser notada sensivelmente para todas as tecnologias de tratamento (com diferenças acima de 20%), exceto na flotação/filtração direta.

As medianas obtidas, na água tratada, foram inferiores a 3,5 uH em todas as tecnologias de tratamento e têm medidas próximas de 1,0 uH em três tipologias, exceção feita à flotação/filtração direta, em ambos períodos.

Destaca-se que as tecnologias de tratamento filtração direta e dupla filtração tiveram desempenho considerável e não possuem diferenças significativas entre essas.

Após a análise estatística agrupada por tecnologia de tratamento, procedeu-se à análise individual de cada ETA. Na Figura 5.8 é apresentado o Box-Whisker da cor, discriminado por estação de tratamento.

Figura 5.8 – Box-Whisker para a cor por unidade de tratamento, cor



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Com intuito de facilitar a interpretação dos resultados dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido dos testes de comparações múltiplas; foi elaborada a Figura 5.9, que mostra uma representação das diferenças significativas de cada ETA (em **negrito**) em relação às demais (em *itálico*), para o parâmetro cor da água bruta e da água tratada no período predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Figura 5.9 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada ETA (em negrito) em relação às demais (em itálico), para o parâmetro cor

Água bruta						
(a) Período predominantemente seco			(b) Período predominantemente chuvoso			
ETA A	ETA B	ETA C	ETA D	ETA E	ETA F	<i>ETA A</i>
↓	↑	↓	↑	↑	↑	<i>ETA B</i>
↑	↑	↓	↑	↑	↑	<i>ETA C</i>
↓	↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA D</i>
↓	↓	↓	↑	↓	=	<i>ETA E</i>
↓	↓	↓	↑	=	↓	<i>ETA F</i>

Água tratada						
(c) Período predominantemente seco			(d) Período predominantemente chuvoso			
ETA A	ETA B	ETA C	ETA D	ETA E	ETA F	<i>ETA A</i>
↑	↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA B</i>
↑	↑	↓	↑	↑	=	<i>ETA C</i>
↑	↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA D</i>
↑	=	↓	↑	↓	↓	<i>ETA E</i>
↑	↑	=	↑	↑	↓	<i>ETA F</i>

Legenda: ↑ Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/superior à estação em itálico (coluna à direita)
 ↓ Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/inferior à estação em itálico (coluna à direita)
 = Estação em negrito (acima) sem diferenças significativas em relação à estação em itálico (à direita)

Da mesma maneira que a turbidez, quando as estações de tratamento convencional são analisadas entre si para a água bruta, percebe-se que há diferença significativa de cor entre as mesmas, com exceção da ETA B em relação à ETA D em período predominantemente chuvoso, conforme quadros comparativos (a) e (b) da Figura 5.9. Cabe ressaltar que há uma faixa de valores para a qual a tecnologia de tratamento convencional pode operar.

Para a análise da água tratada, houve diferença entre todas as estações de tratamento convencional. Tal fato pode ser creditado às diferentes maneiras de operação que há em cada uma delas.

Cabe salientar que a água tratada das ETAs A (tecnologia de tratamento de ciclo completo com flotação) e D (tecnologia de tratamento convencional) em ambos os períodos foram as que tiveram maiores valores de cor remanescente. As demais ETAs tiveram ótimo desempenho

com valores de medianas e de valores máximos na casa 1,0 uH; valor esse que atende plenamente as metas exigidas pela Portaria 2914/2011.

No que tange o porte das estações verifica-se que quando as estações de tratamento de pequeno porte são analisadas entre si para a água tratada, percebe-se que há diferença significativa de cor entre as mesmas. O comportamento das estações de grande porte é similar e pode ser conferido a partir dos quadros comparativos (c) e (d) da Figura 5.9.

Também é possível verificar que o período predominantemente chuvoso ocasionou a elevação significativa dos valores de tendência central (mediana) para o parâmetro cor da água tratada para a ETA D que é de pequeno porte, as demais estações de tratamento se mantiveram com pequenas variações.

Cabe salientar que a água tratada das ETAs A (grande porte) e ETA D (pequeno porte) em ambos os períodos apresentou maiores valores de cor remanescente.

O resultado esperado seria um destaque das estações de grande porte, isso porque na grande maioria dos casos quando se trata de sistemas mais complexos a automatização e utilização de equipamentos de alta precisão tendem a ser comuns. Divergente desta ideia, os melhores resultados ocorreram no médio porte.

Na Tabela 5.19 são apresentadas as eficiências de remoção do parâmetro cor.

Tabela 5.19 – Tabela das eficiências de remoção de cor

Tecnologias de tratamento →	Ciclo completo com flotação	Convencional			Filtração Direta	Dupla Filtração
		Pequeno	Pequeno	Pequeno		
Porte →	Grande	Pequeno	Pequeno	Pequeno	Grande	Médio
ETA →	ETA A	ETA B	ETA C	ETA D	ETA A	ETA B
Cor média total	68,61%	95,19%	84,26%	89,82%	93,40%	95,22%
Cor média Período predominantemente seco	68,19%	93,71%	83,91%	88,17%	91,82%	94,02%
Cor média Período predominantemente chuvoso	69,04%	96,67%	84,62%	91,48%	94,98%	96,42%

A cerca da eficiência de remoção de cor das ETAs de tecnologia de tratamento convencional, todas as três estações de tratamento de água possuem comportamento condizente com o

esperado, ou seja, a eficiência de remoção de cor no período predominantemente chuvoso foi superior àquela apresentada no período predominantemente seco.

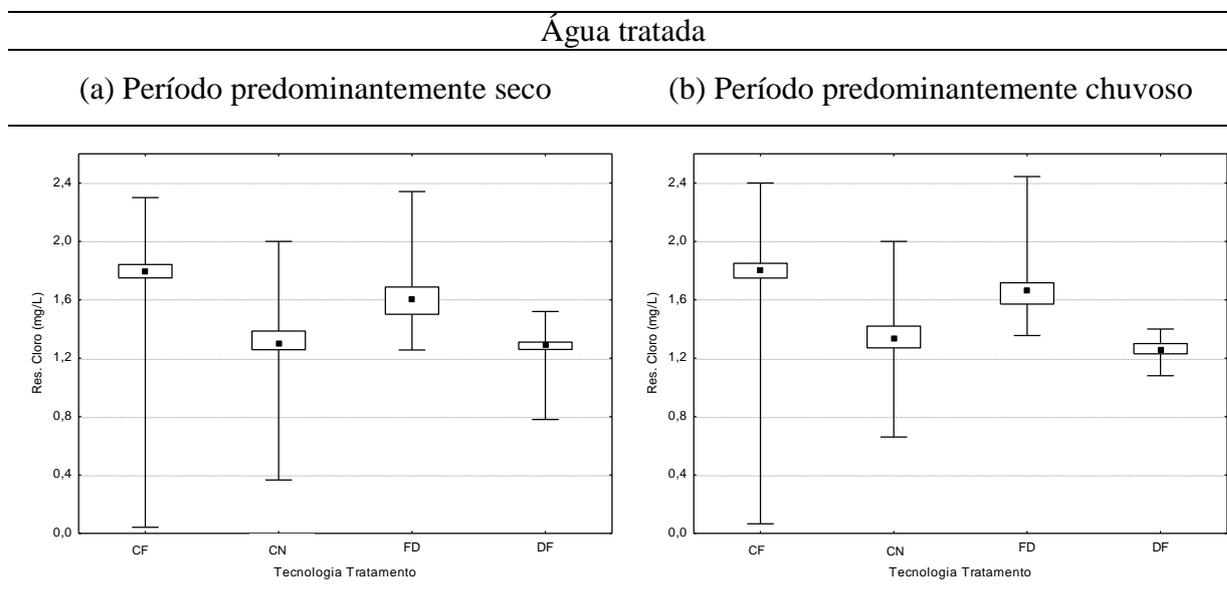
Diferentemente do resultado verificado para as ETAs convencionais, a tecnologia de tratamento por meio de flotação seguida de filtração direta apresenta baixos valores de eficiência de remoção do parâmetro cor, mantendo-se em torno de 68%. Comportamento esse que segue a mesma tendência para o parâmetro turbidez.

Percebe-se ainda que as tecnologias de filtração direta e dupla filtração possuem eficiências de remoção equivalente àquela encontrada na tecnologia de tratamento convencional. Igualmente às estações de tratamento de água ETA B, ETA C, ETA D e ETA A, as ETAs E e F também apresentou eficiência de remoção de cor no período predominantemente chuvoso de valor superior ao apresentado no período predominantemente seco.

5.3.1.3 Residual de cloro

A Figura 5.10 apresenta os gráficos box-whisker dos valores referentes ao residual de cloro da água tratada, nos períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Figura 5.10 – Residual de cloro na água tratada



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Visando facilitar a interpretação dos resultados dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido dos testes de comparações múltiplas; foi elaborada a Figura 5.11, que mostra uma representação das diferenças significativas de cada tecnologia de

tratamento (em negrito) em relação às demais (em itálico), para o parâmetro residual cloro da água tratada no período predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Figura 5.11 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em negrito) em relação às mesmas (em itálico), para o parâmetro residual de cloro

Água tratada				
(a) Período predominantemente seco		(b) Período predominantemente chuvoso		
CF	CN	FD	DF	
↓	↓	↓	↓	<i>CF</i>
↑	↓	↑	↓	<i>CN</i>
↑	↓	↓	↓	<i>FD</i>
↑	↑	↑	↓	<i>DF</i>

CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Legenda: ↑Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/superior à estação em itálico (coluna à direita)

↓Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/inferior à estação em itálico (coluna à direita)

= Estação em negrito (acima) sem diferenças significativas em relação à estação em itálico (à direita)

Para o parâmetro residual de cloro, observa-se, por análise do quadro da Figura 5.11, que todas as tecnologias de tratamento são significativamente diferentes entre si, tanto no período predominantemente seco quanto no período predominantemente chuvoso.

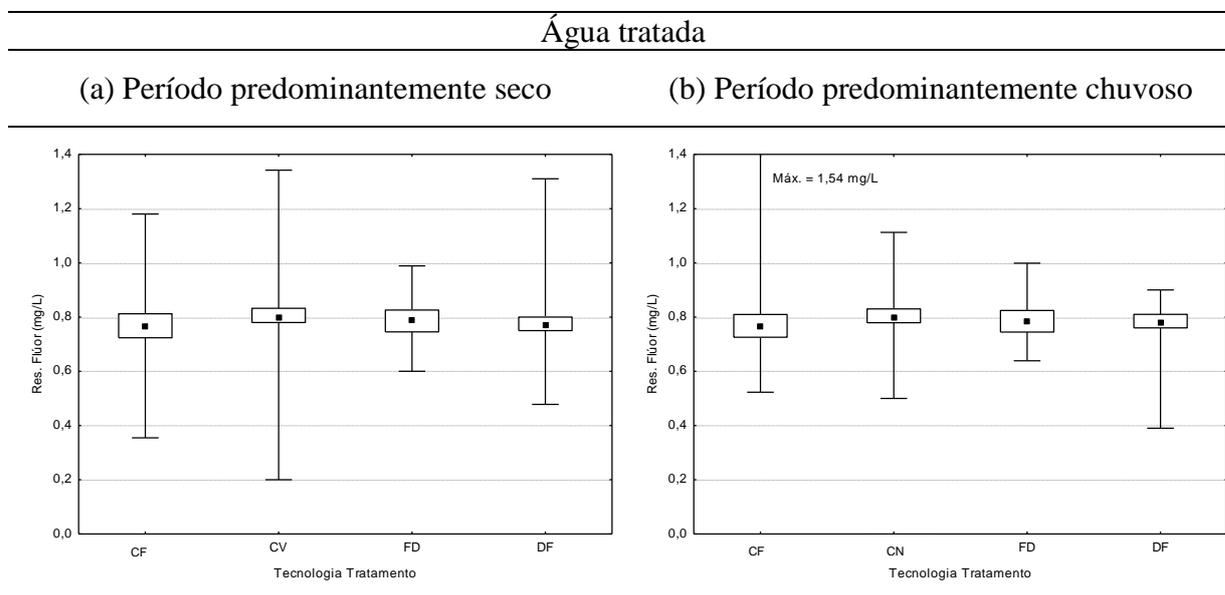
Os valores residuais de cloro na água tratada são muito próximos nos períodos predominantemente secos e predominantemente chuvosos. Comparando-se suas medianas, observa-se diferença percentual inferior a 15% em todos os tipos de tratamento. Observa-se também a maior dispersão no período predominantemente seco, principalmente em tratamento convencional e dupla filtração. Verificam-se também diferenças significativas entre os valores medianos nos dois períodos, com disparidades percentuais próximas a 50% (entre 1,25 e 1,8 mg.L⁻¹).

A Portaria 2914/2011 obriga a manutenção de residuais de cloro entre 0,2 e 2,0 mg/L na rede de distribuição e valores máximos de 5 mg/L. Com isso, é observada a melhor estabilidade para o tratamento convencional e para a dupla filtração, mantendo-se sempre dentro da faixa esperada.

5.3.1.4 Residual de flúor

A Figura 5.12 apresenta os gráficos box-whisker dos valores referentes ao residual de flúor da água tratada, nos períodos predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

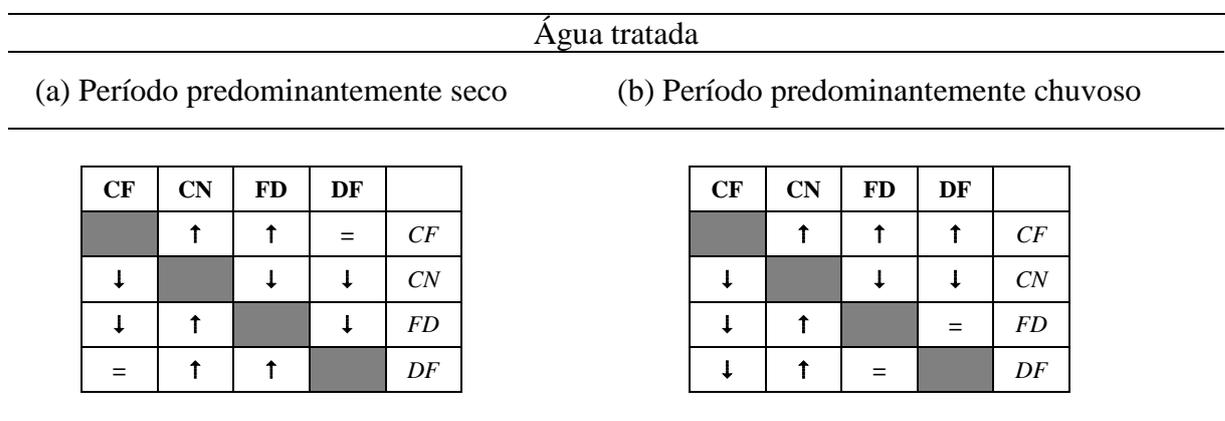
Figura 5.12 – Residual de flúor na água tratada



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Com intuito de facilitar a interpretação dos resultados dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido dos testes de comparações múltiplas; foi elaborada a Figura 5.13, que mostra uma representação das diferenças significativas de cada tecnologia de tratamento (em **negrito**) em relação às demais (em *itálico*), para o parâmetro residual flúor da água tratada no período predominantemente seco e predominantemente chuvoso.

Figura 5.13 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada tecnologia de tratamento (em **negrito**) em relação às mesmas (em *itálico*), para o parâmetro residual de flúor



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Legenda: **↑** Estação em **negrito** (acima) estatisticamente diferente/superior à estação em *itálico* (coluna à direita)

↓ Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/inferior à estação em itálico (coluna à direita)
= Estação em negrito (acima) sem diferenças significativas em relação à estação em itálico (à direita)

Por análise dos quadros da Figura 5.13, constata-se, para o parâmetro residual de flúor, que a tecnologia de flotação seguida de filtração direta em relação à dupla filtração não é significativamente diferente no período predominantemente seco. Já no período predominantemente chuvoso, as tecnologias que não se diferem significativamente entre si são a filtração direta com a dupla filtração.

As chuvas não modificaram substancialmente o residual de flúor na água tratada, visto que os valores medianos em todas as tecnologias ficaram próximos de 0,80 mg/L. A dispersão no período predominantemente chuvoso foi menor. Tal observação não é de fácil visualização quando se observam os dados inter-quartis, mas fica mais clara quando se inspecionam os valores extremos (máximos e mínimos). Além disso, nos dias de chuva, ocorrem menos diferenças dos valores extremos entre as tecnologias de tratamento, o que explica a mudança na significância em dias em que ocorre e que não ocorre a precipitação.

A Portaria 2914/2011 obriga que os valores residuais de flúor na rede de distribuição variem entre 0,7 e 1,0 mg/L e máximos de 1,5 mg/L. Os intervalos inter-quartis de todas as tipologias estudadas estão dentro desses valores, o que denota a boa confiabilidade das ETAs, além da boa estabilidade, visto a estreita diferença entre os percentis 25 e 75%.

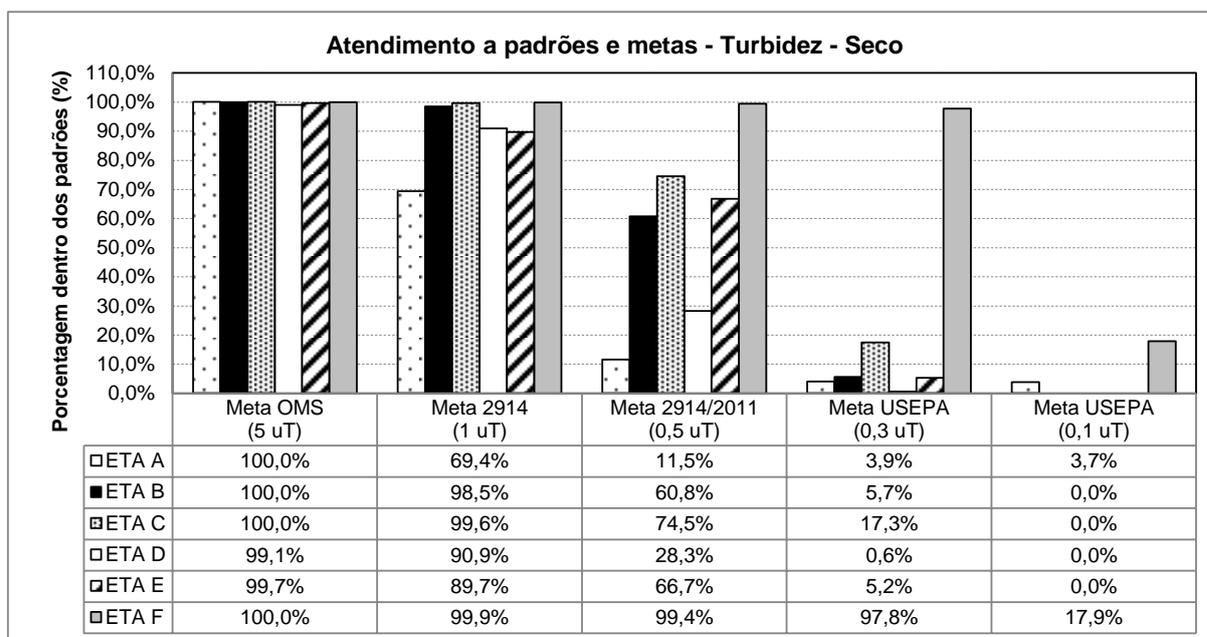
5.3.2 Avaliação do atendimento a padrões e metas de qualidade para a água tratada

A avaliação dos percentuais de atendimento ao padrão de potabilidade, representado no Brasil pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) são apresentados inicialmente para o parâmetro turbidez e na sequência para os demais parâmetros.

5.3.2.1 Turbidez

No que refere à turbidez, efetuou-se uma análise minuciosa a fim de verificar o atendimento aos diversos padrões-referência de potabilidade, a saber: OMS, Portaria 2914/2011 e USEPA. De sorte a subsidiar a referida análise, elaborou-se um histograma para o período predominantemente seco conforme apresentado na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Percentuais de atendimento às diversas metas para turbidez no período predominantemente seco



A Figura 5.14 mostra que à meta da OMS, que preconiza 5uT para a água tratada, é atingida quase na totalidade das medições, independente da tecnologia de tratamento utilizado, não sendo observado êxito em menos de 1,0% da ETA E e da ETA D.

Ainda da Figura 5.14 depreende-se que, no período predominantemente seco, as ETAs A, D e E não atenderam a premissa da Portaria 2914/2011, restando menos que 95% das amostras acima de 1uT.

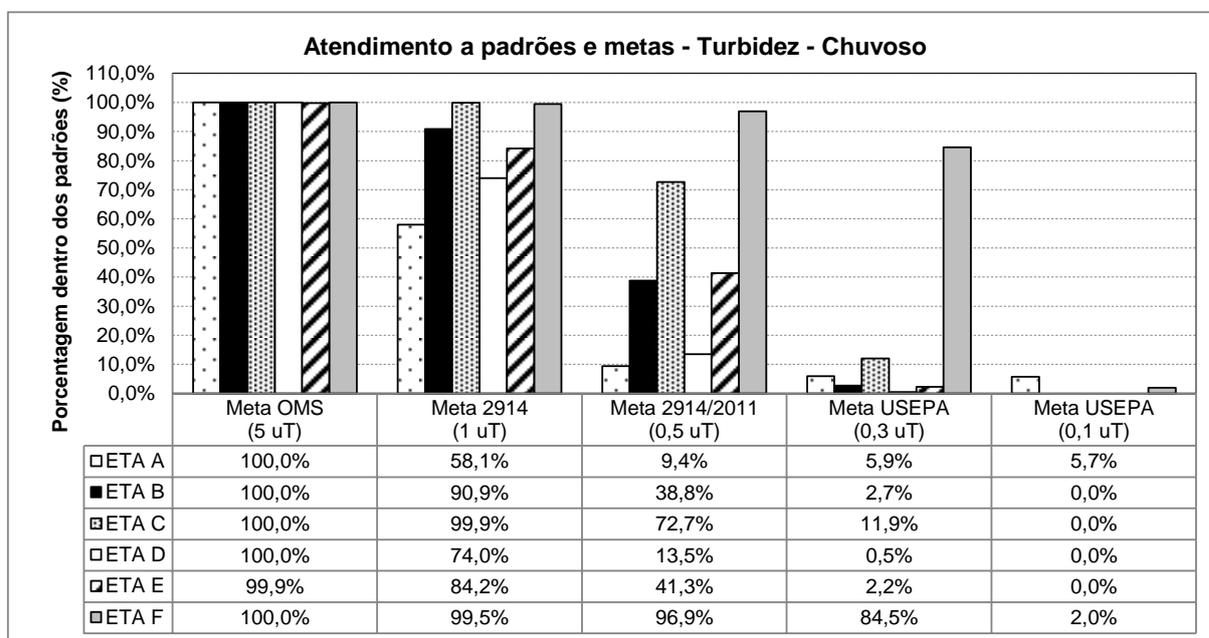
Destaca-se que provavelmente em decorrência da sobrecarga ou das condições de coagulação, o efluente da ETA E não atendeu às antigas recomendações da Portaria 2914 em relação à turbidez (máxima de 1,0 uT).

A Portaria 2914/2011 estabelece que, em 2013, em pelo menos 25% das amostras teriam que obter $uT < 0,5$ e, para 2014, pelo menos 50% das amostras deverá obter tal valor de referência. Em cinco das seis ETAs esses índices foram alcançados, exceto na ETA A. Para o ano de 2014, quatro das seis ETAs já alcançaram a meta estabelecida.

Para a meta estabelecida pela USEPA (95% abaixo de 0,3 uT), somente a ETA F alcança tais índices, denotando-se que é possível alcançar o nível de tratamento exigido na agência de regulação ambiental americana, mas com bastante investimento. Deste fato, o índice de turbidez recomendado pela USEPA (0,1 uT) dificilmente seria alcançado sem um aporte financeiro adequado.

Na Figura 5.15, foi elaborado também um histograma para o parâmetro turbidez no período predominantemente chuvoso.

Figura 5.15 – Percentuais de atendimento às diversas metas para turbidez no período predominantemente chuvoso



Os valores obtidos para a turbidez da água tratada para o período predominantemente chuvoso foram superiores aos obtidos no período predominantemente seco.

Em relação à meta da OMS, quase a totalidade dos valores observados estão abaixo de 5 uT. Não sendo observado êxito em apenas uma estação, a ETA E, o que vai de encontro aos resultados do período predominantemente seco.

Na análise da Figura 5.15, a cerca da Portaria 2914 depreende-se que, no período predominantemente chuvoso, as ETAs A, D e E, continuam na mesma linha de comportamento que no período predominantemente seco, não atendendo a premissa da Portaria 2914/2011, restando menos que 95% das amostras acima de 1uT.

As metas da Portaria 2914/2011 para o ano de 2013 foram alcançadas em quatro ETAs, ou seja, as ETAs A e D foram as únicas que não atenderam a meta imposta. Para o ano de 2014, em apenas duas, ETA C e ETA F, das seis ETAs foram alcançadas a meta. A partir da comparação do atendimento de metas sobre o aspecto sazonalidade pode-se concluir a influência do período predominantemente chuvoso sobre a qualidade da água tratada.

Contudo, considerando os intervalos dos dados (2001-2011), os resultados ainda estão satisfatórios. Para atingir as metas da USEPA, nenhuma das ETAs alcança a meta estabelecida (0,3 uT) e tampouco o valor recomendado de 0,1 uT, uma vez que o percentual máximo de incidências foi de 84,5% para 0,3 uT.

Em linhas gerais, pode-se dizer que o desempenho do tratamento de água das estações estudadas para o índice turbidez é satisfatório quando comparado com os padrões brasileiros, no que tange ao alcance aos índices pré-estabelecidos, mesmo com uma base de dados feita até 12 anos antes do início da legislação entrar em vigor. A análise temporal poderia mostrar a tendência de melhoria do desempenho da ETAs, o que poderá ser feito em momentos posteriores.

5.3.2.2 Demais parâmetros

A avaliação dos percentuais de atendimento aos padrões de potabilidade, Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), OMS e USEPA são apresentados para os parâmetros; pH, cor, residual de cloro e de flúor e colimetria. A Figura 5.16 subsidia a referida análise a partir de um hietograma para o período predominantemente seco e a Figura 5.17 para o período predominantemente chuvoso.

Figura 5.16 – Percentuais de atendimento às metas para diversos parâmetros no período predominantemente seco

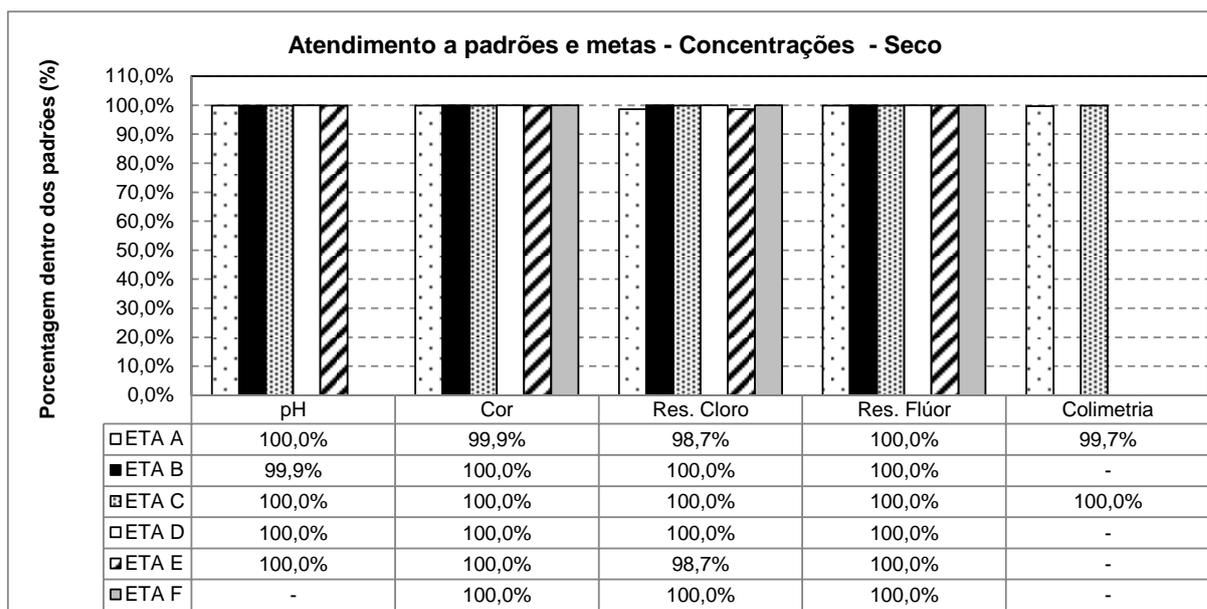
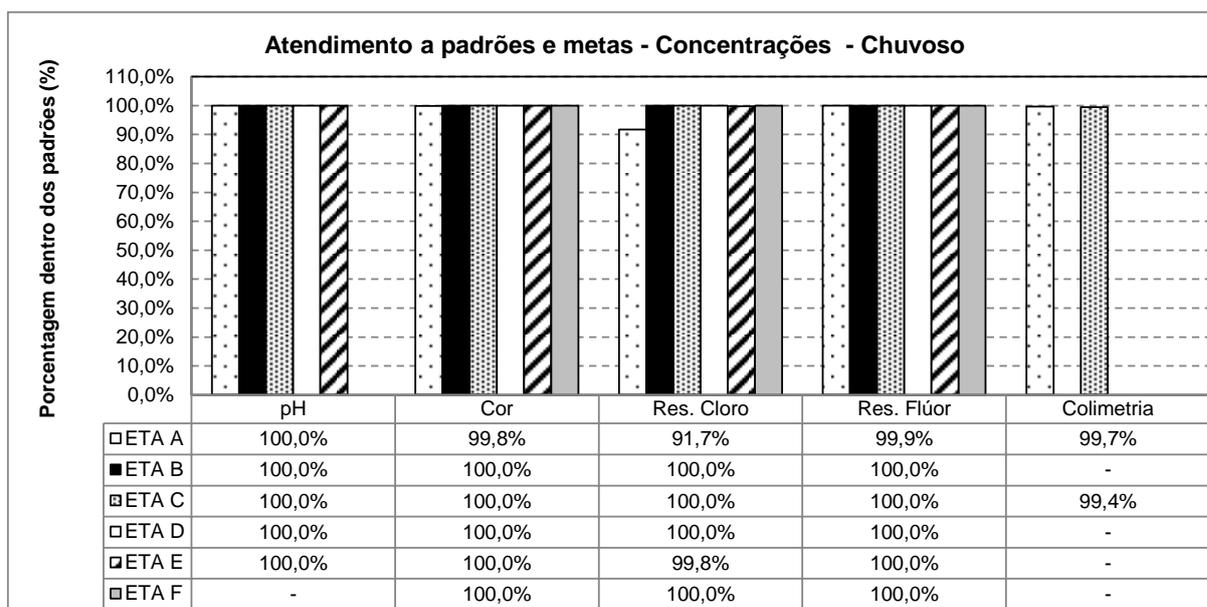


Figura 5.17 – Percentuais de atendimento às metas para diversos parâmetros no período predominantemente chuvoso



O parâmetro pH foi 100% atendido em todas as estações em que existiam dados. Tal fato se dá conforme já citado na metodologia o parâmetro apresenta significativa amplitude nas recomendações da Portaria 2914/2011, ou seja, de 6,0 a 9,5 no sistema de distribuição.

Todos os registros médios diários de cor aparente apresentaram-se abaixo do limite (15 uH) estabelecido pela mesma Portaria 2914/2011, em cinco das seis estações, em ambos períodos. Apenas a ETA Anão atinge os 100% mas fica muito próxima, tendo valores máximos de

15,64 uH no período predominantemente seco e 15,75 uH no período predominantemente chuvoso.

A definição da dosagem de cloro residual frequentemente prende-se ao comprimento e estado de conservação da rede de distribuição, objetivando assegurar concentração residual superior a 0,5 mg/L. Desta forma, pode-se afirmar que quatro das seis ETAs atenderam em ambos os períodos, sendo que a ETA Afoi a única que ficou um pouco mais distante dos 100% nos períodos predominantemente seco (95,3%) e predominantemente chuvoso (91,7%).

Como forma de minimizar a fluorose, a Portaria 2914/2011 e a OMS mencionam concentração máxima de fluoreto no valor de 1,5 mg/L, a qual foi atendida em praticamente 100% das estações analisadas, com exceção da ETA Aque no período predominantemente chuvoso atendeu 99,9%.

A colimetria conforme já comentado na metodologia apresentava dados de monitoramento em apenas duas das seis estações de estudo, cita-se; ETA A e ETA C. O atendimento às metas foi considerável ficando na casa dos 99% em ambas as ETAs e em ambos os períodos.

Da análise dos gráficos das Figura 5.16 e Figura 5.17, depreende-se que a ETA A, apesar de ter apresentado um índice superior a 90% de atendimento em todos os parâmetros, é a menos eficiente se comparada às demais estações em estudo.

5.3.3 Análise de confiabilidade das estações de tratamento

A caracterização das distribuições de probabilidade dos indicadores mostrou que a distribuição lognormal não pode ser adotada para descrever o comportamento da maioria dos dados disponibilizados pelas ETAs (ver Apêndice 3). No entanto, os dados mostraram um comportamento assimétrico à esquerda, em quase todos os casos, bastante similar ao apresentado por aqueles que se ajustam a uma distribuição lognormal. Isto permitiu a aplicação do modelo de confiabilidade, desenvolvido e descrito por Niku *et al.* (1979), cuja adequação será testada posteriormente.

5.3.3.1 Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC)

A análise considerou as seis estações de tratamento de água e os valores dos coeficientes de confiabilidade (CDC) foram calculados para os constituintes de interesse (para um nível de confiabilidade de 95%), considerando os coeficientes de variação (CV) efetivamente apresentados pelas ETAs em operação.

Turbidez

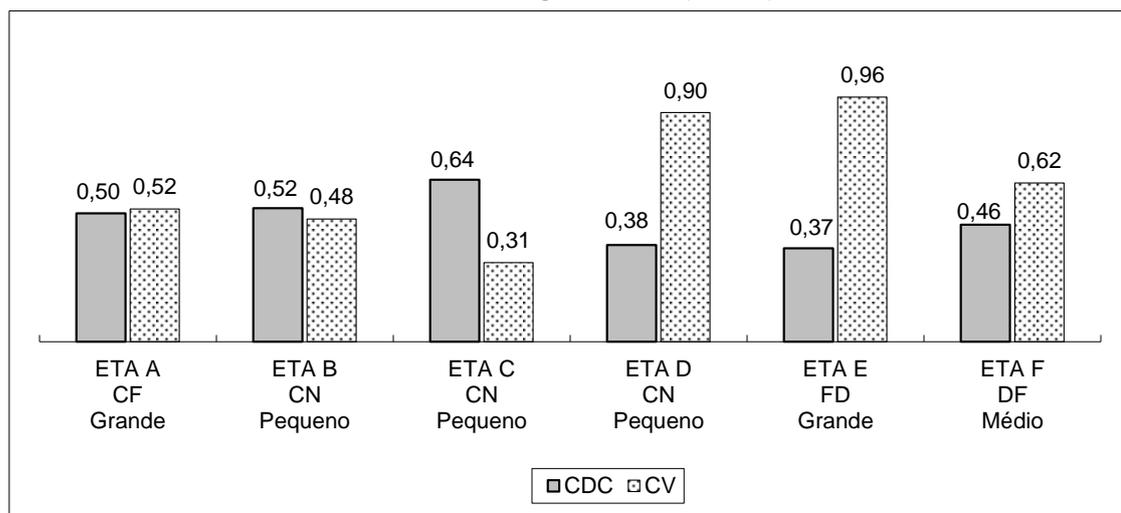
Os valores dos coeficientes de variação (CV) e de confiabilidade (CDC) da turbidez da água tratada são apresentados na Tabela 5.20. Para facilitar a visualização dos dados apresentados na Tabela 5.20, a Figura 5.18 apresenta um gráfico de barras comparando os valores dos coeficientes de confiabilidade e de variação para o parâmetro turbidez. Pela Figura é possível perceber com mais clareza o comportamento inverso dos dois coeficientes, ou seja, quanto maior o coeficiente de variação, menor o coeficiente de confiabilidade, já que a estação apresenta um processo mais instável.

Tabela 5.20 – Valores dos coeficientes de variação e de confiabilidade dos parâmetros – turbidez da água tratada

Tecnologias de tratamento →	Ciclo completo com flotação	Convencional			Filtração Direta	Dupla Filtração
		Pequeno	Pequeno	Pequeno		
Porte →	Grande	ETA B	ETA C	ETA D	ETA E	ETA F
CDC - Turbidez	0,50	0,52	0,64	0,38	0,37	0,46
CV - Turbidez	0,52	0,48	0,31	0,90	0,96	0,62

CV: Coeficiente de variação (desvio padrão/média); CDC: Coeficiente de confiabilidade

Figura 5.18 – Valores dos coeficientes de confiabilidade e de variação
Turbidez da água tratada ($\alpha = 5\%$)



CF = Ciclo completo com flotação; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração
CV: Coeficiente de variação (desvio padrão/média); CDC: Coeficiente de confiabilidade

Pela observação da Tabela 5.20 e da Figura 5.18, percebe-se que foi grande a variabilidade dos coeficientes de variação e de confiabilidade para o parâmetro turbidez. Ficaram evidenciados, também, os maiores coeficientes de variação e os consequentes menores valores de CDC apresentados pelas ETAs D e E, já que os valores de CV variam inversamente com os CDC, para $\alpha = 5\%$.

Ressalta-se, portanto, que a tecnologia de tratamento e o porte não tiveram influência tão expressiva na confiabilidade no desempenho das estações, já que ETAs de tecnologias e portes distintos foram as que apresentaram menores CDCs. Da mesma forma, o maior coeficiente de confiabilidade foi apresentado por uma ETA de pequeno porte.

Cor

Os valores dos coeficientes de variação (CV) e de confiabilidade (CDC) do parâmetro cor da água tratada são apresentados na Tabela 5.21.

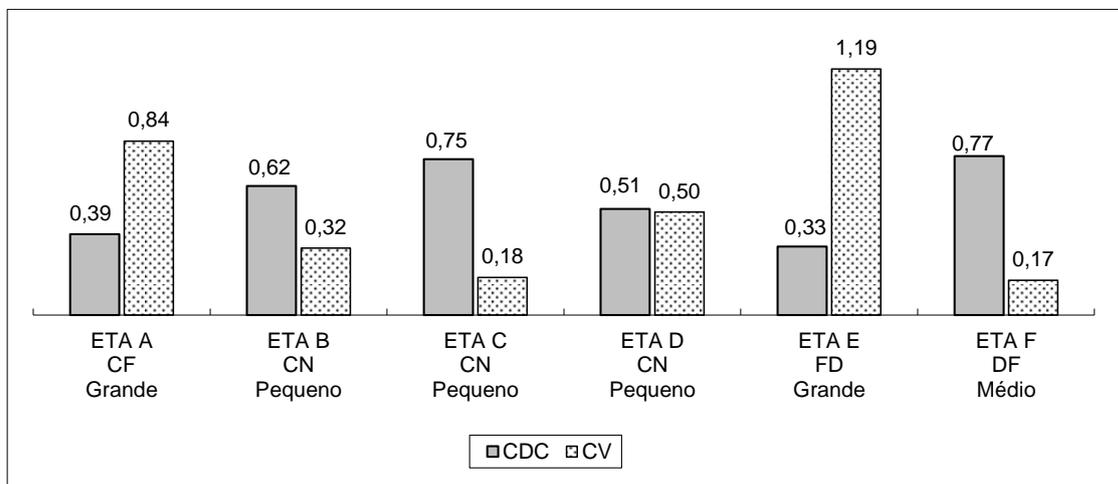
Tabela 5.21 – Valores dos coeficientes de variação e de confiabilidade dos parâmetros –
Cor da água tratada

Tecnologias de tratamento →	Ciclo completo com flotação	Convencional			Filtração Direta	Dupla Filtração
		Pequeno	Pequeno	Pequeno		
Porte →	Grande	Pequeno	Pequeno	Pequeno	Grande	Médio
ETA →	ETA A	ETA B	ETA C	ETA D	ETA E	ETA F
CV - Cor	0,84	0,32	0,18	0,5	1,19	0,17
CDC - Cor	0,39	0,62	0,75	0,51	0,33	0,77

CV: Coeficiente de variação (desvio padrão/média); CDC: Coeficiente de confiabilidade

De maneira análoga àquela utilizada para apresentar o parâmetro turbidez, apresenta-se um gráfico de barras comparando os valores dos coeficientes de confiabilidade e de variação para o parâmetro cor será na Figura 5.19.

Figura 5.19 – Valores dos coeficientes de confiabilidade e de variação - Cor da água tratada ($\alpha = 5\%$)



CF = Flotação/Filtração Direta; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração
CV: Coeficiente de variação (desvio padrão/média); CDC: Coeficiente de confiabilidade

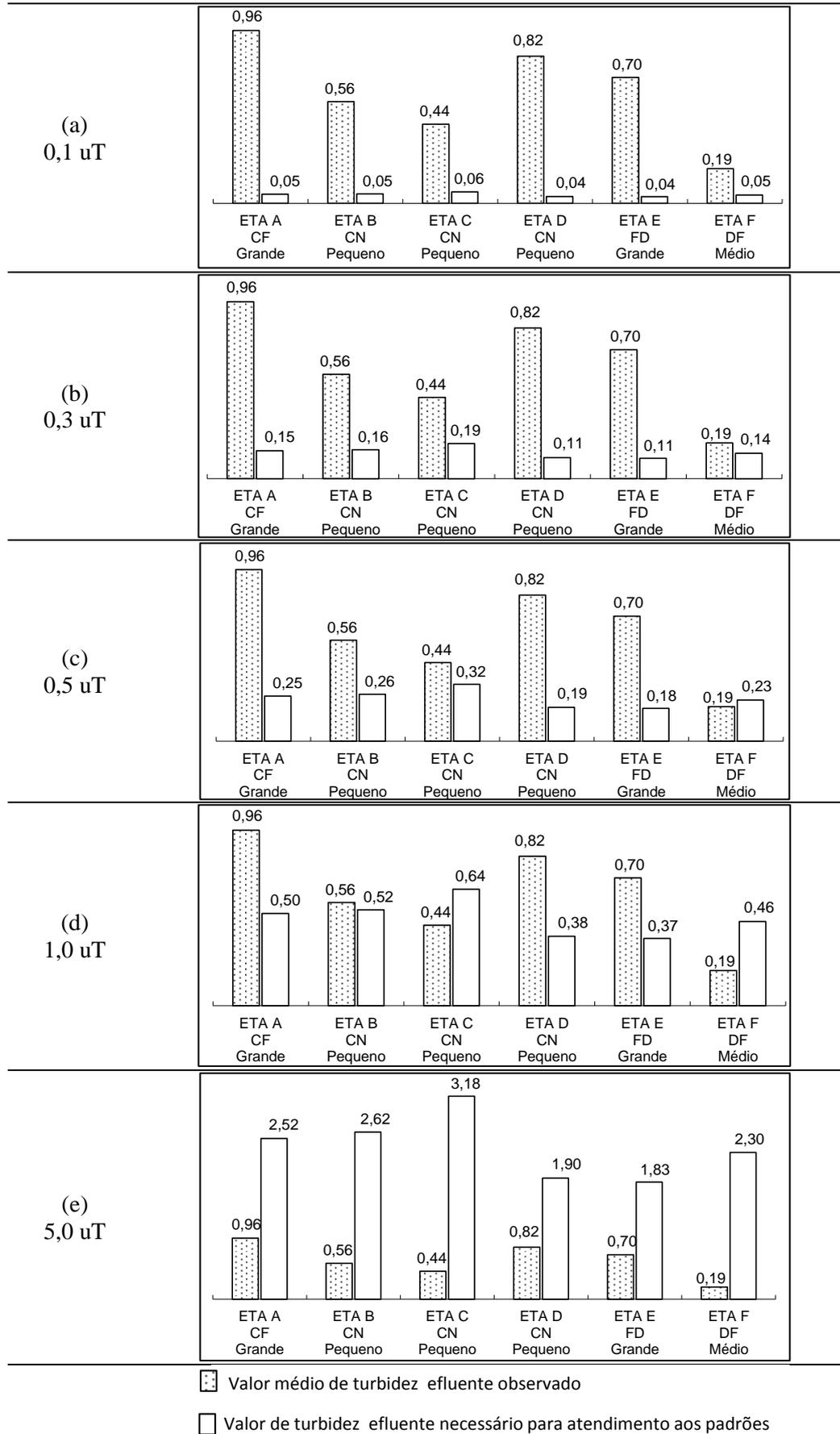
Do mesmo modo, percebe-se que há grande variabilidade dos coeficientes de variação e de confiabilidade. No caso da cor, ficaram evidenciados, também, os maiores coeficientes de variação e naturalmente os menores valores de CDC, os quais são atribuídos às ETAs A e E, para $\alpha = 5\%$. Mais uma vez, fica evidente que a tecnologia e o porte não influenciam no desempenho, já que os maiores CDCs foram obtidos por estações de pequeno porte (ETA C) e médio (ETA F), ambas de tecnologias distintas.

5.3.3.2 Valores de projeto necessários para o alcance dos padrões ou metas especificados

Turbidez

A Figura 5.20 mostra o gráfico com os valores médios de turbidez de projeto ou operação que são necessários para que as ETAs alcancem os padrões de potabilidade constantes na Portaria 2914/11, OMS e USEPA. Os valores efluentes médios de projeto foram calculados por meio da Equação (1), considerando o nível de confiabilidade (α) de 95%.

Figura 5.20 – Valores médios de turbidez efluente observados e necessários para 95% de atendimento aos padrões de (a) 0,1; (b) 0,3, (c) 0,5, (d) 1,0 e (e) 5,0 uT ($\alpha = 5\%$)



Pela observação dos gráficos expressos na Figura 5.20, nota-se que os valores médios de turbidez observados na água tratada para quase todas as ETAs seriam insuficientes para garantir 95% de atendimento a quase todos os padrões. Tomando como exemplo de interpretação a ETA A e o padrão de 0,1 uT, o valor médio de turbidez efluente foi de 0,96 uT, mas seria necessário um valor médio de 0,05 uT na água tratada para garantir que 95% dos dados atenderiam a este padrão tão restritivo. Isto em decorrência da variabilidade dos dados apresentados por esta estação de tratamento.

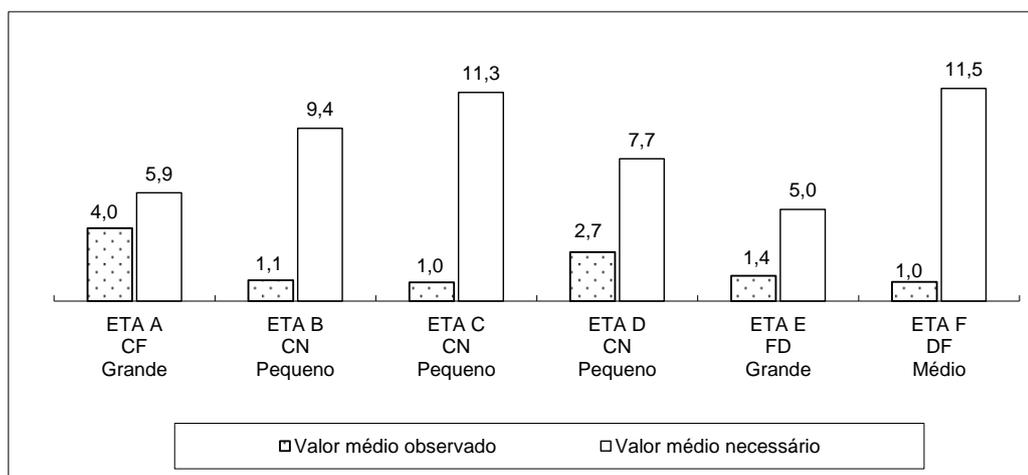
Os padrões de 0,3 e 0,5 uT também não seriam atendidos por quase nenhuma ETA, considerando a turbidez média necessária no efluente. A exceção é a ETA F, que apresenta um atendimento de 91,5% e 98% de atendimento aos padrões de 0,3 e 0,5 uT, respectivamente. Estes percentuais de atendimento serão discutidos mais detalhadamente no decorrer do capítulo.

À medida que os padrões se tornam mais flexíveis, mais ETAs conseguem atendê-los, vide ETA C, que apresenta um atendimento de 99,8% ao padrão de 1,0 uT. No caso do padrão de 5,0 uT, todas as ETAs garantiriam facilmente o percentual de 95% de atendimento.

Cor

A Figura 5.21 mostra o gráfico com os valores médios de cor de projeto ou operação necessários para que as ETAs alcancem os padrões de potabilidade. Da mesma forma que se procedeu na análise da turbidez, os valores efluentes médios de projeto foram calculados por meio da Equação (1), considerando o nível de confiabilidade (α) de 95%.

Figura 5.21 – Valores médios de cor efluente observados e necessários para 95% de atendimento aos padrões de 15 uH ($\alpha = 95\%$)



CF = Flotação/Filtração Direta; CN = Convencional; FD= Filtração Direta; DF = Dupla Filtração

Após análise da Figura 5.21, conclui-se que todas as estações de tratamento de água apresentam valores médios de cor efluente menores que os necessários para atendimento à meta imposta pela Portaria 2914/2011, que define valores inferiores a 15 uH para o parâmetro cor. Este valor é o mesmo tanto para a OMS quanto para a USEPA.

5.3.3.3 Percentual esperado de atendimento a metas de lançamento adotadas

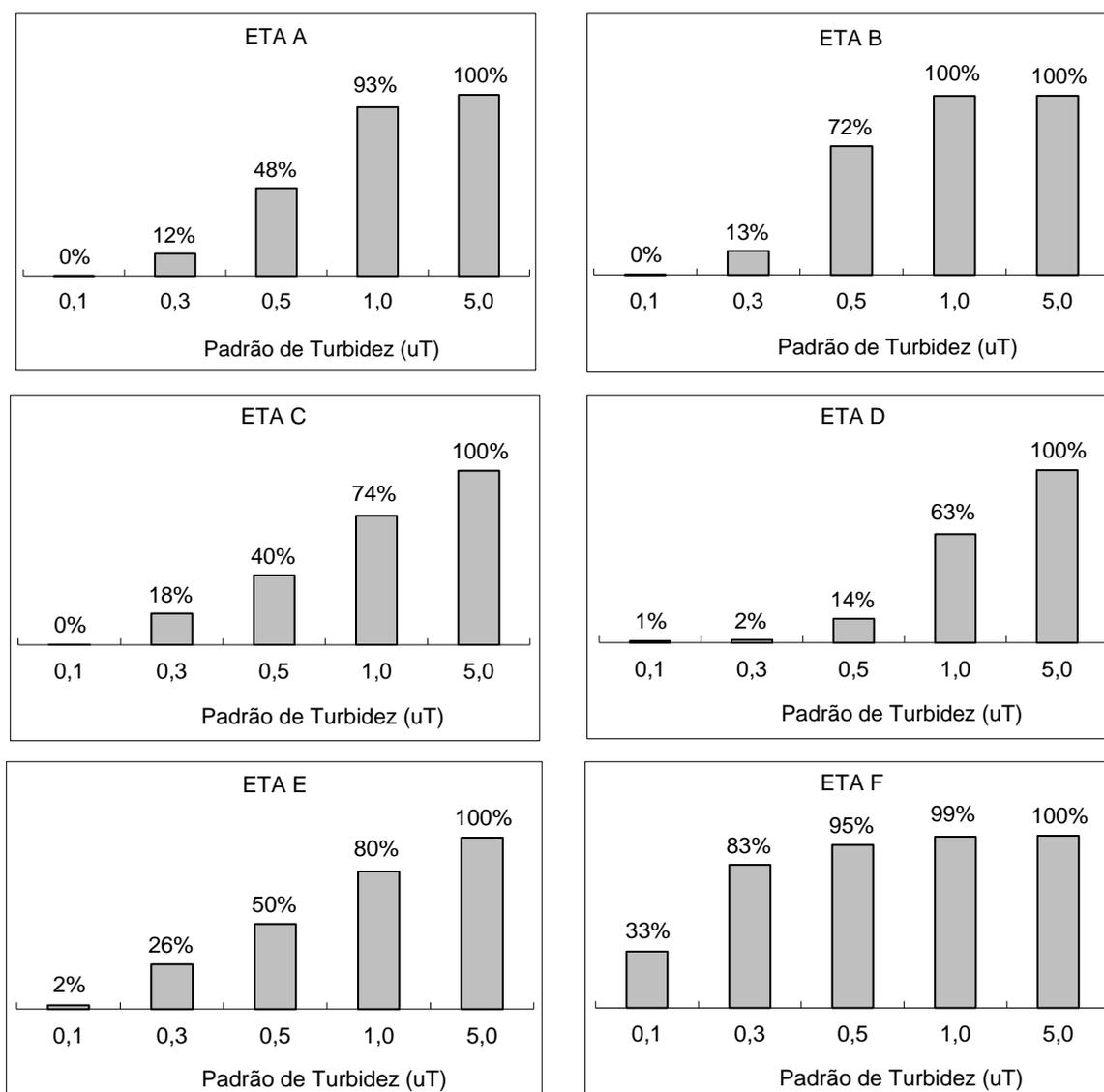
Como descrito no item Metodologia, foram calculados os percentuais de atendimento que as tecnologias de tratamento alcançariam, mantendo os mesmos parâmetros de operação, utilizando-se a Equação (3).

Turbidez

Os resultados obtidos para turbidez da água tratada são apresentados na Figura 5.22, considerando os padrões de atendimento de 0,1, 0,3, 0,5, 1,0 e 0,5 uT. Os percentuais de atendimento foram projetados com base nos coeficientes de confiabilidade, para cada um destes padrões, conforme Figura 5.22.

Como esperado, o percentual esperado de atendimento é maior quando os padrões de turbidez são menos restritivos, como é o caso do padrão de 5 uT. Neste caso, todas as ETAs apresentaram um percentual de 100% de atendimento. Já para o padrão de 0,1 uT, por exemplo, o atendimento é mínimo e só alcançado em pequenos percentuais pela ETA F. Assim, confirma-se mais uma vez o que já foi observado em análises anteriores: o ótimo desempenho da ETA F se destaca em relação às demais estações.

Figura 5.22 – Percentual esperado de atendimento aos padrões de turbidez de 0,1, 0,3, 0,5, 1,0 e 5,0 uT ($\alpha = 95\%$)

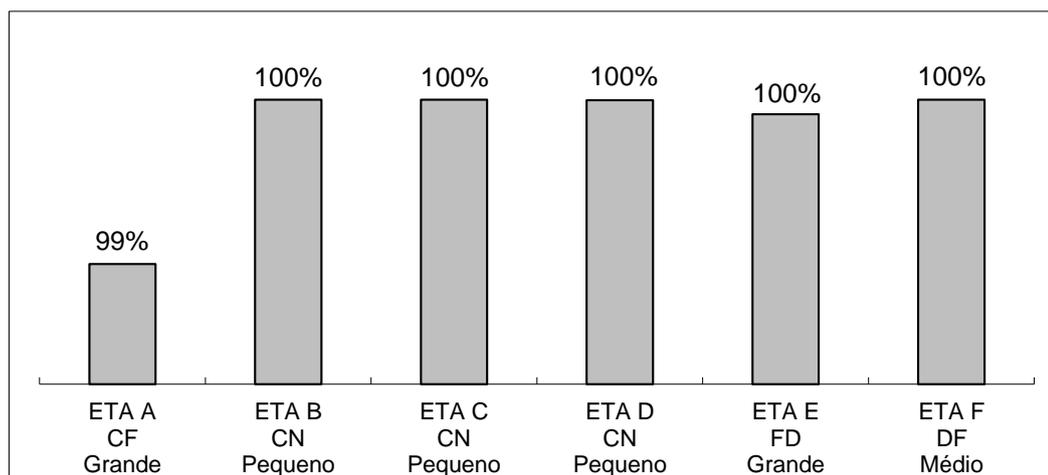


Cor

Os resultados obtidos para cor da água tratada são apresentados na Figura 5.23, considerando o padrão de atendimento de 15 uH. Destaca-se que essa meta é idêntica para a Portaria 2914/2011, para a USEPA e para a OMS. Os percentis de atendimento foram projetados com base nos coeficientes de confiabilidade para este padrão.

Após análise da Figura 5.23, percebe-se que todas as estações de tratamento de água alcançariam percentual de atendimento praticamente total à meta imposta pela Portaria 2914/2011, que define valores muito pouco restritivos para o parâmetro cor.

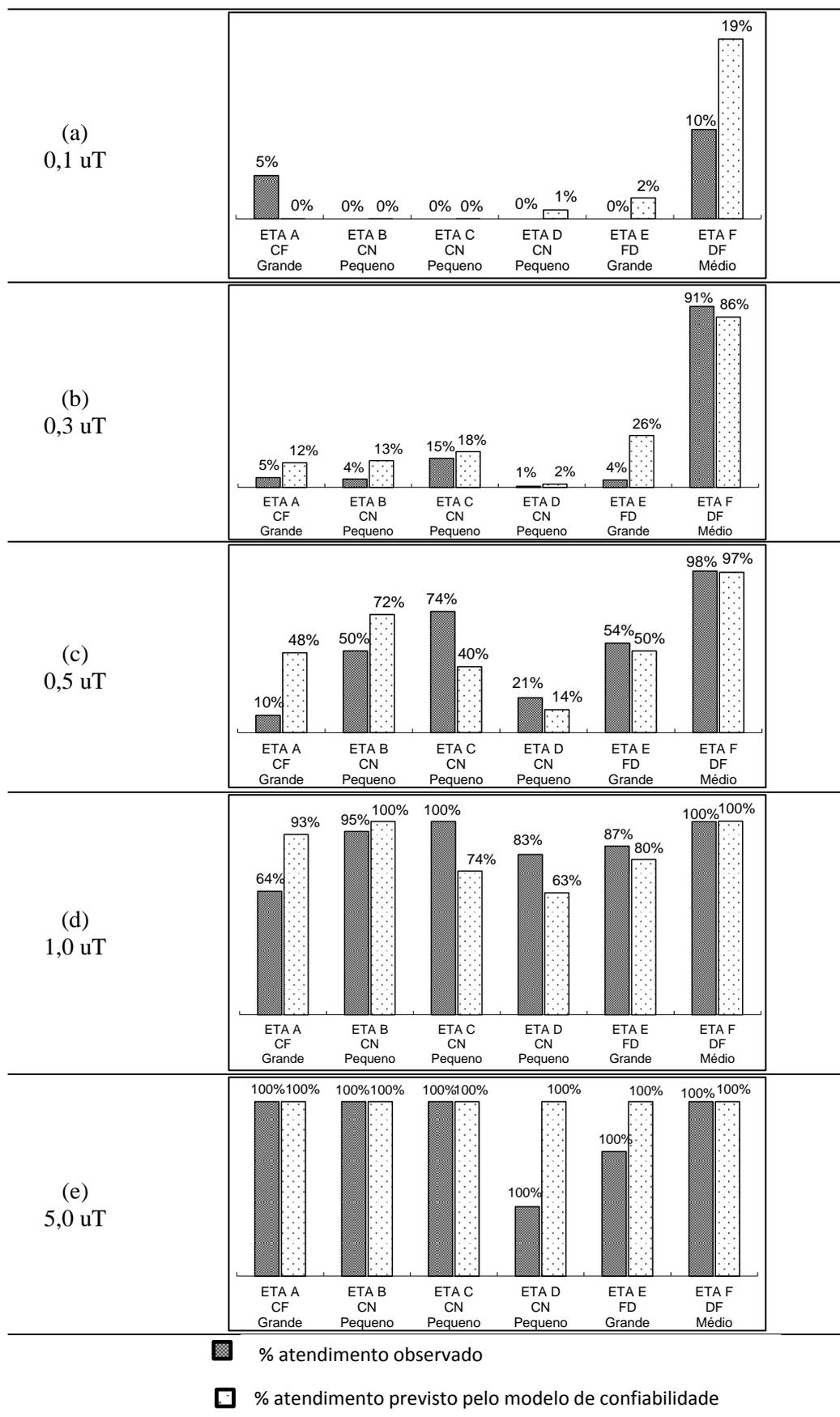
Figura 5.23 – Percentual esperado de atendimento ao padrão de cor de 15 uH ($\alpha = 95\%$)



5.3.3.4 Testes para comprovação da validade do modelo de confiabilidade

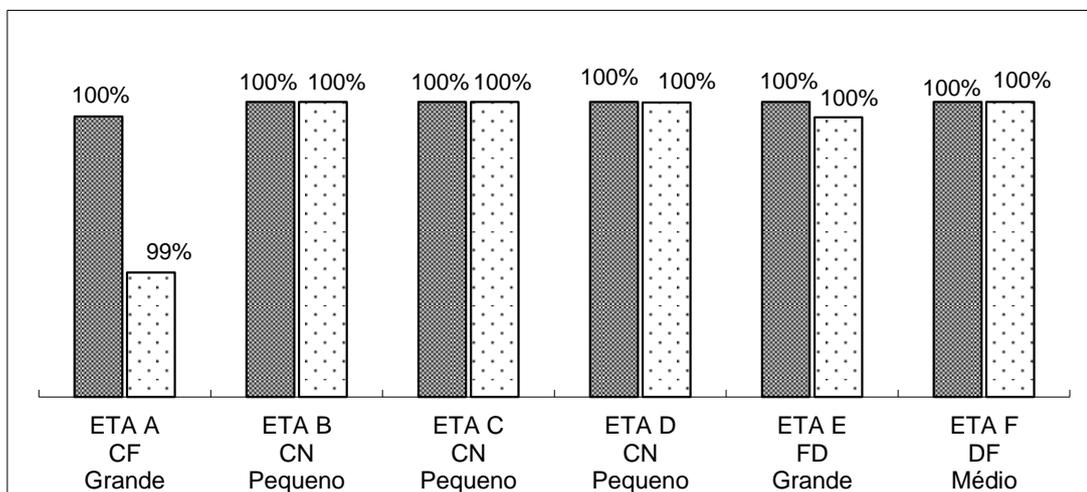
Para comprovar a validade das projeções de desempenho efetuadas com base nos coeficientes de confiabilidade, os percentuais de atendimento esperado foram comparados com os percentuais de atendimentos efetivamente obtidos pelas ETAs, calculados e apresentados no Item 5.3.5.3. Nesta análise, os dados foram analisados um a um, enquanto no modelo de confiabilidade foram utilizados apenas a média dos valores efluentes e o coeficiente de variação para projeção dos resultados, que são apresentados na Figura 5.24, para os dados de turbidez efluente e na Figura 5.25 para os valores de cor efluente.

Figura 5.24 – Percentual de atendimento projetado pelo modelo de confiabilidade e efetivamente observado para os padrões de turbidez: (a) 0,1, (b) 0,3, (c) 0,5, (d) 1,0 e (e) 5,0 Ut ($\alpha = 95\%$)



Como pode ser visualizado na Figura 5.24, os valores percentuais estimados pelo modelo foram próximos dos resultados de atendimento efetivamente observados, o que viabiliza a utilização do modelo de confiabilidade desenvolvido por Niku *et al.*(1979).

Figura 5.25 – Percentual de atendimento projetado pelo modelo de confiabilidade e efetivamente observado para o padrão de cor de 15 uH



O comportamento do parâmetro cor é muito similar ao do parâmetro turbidez, como pode ser visualizado na Figura 5.25, os valores percentuais estimados pelo modelo foram bastante próximos dos resultados de atendimento efetivamente observados, o que viabiliza a utilização do modelo de confiabilidade desenvolvido por Niku *et al.*(1979).

6 CONCLUSÕES

Como conclusões deste trabalho, observou-se na comparação de desempenho das ETAs em função da tecnologia de tratamento adotada, que a dupla filtração apresentou valores de turbidez da água tratada significativamente menores que os mostrados por todos os outros processos de tratamento. A cor, no entanto, foi removida de maneira mais eficiente pela tecnologia de dupla filtração, quando comparada com a convencional e flotação seguida de filtração direta, mas de maneira equivalente ao processo de filtração direta. Quando se comparam as ETAs individualmente, percebe-se que na análise da água tratada, houve resultados bastante diversos de cor entre todas as estações de tratamento. No entanto, a ETA C (tecnologia convencional) apresentou os menores valores de cor entre todas as outras.

Para o parâmetro residual de cloro, observou-se que todas as tecnologias de tratamento são significativamente diferentes entre si, tanto no período predominantemente seco quanto no período predominantemente chuvoso. Constatou-se, ainda, para o parâmetro residual de flúor, que a tecnologia de flotação seguida de filtração direta em relação à dupla filtração não é significativamente diferente no período predominantemente seco. Já no período predominantemente chuvoso, as tecnologias que não se diferem significativamente entre si são a filtração direta com a dupla filtração.

Já para a avaliação de desempenho das estações de tratamento agrupadas por porte, verificou-se que a ETA de médio porte apresentou os menores valores de turbidez e cor em ambos os períodos, comportamento este que não condiz com o esperado, ou seja, o comum seria que as estações de tratamento de água de grande porte tivessem um melhor desempenho. Para o parâmetro residual de cloro, observou-se que todas as tecnologias de tratamento são significativamente diferentes entre si, tanto no período predominantemente seco quanto no período predominantemente chuvoso. Os valores residuais de cloro na água tratada são muito próximos nos períodos predominantemente secos e predominantemente chuvosos.

No que se refere à avaliação do atendimento a padrões e metas de qualidade para a água tratada em relação ao parâmetro turbidez, concluiu-se que as estações ETA D e ETA E não atenderam totalmente à meta da OMS (5uT) para a água tratada no período predominantemente seco. Já no período predominantemente chuvoso, apenas a ETA E não atendeu a meta da OMS. O efluente das ETAs A e E não atenderam às antigas recomendações da Portaria 2914/2011 em relação à turbidez (máxima de 1,0 uT) para o período

predominantemente seco. Para o período chuvoso, apenas duas ETAs atendem à referida recomendação, sendo elas: ETA C e ETA F.

A Portaria 2914/2011 estabelece que, em 2013, em pelo menos 25% das amostras teriam que obter $uT < 0,5$ e, para 2014, pelo menos 50% das amostras deverá obter tal valor de referência. Em cinco das seis ETAs esses índices foram alcançados, exceto na ETA Ano período predominantemente seco. Já no período chuvoso, duas ETAs não atendem a meta da Portaria para o ano de 2013, a saber: ETA A e ETA D. Para a meta de 2014 no período predominantemente seco, quatro das seis ETAs já a alcançaram e, no período predominantemente chuvoso, apenas duas ETAs.

Para a meta estabelecida pela USEPA (95% abaixo de 0,3 uT), somente a ETA F alcançou tais índices no período predominantemente seco. Lembra-se que o índice de turbidez recomendado pela USEPA (0,1 uT) dificilmente seria alcançado sem um aporte financeiro adequado.

Quanto ao residual de cloro, quatro das seis ETAs atenderam em ambos os períodos, sendo que a ETA A foi a única que ficou um pouco mais distante dos 100% no período predominantemente chuvoso. Acerca do parâmetro residual de flúor, houve atendimento por parte de todas as estações analisadas. Ressalta-se que todos os registros médios diários de cor aparente apresentaram-se abaixo do limite (15 uH) estabelecido pela Portaria 2914/2011.

Os resultados da análise de confiabilidade mostraram que os valores médios de turbidez observados na água tratada por quase todas as ETAs seriam insuficientes para garantir 95% de atendimento aos padrões de 0,3 e 0,5 uT. Tendo analisado a meta da OMS (5,0 uT), observou-se que todas as ETAs garantiriam facilmente o percentual de 95% de atendimento. Todas as estações de tratamento de água atenderam a meta imposta pela Portaria 2914/201, que define valores inferiores a 15,0 uH para o parâmetro cor.

Por fim, conclui-se que as ETAs A e E foram as que apresentaram o pior desempenho em todas as avaliações efetuadas no presente trabalho. Em contrapartida, a ETA F demonstrou a melhor eficiência em todos os parâmetros.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, sugere-se a realização de testes estatísticos anuais para os valores de turbidez e análise quanto ao atendimento à Portaria 2914/2011 e às metas estabelecidas e aos valores recomendados pela USEPA.

Sugere-se, também, a avaliação dos critérios de medição para os diversos parâmetros para as várias estações de tratamento de água.

Incluir a verificação de dados operacionais na avaliação de desempenho. Verificar a variação da vazão, taxa de filtração, coagulantes, dosagens, dentre outros.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12216 - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 18 p.

ALI, A.; HASHMI, H. N.; BAIG, N.; IQBAL, S.; MUMTAZ, K. Performance evaluation of the water treatment plants of Islamabad – Pakistan. *Arch. Environ. Sci.*, n.6, p. 111-117, 2012. ISSN 2167-1664.

ALMEIDA, J. M. S. *Otimização do índice de qualidade de estação convencional de tratamento de água (IQETA) por meio de análise estatística multivariada*. 2009. 73f. (Dissertação de Mestrado em Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS.

Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br> >. Acesso em: 15 ago. 2013.

ANGELIS, F. T. Utilização da flotação na remoção de algas e melhorias em uma ETA. In: 37ª ASSEMBLEIA NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS SERVIDORES MUNICIPAIS DE SANEAMENTO (ASSEMAE), 37. , 2007, Guarulhos-SP. Disponível em: <<http://www.saneamentobasico.com.br/portal/wp-content/uploads/2013/02/UTILIZA%C3%87%C3%83O-DA-FLOTA%C3%87%C3%83O-NA-REMO%C3%87%C3%83O-DE-ALGAS.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2013.

BASTOS, R.K.X.; OLIVEIRA, D.C; FREITAS, A.G.; NASCIMENTO, L.E. Avaliação de desempenho de uma estação de tratamento de água antes e depois de intervenções de melhoria. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30., 2006, Punta del Este, Uruguai. *Resgatando princípios antigos para os novos desafios do milênio*. Montevideu: AIDIS - Associação Americana de Engenharia Sanitária e Ambiental, Seção Uruguai, 2006. p.1-8.

BASTOS, R.K.X., HELLER, L; BEVILACQUA,P.D., PÁDUA, V.L.; BRANDÃO, C.C.S. Apresentado em: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 29, San Juan, 22-27 Ago. 2004. *Legislação sobre controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano. A experiência brasileira comparada à pan-americana*.

BASTOS, R. K. X. ; PERÍGOLO, R.A.; NASCIMENTO, L. E. Controle operacional e qualidade da água em estações de tratamento de água em situações adversas, a importância do conhecimento dos parâmetros de funcionamento da ETA. In: EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO, 27., 2003, Santo André-SP. *Anais...* Jaboticabal: ASSEMAE, 2003 [Anais eletrônicos].

BASTOS, R.K.X., HELLER, L., FORMAGGIA, D.M.E., AMORIM, L. C; SANCHEZ, P S.; BEVILACQUA, P.D., COSTA, S.S., CÂNCIO J. A. Revisão da Portaria 36 GM/90. Premissas e princípios norteadores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. [CD-ROM].

BASTOS, R.K.X.; VARGAS, L.C.; MOYSES, S.S.; SILVA, H.C. Avaliação de desempenho de estações de tratamento de água. Desvendando o real. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, 2000. [Anais eletrônicos].

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da República da União*. Poder Executivo: Brasília, DF 2011a.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*. *Diário Oficial da União*. Brasília-DF, 2011b.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília-DF, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 26 mar. 2004. 15p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº635, de 26 de dezembro de 1975. Aprova normas e padrões sobre a fluoretação da água de sistemas públicos de abastecimento. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília-DF.

CEZAR, M. C. M.; BERTOLOSSI, V. M.; SOUZA, T. B.; BRANDÃO, C. C. S. Seleção de meio filtrante para utilização em ETA com processo de flotação por ar dissolvido seguido de filtração rápida com opção para filtração direta, para tratamento de água com presença de algas: Estudo de Caso - ETA Brasília. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, Campo Grande-MS. 2005. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/I-100.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. *Resolução Conama n^o 357*. Disponível em:< www.mma.conama.gov.br/conama>

DEAN, R.B., FORSYTHE, S.L. (1976a). Estimating the reliability of advanced waste treatment. Part 1, *Water & Sewage Works*, June.

DI BERNARDO, L ; SABOGAL PAZ, L. P . Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2008. v. 2. 1560p .

GUPTA, A. K.; SHRIVASTAVA, R.K. Reliability-Constrained Optimization of Water Treatment Plant Design Using Genetic Algorithm. *Journal of Environmental Engineering*, v.136, n.3, p. 326–334, 2010. ISSN: 0733-9372.

GUPTA, A. K.; SHRIVASTAVA, R.K. Uncertainty Analysis of Conventional Water Treatment Plant Design for Suspended Solids Removal. *Journal of Environmental Engineering*, v.132, n.11, p. 1413–1421, 2006. ISSN: 0733-9372.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. *Abastecimento de água para consumo humano*. 1º Ed. Minas Gerais: UFMG, 2006.

HELSEL, D.R., HIRSCH, R.M. *Statistical methods in water resources*. Techniques of Water Resources Investigations Series, Book 4, chapter A3, US Geological Survey, 1992, 509 p.

HONORATO, T. Z. ; COSTANZI, R. N. Qualidade de Controle Aplicada a Estações de Tratamento de Água. In: 4TH INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 4., São Paulo, 2013. Anais... Disponível em:

<<http://www.advancesincleanerproduction.net/fourth/ptbr/site/downloads.html>>. Acesso em: 17 dez. 2013.

JUNTUNEN, P.; LIUKKONEN, M.; LEHTOLA, M.; HILTUNEN, Y. Cluster analysis by self-organizing maps: An application to the modelling of water quality in a treatment process. *Applied Soft Computing*, v. 13, n. 7, p. 3191–3196, 2013. ISSN: 1568-4946.

LAMRINI, B.; LAKHAL, EL-K.; LE LANN, M-V.; WEHENKEL, L. Data validation and missing data reconstruction using self-organizing map for water treatment. *Neural Computing and Applications*, v.20, n.4, p. 575-588, 2011. ISSN: 1433-3058.

LAPPONI, J.C. *Estatística usando Excel*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1ª ed., 2005. 476p.

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. 2. ed. Campinas: Editora Átomo, 2008. 444 p.

LOGSDON, G.; HESS, A.; HORSLEY, M. (1999). Guide to selection of water treatment processes. In: LETTERMAN, R. D. (ed.). *Water Quality and Treatment: a Handbook of Community Water Supplies*. 5th ed. New York: McGraw-Hill/American Water Works Association, cap. 3, p. 3.1-3.26.

LOPES, V.C. *Índice de qualidade de desempenho de estações convencionais de tratamento de Água*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

MAKUNGO, R.; ODIYO, J.O.; TSHIDZUMBA, N. Performance of small water treatment plants: The case study of Mutshedzi Water Treatment Plant. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 36, n. 14–15, p. 1151–1158, 2011. ISSN: 1474-7065.

METCALF & EDDY (2003). *Wastewater engineering: treatment, and reuse*. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 4 th.Ed., 1819p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. CPRM, 2007. 552p.

MOSTAFA, K. S.; BAHAREH, G.; ELAHE, D.; PEGAH, D. Optimization of conventional water treatment plant using dynamic programming. *Toxicology and Industrial Health*, v.29, n.3, p.1-9, 2013. ISSN: 0748-2337.

NIKU, S., SCHROEDER, E.D., HAUGH, R.S. (1982). Reliability and stability of trickling filter processes. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 54, n. 2, p. 129 - 134.

NIKU, S.; SCHROEDER, E. D.; TCHOBANOGLOUS, G.; SAMANIEGO, F. J. Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability. United States Environmental Protection Agency Grant nº R805097-01. *Project Summary*. Cincinnati, OH: USEPA, 1981. 11 p.

NIKU, S., SCHROEDER, E.D., SAMANIEGO F.J. (1979). Performance of activated sludge process and reliability-based design. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 51, n. 12, p. 2841 - 2857.

OLIVEIRA, S. C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plants. *Water Research*, v. 42, n. 4, p. 1182-1194, 2008. ISSN 00431354.

OLIVEIRA, S. C.; VON SPERLING, M. Análise da confiabilidade de estações de tratamento de esgotos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 4, p. 389-398, 2007. ISSN 14134152.

OLIVEIRA, S.M.A.C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of stabilisation pond systems. *Water Science & Technology*, v. 55, n. 11, pp 127–134, 2007.

OLIVEIRA, S. M. A. C. (2006). *Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos*. 2006. 231 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RAO SRINIVASA, N.S.; SHRIHARI, S. Sensitivity analysis of integrated water treatment plant. *Journal of Environmental Research and Development*, v.4, n.3, p. 866-875, 2010. ISSN 0973-6921.

ROCHA, F. A. *et al.* Análise do desempenho de uma estação de tratamento de água convencional automatizada. *Revista Educação, Tecnologia e Cultura*, Salvador, n.06, p. 70-75, 2009.

SHAPIRO, S.S., WILK, M.B., CHEN, H.J. A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American statistical association*, v. 63, Issue 324, p. 1343–1372, 1968.

SHAPIRO, S.S., WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, p. 591-611, 1965.

SMETI, E.M.; THANASOULIAS, N.C.; KOUSOURIS, L.P; TZOUMERKAS, P.C. An approach for the application of statistical process control techniques for quality improvement of treated water. *Desalination*, v. 213, n. 1–3, p. 273–281, 2007. ISSN: 0011-9164.

SNEDECOR, G.W., COCHRAN, W.G. *Statistical Methods*. Ames: Iowa State University Press, 8th. ed., 1989. 503p

SOLSONA, Felipe. *Guias para elaborar normas de calidad del agua de bebida en los países em desarrollo*. Lima: Organización Panamericana de la Salud / Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002. 70p.

TEIXEIRA, A.R.; SANTOS, E.P.C.; PÁDUA, V.L.; HELLER, L.; DI BERNARDO, L.; LIBÂNIO, M. A confiabilidade analítica dos valores de turbidez da água filtrada e seu efeito no cumprimento do padrão de potabilidade. *Revista engenharia sanitária e ambiental*, v.9, n.1, p.65-72. 2004. ISSN 1413-4152.

TOWLER, E.; RAJAGOPALAN, B.; SUMMERS, R. S. Using Parametric and Nonparametric Methods to Model Total Organic Carbon, Alkalinity, and pH after Conventional Surface Water Treatment. *Environmental Engineering Science*, v.26, n.8, p.1299-1308, 2009. ISSN: 1092-8758.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. *National Primary Drinking Water Regulations*. EPA 816-F-09-004 May 2009. Washington, D.C.: USEPA, 2009.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. *National Primary Drinking Water Regulations*. Long Term 1 – Enhanced Surface Water Treatment Rule (LT1ESWTR) Implementation Turbidity Provisions (EPA 816-R-04-007). Washington, D.C.: USEPA, 2004. (Guia técnico).

ZHANG, K. *et al.* An integrated performance assessment framework for water treatment plants. *Water Research*, v. 46, n. 6, p. 1.673-1.683, 2012. ISSN 00431354.

WHO. World Health Organization. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4 ed. Geneva: WHO, 2011.

WHO - World Health Organization. *Guidelines for drinking - water quality.*, 3 ed. Geneva: WHO, 2004. 515p.

WHO - World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality.* 2ed. Geneva: WHO, 1995. 188p.

WHO - World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality. Volume 1 – Recommendations.* Geneva: WHO, 1984. 130p.

APÊNDICE 1

Quadro 1 – Resultados teste de Aderência - p-valor da distribuição estatística

ETA	Porte	Tecnologia de Tratamento	Variável	Nº de dados	Nº de classes	p-valor da distribuição estatística					
						Normal	Retangular	Exponencial	Gamma	Log-normal	Chi-square
ETA A	Grande	Ciclo completo com flotação	Turbidez AB	2398	49	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Turbidez AT	2524	50	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AB	2425	49	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AT	2523	50	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
ETA B	Pequeno	Convencional	Turbidez AB	2097	46	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-
			Turbidez AT	2098	46	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AB	2086	46	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AT	2098	46	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
ETA C	Pequeno	Convencional	Turbidez AB	2173	47	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Turbidez AT	2174	47	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00003	0,00000
			Cor AB	2162	46	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AT	2161	46	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
ETA D	Pequeno	Convencional	Turbidez AB	3317	58	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Turbidez AT	3325	58	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AB	3278	57	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AT	3286	57	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
ETA E	Grande	Filtração Direta	Turbidez AB	1699	41	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Turbidez AT	1751	42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AB	1699	41	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AT	1751	42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
ETA F	Médio	Dupla Filtração	Turbidez AB	1765	42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Turbidez AT	1765	42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AB	1762	42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
			Cor AT	1762	42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

APÊNDICE 2

Figura A 1 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e *Probability-Probability Plot* para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA A

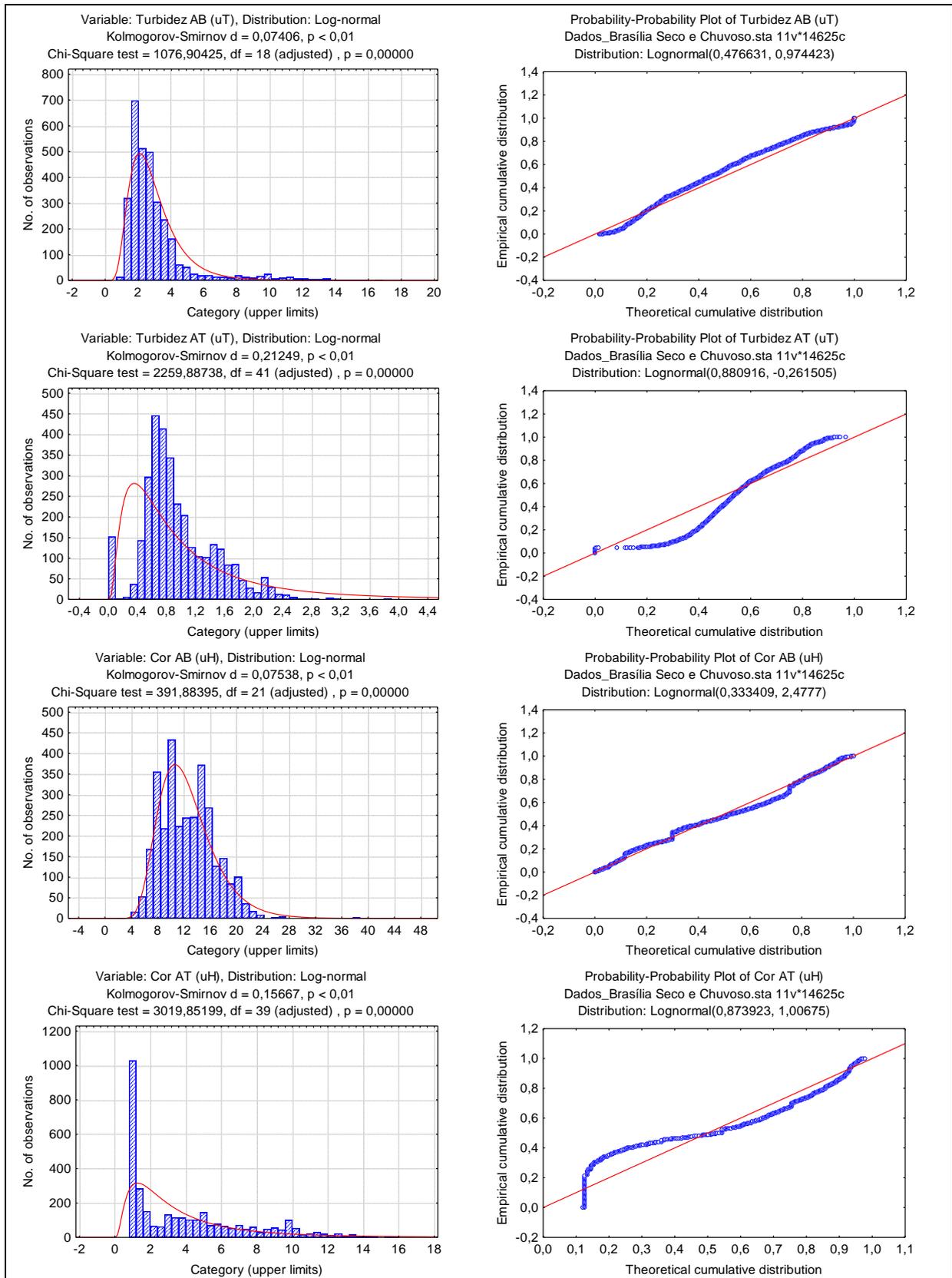


Figura A 2 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA B

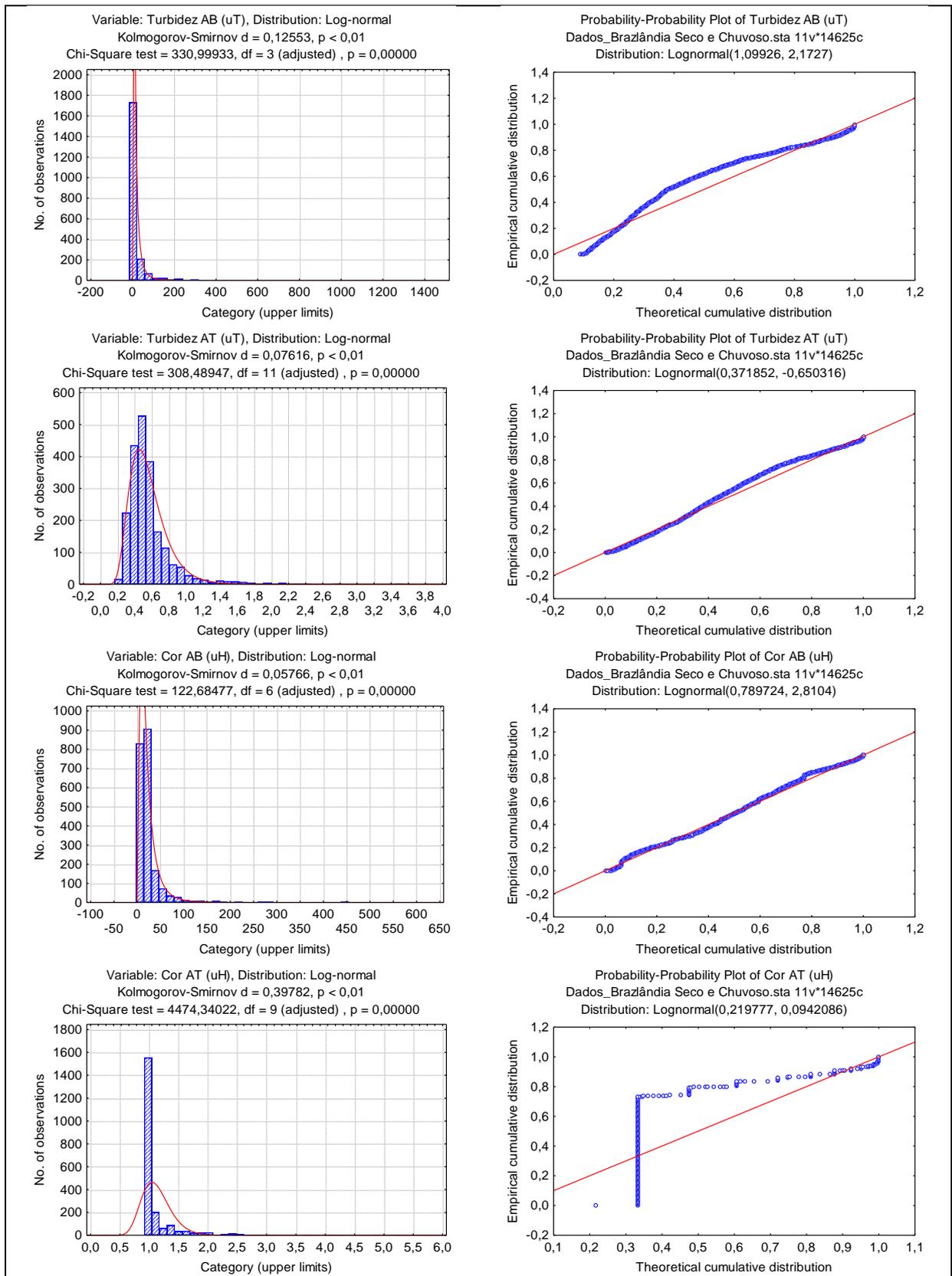


Figura A 3 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA C

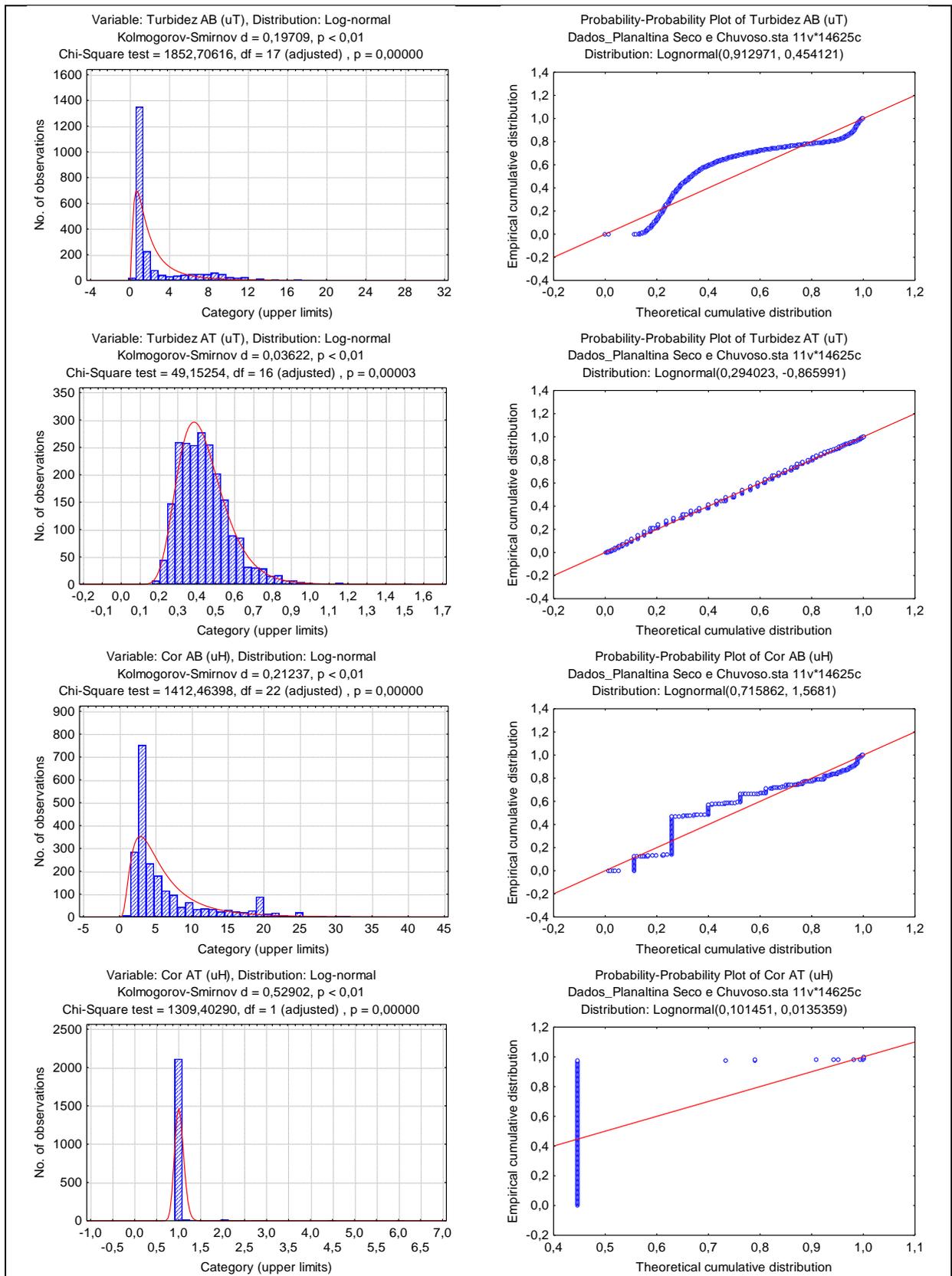


Figura A 4 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA D

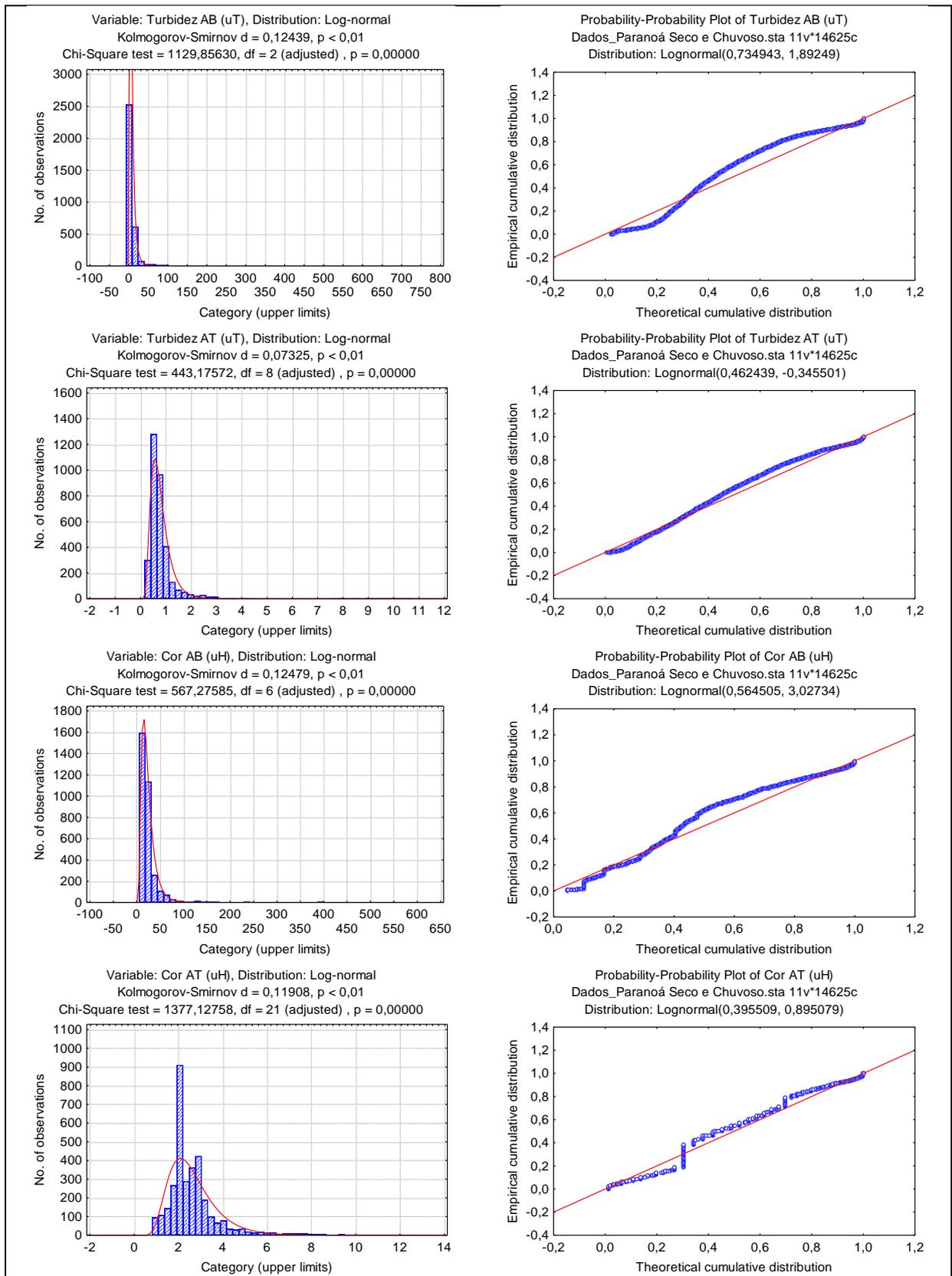


Figura A 5 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA E

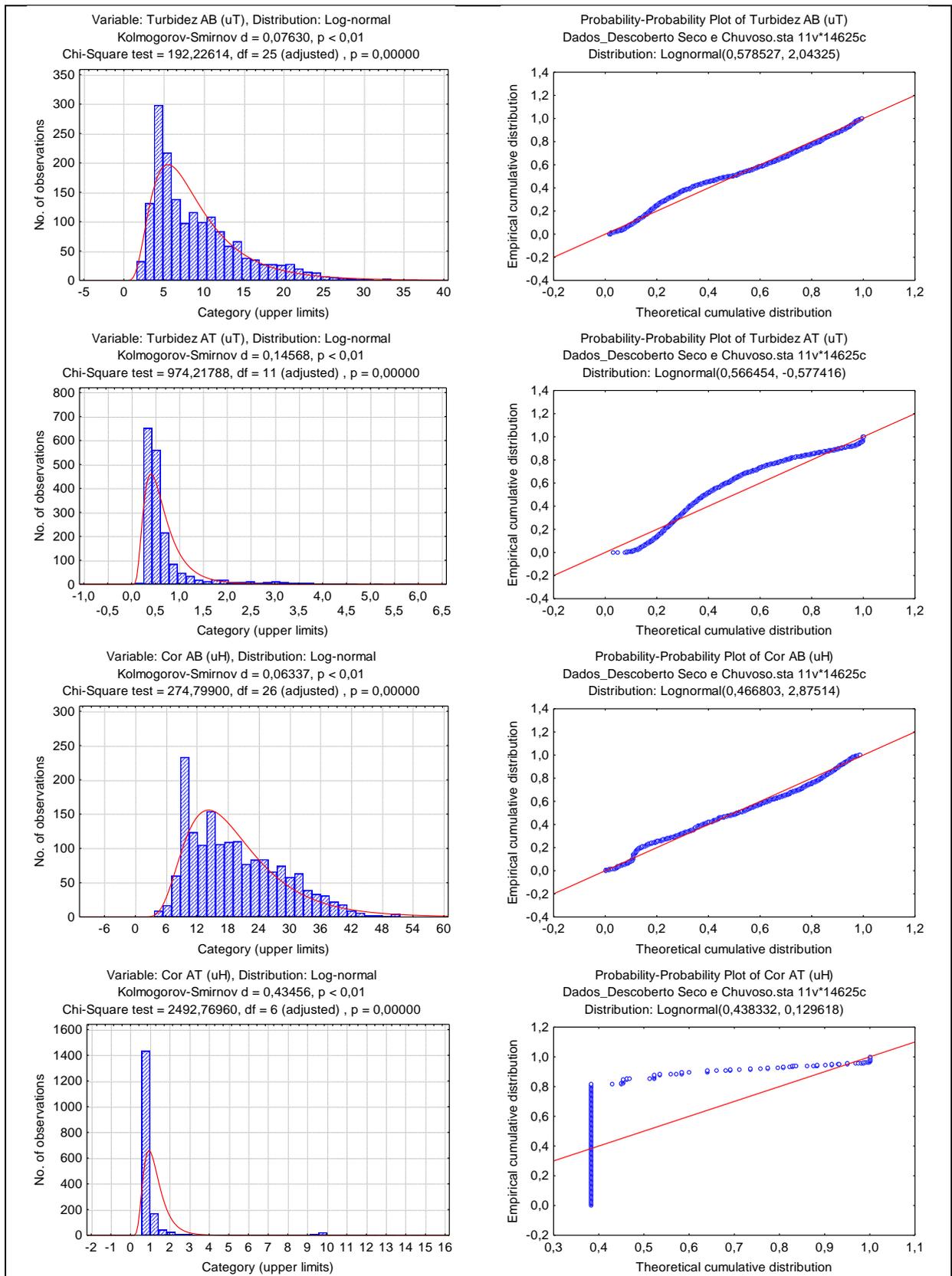


Figura A 6 - Gráficos de distribuição de frequência log-normal e Probability-Probability Plot para os parâmetros de cor e turbidez, da água bruta e tratada, da ETA F

