

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

APLICAÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSO PARA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Guilherme Abreu Souza

Belo Horizonte

2018

**APLICAÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSO PARA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Guilherme Abreu Souza

Guilherme Abreu Souza

**APLICAÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSO PARA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 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
2018

S729a

Souza, Guilherme Abreu.

Aplicação de gráficos de controle estatístico de processo para avaliação de desempenho de estações de tratamento de água [manuscrito] / Guilherme Abreu Souza. – 2018.

x, 126 f., enc.: il.

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira.

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

Anexos: f. 93-126.

Bibliografia: f. 81-92.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Água - Estações de tratamento - Teses. 4. Métodos gráficos - Teses. I. Oliveira, Sílvia Maria Alves Corrêa. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos
Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL
Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br
<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

“Aplicação de Gráficos de Controle Estatístico de Processo Para Avaliação de Desempenho de Estações de Tratamento de Água”

GUILHERME ABREU SOUZA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof.^a SILVIA MARIA ALVES CORRÊA OLIVEIRA

Prof.^a MIRIAM CRISTINA SANTOS AMARAL MORAVIA

Prof. CRISTIANO CHRISTOFARO MATOSINHOS

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento
Coordenador

Versão Final aprovada por -

Prof. Silvia Maria Alves Corrêa Oliveira
Orientadora

Belo Horizonte, 08 de março de 2018.

AGRADECIMENTOS

A Sílvia, minha professora orientadora, agradeço imensamente pela disponibilidade, apoio, orientação e conhecimentos dispensados na realização de todas as etapas deste trabalho.

A Lívia, pelo convite para fazer parte de seu trabalho de doutorado, sempre com ideias enriquecedoras e pelo convívio amigável.

Ao grupo de alunos orientados pela Sílvia, formado pela Jéssyca, Josianne, Aline, Ana Luíza e Carolina, pelas dicas constantes e ajuda nos momentos mais difíceis.

À Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, e, em especial, aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Sanitária – DESA, pela excelência e qualidade proporcionada durante essa jornada.

A Deus, pela oportunidade de crescimento pessoal e por todas as graças concedidas, além do dom da vida.

Aos meus familiares, minha mãe, meu pai e meu irmão pelo apoio em todas as situações, sempre dispostos a ajudar nas dificuldades encontradas.

A Cibele Lana Angelo, pelo carinho, amor, compreensão, apoio e respeito.

Por fim, a você leitor, agradeço pelo interesse em saber mais sobre esse trabalho.

RESUMO

Nesta pesquisa foi avaliado o desempenho e a estabilidade de quinze estações de tratamento de água, por meio da aplicação de gráficos de controle estatístico de processo a partir de dados secundários provenientes de monitoramentos dos parâmetros turbidez, cor aparente, cloro e flúor residuais, referentes aos anos de 2015 e 2016. Analisou-se a água bruta, a água tratada, a eficiência de tratamento, o nível de atendimento aos padrões de potabilidade e a estabilidade das estações em função do porte e da tecnologia de tratamento.

Foi possível constatar que, em geral, as ETAs com tecnologia de tratamento convencional trataram água bruta com valores mais elevados de turbidez e cor em relação às demais ETAs, fato que se refletiu na elevada eficiência de remoção desses parâmetros. Em referência ao cumprimento dos padrões de potabilidade, percebeu-se que, para o parâmetro turbidez, em 2015, apenas uma estação não conseguiu atender ao padrão estabelecido. Contudo, em 2016, apenas seis estações obtiveram êxito em atender plenamente ao padrão mais restritivo. Considerando os parâmetros cor, cloro e flúor, foi observado que todas as quinze estações atingiram 100% de atendimento para a cor e flúor e que treze atingiram 100% de atendimento para o cloro. O estudo comparativo da estabilidade em função do porte indicou que as estações de médio porte obtiveram maior estabilidade, seguidas das estações de pequeno e grande porte. Já a estabilidade, em relação à tecnologia de tratamento, indicou que nas estações de pequeno porte a ETA de filtração direta alcançou maior desempenho, seguida da estação de tecnologia convencional e, por fim, a de dupla filtração. No que concerne ao grupo das ETAs de grande porte, notou-se maior estabilidade para as estações de oxidação com filtração e de filtração direta, seguidas pela ETA de ciclo completo com flotação. Não foi possível confirmar a suposição de que, em virtude das metas progressivas estabelecidas pela Portaria 2914/2011, as eventuais modificações realizadas ao longo de 2015 no processo de tratamento de água aumentariam a eficiência e melhorariam o desempenho em 2016.

ABSTRACT

The research presents results from an evaluation of performance and stability of fifteen water treatment plants (WTP) through the statistical process control charts application considering the data from 2015 and 2016 of turbidity, apparent color, concentrations of residual chlorine and fluoride. The analyzes were performed considering raw water, treatment efficiency, the standards of potability and stability of WTPs, according to the size and treatment technologies.

The results showed that, in general, conventional WTPs presented higher values of raw water turbidity and color compared to other, fact that reflected the efficiency of removal of these parameters, allowing to achieve higher levels of performance. In reference to compliance the potability standards, it was noticed that for turbidity, in 2015, only one station didn't meet the established standard. In 2016, however, only six stations were successful in meeting the most restrictive standard. Considering the parameters color, chlorine and fluorine, it was observed that all the stations reached 100% of attendance for the color and fluoride and, also, 100% of for chlorine, except for two WTPs. Stability evaluation of treatment plants grouped by size showed that the midsize stations were more stable, followed by small and large treatment plants. Considering the stability of the treatment technology, it was verified that in the conjuncture of the small treatment plants, the WTP of direct filtration achieved higher performance, followed by conventional technology and, finally, by double filtration. As for the group of large ETAs, greater stability was observed for the oxidation filtration and direct filtration, followed by the complete cycle with flotation. It was not possible to confirm the hypothesis that, due to the progressive goals established by Brazilian Ordinance 2914/2011, any changes made during the course of 2015 in the water treatment process would increase efficiency and improve performance in 2016.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	IX
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 QUALIDADE DA ÁGUA PARA ABASTECIMENTO HUMANO	4
3.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO HUMANO	6
3.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO	9
3.3.1 <i>Histórico</i>	9
3.3.2 <i>Conceitos</i>	10
3.4 GRÁFICOS DE CONTROLE	12
3.4.1 <i>Fase I e Fase II de aplicação dos gráficos de controle</i>	15
3.4.2 <i>Gráfico de controle e teste de hipótese</i>	15
3.4.3 <i>Subgrupos racionais</i>	17
3.4.4 <i>Tipos de gráficos de controle</i>	17
3.4.5 <i>Condições para aplicação</i>	18
3.4.6 <i>Áreas de aplicação</i>	20
4 METODOLOGIA.....	23
4.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA ANALISADAS	24
4.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE MONITORAMENTO DAS ETAS	25
4.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO PRELIMINAR	26
4.4 AVALIAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	28
4.4.1 <i>Análise da eficiência de remoção dos parâmetros turbidez e cor das estações de tratamento</i>	28
4.4.2 <i>Verificação do atendimento aos padrões de potabilidade</i>	28
4.4.3 <i>Aplicação de gráficos de controle estatístico de processo para analisar a estabilidade das estações de tratamento</i>	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE MONITORAMENTO DAS ETAS	38
5.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO PRELIMINAR	38
5.3 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO	48
5.3.1 <i>Turbidez</i>	48
5.3.2 <i>Cor</i>	49
5.4 AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO AOS PADRÕES DE POTABILIDADE	50
5.4.1 <i>Turbidez</i>	50
5.4.2 <i>Demais parâmetros</i>	54
5.5 APLICAÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO PARA ANALISAR DA ESTABILIDADE DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO	56
5.5.1 <i>Tratamento estatístico da autocorrelação</i>	56
5.5.2 <i>Comparativo da estabilidade em função do porte</i>	61
5.5.3 <i>Comparativo da estabilidade em função da tecnologia de tratamento</i>	69
5.6 PERSPECTIVAS FUTURAS	76
6 CONCLUSÕES.....	78
7 RECOMENDAÇÕES.....	80

REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE I	93
APÊNDICE II.....	100
APÊNDICE III	101
APÊNDICE IV.....	113
APÊNDICE V	114
APÊNDICE VI.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Exemplo de processo produtivo de água tratada.....	11
Figura 3.2 – (a) Presença apenas de causas comuns no processo (b) Presença de causas especiais no processo	12
Figura 3.3 – Exemplo de gráfico de controle	13
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia do trabalho.....	23
Figura 4.2 – Fases de aplicação da metodologia Box-Jenkins	30
Figura 5.1 – <i>Box-Whisker</i> para a turbidez da água bruta em 2015 e 2016 por ETA.....	41
Figura 5.2 – <i>Box-Whisker</i> para a turbidez da água tratada em 2015 e 2016 por ETA	42
Figura 5.3 – <i>Box-Whisker</i> para o parâmetro cor da água bruta em 2015 e 2016 por ETA.....	43
Figura 5.4 – <i>Box-Whisker</i> para o parâmetro cor da água tratada em 2015 e 2016 por ETA....	45
Figura 5.5 – <i>Box-Whisker</i> para o parâmetro cloro da água tratada em 2015 e 2016 por ETA.	46
Figura 5.6 – <i>Box-Whisker</i> para o parâmetro flúor da água tratada em 2015 e 2016 por ETA .	47
Figura 5.7 – Eficiência de remoção do parâmetro turbidez em 2015 e 2016 por ETA.....	48
Figura 5.8 – Eficiência de remoção do parâmetro cor em 2015 e 2016 por ETA.....	49
Figura 5.9 – Percentual de atendimento das ETAs ao padrão de potabilidade nacional do parâmetro turbidez em 2015 (75% das amostras < 0,5 uT).....	51
Figura 5.10 – Percentual de atendimento das ETAs ao padrão de potabilidade nacional do parâmetro turbidez em 2016 (95% das amostras < 0,5 uT).....	51
Figura 5.11 – Percentual de atendimento das ETAs ao padrão de potabilidade dos Estados Unidos do parâmetro turbidez	53
Figura 5.12 – Percentual de atendimento ao padrão de potabilidade do parâmetro cor.....	54
Figura 5.13 – Percentual de atendimento ao padrão de potabilidade do parâmetro cloro.....	55
Figura 5.14 – Percentual de atendimento ao padrão de potabilidade do parâmetro flúor	55
Figura 5.15 – Gráfico de controle aplicado aos dados originais do flúor e aos resíduos (resFlúor) da ETA 14.....	61
Figura 5.16 – Gráficos de controle aplicados à variável “resTurbidez” para comparar a estabilidade em função do porte	62
Figura 5.17 – Período de estabilidade segundo o porte das ETAs considerando a variável “resTurbidez”.....	63

Figura 5.18 – Gráficos de controle aplicados à variável “resCloro” para comparar a estabilidade em função do porte	64
Figura 5.19 – Período de estabilidade segundo o porte das ETAs considerando a variável “resCloro”	66
Figura 5.20 – Gráficos de controle aplicados à variável “resFlúor” para comparar a estabilidade em função do porte	67
Figura 5.21 – Período de estabilidade segundo o porte das ETAs considerando a variável “resFlúor”	69
Figura 5.22 – Gráficos de controle aplicados à variável “resTurbidez” para comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento	70
Figura 5.23 – Período de estabilidade segundo a tecnologia de tratamento das ETAs considerando a variável “resTurbidez”	71
Figura 5.24 – Gráficos de controle aplicados à variável “resCloro” para comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento	72
Figura 5.25 – Período de estabilidade segundo a tecnologia de tratamento das ETAs considerando a variável “resCloro”	73
Figura 5.26 – Gráficos de controle aplicados à variável “resFlúor” para comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento	75
Figura 5.27 – Período de estabilidade segundo a tecnologia de tratamento das ETAs considerando a variável “resFlúor”	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação de padrões de potabilidade do Brasil, Estados Unidos e OMS	5
Tabela 3.2 – Limites de aplicação de diferentes técnicas de tratamento, em função da qualidade da água bruta.....	9
Tabela 3.3 – Pesquisas referentes à aplicação de gráficos de controle à dados de qualidade da água tratada.....	21
Tabela 4.1 – Principais informações das ETAs selecionadas.....	24
Tabela 5.1 – Estações de tratamento avaliadas, período de monitoramento e número de dados de cada parâmetro	38
Tabela 5.2 – Quantidade de <i>outliers</i> identificados por ETA para o parâmetro cloro.....	39
Tabela 5.3 – Quantidade de <i>outliers</i> identificados por ETA para o parâmetro flúor	39
Tabela 5.4 – Estatísticas de erro para a seleção dos modelos das séries de dados das ETAs ..	57
Tabela 5.5 – Modelos ARIMA selecionados para o parâmetro turbidez por ETA	58
Tabela 5.6 – Modelos ARIMA selecionados para o parâmetro cloro por ETA	58
Tabela 5.7 – Modelos ARIMA selecionados para o parâmetro flúor por ETA.....	59
Tabela 5.8 – Número de pontos fora dos limites de controle considerando as variáveis sem o tratamento da autocorrelação e após o tratamento.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AB	Água bruta
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACF	Função de autocorrelação amostral
AIC	Critério de Informações de Akaike
AIQ	Amplitude inter-quartis
ARIMA	Autorregressivos integrados de médias móveis
AT	Água tratada
BIC	Critério de Informações de Bayesiano
CEP	Controle estatístico de processo
CF	Ciclo completo com flotação
CN	Convencional
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CUSUM	<i>Cumulative Sum</i>
CV	Coefficiente de variação
DESA	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
DF	Dupla filtração
DP	Desvio-padrão
ETA	Estação de tratamento de água
EUA	Estados Unidos da América
EWMA	<i>Exponentially Weighted Moving Average</i>
FD	Filtração Direta
GDWQ	<i>Guidelines for Drinking Water Quality</i>
mg/L	Miligrama por litro
LC	Linha central
LIC	Limite inferior de controle
LSC	Limite superior de controle
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma brasileira
OF	Oxidação com filtração
OMS	Organização Mundial de Saúde

PACF	Função de autocorrelação amostral parcial
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
WHO	<i>World Health Organization</i>

1 INTRODUÇÃO

Dentre os serviços do setor de saneamento básico, o sistema de abastecimento de água apresenta uma posição de destaque devido à grande dinâmica desse processo e à associação direta de riscos à saúde humana. No entanto, a distribuição de água com qualidade satisfatória tem se tornado um desafio cada vez maior para as prestadoras de serviços de saneamento em virtude do aumento da demanda, da deterioração da qualidade dos mananciais e do estabelecimento de padrões de potabilidade sucessivamente mais restritivos.

Em geral, tais circunstâncias exigem que ampliações e modificações sejam implementadas nas estações de tratamento de água (ETAs), forçando-as a apresentarem um nível mais elevado de desempenho no processo de tratamento de água (DI BERNARDO & SABOGAL-PAZ, 2008).

Segundo Zhang *et al.* (2012), a análise de desempenho de ETAs torna-se um problema complexo na medida em que a qualidade da água bruta varia e o comportamento de uma unidade dentro da própria estação afeta a performance das etapas seguintes. Essa análise pode ser feita tanto em nível de etapa, considerando a eficiência de cada fase do tratamento, quanto em nível de sistema, com a análise apenas do afluente e do efluente da estação. O primeiro aspecto tende a ser empregado pelas prestadoras de serviço de saneamento, principalmente para controle do tratamento, enquanto a análise global pelas agências reguladoras.

No contexto nacional, a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) é o ponto inicial para avaliação de desempenho de ETAs, uma vez que estabelece valores limites para os parâmetros de potabilidade da água. Entretanto, é necessário saber se o cumprimento desses padrões é suficiente para definir se o processo de tratamento apresenta características de elevada qualidade. Conforme Deming (1990), diversos autores argumentaram que somente atender a limites específicos não satisfaz os requisitos para o enquadramento do processo como de boa qualidade.

Nesse sentido, Montgomery (2009) apresenta uma definição moderna a respeito do termo qualidade: qualidade é inversamente proporcional à variabilidade. Portanto, a melhoria na qualidade é alcançada ao se reduzir a variabilidade indesejada do processo. Como a

variabilidade somente pode ser expressa em termos estatísticos, as técnicas e os métodos estatísticos detêm um papel central no aperfeiçoamento da qualidade dos sistemas produtivos.

Assim, uma das formas de gerir com eficiência e confiabilidade o processo de tratamento de água para abastecimento humano consiste na utilização dos conceitos e ferramentas do controle estatístico de processos (CEP). Por meio desta técnica de monitoramento do processo, pode-se detectar fontes não usuais de variabilidade nos sistemas, o que permite a tomada de ações corretivas para remoção das alterações ou falhas presentes.

Apesar de muito utilizado em controle de processos industriais, o uso de ferramentas de controle estatístico de processo na área de tratamento de água é relativamente esparso e pouco difundido, ainda que alguns autores já tenham utilizado o conceito ao longo dos últimos anos (SMETI *et al.*, 2007a; SMETI *et al.*, 2007b; ARAUJO *et al.*, 2011; HONORATO & COSTANZI, 2013; HENNING *et al.*, 2014).

Então, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho e a estabilidade de estações de tratamento de água, por meio da análise de eficiência de remoção, atendimento aos padrões e aplicação de gráficos de controle estatístico de processo. Ademais, pretende-se verificar as seguintes hipóteses: (i) as ETAs de grande porte apresentam melhor performance em relação aos demais portes, devido à utilização de sistemas automatizados mais complexos e equipamentos de alta precisão, além da provável maior capacitação técnica dos operadores e (ii) as estações de tratamento de água apresentaram maior eficiência, desempenho e estabilidade em 2016, em virtude das metas progressivas estabelecidas pela Portaria 2914/2011 e de eventuais modificações realizadas ao longo de 2015 nos processos de tratamento de água.

Ressalta-se que esse trabalho faz parte de um projeto maior, no qual será desenvolvida uma tese de doutorado com aplicações de diversas outras técnicas estatísticas em um número expressivo de estações de tratamento de água (45 estações).

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o desempenho e a estabilidade de estações de tratamento de água, por meio da análise de eficiência de remoção, atendimento aos padrões e aplicação de gráficos de controle estatístico de processo, a partir de dados secundários provenientes de monitoramentos em escala real.

2.2 *Objetivos específicos*

- Analisar a eficiência de remoção dos parâmetros turbidez e cor das estações de tratamento.
- Verificar o atendimento aos padrões de potabilidade dos parâmetros turbidez, cor, cloro e flúor.
- Comparar a estabilidade das estações de tratamento em função do porte, utilizando gráficos de controle estatístico de processo.
- Comparar a estabilidade das estações de tratamento em função da tecnologia de tratamento, empregando gráficos de controle estatístico de processo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Qualidade da água para abastecimento humano*

A qualidade da água para abastecimento humano pode ser influenciada por diversos fatores. As propriedades da água eventualmente modificam-se em virtude de alterações nos mananciais de captação, por alterações na qualidade dos produtos químicos empregados no tratamento, variabilidade na precisão das bombas de dosagem química e desvios nas rotinas de controle e instrumentação. A água tratada nas ETAs também está suscetível à modificações de suas características no sistema de distribuição, devido a interações microbiológicas, químicas e físicas entre a água e os materiais empregados na etapa de distribuição (CORNWELL *et al.*, 2015).

De acordo com Oliveira (2014), são inúmeras as variáveis internas e externas que podem ser consideradas na avaliação de desempenho de estações de tratamento de água. As variáveis internas compreendem aquelas relacionadas diretamente ao projeto e à operação, de responsabilidade do prestador e passíveis de alteração.

Como exemplos, é possível citar vazões de projeto, tipos de processos e operações unitárias empregados, características físicas das unidades componentes das estações, quadro de funcionários, tipo e quantidade de produtos químicos utilizados, consumo de energia elétrica e geração, tratamento e destinação final de resíduos. Já as variáveis externas estão além do alcance do prestador, sendo de caráter permanente ou que demandam ações de longo prazo para modificação. Incluem vazões de demanda, características dos mananciais e qualidade da água bruta, metas requeridas de qualidade da água tratada (padrão de potabilidade) e preço de insumos.

Dentre as normas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 12216 (ABNT, 1992) trata do projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público. Estão elencadas mais de 150 variáveis quantitativas de projeto e de operação de ETA, somando-se ainda inúmeras variáveis qualitativas referentes à forma, ao posicionamento e ao arranjo de unidades e a outras condições diversas. O desempenho de uma ETA é, portanto, o resultado do efeito conjunto de variáveis internas e externas e das condições e padrões utilizados

na mensuração, podendo ser avaliado, por exemplo, sob a perspectiva da qualidade da água tratada (OLIVEIRA, 2014).

Nesse contexto, o ponto de partida para a avaliação de desempenho de ETAs é o atendimento ao padrão de potabilidade, representado no Brasil pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde. Essa Portaria dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Nos Estados Unidos da América (EUA), a Agência de Proteção Ambiental do país (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), por sua vez, 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).

A Tabela 3.1 apresenta um resumo comparativo dos padrões de potabilidade propostos para o Brasil, Estados Unidos e pela OMS.

Tabela 3.1 – Comparação de padrões de potabilidade do Brasil, Estados Unidos e OMS

Parâmetro	Brasil	Estados Unidos	Organização Mundial da Saúde ^(c)
Turbidez da água filtrada	Máximo de 1,0 uT ⁽¹⁾ 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 ⁽²⁾ a 2 mg L ⁻¹ ⁽³⁾ Máximo de 5 mg L ⁻¹ ⁽⁷⁾	4 mg L ⁻¹ ^(a)	5 mg L ⁻¹
Cor aparente	≤ 15 uH ⁽⁴⁾	≤ 15 uH ^(b)	≤ 15 uH
Fluoreto	0,6 mg L ⁻¹ a 1,0 mg L ⁻¹ ⁽⁵⁾ Máximo de 1,5 mg L ⁻¹ ⁽⁶⁾	2 mg L ⁻¹ ^(b) Máximo de 4 mg L ⁻¹ ^(a)	1,5 mg L ⁻¹
pH	Entre 6 e 9,5 ⁽⁷⁾	6,5 a 8,5 ^(b)	- ^(c)

(1) Estabelecido no anexo III da Portaria 2914;

(2) No sistema de distribuição, estabelecido no artigo 34 da Portaria 2914/2011;

(3) Recomendação no parágrafo segundo do artigo 39 da Portaria 2914/2011;

(4) No sistema de distribuição, estabelecido no anexo X da Portaria 2914/2011;

(5) Intervalo recomendado, quadro 1 da Portaria 635 (BRASIL, 1975);

- (6) No sistema de distribuição, estabelecido no anexo VII da Portaria 2914/2011;
- (7) Intervalo estabelecido no parágrafo primeiro do artigo 39 da Portaria 2914/2011.
- (a) Padrão Primário (National Primary Drinking Water Regulations) (USEPA, 2009);
- (b) Padrão Secundário (National Secondary Drinking Water Regulations);
- (c) Não é considerado como de risco à saúde nos níveis usualmente encontrados na água potável.

Especificamente, no Brasil, destaca-se o parâmetro turbidez, para o qual a Portaria 2914/2011 considerou metas progressivas: 25% das amostras mensais coletadas abaixo de 0,5 uT no primeiro ano, 50% no segundo ano, 75% no terceiro ano e 95% no quarto ano após a promulgação. Dessa forma, como pode ser observado, as legislações que estabelecem padrões de potabilidade estão se tornando cada vez mais rígidas e não se tem conhecimento se as ETAs do país estão tendo êxito em atender aos padrões mais restritivos vigentes.

3.2 Tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano

O objetivo das tecnologias de tratamento é transformar a água captada em água potável e pronta para o consumo humano, atendendo aos padrões estabelecidos. Como destaca Pádua (2006), pode-se dizer que do ponto de vista técnico é possível potabilizar qualquer tipo de água. Porém, os custos envolvidos e o risco sanitário podem ser muito elevados, tornando essenciais as ações de proteção dos mananciais e a escolha assertiva da fonte de captação. Águas superficiais geralmente necessitam de tratamentos mais sofisticados, pois estão mais sujeitas à poluição e alteração de suas características físicas e biológicas. Uma exceção são águas de nascentes, que podem ser consumidas se realizadas apenas a proteção das cabeceiras e a cloração (FUNASA, 2015).

Com relação às tecnologias de tratamento empregadas nas ETAs, 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 & PÁDUA, 2010).

Segundo Libânio (2016), o tratamento convencional predomina no país 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 em substituição à

decantação (se houver presença de algas ou elevada cor na água bruta) e filtração rápida, usualmente descendente (DI BERNARDO *et al*, 2017).

Ainda sobre o tratamento convencional deve-se ressaltar que, como este tratamento possui sempre as unidades de tratamento em série, logo o desempenho de cada uma das unidades pode afetar o funcionamento das demais subsequentes. Assim, é necessário avaliar sempre o tratamento como um todo e não somente em unidades individuais.

Heller e Pádua (2010) 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 (DI BERNARDO *et al*, 2017). A técnica/tecnologia deixa a desejar no quesito flexibilidade operacional e bom desempenho quando há variação da qualidade da água bruta (elevada turbidez e cor verdadeira). Segundo Heller e Pádua (2006), 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).

Nos casos em que o manancial possui uma floração acentuada de algas, nem mesmo a técnica de dupla filtração mostra-se eficiente (LIBÂNIO, 2016). O uso de uma unidade de flotação torna-se necessária para remover as algas, aliada à técnica de filtração direta (CEZAR *et al.*, 2005; ANGELIS, 2007) ou mesmo o tratamento convencional, quando a flotação substitui a decantação.

Por sua vez, a oxidação química é uma outra opção que tem sido utilizada em tratamento de água, sendo que os principais objetivos são o controle do crescimento microbiano, a remoção de cor, o controle de odor, otimização da floculação e coagulação e a remoção de ferro e manganês (MONDARDO, 2004).

Ainda como opção de tratamento, os filtros russos têm funcionamento semelhante aos filtros rápidos de gravidade, deles diferenciando-se pelo sentido ascendente do fluxo, e são lavados, por contracorrente de água. Por realizar a coagulação e a floculação no meio poroso do leito filtrante, este processo de tratamento apresenta sobretudo a vantagem de dispensar floculadores e decantadores prévios. Nessa unidade toda a espessura do leito trabalha no processo de clarificação, e como seus grãos se dispõem em ordem decrescente de tamanho (por força das lavagens em contracorrente), a clarificação se realiza de maneira lógica através de meios de porosidade decrescente no sentido do fluxo (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Já, dentre os processos de separação por membranas para o tratamento de água, destacam-se a microfiltração, a ultrafiltração, a nanofiltração e a osmose inversa, as quais utilizam a pressão hidráulica como força motriz para remover os contaminantes da água (MIERZWA *et al.*, 2008). Segundo Ghiggi (2011), com o aumento da atividade regulatória e o estabelecimento de padrões de potabilidade da água mais restritivos, em paralelo à deterioração da qualidade da água dos mananciais, há necessidade de se considerar tecnologias alternativas para a produção de água potável. Dessa forma, os processos de separação por membranas são reconhecidos pelas indústrias como atrativos para o tratamento de água, por serem compactos e de fácil controle, além de apresentarem alta capacidade de remoção de turbidez, matéria orgânica e microrganismos.

Portanto, diante das diversas tecnologias de tratamento de água existentes, é necessário avaliar criteriosamente vários aspectos, 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; disposição final do lodo; entre outros. Dessa forma, assegura-se que a escolha da tecnologia foi a mais adequada para ser empregada na potabilização da água a ser distribuída para a população.

A Tabela 3.2 apresenta valores máximos de referência dos parâmetros de qualidade que viabilizam tecnicamente a aplicação de alguns tipos de tratamento.

Tabela 3.2 – Limites de aplicação de diferentes técnicas de tratamento, em função da qualidade da água bruta

Tipo de Tratamento	Valores máximos para a água bruta					
	Turbidez (uT)	Cor verdadeira (uH)	Ferro total (mg/L)	Manganês (mg/L)	NMP coliformes/100 mL	
					Totais	Fecais
Filtração lenta	10	5	1,0	0,2	2.000	500
Pré-filtro + filtro lento	50	10	5,0	0,5	10.000	3.000
Filtração em múltiplas etapas	100	10	3,0	0,5	20.000	5.000
Filtração direta ascendente	100	100	15,0	1,5	5.000	1.000
Dupla filtração	200	150	15,0	2,5	20.000	5.000
Filtração direta descendente	25	25	2,5	-	2.500	500
Filtração direta descendente com floculação	50	50	2,5	-	5.000	1.000
Tratamento convencional**	250	*	2,5	-	20.000	5.000

*Depende do valor de turbidez.

**Para águas que excedem os limites do tratamento convencional, este deverá ser complementado com tratamentos especiais, tais como pré-oxidação, ajuste de pH, aplicação de polímeros, utilização de carvão ativado, etc.

Fonte: Pádua (2006).

3.3 Controle estatístico de processo

3.3.1 Histórico

Segundo Montgomery e Runger (2003), o início formal do controle estatístico da qualidade ocorreu em 1924, quando Walter A. Shewhart desenvolveu o conceito de gráficos de controle. Além disso, ao final da década de 1920, Harold F. Dodge e Harry G. Romig elaboraram procedimentos de amostragem estatística como alternativa à inspeção em 100% dos produtos. No entanto, apesar do alto potencial das técnicas desenvolvidas, esses conceitos e métodos não foram imediatamente reconhecidos e empregados pela indústria norte-americana.

Nos Estados Unidos da América, as primeiras aplicações ocorreram na indústria química a partir da década de 1950, restringindo-se a esse setor até o início dos anos 1980. Nesse período, diversas empresas ocidentais descobriram que seus concorrentes japoneses utilizavam sistematicamente métodos de controle da qualidade desde a década de 1960 para a melhoria do processo industrial (ELDIN & HAMZA; SEREL, 2009). Desde 1980, houve, então, uma

intensa expansão no emprego de métodos de controle estatístico da qualidade nos EUA, sendo que o uso dessas técnicas tiveram um papel central no ressurgimento da indústria norte-americana (MONTGOMERY, 2009).

Burr (1976) afirma que a principal justificativa para a utilização do controle estatístico da qualidade no ambiente industrial é a necessidade dos sistemas produtivos trabalharem sempre mais próximos dos limites de tolerância, requerendo maior estabilidade e eficiência na produção.

3.3.2 Conceitos

Taguchi (1981) define um produto ou serviço de qualidade como aquele que atende perfeitamente às especificações, atingindo o valor alvo com a menor variabilidade possível. Montgomery e Runger (2003) fornecem uma definição similar, destacando a melhoria da qualidade como a redução sistemática da variabilidade e a eliminação de resíduos, caracterizados como perda e retrabalho no processo de fabricação, inspeção ou testes, erros em documentos, tais como projetos de engenharia e ordens de pagamento, e maiores custos com garantia e manutenção, devido a maior ocorrência de produtos defeituosos.

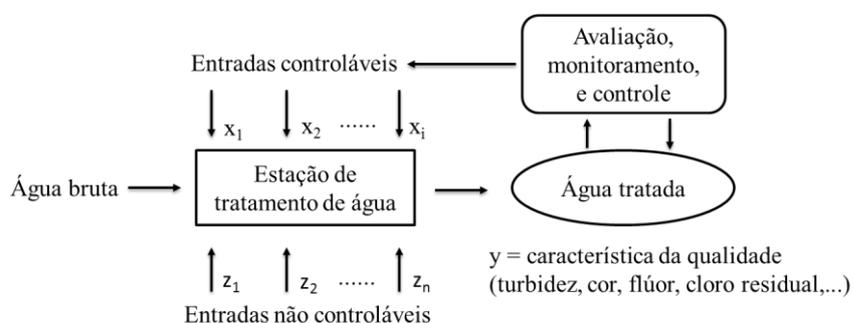
Nesse contexto, o controle estatístico de processo (CEP), ramificação do controle estatístico da qualidade, é uma técnica aplicada à produção industrial que propicia a redução sistemática da variabilidade nas características da qualidade de interesse, e, como consequência, menores custos, maiores produtividades, consumidores mais satisfeitos, e por fim, maiores lucros para as empresas (WOODALL, 2000).

De modo geral, considera-se o processo produtivo como um sistema de componentes interativos, exemplificados por sistemas computacionais, materiais, sistemas de controle e fatores perturbadores (AIZENCHTADT *et al.*, 2008). Takahashi (2011) fornece uma definição simplificada evidenciando o processo como um sistema (máquina) que transforma “entradas” em produtos com determinadas características de qualidade.

Nesse cenário, é possível caracterizar as estações de tratamento de água como processos produtivos, com entradas (água bruta, materiais de tratamento) processadas pela “máquina”

(estrutura física e equipamentos da ETA), tendo como produto final a água tratada (Figura 3.1). Sob esta perspectiva, é viável a aplicação dos métodos de controle estatístico de processo aos dados de monitoramento das ETAs.

Figura 3.1 – Exemplo de processo produtivo de água tratada



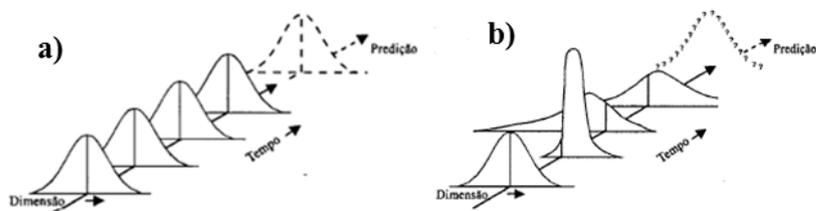
Independentemente de quão bem projetado ou cuidadosamente mantido seja o sistema produtivo, uma certa variabilidade sempre existirá. Essa variabilidade natural ou “ruído de fundo” é o efeito cumulativo de muitas causas pequenas, geralmente inevitáveis. Quando o ruído de fundo for relativamente pequeno, considera-se que o processo apresenta um nível aceitável de desempenho. No âmbito do controle estatístico, essa variabilidade natural é ocasionada por causas comuns, e quando apenas causas comuns estão presentes, o sistema é definido como um sistema estável, sob controle estatístico. Em outras palavras, as causas comuns são inerentes ao processo (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

Já, as causas especiais determinam variabilidade nas características chaves de qualidade do produto e geralmente aparecem de três fontes: o mau funcionamento de máquinas, erro de operadores, flutuações das condições ambientais e variações nas propriedades das matérias primas (NAVIDI, 2010). Tal variabilidade apresenta elevada magnitude quando comparada ao ruído de fundo, representando usualmente um nível inaceitável de desempenho. Um processo que esteja operando na presença de causas especiais é definido como fora de controle.

A Figura 3.2 apresenta dois exemplos de processos produtivos: (a) quando somente causas comuns de variação estão presentes, o produto do processo segue uma distribuição estável ao longo do tempo, sendo, portanto, previsível e controlado; (b) quando causas especiais de

variação estão presentes, o produto do processo não segue uma distribuição estável ao longo do tempo, tornando-se imprevisível e sem controle (WERKEMA, 1995).

Figura 3.2 – (a) Presença apenas de causas comuns no processo (b) Presença de causas especiais no processo



Fonte: Adaptado de Werkema, 1995.

A principal finalidade da aplicação do CEP é, portanto, identificar e eliminar a variabilidade indesejada do processo, por meio da rápida detecção da ocorrência de causas especiais, de forma que a investigação e a posterior ação corretiva possam ser tomadas antes que os problemas se acumulem (MAHESH & PRABHUSWAMY, 2010).

Montgomery e Runger (2003) descrevem o CEP como um conjunto de dispositivos para resolver problemas aplicáveis a qualquer tipo de sistema produtivo, sendo que as principais ferramentas são: apresentação em histogramas ou ramo-e-folhas; folha de controle; gráfico de Pareto; diagrama de causa-e-efeito; diagrama de concentração de defeito; diagrama de dispersão; e gráfico de controle.

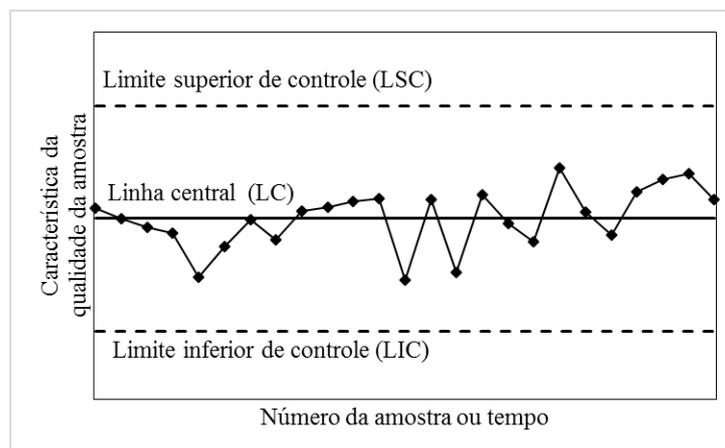
Apesar da importância incontestável de todas as ferramentas que constroem um ambiente propício para a melhoria da qualidade e da produtividade de um sistema, Jarvis (2008) afirma que o gráfico de controle é a principal e mais sofisticada técnica do CEP. Essa ferramenta fornece uma distinção clara entre os tipos de variação presentes no processo, contribuindo para identificar a real necessidade de intervenção no sistema.

3.4 Gráficos de controle

Os gráficos de controle estatístico são construídos a partir de dados de monitoramento de um determinado processo, plotados num sistema de coordenadas cartesianas, em que o eixo das ordenadas é representado por uma dada característica do produto medida ou calculada na

amostra e o eixo das abscissas representado pelo número da amostra ou pelo tempo. A Figura 3.3 apresenta um exemplo de gráfico de controle, o qual apresenta três linhas paralelas ao eixo da abscissa, denominadas linha central (LC), comumente definida a partir do valor médio, o limite superior de controle (LSC) e o limite inferior de controle (LIC) (FOLLADOR, 2010).

Figura 3.3 – Exemplo de gráfico de controle



Segundo Shewhart (1981), os limites de controle são escolhidos de tal forma que quando o processo está sob controle, todos os pontos da amostra posicionam-se entre eles e nenhuma ação é necessária. No entanto, quando um ponto posiciona-se fora dos limites, há uma evidência de que o processo está fora de controle, necessitando de investigações para que as causas especiais sejam encontradas e eliminadas.

A escolha dos limites de controle é uma decisão crítica que deve ser feita ao se construir um gráfico de controle. Para minimizar a ocorrência do risco de um erro tipo I, ou seja, o risco de um ponto localizar-se além dos limites de controle, indicando uma condição fora de controle quando não há causa especial no processo, é necessário mover os limites de controle para mais distante da linha central. No entanto, o alargamento dos limites de controle causa um efeito contrário, aumenta-se o risco de suceder um erro de tipo II, isto é, o risco de um ponto situar-se entre os limites de controle quando o processo está realmente fora de controle estatístico (JURAN, 1992).

Segundo Montgomery e Runger (2003), independentemente da distribuição da característica de qualidade, é uma prática determinar os limites de controle como um múltiplo do desvio-padrão

da estatística traçada no gráfico. O múltiplo escolhido geralmente é o número três (três sigma) para qualquer tipo de gráfico de controle utilizado. Justifica-se o uso de limites de controle de três sigma com base nos bons resultados apresentados na prática.

Dessa forma, os limites de controle posicionados a três-sigma são calculados de forma que, se o processo permanece estável (ausência de causas especiais), a probabilidade de uma amostra situar-se dentro dos limites é de 99,73% e fora dos limites é de 0,27%. Logo, caso a amostra coletada esteja entre os limites de controle (limites de confiança), conclui-se que os parâmetros do processo (média e amplitude) permanecem os mesmos. Caso alguma amostra posicione-se além dos limites de controle, a probabilidade dessa amostra pertencer a esse processo é muito pequena (0,27%), logo há uma forte evidência de que houve alteração no processo (média ou desvio) devido à presença de causas especiais (RIBEIRO & CATEN, 2002).

Os sistemas produtivos, frequentemente, operaram em um estado sob controle, gerando produtos aceitáveis durante períodos relativamente longos de tempo. Eventualmente, no entanto, causas especiais podem ocorrer, resultando na mudança do processo para um estado fora de controle, em que uma grande quantidade da saída do processo não irá atender aos requisitos e padrões estabelecidos. Dessa forma, um objetivo importante do controle estatístico de processo é detectar rapidamente a ocorrência dessas causas especiais ou mudanças no processo, de modo que investigações e ações corretivas possam ser empregadas antes que muitas unidades não conformes sejam produzidas.

Ressalta-se que os gráficos apenas identificam as variações incomuns nos processos, sendo imprescindíveis as ações dos operadores, gerentes ou engenheiros para a eliminação da origem do distúrbio e, somente assim, reduzirem a variabilidade do processo a níveis aceitáveis, uma vez que não é possível eliminar completamente a variabilidade dos sistemas produtivos.

Há, no mínimo, cinco razões para a longa história de utilização de gráficos de controle no setor industrial (MONTGOMERY, 2009):

- São técnicas comprovadas para melhoria da produtividade: programas bem implantados reduzem a perda e o retrabalho, gerando aumento na produtividade, diminuição dos custos e aumento na capacidade do processo.

- São efetivos na prevenção de defeitos: quando o processo mantêm-se sob controle estatístico, certamente as unidades produzidas estarão atendendo aos limites de especificação técnica.
- Previnem ajustes desnecessários no processo: é o melhor instrumento para distinguir ruído de fundo de variações anormais, evitando ajustes desnecessários que podem prejudicar o desempenho do processo.
- Fornecem informação de diagnóstico: o padrão de comportamento dos pontos plotados no gráfico é fonte valiosa de informação para engenheiros e operadores experientes para a implementação de melhorias no processo.
- Fornecem informação de capacidade do processo: oferece informação sobre o valor de importantes parâmetros de processo e sua estabilidade ao longo do tempo, permitindo estimar a capacidade do processo em atender aos limites da especificação técnica.

3.4.1 Fase I e Fase II de aplicação dos gráficos de controle

O uso de gráficos de controle padrão envolve duas etapas de aplicação, denominadas fase I e fase II (BURR, 1976). Na fase I, um conjunto de dados do processo é coletado e analisado de forma exploratória, possibilitando a construção dos limites de controle. Durante esse processo, há um esforço da área de engenharia e do pessoal operacional na identificação e eliminação de causas especiais. Assim, os pontos fora dos limites de controle são excluídos, fazendo-se necessário recalcular os novos limites de controle até o momento em que não haja mais pontos fora dos limites de controle. Tal ajuste é necessário para estabilizar o processo e determinar os limites de controle capazes de monitorar a produção futura de forma confiável.

Na fase seguinte, ou seja, na fase II, com o processo em condições estáveis e representativas do desempenho do processo, utiliza-se o gráfico de controle, para monitorar os dados futuros, comparando-se a estatística das amostras posteriores com os limites de controle já estabelecidos.

3.4.2 Gráfico de controle e teste de hipótese

Conforme mencionado anteriormente, o processo é considerado sob controle estatístico quando o ponto amostral medido ou calculado de determinado sistema está situado entre os limites de

controle e fora de controle em caso contrário. Assim, há uma decisão binária baseada em sim ou não de acordo com o valor da estatística, assemelhando-se à estrutura usada para testar hipóteses.

Alguns autores reconhecem a existência de uma forte relação entre gráficos de controle e testes de hipóteses. Basicamente, o gráfico de controle é um teste da hipótese de que o processo está em controle estatístico. Um ponto situado dentro dos limites é equivalente a confirmar a hipótese de controle estatístico, entretanto, um ponto situado fora dos limites é equivalente a rejeitar a hipótese de controle estatístico.

Box e Kramer (1992) afirmaram que o monitoramento do processo se assemelha a um sistema de testes de hipóteses estatísticas contínuas. Vining e Kowalski (2005), por exemplo, referem-se ao gráfico de controle como um teste de significância infinito, justificando a visão do teste de hipóteses ao mostrar laços entre áreas importantes da estatística, além de fornecerem uma base formal para avaliar as propriedades dos gráficos de controle.

Por outro lado, Deming (1986) defendia fortemente a aplicação de gráficos de controle, mas argumentou contra o uso de testes de hipóteses uma vez que as aplicações práticas na indústria necessitavam de estudos pormenorizados devido à natureza dinâmica dos processos para os quais não há uma população finita ou um quadro de amostragem bem definido. Conforme assinalado por Woodall e Faltin (1996), a teoria matemática formal de testar uma hipótese estatística é de grande importância, mas torna-se imprescindível saber a diferença entre a teoria formal de testar uma hipótese estatística e a teoria empírica do teste de hipóteses empregada na operação de controle estatístico. Na aplicação e operação dos gráficos de controle é necessário testar a hipótese de que a amostra de dados foi obtida sob condições aleatórias.

Algumas divergências sobre a relação entre controle de gráficos e teste de hipóteses resulta da falha em distinguir a fase I e a fase II de aplicação do gráfico de controle. A abordagem teórica para a aplicação dos gráficos de controle na fase II assemelha-se ao teste repetido de hipóteses, uma vez que se assume como conhecida a forma da distribuição, assim como os valores dos parâmetros de controle. Desse modo, apenas a ocorrência de causa especial resultaria em uma mudança substancial no parâmetro de interesse. Em alguns casos, há equivalência matemática.

No entanto, nas aplicações práticas na fase I, o gráfico de controle assemelha-se mais a uma ferramenta de análise exploratória dos dados (WOODALL, 2000).

Como explicam Hoerl e Palm (1992), as regras do gráfico de controle são usadas para detectar desvios do modelo, incluindo os próprios pressupostos do modelo. Assim, a visão de que o gráfico de controle é equivalente ao teste de hipóteses é uma simplificação excessiva, visto que a aplicação de gráficos de controle na parte inicial (fase I) pode falhar, em decorrência dos dados não atenderem aos pressupostos de distribuição normal e independência.

3.4.3 Subgrupos racionais

Uma ideia fundamental no uso de gráficos de controle é coletar dados amostrais de acordo com o que Shewhart denominou de subgrupo racional (GILBERT, 1987). Um subgrupo racional é uma amostra em que todos os itens foram produzidos sob condições onde somente causas comuns são responsáveis pela variação de um determinado processo. Causas especiais de variações não devem ocorrer dentro de um subgrupo racional, somente entre subgrupos.

Deve-se garantir que as observações dos subgrupos racionais são do mesmo lote de produção, com matéria-prima do mesmo fornecedor e produzido na mesma máquina. Assegura-se, assim, que os valores das amostras são homogêneos quanto a origem. Dessa forma, os limites de controle representarão fronteiras para toda a variabilidade comum e não à variabilidade especial, uma vez que a variabilidade natural tenderá a gerar pontos dentro dos limites de controle e a variabilidade especial fora dos limites de controle.

3.4.4 Tipos de gráficos de controle

Existem diversos tipos de gráficos de controle aplicados a processos. A escolha do tipo de gráfico deve considerar o tamanho das observações, a periodicidade da coleta das observações e o tipo de informações analisadas. São classificados em dois grandes grupos: gráficos de controle para variáveis (característica de qualidade é mensurada em uma escala quantitativa) e gráficos de controle para atributos (característica de qualidade é mensurada em uma escala qualitativa). Assim, segundo Spiegel e Stephens (2008), os termos variáveis e atributos estão associados à característica dos dados coletados no sistema.

Os gráficos para variáveis comumente utilizados são os gráficos de controle de Shewhart, os gráficos de controle de média móvel exponencialmente ponderada (EWMA) e os gráficos de controle de soma cumulativa (CUSUM). Todos os tipos de gráficos de controle têm algumas características comuns, tais como a linha central, correspondente ao desempenho médio, e os limites de controle representando à faixa de variação esperada no processo.

A principal diferença entre esses tipos de gráficos consiste no fato dos gráficos de Shewhart utilizarem apenas a informação contida na última observação plotada, isto é, ignora qualquer informação fornecida pela sequência inteira dos dados, tornando esse tipo de gráfico insensível a mudanças de pequena magnitude no processo. Já os gráficos EWMA e CUSUM são considerados gráficos de controle com memória, visto que utilizam os dados das amostras precedentes para avaliar a estabilidade do processo, tornando-os mais eficazes na detecção de pequenas mudanças na média do sistema produtivo (CHAMP & WOODALL, 1987; MONTGOMERY, 2009).

O gráfico de controle EWMA foi introduzido pela primeira vez por Roberts (1959), com a finalidade de detectar pequenas mudanças de deslocamento na média do processo. Esse tipo de gráfico é usado extensivamente nas situações de modelagem em séries temporais e em previsão (BOX *et al.*, 1994; MONTGOMERY & MASTRANGELO, 1991). Segundo Montgomery (2009), seu desempenho é aproximadamente equivalente ao CUSUM, com a vantagem de ser mais fácil de configurar e operar.

3.4.5 Condições para aplicação

Os gráficos de controle típicos (Shewhart, EWMA, CUSUM) são projetados e avaliados partindo-se do pressuposto de que as observações de determinada característica de qualidade são independentes ao longo do tempo e seguem a distribuição normal. No entanto, nem sempre estas suposições são válidas, fazendo-se necessário buscar novas metodologias que englobem uma classe maior de situações práticas (MONTGOMERY, 2009).

Maragah e Woodall (1992) afirmam que, em diversos processos industriais, há elevada autocorrelação nas características de qualidade do produto. O termo autocorrelação é usado para descrever a correlação de uma variável em um ponto no tempo com observações dessa

mesma variável em tempos prévios. Como a autocorrelação afeta as estimativas de variabilidade do processo, são identificadas causas especiais inexistentes na prática e não detecção de causas especiais que realmente estão presentes, implicando em uma alta taxa de falsos positivos e/ou falsos negativos. Essa situação prejudica o desempenho dos gráficos de controle, tornando-os ineficazes na redução sistemática da variabilidade no sistema de interesse.

Portanto, com relação à aplicação de gráficos de controle a dados que violam a suposição da independência, são propostas duas técnicas. A primeira abordagem baseia-se na utilização das observações originais empregando gráficos de controle com os limites de controle ajustados considerando a autocorrelação, a exemplo dos trabalhos elaborados por Vasilopoulos e Stamboulis (1978), Wardell *et al.* (1994), Zhang (1998), Van Brackle e Reynolds (1997), Lu e Reynolds (2001). Esta abordagem é aconselhável apenas em situações com pequenos valores de autocorrelação.

A segunda e principal técnica foi introduzida pela primeira vez por Alwan e Roberts (1988) e utiliza modelagem de séries temporais para ajudar a detectar a existência de variação sistemática e obter uma classificação mais precisa de causas especiais. O processo autocorrelacionado é delineado com um modelo autorregressivo integrado de médias móveis (ARIMA), tendo como finalidade examinar a variabilidade sistemática presente no processo.

A metodologia Box-Jenkins (BOX *et al.*, 1994) permite encontrar um modelo ARIMA apropriado à cada conjunto de dados autocorrelacionado. Os modelos estatísticos lineares ARIMA são empregados para análise de séries temporais e apresentam como premissa básica o fato da série temporal ser gerada por um processo estocástico cuja natureza pode ser representada através de um modelo. Segundo a sistemática dessa metodologia, os modelos ARIMA descrevem tanto o comportamento estacionário como o não estacionário, tornando essa metodologia de modelagem flexível, uma vez que as previsões são feitas a partir dos valores passados e correntes das séries.

Posteriormente ao ajuste de um modelo de séries temporais, os gráficos de controle típicos são aplicados aos resíduos gerados, definidos como a diferença entre os valores obtidos pelo modelo e os valores efetivamente observados. Essa técnica foi aplicada por diversos autores:

Montgomery e Mastrangelo (1991), Wardell *et al.* (1994), Runger *et al.*, (1995), Lu e Reynolds (2001) e Smeti *et al.* (2007b).

3.4.6 Áreas de aplicação

Segundo Montgomery (2009), há muitas aplicações bem sucedidas do CEP no ambiente das indústrias, além de diversas outras aplicações exitosas no ambiente não industrial e em serviços. No entanto, destaca-se que as aplicações fora da indústria exigem maior flexibilidade no uso em razão dos sistemas não industriais tenderem a possuir uma concepção mais complexa de funcionamento do processo.

Para além das indústrias, cita-se como exemplo a utilização dos gráficos de controle em áreas como administração, epidemiologia, detecção de fraudes, cuidados de saúde, segurança, gestão de pessoal, monitoramento de resíduos, atletismo, genética, finanças, entre outras aplicações (MORAIS & PACHECO, 2006).

O emprego de gráficos de controle em questões relativas ao saneamento iniciou-se no setor de tratamento de esgotos, muito embora seja ainda uma utilização relativamente dispersa (BERTHOUEX *et al.* 1978; BERTHOUEX & HUNTER, 1975, 1981 e 1983; BERTHOUEX & FAN, 1986; VAUGHAN & RUSSEL, 1983; AIZENCHTADT *et al.*, 2008; OLIVEIRA & VON SPERLING, 2009). Em geral, esses autores propuseram a utilização de gráficos de controle para identificação de alterações, como tendências, picos ou distúrbios, no comportamento de dados efluentes de estações de tratamento de esgotos. Tais gráficos eram utilizados como fonte de informação para melhoria das condições de operação do processo.

Por sua vez, a aplicação dessa ferramenta na área de tratamento de água para abastecimento humano justifica-se na medida em que 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 seriam 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.

Nesse sentido, são encontrados trabalhos mais recentes referentes à aplicação de gráficos de controle na área de tratamento de água, tanto no cenário nacional quanto internacional. A Tabela 3.3 apresenta trabalhos publicados relacionados a esse tema, expondo o escopo do estudo, os parâmetros e quantitativos de dados utilizados, além da conclusão principal.

Tabela 3.3 – Pesquisas referentes à aplicação de gráficos de controle à dados de qualidade da água tratada

Fonte	Escopo do estudo	Parâmetros/ N° de dados	Conclusão principal
Smeti <i>et al</i> (2007a)	Aplicação do controle estatístico de processo para melhoria da qualidade da água tratada. Foi utilizado o principal reservatório de água tratada de Atenas, Grécia.	Turbidez = 363 Cloro res = 359 Alumínio = 359	Influência da presença de autocorrelação. Os parâmetros atendem à legislação da Grécia e as técnicas de controle estatístico de processo podem contribuir para melhorar ainda mais a qualidade da água.
Smeti <i>et al</i> (2007b)	Aplicação de gráficos de controle para avaliação da toxicidade da água tratada. Foram utilizados três reservatórios de água tratada de Atenas, Grécia.	Toxicidade, 163 dados para 2 reservatórios e 91 dados para o terceiro.	Utilizou-se o modelo ARIMA para superar a presença de autocorrelação. Dois reservatórios estavam sob controle estatístico e o terceiro apresentou apenas três pontos fora dos limites. O método baseado em séries temporais captura a estrutura dinâmica dos dados e fornece gráficos úteis para a melhoria da qualidade da água.
Araujo <i>et al</i> (2011)	Aplicação de gráficos de controle para monitoramento estatístico da turbidez da água potável. ETA Cubatão Joinville, SC (1.500 l/s).	Turbidez = 37	Verificou-se igualmente para os três tipos de gráficos aplicados que sem o tratamento da autocorrelação ocorrem muitos alarmes falsos. Após aplicação do modelo ARIMA, o processo apresentou apenas quatro pontos fora de controle.
Honorato e Costanzi (2013)	Aplicação técnicas de controle estatístico na ETA de Londrina, PR (1.250 l/s).	Turbidez e pH, média mensal referente à 2007, 2008 e 2009.	Com relação ao parâmetro turbidez, a ETA estava sob controle estatístico e apenas um ponto do parâmetro pH estava fora dos limites de controle.
Henning <i>et al</i> (2014)	Aplicação de gráficos de controle estatístico de processo para avaliar a qualidade da água potável. ETA Cubatão Joinville, SC (1.500 l/s).	Turbidez = 48 Cloro res = 48	As aplicações de gráfico de controle com limites alargados e aos resíduos usando o modelo ARIMA mostraram-se adequadas para monitorar estes parâmetros. Oito pontos fora dos limites de controle para a turbidez. Processo estava sob controle estatístico para o cloro residual.

Nota-se, nos trabalhos mencionados, a necessidade de tratar a questão da autocorrelação presente nos dados relativos à qualidade da água tratada para consumo humano, utilizando a modelagem de série temporal. Além disso, os autores reforçam que as técnicas de controle estatístico de qualidade podem ser usadas para monitoramento do processo em ETAs, as quais permitem detectar causas de variabilidade, implementar ações corretivas e melhorar a qualidade da água tratada a ser distribuída para a população.

Apesar dos trabalhos citados anteriormente, percebe-se que há lacunas a serem preenchidas no que tange à utilização de gráficos de controle ao setor de tratamento de água, especificamente em relação a utilização dessa ferramenta em uma grande massa de dados, analisando tanto o porte quanto a tecnologia de tratamento das estações de tratamento de água. Ressalta-se, ainda, a atualidade dos dados, que se referem aos anos de 2015 e 2016, além da dificuldade de acesso e obtenção das informações de monitoramento de ETAs, tornando os resultados deste trabalho de grande relevância para a área.

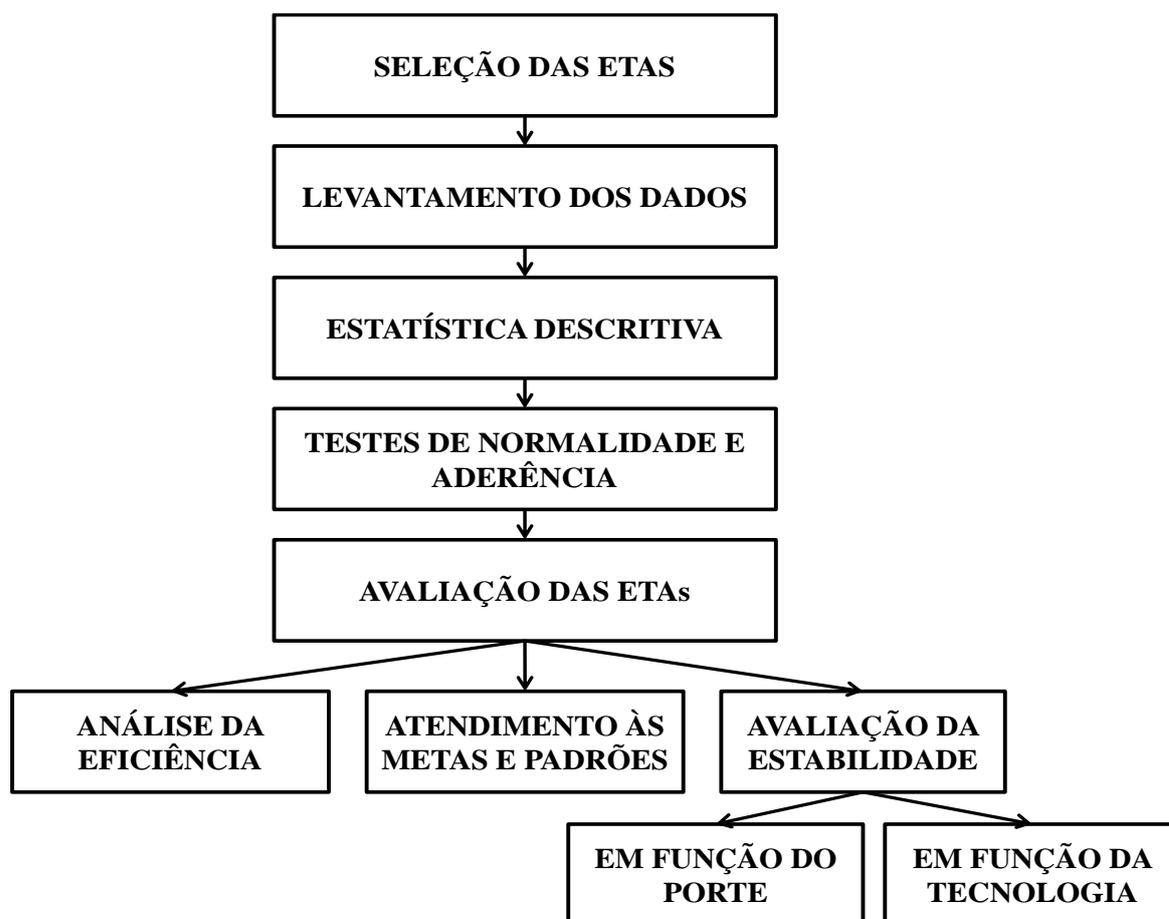
4 METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada a coleta de dados das características da água bruta e da água tratada de quinze estações de tratamento de água. Os dados obtidos referem-se aos parâmetros turbidez, cor aparente, cloro e flúor residuais.

Em seguida, foi efetuada uma análise estatística preliminar para auxiliar na identificação de valores extremos, dados inconsistentes ou falhas de preenchimento, além de testes de normalidade e testes de aderência. Por fim, analisou-se o desempenho individual das ETAs, considerando a água bruta e a água tratada, o atendimento aos padrões de potabilidade e comparou-se a estabilidade das ETAs em função do porte e da tecnologia de tratamento.

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma da estrutura do trabalho a fim de auxiliar a compreensão.

Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia do trabalho



4.1 Estações de tratamento de água analisadas

Nesta pesquisa foram selecionadas quinze estações de tratamento de água operadas por um prestador de serviços de saneamento da mesma unidade federativa do Brasil. Ressalta-se que, por solicitação do prestador, foi mantido o sigilo das respectivas estações, as quais não foram identificadas por seus nomes verdadeiros, mas sim por códigos. A Tabela 4.1 apresenta as principais informações das ETAs.

Tabela 4.1 – Principais informações das ETAs selecionadas

Nome da estação	Vazão de projeto (l/s)	Vazão média de operação (l/s)	Tipo de manancial	Porte da estação	Tecnologia de tratamento	Nome de referência da ETA
ETA 01	50	25	Lótico	Pequeno	Convencional	ETA01-P-CN
ETA 02	35	16	Lêntico	Pequeno	Convencional	ETA02-P-CN
ETA 03	80	44	Lótico	Pequeno	Convencional	ETA03-P-CN
ETA 04	500	414	Lêntico	Médio	Convencional	ETA04-M-CN
ETA 05	180	104	Lótico	Médio	Convencional	ETA05-M-CN
ETA 06	425	181	Lótico	Médio	Convencional	ETA06-M-CN
ETA 07	635	561	Lêntico	Grande	Convencional	ETA07-G-CN
ETA 08	4.200	4.415	Lêntico	Grande	Convencional	ETA08-G-CN
ETA 09	7.900	6.481	Lótico	Grande	Convencional	ETA09-G-CN
ETA 10	100	56	Lêntico	Pequeno	Dupla Filtração	ETA10-P-DF
ETA 11	60	32	Lêntico	Pequeno	Filtração direta	ETA11-P-FD
ETA 12	55	31	Lótico	Pequeno	Convencional	ETA12-P-CN
ETA 13	840	739	Subterrâneo	Grande	Oxidação com filtração	ETA13-G-OF
ETA 14	3.000	380	Lêntico	Grande	Filtração direta	ETA14-G-FD
ETA 15	1.500	777	Lêntico	Grande	Convencional/Flotação	ETA15-G-CF

O nome de referência das ETAs foi escrito segundo códigos de identificação, adicionando ao número da ETA, as siglas do porte da estação (P – pequeno porte; M – médio porte; G – grande porte) e das cinco tecnologias de tratamento (CN – convencional; DF – dupla filtração; FD – filtração direta; OF – oxidação com filtração; CF – ciclo completo com flotação). Assim, facilita-se o entendimento do leitor na análise das estações.

A primeira fase consistiu em analisar o desempenho e o atendimento aos padrões de potabilidade de todas as ETAs. Já a fase posterior baseou-se na comparação da estabilidade do

processo de tratamento das estações, considerando tanto o porte, quanto a tecnologia de tratamento.

O porte das estações foi determinado considerando a vazão de projeto das estações e pelo critério preconizado pela DN COPAM 74/2004 (MINAS GERAIS, 2004): pequeno porte - estações com vazão superior a 20 L/s e inferior a 100 L/s; médio porte - vazão entre 100 L/s e 500 L/s; grande porte - vazão superior a 500 L/s. Considerando essa classificação, foram selecionadas três estações de cada porte, isto é, três estações de pequeno porte (ETAs 01, 02 e 03), três estações de médio porte (ETAs 04, 05 e 06) e mais três estações de grande porte (ETAs 07, 08 e 09), resultando em um total de nove ETAs para o estudo comparativo da estabilidade em função da capacidade de tratamento.

Com o intuito de obter uma base comum para a comparação dos resultados, destaca-se que as nove estações escolhidas empregam a mesma tecnologia de tratamento, nesse caso, a tecnologia de tratamento convencional. Esse tipo de tratamento predomina no país devido, principalmente, às características da água bruta, a qual é influenciada fortemente pela variação sazonal, demandando um processo mais robusto.

Com o objetivo de avaliar e comparar a estabilidade das estações de tratamento em função da tecnologia de tratamento foram selecionadas mais seis ETAs. Definiu-se uma estação que emprega a tecnologia de tratamento dupla filtração (ETA 10), uma de filtração direta (ETA 11) e outra convencional (ETA 12) classificadas como pequeno porte. Outras três ETAs definidas como de grande porte foram selecionadas também, uma que emprega oxidação com filtração (ETA 13), outra de filtração direta (ETA 14) e mais uma de ciclo completo com flotação (ETA 15).

4.2 Levantamento dos dados de monitoramento das ETAs

As séries históricas de dados de monitoramento das ETAs referem-se aos anos de 2015 e 2016. As informações obtidas representam os dados efetivamente medidos, originados do monitoramento realizado pelo próprio prestador e consistem dos parâmetros turbidez, cor aparente, concentrações de cloro e flúor residuais. Dentre os diversos parâmetros existentes nos padrões de potabilidade, foram escolhidos aqueles mencionados previamente em virtude da

larga utilização em trabalhos de análise de ETAs (SMETI *et al.*, 2007a; SMETI *et al.*, 2007b; ROCHA *et al.*, 2009; MAKUNGO *et al.*, 2011; ARAUJO *et al.* 2011; ALI *et al.*, 2012; HONORATO & COSTANZI, 2013; HENNING *et al.*, 2014; MELO, 2014) e pela anuência do prestador em fornecê-los. Além disso, foram obtidas as informações de vazão das ETAs.

A apresentação dos dados das diversas estações foi padronizada de forma a facilitar a utilização e consulta, com a organização em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel), em ordem cronológica de monitoramento.

A turbidez efluente foi analisada de forma destacada, em razão de ser o parâmetro rotineiramente monitorado pela quase totalidade das estações de tratamento no Brasil e no mundo (MELO, 2014). Ressalta-se, ainda, que como a turbidez relaciona-se à contaminação orgânica e inorgânica da água, podendo indicar a presença de microrganismos como protozoários e outros patogênicos, é recomendado que seus valores sejam tão baixos quanto possível (PÁDUA & FERREIRA, 2006), demonstrando a sua importância nas premissas estabelecidas pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011), com as respectivas metas progressivas.

Com relação à cor, destaca-se que as ETAs, em geral, não realizam o monitoramento da cor verdadeira, sendo necessário avaliar o desempenho na remoção de partículas dissolvidas por meio da cor aparente. Embora teores mais significativos de cor dificultem a manutenção da concentração residual de cloro nas redes de distribuição e favoreçam a formação de subprodutos da cloração, motivos estéticos já justificam o limite de 15 uH estabelecido pela Portaria 2914/2011. Valores acima deste limite são facilmente perceptíveis, levando à rejeição da água fornecida pela população abastecida.

A avaliação de desempenho contemplou também as concentrações de cloro e flúor residuais, responsáveis, respectivamente, por minimizar a presença de organismos microbiológicos na água distribuída e reduzir a incidência da cárie dentária na população abastecida.

4.3 Tratamento estatístico preliminar

O tratamento estatístico preliminar dos dados consistiu na identificação de valores extremos (*outliers*), dados inconsistentes ou falhas de preenchimento. Valores extremos são observações

atípicas ou infrequentes, que parecem não seguir a distribuição característica do resto dos dados. Eles podem refletir propriedades reais do fenômeno em estudo ou serem consequências de erros de medição ou outras anomalias que não podem ser modeladas.

Foi empregada a técnica proposta por Naghettini e Pinto (2007) para a identificação de *outliers*, a qual consiste em definir a amplitude interquartis (AIQ), dada pela diferença entre Q_{75} e Q_{25} , respectivamente, terceiro e primeiro quartis. Foi considerado como valor extremo superior todo valor maior que $Q_{75} + 1,5AIQ$ e como inferior todo valor menor que $Q_{25} - 1,5AIQ$. A investigação da presença de *outliers* se restringiu aos parâmetros cloro e flúor. Não foi avaliada a presença de valores extremos para os parâmetros turbidez e cor aparente das águas bruta e tratada devido à forte influência de eventos pluviométricos, resultando em valores extremos, em geral, pontuais e de ocorrência sazonal, os quais não podem ser descartados da análise.

Em seguida, foi desenvolvida a análise descritiva dos dados, com os cálculos do número de dados disponíveis, média, mediana, mínimo, máximo, percentis 10, 25, 75 e 90%, desvio-padrão, coeficiente de assimetria e curtose, além do coeficiente de variação. Com o intuito de auxiliar na interpretação da estatística descritiva, foram construídos gráficos do tipo *box-whisker* para cada parâmetro.

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.

Foi aplicado, também, o teste de hipóteses não paramétrico (Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido de teste de comparações múltiplas), ao nível de 5% de significância, para avaliar a influência do tipo de manancial na qualidade da água bruta em relação à turbidez da água bruta e a existência de diferenças significativas entre as estações avaliadas.

4.4 Avaliação das estações de tratamento de água

4.4.1 Análise da eficiência de remoção dos parâmetros turbidez e cor das estações de tratamento

A análise de eficiência de remoção contemplou os parâmetros turbidez e cor, em virtude das estações de tratamento realizarem o monitoramento desses parâmetros tanto para a água bruta quanto para a água tratada. Por outro lado, como os parâmetros cloro e flúor são produtos introduzidos durante o tratamento, o monitoramento é realizado apenas para a água tratada, impossibilitando essa análise.

4.4.2 Verificação do atendimento aos padrões de potabilidade

Nesta etapa foi verificado o atendimento aos padrões dos parâmetros turbidez, cor, residual de cloro e flúor referentes à Portaria 2914/2011. Conforme explicitado previamente, o parâmetro turbidez foi analisado de forma mais detalhada, sendo avaliado além da Portaria 2914/2011, o atendimento ao padrão da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Destaca-se a utilização dos padrões da USEPA como referência neste estudo por ser a organização pioneira em estipular parâmetros de potabilidade, além de ser uma das legislações mais restritivas em âmbito mundial.

A Tabela 3.1 apresentada, anteriormente, resume os padrões de potabilidade estabelecidos pelo Brasil, pela USEPA e pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para os parâmetros. Como os valores definidos pela OMS são, em geral, mais tolerantes, optou-se por não utilizá-los neste trabalho.

4.4.3 Aplicação de gráficos de controle estatístico de processo para analisar a estabilidade das estações de tratamento

Com o propósito de comparar a estabilidade e avaliar o desempenho e a confiabilidade das estações de tratamento de água em função do porte e da tecnologia de tratamento, foram empregados os gráficos de controle estatístico de processo. Ressalta-se que essa análise envolveu apenas a água tratada, uma vez que o objetivo foi avaliar a estação de tratamento de

água como um sistema produtivo, a qual apresenta como produto final a água tratada a ser distribuída para o abastecimento da população.

Como o uso de gráficos de controle envolve duas etapas, denominadas fase I e fase II, foi necessário executar a fase I para os dados do ano de 2015 e a fase II para os dados de 2016. Esses períodos foram selecionados tendo em vista as metas progressivas estabelecidas pela Portaria 2914/2011, sendo o final do ano de 2015 o limite para as ETAs se adequarem ao padrão mais restritivo do parâmetro turbidez (95% das amostras mensais coletadas $< 0,5$ uT). Dessa forma, entende-se que as eventuais modificações no processo de tratamento de água com a finalidade de aumentar a eficiência e melhorar o desempenho foram realizadas ao longo de 2015. Assim, em 2016, supõe-se que o processo esteja mais estabilizado, atendendo ao limite mais restritivo do padrão de potabilidade.

Os conceitos das fases I e II são utilizados plenamente nos processos industriais, em virtude do monitoramento em tempo real da produção, permitindo que adequações e melhorias sejam realizadas assim que as instabilidades ocorram. No entanto, tendo em vista a utilização de dados de origem secundária e a impossibilidade de modificar o desempenho do processo de tratamento já transcorrido, não foi possível aplicar plenamente os conceitos das fases, especificamente, no que concerne à exclusão dos pontos fora dos limites de controle da fase I.

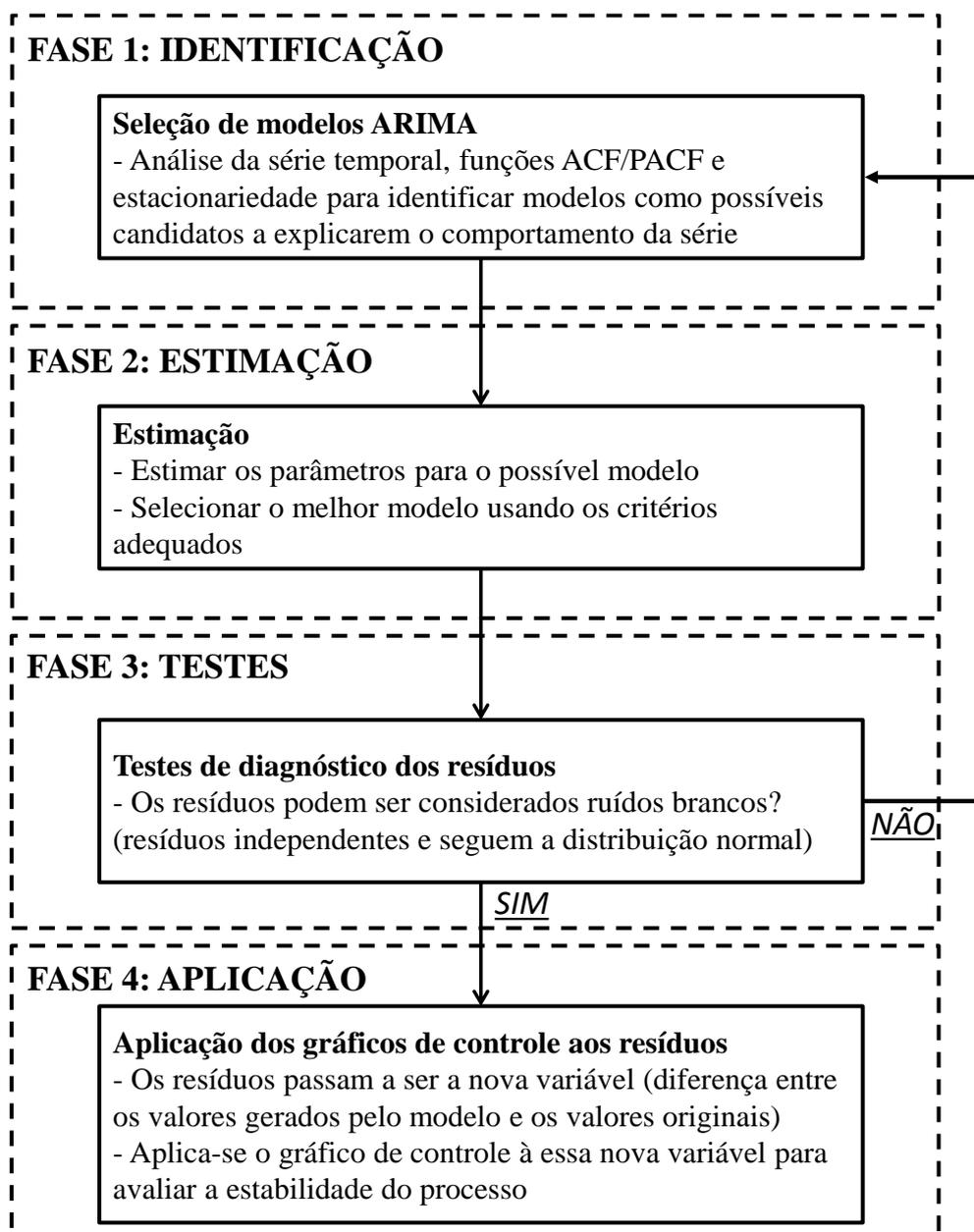
Conforme evidenciado previamente, os dados de monitoramento das estações de tratamento apresentam elevada autocorrelação. A autocorrelação presente nos parâmetros estudados nesta pesquisa é determinada pela elevada frequência de monitoramento, exigida pela Portaria 2914/2011, isto é, a obtenção de uma amostra a cada duas horas na saída do tratamento para cada parâmetro.

Portanto, foi necessário aplicar a abordagem para dados autocorrelacionados proposta por Alwan e Roberts (1988), a qual utiliza modelagem de séries temporais para detectar a existência de variação sistemática, identificando de forma mais precisa as causas especiais. A notação empregada para designação do modelo é $ARIMA(p,d,q)$ em que p representa o número de parâmetros autorregressivos (correspondem a defasagens da série transformada, isto é, série estacionária obtida por diferenciação), d denominado como termo integrado, ou seja, o número

de diferenciações para que a série original torne-se estacionária e q o número de parâmetros de médias móveis (defasagens dos erros aleatórios).

O emprego desses modelos seguiu quatro etapas iterativas: identificação, estimação, testes e aplicação, as quais estão esquematizadas na Figura 4.2. Ressalta-se que toda essa metodologia foi desenvolvida por meio do software R CORE TEAM (2016).

Figura 4.2 – Fases de aplicação da metodologia Box-Jenkins



Na primeira fase, foi necessário identificar o processo aleatório que gerou os dados, para em seguida estimar os parâmetros que o caracterizam e testar se as hipóteses do modelo foram cumpridas. Nas situações em que houve rejeição das hipóteses, uma nova fase de identificação foi considerada até que a verificação das hipóteses fosse finalmente positiva, permitindo, então, a aplicação do modelo. A seguir, apresenta-se detalhadamente cada etapa:

i. Identificação do modelo

Primeiramente, foi realizada a análise da série temporal com relação à presença de autocorrelação, por meio do emprego das funções de autocorrelação (ACF) e as funções de autocorrelação parcial (PACF) por parâmetro de cada estação separadamente, ao nível de 5% de significância. Já, a estacionariedade da série de dados foi analisada pela aplicação do teste Dickey-Fuller aumentado, também ao nível de 5% de significância.

Na etapa de identificação do modelo ARIMA, foram empregados procedimentos que identificassem a estrutura do modelo, isto é, permitissem conhecer os valores dos parâmetros p , d e q que caracterizam o processo estocástico. Os procedimentos de identificação são constituídos por duas partes: inicialmente diferencia-se a série temporal original tantas vezes quantas necessárias para obtenção de uma série estacionária (o número de diferenciações d é aquele necessário para que a função de autocorrelação amostral da série transformada decresça rapidamente para zero) de modo a possibilitar a análise do processo com o modelo ARMA(p, q); posteriormente, é realizada a identificação de um processo AR(p), MA(q) ou ARMA(p, q), por meio da análise das funções de autocorrelação (ACF) e da autocorrelação parcial (PACF), com determinação dos valores dos parâmetros p , q (BOX & JENKINS, 1976; BUSSAB & MORETTIN, 1987).

Os modelos ARIMA apresentam a seguinte notação: $X_t = \rho_1 X_{t-1} + \rho_2 X_{t-2} + \dots + \rho_n X_{t-n} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_m \varepsilon_{t-m}$, em que X_t representa a série temporal dos dados gerados pelo modelo, ε_t é o termo de erro, ρ representa o coeficiente autorregressivo e θ o coeficiente de média móvel. Nas situações em que há diferenciação da série pelo termo d do modelo ARIMA (p, d, q), insere-se o termo da série diferenciada (X_{t-1}) do lado esquerdo da equação, dessa forma: $X_t - X_{t-1} = \alpha + \rho_1 X_{t-1} + \rho_2 X_{t-2} + \dots + \rho_n X_{t-n} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_m \varepsilon_{t-m}$.

A seleção dos modelos ARIMA envolveu tanto a análise das funções ACF e PACF, quanto a utilização da função *auto.arima* do software R.

ii) Estimativas dos parâmetros

Após a identificação dos valores p , d e q , a etapa seguinte consistiu em realizar a estimativa dos parâmetros do modelo. Um fundamento importante a ser observado na identificação do modelo ARIMA é o princípio da parcimônia, ou seja, deve-se buscar um modelo com melhor ajuste e menor número possível de parâmetros. Assim sendo, dados dois modelos com ajustes similares, escolhe-se aquele com menor número de parâmetros. Existem duas justificativas para isso: simplicidade na estrutura identificada, o que permite uma melhor compreensão do processo subjacente; e modelos superparametrizados geralmente não são bons para previsões, pois se ajustam bem aos dados amostrais, mas não conseguem generalizar o comportamento de toda a série. Na verdade, o princípio da parcimônia é conceito geral, devendo ser aplicado a qualquer problema de modelagem estatística, e não apenas na utilização de modelos ARIMA.

Existem diferentes métodos para a estimativa dos parâmetros do modelo, e todos produzem resultados semelhantes, embora possam existir diferenças quanto à eficiência na implementação computacional. De maneira geral, durante a etapa de estimativa usa-se algum procedimento iterativo de estimação de mínimos quadrados não linear ou através dos métodos de máxima verossimilhança aproximada (BUSSAB & MORETTIN, 1987). Conforme explicitado anteriormente, o modelo a ser selecionado deve ter o menor número possível de parâmetros.

Akaike (1974) desenvolveu o Critério de Informação de Akaike (AIC), que se origina da minimização da informação (ou distância) de Kullback-Leibler (K-L) como base para a seleção de modelos. A informação K-L é uma medida da distância entre o modelo verdadeiro e um modelo candidato. Na realidade este modelo verdadeiro quase sempre é uma abstração. De fato, é desejável a obtenção de um bom modelo, que represente satisfatoriamente o mecanismo que gerou os dados em questão. Por conseguinte, necessita-se de uma medida da distância entre um bom modelo e vários modelos candidatos, para ter evidências de um modelo que se destaque. Pode-se às vezes conseguir dois ou mais modelos que se destacam.

Por sua vez, Schwarz (1978) propôs o Critério de Informação Bayesiano e consiste em um critério de avaliação de modelos definido em termos de probabilidade a posteriori. Sob a suposição de que todos os modelos tenham distribuição de probabilidade, a priori iguais, a probabilidade a posteriori, obtida usando a informação dos dados, poderá servir para comparar os modelos e ajudar na identificação do modelo que gerou os dados.

Ambos os critérios penalizam modelos com muitas variáveis, sendo que valores menores de AIC e BIC são preferíveis. Geralmente, o BIC tende a escolher modelos mais parcimoniosos em relação ao AIC. Dessa forma, empregou-se o critério BIC neste trabalho para escolher o modelo mais apropriado.

Após essa etapa, foi verificado o desempenho da modelagem das séries temporais, utilizando os primeiros 75% dos dados de cada estação como período de estimação e o restante dos 25% dos dados para validar os modelos obtidos. Nau (2005) afirma que bons modelos apresentam as medidas de erro similares em ambos os períodos.

Foram utilizados os valores do erro médio (ME), erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE). O ME é calculado considerando a subtração do valor previsto pelo valor observado. Assim, a previsão é viesada para baixo caso o resultado seja negativo e viesada para cima caso o resultado seja positivo. Já, o MAE mede a magnitude média dos erros em um conjunto de previsões, sem considerar sua direção, ou seja, é a média absoluta entre a previsão e a observação real de todas as amostras, em que todas as diferenças individuais têm igual peso. O RMSE é o erro médio elevado ao quadrado e, posteriormente, tira-se a raiz desse resultado. Dessa forma, a diferença entre o MAE e o RMSE é o fato desse último dar maior peso a erros grandes, ou seja, desvios grandes são mais importantes na estatística final. Para todos esses índices de erros utilizados, quanto menor o valor em termos absolutos, melhor é o desempenho do modelo.

Dessa forma, os modelos mais apropriados foram selecionados por meio da análise dos índices de erros, na etapa iterativa, e pelo desempenho dos modelos no período de estimação e validação.

iii) Testes de diagnóstico

O teste de diagnóstico consistiu no exame da normalidade e aleatoriedade dos resíduos (erros) do modelo, expresso em suas funções de autocorrelação. O ajuste de um modelo ARIMA busca capturar toda a estrutura de dependência serial presente na série de dados. Logo, os resíduos do modelo não devem apresentar qualquer tipo de dependência no tempo. Num modelo ARIMA bem ajustado, os erros de previsão um passo à frente (resíduos) são uma sequência de ruídos brancos, com a ausência de autocorrelações (e autocorrelações parciais) significativas e seguem a distribuição normal.

Aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar aderência à distribuição normal ao nível de 5 % de significância. Com o objetivo de avaliar a autocorrelação presente nessas novas variáveis, foram aplicadas as funções ACFs e PACFs e o teste de Box-Pierce, também ao nível de 5% de significância.

iv) Aplicação dos gráficos de controle ao resíduos

Por fim, foi aplicado o gráfico de controle aos resíduos após o tratamento estatístico mencionado previamente para eliminação da autocorrelação. Essa nova variável é definida como a diferença entre os valores gerados pelo modelo e os valores originais dos dados de monitoramento.

Destaca-se que essa nova variável, foi organizada em subgrupos racionais. Esses subgrupos foram construídos a partir dos dados relativos ao período de um dia. Dessa forma, cada subgrupo racional corresponde à média diária dos resíduos. Ressalta-se que a utilização da média diária em contraponto às observações individuais das variáveis favorece a visualização dos gráficos e, além disso, o Teorema do Limite Central garante a normalidade da distribuição da média das médias. Essa propriedade justifica, em grande parte, a popularidade dos gráficos de controle (MOOD *et al.*, 1974).

Empregou-se o gráfico de controle do tipo média móvel exponencialmente ponderada (EWMA), uma vez que, por se tratar da qualidade da água consumida pela população, há a necessidade de uma resposta rápida quando há um desvio na operação, por menor que seja, para

que a água não seja distribuída fora dos padrões estabelecidos. Assim sendo, justifica-se a utilização do gráfico EWMA, pois apresenta maior sensibilidade a pequenos e moderados desvios na média de um processo e por apresentar desempenho aproximadamente equivalente ao CUSUM, com a vantagem de ser mais fácil de configurar e operar.

Na sequência, apresenta-se a formulação estatística empregada para a construção do gráfico EWMA.

A estatística desse tipo de gráfico é uma média ponderada de todas as observações passadas e correntes com pesos que diminuem geometricamente, atribuindo maior peso para os dados mais recentes. A média móvel exponencialmente ponderada é definida da seguinte forma:

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (4.1)$$

em que z_i é a média ponderada de todas as médias amostrais anteriores, x_i é o valor do parâmetro e λ é uma constante.

Tendo em vista atingir as mesmas propriedades dos gráficos de Shewhart com limites de controle posicionados a três sigmas, foi empregado o valor de $\lambda = 0,2$ (Lu & Reynolds, 1999).

O valor inicial (requerido na primeira amostra $i = 1$) é o alvo do processo, então:

$$z_0 = \mu_0 \quad (4.2)$$

Foi utilizada a média das amostras preliminares para o valor inicial do EWMA, sendo, portanto $z_0 = \bar{x}$.

Para se demonstrar que no gráfico EWMA z_i é a média ponderada de todas as médias amostrais anteriores, ao substituir por z_{i-1} no lado direito da Equação (4.1) obtém-se:

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)[\lambda x_{i-1} + (1 - \lambda)z_{i-2}] = \lambda x_i + \lambda(1 - \lambda)x_{i-1} + [(1 - \lambda)^2 z_{i-2}] \quad (4.3)$$

Continuando as substituições para z_{i-j} , $j = 2, 3, \dots, t$, obtém-se:

$$z_i = \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)^j x_{i-j} + (1 - \lambda)^i z_0 \quad (4.4)$$

O ponderador $\lambda(1 - \lambda)^j$ decresce geometricamente com a idade da média amostral. Além disso, os pesos somam à unidade, uma vez que

$$\lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)^j = \lambda \left[\frac{1 - (1 - \lambda)^i}{1 - (1 - \lambda)} \right] = 1 - (1 - \lambda)^i \quad (4.5)$$

Se as observações x_i são independentes e aleatórias com variância σ^2 , então a variância de z_i é

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma^2 \frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \quad (4.6)$$

Portanto, o gráfico de controle EWMA é construído traçando z_i versus o número de amostra i (ou tempo). A linha central e os limites de controle para o gráfico de controle EWMA são os seguintes:

$$\begin{aligned} LSC &= \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \\ LC &= \mu_0 \\ LIC &= \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Na Equação (4.7) o fator L é a largura dos limites de controle, ou seja, o número de múltiplos do desvio padrão em que os limites de controle estarão distantes da linha central. Nesta pesquisa, foi empregado $L = 2,859$. Conforme o trabalho desenvolvido por Lu e Reynolds (1999), esse valor é o mais adequado para se obter desempenho similar ao gráfico de controle de Shewhart, com os limites estabelecidos em três sigma.

Tendo em vista comparar o desempenho dos gráficos e a efetividade do tratamento estatístico da autocorrelação, foram aplicados os gráficos de controle aos dados originais também, sem o respectivo tratamento estatístico. Dessa forma, foi possível comparar o desempenho do controle estatístico em ambos os casos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Levantamento dos dados de monitoramento das ETAs

A Tabela 5.1 apresenta o código das estações de tratamento, o período de monitoramento e o número de dados analisados por parâmetro e por ETA.

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

Nome da estação	Período de monitoramento	Vazão	Turbidez	Cor aparente	Cloro	Flúor	Total de dados
ETA01-P-CN	01/01/15 a 31/12/16	4.930	8.277	8.128	6.642	6.574	34.551
ETA02-P-CN	01/01/15 a 31/12/16	3.602	9.901	9.687	7.984	7.955	39.129
ETA03-P-CN	01/01/15 a 25/12/16	5.634	7.945	7.946	6.474	3.780	31.779
ETA04-M-CN	01/01/15 a 31/12/16	3.929	10.642	10.630	8.775	8.757	42.733
ETA05-M-CN	01/01/15 a 25/12/16	4.818	8.609	8.731	6.839	6.839	35.836
ETA06-M-CN	01/01/15 a 25/12/16	7.187	8.351	8.350	6.519	6.518	36.925
ETA07-G-CN	01/01/15 a 31/12/16	3.203	10.549	10.499	8.751	8.751	41.753
ETA08-G-CN	01/01/15 a 31/12/16	3.351	10.401	10.398	8.691	8.690	41.531
ETA09-G-CN	01/01/15 a 31/12/16	6.221	11.115	10.228	8.723	8.722	45.009
ETA10-P-DF	01/01/15 a 11/12/16	3.474	8.964	8.966	6.893	6.891	35.188
ETA11-P-FD	01/01/15 a 25/12/16	7.344	14.594	14.590	7.277	7.188	50.993
ETA12-P-CN	01/01/15 a 31/12/16	4.734	9.587	9.356	8.053	8.043	39.773
ETA13-G-OF	01/01/15 a 31/12/16	2.718	11.338	11.334	8.729	8.685	42.804
ETA14-G-FD	01/01/15 a 31/12/16	4.080	10.610	7.575	5.277	5.274	32.816
ETA15-G-CF	01/01/15 a 31/12/16	1.968	10.203	10.207	8.711	8.710	39.799
Total de dados	-	67.193	151.086	146.625	114.338	111.377	590.619

Destaca-se o quantitativo total de dados avaliados, aproximadamente 600 mil observações, número consideravelmente maior que os estudos já realizados nesse contexto e expostos no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

5.2 Tratamento estatístico preliminar

No tocante ao tratamento estatístico preliminar, foi realizada a verificação da presença de valores extremos (*outliers*) para os parâmetros cloro residual e flúor. De acordo com o mencionado anteriormente, a análise de valores extremos para os dados de turbidez e cor não

foi executada, devido à forte influência da sazonalidade na qualidade da água, tornando difícil a comprovação de inconsistência ou improbabilidade de ocorrência.

Percebe-se, por meio dos resultados expostos na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3 que todas as estações apresentaram valores considerados extremos para os parâmetros cloro e flúor.

Tabela 5.2 – Quantidade de *outliers* identificados por ETA para o parâmetro cloro

Nome da estação	2015				2016			
	Mínimo	Máximo	Total	Percentual	Mínimo	Máximo	Total	Percentual
ETA01-P-CN	31	564	3267	18,2%	161	21	3375	5,4%
ETA02-P-CN	873	1	3990	21,9%	1099	2	3994	27,6%
ETA03-P-CN	361	224	3164	18,5%	154	591	3310	22,5%
ETA04-M-CN	158	84	4390	5,5%	80	1	4385	1,8%
ETA05-M-CN	301	2	3433	8,8%	352	25	3406	11,1%
ETA06-M-CN	152	0	3361	4,5%	679	9	3158	21,8%
ETA07-G-CN	29	21	4386	1,1%	206	218	4365	9,7%
ETA08-G-CN	833	88	4325	21,3%	599	363	4366	22,0%
ETA09-G-CN	211	4	4349	4,9%	453	4	4374	10,4%
ETA10-P-DF	15	12	3463	0,8%	647	6	3430	19,0%
ETA11-P-FD	224	0	3997	5,6%	209	0	3280	6,4%
ETA12-P-CN	545	219	3977	19,2%	785	132	4076	22,5%
ETA13-G-OF	339	98	4335	10,1%	513	816	4394	30,2%
ETA14-G-FD	218	4	3060	7,3%	304	4	2217	13,9%
ETA15-G-CF	622	0	4356	14,3%	313	0	4355	7,2%

Tabela 5.3 – Quantidade de *outliers* identificados por ETA para o parâmetro flúor

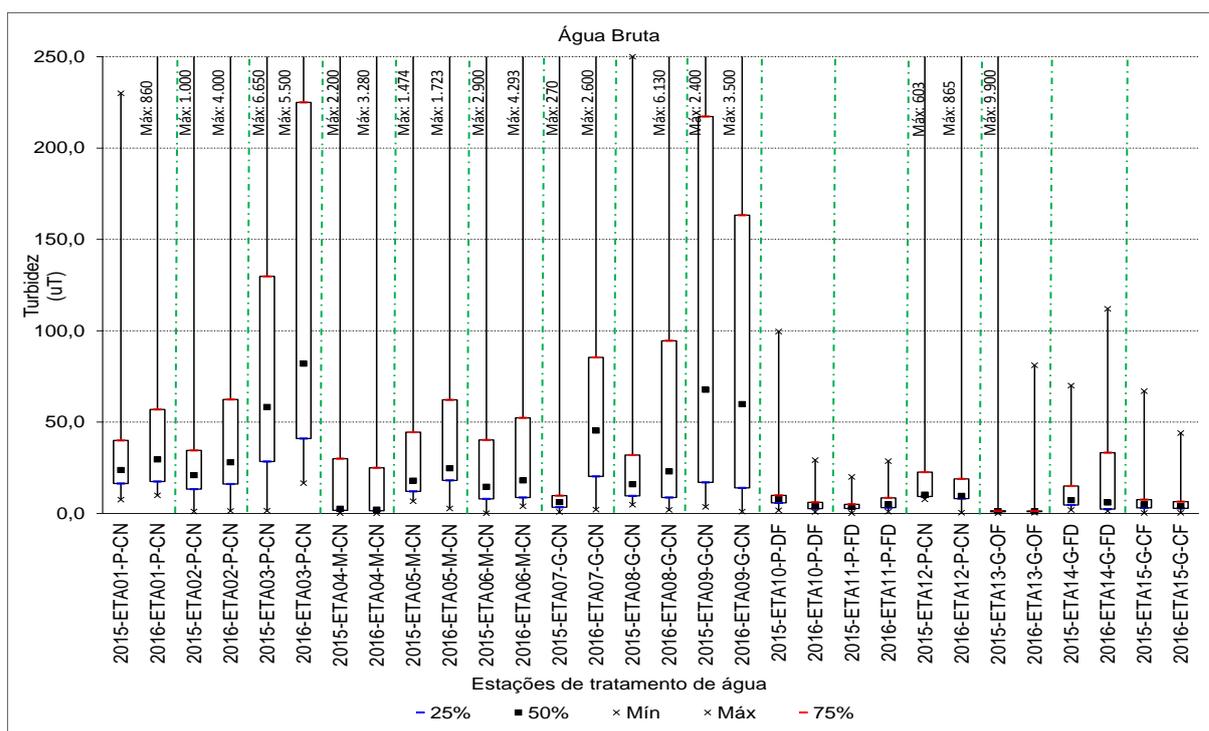
Nome da estação	2015				2016			
	Mínimo	Máximo	Total	Percentual	Mínimo	Máximo	Total	Percentual
ETA01-P-CN	292	124	3230	12,9%	359	93	3344	13,5%
ETA02-P-CN	183	118	3990	7,5%	165	60	3965	5,7%
ETA03-P-CN	13	0	2626	0,5%	2	1	1154	0,3%
ETA04-M-CN	25	13	4378	0,9%	265	158	4379	9,7%
ETA05-M-CN	184	7	3433	5,6%	24	6	3406	0,9%
ETA06-M-CN	142	0	3360	4,2%	123	0	3158	3,9%
ETA07-G-CN	357	120	4386	10,9%	249	50	4365	6,8%
ETA08-G-CN	417	53	4324	10,9%	401	33	4366	9,9%
ETA09-G-CN	246	8	4348	5,8%	1	0	4374	0,0%
ETA10-P-DF	249	85	3461	9,7%	170	7	3430	5,2%
ETA11-P-FD	336	0	3997	8,4%	238	0	3191	7,5%
ETA12-P-CN	319	53	3966	9,4%	459	27	4077	11,9%
ETA13-G-OF	82	130	4335	4,9%	112	16	4350	2,9%
ETA14-G-FD	197	10	3059	6,8%	215	0	2215	9,7%
ETA15-G-CF	600	185	4355	18,0%	140	74	4355	4,9%

Vale ressaltar que a maior proporção de valores extremos foi verificada para o parâmetro cloro em contraposição ao parâmetro flúor, atingindo percentuais de, aproximadamente, 30% na ETA 13 em 2016. No entanto, avaliando-se o percentual de *outliers* de ambos os parâmetros, a grande maioria das estações indicaram valores abaixo de 10%, sendo possível afirmar que as proporções de dados excluídos não afetaram negativamente os resultados obtidos na análise de eficiência, de atendimento aos padrões e de estabilidade das ETAs (MELO, 2014).

Após essa verificação, procedeu-se a análise da estatística descritiva de todos os dados mencionados na Tabela 5.1. O Apêndice I apresenta os resultados da estatística descritiva de todos os parâmetros, considerando cada ETA para ambos os anos. Ressalta-se que, para os parâmetros turbidez e cor, a estatística foi segregada tanto em água bruta quanto em água tratada e, para os parâmetros cloro e flúor, examinada apenas a água tratada, por serem produtos introduzidos durante o tratamento. Com o intuito de auxiliar na interpretação da estatística descritiva, foram construídos gráficos do tipo *box-whisker* para cada parâmetro, os quais se encontram na sequência.

A Figura 5.1 apresenta os resultados na forma de gráfico *box-whisker* para a turbidez da água bruta por estação de tratamento e por ano (2015 e 2016).

Figura 5.1 – Box-Whisker para a turbidez da água bruta em 2015 e 2016 por ETA



A partir do *box-whisker* referente à turbidez da água bruta e do teste de hipóteses não paramétrico (Kruskal-Wallis para amostras independentes, seguido de teste de comparações múltiplas), ao nível de 5% de significância, foi possível verificar a influência do tipo de manancial na qualidade da água bruta em relação à turbidez da água bruta e a existência de diferenças significativas entre as estações avaliadas. Tendo em vista facilitar o entendimento dos resultados dos testes, foi elaborado o Apêndice II com os resultados dos testes por meio de uma representação gráfica das diferenças significativas de cada estação (em **negrito**) em relação às demais (em *itálico*), para a turbidez da água bruta em cada ano.

Considerando o tipo de manancial de captação, verificou-se que a turbidez da água bruta dos mananciais do tipo lótico apresentaram valores significativamente superiores aos mananciais lânticos e subterrâneos. Esses resultados eram esperados, em virtude da melhor qualidade da água de mananciais lânticos, principalmente pela sedimentação dos sólidos, e de mananciais subterrâneos, especialmente pela filtração natural.

Foi possível notar que a água bruta das ETAs com tecnologia de tratamento convencional atingiram valores significativamente mais elevados de turbidez em relação às demais ETAs

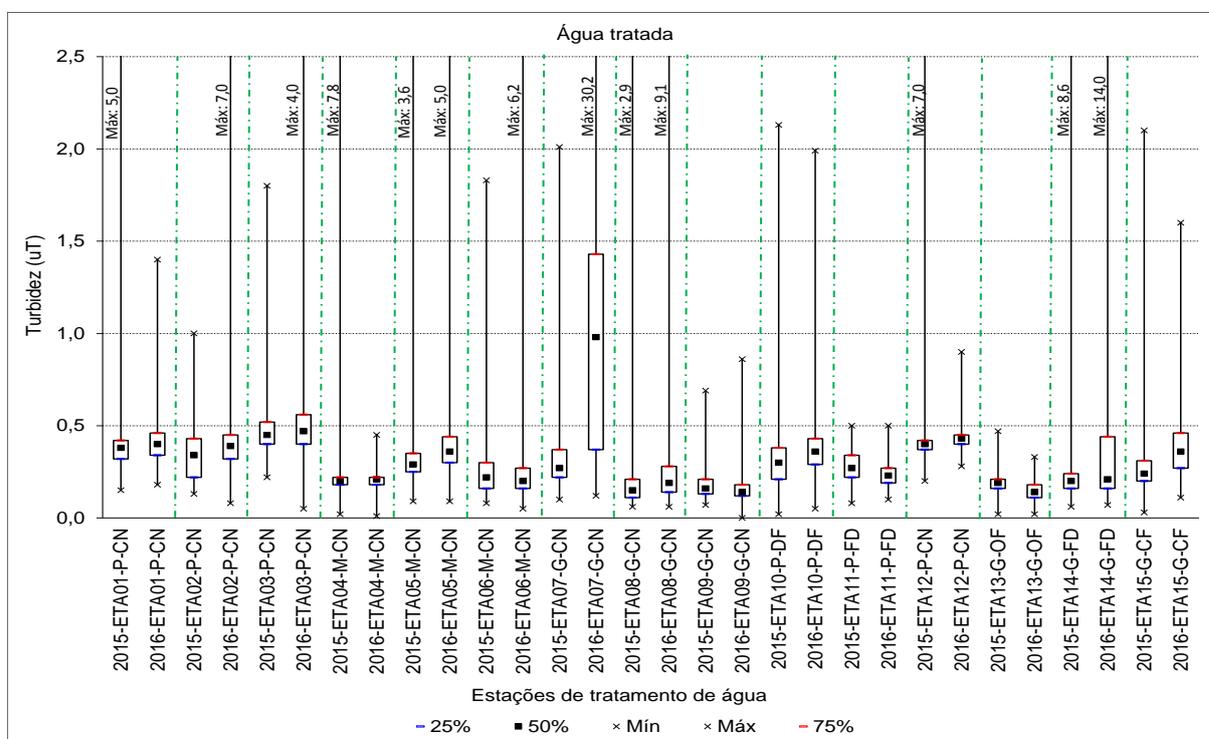
(com exceção da ETA 14). Esses resultados estão alinhados com a teoria, a qual considera o tratamento convencional suficientemente robusto à maior variabilidade e a valores mais elevados de turbidez da água captada. Destaca-se, também, a elevação dos valores de turbidez da água bruta em 2016 quando comparado a 2015, em nove das quinze estações, situação que pode afetar negativamente o desempenho das ETAs.

Além disso, as ETAs 03 e 09 exibiram medidas de dispersão superior às demais estações, atingindo valores superiores a 200 uT no terceiro quartil. Tal fato sinaliza um alerta, em virtude dos mananciais de captação das referidas estações apresentarem valores próximos ao limite de referência (250 uT) para o emprego da tecnologia convencional (Tabela 3.2).

Nesse sentido, ressalta-se, também, os valores de turbidez da água bruta da ETA 14, atingindo patamares acima de 25 uT em 2016, nível de referência para emprego da tecnologia de filtração direta descendente.

Por sua vez, a Figura 5.2 mostra os resultados na forma de gráfico *box-whisker* para a turbidez da água tratada por estação de tratamento e por ano (2015 e 2016).

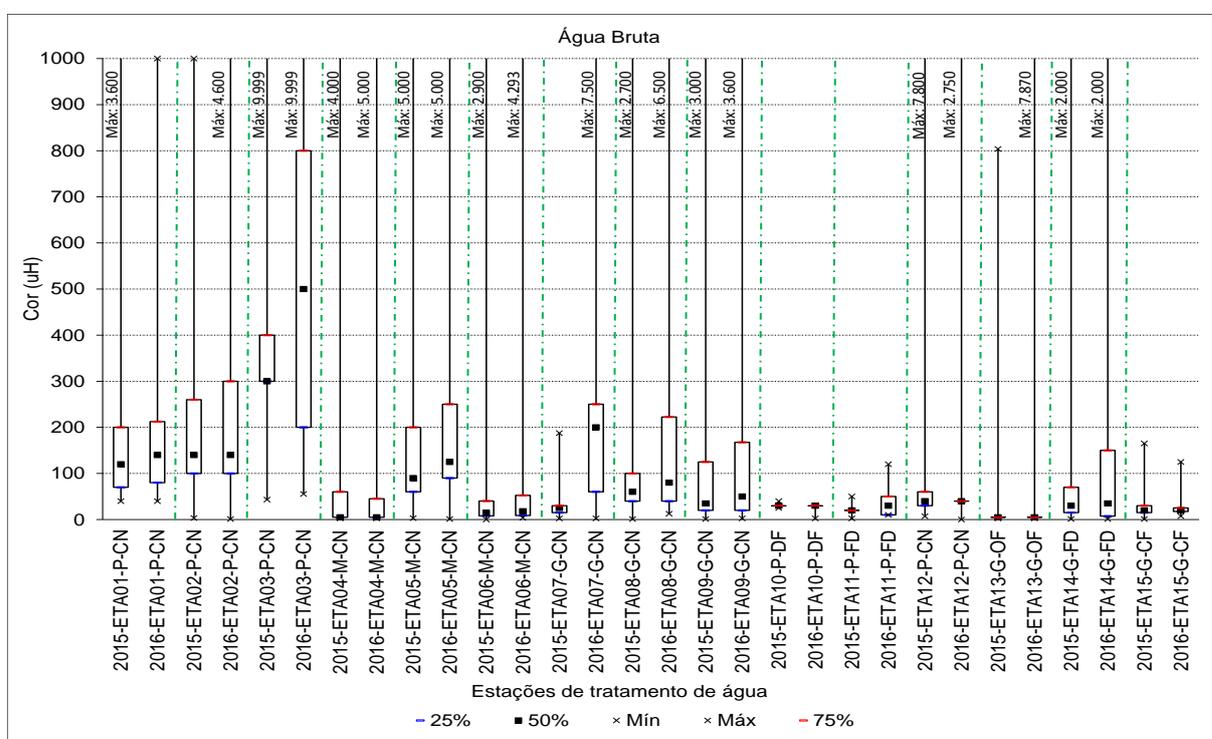
Figura 5.2 – Box-Whisker para a turbidez da água tratada em 2015 e 2016 por ETA



Em referência ao *box-whisker* para a turbidez da água tratada, constata-se que, com exceção da ETA 03 (em ambos os anos) e da ETA 07 (em 2016), todas as demais ETAs apresentaram valores de terceiro quartil inferiores a 0,5 uT. O valor de 0,5 uT é destacado em virtude do padrão de potabilidade nacional estabelecer esse valor como limite a ser considerado pelas estações de tratamento. Ademais, é notável o fato da ETA 07 exibir um desempenho tão aquém em 2016 em relação a 2015, atingindo valores de turbidez da água tratada próximo a 1,5 uT em seu terceiro quartil, além de elevada dispersão em relação às demais ETAs.

Com relação ao parâmetro cor, a Figura 5.3 exibe os resultados na forma de gráfico *box-whisker* para a cor da água bruta por estação de tratamento e por ano (2015 e 2016).

Figura 5.3 – Box-Whisker para o parâmetro cor da água bruta em 2015 e 2016 por ETA



Verifica-se que a cor da água bruta apresentou comportamento semelhante a turbidez da água bruta, isto é, houve elevação dos valores de cor da água bruta em 2016 quando comparado a 2015, em nove das quinze estações, situação que pode, também, afetar negativamente a performance das ETAs. Com relação à análise da cor da água bruta, evidencia-se a ETA 15, a qual utiliza a tecnologia de tratamento convencional com flotação em substituição ao decantador.

A flotação é especialmente indicada no tratamento de águas com valores altos de cor verdadeira e baixa turbidez e águas com concentrações elevadas de algas, pois estas tipicamente conduzem à formação de flocos com baixa velocidade de sedimentação. Nesse caso, a cor da água bruta, ao menos nos dois anos analisados, não corroboram a escolha da tecnologia de tratamento mencionada, devido à valores baixos em comparação às demais ETAs que empregam, majoritariamente, a tecnologia de tratamento convencional (com decantação).

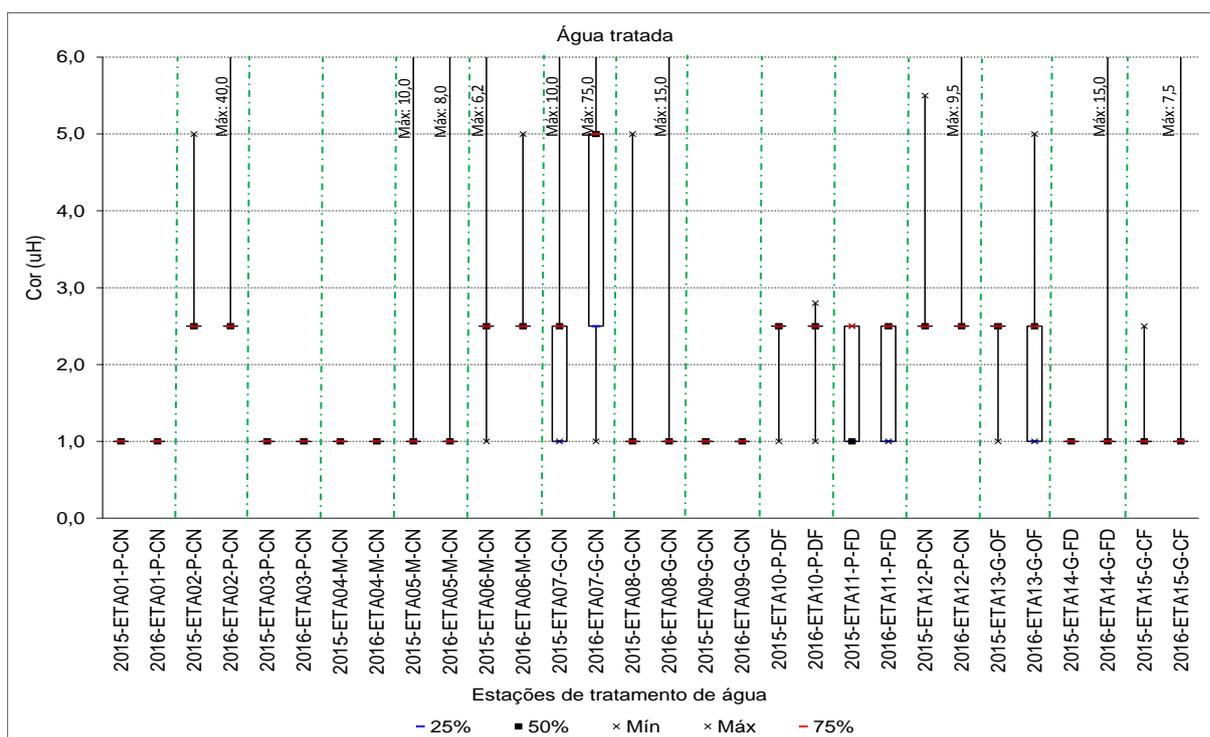
Dessa forma, uma das justificativas para a seleção dessa técnica de tratamento pode ser a ocorrência de floração de cianobactérias em seu reservatório de captação, uma vez que há ocupações irregulares do solo no entorno da represa, além de lançamentos de esgoto bruto. Essa situação potencializa a floração de cianobactérias.

Ainda, ressalta-se os elevados valores de cor presentes na água bruta da ETA 03 em comparação às demais ETAs, atingindo 800 uH no terceiro quartil em 2016. Aliado aos altos valores de turbidez da água bruta, essa situação pode ser um fator determinante no desempenho dessa estação.

Novamente em relação à ETA 14, como citado para a turbidez da água bruta, a qual utiliza a filtração direta descendente, verifica-se que os valores de cor da água bruta estão acima do valor de referência indicado anteriormente. A água bruta apresentou valores acima de 25 uH, limite de referência para o emprego da tecnologia de tratamento filtração direta descendente.

A Figura 5.4 apresenta os resultados na forma de gráfico *box-whisker* para a cor da água tratada por estação de tratamento e por ano (2015 e 2016).

Figura 5.4 – Box-Whisker para o parâmetro cor da água tratada em 2015 e 2016 por ETA



A análise do gráfico *box-whisker* para a cor da água tratada indica que todas as ETAs exibiram o terceiro quartil abaixo de 5,0 uH, e, com exceção dos picos de cor ocorridos em 2016 nas ETAs 02 e 07, todos os valores estão abaixo de 15 uH, limite estabelecido pela Portaria 2914/2011. Como pode ser visto, o comportamento do *box-whisker* da grande maioria das ETAs é achatado e/ou coincide os valores dos quartis superiores e inferiores com a mediana.

Tal situação é explicada pelos limites de detecção dos métodos utilizados para a medição do parâmetro em questão. O limite de detecção do método é a menor concentração de uma substância que pode ser detectada, mas não necessariamente quantificada, pelo método utilizado. Dessa forma, a menor concentração detectada pelas medições realizadas pelas estações de tratamento são variáveis, a depender do método, mas conhecidos e estabelecidos em 5,0 uH, 2,5 uH e 1,0 uH. Assim, as concentrações reais são menores ou iguais aos valores reportados no monitoramento.

Essa constatação impossibilitou a aplicação dos gráficos de controle aos dados de cor da água tratada e, por conseguinte, o estudo comparativo da estabilidade das estações de tratamento

tanto em função do porte quanto da tecnologia de tratamento, visto que há necessidade de se trabalhar com os dados efetivamente quantificados para a obtenção de resultados confiáveis.

A seguir, são apresentados os gráficos *Box-Whisker* dos parâmetros cloro (Figura 5.5) e flúor (Figura 5.6) por estação de tratamento e por ano (2015 e 2016), ressaltando que foram construídos apenas para a água tratada, uma vez que são adicionados no tratamento.

Figura 5.5 – Box-Whisker para o parâmetro cloro da água tratada em 2015 e 2016 por ETA

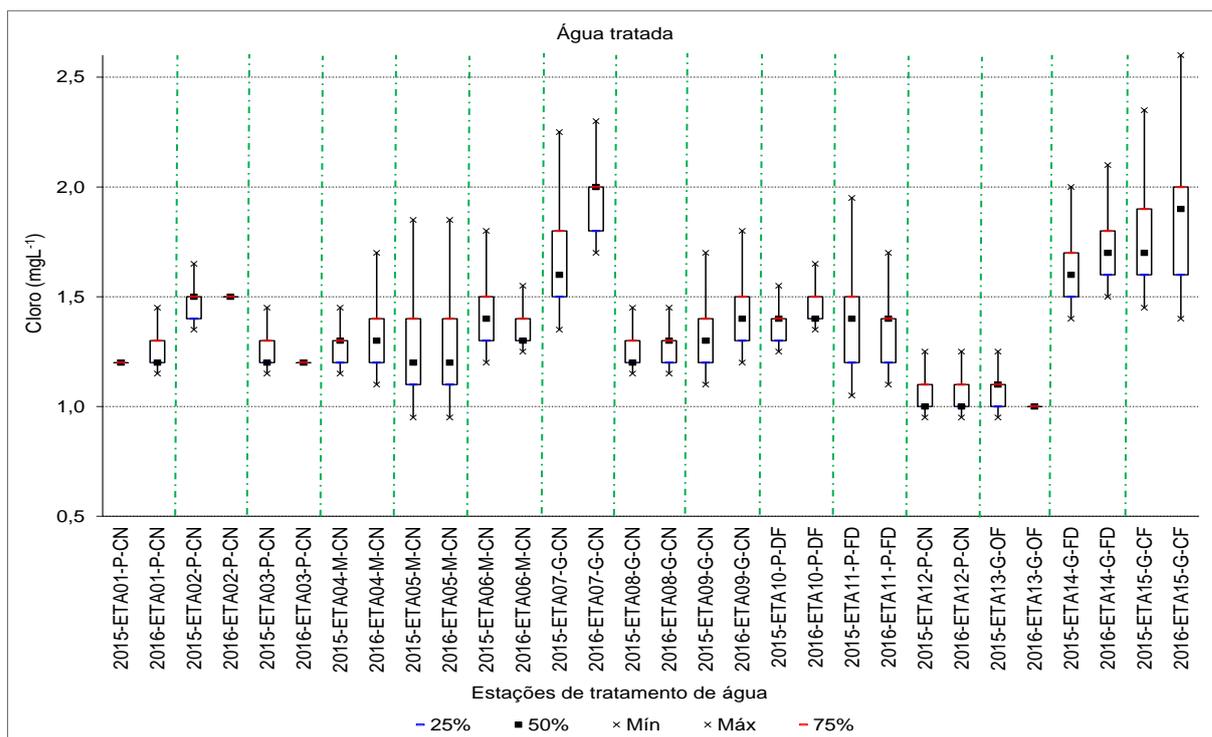
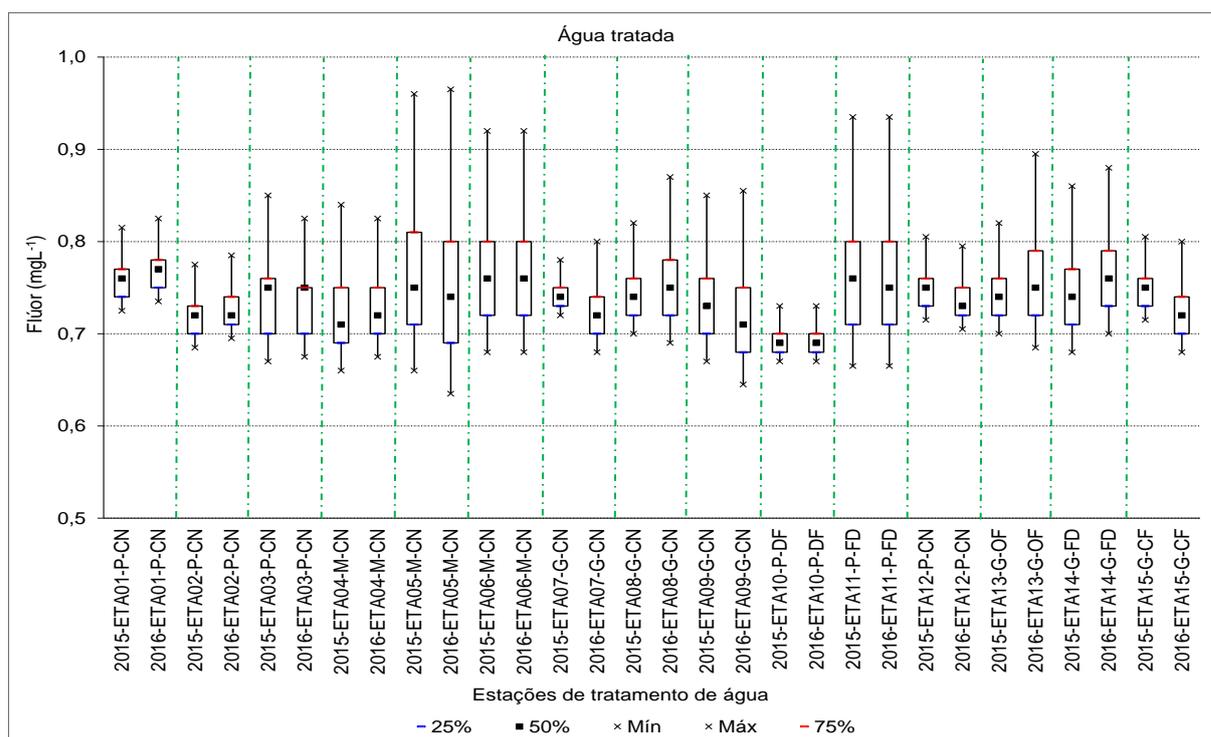


Figura 5.6 – Box-Whisker para o parâmetro flúor da água tratada em 2015 e 2016 por ETA



No que concerne ao parâmetro cloro, percebe-se que a grande maioria das concentrações situam-se na faixa entre 1,0 e 1,5 mgL⁻¹. Apenas as observações das ETAs 07, 14 e 15 apresentam comportamentos diferentes, atingindo valores de concentração maior, com amplitude interquartil posicionada entre 1,5 e 2,0 mgL⁻¹. Por sua vez, os dados relativos ao parâmetro flúor estabelecem-se, preponderantemente, no intervalo entre 0,7 e 0,8 mgL⁻¹.

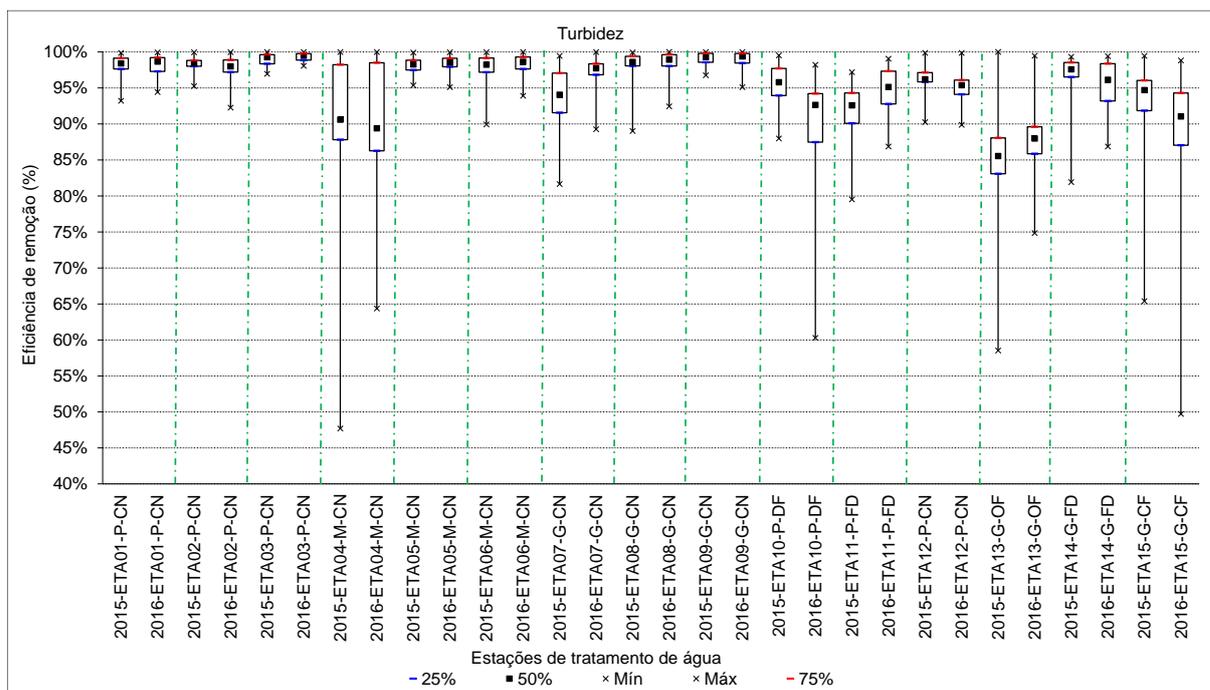
Posteriormente à análise descritiva dos dados, foram aplicados os testes de normalidade de Shapiro-Wilk a todos os parâmetros de qualidade em ambos os períodos para todas as ETAs. Nenhuma das observações apresentou aderência à distribuição normal ao nível (α) de 5 % de significância. Estes resultados já eram esperados, de acordo com trabalhos realizados, uma vez que dados ambientais dificilmente apresentam aderência à distribuição normal (LACHENBRUCH, 1975; HELSEL & HIRSCH, 2002; MELO, 2014; BARBOSA, 2015; PINTO, 2016).

5.3 Análise da eficiência de remoção das estações de tratamento

5.3.1 Turbidez

Com relação à eficiência de remoção da turbidez, a Figura 5.7 exibe o desempenho de cada estação por ano.

Figura 5.7 – Eficiência de remoção do parâmetro turbidez em 2015 e 2016 por ETA



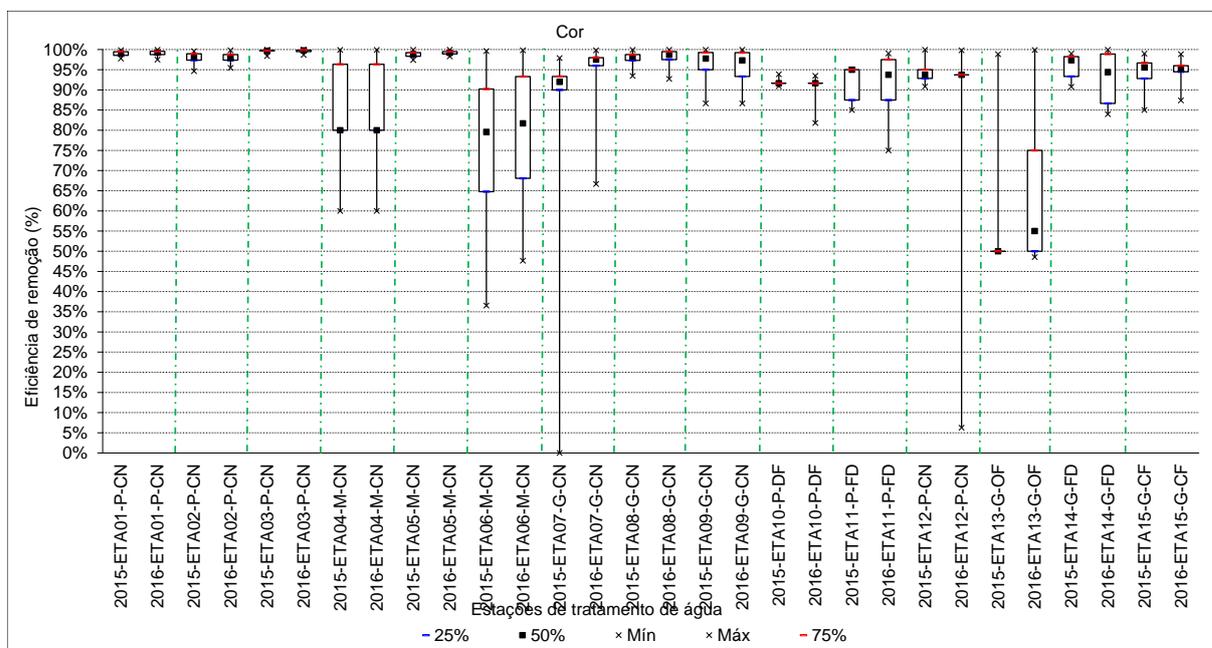
Verifica-se, de modo geral, que as ETAs de tratamento convencional conseguiram atingir maiores patamares de desempenho. Essa constatação está intrinsecamente associada aos maiores valores de turbidez encontrados na água bruta para tais ETAs (Figura 5.1) e a robustez da tecnologia de tratamento convencional.

Particularmente, foi constatado desempenho inferior da ETA 13 em relação às demais, o que se justifica pela elevada qualidade da água bruta captada, a qual apresenta valores muito baixo de turbidez.

5.3.2 Cor

Por seu turno, a Figura 5.8 mostra a eficiência de remoção do parâmetro cor em cada estação de tratamento por ano.

Figura 5.8 – Eficiência de remoção do parâmetro cor em 2015 e 2016 por ETA



Como constatado para a turbidez, as ETAs de tratamento convencional conseguiram atingir maiores patamares de desempenho, com exceção das ETAs 04 e 06, devido aos baixos valores de cor na água bruta.

A eficiência de remoção da turbidez e da cor estão associados a diversos fatores, podendo destacar o tipo e dosagem do coagulante e o pH de coagulação, que associados permitem construir o diagrama de coagulação e definir o mecanismo de coagulação. Outras variáveis relacionadas ao desempenho na eficiência de remoção são o tempo e o gradiente de velocidade médio de mistura rápida e de floculação.

Por exemplo, Mendes (1989), após realizar uma série de estudos em instalação de bancada, com águas de diferentes qualidades, observou que quando se aumenta o tempo de floculação há sempre um gradiente de velocidade ótimo que possibilita melhorar a eficiência de remoção de turbidez ou cor por meio da decantação. Contudo, existe um tempo, característico para cada

água, acima do qual a eficiência da floculação cresce muito lentamente, ficando economicamente desvantajosa a adoção de tempos de detenção superiores.

Outra forma interessante para melhorar o desempenho das ETAs nesse aspecto é a possibilidade de emprego de polímeros. Como auxiliares de coagulação e de floculação, os polímeros apresentam vantagens, tais como, melhoria da qualidade da água decantada e filtrada, redução do consumo do coagulante primário, redução dos gastos com produtos químicos, redução no volume do lodo no decantador, aumento da eficiência da desinfecção como consequência da redução da concentração de sólidos suspensos na água filtrada, diminuição da ocorrência da deposição de lodo na rede e nos reservatórios de distribuição (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

Portanto, recomenda-se para as estações em análise, um estudo pormenorizado das questões citadas, com o objetivo de potencializar a eficiência do tratamento naquelas em que haja necessidade.

5.4 Avaliação do atendimento aos padrões de potabilidade

5.4.1 Turbidez

A Figura 5.9 exibe o percentual de atendimento ao padrão de potabilidade nacional referente à turbidez em 2015, isto é, 75% das amostras coletadas menor que 0,5 uT, limite destacado com uma linha tracejada no gráfico. A Figura 5.10 mostra o percentual de atendimento ao padrão de potabilidade nacional em 2016, considerando o limite mais restritivo da legislação, ou seja, 95% das amostras coletadas menor que 0,5 uT, também com uma linha tracejada destacando esse patamar.

Figura 5.9 – Percentual de atendimento das ETAs ao padrão de potabilidade nacional do parâmetro turbidez em 2015 (75% das amostras < 0,5 uT)

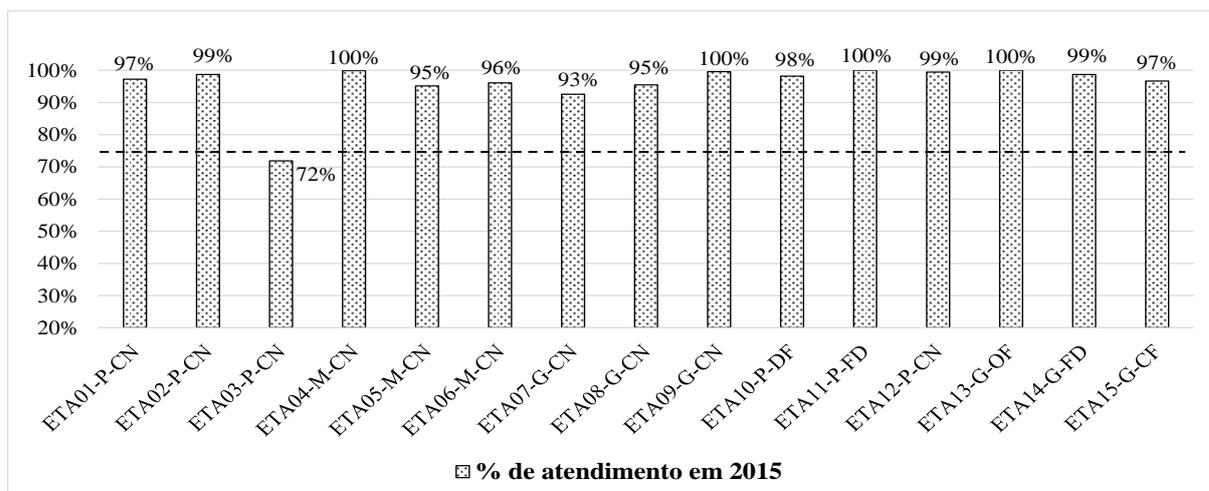
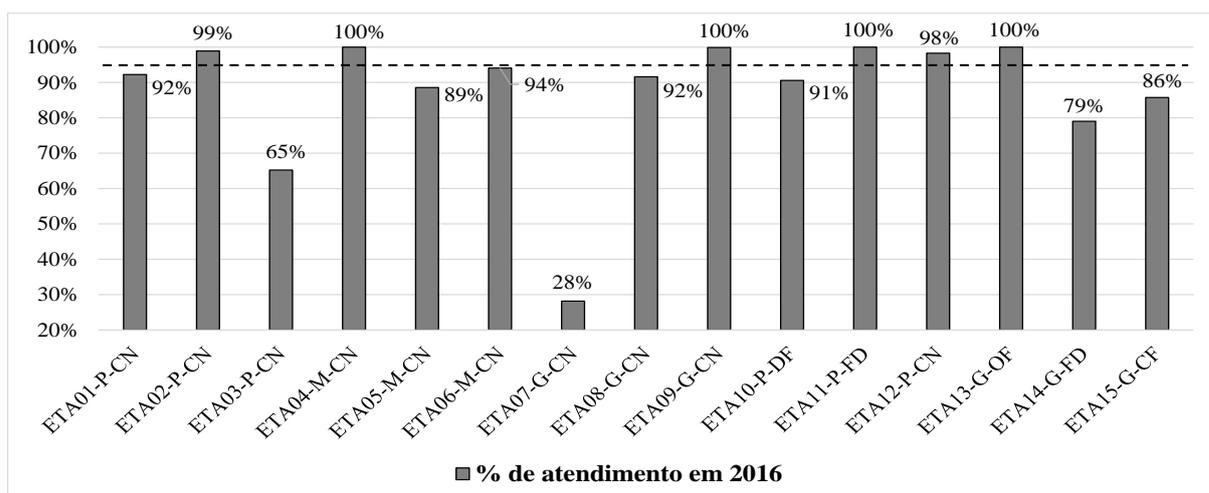


Figura 5.10 – Percentual de atendimento das ETAs ao padrão de potabilidade nacional do parâmetro turbidez em 2016 (95% das amostras < 0,5 uT)



Em 2015, percebe-se que apenas a ETA 03 não conseguiu atender ao padrão estabelecido, mas apresentou percentual de atendimento (72%) próximo ao necessário (75%). As demais estações observaram o padrão com certa margem de folga, com níveis acima de 93%.

Contudo, em 2016, apenas seis estações (ETAs 02, 04, 09, 11, 12 e 13) obtiveram êxito em atender plenamente ao padrão mais restritivo. Em todas as demais ETAs, foi observado um aspecto relevante no que concerne ao percentual de atendimento. Houve um menor atendimento em 2016 em contraposição a 2015, por exemplo, a ETA 01 apresentou atendimento de 97% em

2015, reduzindo para 92% em 2016, fazendo com que o limite de 95% das amostras coletadas menor que 0,5 uT não fosse atendido. Dessa forma, pode-se destacar que apesar do não atendimento em 2016, todas as estações pesquisadas, excetuando as ETAs 03 e 07, já demonstraram capacidade para atender a esse limite mais restritivos.

Evidencia-se o problema sistemático da ETA 03 em não conseguir atender ao padrão tanto em 2015 quanto em 2016, além da redução substancial do percentual de atendimento verificado na ETA 07, caindo de 93% em 2015 para apenas 28% em 2016.

Especificamente com relação ao desempenho da ETA 07, foi possível perceber que a água bruta captada apresentou aumento considerável dos valores de turbidez em 2016 em contraposição à 2015, o que refletiu diretamente no percentual de atendimento verificado. Essa elevada variação nos valores de turbidez da água bruta justifica-se pela situação de escassez hídrica vivenciada pelo município em que a referida ETA se localiza.

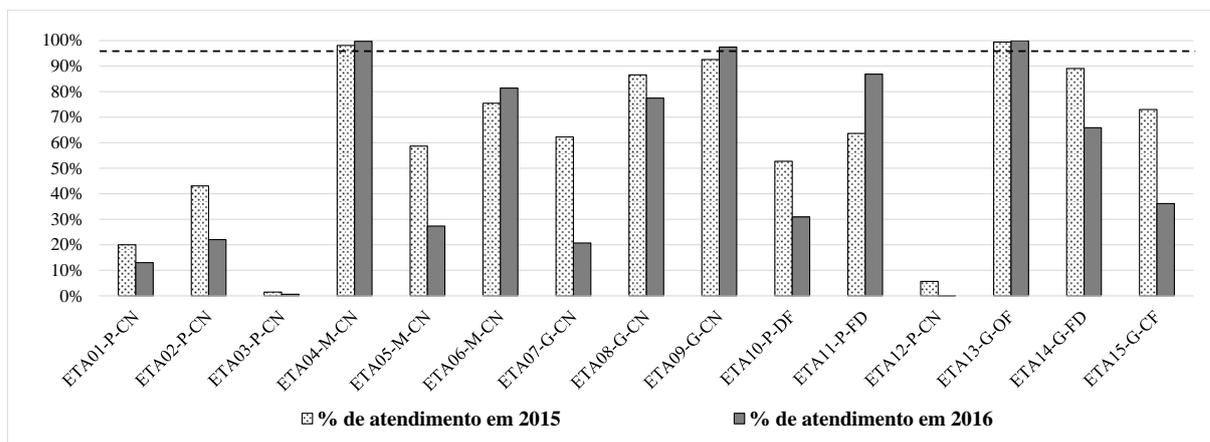
O volume na barragem em que é feita a captação, responsável por cerca de 73% do abastecimento no município, esteve abaixo do limite referente ao volume de reserva técnica, sendo necessária a instalação de uma balsa para bombeamento da água desse volume, gerando o revolvimento dessa área. Por se tratar de uma área mais profunda, abaixo do nível comumente utilizado para captação, atua como zona de sedimentação e acúmulo de matéria orgânica decorrente de decomposições, além de microrganismos e compostos inorgânicos como metais, fato que deteriorou a qualidade da água bruta destinada ao tratamento.

Essa situação impôs a realização de alterações no processo de tratamento, tais como a concentração de coagulante aplicada e o tempo de carreira de filtração. No entanto, pode-se concluir que essas respostas não surtiram efeitos imediatos, levando à problemas de operação nesse período.

Esse cenário é um aviso acerca da necessidade de maior capacitação técnica dos operadores e maior controle/supervisão durante as fases de planejamento, projeto e execução das ETAs, para que o padrão estabelecido pela legislação seja plenamente atendido.

Considerando o padrão de potabilidade estabelecido nos Estados Unidos, a Figura 5.11 apresenta o percentual de atendimento das ETAs em 2015 e 2016, baseado no limite norte-americano, o qual estabelece que 95% das amostras coletadas sejam menores que 0,3 uT.

Figura 5.11 – Percentual de atendimento das ETAs ao padrão de potabilidade dos Estados Unidos do parâmetro turbidez



Nota-se que apenas as ETAs 04 e 13 estariam plenamente capacitadas e prontas para atender ao limite mais restritivo definido pela USEPA. Já a ETA 09, em 2016, demonstrou, também, desempenho capaz de atingir esse patamar.

Uma das justificativas para o elevado desempenho da ETA 04 está relacionada ao monitoramento do tratamento da água, realizado de modo totalmente automatizado, por meio de sensores distribuídos nos diversos pontos da estação, permitindo a verificação das condições da água (turbidez, cor, pH, dureza, entre outros) durante as etapas de tratamento. Além desse controle, efetua-se, também, as análises na água tratada com frequência de duas em duas horas.

Por sua vez, a ETA 13 possui como fonte produtora de água bruta uma bateria de vinte e sete poços profundos. Como a água subterrânea apresenta maior qualidade em relação à captação superficial, esse quesito favorece o destacado desempenho dessa estação. Usualmente o sistema de tratamento de água proveniente da exploração de poços profundos é do tipo simplificado, exigindo apenas a desinfecção da água. No entanto, devido às características do aquífero em análise, classificado como aluvionar e constituído por altas concentrações de ferro e manganês

dissolvidos, foi necessária a instalação de um sistema mais complexo, com o processo de oxidação desses metais.

Dessa forma, nessa estação, o tratamento inicia-se com o bombeamento da água proveniente da bateria de poços até o tanque de reunião, onde ocorre dosagem de cal para correção do pH, e posteriormente encaminhada à ETA. Ao chegar à estação, a água bruta passa pelo vertedor Parshall, para medição da vazão e redução de velocidade. Em seguida, passa pelos tanques de oxidação, com adição de cloro em gás, e segue para as câmaras de sedimentação dos metais ferro e manganês, posteriormente segue para o sistema de filtração. Após passar pelo sistema de tratamento, ocorre o processo de fluoretação (ácido fluorsilícico), para posteriormente a água já tratada ser bombeada ao reservatório principal.

5.4.2 Demais parâmetros

A seguir são apresentados os desempenhos das estações de tratamento em relação ao atendimento aos padrões de potabilidade dos parâmetros cor (Figura 5.12), cloro (Figura 5.13) e flúor (Figura 5.14). Os limites estabelecidos e recomendados pela Portaria 2914/2011 e considerados nesta pesquisa foram 15 uH para cor, intervalo de 0,2 a 2,0 mgL⁻¹ para o cloro e faixa de 0,6 a 1,0 mgL⁻¹ para o flúor.

Figura 5.12 – Percentual de atendimento ao padrão de potabilidade do parâmetro cor

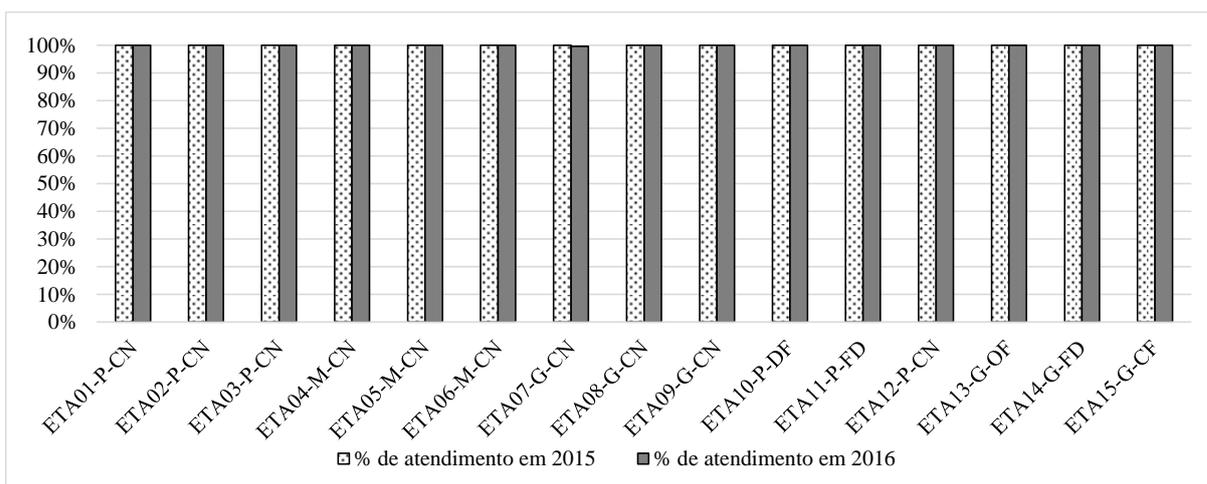


Figura 5.13 – Percentual de atendimento ao padrão de potabilidade do parâmetro cloro

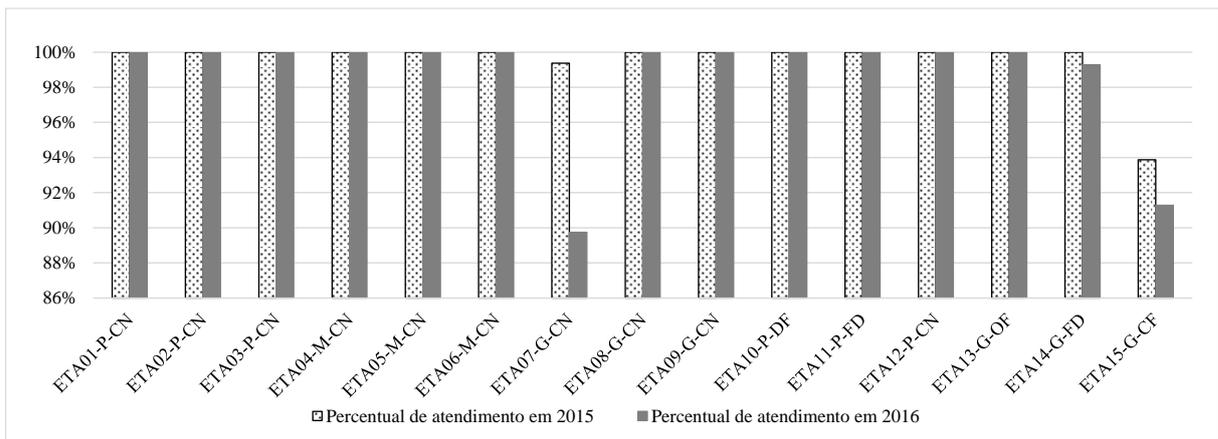
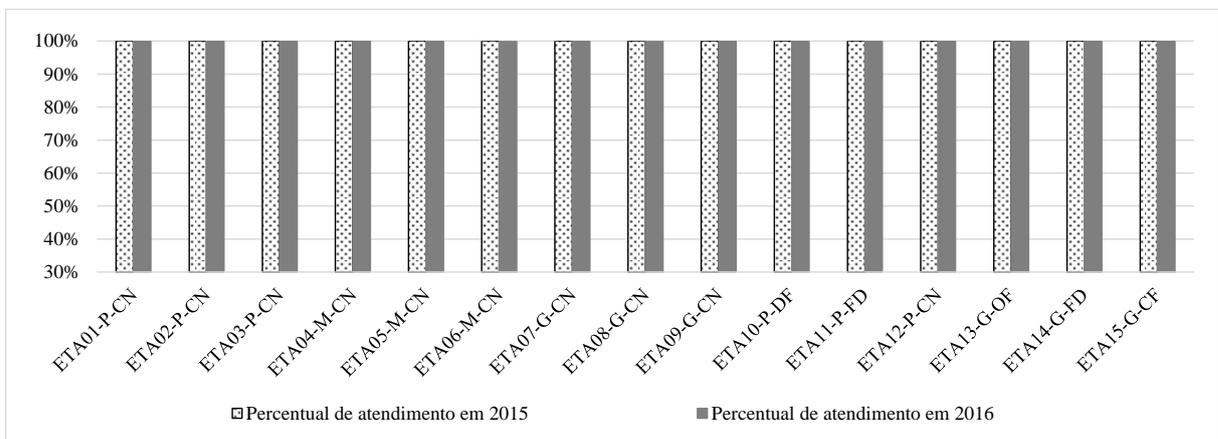


Figura 5.14 – Percentual de atendimento ao padrão de potabilidade do parâmetro flúor



Pela análise dos gráficos, nota-se que houve um maior grau de cumprimento da legislação no que concerne aos parâmetros supramencionados quando comparados à turbidez, atingindo 100% de atendimento para a cor e flúor em todas as ETAs e, também, 100% de atendimento para o cloro, com exceção das ETAs 07 e 15.

5.5 Aplicação de gráficos de controle estatístico de processo para analisar da estabilidade das estações de tratamento

5.5.1 Tratamento estatístico da autocorrelação

Conforme explicado anteriormente, a análise de estabilidade das estações envolveu os dados da água tratada referentes à turbidez, cloro e flúor. O parâmetro cor não foi avaliado, em decorrência da não quantificação exata dos valores existentes nas amostras.

O Apêndice III apresenta as funções de autocorrelação (ACF) e as funções de autocorrelação parcial (PACF) por parâmetro de cada estação separadamente. Por meio da avaliação das funções, pode-se afirmar, ao nível de 5% de significância, que o conjunto integral de dados analisados são autocorrelacionados, em todas as estações de tratamento de água.

Já, com relação à estacionariedade da série de dados, foi aplicado o teste Dickey-Fuller aumentado, também ao nível de 5% de significância. O Apêndice IV exibe os resultados do teste por parâmetro em cada estação de tratamento, demonstrando que a maior parte das séries de dados apresentou estacionariedade.

Além do teste Dickey-Fuller aumentado, é possível verificar padrões de comportamento das séries nos correlogramas (funções de autocorrelação) que indicam estacionariedade ou não. Por exemplo, a série pode ser considerada estacionária quando há valores significativos de autocorrelações nos períodos iniciais de defasagem e truncamento abrupto nos períodos seguintes ou valores significativos de autocorrelações decaindo bem rápido para valores próximos a zero. Por outro lado, a série pode ser considerada não estacionária quando há padrão de decaimento lento para zero.

Diversos modelos alternativos (estacionários e não estacionários) foram examinados para cada parâmetro em cada estação e a seleção dos modelos ARIMA mais apropriados baseou-se na utilização do critério BIC e no desempenho dos modelos na etapa de validação. A Tabela 5.4 apresenta o desempenho dos modelos selecionados, tanto para os períodos de estimação quanto de validação, com os respectivos valores do erro médio (ME), erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE).

Foi possível concluir que os modelos definidos para os parâmetros turbidez, cloro e flúor para cada ETA apresentam desempenhos aceitáveis, visto que foram selecionados os erros com menores valores em termos absolutos e obtidos erros similares em ambos os períodos.

Tabela 5.4 – Estatísticas de erro para a seleção dos modelos das séries de dados das ETAs

Nome das estações	Período	Turbidez			Cloro			Flúor		
		ME	RMSE	MAE	ME	RMSE	MAE	ME	RMSE	MAE
ETA01	Est.	5,08E-05	1,38E-01	4,89E-02	4,05E-04	3,13E-02	1,85E-02	2,33E-04	1,59E-02	1,16E-02
	Valid.	-3,21E-04	5,15E-02	3,85E-02	1,84E-04	4,06E-02	2,53E-02	1,06E-03	1,78E-02	1,29E-02
ETA02	Est.	-1,31E-04	4,82E-02	3,58E-02	8,02E-03	1,14E-01	5,92E-02	-2,92E-04	1,94E-02	9,92E-03
	Valid.	8,74E-03	1,35E-01	6,47E-02	3,02E-03	7,03E-02	5,45E-02	2,28E-04	1,40E-02	9,91E-03
ETA03	Est.	-4,90E-05	5,38E-02	3,79E-02	-7,21E-04	4,73E-02	3,54E-02	-5,78E-04	1,64E-02	1,27E-02
	Valid.	6,39E-03	5,94E-02	4,46E-02	7,50E-04	4,29E-02	2,83E-02	-1,90E-05	1,88E-02	1,48E-02
ETA04	Est.	1,03E-03	3,62E-02	1,58E-02	7,19E-04	3,00E-02	2,34E-02	4,95E-05	2,08E-02	1,59E-02
	Valid.	-4,54E-04	1,73E-02	1,26E-02	1,13E-04	3,85E-02	3,04E-02	-1,55E-03	2,28E-02	1,77E-02
ETA05	Est.	1,03E-03	1,11E-01	5,87E-02	2,91E-04	9,64E-02	7,56E-02	-2,35E-03	3,23E-02	2,63E-02
	Valid.	2,59E-03	1,56E-01	6,45E-02	-3,91E-03	1,15E-01	9,12E-02	-1,15E-04	3,46E-02	2,80E-02
ETA06	Est.	-6,59E-05	1,11E-01	5,67E-02	2,25E-04	5,19E-02	4,06E-02	-2,47E-05	2,42E-02	1,89E-02
	Valid.	2,41E-04	1,21E-01	6,89E-02	-9,81E-04	7,16E-02	5,31E-02	1,40E-04	2,36E-02	1,88E-02
ETA07	Est.	1,40E-01	3,67E-01	1,06E-01	9,59E-04	5,55E-02	3,90E-02	-3,10E-04	1,33E-02	1,01E-02
	Valid.	-2,62E-02	1,92E-01	9,22E-02	4,89E-03	8,42E-02	5,63E-02	8,02E-05	1,19E-01	9,38E-03
ETA08	Est.	4,75E-03	1,79E-01	6,65E-02	2,67E-03	7,54E-02	5,38E-02	1,40E-05	2,77E-02	1,86E-02
	Valid.	-2,51E-04	6,09E-02	3,26E-02	2,16E-03	6,02E-02	4,54E-02	1,25E-04	2,18E-02	1,76E-02
ETA09	Est.	2,41E-05	3,83E-02	2,68E-02	-5,87E-04	8,07E-02	6,34E-02	-7,20E-04	3,17E-02	1,95E-02
	Valid.	1,14E-03	3,29E-02	1,90E-02	1,39E-03	8,74E-02	6,69E-02	7,79E-04	2,68E-02	2,16E-02
ETA10	Est.	5,06E-04	5,91E-02	3,93E-02	7,10E-04	2,92E-02	2,19E-02	-3,76E-04	8,70E-03	6,03E-03
	Valid.	8,13E-03	1,00E-01	5,41E-02	4,88E-04	2,90E-02	2,37E-02	-9,12E-05	5,53E-03	4,25E-03
ETA11	Est.	-1,46E-03	4,84E-02	3,61E-02	2,67E-04	1,04E-01	8,32E-02	2,05E-05	4,11E-02	3,36E-02
	Valid.	-2,67E-03	3,76E-02	2,78E-02	-6,91E-04	8,58E-02	6,57E-02	-1,16E-04	3,52E-02	2,82E-02
ETA12	Est.	5,06E-04	3,31E-02	1,84E-02	5,98E-04	5,40E-02	3,92E-02	-2,18E-03	4,83E-02	1,40E-02
	Valid.	1,72E-03	1,74E-02	1,14E-02	-4,64E-03	5,86E-02	3,93E-02	9,49E-04	7,33E-03	5,76E-03
ETA13	Est.	-1,35E-03	1,88E-02	1,46E-02	-1,60E-03	5,19E-02	3,68E-02	-1,84E-04	2,27E-02	1,68E-02
	Valid.	1,19E-03	1,43E-02	1,12E-02	-2,59E-03	3,01E-02	2,08E-02	-7,42E-04	1,83E-02	1,35E-02
ETA14	Est.	-1,26E-03	3,19E-01	1,16E-01	7,25E-03	1,06E-01	8,24E-02	1,44E-03	2,76E-02	2,17E-02
	Valid.	1,00E-03	2,66E-02	1,96E-02	-2,92E-03	1,16E-01	8,95E-02	-9,66E-04	2,93E-02	2,32E-02
ETA15	Est.	-1,53E-04	5,70E-02	3,69E-02	9,24E-04	1,20E-01	9,59E-02	-4,00E-04	1,63E-02	1,27E-02
	Valid.	-1,57E-03	8,44E-02	5,76E-02	4,64E-03	9,69E-02	7,72E-02	2,93E-04	1,39E-02	1,10E-02

Est. – período de estimação; Valid. – período de validação; ME – erro médio; RMSE – erro quadrático médio e MAE – erro absoluto médio.

Portanto, após todo o processo iterativo para escolha do modelo mais apropriado para cada situação, foram selecionados os modelos exibidos na Tabela 5.5 para a turbidez, na Tabela 5.6 para o parâmetro cloro e na Tabela 5.7 para o flúor.

Tabela 5.5 – Modelos ARIMA selecionados para o parâmetro turbidez por ETA

Nome da estação	Turbidez	
	ARIMA (p,d,q)	Modelo
ETA01	(1,0,1)	$X_t = 0,50X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,15\varepsilon_{t-1}$
ETA02	(0,1,2)	$X_t = X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,24\varepsilon_{t-1} - 0,45\varepsilon_{t-2}$
ETA03	(1,1,1)	$X_t = 1,35X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,88\varepsilon_{t-1}$
ETA04	(0,1,2)	$X_t = X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,44\varepsilon_{t-1} - 0,49\varepsilon_{t-2}$
ETA05	(1,1,3)	$X_t = 1,9X_{t-1} + \varepsilon_t - 1,64\varepsilon_{t-1} + 0,54\varepsilon_{t-2} + 0,1\varepsilon_{t-3}$
ETA06	(1,0,1)	$X_t = 0,86X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,53\varepsilon_{t-1}$
ETA07	(1,1,1)	$X_t = 1,36X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,88\varepsilon_{t-1}$
ETA08	(1,1,3)	$X_t = 1,88X_{t-1} + \varepsilon_t - 1,51\varepsilon_{t-1} + 0,46\varepsilon_{t-2} + 0,06\varepsilon_{t-3}$
ETA09	(1,1,1)	$X_t = 1,58X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,91\varepsilon_{t-1}$
ETA10	(2,1,2)	$X_t = 0,63X_{t-1} + 0,39X_{t-2} + \varepsilon_t - 0,02\varepsilon_{t-1} - 0,81\varepsilon_{t-2}$
ETA11	(1,1,1)	$X_t = 1,43X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,89\varepsilon_{t-1}$
ETA12	(1,1,2)	$X_t = 1,66X_{t-1} + \varepsilon_t - 1,37\varepsilon_{t-1} - 0,40\varepsilon_{t-2}$
ETA13	(4,1,1)	$X_t = 1,34X_{t-1} - 0,26X_{t-2} + 0,20X_{t-3} + 0,29X_{t-4} + \varepsilon_t - 0,96\varepsilon_{t-1}$
ETA14	(5,1,5)	$X_t = 0,91X_{t-1} - 0,36X_{t-2} + 0,07X_{t-3} - 0,37X_{t-4} + 0,20X_{t-5} + \varepsilon_t - 0,49\varepsilon_{t-1} - 0,45\varepsilon_{t-2} + 0,26\varepsilon_{t-3} + 0,54\varepsilon_{t-4} - 0,73\varepsilon_{t-5}$
ETA15	(1,1,1)	$X_t = 1,57X_{t-1} + \varepsilon_t - 0,85\varepsilon_{t-1}$

X_t – série temporal dos dados de turbidez gerados pelo modelo; ε_t – termo de erro.

Tabela 5.6 – Modelos ARIMA selecionados para o parâmetro cloro por ETA

Nome da estação	Cloro	
	ARIMA (p,d,q)	Modelo
ETA01	(1,1,1)	$Y_t = 1,43Y_{t-1} + \varepsilon_t - 0,92\varepsilon_{t-1}$
ETA02	(1,1,2)	$Y_t = 1,01Y_{t-1} + \varepsilon_t - 0,87\varepsilon_{t-1} - 0,09\varepsilon_{t-2}$
ETA03	(4,1,2)	$Y_t = 1,16Y_{t-1} - 0,16Y_{t-2} - 0,09Y_{t-3} - 0,20Y_{t-4} + \varepsilon_t - 0,70\varepsilon_{t-1} - 0,06\varepsilon_{t-2}$
ETA04	(4,1,2)	$Y_t = 0,09Y_{t-1} - 0,06Y_{t-2} - 0,16Y_{t-3} - 0,03Y_{t-4} + \varepsilon_t - 0,09\varepsilon_{t-1} - 0,80\varepsilon_{t-2}$
ETA05	(3,0,3)	$Y_t = 1,25Y_{t-1} + 0,15Y_{t-2} - 0,41Y_{t-3} + \varepsilon_t - 1,00\varepsilon_{t-1} - 0,44\varepsilon_{t-2} + 0,47\varepsilon_{t-3}$
ETA06	(2,1,3)	$Y_t = 0,94Y_{t-1} - 0,89Y_{t-2} + \varepsilon_t - 0,69\varepsilon_{t-1} + 0,68\varepsilon_{t-2} - 0,73\varepsilon_{t-3}$
ETA07	(0,1,1)	$Y_t = Y_{t-1} + \varepsilon_t - 0,52\varepsilon_{t-1}$
ETA08	(1,1,5)	$Y_t = 0,61Y_{t-1} + \varepsilon_t - 1,32\varepsilon_{t-1} + 0,27\varepsilon_{t-2} + 0,11\varepsilon_{t-3} + 0,03\varepsilon_{t-4} - 0,08\varepsilon_{t-5}$
ETA09	(1,1,1)	$Y_t = 1,19Y_{t-1} + \varepsilon_t - 0,94\varepsilon_{t-1}$
ETA10	(2,1,2)	$Y_t = 1,62Y_{t-1} - 0,23Y_{t-2} + \varepsilon_t - 1,33\varepsilon_{t-1} + 0,38\varepsilon_{t-2}$
ETA11	(1,0,0)	$Y_t = 0,62Y_{t-1}$
ETA12	(1,1,2)	$Y_t = 0,28Y_{t-1} + \varepsilon_t - 0,19\varepsilon_{t-1} - 0,76\varepsilon_{t-2}$
ETA13	(2,1,3)	$Y_t = 0,91Y_{t-1} - 0,87Y_{t-2} + \varepsilon_t - 0,61\varepsilon_{t-1} + 0,57\varepsilon_{t-2} - 0,68\varepsilon_{t-3}$
ETA14	(3,1,4)	$Y_t = 0,69Y_{t-1} + 0,24Y_{t-2} + 0,69Y_{t-3} + \varepsilon_t - 0,46\varepsilon_{t-1} - 0,58\varepsilon_{t-2} - 0,57\varepsilon_{t-3} + 0,62\varepsilon_{t-4}$
ETA15	(1,1,1)	$Y_t = 1,13Y_{t-1} + \varepsilon_t - 0,93\varepsilon_{t-1}$

Y_t – série temporal dos dados de cloro gerados pelo modelo; ε_t – termo de erro.

Tabela 5.7 – Modelos ARIMA selecionados para o parâmetro flúor por ETA

Nome da estação	Flúor	
	ARIMA (p,d,q)	Modelo
ETA01	(1,1,2)	$Z_t = 1,44Z_{t-1} + \varepsilon_t - 0,87\varepsilon_{t-1} - 0,10\varepsilon_{t-2}$
ETA02	(0,1,2)	$Z_t = Z_{t-1} + \varepsilon_t - 0,82\varepsilon_{t-1} - 0,13\varepsilon_{t-2}$
ETA03	(1,1,1)	$Z_t = 1,18Z_{t-1} + \varepsilon_t - 0,92\varepsilon_{t-1}$
ETA04	(2,1,2)	$Z_t = 0,36Z_{t-1} + 0,33Z_{t-2} + \varepsilon_t + 0,08\varepsilon_{t-1} - 0,82\varepsilon_{t-2}$
ETA05	(2,1,2)	$Z_t = 0,21Z_{t-1} + 0,15Z_{t-2} + \varepsilon_t - 0,02\varepsilon_{t-1} - 0,95\varepsilon_{t-2}$
ETA06	(3,0,3)	$Z_t = 0,38Z_{t-1} - 0,38Z_{t-2} + 0,76Z_{t-3} + \varepsilon_t - 0,07\varepsilon_{t-1} + 0,45\varepsilon_{t-2} - 0,59\varepsilon_{t-3}$
ETA07	(2,1,3)	$Z_t = 0,59Z_{t-1} + 0,56Z_{t-2} + \varepsilon_t - 0,42\varepsilon_{t-1} - 0,84\varepsilon_{t-2} - 0,37\varepsilon_{t-3}$
ETA08	(2,0,3)	$Z_t = -0,14Z_{t-1} + 0,80Z_{t-2} + \varepsilon_t + 0,58\varepsilon_{t-1} - 0,47\varepsilon_{t-2} - 0,13\varepsilon_{t-3}$
ETA09	(1,1,1)	$Z_t = 1,43Z_{t-1} + \varepsilon_t - 0,91\varepsilon_{t-1}$
ETA10	(2,1,1)	$Z_t = 1,42Z_{t-1} + 0,17Z_{t-2} + \varepsilon_t - 0,94\varepsilon_{t-1}$
ETA11	(1,0,2)	$Z_t = 0,71Z_{t-1} + \varepsilon_t - 0,23\varepsilon_{t-1} - 0,21\varepsilon_{t-2}$
ETA12	(0,1,1)	$Z_t = Z_{t-1} + \varepsilon_t - 0,99\varepsilon_{t-1}$
ETA13	(3,1,3)	$Z_t = 1,45Z_{t-1} - 0,97Z_{t-2} + 0,43Z_{t-3} + \varepsilon_t - 0,98\varepsilon_{t-1} + 0,80\varepsilon_{t-2} - 0,75\varepsilon_{t-3}$
ETA14	(1,1,2)	$Z_t = 1,75Z_{t-1} + \varepsilon_t - 1,44\varepsilon_{t-1} + 0,44\varepsilon_{t-2}$
ETA15	(4,1,2)	$Z_t = 1,22Z_{t-1} + 0,13Z_{t-2} + 0,04Z_{t-3} + 0,21Z_{t-4} + \varepsilon_t - 0,94\varepsilon_{t-1} - 0,03\varepsilon_{t-2}$

Z_t – série temporal dos dados de flúor gerados pelo modelo; ε_t – termo de erro.

Foi possível notar que os modelos não apresentaram comportamento semelhante quando comparados de forma geral, nem mesmo quando analisados por parâmetro (turbidez, cloro e flúor). Então, percebe-se que cada série de dados contém características próprias, sendo necessária a análise individualizada.

Após a determinação dos modelos mais adequados, a etapa seguinte consistiu na geração dos resíduos de cada modelo, definidos como a diferença entre os valores gerados pelo modelo e os valores originais dos dados de monitoramento. Essas novas variáveis (resíduos) foram denominadas como “resTurbidez”, “resCloro” e “resFlúor”.

Essas novas variáveis foram organizadas em subgrupos racionais, correspondendo à média diária. Por meio da aplicação do teste de Shapiro-Wilk, verificou-se que todos os parâmetros apresentaram aderência à distribuição normal ao nível (α) de 5% de significância.

Com o objetivo de avaliar a autocorrelação presente nessas novas variáveis, foram aplicadas as funções ACFs e PACFs, apresentadas no Apêndice V. Nota-se que a autocorrelação diminuiu sensivelmente quando comparada às mesmas funções aplicadas aos dados originais (Apêndice III). Além disso, de acordo com o Apêndice VI, o p-valor do teste de Box-Pierce para as

variáveis “resTurbidez”, “resCloro” e “resFlúor” de cada ETA permitem concluir, ao nível de 5% de significância, que essas novas variáveis não são autocorrelacionadas, isto é, são independentes.

O desempenho dos gráficos de controle é afetado quando existe autocorrelação no processo, tornando-os ineficazes na redução sistemática da variabilidade nas características da qualidade de interesse. A Tabela 5.8 evidencia esse fato, demonstrando um comparativo da quantidade total de pontos fora dos limites de controle em cada ETA referentes à aplicação dos gráficos de controle aos dados originais (sem o tratamento da autocorrelação) e aos resíduos dos modelos ARIMA (com o tratamento da autocorrelação - variáveis “resTurbidez”, “resCloro” e “resFlúor”).

Tabela 5.8 – Número de pontos fora dos limites de controle considerando as variáveis sem o tratamento da autocorrelação e após o tratamento

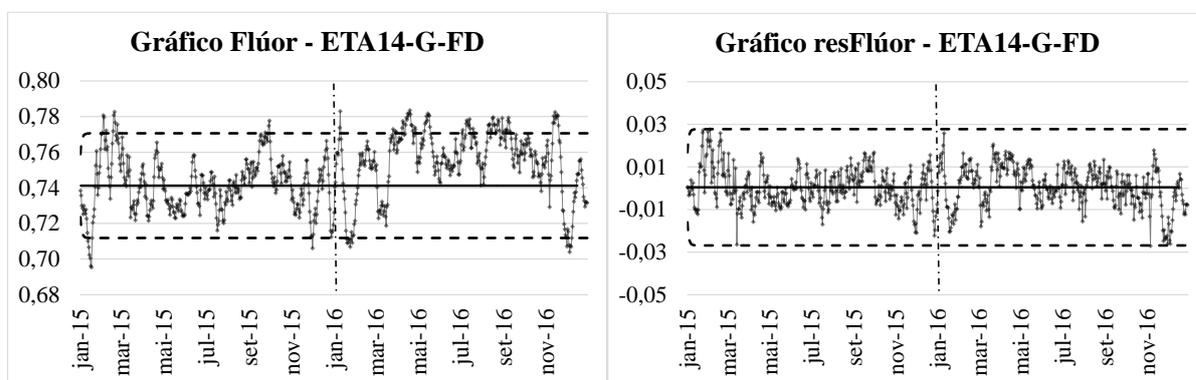
Nome da estação	Turbidez			Cloro			Flúor		
	Var. original	Var. resíduos	Razão var. original e resíduos	Var. original	Var. resíduos	Razão var. original e resíduos	Var. original	Var. resíduos	Razão var. original e resíduos
ETA01	11	6	1,8	164	22	7,5	106	5	21,2
ETA02	192	8	24	34	20	1,7	119	33	3,6
ETA03	222	5	44,4	47	9	5,2	125	11	11,4
ETA04	17	5	3,4	257	30	8,6	152	7	21,7
ETA05	84	17	4,9	83	7	11,9	37	2	18,5
ETA06	145	17	8,5	144	48	3	86	3	28,7
ETA07	356	215	1,7	459	16	28,2	330	35	9,4
ETA08	128	63	2	169	27	6,3	147	12	12,3
ETA09	96	8	12	44	1	44	123	5	24,6
ETA10	236	16	14,8	128	13	10	59	11	5,4
ETA11	164	7	23,4	70	1	70	31	0	-
ETA12	192	6	32	39	4	11,1	6	5	1,2
ETA13	408	10	40,8	245	87	2,8	96	18	5,3
ETA14	135	31	4,4	141	29	4,9	112	1	112
ETA15	242	37	6,5	148	17	8,7	291	6	48,5

Var. – variável.

Observa-se que a quantidade de pontos fora dos limites de controle, considerando os valores originais, é maior em todas as estações, em virtude da elevada autocorrelação presente nesses dados, atingindo magnitudes, por exemplo, da ordem de 112 vezes (razão entre variável original e resíduos) mais pontos fora dos limites na ETA 14 considerando o parâmetro flúor e 70 vezes na ETA 11 referente ao cloro.

A Figura 5.15 apresenta a forma de identificação dos pontos fora dos limites de controle por meio do gráfico de controle, evidenciando a situação descrita na tabela anterior. Foi utilizado o exemplo mencionado previamente da ETA 14, ou seja, a aplicação dos gráficos aos dados originais de flúor e aos resíduos da série temporal do modelo ARIMA após o tratamento da autocorrelação (variável “resFlúor”). Verifica-se o total de 112 pontos fora dos limites no primeiro gráfico, em contraposição ao único ponto no segundo, isto é, 112 vezes mais pontos fora dos limites, conforme citado.

Figura 5.15 – Gráfico de controle aplicado aos dados originais do flúor e aos resíduos (resFlúor) da ETA 14



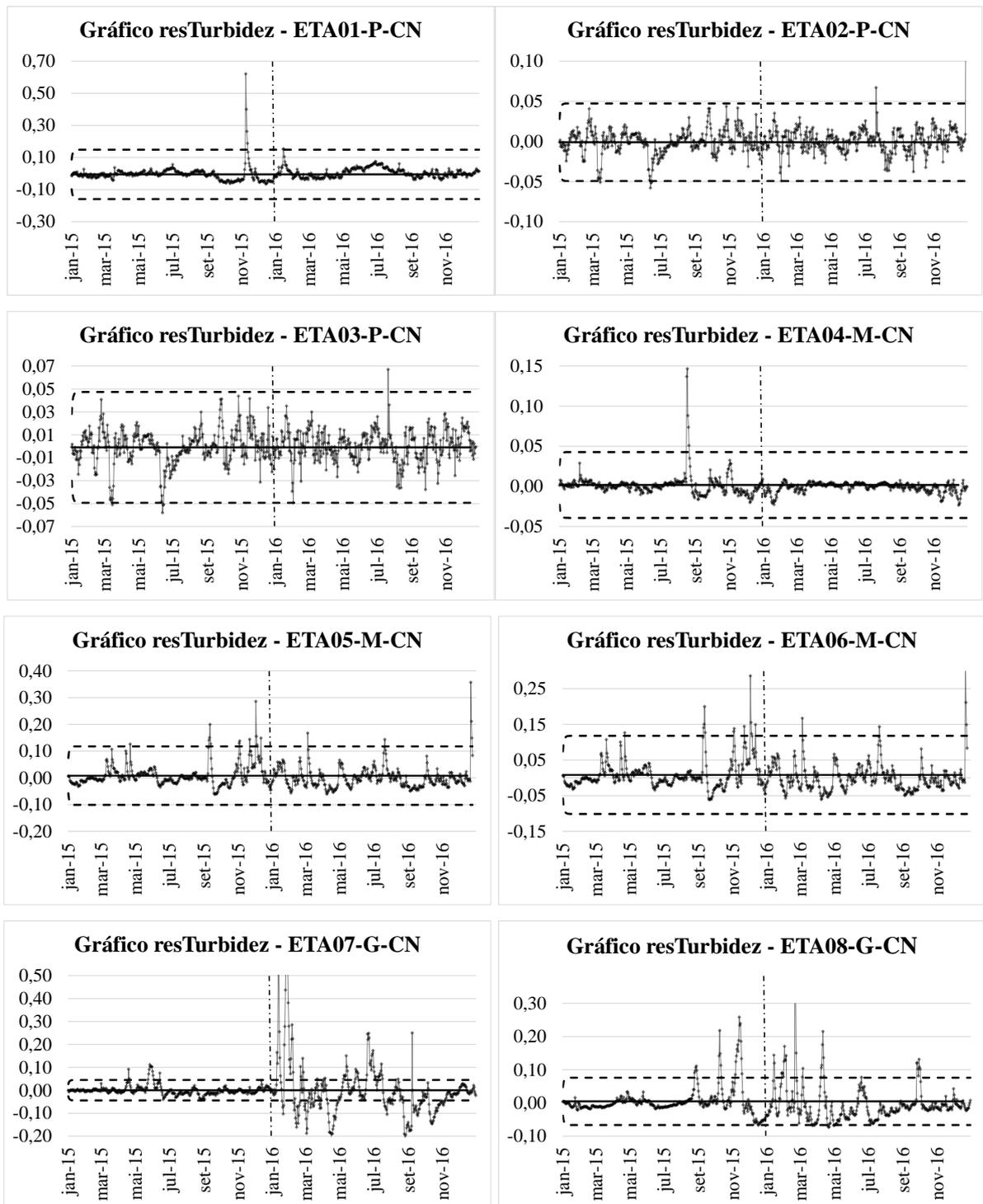
Após a execução do tratamento estatístico da autocorrelação, foi possível comparar a estabilidade das ETAs em função do porte e da tecnologia de tratamento. Na sequência, são apresentados os resultados obtidos. Destaca-se que o percentual de estabilidade das estações de tratamento foi calculado por meio da divisão do número total de pontos situados entre os limites de controle pelo número total de pontos plotados no gráfico. Ademais, a utilização de termos percentuais permite a comparação dos resultados, visto que o número de dados monitorados em cada estação é variável.

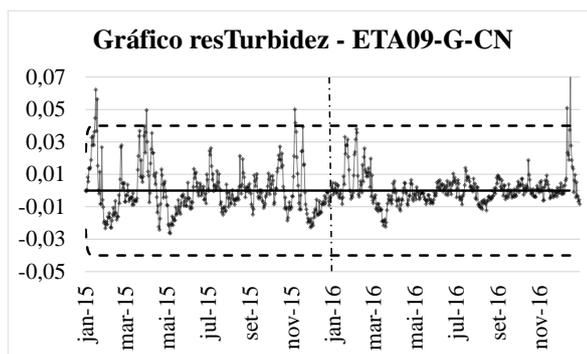
5.5.2 Comparativo da estabilidade em função do porte

5.5.2.1 Turbidez

A Figura 5.16 exibe os gráficos de controle aplicados à variável “resTurbidez” para comparar a estabilidade das estações de tratamento em função do porte, correspondendo às ETAs de 01 a 09.

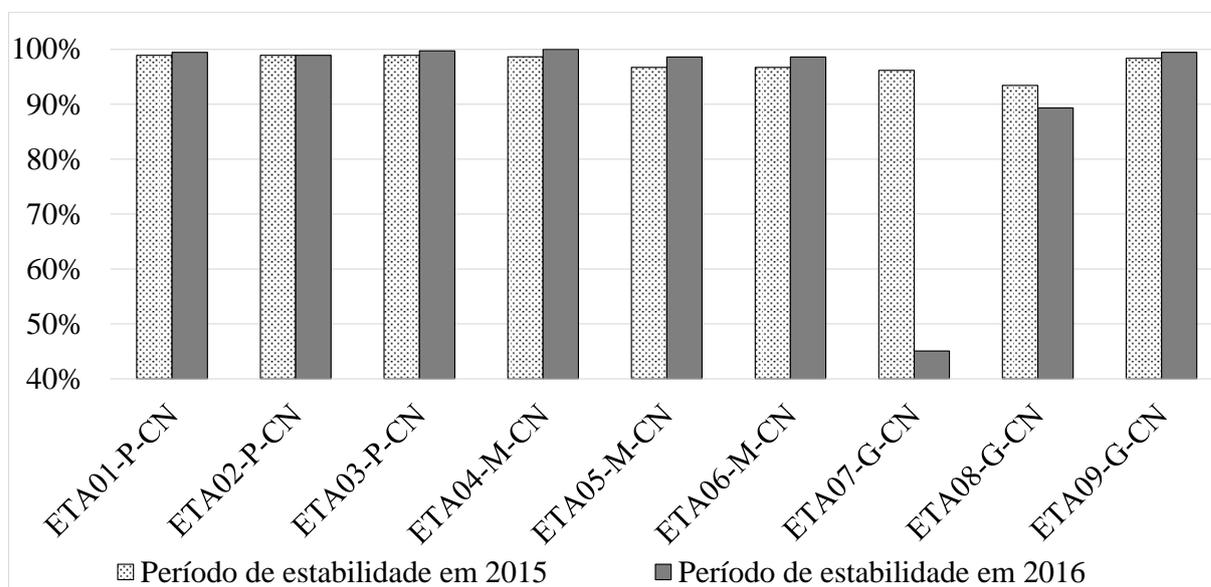
Figura 5.16 – Gráficos de controle aplicados à variável “resTurbidez” para comparar a estabilidade em função do porte





Já, a Figura 5.17 apresenta o período de estabilidades das estações mencionadas, anteriormente, em termos percentuais, como forma de auxiliar na interpretação dos resultados.

Figura 5.17 – Período de estabilidade segundo o porte das ETAs considerando a variável “resTurbidez”



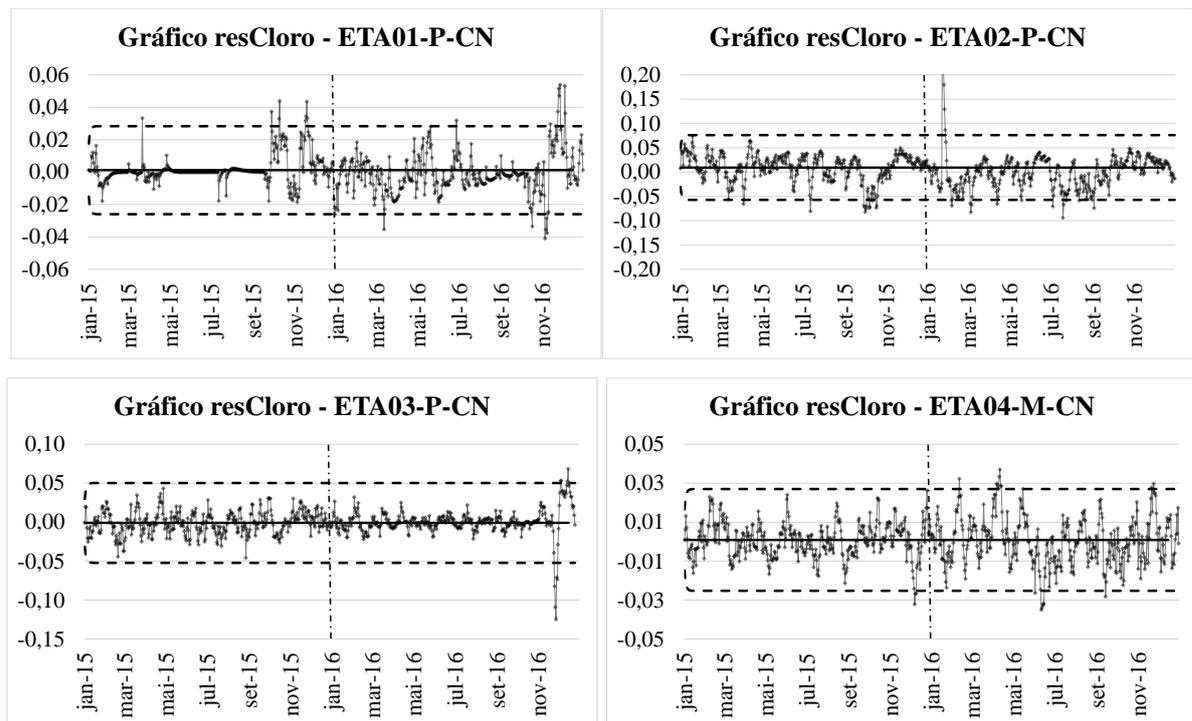
Por meio da análise dos gráficos de controle, verifica-se que a maior concentração de pontos fora dos limites de controle foi obtida entre os meses de novembro a março período no qual a turbidez da água bruta apresentou valores mais elevados para as ETAs analisadas. Em virtude da precipitação, as águas dos mananciais de superfície tendem a ficar mais turvas, devido ao carreamento dos sedimentos das margens pelo fluxo de escoamento superficial da água, exigindo que alterações sejam realizadas no tratamento, o que pode levar à instabilidades nesse período.

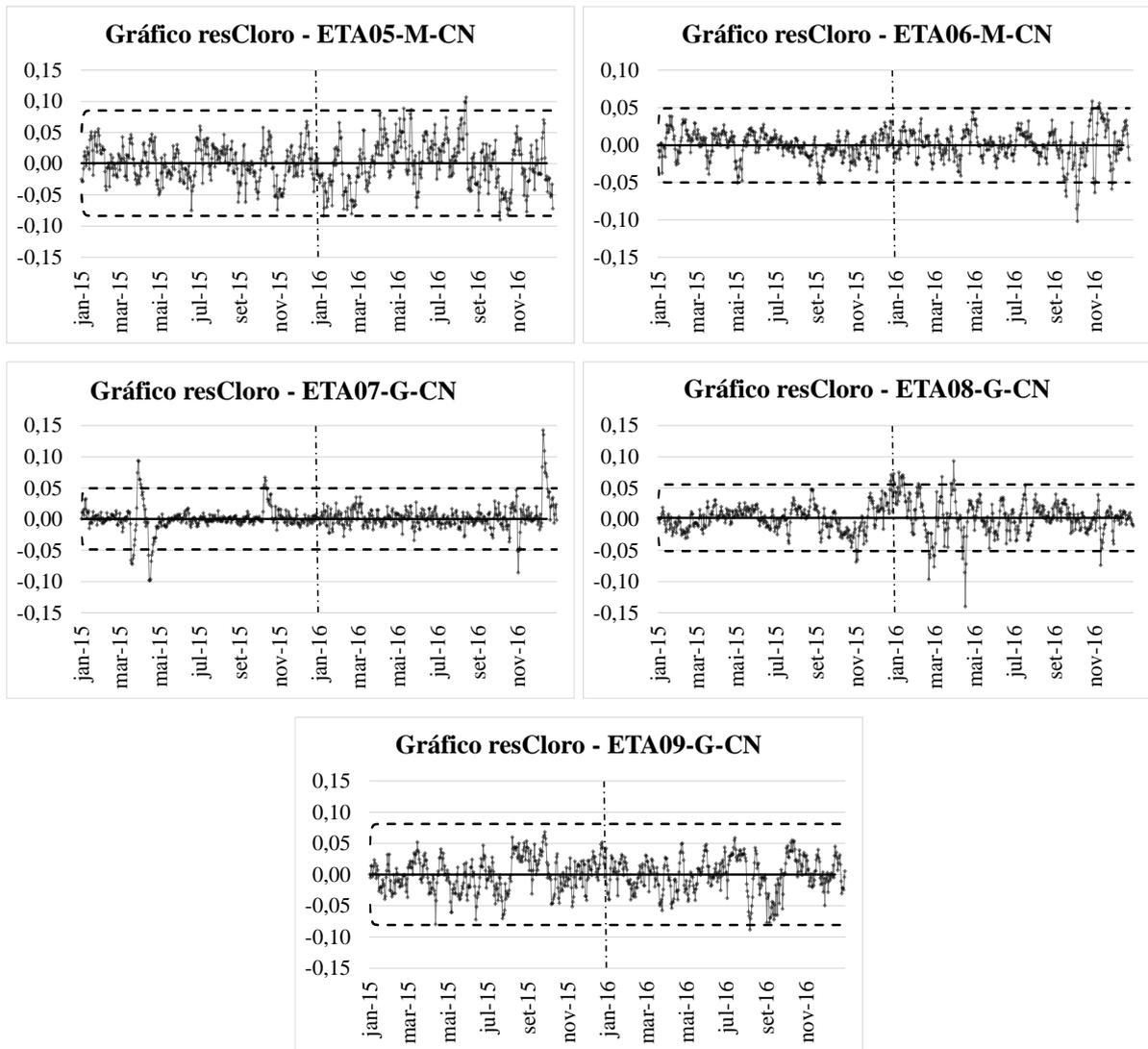
Nota-se, em termos de estabilidade média, que as ETAs de pequeno porte atingiram um menor nível de instabilidade, seguidas pelas ETAs de médio e grande porte. Esses resultados obtidos não são compatíveis com o esperado, uma vez que as estações de tratamento de água de grande porte, em sua maioria, apresentam melhor performance devido à utilização de sistemas automatizados mais complexos e equipamentos de alta precisão, os quais permitem reduzir a probabilidade de erros ou desvios na operação, além da provável maior capacitação técnica dos operadores. No entanto, foi verificada a contribuição substancial da ETA 07 para os resultados alcançados, estação que apresenta sérios problemas no tocante ao atendimento ao padrão.

5.5.2.2 Cloro

A Figura 5.18 expõe os gráficos de controle aplicados à variável “resCloro” com o mesmo objetivo de comparar a estabilidade das estações de tratamento em função do porte, porém considerando o parâmetro cloro.

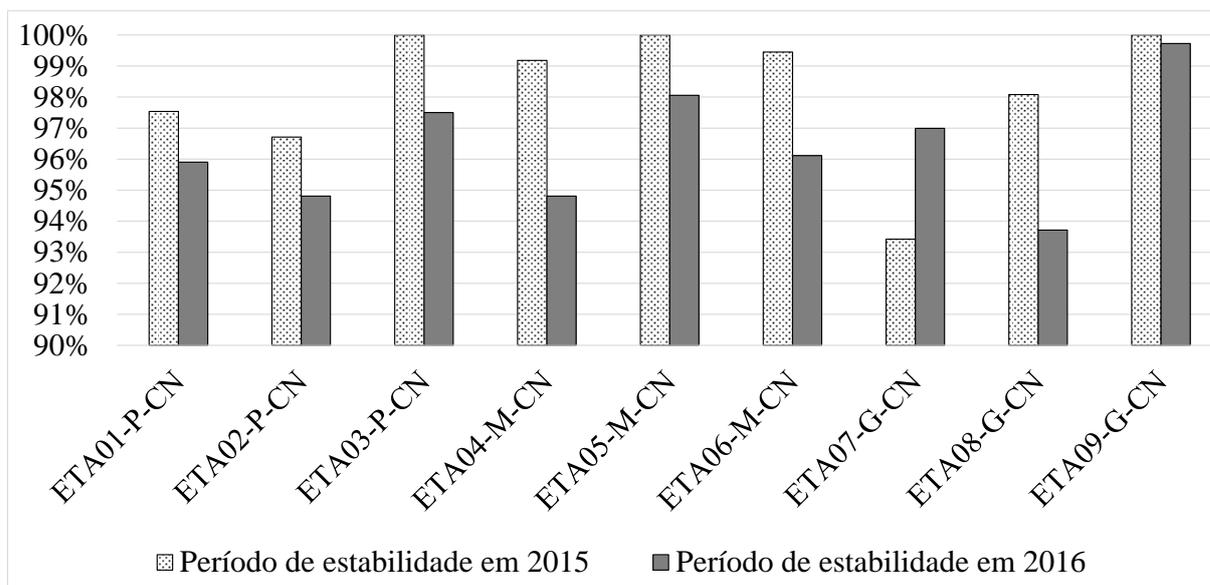
Figura 5.18 – Gráficos de controle aplicados à variável “resCloro” para comparar a estabilidade em função do porte





A Figura 5.19 mostra o percentual de estabilidade das estações, também relativos ao parâmetro cloro.

Figura 5.19 – Período de estabilidade segundo o porte das ETAs considerando a variável “resCloro”



Primeiramente, percebe-se que, considerando a média de estabilidade dos grupos, os percentuais apresentaram pequena diferença. A maior estabilidade foi obtida para as ETAs de médio porte, seguidas pelas ETAs de pequeno e grande porte.

Além disso, nota-se que, dentro de cada grupo, há estações com percentuais elevados de estabilidade, isto é, a ETA 03 no grupo de pequeno porte, ETA 05 no grupo de médio porte e ETA 09 nas estações de grande porte. Notadamente, na ETA 09, as aplicações dos produtos químicos (oxidação e desinfecção por cloração, fluoretação por ácido fluossilícico e correção de pH com cal hidratada) ocorrem de forma mecanizada e automatizada, não havendo, praticamente, contato dos operadores diretamente com os produtos.

Nota-se, então, que estações com menor grau de complexidade até estações com elevado grau de mecanização e automatização, como a ETA 09, conseguem atingir altos níveis de desempenho. Dessa forma, verifica-se que o porte pode não influenciar diretamente nos desempenhos obtidos, mas a forma de operação e precisão dos equipamentos utilizados nas ETAs.

Ademais, percebe-se que, com exceção da ETA 07, houve redução no percentual de estabilidade em 2016 em relação à 2015, fato que não era esperado. A tendência seria maior desempenho e

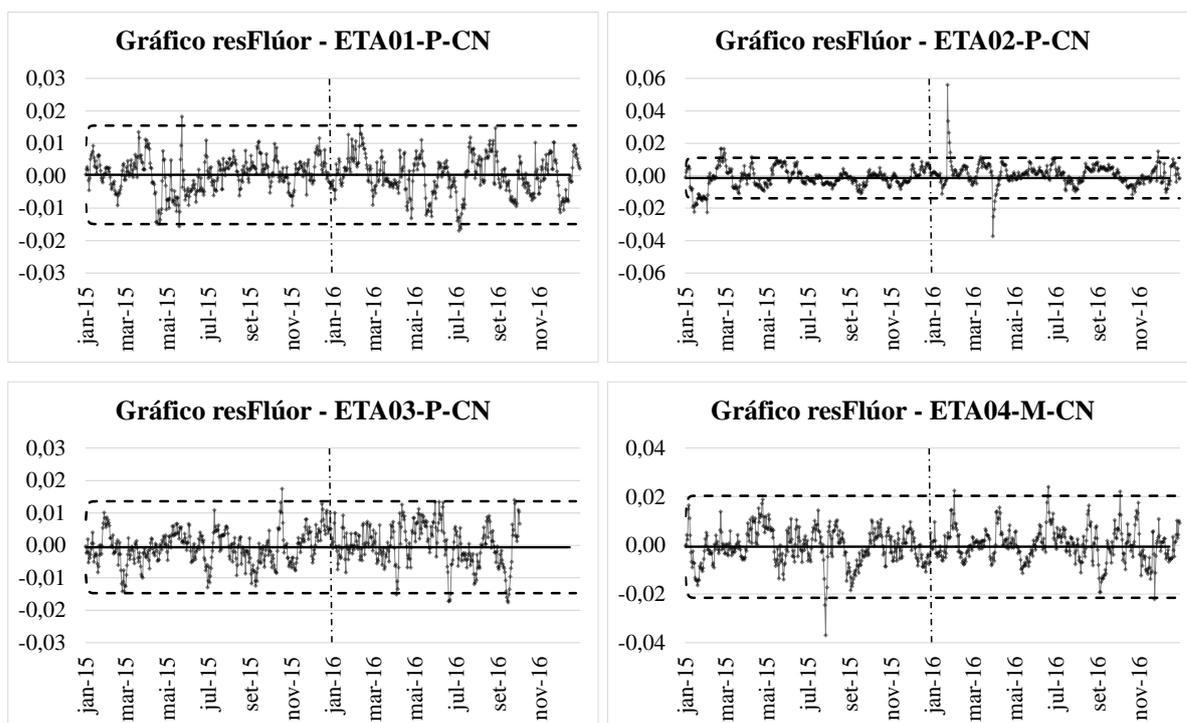
estabilidade em 2016, em virtude das metas progressivas estabelecidas pela Portaria 2914/2011 e eventuais modificações realizadas ao longo de 2015 nos processos de tratamento de água.

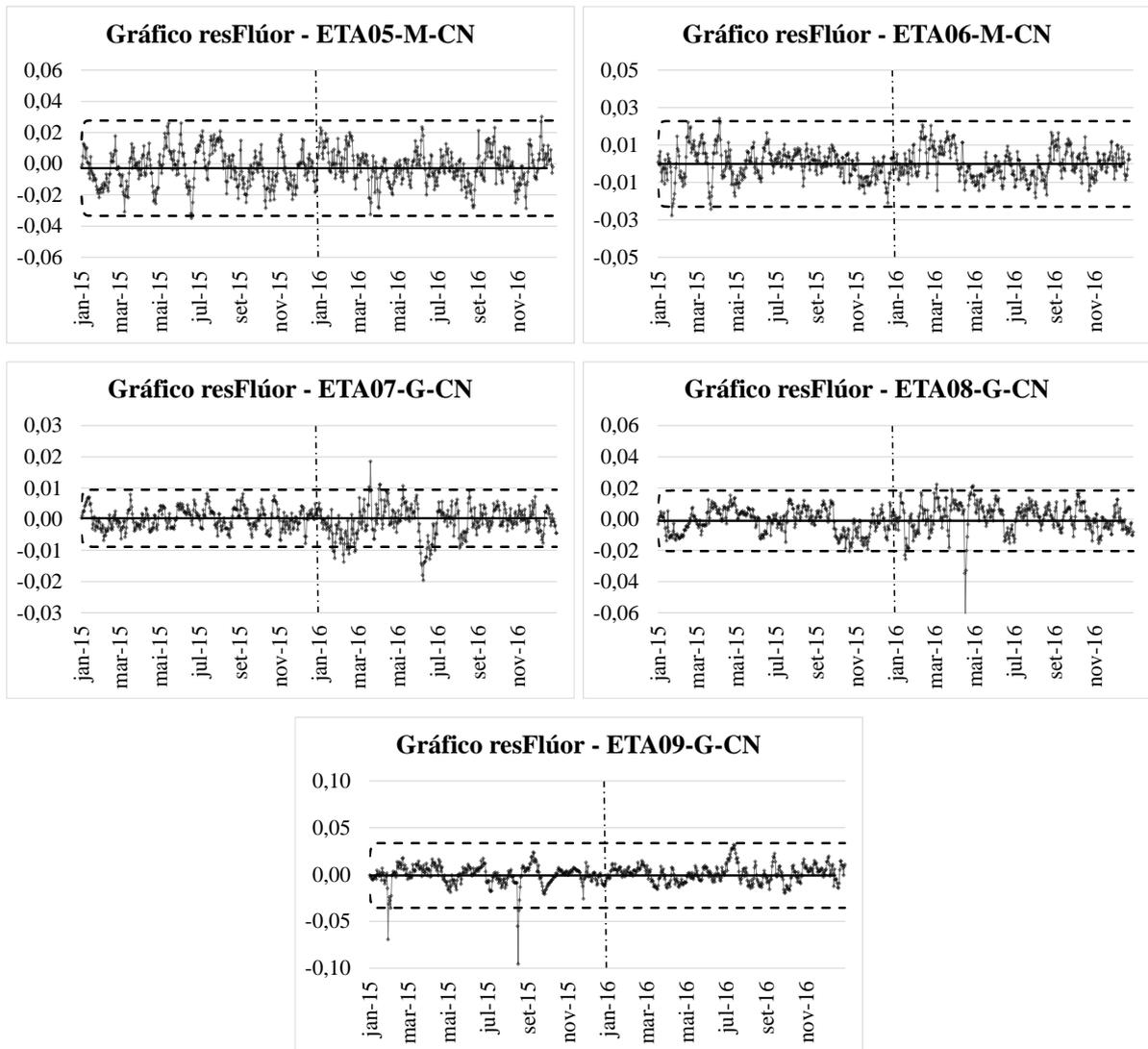
Com relação à estação que apresentou o menor percentual médio de estabilidade, isto é, a ETA 07, constata-se que esse desempenho influenciou no atendimento ao padrão de potabilidade, fazendo com que essa fosse a única estação a não atingir 100% de atendimento aos limites especificados na Portaria 2914/2011 entre as nove ETAs analisadas.

5.5.2.3 Flúor

Por sua vez, a Figura 5.20 demonstra os gráficos de controle aplicados à variável “resFlúor”, com a finalidade de comparar a estabilidade em função do porte.

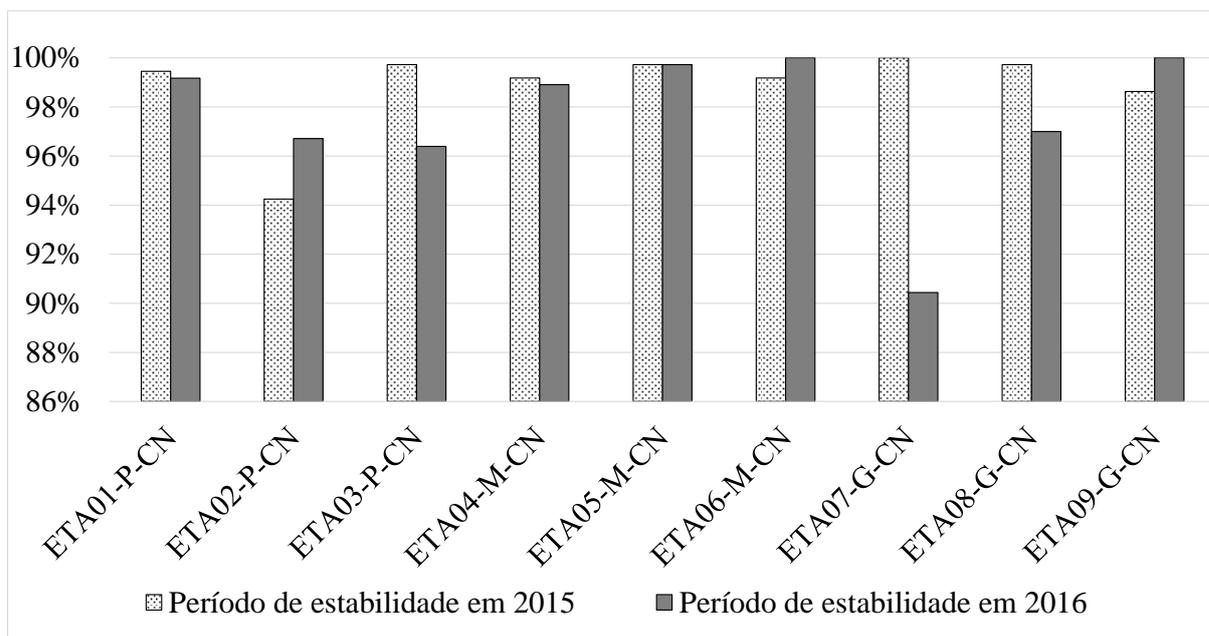
Figura 5.20 – Gráficos de controle aplicados à variável “resFlúor” para comparar a estabilidade em função do porte





Como nos casos anteriores, a Figura 5.21 também exibe o percentual de estabilidade das estações, porém no tocante ao parâmetro flúor.

Figura 5.21 – Período de estabilidade segundo o porte das ETAs considerando a variável “resFlúor”



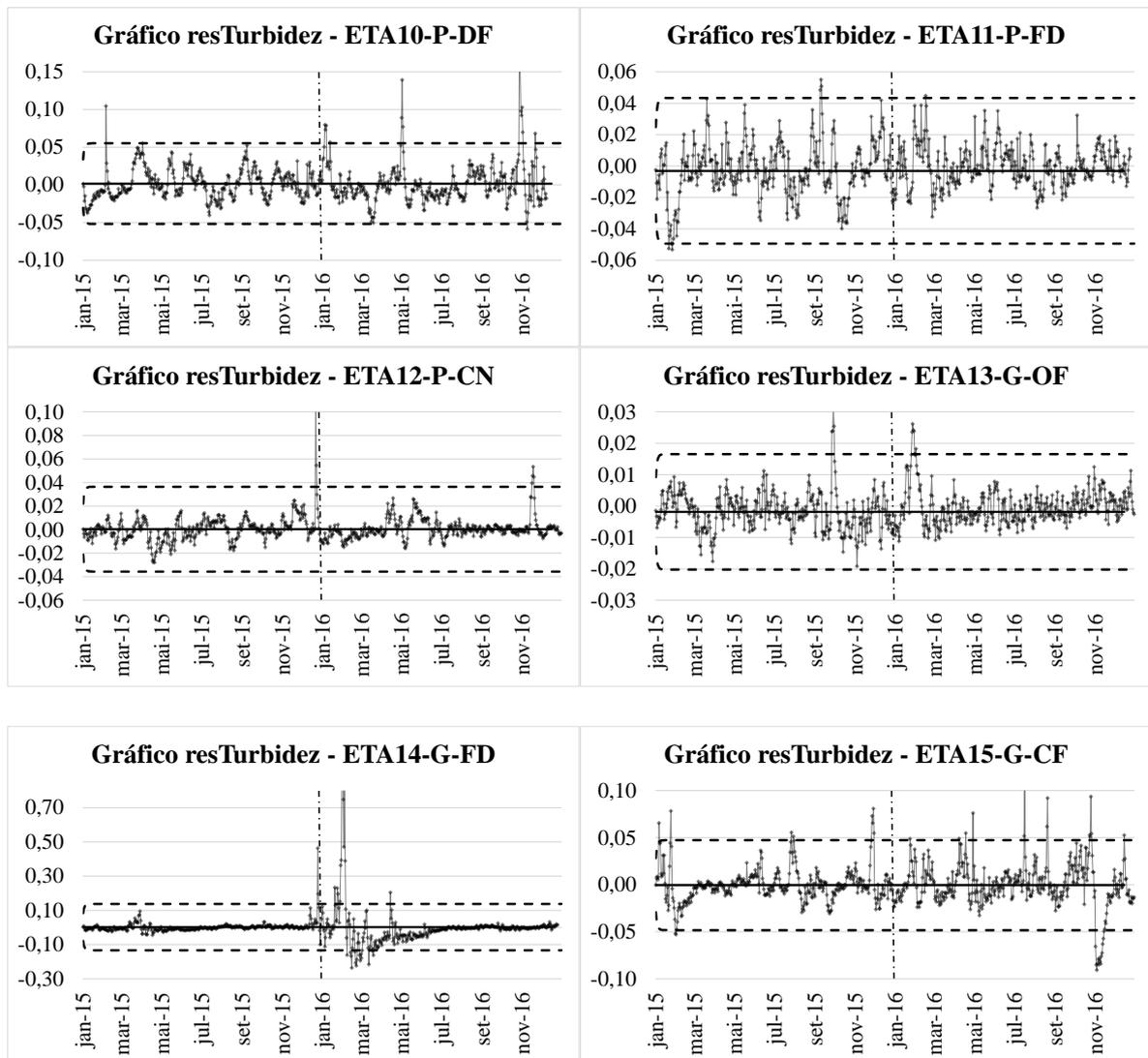
De forma geral, verifica-se que as ETAs de médio porte atingiram um maior nível de estabilidade, seguidas pelas estações de médio e grande porte, com resultados semelhantes. Assim como na situação ocorrida para o parâmetro cloro, nota-se que dentro dos agrupamentos de pequeno e grande porte há estações com percentuais elevados de estabilidade, como a ETA 01 e a ETA 09, respectivamente.

5.5.3 Comparativo da estabilidade em função da tecnologia de tratamento

5.5.3.1 Turbidez

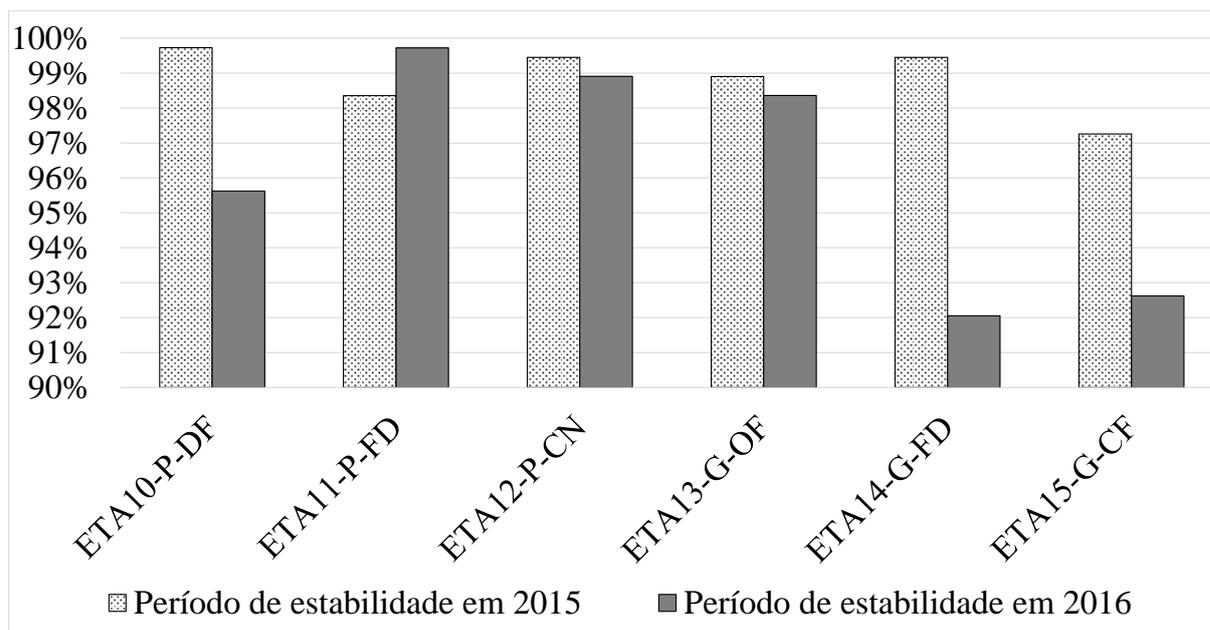
A Figura 5.22 exibe os gráficos de controle aplicados à variável “resTurbidez” para comparar a estabilidade das estações de tratamento em função da tecnologia de tratamento, correspondendo às ETAs de 10 a 15.

Figura 5.22 – Gráficos de controle aplicados à variável “resTurbidez” para comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento



Por sua vez, a Figura 5.23 mostra o percentual de estabilidade das ETAs em 2015 e 2016.

Figura 5.23 – Período de estabilidade segundo a tecnologia de tratamento das ETAs considerando a variável “resTurbidez”



De forma geral, os resultados indicam que, no grupo das ETAs de pequeno porte, a ETA 12 (convencional) apresenta o sistema com maior estabilidade, seguida pela ETA 11 (filtração direta) e ETA 10 (dupla filtração). A maior estabilidade para a ETA 12 pode ser justificada pelo emprego da tecnologia convencional no tratamento da água, técnica robusta para maiores variações nos valores de turbidez da água bruta.

Já no conjunto das ETAs de grande porte, a ETA 13 (oxidação com filtração) apresentou melhor desempenho, seguida da ETA 14 (filtração direta) e ETA 15 (ciclo completo com flotação). Ressalta-se o desempenho inferior das ETAs 14 e 15, considerando o percentual em 2016, com 92,1% e 92,6% do tempo de estabilidade, respectivamente. Em ambas as situações, nota-se que, no período de estudo, a vazão média tratada nessas duas ETAs foi consideravelmente menor que a capacidade instalada. A ETA 14 utilizou cerca de 13% de sua capacidade e a ETA 15 aproximadamente 50%, circunstâncias que podem ser esclarecidas pela declaração de situação crítica de escassez hídrica na porção hidrográfica dos dois reservatórios de captação.

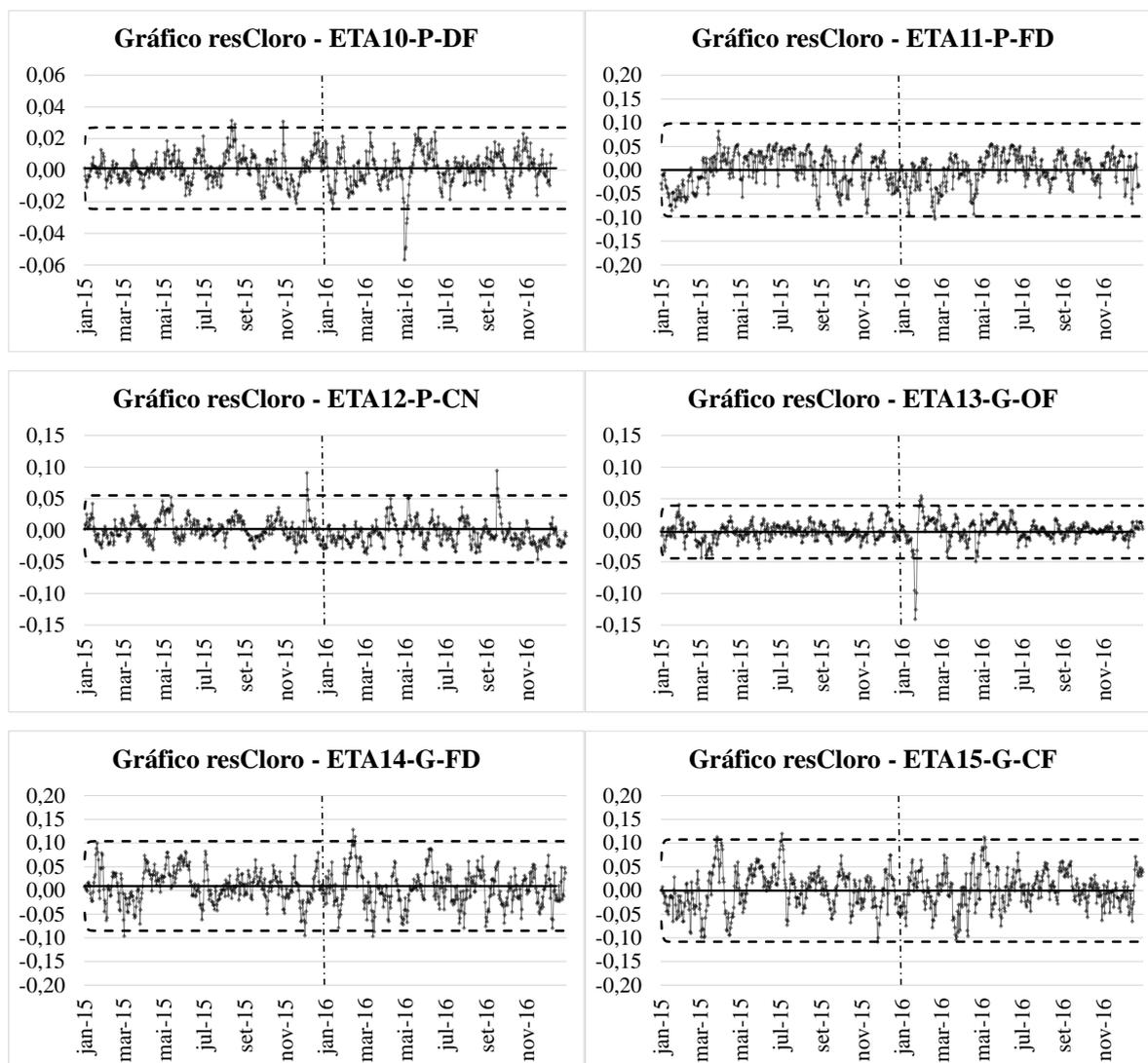
Então, assim como no caso ocorrido para a ETA 07, o volume nas barragens reduziu expressivamente, sendo necessária a captação em águas mais profundas, abaixo do nível comumente utilizado para captação. Especialmente, nota-se com clareza no gráfico de controle

da ETA 14 essa situação, visto que a estação sofreu forte instabilidade no final de 2015 e início de 2016, período crítico da escassez hídrica.

5.5.3.2 Cloro

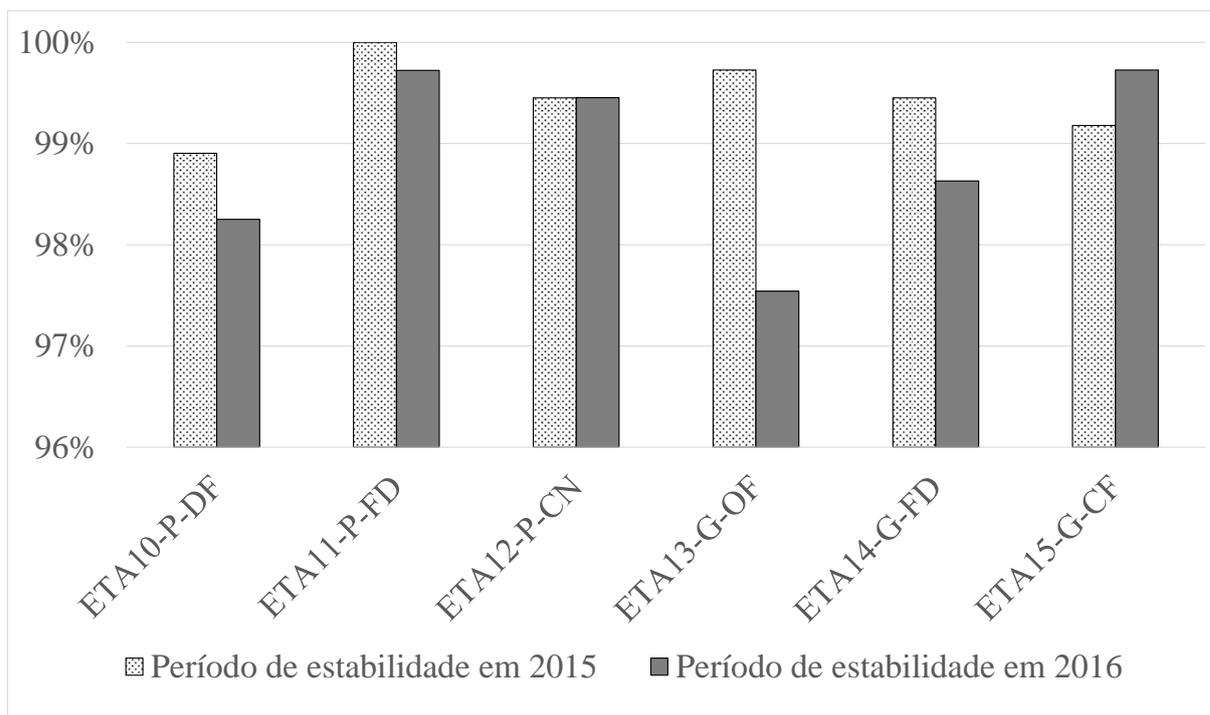
A Figura 5.24 apresenta os gráficos de controle aplicados à variável “resCloro”, com a finalidade de comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento.

Figura 5.24 – Gráficos de controle aplicados à variável “resCloro” para comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento



Já, a Figura 5.25 mostra o percentual de estabilidade das estações, também relativos ao parâmetro cloro.

Figura 5.25 – Período de estabilidade segundo a tecnologia de tratamento das ETAs considerando a variável “resCloro”



De modo generalizado, os resultados apontam que, no grupo das ETAs de pequeno porte, a ETA 11 (filtração direta) apresenta o sistema com maior estabilidade, seguida pela ETA 12 (convencional) e ETA 10 (dupla filtração). Por seu turno, no conjunto das ETAs de grande porte, a ETA 15 (ciclo completo com flotação), apresentou melhor desempenho, seguida da ETA 14 (filtração direta) e ETA 13 (oxidação com filtração).

Ressalta-se as medidas adotadas nas ETAs 11, 14 e 15 com relação à floração de algas em seus respectivos reservatórios de captação. A presença de algas e cianobactérias na água bruta aduzida às estações de tratamento pode causar problemas operacionais em várias etapas de tratamento, tais como: dificuldade de coagulação e floculação, baixa eficiência do processo de sedimentação, colmatação dos filtros e aumento da necessidade de produtos para a desinfecção (HAARHOFF & CLEASBY, 1989; EDZWALD & WINGLER, 1990; EDZWALD, 1993; KAUR *et al.*, 1994; DI BERNARDO, 1995; BRANDÃO *et al.*, 1996).

Diversas pesquisas (ROOK, 1977; BABCOCK & SINGER, 1979; GRAHAM *et al.*, 1998; BOND *et al.*, 2014; BACH *et al.*, 2015; BONGIOVANI *et al.*, 2016) desenvolvidas a partir da

década de 1970, mostram que a cloração de algumas águas leva à formação de diversos subprodutos clorados, entre os quais os chamados trihalometanos (THM), que são potencialmente cancerígenos. Estudos recentes sugerem que, além das substâncias húmicas, às quais tradicionalmente se atribui a formação de THM, as algas também se constituem em potenciais precursores de trihalometanos (BAUM, 1978; GEHR *et al.*, 1993; entre outros).

Além disso, as cianotoxinas encontram-se predominantemente no interior das células viáveis (sadias) das cianobactérias tóxicas (toxinas intracelulares). Sob condições normais, apenas uma pequena proporção dessas toxinas é liberada pelas células viáveis para a água (toxinas extracelulares). Contudo, quando ocorre a lise da célula, seja pelo decaimento natural ou pela ação de ruptura das células exercidas por agentes químicos como o sulfato de cobre e oxidantes (como o processo de cloração), a toxina intracelular é significativamente liberada para a coluna d'água (YOO *et al.*, 1995).

No processo de tratamento da ETA 11, devido à elevada concentração de algas na água bruta captada atualmente e, concomitantemente com a realização da etapa de pré-oxidação, passou a ser utilizado o carvão ativado para adsorção de possíveis cianotoxinas e subprodutos presentes na água, processo que até anos atrás não era necessário. Já, na ETA 14, é realizado o monitoramento e análises hidrobiológicas e, caso haja aumento significativo na quantidade de fitoplânctons, a etapa de pré-cloração é suspensa e/ou realizada em outra fase do tratamento.

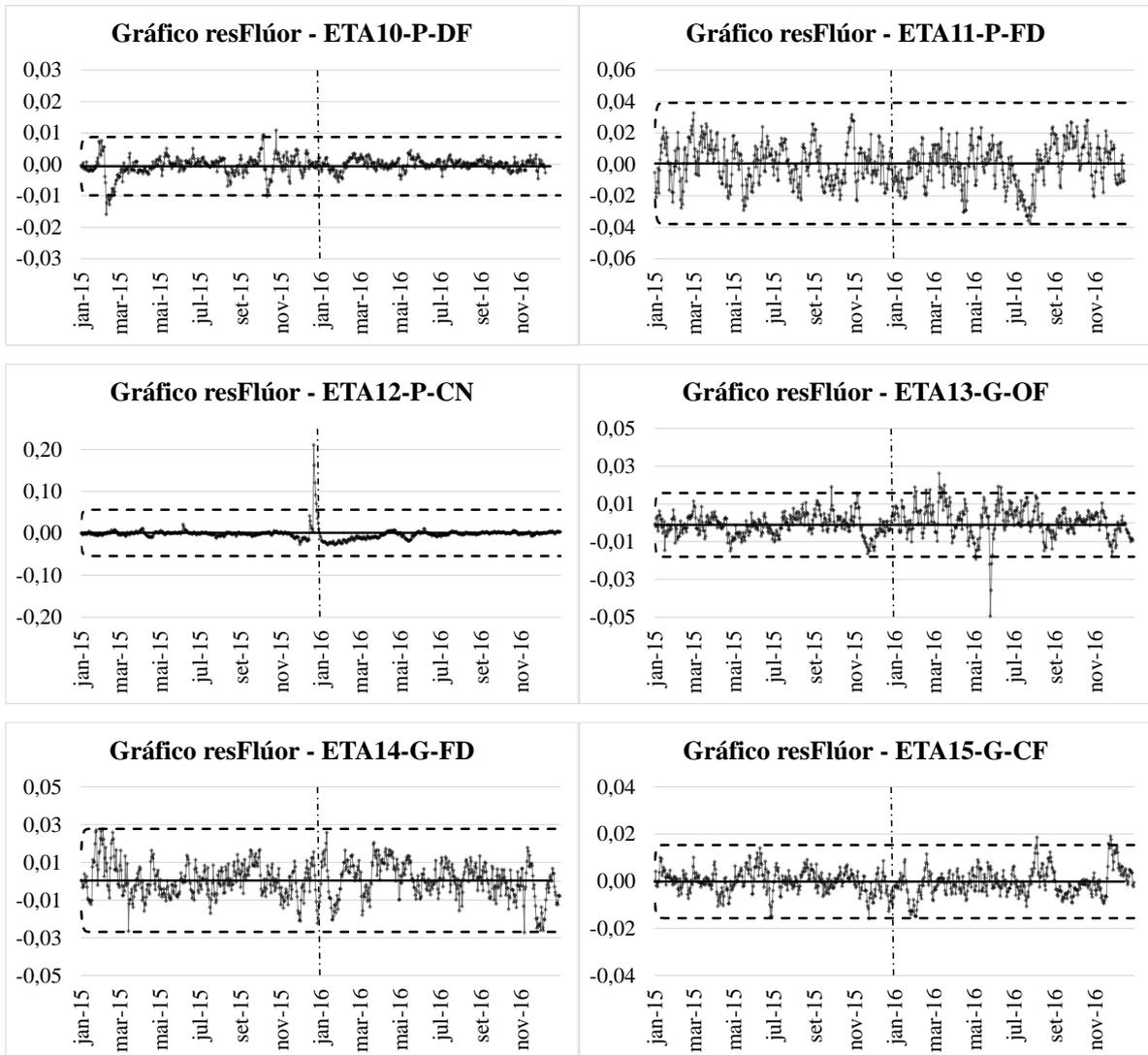
Nessas duas situações, nota-se a utilização da oxidação química da água bruta. Entretanto, permanece a atenção com relação à aplicação direta de oxidantes em água bruta, ou seja, águas em que a remoção das células viáveis de cianobactérias ainda não foi realizada.

Por sua vez, a ETA 15 emprega a tecnologia de ciclo completo com flotação, visto que é especialmente indicada no tratamento de águas com concentrações elevadas de algas, pois estas águas tipicamente conduzem à formação de flocos com baixa velocidade de sedimentação. Assim, garante-se melhores resultados na remoção da biomassa algal antes da etapa de filtração.

5.5.3.3 Flúor

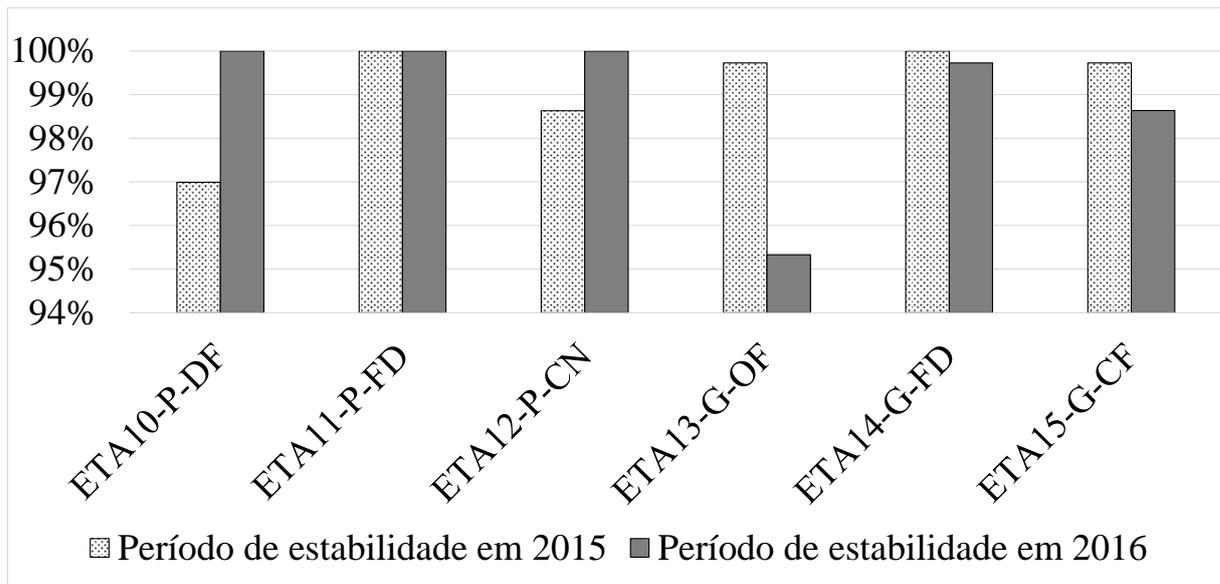
A Figura 5.26 apresenta os gráficos de controle aplicados à variável “resFlúor”, com o mesmo objetivo de comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento.

Figura 5.26 – Gráficos de controle aplicados à variável “resFlúor” para comparar a estabilidade em função da tecnologia de tratamento



Por sua vez, a Figura 5.27 exibe o percentual de estabilidade das estações, também relativos ao parâmetro flúor.

Figura 5.27 – Período de estabilidade segundo a tecnologia de tratamento das ETAs considerando a variável “resFluór”



Os resultados de estabilidade considerando a tecnologia sugerem que a ETA 11 (filtração direta) apresenta o sistema com maior estabilidade, seguida pela ETA 12 (convencional) e ETA 10 (dupla filtração) no conjunto das ETAs de pequeno porte. No concernente ao grupo das ETAs de grande porte, a ETA 14 (filtração direta) apresentou melhor operação, seguida da ETA 15 (ciclo completo com flotação) e ETA 13 (oxidação com filtração).

5.6 Perspectivas futuras

Conforme mencionado previamente, o controle estatístico de processo é uma ferramenta que tem por finalidade desenvolver e aplicar métodos estatísticos como parte de uma estratégia para prevenção de defeitos, melhoria da qualidade de produtos/serviços e redução de custos. O CEP fornece informações permanentes sobre o comportamento do processo, detecção e caracterização de causas que geram instabilidades no processo, indicação de ações para corrigir e prevenir as causas de instabilidade, além de informações para melhoria contínua do processo.

Nesse sentido, o CEP é uma técnica que pode ajudar os processos de tratamento de água a serem cada vez mais eficientes, por intermédio da prevenção de falhas, redução de erros e desperdícios, agendamento de manutenções e padronização de procedimentos. Dessa forma,

as estações de tratamento de água podem atingir os objetivos da denominada “Indústria 4.0”, termo desenvolvido para caracterizar a Quarta Revolução Industrial.

Essa nova etapa no âmbito industrial é determinada pelo conceito de indústria inteligente, que engloba as principais inovações tecnológicas dos campos de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura. O fundamento básico implica que conectando máquinas, sistemas e ativos, as empresas poderão criar redes inteligentes ao longo de toda a cadeia de valor, possibilitando controlar os módulos da produção de forma autônoma.

Dessa forma, por meio da instalação de dispositivos de controle, sensores de medição dos parâmetros ao longo das unidades de tratamento, rastreadores em tempo real e equipamentos de alta precisão para bombas/dosadores de materiais de tratamento, as estações de tratamento de água podem se transformar em verdadeiras fábricas inteligentes, com a utilização de recursos como gráficos, alarmes e telas sinóticas, além de integrar todos os sistemas para facilitar o acesso dos responsáveis pela estação. Essa integração de sistemas permite criar lógicas onde todas as ações são registradas e devidamente computadas pelos sistemas, reduzindo erros e aumentando a produtividade. Nota-se a relevância e a interface da aplicação do CEP nas ETAs nesse novo modelo de processo.

O CEP permitirá, então, acompanhar em tempo real a produtividade e a qualidade da água, traçar metas através desse acompanhamento e identificar soluções inteligentes para problemas antes mesmo que eles ocorram, potencializando o atendimento aos padrões de potabilidade. Desse modo, será possível garantir a distribuição de água tratada com qualidade mais elevada para a população.

6 CONCLUSÕES

Como conclusões deste trabalho, foi possível constatar que as águas brutas em mananciais do tipo lótico apresentaram valores mais elevados de turbidez, sendo que a maior parte das estações que captam água nesse tipo de manancial emprega tecnologia de tratamento convencional. Esses resultados estão alinhados com a teoria, a qual considera o tratamento convencional suficientemente robusto a maior variabilidade e a valores mais elevados de turbidez da água captada e a menor qualidade da água bruta de mananciais lóticos em relação aos mananciais lânticos e subterrâneos. Tal situação contribuiu para que as ETAs de tratamento convencional também conseguissem atingir maiores eficiências de remoção, tanto para o parâmetro turbidez quanto para o parâmetro cor.

Em referência ao cumprimento dos padrões de potabilidade do parâmetro turbidez, percebeu-se que, em 2015, apenas uma ETA não conseguiu atender ao padrão estabelecido e, em 2016, nove estações não obtiveram êxito em atender plenamente ao padrão mais restritivo. Em relação ao atendimento dos parâmetros cor, cloro e flúor, foi observado que todas as estações atingiram 100% de atendimento para a cor e flúor e, também, 100% de atendimento para o cloro, com exceção das ETAs 07 e 15.

Referente ao estudo comparativo em função do porte, foi possível concluir que as estações de médio porte obtiveram maior estabilidade, seguidas das estações de pequeno e grande porte. Portanto, a hipótese (i) foi rejeitada, uma vez que as estações de grande porte não apresentaram maior desempenho.

Analisando a estabilidade considerando a tecnologia de tratamento, verificou-se que na conjuntura das estações de pequeno porte, a ETA 11 (filtração direta) alcançou maior desempenho, seguida pela ETA 12 (tecnologia convencional) e, por fim, pela ETA 10 (dupla filtração). No que concerne ao grupo das ETAs de grande porte, notou-se maior estabilidade para as ETAs 13 (oxidação com filtração) e 14 (filtração direta), seguidas pela ETA 15 (ciclo completo com flotação).

Em referência à estabilidade de todas as quinze estações de tratamento considerando os anos de 2015 e 2016, percebeu-se que para o parâmetro turbidez seis ETAs obtiveram maior

estabilidade em 2016, apenas duas para o cloro e cinco estações para o flúor apresentaram melhores resultados em 2016. Então, a hipótese (ii) foi refutada, ou seja, não foi possível confirmar que em virtude das metas progressivas estabelecidas pela Portaria 2914/2011, as eventuais modificações realizadas ao longo de 2015 no processo de tratamento de água aumentariam a eficiência e melhorariam o desempenho e a estabilidade em 2016.

É importante enfatizar que os resultados obtidos devem ser observados com prudência, em virtude do número de estações de tratamento analisadas, além dos bons resultados alcançados por estações de tratamento de água de forma individual, considerando tanto o porte quanto a tecnologia de tratamento. Evidenciando que as limitações não devem ser atribuídas estritamente ao porte ou ao processo de tratamento mas, provavelmente, a eventuais problemas de projeto, operação e manutenção das unidades.

Por fim, destaca-se a viabilidade da implementação do gráfico de controle pelos prestadores de serviços de saneamento no monitoramento dos parâmetros de potabilidade. O CEP permite o acompanhamento em tempo real da produtividade e da qualidade da água, traçar metas através desse acompanhamento e identificar soluções inteligentes para problemas antes mesmo que eles ocorram, potencializando o atendimento aos padrões de potabilidade. Desse modo, será possível garantir a distribuição de água tratada com qualidade mais elevada para a população e tornar o processo de tratamento de água uma verdadeira fábrica inteligente.

7 RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Associar os gráficos de controle estatístico de processo ao custo de tratamento de água e a geração de lodo, de modo que a técnica contribua para a melhoria da produtividade.
- Empregar o gráfico de controle estatístico de processo multivariado, empregando os dados de todas as variáveis monitoradas simultaneamente.
- Utilizar os limites de alerta posicionados a dois desvios-padrão, de forma que haja tomada de ações antes que sejam extrapolados os limites da estabilidade.
- Incluir a análise de dados operacionais na avaliação de desempenho e de estabilidade, como variação da vazão, taxa de filtração, coagulantes, dosagens, dentre outros.

REFERÊNCIAS

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

AIZENCHTADT, E.; INGMAN, D.; FRIEDLER, E. Quality control of wastewater treatment: A new approach. *European Journal of Operational Research*, v. 189, n. 2, p. 445-458, 2008. ISSN 0377-2217.

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Control*. AC-19, p. 716–723, 1974.

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.

ALWAN, L. C.; ROBERTS, H. V. Time-series modeling for statistical process control. *Journal of Business & Economic Statistics*, v. 6, n. 1, p. 87-95, 1988. ISSN 1537-2707.

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: 29 out. 2017.

ARAUJO, N. G. A.; LINDOSO, R. L.; HENNING, E.; ALVES, C. C.; ZVIRTES, L. *Aplicação de gráficos de controle para monitoramento estatístico da turbidez da água potável*. Belo Horizonte : XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2011.

BABCOCK D. B.; SINGER P. C. Chlorination and coagulation of humic and fulvic acids. *Journal of the American Water Works Association*, v. 73, n. 3, 1979.

BACH, L.; GARBELINI, E. R.; STETS, S.; PERALTA-ZAMORA, P.; EMMEL, A. Experimental design as a tool for studying trihalomethanes formation parameters during water chlorination. *Microchemical Journal*, v. 123, p. 252-258, 2015.

BARBOSA, T. B. C. Avaliação da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do rio Paracatu em função do uso e ocupação do solo. Belo Horizonte, Minas Gerais: Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2015.

BAUM, B. J. C. Precursors and mechanisms of haloform formation in the chlorination of water supplies. In: Jolley RL *et al*, editors. Water Chlorination: environmental impact and health effects. *Ann Arbor Science Publishers*, v .2, p. 29-47, 1978.

BERTHOUEX, P.M.; FAN, R. Evaluation of treatment plant performance: causes, frequency, and duration of upsets. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 58, n. 5, p.368 – 375, 1986.

BERTHOUEX, P.M.; HUNTER, W.G. How to construct reference distributions to evaluate treatment plant effluent quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 55, n. 12, p. 1417-1424, 1983.

BERTHOUEX, P.M.; HUNTER, W.G. Simple statistics for interpreting environmental data. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 53, n. 2, p. 167-175, 1981.

BERTHOUEX, P.M.; HUNTER, W.G. Treatment plant monitoring programs: A preliminary analysis. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 47, n. 8, p. 2143-2156, 1975.

BERTHOUEX, P.M.; HUNTER, W.G.; PALLESEN, L. Monitoring sewage treatment plants: some quality control aspects. *Journal of Quality Technology*, v. 10, n. 4, p. 139-149, 1978.

BOND, T.; KAMAL, N. H. M.; BOMSSEAU, T.; TEMPLETON, M. R. Disinfection by-product formation from the chlorination and chlorination of amines. *Journal of Hazardous Materials*, v. 278, p. 288-296, 2014.

BONGIOVANI, M. C.; CAMACHO, F. P.; COLDEBELLA, P. F.; VALVERDE, K. C.; NISHI, L.; BERGAMASCO, R. Removal of natural organic matter and trihalomethane minimization by coagulation/flocculation/filtration using a natural tannin. *Journal of Desalination and Water Treatment*, v. 57, p. 5406-5415, 2016.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. *Time series analysis forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day, 1976. Edição revisada.

BOX, G. E. P.; G. M. JENKINS; G. C. REINSEL. *Time Series Analysis, Forecasting, and Control*, 3rd. ed. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1994.

BOX, G. E. P.; KRAMER, T. Statistical Process Monitoring and Feedback Adjustment. A Discussion. *Technometrics*, v. 34, p. 251-285, 1992. ISSN 0040-1706.

BRANDÃO, C.C.S.; LACERDA, M.R.S.; ABREU, M.C. Influência do tempo de floculação na filtração direta de águas com baixa turbidez e teor elevado de algas. In: ANAIS DO VII SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL; 1996; Lisboa, Portugal.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro 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, 2011.

BURR, I. W. *Statistical Quality Control Methods*. New York: CRC Press, v. 16, 1976. 532 p. ISBN 0824763440.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. *Estatística Básica*. 4ª Edição. São Paulo: Atual Editora, 1987.

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: 29 out. 2017.

CHAMP, C. W.; WOODALL, W. H. Exact results for Shewhart control charts with supplementary runs rules. *Technometrics*, v. 29, n. 4, p. 393-399, 1987. ISSN 0040-1706.

CORNWELL, D.; BROWN, R.; MCTIGUE, N. Controlling Lead and Copper Rule Water Quality Parameters. *Journal American Water Works Association*, p. 86-96, 2015. ISSN 0003-150X.

DEMING, W. E. *Qualidade: a revolução da administração*. Rio de Janeiro: Marques-Saraiva, 1990. 367 p. ISBN 8585238151.

DEMING, W. E. *Out of the Crisis*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, 1986.

DI BERNARDO, L. Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Rio de Janeiro-RJ. 1995.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2ª ed. v. 1. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, P. E. N. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 3ª ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2017. ISBN 978-85-62324-05-5.

DI BERNARDO, L.; MENDES, C. G. N.; BRANDÃO, C. C. S.; SENS, M. L.; PÁDUA, V. L. *Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta*. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 498p.

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

EDZWALD, J. K. Algae, bubbles, coagulants and dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, v. 27, n.10, p.67-81, 1993.

EDZWALD J. K.; WINGLER B. J. Chemical and physical aspects of dissolved air flotation for the removal of algae. *Journal Water SRT-Aqua*, v. 39, n. 1, p. 24-35, 1990.

ELDIN, S.; HAMZA, A. Monitoring controlling design process using control charts process. *Bussiness Process Management Journal*, v. 15, n. 3, p. 358-370, 2009. ISSN 1463-7154.

FOLLADOR, F. A. C. *Controle estatístico de processo aplicado à qualidade de águas superficiais*. Cascavel, Paraná: Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola. 2010.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. Ministério da Saúde. *Manual de Saneamento*. Brasília: Assessoria de Comunicação e Educação em Saúde, 2015. 409 p. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/engenharia-de-saude-publica1/-/asset_publisher/ZM23z1KP6s6q/content/manual-de-saneamento?inheritRedirect=false>. Acesso em: 26 abr. 2017.

GEHR, R.; SWARTZ, C.; OFFRINGA, O. Removal of trihalomethane precursors from eutrophic water by dissolved air flotation. *Water Research*, v. 27, n. 1, p. 41-49, 1993.

GHIGGI, F. F. Tratamento de águas para consume doméstico com membranas de ultrafiltração. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química. 2011.

GILBERT, R. O. *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987, 320p.

GRAHAM, N. J. D.; WARDLAW, V.E.; PERRY R.; JIANG, J. Q. The significance of algae as trihalomethane precursors. *Water Science & Technology*, v. 37, n. 2, p. 83-89, 1998.

HAARHOFF J.; CLEASBY, J.L. Direct filtration of Chlorella with cationic polymer. *Journal of Environmental Engineering*, v. 115, n. 2, p. 348-366, 1989.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. *Abastecimento de água para consumo humano*. 2ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010. ISBN 9788570418456.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. *Statistical methods in water resources* – Chapter A3: Techniques of Water-Resources Investigations. Book 4. United States Geological Survey, 2002. 522 p.

HENNING, E.; WALTER, O. M. C. F.; SOUZA, N. S.; SAMOHYL, R. W. Um Estudo para a Aplicação de Gráficos de Controle Estatístico de Processo em Indicadores de Qualidade da Água Potável. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*, v. 9, n. 1, p. 2-13, 2014. ISSN 1980-5160.

HOERL, R. W.; PALM, A. C. Discussion: Integrating SPC and APC. *Technometrics*, v. 34, n. 3, p. 268-272, 1992. ISSN 1537-2723.

HONORATO, T. Z.; COSTANZI, R. N. *Qualidade de Controle Aplicada a Estações de Tratamento de Água*. 4TH International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo: [s.n.]. 2013. p. 1-7.

JARVIS, B. *Statistical Aspects of the Microbiological Examination of Foods*. 2ª. ed. [S.l.]: Academic Press, 2008. 336 p. ISBN 978-0-444-53039-4.

JURAN, J. M. *A qualidade desde o projeto*. São Paulo: Pioneira, 1992. p.285.

KAUR K.; BOTT T.R.; HEATHCOTE, G.R.; KEAY G.; LEADBEATER, B.S.C. Treatment of algal-laden water: pilot-plant experiences. *Journal IWEM*, v. 8, p. 22-32, 1994.

LACHENBRUCH, P. A. *Some unsolved practical problems in discriminant analysis*. Department of Biostatistics: University of North Carolina at Chapel Hill. 1975.

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. 4ª. ed. Campinas: Átomo, 2016. ISBN 9788576702719.

LU, C. W.; REYNOLDS JR, M. R. Control charts for monitoring the mean and variance of autocorrelated processes. *Journal of Quality Technology*, v. 31, p. 259-274, 1999. ISSN 0022-4065.

LU, C. W.; REYNOLDS JR, M. R. CUSUM charts for monitoring an autocorrelated process. *Journal of Quality Technology*, v. 33, p. 316-334, 2001. ISSN 0022-4065.

MAHESH, B. P.; PRABHUSWAMY, M. S. Process variability reduction through statistical process control for quality improvement. *International Journal for Quality Research*, v. 4, n. 3, p. 193-203, 2010. ISSN 1800-7473.

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.

MARAGAH, H. D.; WOODALL, W. H. The Effect of Autocorrelation on the Retrospective X-chart. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, v. 40, p. 29-42, 1992. ISSN 0094-9655.

MELO, L. D. V. *Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de água* [manuscrito] / Lívia Duarte Ventura Melo. – 2014. xiii, 78 f., enc.: il. Belo Horizonte, Minas Gerais: Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

MENDES, C. G. N. *Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis*. São Carlos, São Paulo: Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1989.

MIERZWA, J. C.; SILVA, M. C. C.; RODRIGUES, L. B.; HESPANHOL, I. Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. *Eng. San. Ambient.* v. 13, n. 1, p. 78-87, 2008.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM – nº 74, de 09 de setembro de 2004. *Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ambiental de funcionamento ou de licenciamento ambiental no nível estadual, determina normas para indenização dos custos de análise de pedidos de autorização ambiental e de licenciamento ambiental, e dá outras providências.* Diário Executivo de Minas Gerais, 2004.

MONDARDO, R. I. *Influência da Pré-oxidação na Tratabilidade das Águas Via Filtração Direta Descendente em Manancial com elevadas Concentrações de Microalgas e Cianobactérias.* 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2004.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control.* 6th. ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2009.

MONTGOMERY, D. C.; MASTRANGELO, C. M. Some statistical process control methods for autocorrelated data. *Journal of Quality Technology*, v. 23, p. 179-193, 1991. ISSN 0022-4065.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers.* 3ª. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

MOOD, A. M.; GRAYBILL, F. A.; BOES, D. C. *Introduction to the theory of statistics.* Ed. McGraw-Hill. 3ed, 1974.

MORAIS, M. C.; PACHECO,. Combined CUSUM–Shewhart Schemes for Binomial Data. *Economic Quality Control*, v. 21, n. 1, p. 43-57, 2006. ISSN 0940-5151.

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

NAU, R. F. Three types of forecasts: estimation period, validation period, and “the future”. *Statistical Forecasting (MBA Course)*, 2005.

NAVIDI, W. *Statistics for Engineers and Scientists*. 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2010.

OLIVEIRA, M. D. *Desenvolvimento, aplicação e avaliação de sistema de indicadores de desempenho de estações de tratamento de água*. [S.l.]: Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais - PPGSMARH/UFMG. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2014.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. *Gráficos de controle da qualidade de efluentes de estações de tratamento de esgotos*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25, 2009, Recife. Anais. Rio de Janeiro : ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009.

PÁDUA, V. L. Introdução ao tratamento de água. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. *Abastecimento de água para consumo humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. Cap. 12. p. 519-570

PÁDUA, V. L.; FERREIRA, A. C. S. Qualidade da água para consumo humano. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de. *Abastecimento de água para consumo humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. Cap. 4. p. 153-222

PINTO, C. C. Importância da avaliação de dados de concentração e de carga de poluentes em bacias hidrográficas: exemplo da bacia do rio Verde. Belo Horizonte, Minas Gerais: Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2016.

R CORE TEAM (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. *Cartas de Controle para Variáveis, Cartas de Controle para Atributos, Função de Perda Quadrática, Análise de Sistemas de Medição*. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012. 172p. (Série Monográfica Qualidade). ISBN 85-88085-10-0.

ROBERTS, S. W. Control chart tests based on geometric moving averages. *Technometrics*, v. 1, n. 3, p. 239-250, 1959. ISSN 0040-1706.

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.

ROOK, J. J. Haloforms in drinking water. *Journal of The American Water Works Association*, v. 69, n. 12, 1977.

RUNGER, G. C.; WILLEMAIN, T. R.; PRABHU, S. Average run lengths for CUSUM control charts applied to residuals. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, v. 24, p. 273-283, 1995. ISSN 1532-415X.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. *Ann. Stat.* v. 5, n. 2, 461–464, 1978.

SEREL, D. A. Economic design of EWMA control charts based on loss function. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 49, n. 3-4, p. 745-759, 2009.

SHEWHART, W. A. *Economic Control of Quality of Manufactured Products*. New York: Van Nostrand, 1981. Reprint: American Society for quality control, Milwaukee, WI.

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, 2007a. ISSN 0011-9164.

SMETI, E. M.; KORONAKIS, D. E.; GOLFINOPOULOS, S. K. Control charts for the toxicity of finished water—Modeling the structure of toxicity. *Water Research*, v. 41, n. 12, p. 2679-2689, June 2007b. ISSN 0043-1354.

SPIEGEL, M. R.; STEPHENS, L. J. *Schaum's outline of theory and problems of statistics*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

TAGUCHI, G. *On-Line Quality Control During Production*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1981.

TAKAHASHI, F. H. *Aplicação do controle estatístico de processos (CEP) como ferramenta para a melhoria da qualidade do leite*. [S.l.]: Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP. Piracicaba, São Paulo, 2011.

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 (Guia Técnico), 2004.

VAN BRACKLE, L. N.; REYNOLDS, M. R. EWMA and CUSUM control charts in the presence of autocorrelation. *Commun. Stat. Simulation Comput*, v. 26, p. 979-1008, 1997. ISSN 1532-4141.

VASILOPOULOS, A. V.; STAMBOULIS, A. P. Modification of control chart limits in the presence of data correlation. *Journal of Quality Technology*, v. 10, p. 20-30, 1978. ISSN 0022-4065.

VAUGHAN, W.J.; RUSSELL, C.S. Monitoring point sources of pollution: answers and more questions from statistical quality control. *The American Statistician*, v. 37, Issue 4, Part 2: Proceedings of the Seventh Symposium on Statistics and the Environment, p. 476–487, 1983.

VINING, G. G.; KOWALSKI, S. *Statistical Methods for Engineers*. 2ª. ed. Pacific Grove: Duxbury Press, 2005. ISBN 978-0534384739.

WARDELL, D. G.; MOSKOWITZ, H.; PLANTE, R. D. Run-length distributions of special-cause control charts for correlated processes. *Technometrics*, v. 36, n. 7, p. 3-27, 1994. ISSN 1537-2723.

WERKEMA, M. C. C. *Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, v. Série Ferramentas da Qualidade, 2, 1995.

WHO. World Health Organization. *Guidelines for drinking - water quality.*, 3 ed. Geneva: WHO, 2011. 515p.

WOODALL, W. H. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, v. 32, n. 4, p. 341-350, 2000. ISSN 0022-4065.

WOODALL, W. H.; FALTIN, F. W. An Overview and Perspective on Control Charting. In: KEATS, J. B.; MONTGOMERY, D. C. *Applications in Process Control*. New York: Marcel Dekker, 1996. Cap. 2, p. 7-20.

YOO, R. S.; CARMICHAEL, W. W.; HOEHN, R. C.; HRUDEY, S. E. Cyanobacterial (Blue-Green Algal) toxins: A resource guide. *AWWA Research Foundation and American Water Works Association*; 1995.

ZHANG, N. F. A statistical control chart for stationary process data. *Technometrics*, n. 40, p. 24-38, 1998. ISSN 1537-2723.

ZHANG, K.; ACHARI, G.; SADIQ, R.; LANGFORD, C. H.; DORE, M. H. I. An integrated performance assessment framework for water. *Water Research*, v. 46, n. 6, p. 1673-1683, 2012. ISSN 0043-1354.

APÊNDICE I

Tabela I.1 – Estatística descritiva da vazão (Ls⁻¹) de cada estação em 2015 e 2016

Descrição	ETA 1		ETA 2		ETA 3		ETA 4		ETA 5	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	2285	2645	1650	1952	3037	2733	1905	2024	2598	2219
Média	25,47	25,58	15,92	15,90	43,59	43,58	418,59	408,23	104,04	103,01
Mediana	48,70	48,70	20,60	19,00	77,00	77,00	430,00	425,00	132,60	132,60
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	51,50	55,10	24,60	30,20	81,00	81,00	650,00	640,00	171,30	171,80
Percentil 10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	315,00	260,00	0,00	0,00
Percentil 25%	0,00	0,00	14,00	13,50	0,00	0,00	390,00	370,00	0,00	0,00
Percentil 75%	50,10	50,10	21,90	21,00	80,00	80,00	458,00	470,00	165,10	159,00
Percentil 90%	50,10	50,10	22,50	23,20	81,00	80,00	490,00	502,00	168,20	165,10
DP ¹	25,00	24,80	8,53	8,07	39,41	38,87	70,31	91,22	70,23	70,07
CV ² (%)	98,16	96,93	53,59	50,75	90,42	89,19	16,80	22,35	67,51	68,02
Descrição	ETA 6		ETA 7		ETA 8		ETA 9		ETA 10	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	3770	3417	1525	1678	1309	2042	3246	2975	1991	1483
Média	190,81	170,71	577,42	545,02	4172,42	4657,18	6398,48	6563,04	56,51	55,02
Mediana	200,00	165,40	590,00	565,00	4340,00	4950,00	6680,00	6770,00	82,50	81,50
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	450,00	444,00	673,00	706,00	5600,00	6300,00	8900,00	8100,00	114,00	112,70
Percentil 10%	0,00	0,00	555,60	506,90	3675,00	3188,60	4810,00	5489,60	0,00	0,00
Percentil 25%	0,00	0,00	576,00	541,00	4231,00	4450,00	5821,50	6020,00	0,00	0,00
Percentil 75%	351,90	357,40	600,00	580,00	4675,00	5150,00	7360,00	7450,00	99,30	85,00
Percentil 90%	363,00	368,60	606,00	592,10	4965,00	5497,00	7740,00	7631,20	101,30	94,10
DP ¹	164,34	173,91	56,36	76,32	983,25	960,45	1329,43	1130,69	47,05	41,63
CV ² (%)	86,13	101,88	9,76	14,00	23,57	20,62	20,78	17,23	83,25	75,66
Descrição	ETA 11		ETA 12		ETA 13		ETA 14		ETA 15	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	3702	3642	3039	1695	1471	1247	1729	2351	946	1022
Média	31,51	30,97	28,73	33,25	698,37	779,18	449,33	312,33	816,82	737,75
Mediana	52,00	49,40	25,20	37,50	787,00	787,00	580,60	0,00	740,00	707,35
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	56,50	53,80	66,30	72,40	940,70	942,10	1675,00	1858,30	1450,00	1494,70
Percentil 10%	0,00	0,00	0,00	0,00	567,00	721,40	0,00	0,00	690,00	638,61
Percentil 25%	0,00	0,00	22,80	22,80	581,80	770,40	0,00	0,00	730,00	685,68
Percentil 75%	52,90	52,00	45,20	45,20	803,70	803,70	606,00	626,80	945,60	782,88
Percentil 90%	52,90	52,00	50,10	51,80	803,70	889,20	1128,40	665,64	1083,66	986,81
DP ¹	25,86	25,26	17,53	17,02	129,83	89,29	438,63	399,87	227,65	218,45
CV ² (%)	82,05	81,58	61,02	51,18	18,59	11,46	97,62	128,03	27,87	29,61

Tabela I.2 – Estatística descritiva do parâmetro turbidez (uT) de cada estação considerando água bruta e água tratada em 2015 e 2016

Descrição	ETA 01				ETA 02				ETA 03			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	777	852	3270	3378	801	1119	3991	3990	748	721	3164	3312
Média	33,70	48,43	0,39	0,40	52,85	119,59	0,33	0,39	271,22	259,20	0,47	0,50
Mediana	23,80	29,60	0,38	0,40	21,00	28,00	0,34	0,39	58,30	82,00	0,45	0,47
Mínimo	7,57	9,90	0,15	0,18	1,10	1,34	0,13	0,08	1,52	16,60	0,22	0,05
Máximo	230	860	4,99	1,40	1000	4000	1,00	7,00	6650	5500	1,80	4,00
Percentil 10%	13,00	12,00	0,28	0,30	11,00	10,60	0,18	0,26	19,80	32,00	0,36	0,36
Percentil 25%	16,40	17,50	0,32	0,34	13,30	16,10	0,22	0,32	28,43	41,00	0,40	0,40
Percentil 75%	40,00	56,95	0,42	0,46	34,50	62,40	0,43	0,45	129,75	225,00	0,52	0,56
Percentil 90%	66,26	104,70	0,48	0,50	61,88	200,00	0,48	0,50	703,40	788,40	0,60	0,70
DP ¹	28,86	58,82	0,18	0,10	135,87	346,41	0,11	0,20	666,24	470,06	0,12	0,16
CV ² (%)	85,64	121,47	47,26	24,13	257,08	289,66	34,33	52,42	245,64	181,35	25,30	31,03
Descrição	ETA 04				ETA 05				ETA 06			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	967	899	4390	4386	905	864	3434	3406	932	901	3360	3158
Média	56,33	45,35	0,20	0,20	62,70	84,70	0,33	0,39	76,13	109,70	0,25	0,25
Mediana	2,60	2,10	0,20	0,21	18,00	24,75	0,29	0,36	14,60	18,10	0,22	0,20
Mínimo	0,18	0,13	0,02	0,01	6,71	2,73	0,09	0,09	0,12	3,94	0,08	0,05
Máximo	2200	3280	7,80	0,45	1474	1723	3,55	5,00	2900	4293	1,83	6,22
Percentil 10%	1,30	1,20	0,16	0,15	9,59	15,90	0,21	0,26	6,03	6,16	0,13	0,12
Percentil 25%	1,70	1,50	0,18	0,18	12,10	18,13	0,25	0,30	8,00	8,73	0,16	0,16
Percentil 75%	30,00	25,00	0,22	0,22	44,50	62,20	0,35	0,44	40,23	52,35	0,30	0,27
Percentil 90%	138,40	92,00	0,24	0,23	155,40	207,50	0,45	0,53	194,70	329,00	0,42	0,42
DP ¹	176,07	194,94	0,16	0,03	129,51	172,23	0,19	0,19	200,39	288,65	0,14	0,21
CV ² (%)	312,55	429,82	77,68	16,66	206,57	203,35	56,62	47,13	263,22	263,13	55,43	82,15
Descrição	ETA 07				ETA 08				ETA 09			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	885	913	4386	4365	852	861	4325	4363	1198	1194	4349	4374
Média	7,78	130,71	0,31	1,03	26,95	101,78	0,20	0,25	172,61	139,65	0,18	0,16
Mediana	6,23	45,40	0,27	0,98	16,00	23,00	0,15	0,19	67,70	59,85	0,16	0,14
Mínimo	0,81	2,10	0,10	0,12	4,80	2,00	0,06	0,06	3,60	1,00	0,07	0,00
Máximo	270	2600	2,01	30,20	250	6130	2,90	9,10	2400	3500	0,69	0,86
Percentil 10%	2,51	5,22	0,19	0,22	6,10	6,10	0,09	0,11	9,40	5,75	0,11	0,10
Percentil 25%	3,43	20,30	0,22	0,37	9,63	8,75	0,11	0,14	17,00	14,00	0,13	0,12
Percentil 75%	9,76	85,45	0,37	1,43	32,00	94,50	0,21	0,28	217,25	163,25	0,21	0,18
Percentil 90%	13,04	219,60	0,48	1,78	63,70	269,20	0,36	0,48	485,50	380,00	0,28	0,22
DP ¹	10,46	280,78	0,13	0,90	29,00	294,29	0,18	0,25	252,75	227,24	0,08	0,06
CV ² (%)	134,55	214,81	41,07	87,57	107,63	289,14	87,87	98,00	146,43	162,72	43,51	36,75
Descrição	ETA 10				ETA 11				ETA 12			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	1243	826	3465	3430	4003	3314	3997	3280	633	900	3977	4077
Média	8,53	4,87	0,30	0,38	3,99	6,62	0,29	0,24	30,18	28,94	0,39	0,43

Mediana	7,96	4,17	0,30	0,36	3,75	5,12	0,27	0,23	10,30	9,66	0,40	0,43
Mínimo	1,70	0,81	0,02	0,05	0,22	1,04	0,08	0,10	7,75	0,38	0,20	0,28
Máximo	100	29	2,13	1,99	20	29	0,50	0,50	603	865	7,00	0,90
Percentil 10%	4,10	1,56	0,13	0,25	2,04	2,31	0,19	0,17	8,97	7,03	0,33	0,38
Percentil 25%	5,78	2,67	0,21	0,29	2,76	3,22	0,22	0,19	9,30	8,10	0,37	0,40
Percentil 75%	9,93	6,08	0,38	0,43	5,00	8,56	0,34	0,27	22,65	18,90	0,42	0,45
Percentil 90%	12,80	8,13	0,44	0,50	6,40	12,60	0,42	0,32	66,66	63,38	0,44	0,47
Percentil 95%	14,59	10,96	0,48	0,61	7,20	17,90	0,48	0,37	128,50	105,00	0,46	0,48
DP ¹	5,06	3,30	0,13	0,14	1,71	4,78	0,09	0,07	56,38	67,69	0,11	0,04
CV ² (%)	59,28	67,75	42,46	36,94	42,88	72,20	31,07	29,20	186,82	233,95	29,27	9,88

Descrição	ETA 13				ETA 14				ETA 15			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	1447	1164	4335	4392	3086	2245	3063	2216	746	748	4356	4353
Média	8,18	1,35	0,19	0,15	10,14	19,55	0,22	0,44	6,47	5,30	0,27	0,39
Mediana	1,20	1,15	0,19	0,14	7,30	6,00	0,20	0,21	4,93	4,13	0,24	0,36
Mínimo	0,19	0,44	0,02	0,02	1,90	1,30	0,06	0,07	0,25	0,34	0,03	0,11
Máximo	9900	81	0,47	0,33	70	112	8,60	14,00	67	44	2,10	1,60
Percentil 10%	0,86	0,83	0,13	0,10	3,70	1,80	0,12	0,13	1,76	2,06	0,17	0,23
Percentil 25%	0,98	1,00	0,16	0,11	4,68	2,40	0,16	0,16	3,10	2,80	0,20	0,27
Percentil 75%	1,50	1,36	0,21	0,18	15,00	33,25	0,24	0,44	7,60	6,50	0,31	0,46
Percentil 90%	1,96	1,85	0,23	0,20	21,20	62,40	0,32	0,85	10,80	9,71	0,41	0,58
DP ¹	260,22	2,43	0,04	0,04	7,19	24,01	0,18	0,80	6,78	3,83	0,11	0,16
CV ² (%)	3180,03	180,25	22,81	27,52	70,95	122,83	83,66	181,54	104,78	72,31	41,53	40,28

Tabela I.3 – Estatística descritiva do parâmetro cor (uT) de cada estação considerando água bruta e água tratada em 2015 e 2016

Descrição	ETA 01				ETA 02				ETA 03			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	777	698	3270	3378	801	905	3991	3990	748	721	3164	3312
Média	164,34	175,38	1,00	1,00	182,76	269,00	2,51	2,51	778,86	776,98	1,00	1,00
Mediana	120,00	140,00	1,00	1,00	140,00	140,00	2,50	2,50	300,00	500,00	1,00	1,00
Mínimo	40,00	40,00	1,00	1,00	3,40	1,00	2,50	2,50	43,10	55,60	1,00	1,00
Máximo	3600	1000	1,00	1,00	1000	4600	5,00	40,00	9999	9999	1,00	1,00
Percentil 10%	60,00	50,00	1,00	1,00	80,00	80,00	2,50	2,50	100,00	90,00	1,00	1,00
Percentil 25%	70,00	80,00	1,00	1,00	100,00	100,00	2,50	2,50	300,00	200,00	1,00	1,00
Percentil 75%	200,00	212,50	1,00	1,00	260,00	300,00	2,50	2,50	400,00	800,00	1,00	1,00
Percentil 90%	300,00	350,00	1,00	1,00	340,00	500,00	2,50	2,50	2000,00	2000,00	1,00	1,00
DP ¹	177,03	139,39	0,00	0,00	121,22	376,61	0,19	0,60	1347,59	1093,59	0,00	0,00
CV ² (%)	107,72	79,48	0,00	0,00	66,33	140,00	7,36	24,03	173,02	140,75	0,00	0,00

Descrição	ETA 04				ETA 05				ETA 06			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	967	887	4390	4386	905	853	3434	3406	932	901	3360	3157
Média	115,18	84,06	1,00	1,00	277,43	332,78	1,02	1,01	76,13	109,70	2,51	2,51
Mediana	5,00	5,00	1,00	1,00	90,00	125,00	1,00	1,00	14,60	18,10	2,50	2,50
Mínimo	2,50	2,50	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	0,12	3,94	1,00	2,50
Máximo	4000	5000	1,00	1,00	5000	5000	10,00	8,00	2900	4293	6,20	5,00
Percentil 10%	5,00	2,50	1,00	1,00	50,00	80,00	1,00	1,00	6,03	6,16	2,50	2,50
Percentil 25%	5,00	5,00	1,00	1,00	60,00	90,00	1,00	1,00	8,00	8,73	2,50	2,50
Percentil 75%	60,00	45,00	1,00	1,00	200,00	250,00	1,00	1,00	40,23	52,35	2,50	2,50
Percentil 90%	300,00	200,00	1,00	1,00	700,00	850,00	1,00	1,00	194,70	329,00	2,50	2,50
DP ¹	348,72	318,90	0,00	0,00	523,04	559,32	0,38	0,25	200,39	288,65	0,18	0,19
CV ² (%)	302,76	379,40	0,00	0,00	188,53	168,08	37,15	24,85	263,22	263,13	7,08	7,41

Descrição	ETA 07				ETA 08				ETA 09			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	884	865	4386	4364	852	845	4325	4363	1198	292	4349	4374
Média	25,65	318,02	1,92	4,21	84,22	237,04	1,02	1,01	167,60	203,62	1,00	1,00
Mediana	25,00	200,00	2,50	5,00	60,00	80,00	1,00	1,00	35,00	50,00	1,00	1,00
Mínimo	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	12,50	1,00	1,00	1,00	2,50	1,00	1,00
Máximo	188	7500	10,00	75,00	2700	6500	5,00	15,00	3000	3600	1,00	1,00
Percentil 10%	12,50	20,00	1,00	2,50	35,00	30,00	1,00	1,00	12,50	10,00	1,00	1,00
Percentil 25%	15,00	60,00	1,00	2,50	40,00	40,00	1,00	1,00	20,00	20,00	1,00	1,00
Percentil 75%	30,00	250,00	2,50	5,00	100,00	222,50	1,00	1,00	125,00	167,50	1,00	1,00
Percentil 90%	37,50	350,00	2,50	5,00	150,00	600,00	1,00	1,00	500,00	477,50	1,00	1,00
DP ¹	17,35	691,38	0,86	2,33	126,59	441,61	0,23	0,25	356,01	451,14	0,00	0,00
CV ² (%)	67,65	217,41	44,80	55,46	150,30	186,30	22,61	24,67	212,42	221,56	0,00	0,00

Descrição	ETA 10				ETA 11				ETA 12			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	1243	826	3465	3430	4003	3310	3997	3280	633	667	3977	4077
Média	30,12	29,81	2,50	2,50	19,98	39,83	1,62	1,84	137,33	82,68	2,50	2,50

Mediana	30,00	30,00	2,50	2,50	20,00	30,00	1,00	2,50	40,00	40,00	2,50	2,50
Mínimo	25,00	2,50	1,00	1,00	2,50	10,00	1,00	1,00	7,00	0,00	2,50	2,50
Máximo	40	30	2,50	2,80	50	120	2,50	2,50	7800	2750	5,50	9,50
Percentil 10%	30,00	30,00	2,50	2,50	20,00	10,00	1,00	1,00	30,00	40,00	2,50	2,50
Percentil 25%	30,00	30,00	2,50	2,50	20,00	10,00	1,00	1,00	30,00	40,00	2,50	2,50
Percentil 75%	30,00	30,00	2,50	2,50	20,00	50,00	2,50	2,50	60,00	40,00	2,50	2,50
Percentil 90%	30,00	30,00	2,50	2,50	20,00	100,00	2,50	2,50	260,00	122,00	2,50	2,50
DP ¹	1,12	2,02	0,05	0,05	0,84	31,03	0,74	0,74	549,20	184,72	0,05	0,11
CV ² (%)	3,73	6,77	2,04	2,06	4,23	77,90	45,54	40,47	399,90	223,43	1,90	4,38

Descrição	ETA 13				ETA 14				ETA 15			
	AB		AT		AB		AT		AB		AT	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	1447	1159	4335	4392	2280	1034	3063	2216	746	748	4356	4353
Média	5,57	12,36	2,34	1,98	59,35	85,82	1,00	1,17	26,78	23,76	1,03	1,02
Mediana	5,00	5,00	2,50	2,50	30,00	35,00	1,00	1,00	20,00	20,00	1,00	1,00
Mínimo	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,50	1,00	1,00
Máximo	804	7870	2,50	5,00	2000	2000	1,00	15,00	165	125	2,50	7,50
Percentil 10%	5,00	5,00	1,00	1,00	7,50	7,50	1,00	1,00	12,50	15,00	1,00	1,00
Percentil 25%	5,00	5,00	2,50	1,00	15,00	7,50	1,00	1,00	15,00	17,50	1,00	1,00
Percentil 75%	5,00	5,00	2,50	2,50	70,00	150,00	1,00	1,00	30,00	25,00	1,00	1,00
Percentil 90%	5,00	5,00	2,50	2,50	150,00	200,00	1,00	1,00	50,00	35,00	1,00	1,00
DP ¹	21,00	231,77	0,46	0,71	121,30	174,58	0,00	1,00	18,51	10,64	0,22	0,25
CV ² (%)	376,93	1875,18	19,52	36,06	204,40	203,42	0,00	85,03	69,12	44,77	21,32	24,73

Tabela I.4 – Estatística descritiva do parâmetro cloro (mgL⁻¹) de cada estação considerando a água tratada em 2015 e 2016

Descrição	ETA 01		ETA 02		ETA 03		ETA 04		ETA 05	
	AT									
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	2672	3193	670	3055	2579	2565	4148	4304	3130	3029
Média	1,20	1,23	1,30	1,50	1,24	1,20	1,27	1,32	1,26	1,26
Mediana	1,20	1,20	1,30	1,50	1,20	1,20	1,30	1,30	1,30	1,20
Mínimo	1,20	1,15	1,35	1,50	1,15	1,20	1,15	1,10	0,95	0,95
Máximo	1,20	1,45	1,65	1,50	1,45	1,20	1,45	1,70	1,85	1,85
Percentil 10%	1,20	1,20	1,20	1,50	1,20	1,20	1,20	1,20	1,00	1,00
Percentil 25%	1,20	1,20	1,20	1,50	1,20	1,20	1,20	1,20	1,10	1,10
Percentil 75%	1,20	1,30	1,40	1,50	1,20	1,20	1,30	1,40	1,40	1,40
Percentil 90%	1,20	1,30	1,40	1,50	1,40	1,20	1,40	1,50	1,50	1,50
DP ¹	0,00	0,05	0,08	0,00	0,07	0,00	0,07	0,10	0,18	0,19
CV ² (%)	0,00	4,15	6,18	0,00	5,81	0,00	5,40	7,84	14,57	14,76

Descrição	ETA 06		ETA 07		ETA 08		ETA 09		ETA 10	
	AT									
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	3209	2907	4336	3941	3404	3404	4134	3917	3436	2777
Média	1,39	1,35	1,67	1,92	1,25	1,28	1,34	1,38	1,39	1,43
Mediana	1,40	1,30	1,60	2,00	1,20	1,30	1,30	1,40	1,40	1,40
Mínimo	1,2	1,25	1,35	1,7	1,15	1,15	1,1	1,2	1,25	1,35
Máximo	1,8	1,55	2,25	2,3	1,45	1,45	1,7	1,8	1,55	1,65
Percentil 10%	1,30	1,20	1,50	1,70	1,20	1,20	1,20	1,20	1,30	1,40
Percentil 25%	1,30	1,30	1,50	1,80	1,20	1,20	1,20	1,30	1,30	1,40
Percentil 75%	1,50	1,40	1,80	2,00	1,30	1,30	1,50	1,50	1,40	1,50
Percentil 90%	1,50	1,50	1,90	2,10	1,30	1,40	1,50	1,50	1,50	1,50
DP ¹	0,10	0,09	0,16	0,14	0,06	0,07	0,13	0,12	0,06	0,05
CV ² (%)	7,00	6,76	9,80	7,34	5,09	5,63	9,68	8,40	4,45	3,32

Descrição	ETA 11		ETA 12		ETA 13		ETA 14		ETA 15	
	AT									
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	3773	3071	3213	3159	3898	3065	2838	1909	3734	4042
Média	1,35	1,35	1,04	1,04	1,08	1,00	1,63	1,74	1,79	1,84
Mediana	1,40	1,40	1,00	1,00	1,10	1,00	1,60	1,70	1,80	1,90
Mínimo	1,05	1,1	0,95	0,95	0,95	1	1,4	1,5	1,45	1,4
Máximo	1,95	1,7	1,25	1,25	1,25	1	2	2,1	2,35	2,6
Percentil 10%	1,10	1,20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,40	1,50	1,50	1,50
Percentil 25%	1,20	1,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,50	1,60	1,60	1,70
Percentil 75%	1,50	1,50	1,10	1,10	1,10	1,00	1,70	1,80	2,00	2,00
Percentil 90%	1,50	1,50	1,10	1,10	1,20	1,00	1,80	2,00	2,00	2,00
DP ¹	0,14	0,12	0,06	0,06	0,07	0,00	0,14	0,15	0,18	0,20
CV ² (%)	10,38	8,77	6,07	5,66	6,51	0,00	8,90	8,59	9,94	10,92

Tabela I.5 – Estatística descritiva do parâmetro flúor (mgL-1) de cada estação considerando a água tratada em 2015 e 2016

Descrição	ETA 01		ETA 02		ETA 03		ETA 04		ETA 05	
	AT									
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	2814	2996	3689	3740	2613	1151	4340	3956	3242	3376
Média	0,76	0,77	0,72	0,73	0,74	0,74	0,72	0,73	0,76	0,74
Mediana	0,76	0,77	0,72	0,72	0,75	0,75	0,71	0,72	0,76	0,74
Mínimo	0,73	0,74	0,69	0,70	0,67	0,68	0,66	0,68	0,66	0,64
Máximo	0,82	0,83	0,78	0,79	0,85	0,83	0,84	0,83	0,96	0,97
Percentil 10%	0,74	0,74	0,70	0,70	0,70	0,70	0,68	0,69	0,68	0,66
Percentil 25%	0,75	0,75	0,70	0,71	0,70	0,70	0,69	0,70	0,72	0,69
Percentil 75%	0,77	0,78	0,73	0,74	0,76	0,75	0,75	0,75	0,81	0,80
Percentil 90%	0,79	0,80	0,74	0,75	0,78	0,80	0,79	0,78	0,85	0,84
DP ¹	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06
CV ² (%)	2,53	2,82	2,44	2,58	4,25	5,33	6,03	4,97	7,71	8,50

Descrição	ETA 06		ETA 07		ETA 08		ETA 09		ETA 10	
	AT									
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	3218	3035	3909	4066	3854	3932	4094	4373	3127	3253
Média	0,76	0,76	0,74	0,72	0,75	0,76	0,74	0,72	0,69	0,69
Mediana	0,76	0,76	0,74	0,72	0,75	0,75	0,73	0,71	0,69	0,69
Mínimo	0,68	0,68	0,72	0,68	0,7	0,69	0,67	0,645	0,67	0,67
Máximo	0,92	0,92	0,78	0,8	0,82	0,87	0,85	0,855	0,73	0,73
Percentil 10%	0,70	0,70	0,72	0,69	0,71	0,71	0,69	0,66	0,67	0,68
Percentil 25%	0,73	0,72	0,73	0,70	0,73	0,73	0,70	0,68	0,68	0,68
Percentil 75%	0,80	0,80	0,75	0,74	0,77	0,78	0,77	0,75	0,70	0,70
Percentil 90%	0,83	0,83	0,76	0,76	0,79	0,81	0,80	0,78	0,72	0,71
DP ¹	0,05	0,05	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,02	0,01
CV ² (%)	5,94	6,21	2,06	3,79	3,84	5,12	5,71	6,48	2,19	1,89

Descrição	ETA 11		ETA 12		ETA 13		ETA 14		ETA 15	
	AT									
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Nº de dados	3661	3021	3594	3220	4123	3871	2852	2000	3570	4141
Média	0,77	0,76	0,75	0,74	0,74	0,75	0,75	0,76	0,75	0,72
Mediana	0,77	0,76	0,75	0,74	0,74	0,75	0,74	0,76	0,75	0,72
Mínimo	0,665	0,665	0,715	0,705	0,7	0,685	0,68	0,7	0,715	0,68
Máximo	0,935	0,935	0,805	0,795	0,82	0,895	0,86	0,88	0,805	0,8
Percentil 10%	0,70	0,69	0,73	0,72	0,70	0,71	0,70	0,72	0,73	0,69
Percentil 25%	0,72	0,72	0,73	0,73	0,72	0,72	0,72	0,74	0,74	0,70
Percentil 75%	0,81	0,80	0,76	0,75	0,76	0,78	0,77	0,79	0,76	0,74
Percentil 90%	0,84	0,84	0,78	0,77	0,79	0,80	0,80	0,82	0,78	0,76
DP ¹	0,05	0,05	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03
CV ² (%)	6,92	7,03	2,69	2,44	4,07	4,62	5,39	4,85	2,43	3,57

APÊNDICE II

Figura II.1 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada estação de tratamento (em negrito) em relação às demais (em itálico) para o parâmetro turbidez da água bruta em 2015

ETA	<i>01</i>	<i>02</i>	<i>03</i>	<i>04</i>	<i>05</i>	<i>06</i>	<i>07</i>	<i>08</i>	<i>09</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
01		=	↓	↑	=	↑	↑	↑	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑
02	=		↓	↑	=	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
03	↑	↑		↑	↑	↑	↑	↑	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑
04	↓	↓	↓		↓	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	=
05	=	=	↓	↑		↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
06	↓	↓	↓	↑	↓		↑	=	↓	↑	↑	=	↑	↑	↑
07	↓	↓	↓	=	↓	↓		↑	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↑
08	↓	↓	↓	↑	↓	=	↑		↓	↑	↑	=	↑	↑	↑
09	=	↑	=	↑	↑	↑	↑	↑		↑	↑	↑	↑	↑	↑
10	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓		↑	↓	↑	=	↑
11	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↑	↑	↓	↓
12	↓	↓	↓	↑	↓	=	↑	=	↓	↑	↑		↑	↑	↑
13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↓	↓
14	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	=	↑	↓	↑		↑
15	↓	↓	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↓	

Figura II.2 – Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada estação de tratamento (em negrito) em relação às demais (em itálico) para o parâmetro turbidez da água bruta em 2016

ETA	<i>01</i>	<i>02</i>	<i>03</i>	<i>04</i>	<i>05</i>	<i>06</i>	<i>07</i>	<i>08</i>	<i>09</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
01		=	↓	↑	=	↑	=	↑	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑
02	=		↓	↑	=	↑	=	↑	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑
03	↑	↑		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
04	↓	↓	↓		↓	↓	↓	↓	↓	↓	=	↓	↑	↓	=
05	=	=	↓	↑		↑	=	↑	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑
06	↓	↓	↓	↑	↓		↑	=	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
07	=	=	↓	↑	=	↑		↑	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑
08	↓	↓	↓	↑	↓	=	↓		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
09	=	=	↓	↑	=	↑	=	↑		↑	↑	↑	↑	↑	↑
10	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓		↑	↓	↑	↓	=
11	↓	↓	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↑	↑	↑	↑
12	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑		↑	↑	↑
13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↓	↓
14	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑		↑
15	↓	↓	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	=	↓	↓	↑	↓	

Legenda:

↑ Estação em negrito (coluna à esquerda) estatisticamente diferente/superior à estação em itálico (acima)

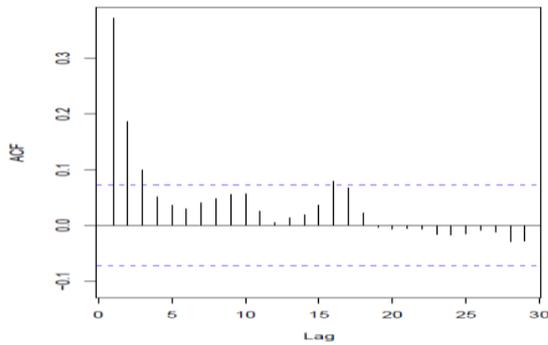
↓ Estação em negrito (coluna à esquerda) estatisticamente diferente/inferior à estação em itálico (acima)

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

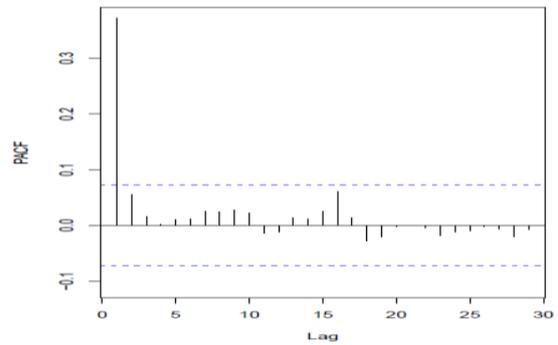
APÊNDICE III

Figura III.1 – Funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parciais (PACF) aplicadas ao parâmetro turbidez das ETAs

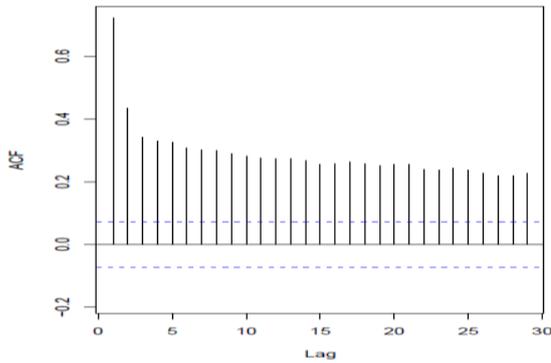
Função autocorrelação Turbidez – ETA 01



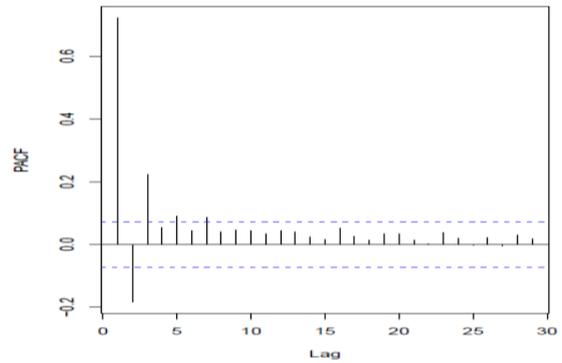
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 01



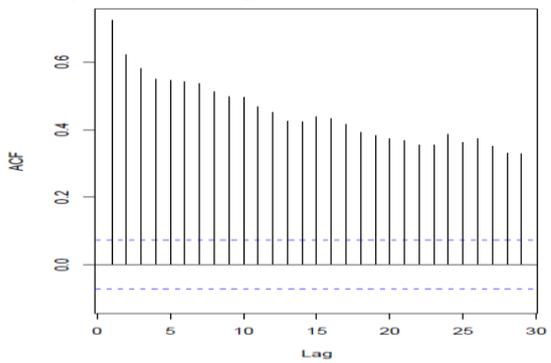
Função autocorrelação Turbidez – ETA 02



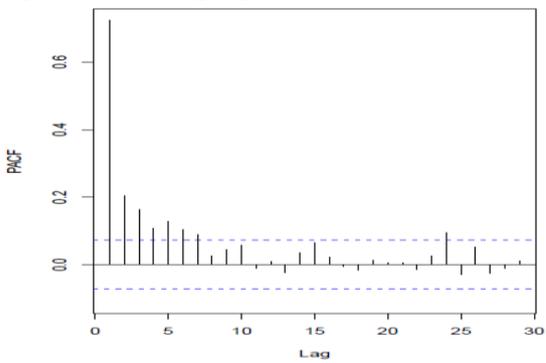
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 02



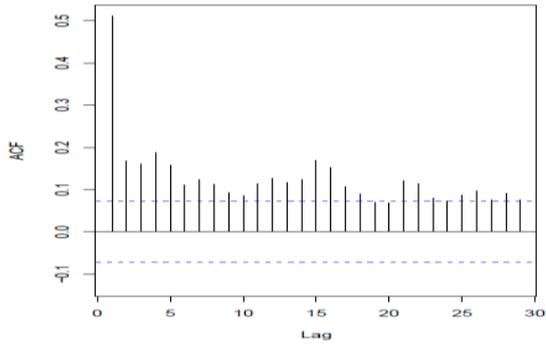
Função autocorrelação Turbidez – ETA 03



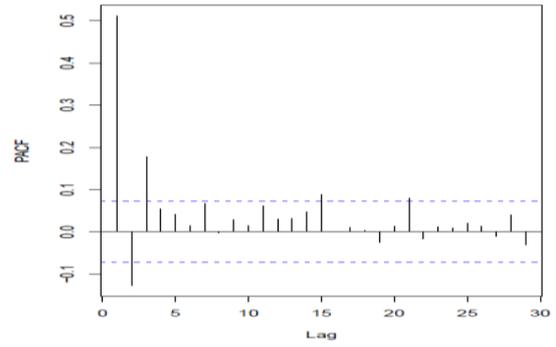
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 03



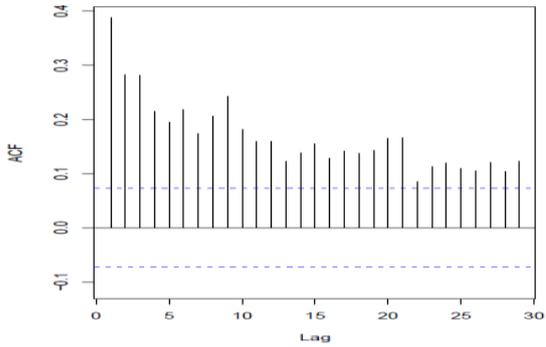
Função autocorrelação Turbidez – ETA 04



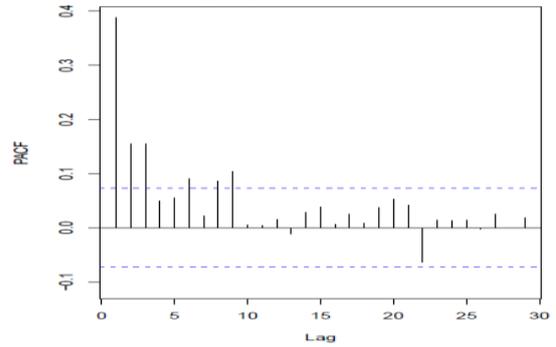
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 04



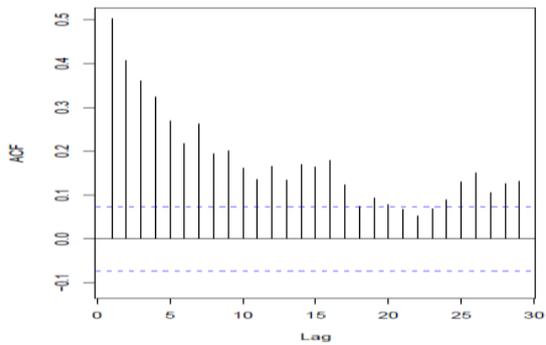
Função autocorrelação Turbidez – ETA 05



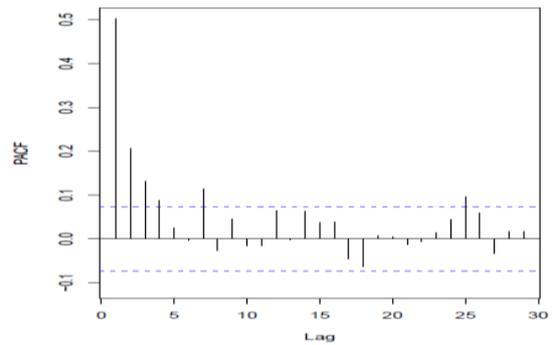
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 05



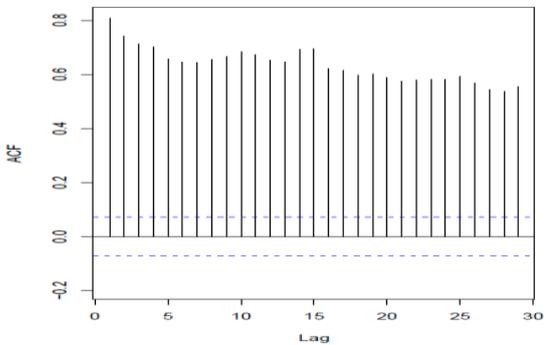
Função autocorrelação Turbidez – ETA 06



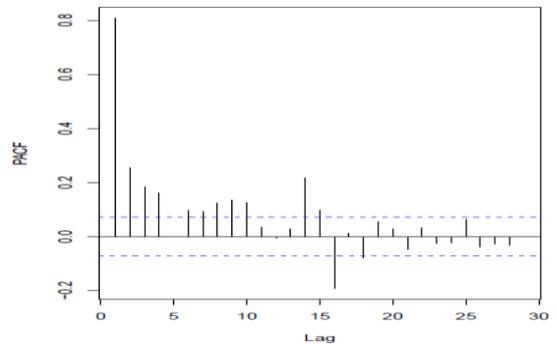
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 06



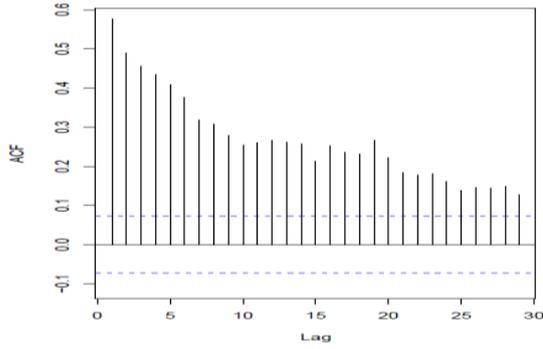
Função autocorrelação Turbidez – ETA 07



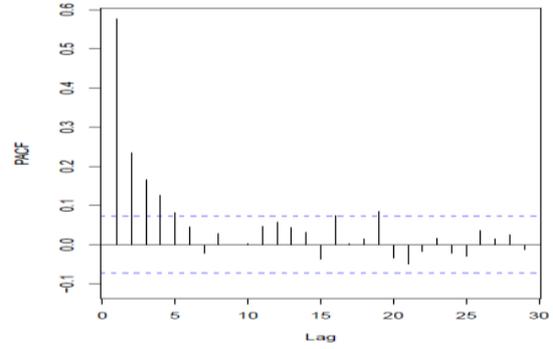
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 07



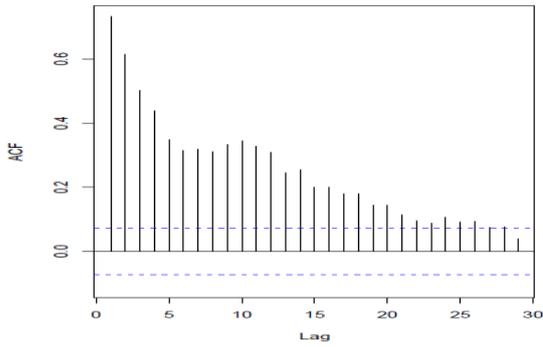
Função autocorrelação Turbidez – ETA 08



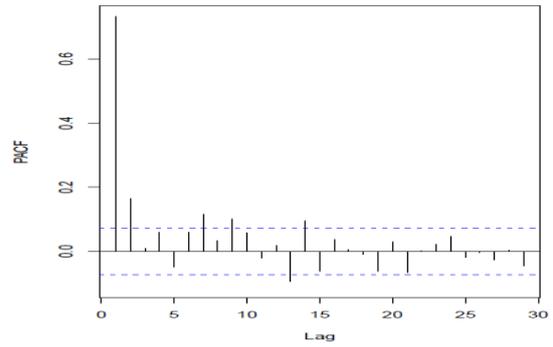
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 08



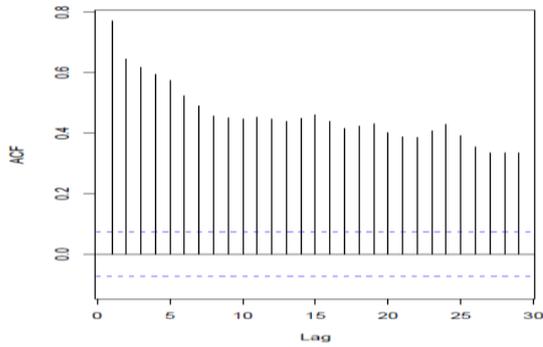
Função autocorrelação Turbidez – ETA 09



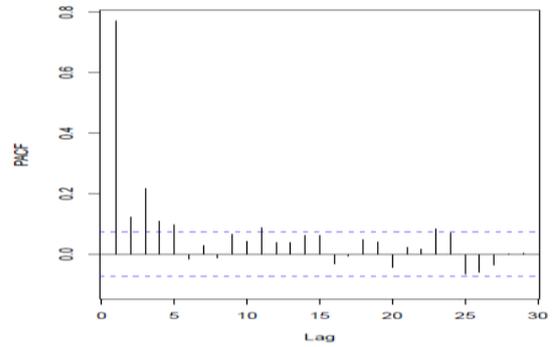
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 09



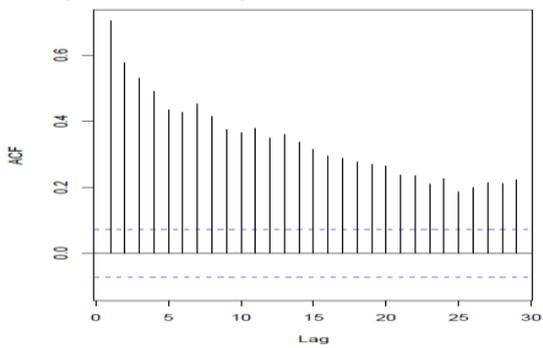
Função autocorrelação Turbidez – ETA 10



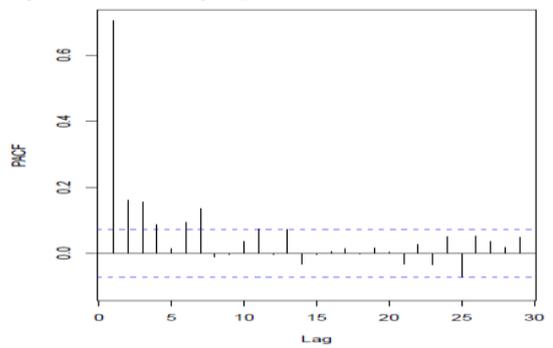
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 10



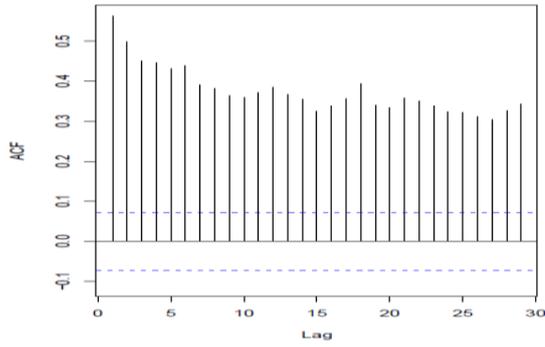
Função autocorrelação Turbidez – ETA 11



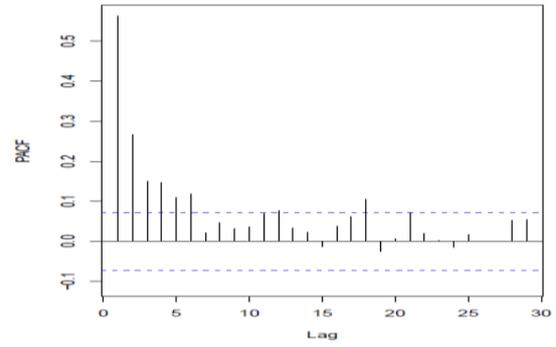
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 11



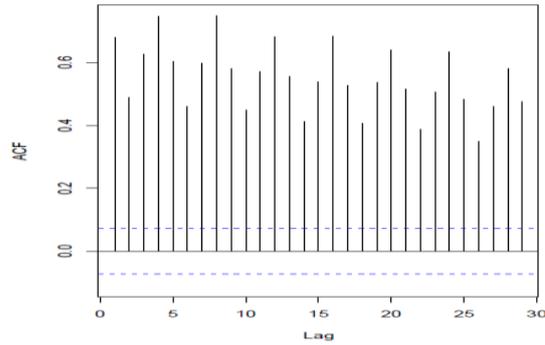
Função autocorrelação Turbidez – ETA 12



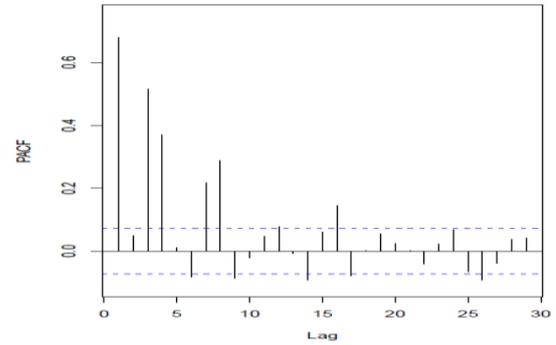
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 12



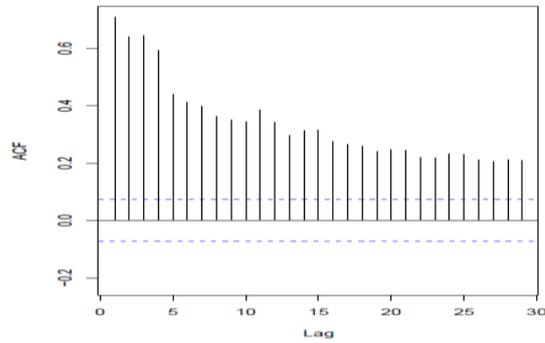
Função autocorrelação Turbidez – ETA 13



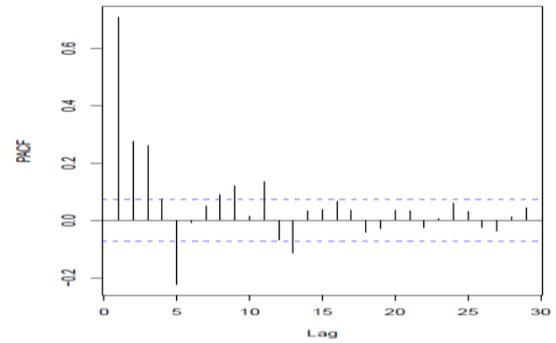
Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 13



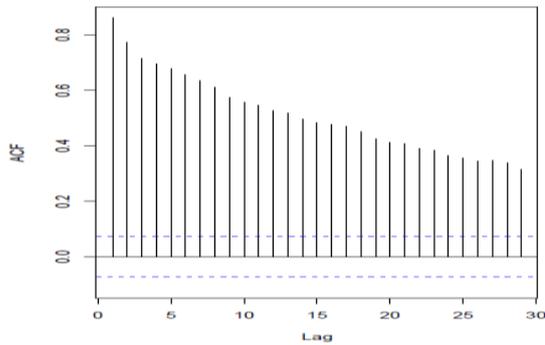
Função autocorrelação Turbidez – ETA 14



Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 14



Função autocorrelação Turbidez – ETA 15



Função autocorrelação parcial Turbidez – ETA 15

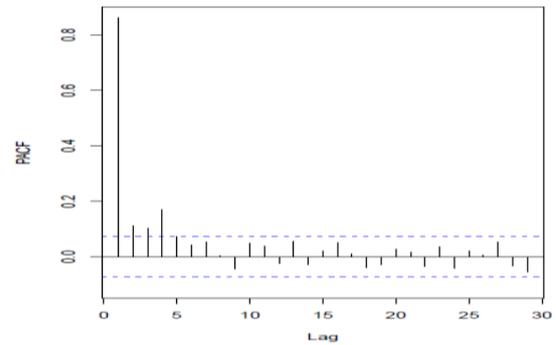
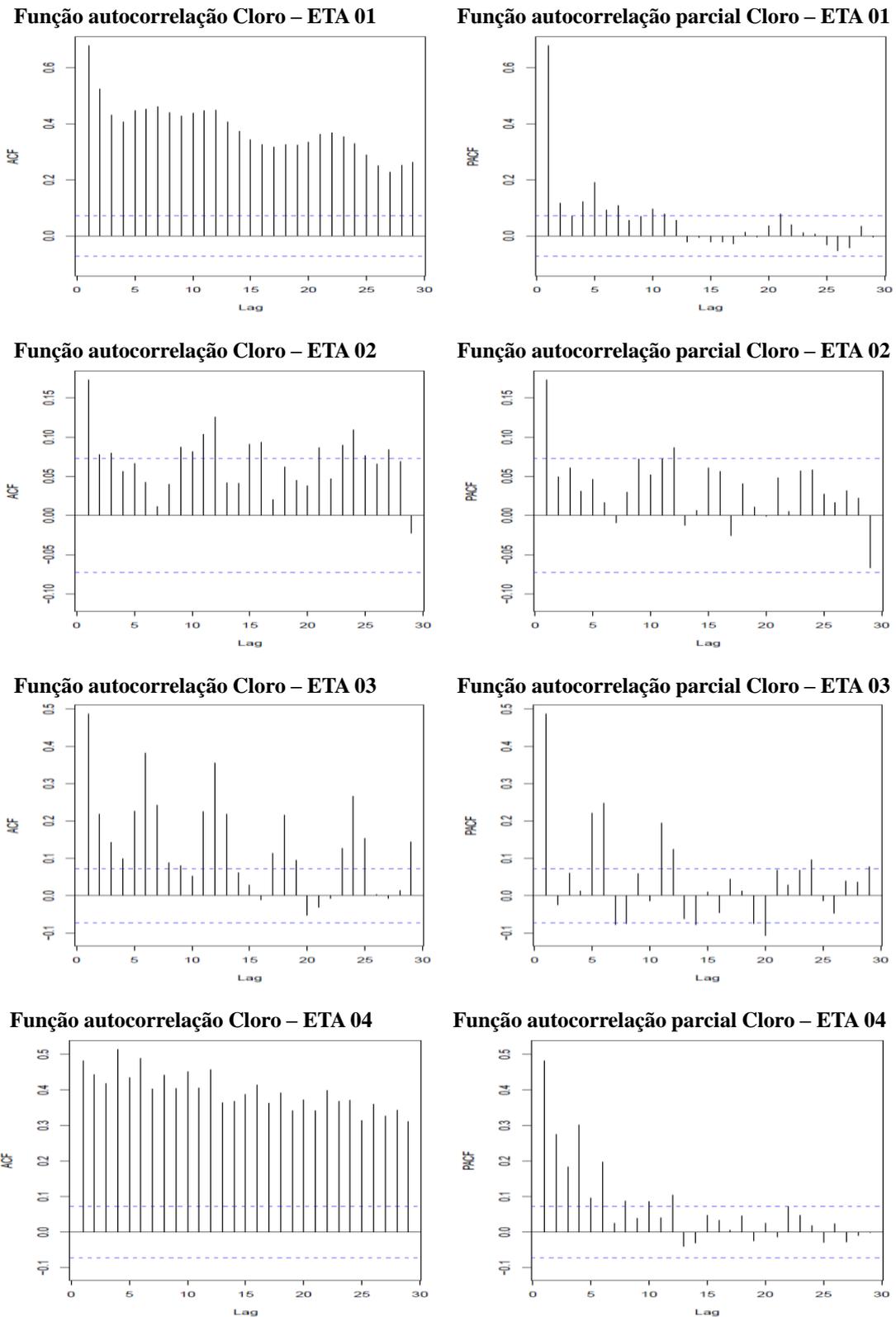
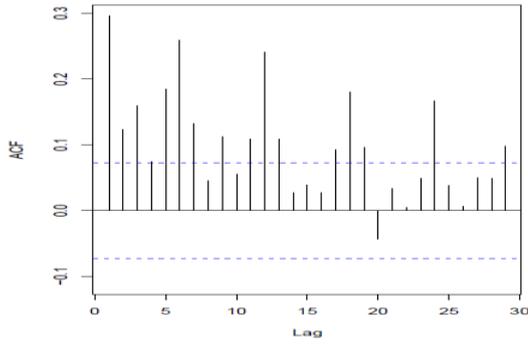


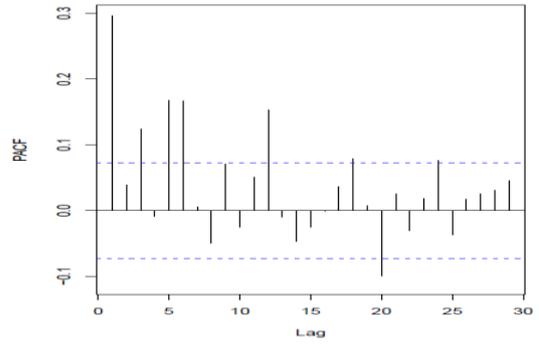
Figura III.2 – Funções de autocorrelação e autocorrelação parciais aplicadas ao parâmetro cloro das ETAs



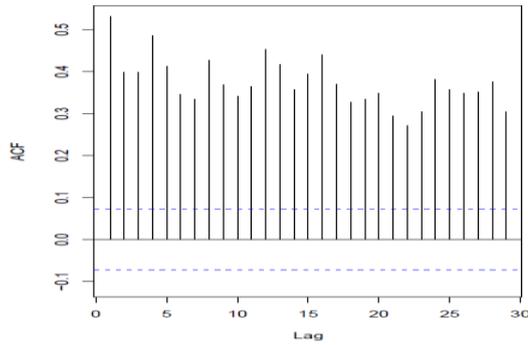
Função autocorrelação Cloro – ETA 05



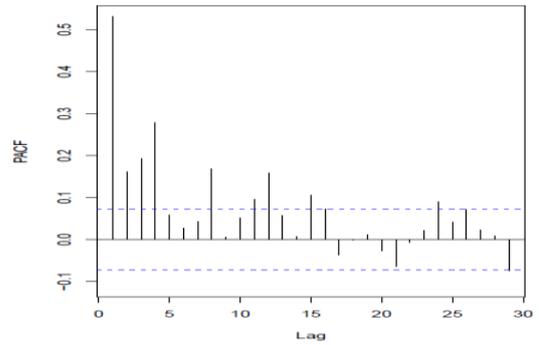
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 05



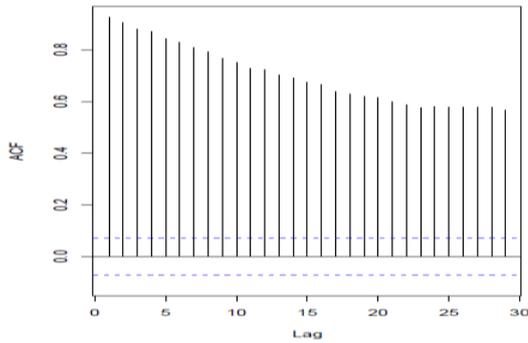
Função autocorrelação Cloro – ETA 06



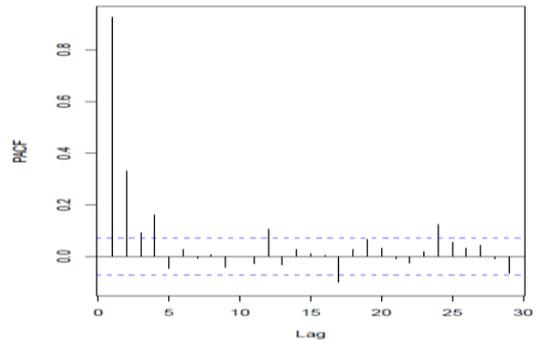
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 06



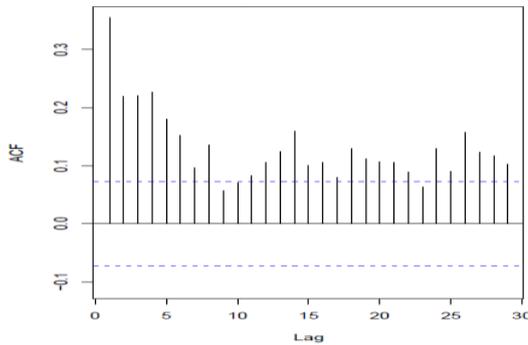
Função autocorrelação Cloro – ETA 07



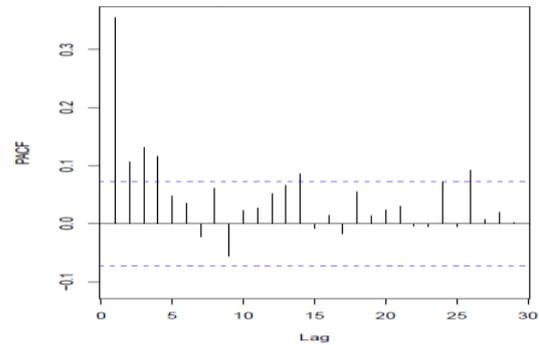
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 07



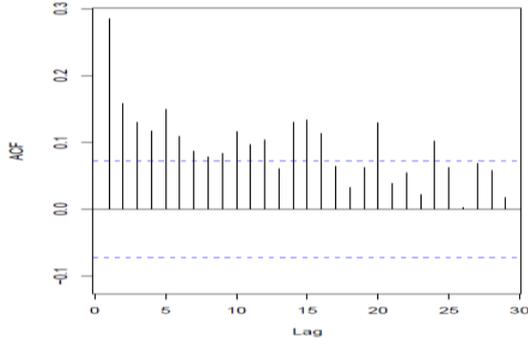
Função autocorrelação Cloro – ETA 08



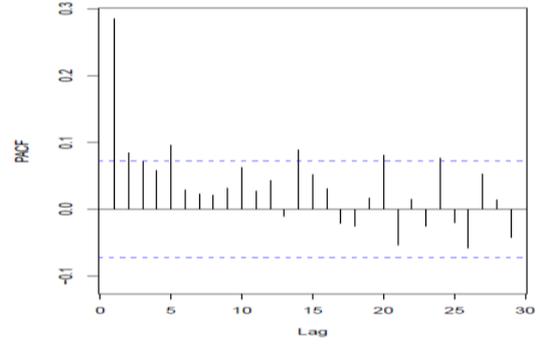
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 08



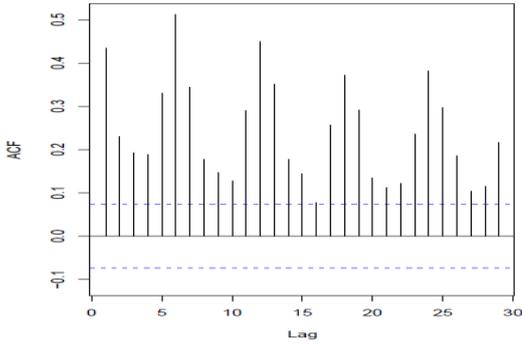
Função autocorrelação Cloro – ETA 09



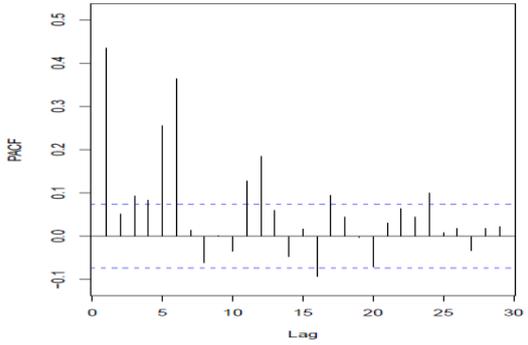
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 09



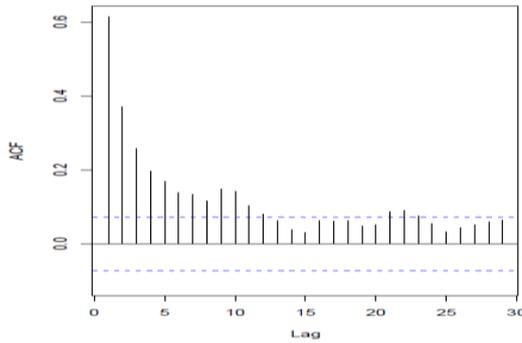
Função autocorrelação Cloro – ETA 10



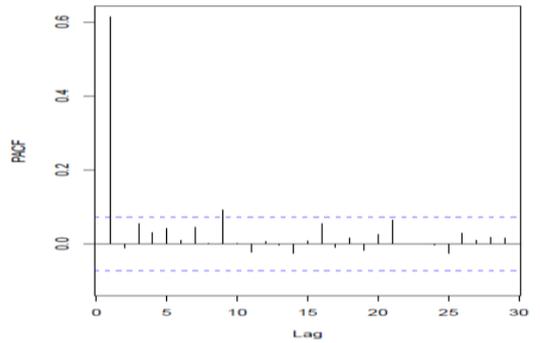
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 10



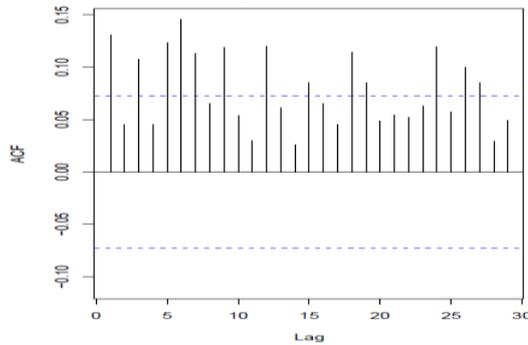
Função autocorrelação Cloro – ETA 11



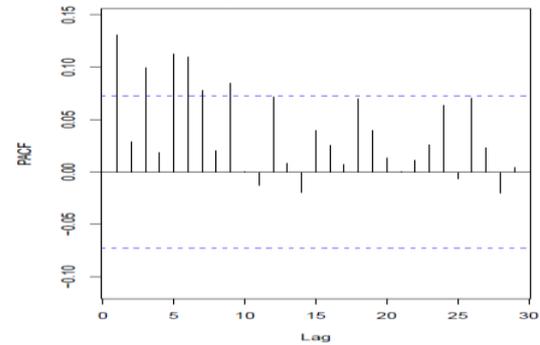
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 11



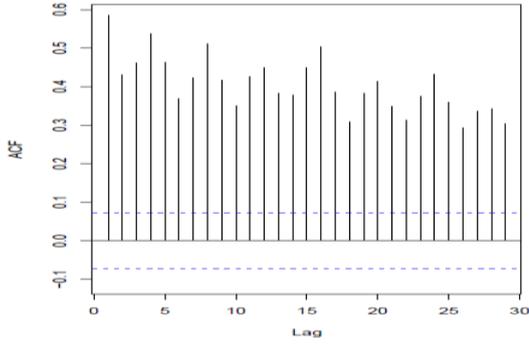
Função autocorrelação Cloro – ETA 12



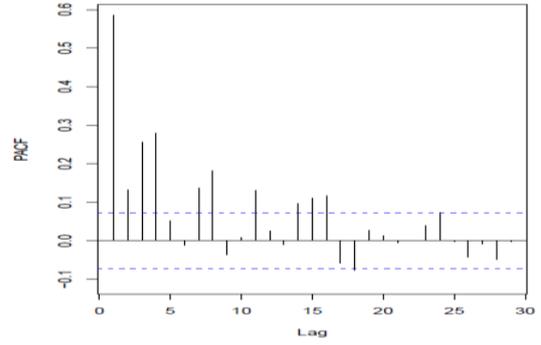
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 12



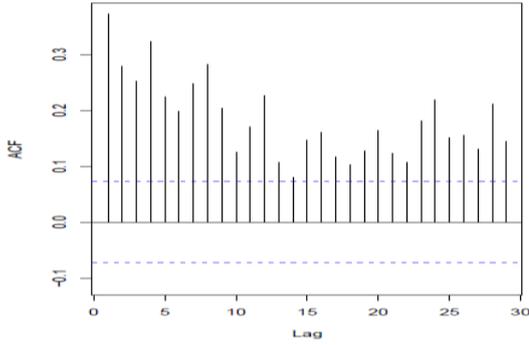
Função autocorrelação Cloro – ETA 13



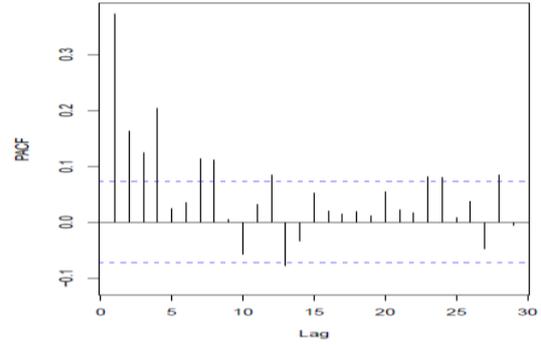
Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 13



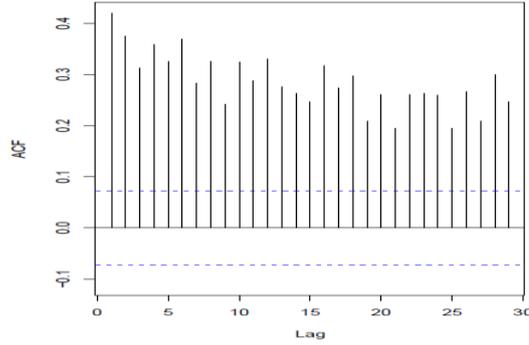
Função autocorrelação Cloro – ETA 14



Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 14



Função autocorrelação Cloro – ETA 15



Função autocorrelação parcial Cloro – ETA 15

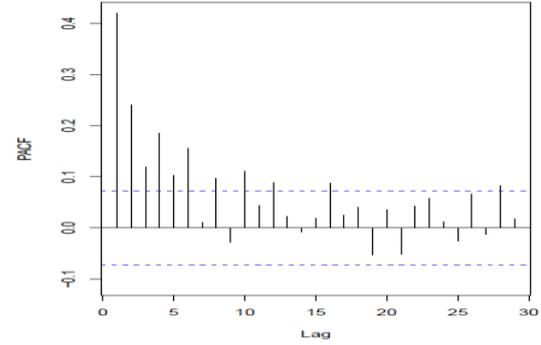
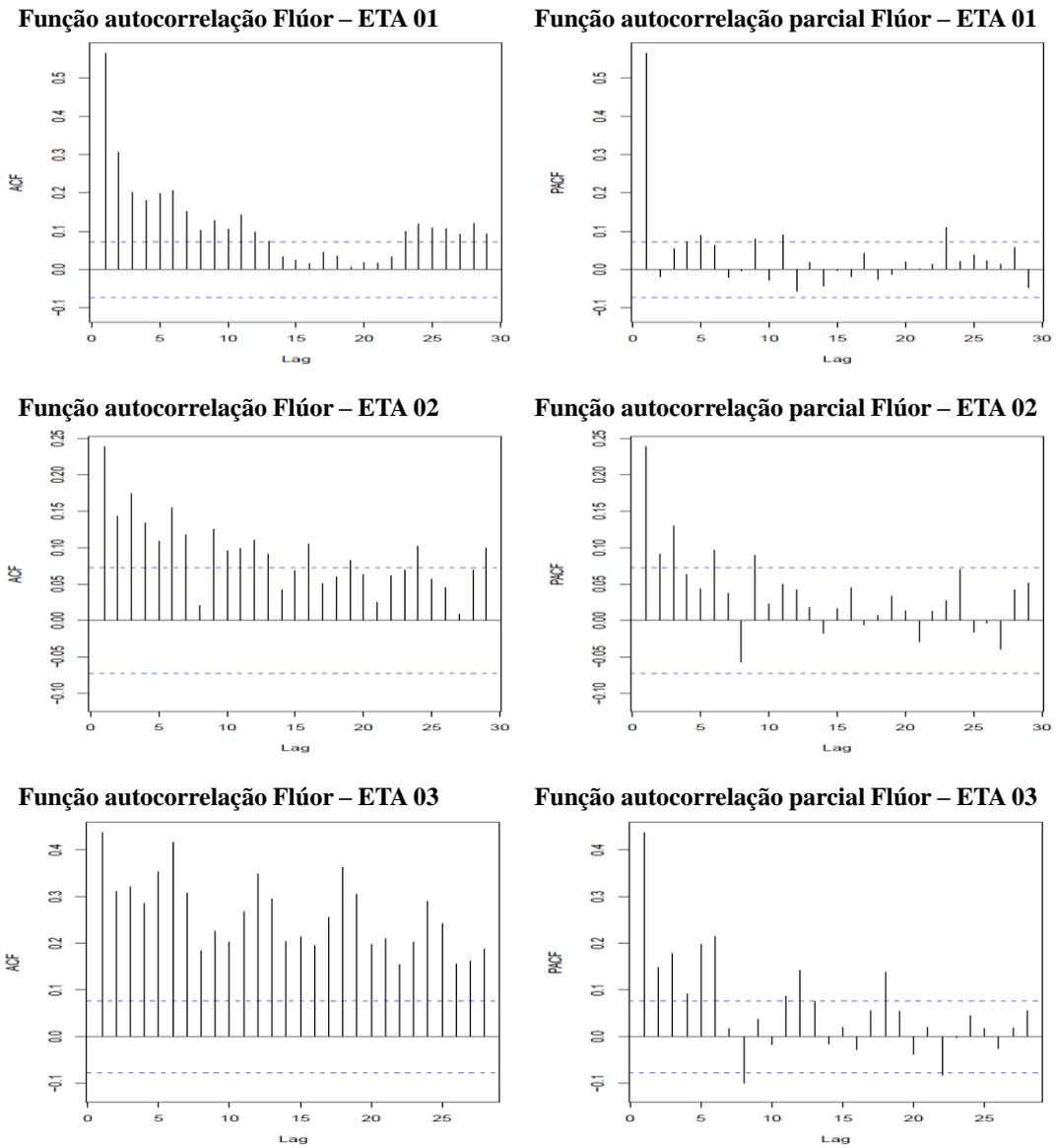
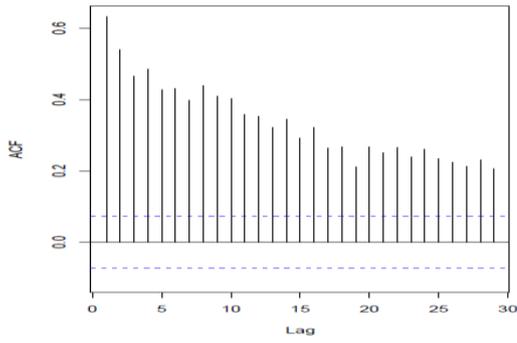


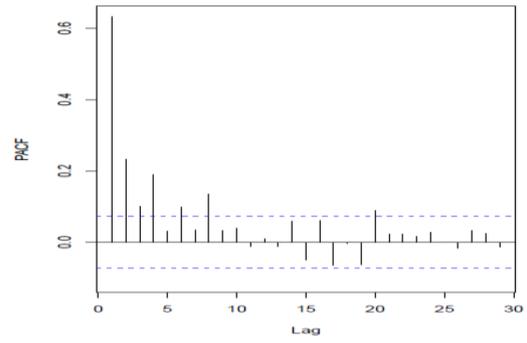
Figura III.3 – Funções de autocorrelação e autocorrelação parciais aplicadas ao parâmetro flúor das ETAs



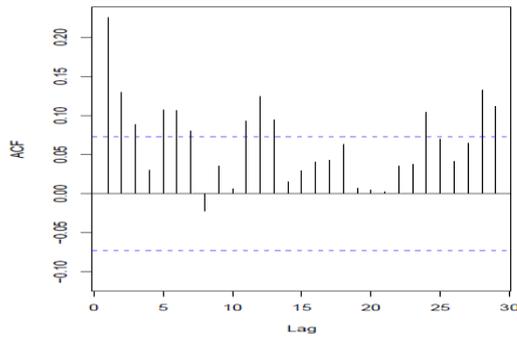
Função autocorrelação Flúor – ETA 04



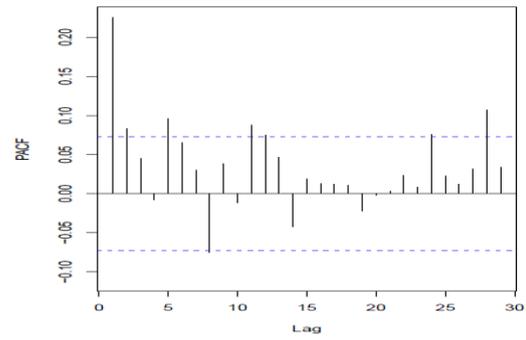
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 04



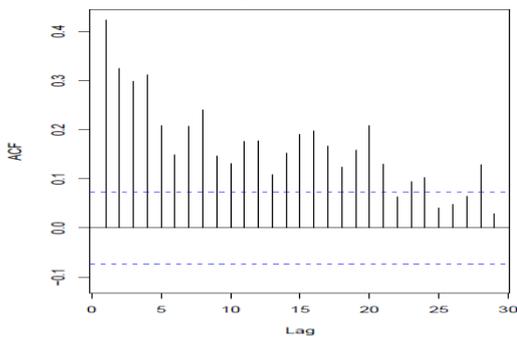
Função autocorrelação Flúor – ETA 05



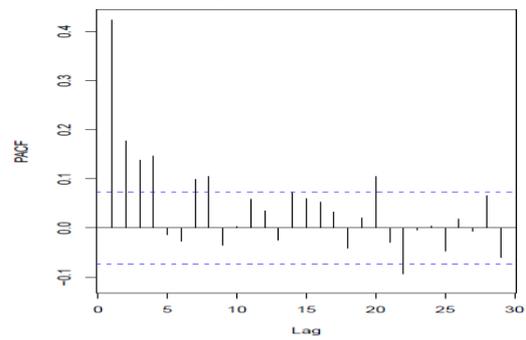
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 05



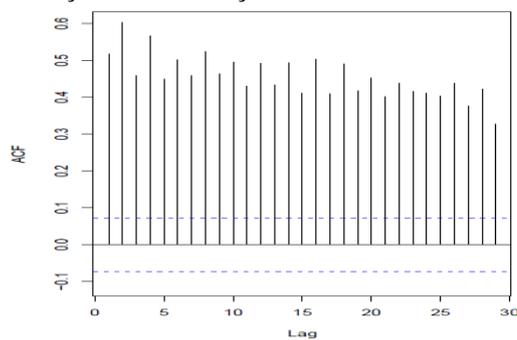
Função autocorrelação Flúor – ETA 06



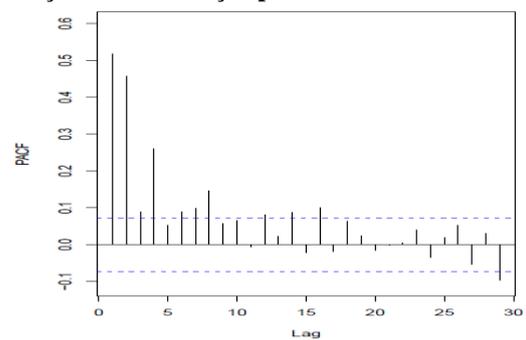
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 06



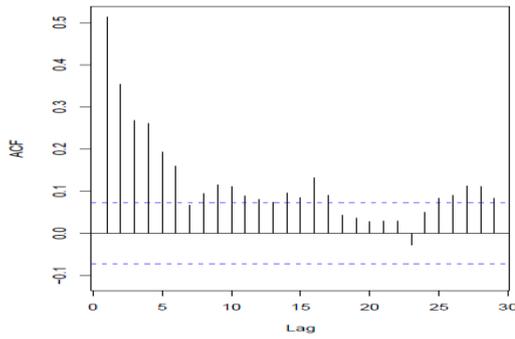
Função autocorrelação Flúor – ETA 07



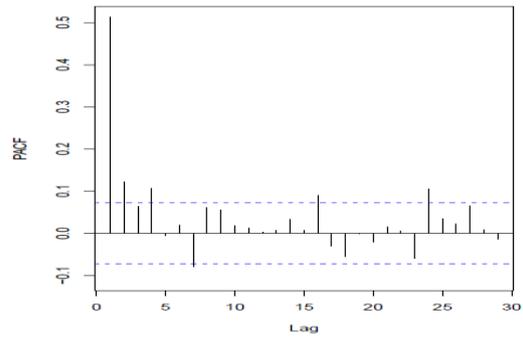
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 07



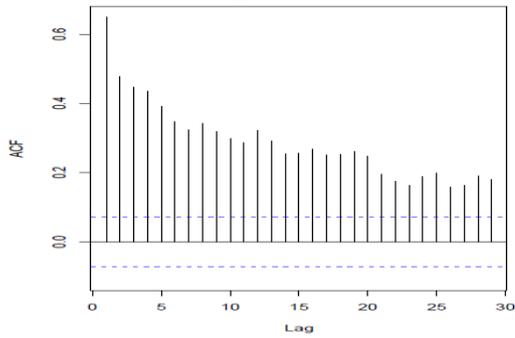
Função autocorrelação Flúor – ETA 08



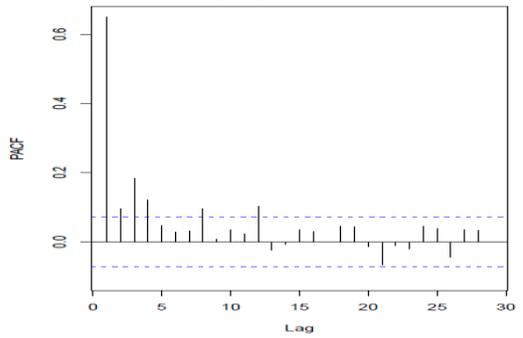
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 08



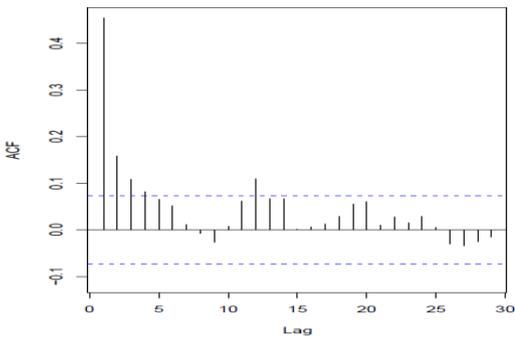
Função autocorrelação Flúor – ETA 09



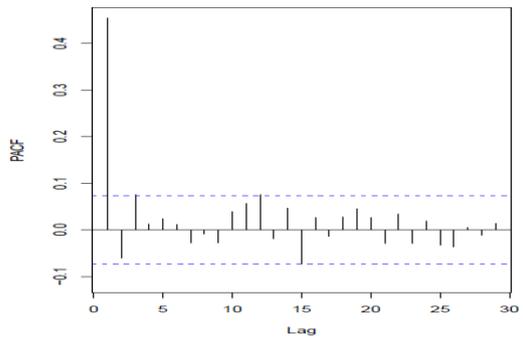
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 09



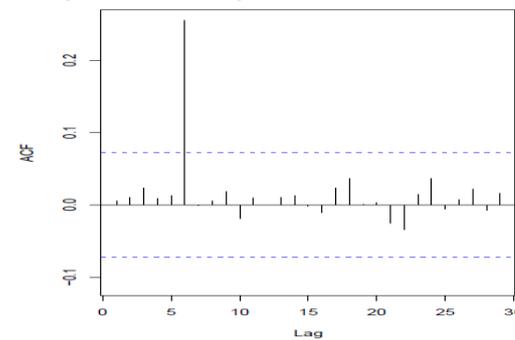
Função autocorrelação Flúor – ETA 11



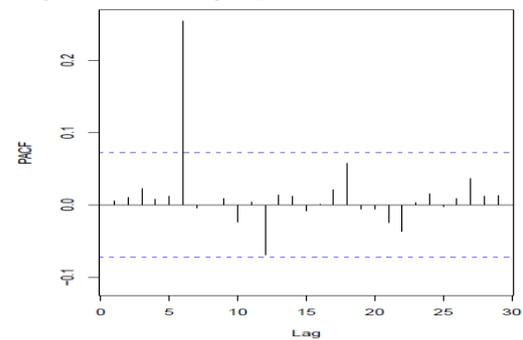
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 11



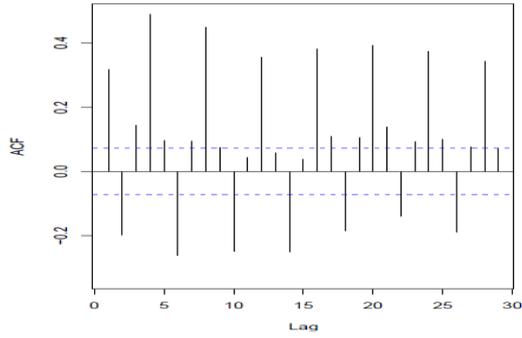
Função autocorrelação Flúor – ETA 12



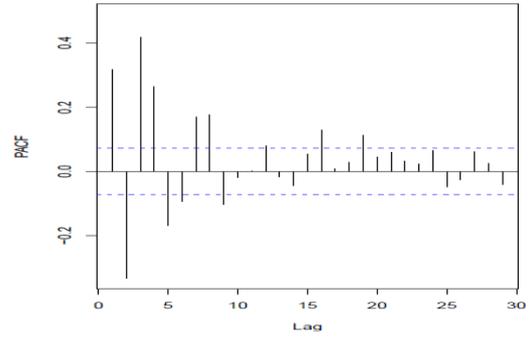
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 12



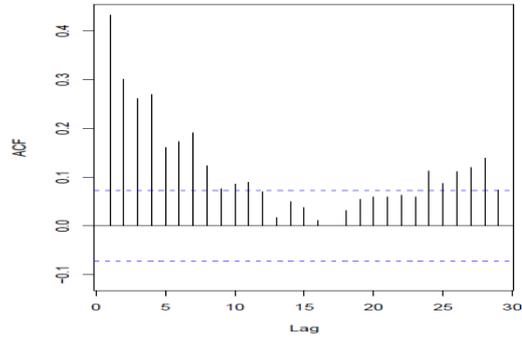
Função autocorrelação Flúor – ETA 13



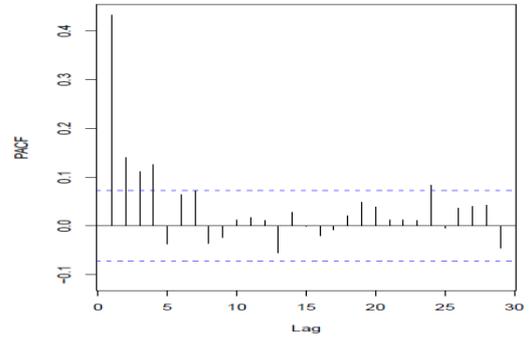
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 13



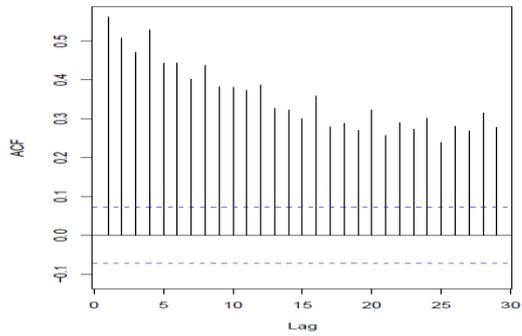
Função autocorrelação Flúor – ETA 14



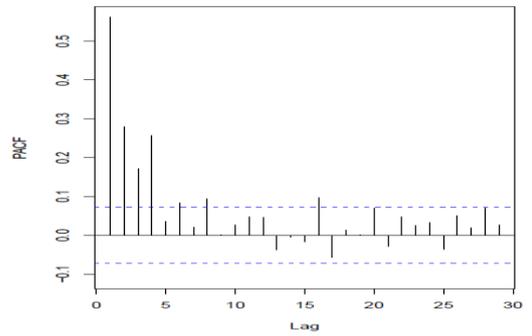
Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 14



Função autocorrelação Flúor – ETA 15



Função autocorrelação parcial Flúor – ETA 15



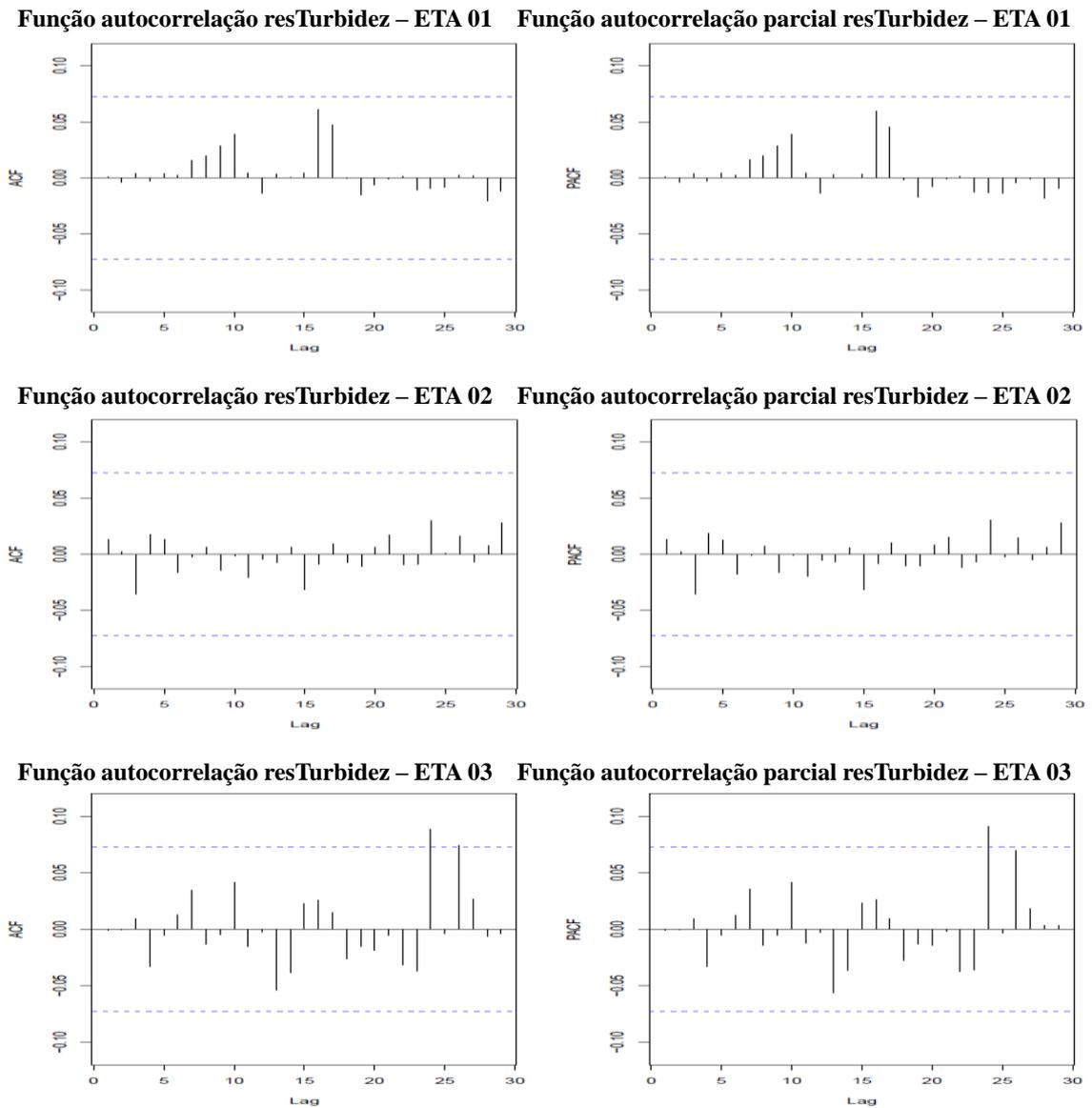
APÊNDICE IV

Tabela IV.1 – Resultados do teste Dickey-Fuller para verificar a estacionariedade das séries de dados

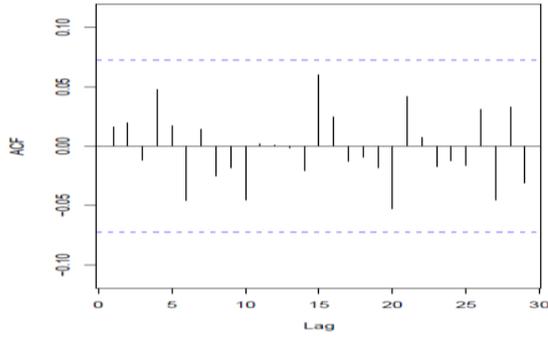
Nome da estação	Turbidez			Cloro			Flúor		
	Dickey-Fuller	p-valor	Série estacionária?	Dickey-Fuller	p-valor	Série estacionária?	Dickey-Fuller	p-valor	Série estacionária?
ETA 01	-7,05	0,01	Sim	-3,35	0,06	Não	-6,29	0,01	Sim
ETA 02	-1,06	0,93	Não	-6,95	0,01	Sim	-6,91	0,01	Sim
ETA 03	-3,39	0,06	Não	-6,13	0,01	Sim	-4,61	0,01	Sim
ETA 04	-6,34	0,01	Sim	-3,55	0,04	Sim	-3,89	0,01	Sim
ETA 05	-5,16	0,01	Sim	-5,81	0,01	Sim	-9,04	0,01	Sim
ETA 06	-5,59	0,01	Sim	-5,11	0,01	Sim	-5,73	0,01	Sim
ETA 07	-2,16	0,51	Não	-2,58	0,33	Não	-3,70	0,02	Sim
ETA 08	-5,03	0,01	Sim	-7,48	0,01	Sim	-6,17	0,01	Sim
ETA 09	-4,63	0,01	Sim	-6,30	0,01	Sim	-4,41	0,01	Sim
ETA 10	-4,85	0,01	Sim	-6,29	0,01	Sim	-6,11	0,01	Sim
ETA 11	-5,85	0,01	Sim	-6,19	0,01	Sim	-8,18	0,01	Sim
ETA 12	-5,77	0,01	Sim	-6,30	0,01	Sim	-7,67	0,01	Sim
ETA 13	-4,84	0,01	Sim	-4,93	0,01	Sim	-6,70	0,01	Sim
ETA 14	-4,44	0,01	Sim	-6,18	0,01	Sim	-6,82	0,01	Sim
ETA 15	-4,85	0,01	Sim	-5,41	0,01	Sim	-4,80	0,01	Sim

APÊNDICE V

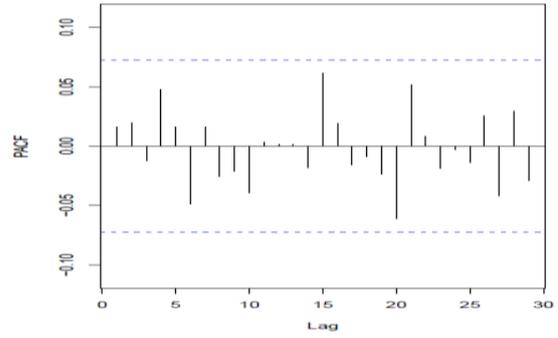
Figura V.1 – Funções de autocorrelação e autocorrelação parciais aplicadas ao parâmetro turbidez das ETAs



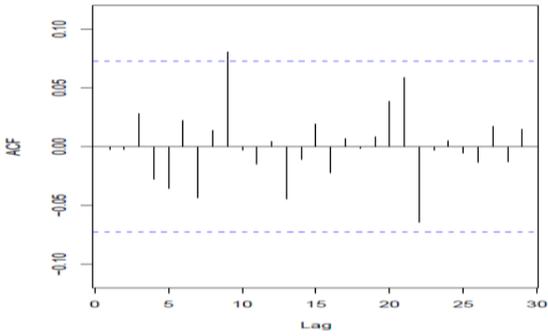
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 04



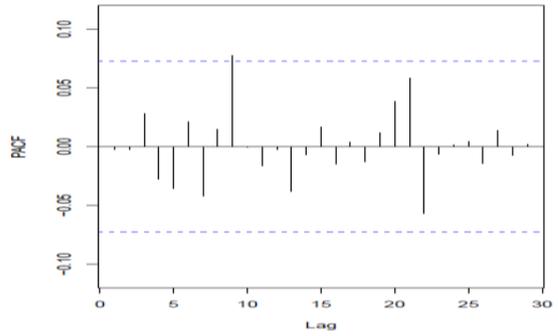
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 04



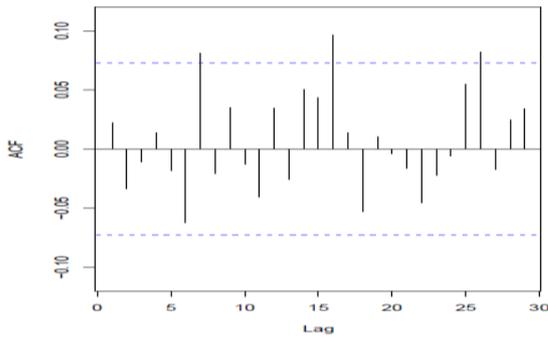
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 05



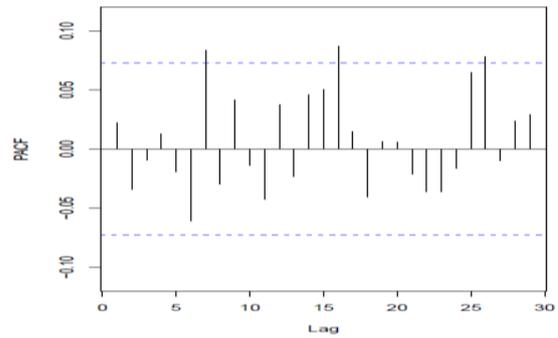
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 05



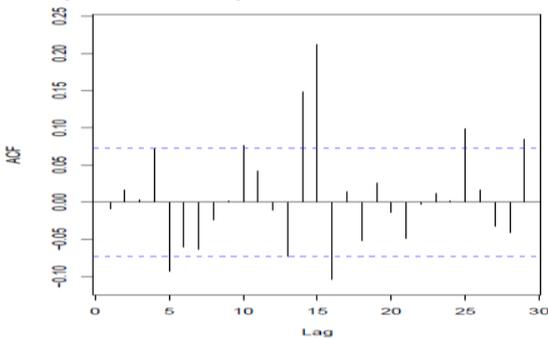
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 06



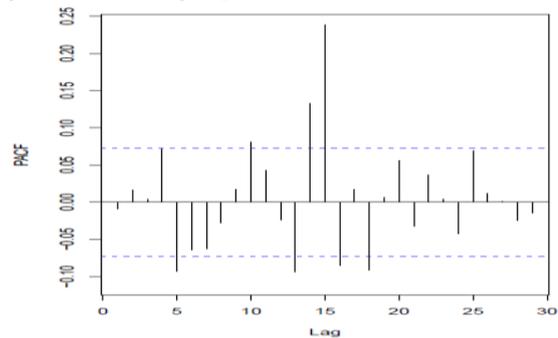
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 06



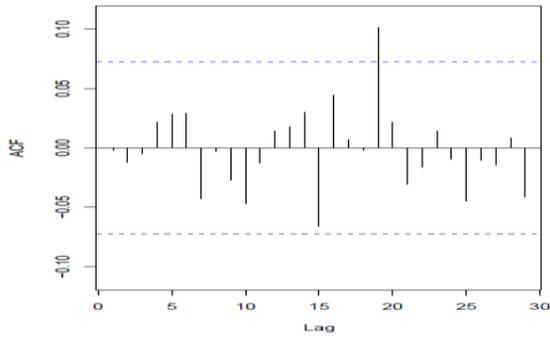
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 07



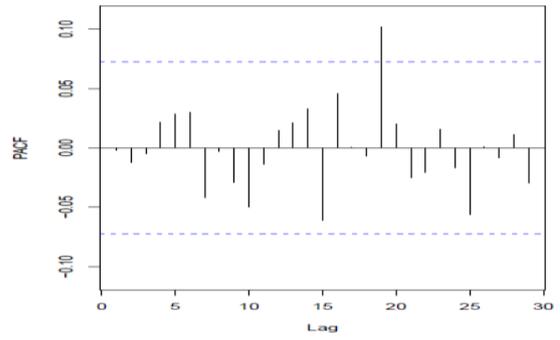
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 07



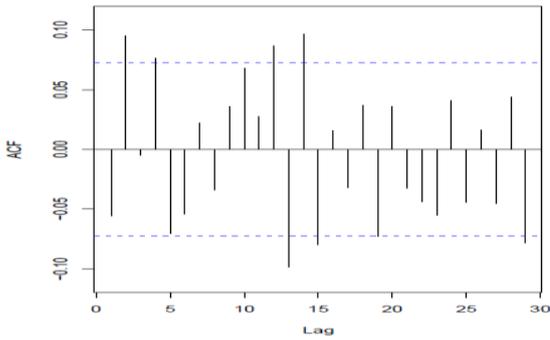
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 08



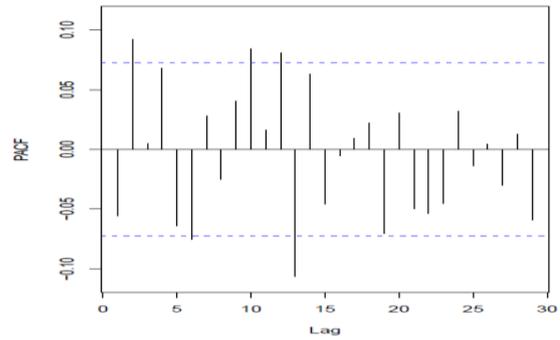
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 08



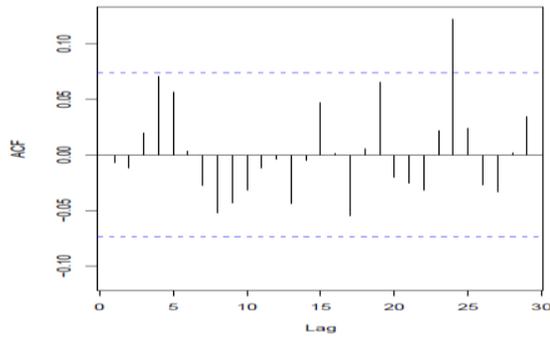
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 09



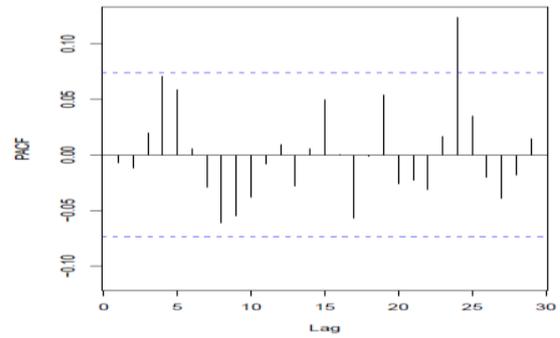
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 09



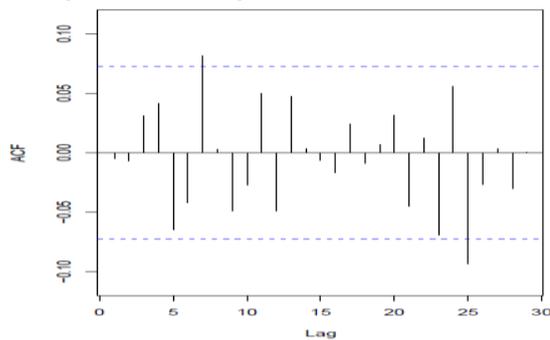
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 10



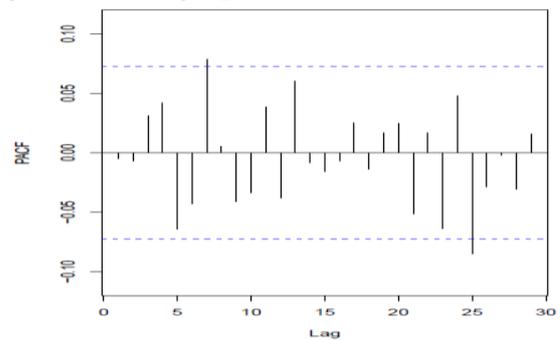
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 10



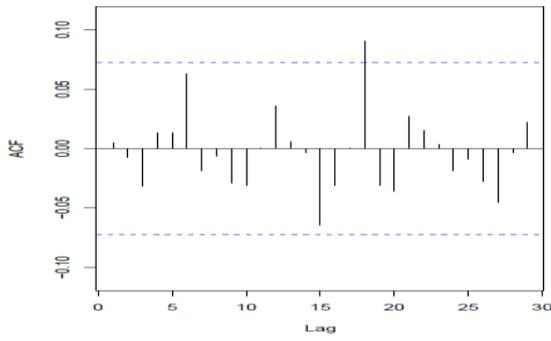
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 11



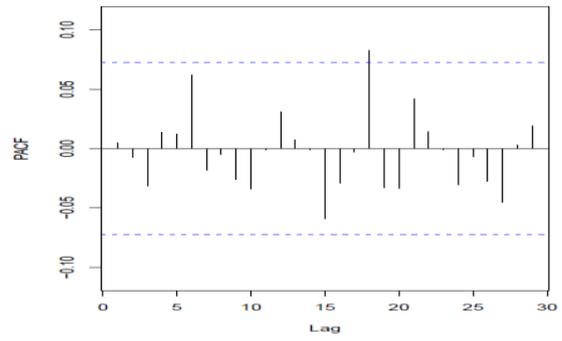
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 11



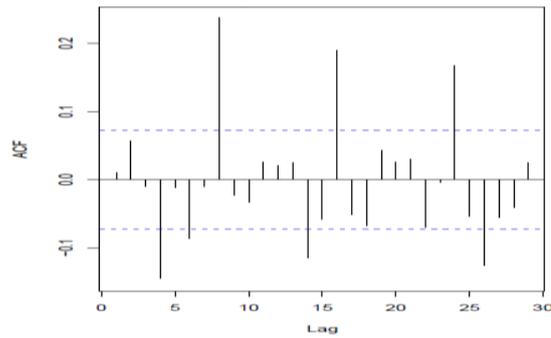
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 12



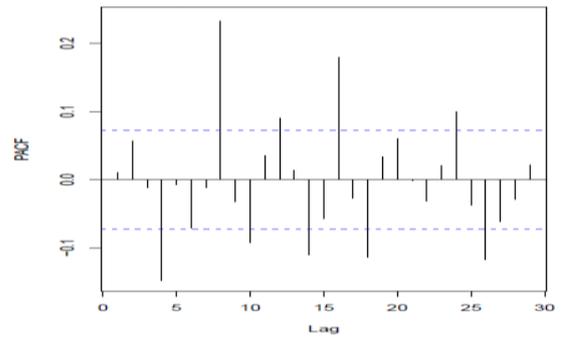
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 12



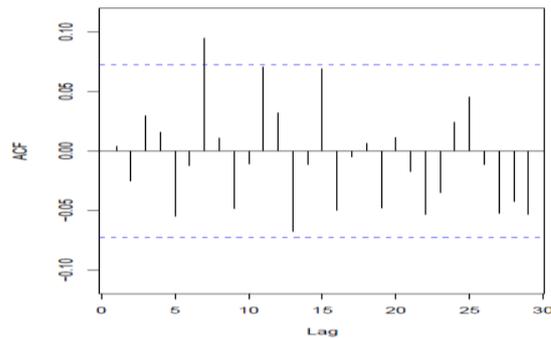
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 13



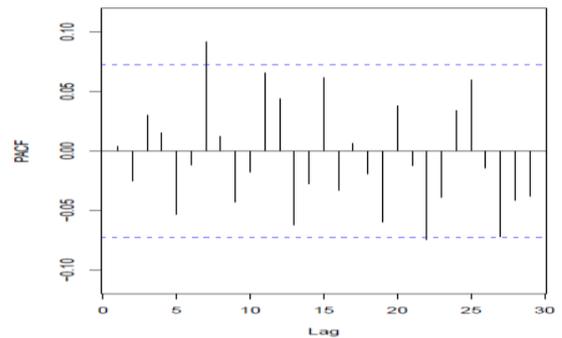
Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 13



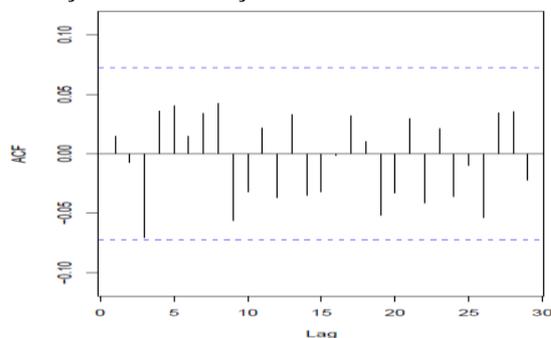
Função autocorrelação resTurbidez – ETA 14



Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 14



Função autocorrelação resTurbidez – ETA 15



Função autocorrelação parcial resTurbidez – ETA 15

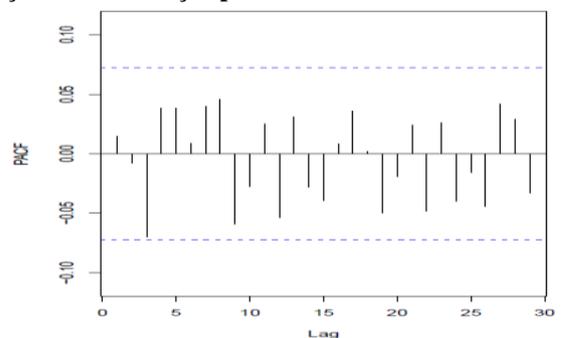
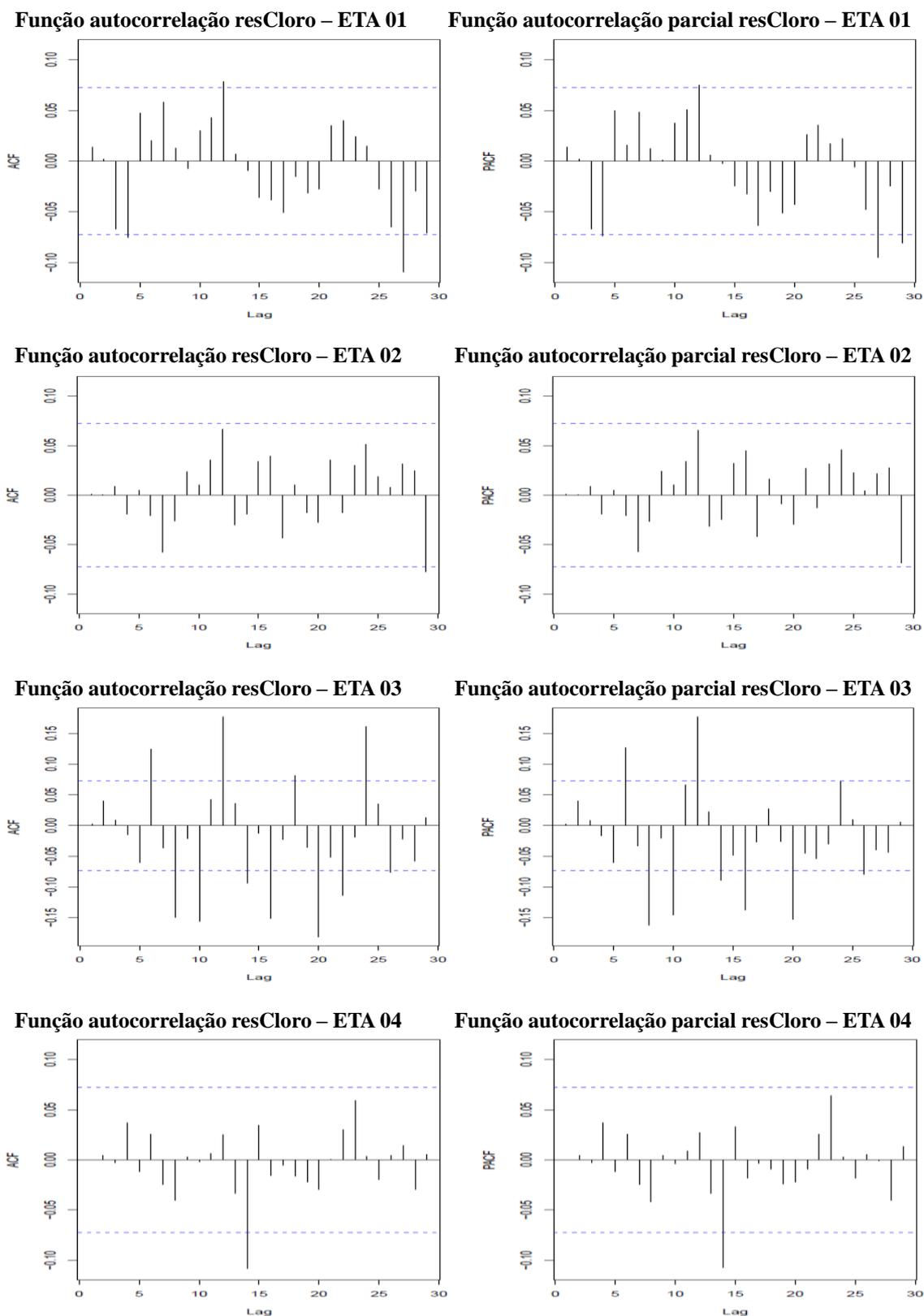
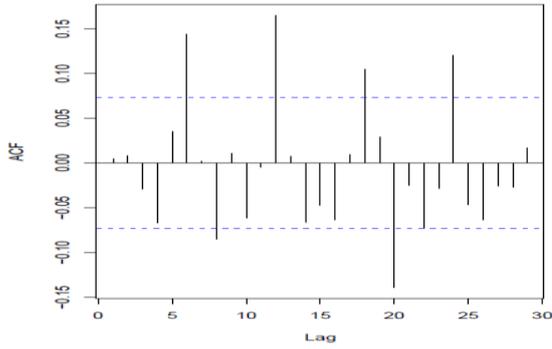


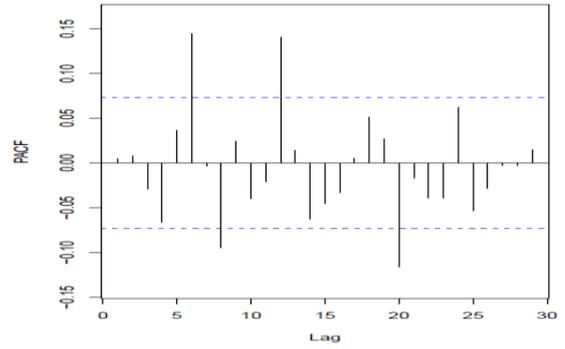
Figura V.2 – Funções de autocorrelação e autocorrelação parciais aplicadas ao parâmetro cloro das ETAs



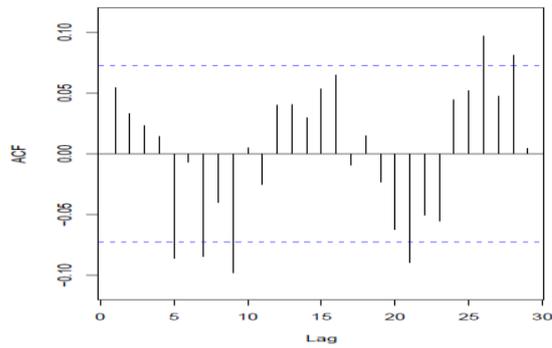
Função autocorrelação resCloro – ETA 05



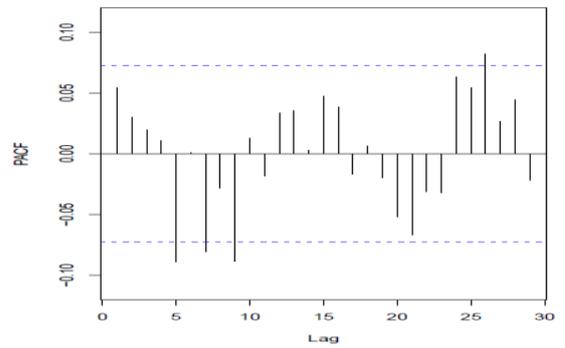
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 05



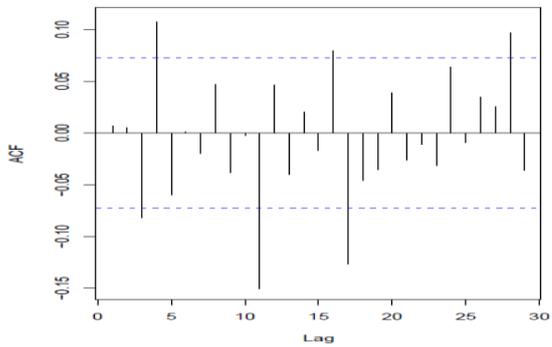
Função autocorrelação resCloro – ETA 06



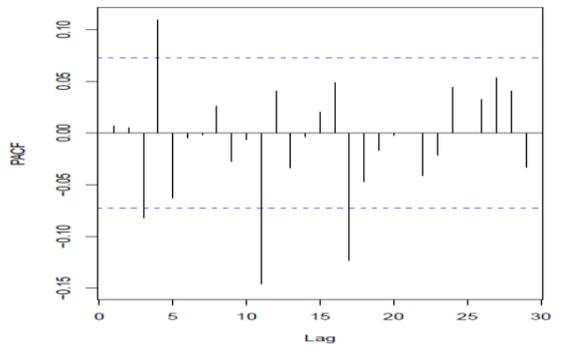
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 06



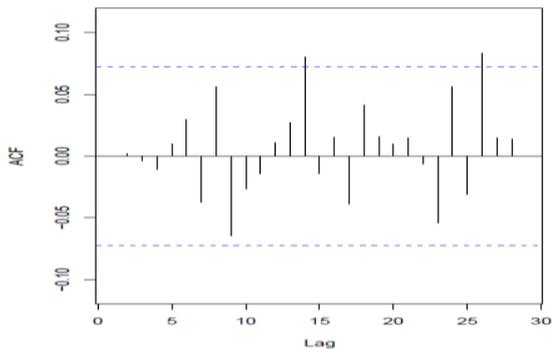
Função autocorrelação resCloro – ETA 07



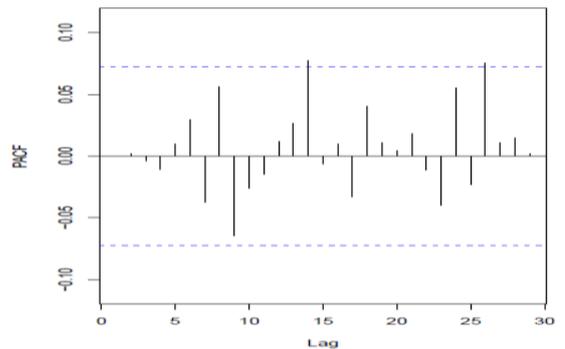
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 07



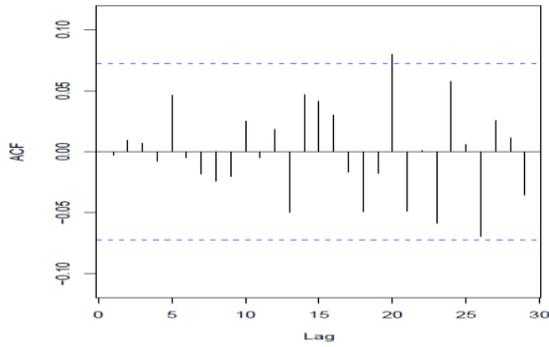
Função autocorrelação resCloro – ETA 08



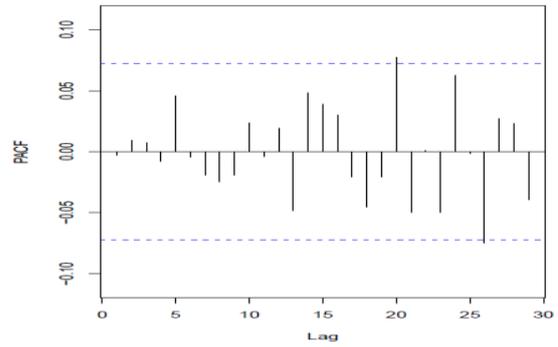
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 08



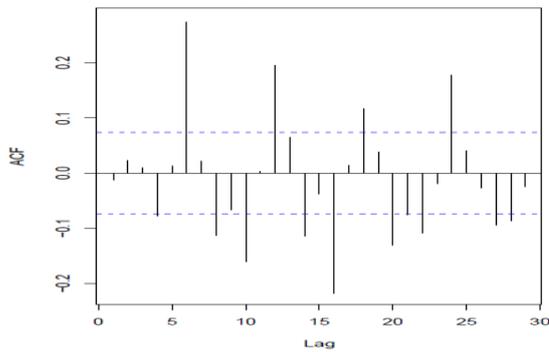
Função autocorrelação resCloro – ETA 09



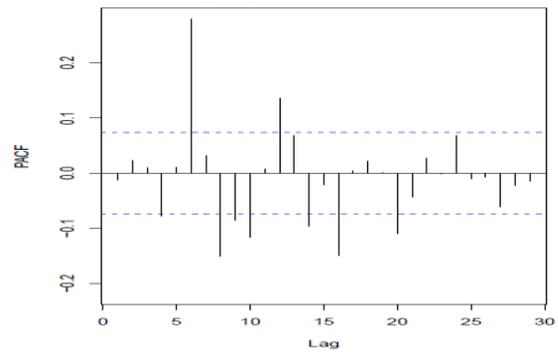
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 09



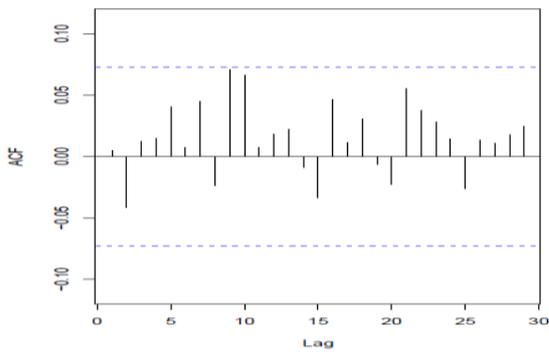
Função autocorrelação resCloro – ETA 10



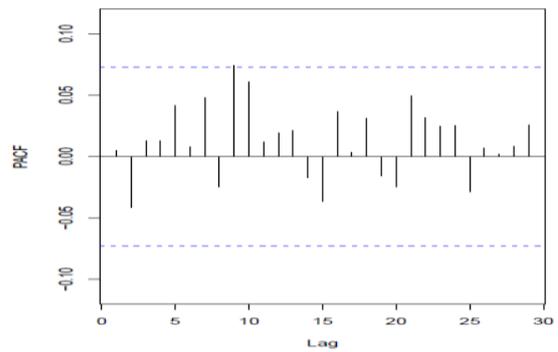
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 10



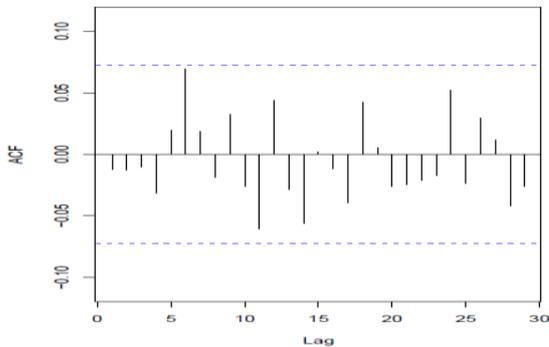
Função autocorrelação resCloro – ETA 11



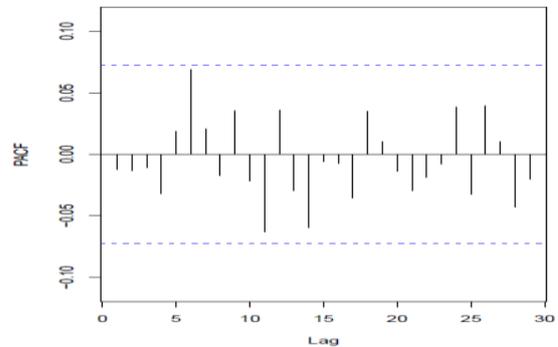
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 11



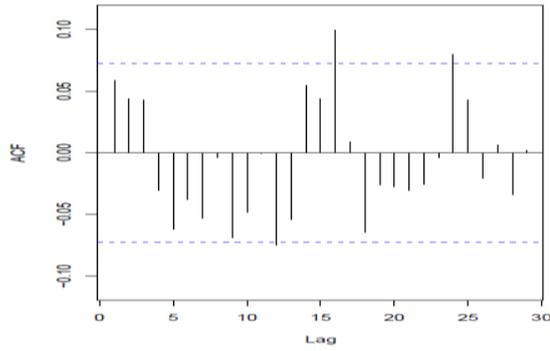
Função autocorrelação resCloro – ETA 12



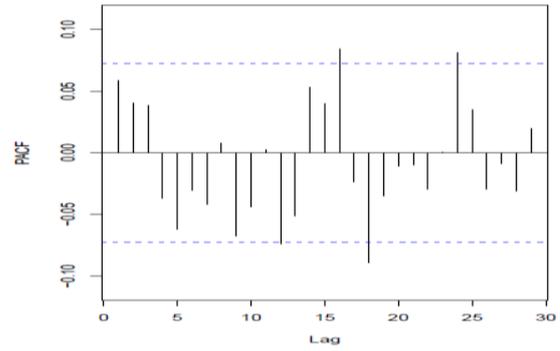
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 12



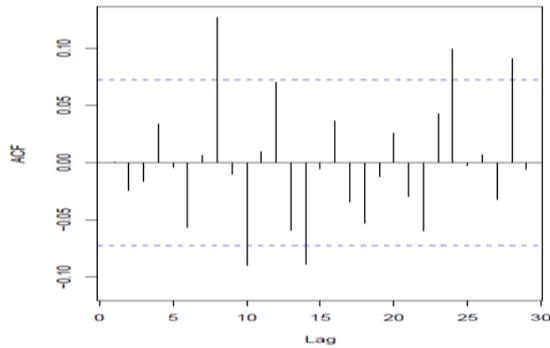
Função autocorrelação resCloro – ETA 13



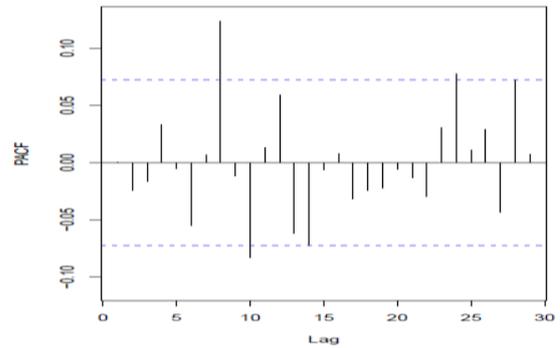
Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 13



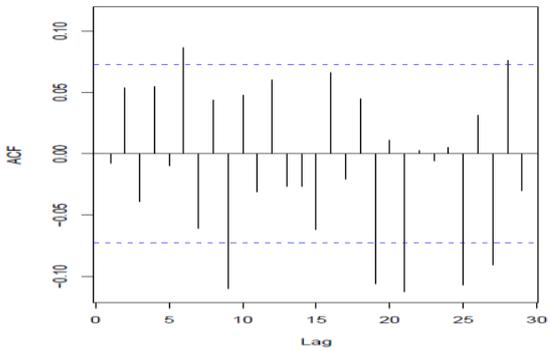
Função autocorrelação resCloro – ETA 14



Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 14



Função autocorrelação resCloro – ETA 15



Função autocorrelação parcial resCloro – ETA 15

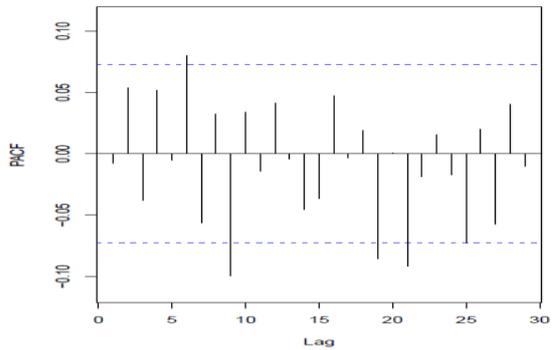
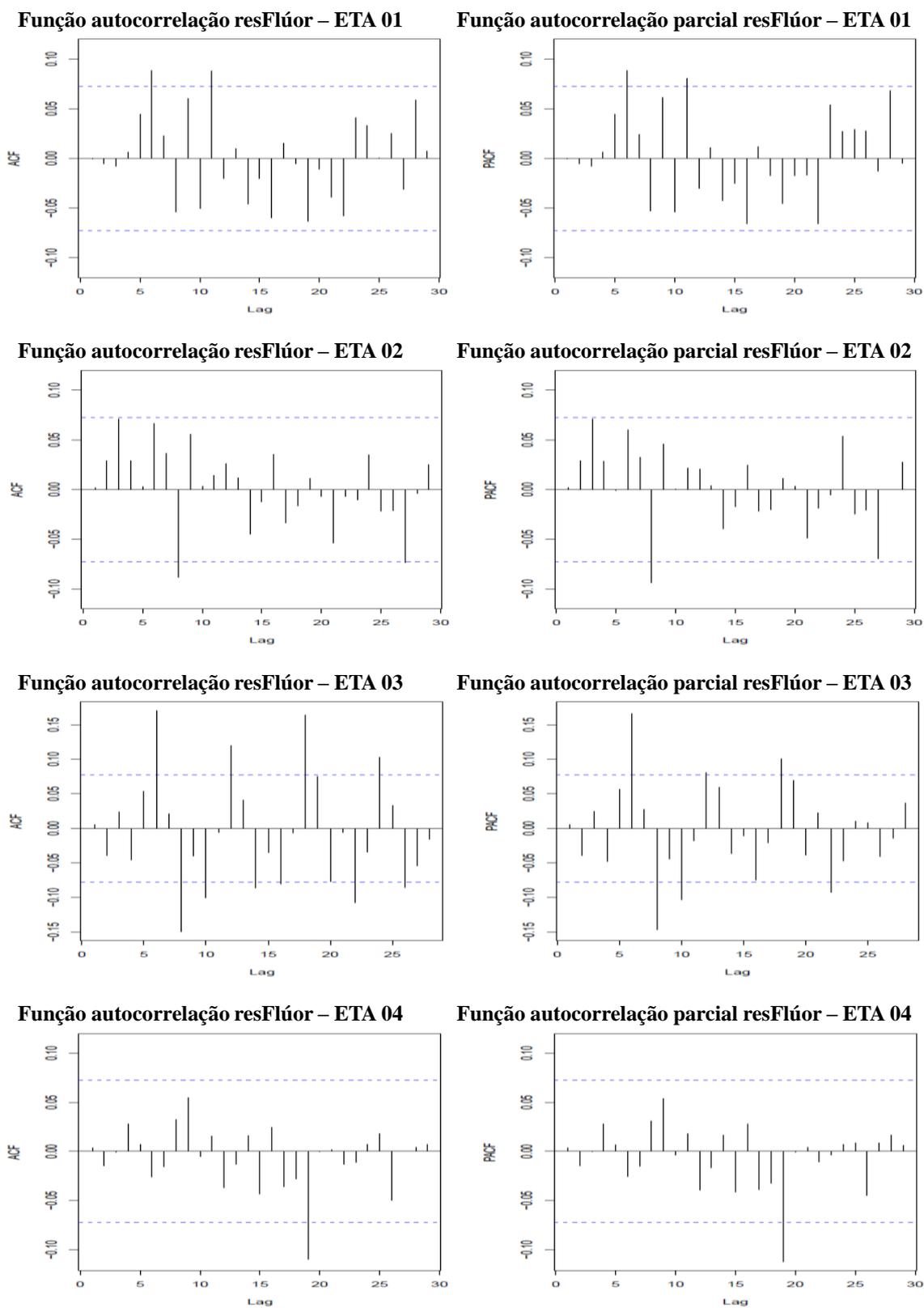
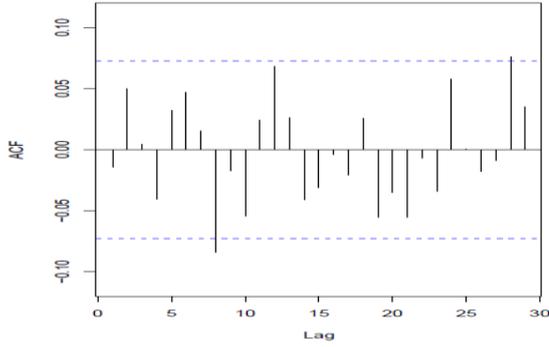


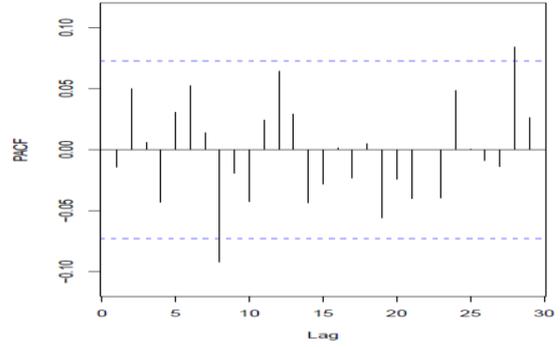
Figura V.3 – Funções de autocorrelação e autocorrelação parciais aplicadas ao parâmetro cloro das ETAs



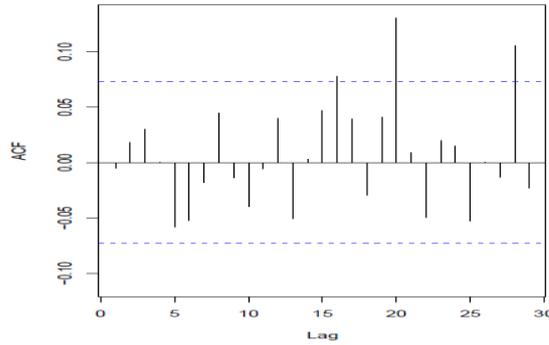
Função autocorrelação resFlúor – ETA 05



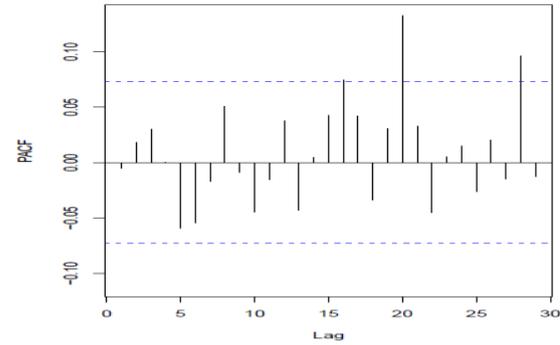
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 05



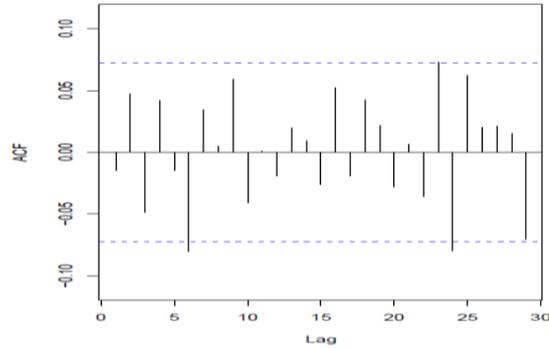
Função autocorrelação resFlúor – ETA 06



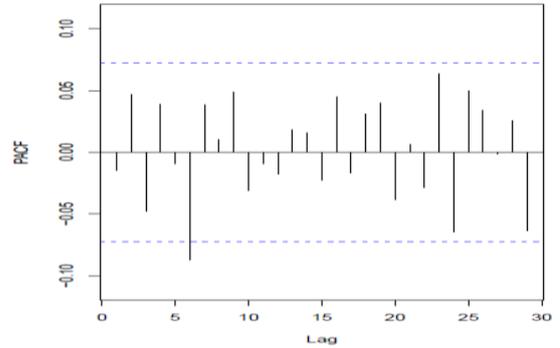
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 06



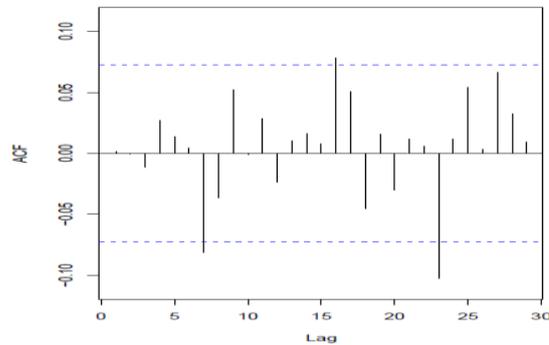
Função autocorrelação resFlúor – ETA 07



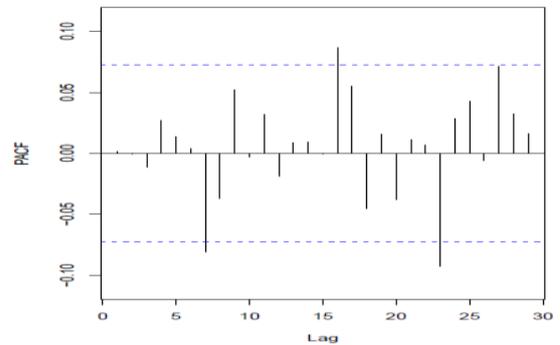
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 07



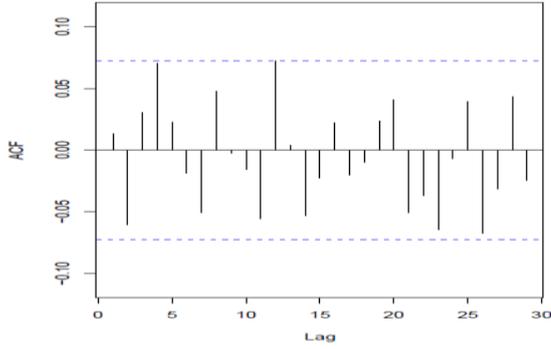
Função autocorrelação resFlúor – ETA 08



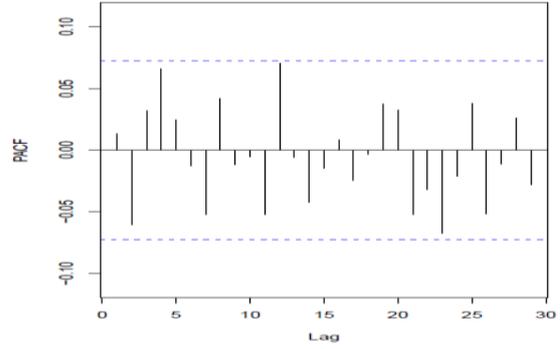
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 08



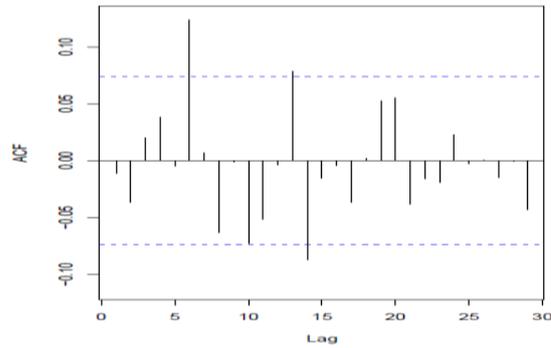
Função autocorrelação resFlúor – ETA 09



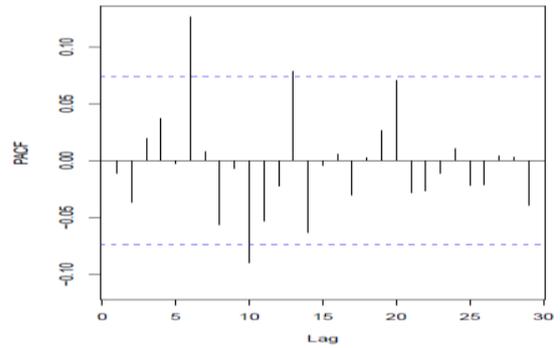
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 09



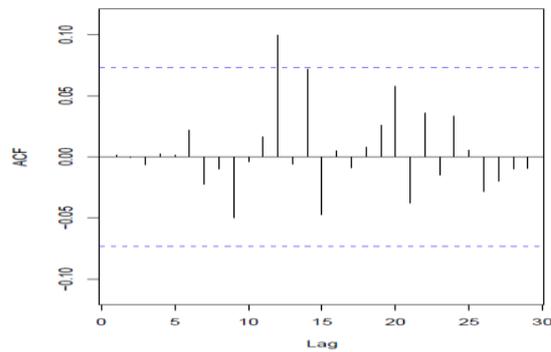
Função autocorrelação resFlúor – ETA 10



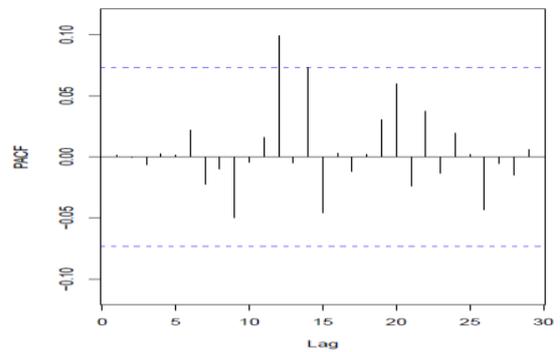
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 10



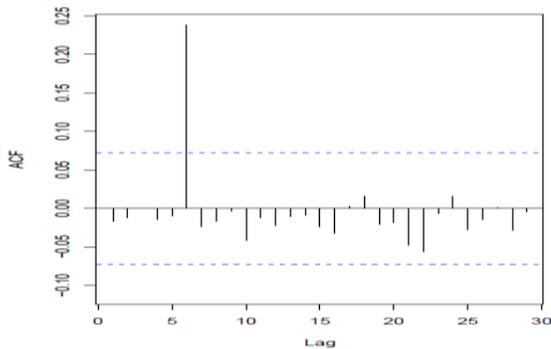
Função autocorrelação resFlúor – ETA 11



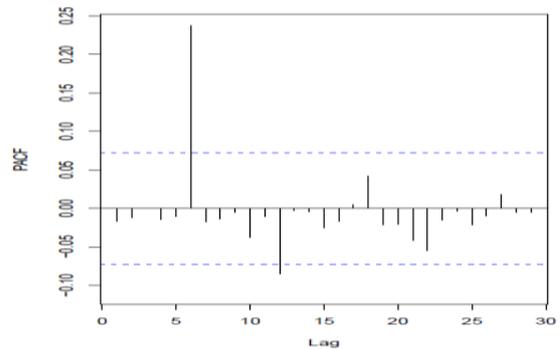
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 11



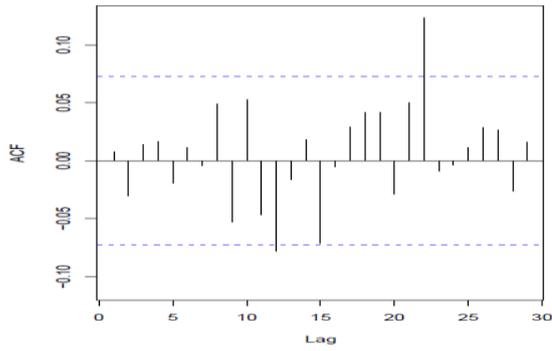
Função autocorrelação resFlúor – ETA 12



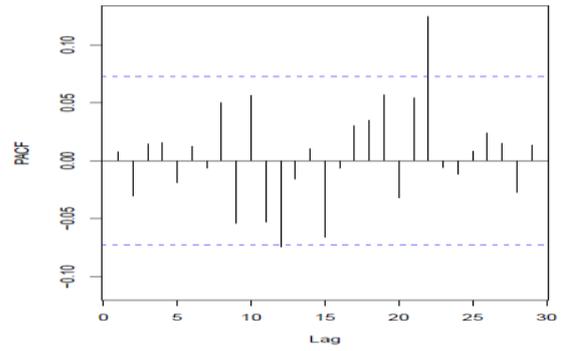
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 12



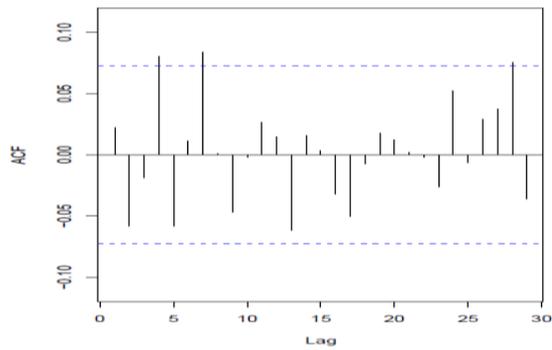
Função autocorrelação resFlúor – ETA 13



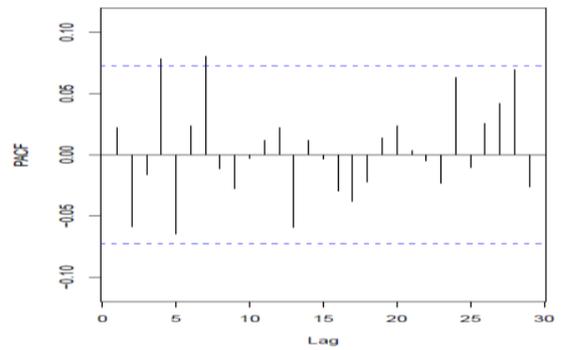
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 13



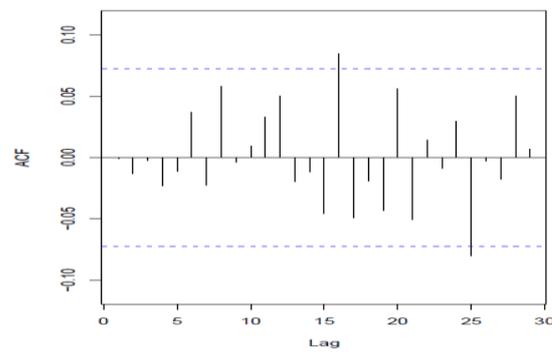
Função autocorrelação resFlúor – ETA 14



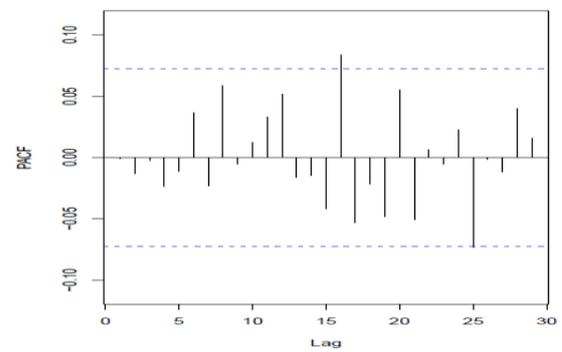
Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 14



Função autocorrelação resFlúor – ETA 15



Função autocorrelação parcial resFlúor – ETA 15



APÊNDICE VI

Tabela VI.1 – Resultados do teste de Box-Pierce para cada ETA com o objetivo de verificar a independência da série de dados

Nome da estação	“resTurbidez”			“resCloro”			“resFlúor”		
	Qui-Quadrado	p-valor	Série independente?	Qui-Quadrado	p-valor	Série independente?	Qui-Quadrado	p-valor	Série independente?
ETA 01	7,28E-04	0,98	Sim	1,37E-01	0,71	Sim	3,04E-04	0,99	Sim
ETA 02	1,33E-01	0,72	Sim	1,11E-03	0,97	Sim	2,88E-03	0,96	Sim
ETA 03	9,89E-04	0,97	Sim	4,99E-03	0,94	Sim	1,67E-02	0,90	Sim
ETA 04	1,92E-01	0,66	Sim	1,76E-01	1,00	Sim	1,07E-02	0,92	Sim
ETA 05	3,84E-03	0,95	Sim	1,83E-02	0,89	Sim	1,50E-01	0,70	Sim
ETA 06	3,59E-01	0,55	Sim	2,13E+00	0,14	Sim	1,81E-02	0,89	Sim
ETA 07	5,69E-02	0,81	Sim	3,28E-02	0,86	Sim	1,54E-01	0,69	Sim
ETA 08	3,31E-03	0,95	Sim	1,79E-05	1,00	Sim	1,22E-03	0,97	Sim
ETA 09	2,26	0,13	Sim	7,37E-03	0,93	Sim	1,31E-01	0,72	Sim
ETA 10	3,56E-02	0,85	Sim	9,94E-02	0,75	Sim	9,20E-02	0,76	Sim
ETA 11	1,72E-02	0,90	Sim	1,84E-02	0,89	Sim	1,84E-03	0,97	Sim
ETA 12	1,65E-02	0,90	Sim	1,09E-01	0,74	Sim	2,17E-01	0,64	Sim
ETA 13	7,46E-02	0,78	Sim	2,50E+00	0,11	Sim	4,48E-02	0,83	Sim
ETA 14	1,03E-02	0,92	Sim	2,49E-04	0,99	Sim	3,63E-01	0,55	Sim
ETA 15	1,64E-01	0,69	Sim	4,46E-02	0,83	Sim	4,41E-04	0,98	Sim