



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**KLYCIA TELES SIEBRA**

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA  
PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE FIAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2018**

KLYCIA TELES SIEBRA

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA  
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE FIAÇÃO

Monografia do Trabalho Final de Curso de Engenharia Química, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheira Química.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S573a Siebra, Klycia Teles.  
Análise de confiabilidade e otimização do tratamento de água para sistemas de refrigeração de uma indústria de fiação / Klycia Teles Siebra. – 2018.  
66 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. André Bezerra dos Santos.
1. Tratamento de Água Industrial. 2. Refrigeração. 3. Indústria de Fiação. I. Título.

CDD 660

---

KLYCIA TELES SIEBRA

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA  
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE FIAÇÃO

Monografia do Trabalho Final de Curso de Engenharia Química, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheira Química.

Aprovada em: 15/06/2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. André Bezerra dos Santos (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcos Erick Rodrigues da Silva  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dra. Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por sempre me dar forças para continuar e nunca me desamparar.

Aos meus pais, Siebra e Railena, pelo apoio, suporte e participação em toda a minha educação.

As minhas irmãs, Mariana, Priscila e Janaina, e a minha prima, Luma, por estarem sempre me auxiliando e me incentivando.

Ao meu namorado, Germano, por toda a paciência e por acreditar na minha capacidade.

Aos amigos, em especial o Ednaldo, pela amizade ao longo da vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. André Bezerra dos Santos, por ter aceitado ser meu orientador e por ter me orientado no trabalho, sendo muito prestativo.

Aos professores participantes da banca examinadora Marcos Erick Rodrigues da Silva e Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A indústria têxtil, por ter disponibilizado os dados para a realização do trabalho.

A Jéssica Cobra, ao Daniel Bastos, ao João Tiago e ao Francisco Antônio, pelo apoio técnico necessário ao longo do trabalho.

“A persistência é o caminho do êxito.” (Charles Chaplin)

## RESUMO

A indústria têxtil, possui um elevado consumo de água devido aos diversos usos dentro da fábrica. Como o custo com água tratada é alto, muitas indústrias possuem estações de tratamento de água para minimizar o custo. No processo produtivo da fiação é necessário um controle de temperatura e umidade relativa, pois o fio precisa disso para não quebrar. Como há uma geração de calor elevada devido às máquinas de produção, é preciso que seja feita a refrigeração da fábrica. Essa refrigeração é feita principalmente com a água, porém ela oferece riscos às estruturas e aos equipamentos, como corrosão e incrustação. Por isso, a importância do tratamento de água industrial em sistema de refrigeração. A água de refrigeração precisa atingir um padrão de qualidade para não ocasionar riscos aos equipamentos. O presente trabalho teve como objetivo geral realizar uma análise de confiabilidade do tratamento de água para sistema de refrigeração de uma indústria têxtil de fiação. O trabalho contou com os seguintes objetivos específicos: calcular a concentração média de projeto dos parâmetros analisados para cumprimento do padrão de qualidade com base em um percentual de confiabilidade adotado; analisar o grau de atendimento ao padrão de qualidade estabelecido; e sugerir melhorias ao tratamento de água para refrigeração. Foram analisados a partir do histórico de monitoramento da indústria, amostras de água coletadas no Tanque de Resfriamento e Tanque de Armazenamento. Os parâmetros de monitoramento foram pH, condutividade, STD, turbidez, cloro livre, alcalinidade, cloretos e fosfato. Foi feita uma análise dos dados por meio da estatística descritiva, sendo gerados gráficos do tipo Box-plot para cada parâmetro, e realizada uma análise de confiabilidade, assumindo-se 95% de confiabilidade. Além disso, foram feitos cálculos para encontrar a concentração média de cada parâmetro para que o tratamento seja 95% confiável. A análise mostrou que o tratamento é confiável para cinco parâmetros, porém para outros parâmetros o tratamento ficou abaixo de 50% de confiabilidade. Nesses parâmetros em que o tratamento não foi confiável, foram feitas otimizações nas dosagens de cloro e ácido e foi sugerida uma melhoria para evitar problemas operacionais, como a purga contínua. Com isso, acredita-se que com um acompanhamento nessas melhorias e atingindo as concentrações médias calculadas, a confiabilidade dos parâmetros atingirá apenas 5% de falha.

**Palavras-chave:** Tratamento de Água Industrial. Refrigeração. Indústria de Fiação.

## ABSTRACT

The textile industry, has a high consumption of water due to the diverse uses inside the factory. As the cost of treated water is high, many industries have water treatment plants to minimize the cost. In the production process of the spinning it is necessary a control of temperature and relative humidity, because the wire needs of this so as not to break. As there is a high heat generation due to the production machines, it is necessary to make the factory refrigeration. This cooling is mainly done with water, but it offers risks to structures and equipment, such as corrosion and incrustation. Therefore, the importance of industrial water treatment in refrigeration system. Cooling water needs to meet a quality standard so as not to cause hazards to equipment. This study aimed to perform a reliability analysis of the water treatment for refrigeration system of a textile spinning industry. The study had the following specific objectives: to calculate the average design concentration of the analyzed parameters to fulfill the quality standard based on a percentage of reliability adopted; analyze the degree of compliance with the established quality standard; and suggest improvements to the treatment of water for refrigeration. From the monitoring history of the industry, samples off water collected in the Cooling Tank and Storage Tank were analyzed. The monitoring parameters were pH, conductivity, STD, turbidity, free chlorine, alkalinity, chlorides and phosphate. Data were analyzed through descriptive statistics, with Box-plot type graphs generated for each parameter, and a reliability analysis was performed, assuming a 95% reliability. In addition, calculations were made to find the mean concentration of each parameter so that the treatment is 95% reliable. The analysis showed that the treatment is reliable for five parameters, but for other parameters the treatment was below 50% of reliability. In those parameters where the treatment was not reliable, optimizations were made for chlorine and acid dosages and an improvement was suggested to avoid operational problems such as continuous purging. With this, it is believed that with a follow-up on these improvements and reaching the calculated average concentrations, the reliability of the parameters will reach only 5% of failure.

**Keywords:** Industrial Water Treatment. Refrigeration. Spinning Industry.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da água no planeta .....	16
Figura 2 – Fabricação do fio em uma indústria têxtil .....	17
Figura 3 – Disperso Misturador .....	19
Figura 4 – Esquema de floccodecantador com remoção hidráulica de lodo .....	21
Figura 5 – Esquema de filtro de escoamento ascendente .....	22
Figura 6 – Fluxograma do Processo de Água Industrial .....	23
Figura 7 – Torre de Resfriamento e Chiller .....	27
Figura 8 – Corrosão e incrustação em trocador de calor .....	28
Figura 9 – Vista aérea da empresa em que foi realizado o estudo .....	32
Figura 10 – Fluxograma do Tratamento de Água na ETA .....	34
Figura 11 – Fluxograma do Sistema de Refrigeração .....	35
Figura 12 – Etapas para determinação do CDC e das concentrações de projeto .....	38
Figura 13 – Etapas para determinação do percentual esperado de atendimento aos padrões de qualidade .....	39
Figura 14 – Box-plot da quantidade de dados analisados – Torre de Resfriamento .....	41
Figura 15 – Box-plot da quantidade de dados analisados – Tanque de Armazenamento ....	41
Figura 16 – Box-plot do parâmetro pH – Torre de Resfriamento .....	43
Figura 17 – Frequência acumulada do pH – Torre de Resfriamento .....	43
Figura 18 – Box-plot do parâmetro pH – Tanque de Armazenamento .....	44
Figura 19 – Frequência acumulada do pH – Tanque de Armazenamento .....	44
Figura 20 – Box-plot do parâmetro condutividade – Torre de Resfriamento .....	45
Figura 21 – Frequência acumulada da condutividade – Torre de Resfriamento .....	45

Figura 22 – Box-plot do parâmetro condutividade – Tanque de Armazenamento .....	46
Figura 23 – Frequência acumulada da condutividade – Tanque de Armazenamento .....	46
Figura 24 – Box-plot do parâmetro STD – Torre de Resfriamento .....	47
Figura 25 – Frequência acumulada de STD – Torre de Resfriamento .....	47
Figura 26 – Box-plot do parâmetro STD – Tanque de Armazenamento .....	48
Figura 27 – Frequência acumulada de STD – Tanque de Armazenamento .....	48
Figura 28 – Box-plot do parâmetro turbidez – Torre de Resfriamento .....	49
Figura 29 – Frequência acumulada da turbidez – Torre de Resfriamento .....	49
Figura 30 – Box-plot do parâmetro turbidez – Tanque de Armazenamento .....	50
Figura 31 – Frequência acumulada da turbidez – Tanque de Armazenamento .....	50
Figura 32 – Box-plot do parâmetro cloro livre – Torre de Resfriamento .....	51
Figura 33 – Frequência acumulada de cloro livre – Torre de Resfriamento .....	51
Figura 34 – Box-plot do parâmetro cloro livre – Tanque de Armazenamento .....	52
Figura 35 – Frequência acumulada de cloro livre – Tanque de Armazenamento .....	52
Figura 36 – Box-plot do parâmetro alcalinidade – Torre de Resfriamento .....	53
Figura 37 – Frequência acumulada de alcalinidade – Torre de Resfriamento .....	53
Figura 38 – Box-plot do parâmetro alcalinidade – Tanque de Armazenamento .....	54
Figura 39 – Frequência acumulada de alcalinidade – Tanque de Armazenamento .....	54
Figura 40 – Box-plot do parâmetro cloretos – Torre de Resfriamento .....	55
Figura 41 – Frequência acumulada de cloretos – Torre de Resfriamento .....	55
Figura 42 – Box-plot do parâmetro cloretos – Tanque de Armazenamento .....	56
Figura 43 – Frequência acumulada de cloretos – Tanque de Armazenamento .....	56
Figura 44 – Box-plot do parâmetro fosfato – Torre de Resfriamento .....	57
Figura 45 – Frequência acumulada de fosfato – Torre de Resfriamento .....	57

Figura 46 – Box-plot do parâmetro fosfato – Tanque de Armazenamento .....	58
Figura 47 – Frequência acumulada de fosfato – Tanque de Armazenamento .....	58
Figura 48 – Box-plot do parâmetro sílica – Torre de Resfriamento .....	59
Figura 49 – Frequência acumulada de sílica – Torre de Resfriamento .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de parâmetros para a água proveniente da torre de resfriamento usada no chiller .....	27
Tabela 2 – Limites de parâmetros para a água proveniente do tanque de armazenamento usada no chiller .....	28
Tabela 3 – Variável normal padronizada para vários níveis de confiabilidade .....	37
Tabela 4 – Estatística descritiva do número de dados – Torre de Resfriamento .....	40
Tabela 5 – Estatística descritiva do número de dados – Tanque de Armazenamento ...	40
Tabela 6 – Cálculo das concentrações de projeto para 95% de confiabilidade – Torre de Resfriamento .....	60
Tabela 7 – Cálculo das concentrações de projeto para 95% de confiabilidade – Tanque de Armazenamento .....	60
Tabela 8 – Cálculo do percentual atendido ao padrão de qualidade – Torre de Resfriamento .....	61
Tabela 9 – Cálculo do percentual atendido ao padrão de qualidade – Tanque de Armazenamento .....	62

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ANA	Agência Nacional de Águas
CDC	Coefficiente de Confiabilidade
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CV	Coefficiente de Variação
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
SAVEH	Sistema de Auto avaliação de Eficiência Hídrica
STD	Sólidos Totais Dissolvidos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1 Justificativa</b> .....	14
<b>1.2 Objetivo Geral</b> .....	15
<b>1.3 Objetivos Específicos</b> .....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>2.1 Água</b> .....	16
<b>2.2 Demanda de Água na Indústria Têxtil</b> .....	17
<b>2.3 Tratamento de Água Industrial</b> .....	18
<b>2.3.1 Pré-cloração</b> .....	18
<b>2.3.2 Coagulação</b> .....	18
<b>2.3.3 Floculação</b> .....	19
<b>2.3.4 Decantação</b> .....	20
<b>2.3.5 Filtração</b> .....	21
<b>2.3.6 Desinfecção</b> .....	22
<b>2.4 Refrigeração</b> .....	22
<b>2.5 Qualidade da Água em Diferentes Usos</b> .....	24
<b>2.5.1 Usos da Água</b> .....	24
<b>2.5.2 Parâmetros de Qualidade da Água</b> .....	24
<b>2.5.2.1 Parâmetros Físicos</b> .....	24
<b>2.5.2.2 Parâmetros Químicos</b> .....	24
<b>2.5.3 Padrões de Qualidade da Água Industrial</b> .....	26
<b>2.6 Análise de Confiabilidade</b> .....	28
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	32

3.1 Área de Estudo .....	32
3.2 Procedimento Geral .....	32
3.3 Tratamento de Água na Empresa .....	32
3.4 Remoção de Outliers .....	36
3.5 Estatística Descritiva do Número de Dados .....	36
3.6 Atendimento aos Limites Padrões de Qualidade da Água .....	36
3.7 Cálculo da Confiabilidade do Tratamento de Água .....	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
4.1 Estatística Descritiva do Número de Dados .....	40
4.2 Atendimento aos Limites Padrões de Qualidade da Água .....	42
4.2.1 pH .....	42
4.2.2 Condutividade .....	44
4.2.3 STD .....	46
4.2.4 Turbidez .....	48
4.2.5 Cloro Livre .....	50
4.2.6 Alcalinidade .....	52
4.2.7 Cloretos .....	54
4.2.8. Fosfato .....	56
4.2.9 Sílica .....	58
4.3 Cálculo das Concentrações de Projeto .....	59
4.4 Cálculo do Percentual de Atendimento aos Padrões de Qualidade .....	61
4.5 Otimização do Tratamento de Água .....	62
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Justificativa

A indústria, principalmente a indústria têxtil, tem um elevado consumo de água devido aos diversos usos dentro da fábrica. Com isso, muitas indústrias possuem estações de tratamento de água (ETA) para tratarem a água bruta para os fins desejados, pois o custo com água tratada é muito alto. Da água consumida pelas indústrias, quinze por cento é gasto pela indústria têxtil. A Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção, Abit, divulgou em março de 2014 que o setor têxtil reduziu o consumo de água nos últimos dez anos. Antes eram necessários 100 L de água por kg de tecido produzido. Após a redução, são necessários 10 L de água. Essa redução ocorreu devido à modernização da fábrica e do reúso de água na indústria.

A água pode ser tratada para ser utilizada como matéria prima, para consumo humano, para refrigeração, para caldeiras, para o processo produtivo, para fins sanitários etc. Para cada tipo de água, há os requisitos de qualidade exigidos por normas, portarias ou padrões internos das empresas.

Na indústria de fiação têxtil, no processo produtivo é necessário um controle de umidade e de temperatura da fábrica para que o fio não quebre, como há uma geração de calor elevada devido ao funcionamento das máquinas de produção é preciso que seja feita a refrigeração da fábrica.

No sistema de refrigeração a água é de fundamental importância para o processo, porém ela oferece riscos às estruturas e equipamentos, como corrosão e incrustação. A água proveniente do tratamento da ETA é própria para o consumo humano e alguns fins industriais, porém ela não possui os parâmetros físico-químicos adequados para uso em máquinas. Assim, além do tratamento convencional, é feito um tratamento com adição de produtos químicos anticorrosivos e biocidas.

Diariamente são feitas análises físico-químicas da água na saída dos chillers. Com isso, é possível verificar se os parâmetros estão de acordo com o manual de controle de qualidade da água.

A confiabilidade é a probabilidade de obter um desempenho satisfatório, sob determinadas condições, por um período de tempo específico. Em uma estação de tratamento de água, a confiabilidade pode ser dada pela porcentagem de tempo em que se obtém as concentrações desejadas da água para cumprir os padrões de qualidade estabelecidos do



tratamento. Desse modo, a ETA será confiável se não houver violação dos limites de padrões estabelecidos.

Assim, o termo está relacionado aos aspectos de falhas nos equipamentos e aos aspectos inerentes ao processo de tratamento, buscando-se avaliar o grau de confiabilidade que foi alcançado pelos sistemas, definindo o limite ou padrão que pode ser alcançado em cada processo (VON SPERLING; PINTO; OLIVEIRA 2009).

Entretanto, a probabilidade de falha é extremamente sensível à função de distribuição da concentração efluente. Conhecida esta distribuição, uma expressão pode ser utilizada para definir a fração do tempo em que uma dada concentração foi excedida no passado e, desta forma, prever o comportamento futuro de uma ETA, desde que as variáveis do processo continuem as mesmas. Diversas análises de variáveis efluentes de ETEs têm mostrado que, para a maioria dos processos, grande parte dos constituintes pode ser modelada pela distribuição lognormal (OLIVEIRA; VON SPERLING 2007).

A aplicabilidade da confiabilidade é mais comum em estações de tratamento de esgotos (ETE), determinando a confiabilidade dos lançamentos dos efluentes, de acordo com padrões estabelecidos por normas. Portanto, esse trabalho é um precursor na confiabilidade do tratamento de água industriais para atingir padrões de qualidade interno.

## **1.2. Objetivo Geral**

Realizar uma análise de confiabilidade do tratamento de água para sistema de refrigeração de uma indústria têxtil de fiação.

## **1.3. Objetivos Específicos**

Calcular a concentração média de projeto dos parâmetros analisados para cumprimento do padrão de qualidade com base em um percentual de confiabilidade adotado.

Analisar o grau de atendimento ao padrão de qualidade.

Sugerir melhorias ao tratamento de água para refrigeração.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Água

De acordo com a Saveh (Sistema de Autoavaliação da Eficiência Hídrica), a água ocupa aproximadamente 70% do planeta Terra. Porém, menos de 3% da água disponível no planeta é doce e somente 0,5% dessa água está em aquíferos subterrâneos, o que dificulta o acesso humano. Apenas 0,04% da água está disponível na superfície em rios, lagos, mangues, etc. (Figura 1).

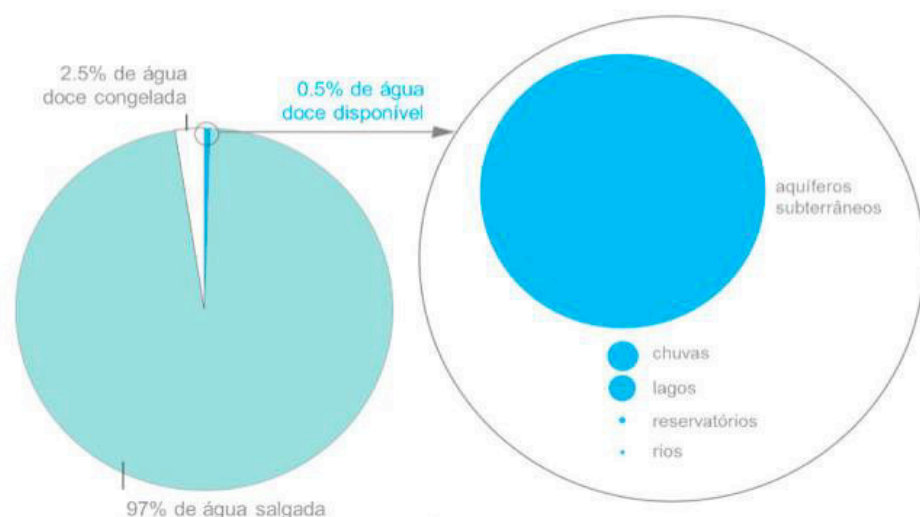


Figura 1 – Distribuição da água no planeta  
Fonte: UN Water, 2006.

No mundo, cerca de 70% da água doce é utilizada na agricultura, a indústria consome cerca de 22% e o uso doméstico cerca de 8%. No Brasil, de acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA), em média anual, o consumo da água é dividido em 67,2% para irrigação, 11,1% para abastecimento animal, 9,5% para indústria, 8,8% para abastecimento urbano, 2,4% para abastecimento rural, 0,8% para mineração e 0,2% para termelétricas.

Na indústria, a água é um insumo fundamental que pode ser utilizada como matéria prima, em sistemas de refrigeração e de aquecimento, como fonte de energia em forma de vapor, para limpeza de áreas, fins sanitários e consumo humano, entre outros.

Portanto, a escassez de água representa uma série de riscos como disponibilidade de matéria prima, prejuízos por pausa em linhas de produção, maior custo com tratamento de água, entre outros.

Desse modo, é de interesse industrial evitar a escassez da água reduzindo o consumo desse bem natural e a adoção de medidas de reúso interno da água. No caso de tratamento para reúso em refrigeração, deve-se produzir água capaz de evitar corrosão, incrustação e crescimento de microrganismos.

## 2.2. Demanda de Água na Indústria Têxtil

Da água consumida pelas indústrias, quinze por cento é gasto pela indústria têxtil. A Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confeção, Abit, divulgou em março de 2014 que o setor têxtil reduziu o consumo de água nos últimos dez anos. Antes eram necessários 100 L de água por kg de tecido produzido. Após a redução, são necessários 10 L de água. Essa redução ocorreu devido à modernização da fábrica e do reúso de água na indústria.

As etapas do processo têxtil são: fiação, tecelagem, beneficiamento e confecção, sendo as etapas de beneficiamento e tingimento de tecidos diretamente ligadas ao alto consumo de água.

Na indústria de fiação, o fio precisa ter um teor de umidade para atingir a qualidade desejada para então seguir para a etapa de tecelagem. Como no processo fabril há muitas máquinas e colaboradores que geram calor, retirando a umidade do fio, a água industrial é, principalmente, consumida para o resfriamento dos galpões da fábrica. Além disso, ela é utilizada para consumo humano, fins sanitários, irrigação, entre outros.

Na Figura 2, observa-se uma das etapas da produção do fio.



Figura 2 – Fabricação do fio em uma indústria têxtil  
Fonte: Empresa em que foi feito o estudo, 2018.

## **2.3. Tratamento de Água Industrial**

Em um tratamento convencional de água industrial há usualmente as seguintes etapas: pré-cloração, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

Primeiramente a água bruta é captada de represas, por companhias de água, e enviada para as estações de tratamento de água das empresas, onde acontece o tratamento convencional.

### **2.3.1. Pré-cloração**

Quando a água chega à ETA, adiciona-se cloro com o objetivo de eliminar a matéria orgânica responsável pelo odor e sabor da água e remover metais que estão dissolvidos na água bruta, como Ferro e Manganês.

### **2.3.2. Coagulação**

A água possui impurezas como partículas suspensas e coloidais. Essas impurezas possuem carga superficial negativa, impedindo que elas se aproximem. Portanto, para que as impurezas sejam removidas, é preciso alterar as suas características por meio da coagulação.

De acordo com DI BERNARDO (2005), a coagulação resulta de dois fenômenos. O primeiro, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva. O segundo, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que sejam adsorvidas pelas impurezas.

Com isso, o coagulante é disperso, em mistura rápida, e reage quimicamente com as impurezas deixando-as desestabilizadas na água e com cargas elétricas neutralizadas. Assim, elas se tornam um aglomerado e são facilmente removidas nas etapas seguintes do tratamento.

Os coagulantes comumente utilizados são o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, o sulfato ferroso clorado, o sulfato férrico e o hidróxi-cloreto de alumínio. A escolha do coagulante depende das características da água bruta.

A mistura rápida pode ser por meio da agitação mecânica ou hidráulica. Para mistura mecanizada são empregados agitadores de turbina ou hélices e para a mistura hidráulica utilizam vertedores retangulares ou triangulares.

Na figura 3, tem-se a foto do equipamento em que é feita a coagulação química.



Figura 3 – Disperso Misturador  
Fonte: Arquivo pessoal do autor, 2018.

O desempenho dessa etapa é de suma importância, pois se for deficiente, as impurezas não serão retidas nos meios granulares da filtração, prejudicando o tratamento.

### 2.3.3. Floculação

Nessa etapa, adiciona-se um polímero, em um processo lento de mistura, com o objetivo de aglomerar as partículas formadas na coagulação e formar flocos maiores e pesados. Além disso, de acordo com HELLER e PÁDUA (2006), o emprego do polímero possui vantagens, tais como aumentar a duração da carreira de filtração, reduzir gastos com produtos químicos, diminuir o volume de lodo gerado e aumentar a eficiência de remoção de cor, turbidez ou carbono orgânico total da água.

Os sistemas de floculação podem ser mecanizados ou hidráulicos. Para DI BERNARDO (2005), a escolha do sistema está condicionada a diversos fatores como a qualidade da água, ao mecanismo de coagulação, ao regime de funcionamento etc.

Segundo Libânio (2010), sempre que a tecnologia de tratamento envolver o processo de coagulação, a floculação ocorre mesmo na ausência de uma unidade específica para tal finalidade. Com isso, há unidades conjuntas de floculação e decantação, exigindo um funcionamento contínuo da estação com vazão constante.

Os sistemas hidráulicos possuem vantagens como menores custos de implantação, operação e manutenção e não exigir pessoal qualificado para operação e manutenção. No

entanto, possuem desvantagens como pouca flexibilidade para a variação da vazão e perda de carga elevada.

#### **2.3.4. Decantação**

Na decantação, os flocos gerados na etapa anterior são, então, separados da água por meio da ação da gravidade. Com isso, forma-se uma camada densa no fundo do recipiente. O objetivo dessa etapa é clarificar a água e diminuir a quantidade de partículas na filtração, por meio da separação das fases líquida e sólida.

A ineficácia da decantação pode ocorrer devido a erros operacionais nas etapas de coagulação e floculação ou devido à baixa concentração de partículas na água bruta, prejudicando a coagulação.

Uma das principais fontes de geração de resíduo em ETAs é o processo de decantação. Os resíduos gerados contêm água e sólidos suspensos da água bruta, adicionado de produtos químicos dosados durante o tratamento (LIBÂNIO, 2010).

A decantação pode ocorrer por meio de três variantes: decantadores de escoamento horizontal, decantadores de alta taxa e flocodecantadores (LIBÂNIO, 2010).

Os decantadores convencionais consistem em grandes tanques retangulares com escoamento horizontal, constituindo de canal de distribuição de água floculada, comportas de entrada, cortina de distribuição de água, calhas de coleta de água decantada, canal geral de água decantada e canaleta central de extração de lodo (DI BERNARDO, 2005).

Há também decantadores convencionais de escoamento ascendente em que acontece a floculação e a decantação no mesmo equipamento. Segundo DI BERNARDO (2005), o emprego do flocodecantador tem sido recomendado somente quando o escoamento é contínuo e não ocorrem variações significativas da vazão e da qualidade da água bruta. Além disso, os flocodecantadores podem ser hidráulicos ou mecânicos, com ou sem recirculação de lodo, com e sem controle da altura de lodo através de vertedor.

Os decantadores de alta taxa foram feitos com o objetivo de aumentar a taxa de escoamento superficial, introduzindo lajes intermediárias, paralelas ao escoamento e ao fundo, nos decantadores convencionais (DI BERNARDO, 2005).

Na figura 4, observa-se como é o funcionamento de um flocodecantador.

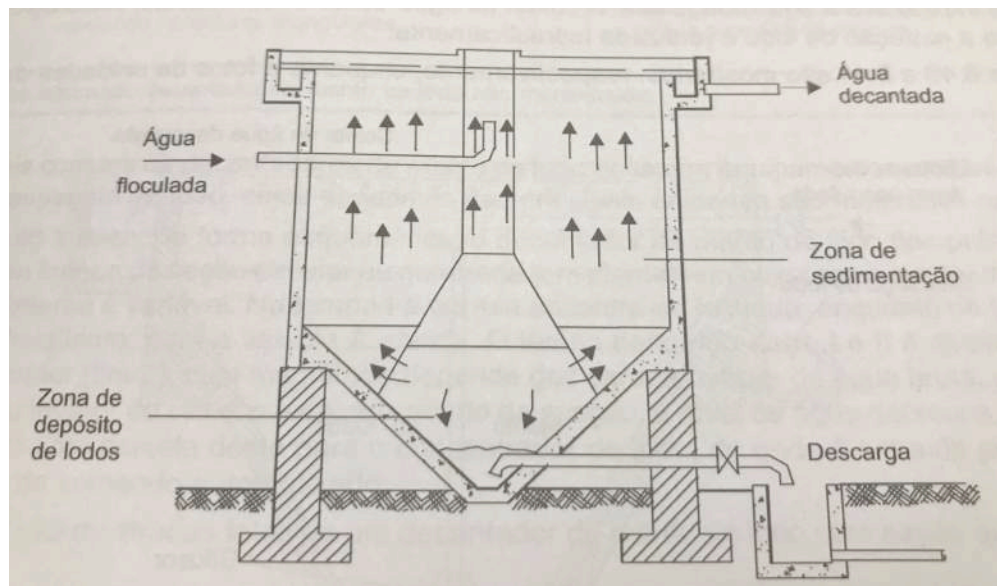


Figura 4 – Esquema de floco-decantador com remoção hidráulica de lodo  
 Fonte: Di Bernardo, 2005.

### 2.3.5. Filtração

Nessa etapa, são retiradas partículas menores, responsáveis pela cor e turbidez, que estão suspensas no meio aquoso, mesmo após as etapas de coagulação, floculação e decantação. Nessa fase, a última do tratamento convencional, a água flui através de um material filtrante, retendo os sólidos suspensos na fase líquida. Desse modo, essa etapa permite corrigir falhas que tenham acontecido nas etapas anteriores, assegurando a qualidade da água tratada.

Há dois tipos de filtração, a rápida e a lenta. A filtração lenta elimina as impurezas, com eficiência, em água bruta com até 50 UT. Esse tipo de filtração é utilizado em tratamento de água de pequeno porte, por exemplo uma comunidade. Na filtração rápida, a água previamente decantada atravessa o meio filtrante, removendo suas impurezas. Esta última, é mais utilizada no tratamento convencional da água.

Os filtros, podem ser de escoamento descendente ou ascendente, sendo constituídos de camadas de um meio poroso granular, com um sistema de drenagem, capaz de extinguir as impurezas ainda presentes e iniciar a eliminação de microrganismos. O meio poroso comumente usado é areia, pedra e carvão ativado.

Além disso, a filtração pode acontecer por meio de outros processos como adsorção, troca iônica e osmose reversa. Na adsorção, tem-se o filtro de carvão ativado como exemplo, ele elimina compostos responsáveis pelo sabor, pelo odor e pela cor. Na troca

iônica, acontece a remoção dos íons cálcio e magnésio. Essa técnica é utilizada no abrandamento da água. A osmose reversa ou inversa, ou seja, uma das formas de filtração por membranas, realiza o fracionamento dos sólidos dissolvidos no meio aquoso e separa as misturas gasosas, permitindo uma maior remoção das moléculas, melhorando a qualidade da água.

Na figura 5 verifica-se o funcionamento de um filtro de escoamento ascendente.

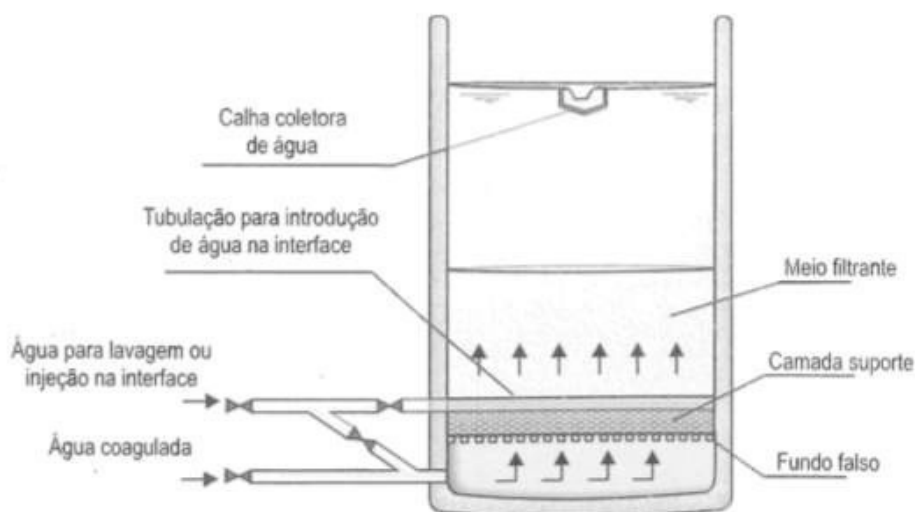


Figura 5 – Esquema de filtro de escoamento ascendente  
Fonte: Libânio, 2010.

### 2.3.6. Desinfecção

Após a filtração, a água recebe a dosagem de produtos desinfetantes para dizimar a possibilidade de presença de microrganismos, como vírus, bactérias e protozoários. Os principais desinfetantes utilizados são cloro, flúor e ozônio, sendo os derivados de cloro, como o hipoclorito de sódio e o hipoclorito de cálcio, mais frequentemente utilizados na indústria.

### 2.4. Refrigeração

Após o tratamento convencional, a água é destinada aos seus diferentes usos, sendo um deles a refrigeração. A água de refrigeração é usada para absorver calor de equipamentos e/ou processos. Ela é usada em três tipos de sistemas:

- Aberto, sem recirculação de água



- Fechado, com recirculação de água
- Aberto, com recirculação de água

No sistema aberto sem recirculação de água, após a troca de calor, a água é completamente rejeitada, por isso é um sistema não evaporativo.

No sistema fechado com recirculação de água, também chamado de não evaporativo, após a absorção de calor, a água é resfriada por meio de água de outro sistema.

No sistema aberto com recirculação de água, a água é resfriada em torres de resfriamento e em seguida é reutilizada. Esse sistema é denominado evaporativo.

Em uma fábrica de fiação é importante que os galpões onde fica o processo produtivo estejam adequadamente resfriados, pois o algodão precisa de uma certa umidade para que não haja enrolamentos ou quebra do fio, perdendo assim sua qualidade.

De acordo com Dantas, E.V. (1988), as águas destes sistemas deverão ser corretamente tratadas. O tratamento se destina a prevenir a corrosão, incrustações e crescimento biológicos, os quais poderão diminuir a vida útil dos equipamentos e interferir na eficiência da troca térmica.

A água, dependendo das impurezas presentes, é um meio bastante corrosivo para materiais metálicos. As impurezas mais comuns são sais dissolvidos, sólidos em suspensão e crescimento biológico.

Portanto, em sistemas de refrigeração deve ser considerada a possibilidade de corrosão em trocadores de calor, onde é realizada a troca térmica. Com isso, são utilizados produtos químicos como anticorrosivos e biocidas, afim de proteger os equipamentos de corrosão e incrustação. Também são utilizados ácidos e bases para o controle de pH.

Na imagem abaixo pode-se ver todo o processo que a água industrial percorre.

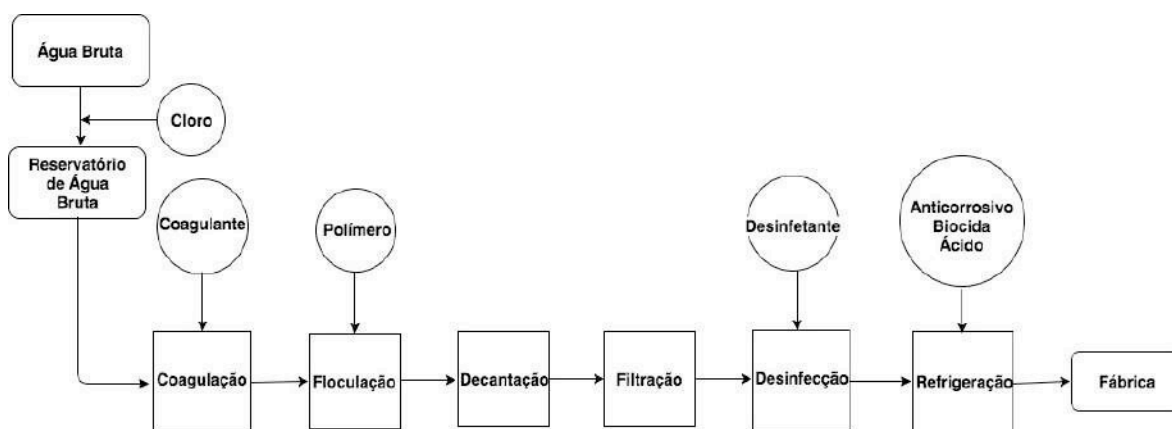


Figura 6 – Fluxograma do Processo de Água Industrial  
Fonte: Do Autor, 2018.

## **2.5. Qualidade da Água em Diferentes Usos**

### **2.5.1. Usos da água**

Os principais usos da água são abastecimento doméstico e industrial, irrigação, recreação e lazer, criação de espécies, geração de energia elétrica, navegação, entre outros. Para o abastecimento doméstico e industrial há um tratamento prévio da água, devido aos requisitos de qualidade exigidos (VON SPERLING, 2005).

### **2.5.2. Parâmetros de Qualidade da Água**

De acordo com VON SPERLING (2005), a qualidade da água pode ser representada através de diversos parâmetros, que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas, sendo os principais parâmetros descritos nos itens que se seguem.

#### **2.5.2.1. Parâmetros Físicos**

- Turbidez

É responsável pelo grau de interferência da passagem da luz através da água devido à sólidos em suspensão. Os usos mais frequentes desse parâmetro são em caracterização de águas brutas e tratadas para abastecimento e controle da operação das ETAs.

- Sólidos Totais Dissolvidos

Os sólidos totais dissolvidos, STD, são estimados a partir de métodos gravimétricos ou muitas vezes por meio de uma relação com a condutividade elétrica. Se o valor de STD estiver alto, implica que a solubilidade dos precipitados de ferro e alumínio está elevada.. Um valor alto de STD pode indicar presença de corrosão.

#### **2.5.2.2. Parâmetros Químicos**

- pH

É o potencial hidrogeniônico, que por sua vez é responsável pela concentração de íons hidrogênio  $H^+$ , indicando a acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. Os usos mais frequentes desse parâmetro são em caracterização de águas brutas e tratadas para abastecimento e controle da operação das ETAs.

Para um pH elevado, ou seja,  $pH > 7$  que implica em basicidade, há a possibilidade de incrustações nas tubulações e equipamentos. Para um pH baixo, ou seja,  $pH < 7$  que implica acidez, há grandes possibilidades de corrosão nas tubulações e máquinas.

- Alcalinidade

Representa a capacidade de resistir às mudanças de pH, ou seja, a quantidade de íons que reagirão para neutralizar os íons  $H^+$ , sendo os principais os bicarbonatos, carbonatos e os hidróxidos. A determinação da alcalinidade é importante para evitar a corrosão de tubulações.

Os usos mais frequentes desse parâmetro são em caracterização de águas brutas e tratadas para abastecimento e controle da operação das ETAs.

- Dureza

Dureza da água é a propriedade relacionada com a concentração de íons de determinados minerais dissolvidos, especialmente causada pela presença de sais de Cálcio e Magnésio, de modo que os principais íons levados em consideração são os de Cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e Magnésio ( $Mg^{2+}$ ). Tal parâmetro é de grande importância, pois águas duras causam sérios problemas de incrustações em processos industriais.

- Cloretos

Os íons cloretos estão presentes em águas naturais devido à dissolução de sais. O uso mais frequente desse parâmetro é em caracterização de águas brutas para abastecimento.

- Fosfatos

O fósforo apresenta-se na água na forma de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico. O ortofosfato é a forma mais disponível para microrganismos, sendo o fósforo indispensável para o crescimento de algas. Portanto, a análise desse parâmetro é de suma importância para o controle de qualidade. O uso mais frequente desse parâmetro é em caracterização de águas brutas e tratadas para abastecimento.

- Sílica

A sílica,  $\text{SiO}_2$ , está presente na forma de silicatos em águas naturais. A sílica pode ocasionar a formação de depósito em equipamentos de transferência de calor. Desse modo, é importante a análise desse parâmetro em águas tratadas para abastecimento de torres de refrigeração e chillers.

- Condutividade

É a capacidade de a água conduzir corrente elétrica devido à presença de íons, como cálcio, sódio, magnésio, entre outros. O valor da condutividade depende da concentração de substâncias dissolvidas e ionizadas e da temperatura da água. A condutividade também permite a avaliação do teor total de sais na água.

- Cloro Livre

A adição de cloro no tratamento da água tem como objetivo principal a destruição de microrganismos patogênicos presentes na água. O cloro é adicionado à água formando ácido hipocloroso,  $\text{HClO}$ , e íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Cl}^-$ . O ácido hipocloroso reage com uma enzima ocasionando a morte da bactéria.

### **2.5.3. Padrões de Qualidade da Água Industrial**

O chiller é composto por dois trocadores de calor, um condensador e um evaporador, e um compressor. As águas que realizam a troca térmica dentro do chiller são provenientes das torres de resfriamento e de um tanque de armazenamento que contém água oriunda da fábrica.



Figura 7 – Torre de Resfriamento e Chiller

Fonte: Arquivo pessoal do autor, 2018.

De acordo com a empresa que realiza uma consultoria no tratamento de água e fornece os produtos químicos, a fim de evitar corrosão, incrustação e acúmulo de microrganismos, os padrões de qualidade da água para ser usada em chillers são:

Tabela 1 – Limites de parâmetros para a água proveniente da torre de resfriamento usada no chiller

<b>Parâmetros</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Unidade</b>
<b>pH</b>	8,50	7,00	-
<b>Condutividade</b>	< 6000		μS/cm
<b>STD</b>	< 4500		mg/L
<b>Turbidez</b>	< 30		NTU
<b>Cloro Livre</b>	1,00	0,30	mg/L
<b>Alcalinidade</b>	< 1000		mgCaCO <sub>3</sub> /L
<b>Cloreto</b>	< 700		mg/L
<b>Sílica</b>	< 150		mg/L
<b>Fosfato</b>	40,00	10,00	mg/L

Fonte: Empresa consultora do tratamento de água, 2018.

Tabela 2 – Limites de parâmetros para a água proveniente do tanque de armazenamento usada no chiller

<b>Parâmetros</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Unidade</b>
<b>pH</b>	9,00	7,00	-
<b>Condutividade</b>	< 3000		μS/cm
<b>STD</b>	< 1000		mg/L
<b>Turbidez</b>	< 30		NTU
<b>Cloro Livre</b>	0,50	0,00	mg/L
<b>Alcalinidade</b>	< 1000		mgCaCO <sub>3</sub> /L
<b>Cloreto</b>	< 300		mg/L
<b>Fosfato</b>	6,50	5,50	mg/L

Fonte: Empresa consultora do tratamento de água, 2018.

Nas imagens abaixo, pode-se observar a corrosão e a incrustação como consequência de um tratamento inadequado para sistema de refrigeração.

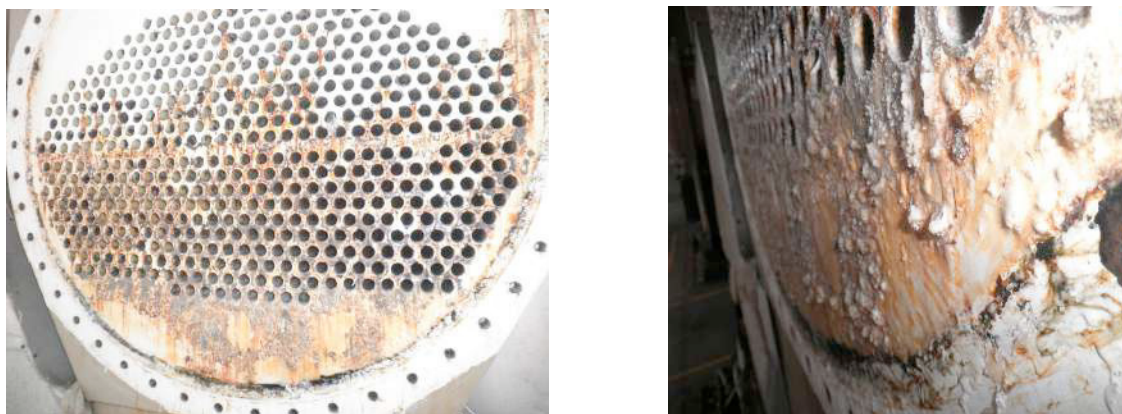


Figura 8 – Corrosão e incrustação em trocador de calor

Fonte: Arquivo pessoal do autor, 2018.

## 2.6. Análise de Confiabilidade

A confiabilidade é a probabilidade de obter um desempenho satisfatório, sob determinadas condições, por um período de tempo específico. Em uma estação de tratamento de água, a confiabilidade pode ser dada pela porcentagem de tempo em que se obtém as concentrações desejadas da água para cumprir os padrões de qualidade estabelecidos do tratamento. Desse modo, a ETA será confiável se não houver violação dos limites de padrões estabelecidos.

Assim, o termo está relacionado aos aspectos de falhas nos equipamentos e aos aspectos inerentes ao processo de tratamento, buscando-se avaliar o grau de confiabilidade que foi alcançado pelos sistemas, definindo o limite ou padrão que pode ser alcançado em cada processo (VON SPERLING; PINTO; OLIVEIRA 2009).

Entretanto, a probabilidade de falha é extremamente sensível à função de distribuição da concentração efluente. Conhecida esta distribuição, uma expressão pode ser utilizada para definir a fração do tempo em que uma dada concentração foi excedida no passado e, desta forma, predizer o comportamento futuro de uma ETA, desde que as variáveis do processo continuem as mesmas. Diversas análises de variáveis efluentes de ETEs têm mostrado que, para a maioria dos processos, grande parte dos constituintes pode ser modelada pela distribuição lognormal (OLIVEIRA; VON SPERLING 2007).

Para determinar uma concentração média que garanta que a concentração esteja abaixo dos padrões estabelecidos, com um nível de confiabilidade, foi criado um método por Niku et al. (1979) que relaciona a concentração média do constituinte com os valores limites a serem cumpridos, baseando-se em análises probabilísticas (OLIVEIRA; VON SPERLING 2007).

Há diversos modelos de distribuição de frequência como distribuição normal, lognormal, gama, exponencial e retangular. Esses modelos são verificados, para o ajuste de dados, por meio de testes como Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors. Também podem ser realizados testes gráficos como o Normal Probability Plot. Através destes testes, observa-se o modelo que melhor caracteriza a distribuição de frequência dos dados.

Diversas análises de variáveis efluentes de estações de tratamento têm mostrado que, para a maioria dos processos, grande parte dos constituintes pode ser modelada pela distribuição lognormal (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2007).

Para calcular o a concentração média de projeto ( $m_x$ ), usa-se a equação 1:

$$m_x = CDC * X_s \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$m_x$ : concentração média do constituinte

CDC: coeficiente de confiabilidade

$X_s$ : padrão estabelecido ou meta de qualidade

O CDC é utilizado para estimar a fração de tempo em que a concentração não ultrapassa os padrões de qualidade, fazendo uso dos coeficientes de variação (desvio padrão / média aritmética).

De modo que CDC é calculado a partir da equação 2:

$$CDC = (\sqrt{CV^2 + 1}) * e^{[-Z_{1-\alpha} \sqrt{\ln(CV^2 + 1)}]} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

CV: coeficiente de variação

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

O coeficiente de confiabilidade é calculado em função de uma determinada probabilidade de falha  $\alpha$ , situada entre 0 e 1. Assim, (1-  $\alpha$ ) é a probabilidade de que a variável não exceda o padrão  $X_s$  (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Para estabelecer a confiabilidade de uma ETA em operação, de acordo com METCALF et EDDY (1991), é preciso conhecer a concentração média, o desvio padrão e a concentração padrão estabelecida. Determina-se a confiabilidade da estação utilizando a distribuição normal padronizada e os percentis associados à probabilidade acumulada.

Para obter o percentual esperado de atendimento aos padrões, Niku et al. (1979) propôs uma equação derivada da integração da função densidade de probabilidade da distribuição normal. Devido à complexidade da equação, OLIVEIRA e SPERLING (2007) chegaram a equação 3 utilizando relações existentes entre as distribuições normal e lognormal e algumas manipulações algébricas que consideram o coeficiente de variação.

Para calcular o percentual de atendimento aos padrões usa-se a equação 3:

$$Z_{1-\alpha} = \ln X_S - \frac{[\ln \mu_x - 1/2 \ln(1+CV^2)]}{\sqrt{\ln(1+CV^2)}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$X_s$ : padrão estabelecido ou meta de qualidade

$\mu_x$ : média da concentração do constituinte

CV: coeficiente de variação



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

Em seguida, obtém-se os valores correspondentes à probabilidade cumulativa da distribuição normal padronizada por meio da função DIST.NORMP do Excel. Esses valores correspondem à área subentendida pela curva normal central reduzida, que por sua vez, são equivalentes ao percentual de atendimento alcançado.

A aplicabilidade da confiabilidade é mais comum em estações de tratamento de esgotos (ETE), determinando a confiabilidade dos lançamentos dos efluentes, de acordo com padrões estabelecidos por normas. Portanto, esse trabalho é um precursor na confiabilidade do tratamento de água industriais para atingir padrões de qualidade interno.

### 3. Metodologia

#### 3.1 Área de Estudo

O trabalho foi realizado em uma indústria têxtil de fiação localizada em Maracanaú, Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará.

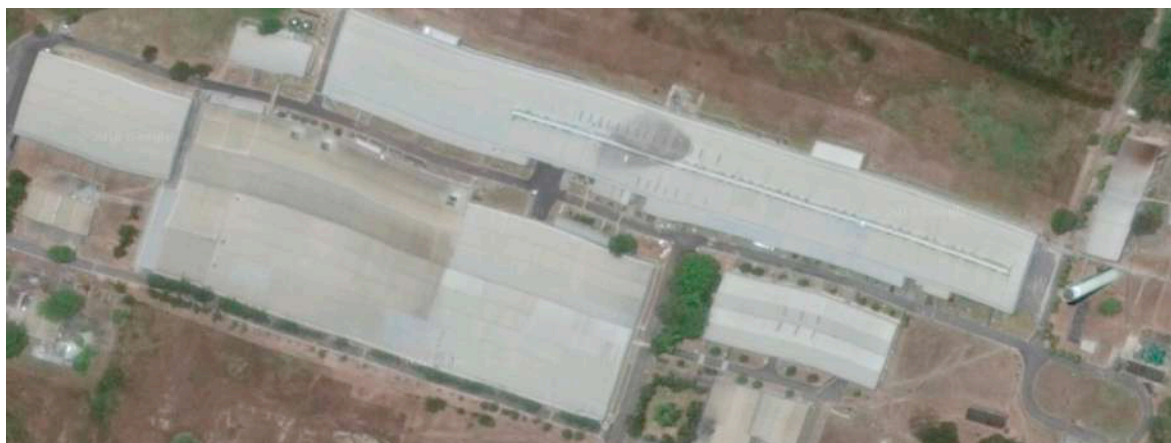


Figura 9 – Vista aérea da empresa em que foi realizado o estudo  
Fonte: Google Maps, 2018.

A indústria possui cerca de 600 funcionários. Tem, em média, um consumo diário de 150 m<sup>3</sup> de água industrial que abastece as torres de resfriamento e parte do setor fabril.

#### 3.2 Procedimento Geral

A empresa disponibilizou o acesso aos dados das planilhas operacionais que contém informações sobre os parâmetros analisados e os resultados das análises físico-químicas. Os dados foram coletados diariamente de julho de 2017 a março de 2018.

As análises físico-químicas foram realizadas no laboratório da ETA da indústria. Os parâmetros usados foram: pH, condutividade, cloro livre, sólidos totais, turbidez, alcalinidade, cloreto, fosfato e sílica.

O Excel foi o software escolhido para organizar os dados e realizar a estatística descritiva dos dados e a análise da confiabilidade do tratamento de água para o sistema de refrigeração.

#### 3.3 Tratamento de Água na Empresa

Na empresa em estudo trabalha-se com duas ETAs, de modo que a vazão de cada uma tem capacidade máxima de 75 m<sup>3</sup>/h. Portanto, quando as duas estão em funcionamento ao mesmo tempo, possui capacidade máxima de tratar 150 m<sup>3</sup>/h. O consumo de água bruta é

em torno de 110 m<sup>3</sup>/dia e o volume de água tratada produzido na estação é cerca de 320 m<sup>3</sup>/dia.

No fluxograma abaixo pode-se ver como é feito o tratamento na estação, desde a captação de água bruta até o envio para as torres de resfriamento. Há duas fontes de água bruta, a água da COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos) e a água pluvial. A água bruta é armazenada em cisterna e, em seguida, encaminhada para a ETA, passando por um disperso misturador, onde ocorre a coagulação. Em seguida, desloca-se para o floccodecantador, onde acontece a floculação e a decantação, sendo depois encaminhada para o filtro de areia, onde acontece a primeira filtração e, em seguida, para o filtro de carvão, visando retirar o odor, o sabor, a cor e o material orgânico solúvel.

Após o filtro de carvão, a água passa por um abrandador por meio de um *by-pass*, pois este se encontra parado há 8 anos, devido a mudança de processo produtivo. Atualmente, não se utiliza mais caldeiras para geração de vapor, evitando a necessidade de retirar a dureza da água, que é a função do abrandador.

Com isso, a água está tratada e é armazenada em cisterna de água industrial. A partir disso, é enviada para a torre de abastecimento (caixa d'água), que por sua vez é dividida em células e, em seguida, distribuída para toda a empresa.

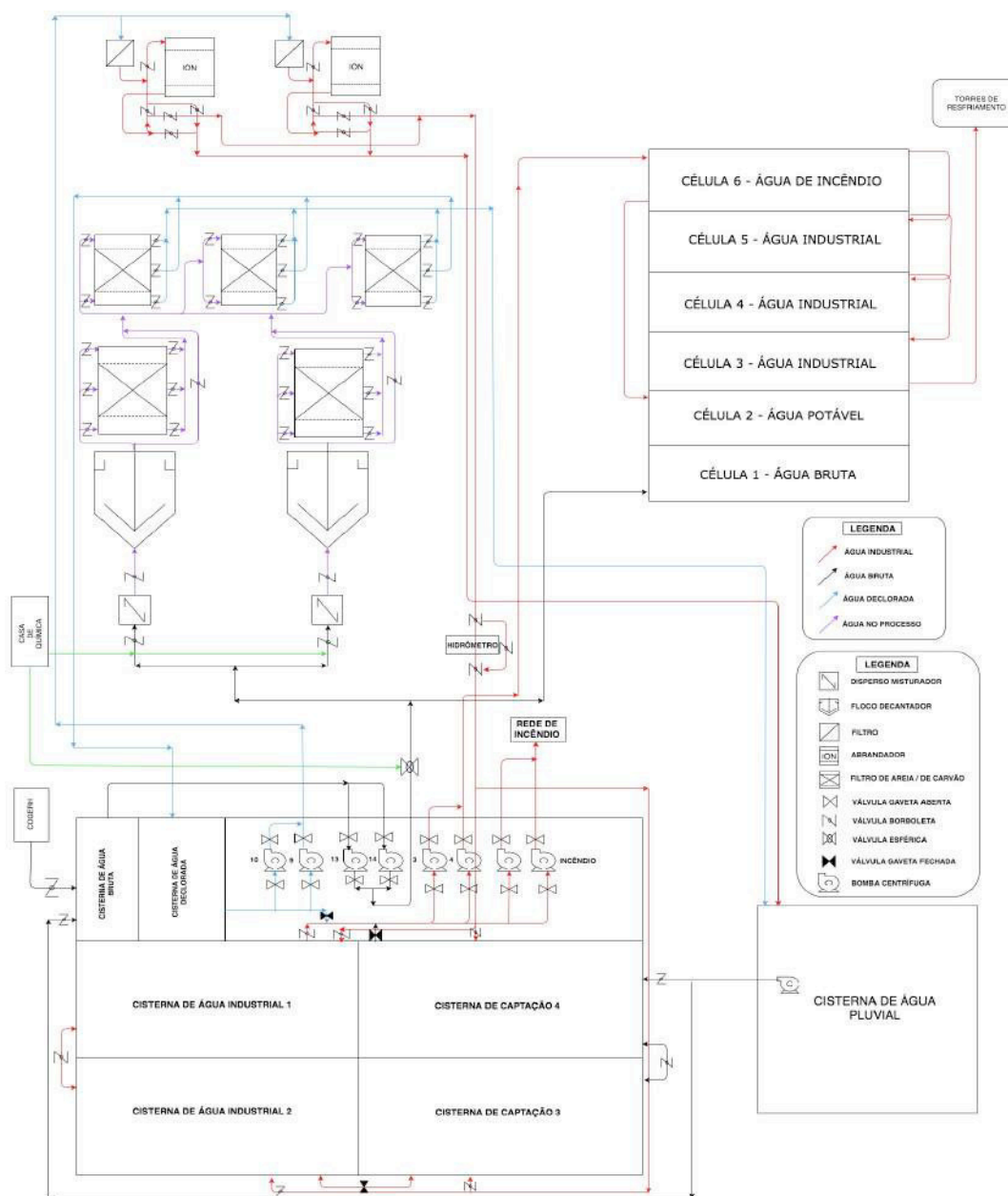


Figura 10 – Fluxograma do Tratamento de Água na ETA  
 Fonte: Empresa em que foi feito o estudo, 2018.

A partir da caixa d'água, uma das células abastece as torres de resfriamento onde acontece a primeira troca térmica. A água é resfriada, por um sistema de ventilação, e recebe a dosagem dos produtos químicos utilizados no tratamento como ácido, anticorrosivo, biocida e cloro. Essa água resfriada é encaminhada para o condensador dentro do chiller, onde também passa um gás que realiza a troca térmica, de modo que a água absorve calor do gás. Assim, a água sai do condensador com a temperatura mais alta e retorna para a torre de resfriamento.

Na fábrica é feita uma convecção forçada em que o ar frio é inserido na fábrica para absorver calor das máquinas e dos colaboradores e o ar quente é enviado para as centrais

de ar. O ar é então filtrado, para retirar impurezas, e encaminhado para o lavador, perdendo calor. O ar, agora resfriado, retorna para a fábrica. A água que absorveu calor do ar é então encaminhada para um tanque de armazenamento.

Após a troca térmica no condensador, o gás, que por sua vez perdeu calor, é encaminhado para o evaporador que também está dentro do chiller. A água que entra no evaporador é a água que está no tanque de armazenamento. A água perde calor para o gás refrigerante, sai com uma temperatura mais baixa e retorna para as centrais de ar.

A água, antes de entrar no chiller, recebe a dosagem dos produtos químicos tanto na torre de resfriamento quando no tanque de armazenamento.

Na Figura 11 pode-se ver o fluxograma do sistema de refrigeração da empresa.

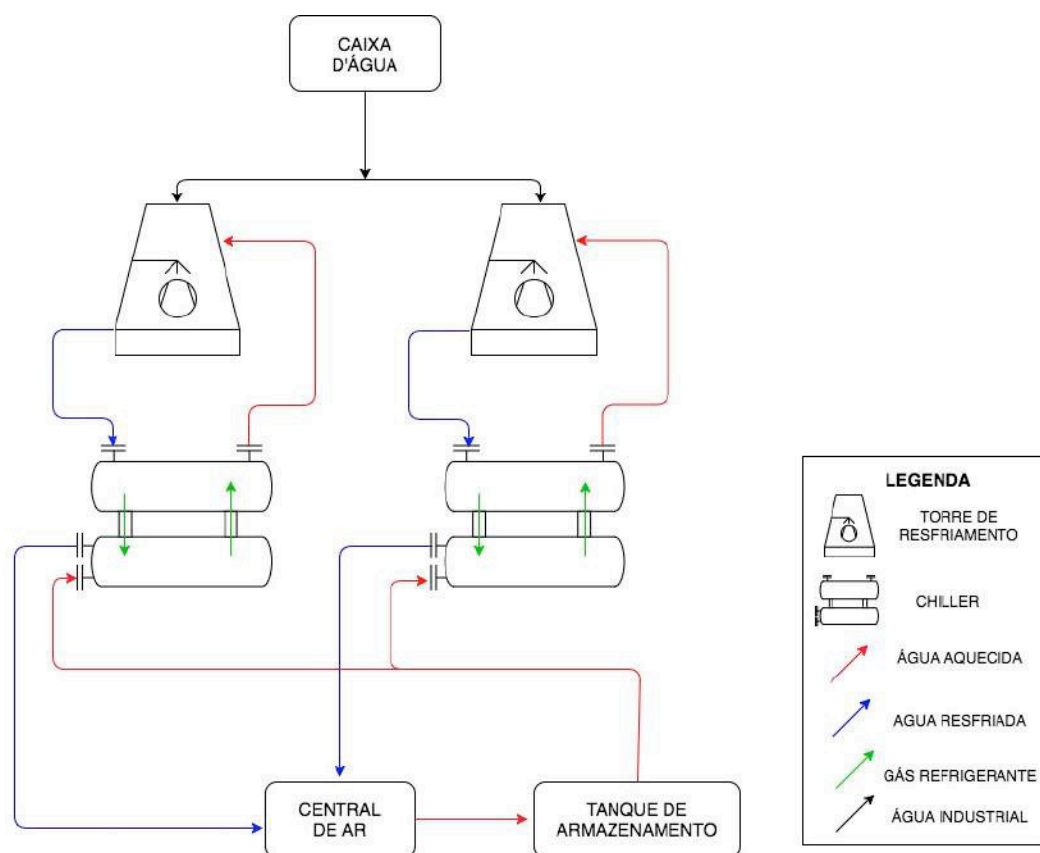


Figura 11 – Fluxograma do Sistema de Refrigeração  
Fonte: Empresa em que foi feito o estudo, 2018.

Na refrigeração trabalha-se com duas torres de resfriamento e dois chillers com capacidade máxima de 800 m<sup>3</sup>/h cada.

### 3.4 Remoção de Outliers

Os outliers são valores extremos que podem ser apresentados no monitoramento de cada parâmetro. Por isso, é necessário verificar a existência desses outliers. Para isso, foi utilizado um teste empírico que foi usado por Oliveira e Von Sperling (2006), Silveira (2011) e Monteiro (2009).

O teste compreende na determinação de limites inferior e superior a partir do primeiro e terceiro quartil da série de dados denominados respectivamente de quartil inferior ( $Q_{inf}$ ) e superior ( $Q_{sup}$ ), como mostra as equações abaixo:

$$L_{inf} = Q_{inf} - 1,5 * (Q_{sup} - Q_{inf}) \quad \text{Equação 4}$$

$$L_{sup} = Q_{sup} + 1,5 * (Q_{sup} - Q_{inf}) \quad \text{Equação 5}$$

Portanto, foram calculados os limites para cada parâmetro e de cada mês de estudo e caso houvesse valores acima do limite superior ou abaixo do limite inferior, eles eram considerados outliers e, assim, eliminados dos dados.

### 3.5 Estatística Descritiva do Número de Dados

Após a remoção dos outliers, foi feita a estatística descritiva do número de dados, de modo que foi calculado, para cada parâmetro, a média aritmética, o valor mínimo e máximo, a mediana, a moda, o desvio padrão, os percentis de 10% e 90% e os quartis inferior e superior do número de dados coletados.

A partir dos resultados obtidos foi gerado um gráfico como o de Box e Whiskers, para facilitar a compreensão. Nesse gráfico, são plotados os valores de máximo e mínimo, o valor da mediana e o primeiro e terceiro quartil do número de dados de cada constituinte.

### 3.6 Atendimento aos Limites Padrões de Qualidade da Água

Foi realizada uma análise dos dados obtidos de cada parâmetro em estudo por meio da estatística descritiva e as concentrações foram comparadas aos limites padronizados de qualidade da água para o sistema de refrigeração, de acordo com a empresa que realiza a consultoria do tratamento na indústria de fiação.

Novamente, foram utilizados recursos como gráficos box-plot para melhorar a visualização e entendimento da variabilidade dos dados. Para se quantificar a percentagem

dos dados coletados que respeitaram os padrões de qualidade, foram usados gráficos de distribuição de frequência acumulada.

### 3.7 Cálculo da Confiabilidade do Tratamento de Água

Diversos estudos sobre a distribuição de frequência de dados efluentes relatam que a distribuição lognormal é a que melhor se ajusta aos dados (NIKU et al., 1979, METCALF; EDDY, 2003, OLIVEIRA, 2006, MONTEIRO, 2009, SILVEIRA, 2011).

Para o cálculo da confiabilidade do tratamento de água para sistemas de refrigeração da indústria de fiação, adotou-se a metodologia desenvolvida por Niku et al. (1979) que determina um valor de concentração média que esteja abaixo dos padrões de qualidade para um determinado nível de confiabilidade.

Com o nível de confiabilidade desejado, obtém-se a variável normal padronizada, que por sua vez, multiplicada pelo coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média dos valores) resulta no coeficiente de confiabilidade (CDC). Este multiplicado pela concentração especificada no padrão de qualidade, resulta na concentração média para o nível de confiabilidade adotado.

Tabela 3 – Variável normal padronizada para vários níveis de confiabilidade

Nível de confiabilidade (%)	Z(1- $\alpha$ )
<b>80</b>	0,842
<b>85</b>	1,282
<b>90</b>	1,645
<b>98</b>	2,054
<b>99</b>	2,326

Fonte: Adaptado de Oliveira e Von Sperling (2007)

Com os valores das concentrações e dos coeficientes de variação de cada parâmetro, foi calculado o percentual esperado de atendimento aos padrões de qualidade. Para os valores de  $Z_{1-\alpha}$  resultantes, foram obtidos os valores correspondentes à probabilidade cumulativa da distribuição normal padronizada, por meio da função DIST.NORMP do Excel e são equivalentes ao percentual de atendimento alcançado.

As figuras abaixo mostram o procedimento de cálculo dos coeficientes de confiabilidade das concentrações de projeto e dos percentuais esperados de atendimento aos padrões adotados.

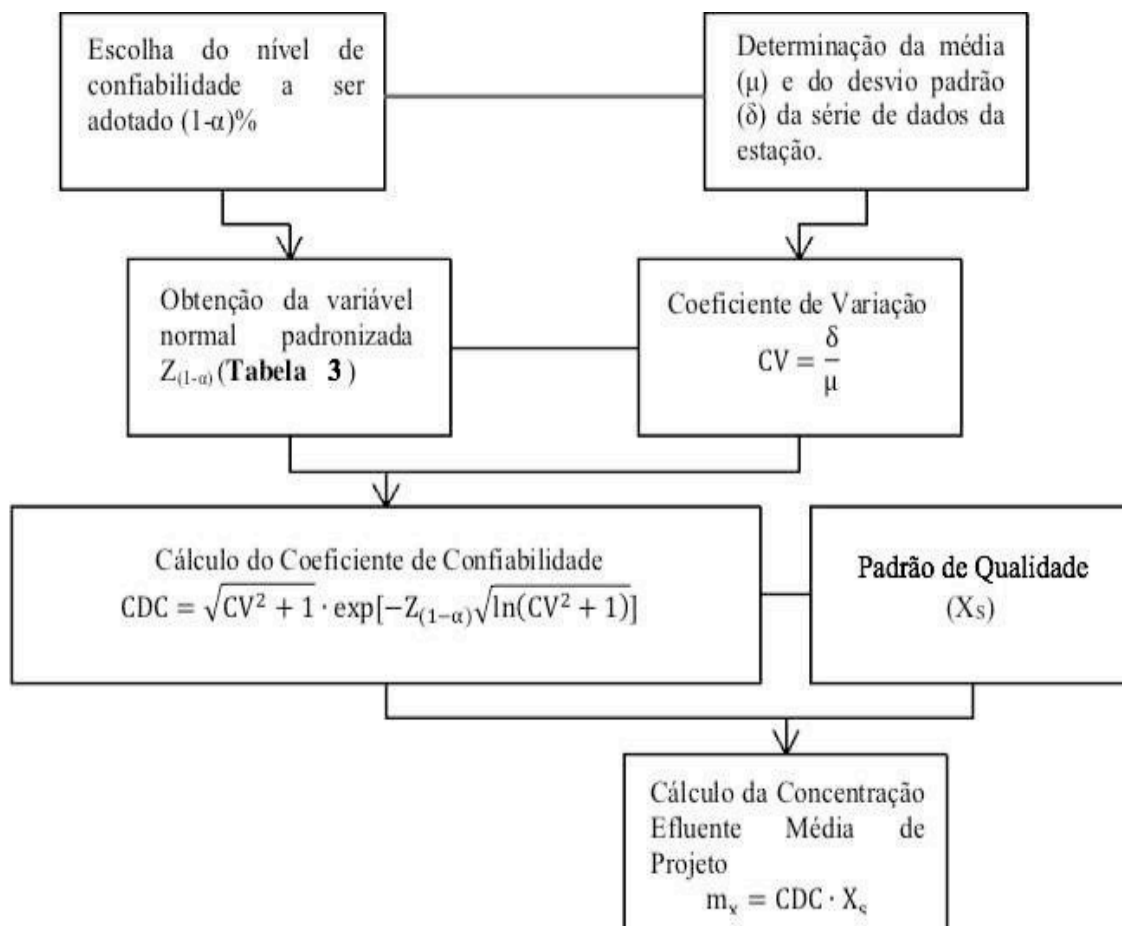


Figura 12 – Etapas para determinação do CDC e das concentrações de projeto  
 Fonte: Adaptado de Oliveira (2006)



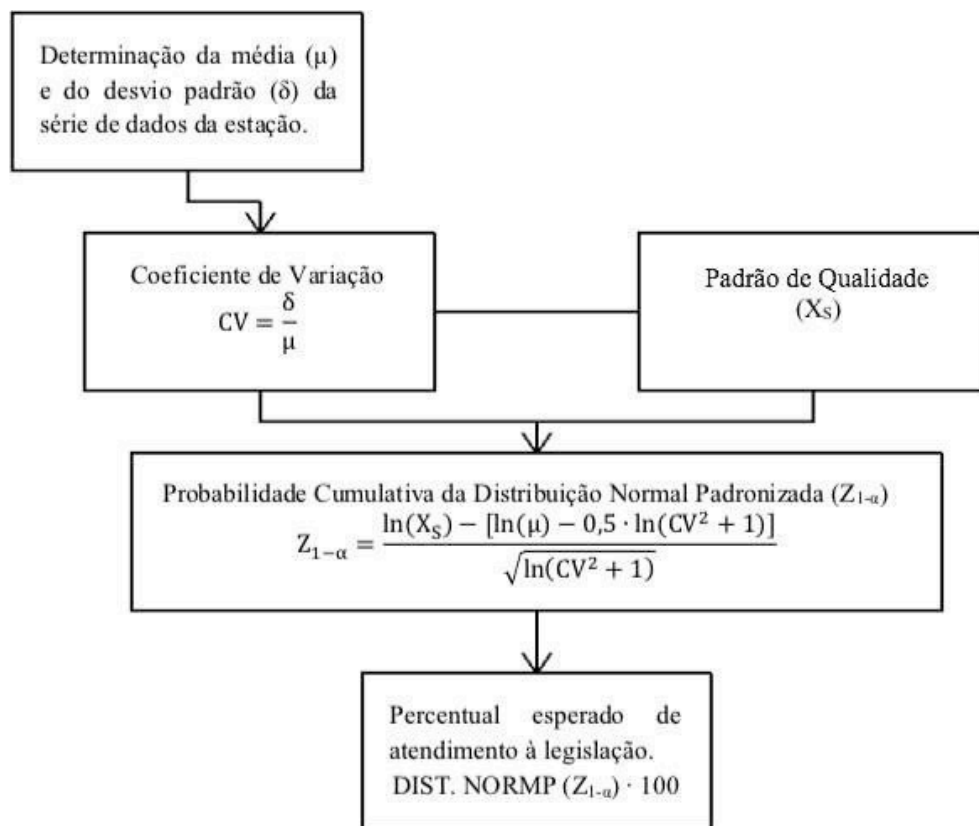


Figura 13 – Etapas para determinação do percentual esperado de atendimento aos padrões de qualidade

Fonte: Adaptado de Oliveira (2006)

A partir das concentrações e percentuais esperados de atendimento aos padrões é que se avalia o tratamento em relação à sua confiabilidade. A análise das concentrações visa à obtenção de um valor de projeto ou operação que considere a variação das condições de operação de uma estação de tratamento. Quanto maior o percentual de atendimento alcançado maior é a capacidade da ETA de produzir uma água com concentração média dentro dos padrões de qualidade.

Desse modo, foram calculados os CVs, CDCs,  $m_x$ , e percentuais esperados de atendimento às metas para os parâmetros em estudo, considerando um nível de confiabilidade de 95%, ou seja, uma probabilidade de falha de 5% em alcançar o padrão.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Estatística Descritiva do Número de Dados

Os resultados da estatística descritiva do número de dados de cada parâmetro, para os dados da água proveniente da torre de resfriamento (TR) e do tanque de armazenamento (TA), no período de julho de 2017 a março de 2018 estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Para melhor descrever os resultados, denomina-se caso 1, os dados da água proveniente da torre de resfriamento e caso 2, os dados da água proveniente do tanque de armazenamento.

Tabela 4 – Estatística descritiva do número de dados – Torre de Resfriamento

ESTATÍSTICA	pH	Condutividade	STD	Turbidez	Cloro	Alcalinidade	Cloretos	Fosfato	Sílica
		uS/cm	mg/L	NTU	mg/L	mgCaCO <sub>3</sub> /L	mg/L	mg/L	mg/L
Média Arit.	17	17	17	13	16	6	5	4	4
Desvio Padrão	4,1	4,0	4,2	6,8	3,8	2,0	1,8	3,0	2,0
Mediana	18	18	17	15	17	5	5	3	5
Moda	21	20	21	15	17	5	4	5	5
Mínimo	8	8	8	0	8	3	3	1	1
Máximo	21	21	21	21	21	10	9	10	7
P10%	14	13	13	6	13	4	4	1	2
Q1	15	15	15	8	15	5	4	2	3
Q3	20	20	20	18	18	7	6	5	6
P90%	21	20	21	20	20	8	7	8	6
<b>TOTAL DE DADOS</b>	<b>152</b>	<b>150</b>	<b>149</b>	<b>118</b>	<b>146</b>	<b>52</b>	<b>49</b>	<b>36</b>	<b>39</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Tabela 5 – Estatística descritiva do número de dados – Tanque de Armazenamento

ESTATÍSTICA	pH	Condutividade	STD	Turbidez	Cloro	Alcalinidade	Cloretos	Fosfato
		uS/cm	mg/L	NTU	mg/L	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mg/L	mg/L
Média Arit.	17	17	17	13	17	2	2	4
Desvio Padrão	4,0	4,1	4,1	6,8	4,1	2,0	2,0	3,4
Mediana	16	17	17	15	17	1	1	2
Moda	21	15	15	15	15	0	0	2
Mínimo	8	8	8	0	8	0	0	1
Máximo	21	21	21	21	21	5	5	10
P10%	14	14	14	6	14	0	0	1
Q1	15	15	15	8	15	0	0	2
Q3	20	20	20	18	20	4	4	5
P90%	21	21	21	20	21	4	4	9
<b>TOTAL DE DADOS</b>	<b>149</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>36</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

As Figuras 14 e 15 contêm os valores máximos e mínimos, o primeiro e o terceiro quartil e a mediana referente à quantidade de dados dos parâmetros analisados.

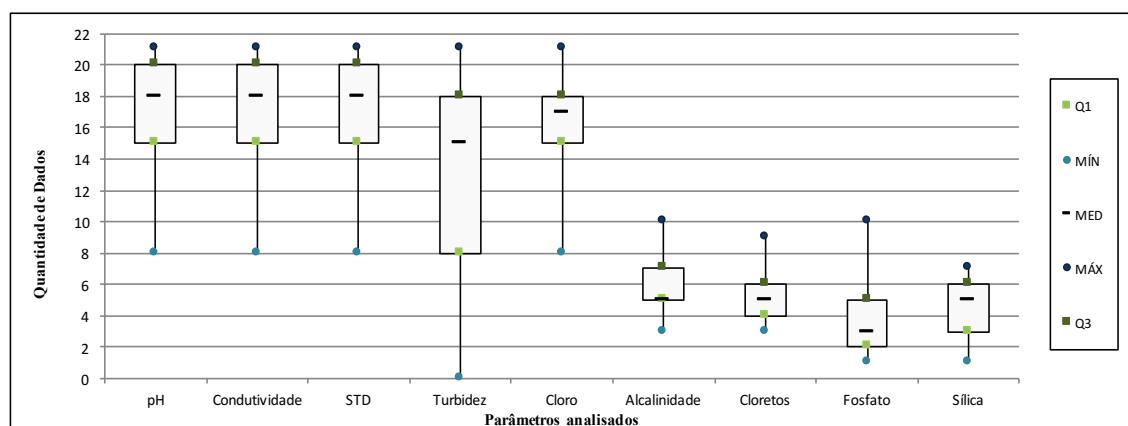


Figura 14 – Box-plot da quantidade de dados analisados – Torre de Resfriamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

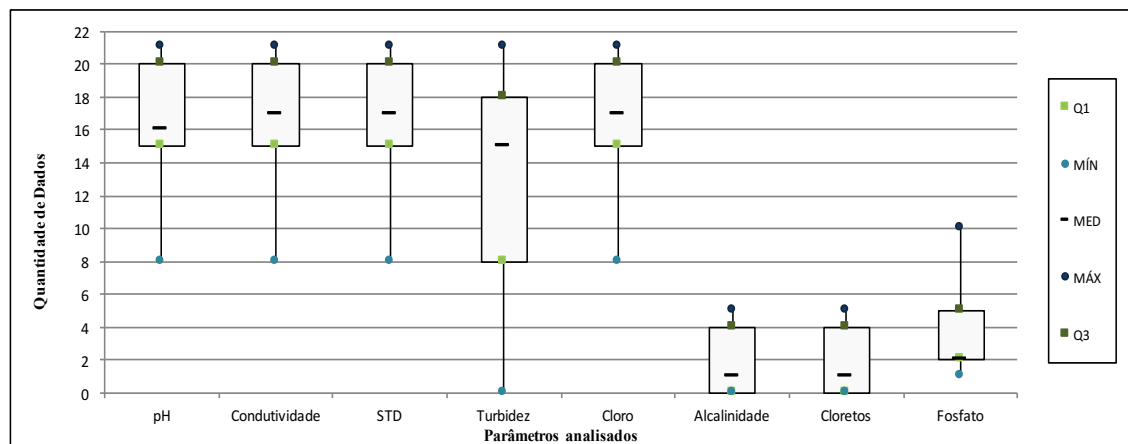


Figura 15 – Box-plot da quantidade de dados analisados – Tanque de Armazenamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Observa-se que há uma grande amplitude dos dados, variando entre 0 e 21 a quantidade de dados mensais dos parâmetros. Em ambos os casos, a turbidez foi a que apresentou maior amplitude e, para o TR, o parâmetro com menor amplitude foi os cloretos. Para o TA, cloretos e alcalinidade apresentam as menores amplitudes.

O parâmetro com maior número de dados do TR, foi o pH com 152 dados coletados e o parâmetro com menor número de dados foi o fosfato com 37 dados coletados. Para o TA, o pH também foi o parâmetro com maior número de dados coletados, totalizando 151 e os parâmetros com menor número de dados foram alcalinidade e cloretos, totalizando para cada

18 dados coletados. Isso acontece, pois dados como pH, condutividade, STD, turbidez e cloro são analisados diariamente, dados como alcalinidade, cloretos, fosfato e sílica são analisados semanalmente.

## **4.2 Atendimento aos Limites dos Padrões de Qualidade da Água**

Os gráficos abaixo representam os resultados obtidos, a partir da estatística descritiva realizada para cada parâmetro, em relação ao mês em que foram coletados os dados.

### **4.2.1 pH**

Os valores mensais do parâmetro pH, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 16, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 17. Observa-se que em outubro de 2017 a janeiro de 2018, os valores do pH estão fora dos limites de padrão de qualidade exigidos. Em outubro e novembro de 2017, 100% dos dados estavam além do limite superior. Em outubro, apenas 25% dos dados estavam dentro dos limites e em janeiro de 2018 houve uma melhora com 70% dos dados dentro dos padrões estabelecidos, mantendo nos meses seguintes um resultado positivo, devido a mudanças no sistema de dosagem do produto químico.

Observa-se também que os dados não foram muito dispersos, pois o maior desvio padrão atingido foi de 0,48 em julho de 2017, e que todos os dados estiveram dentro dos limites de qualidade. O mês com menor amplitude de dados foi em fevereiro de 2018, com desvio padrão de 0,14, também nesse mês 100% dos dados estiveram dentro dos padrões estabelecidos.

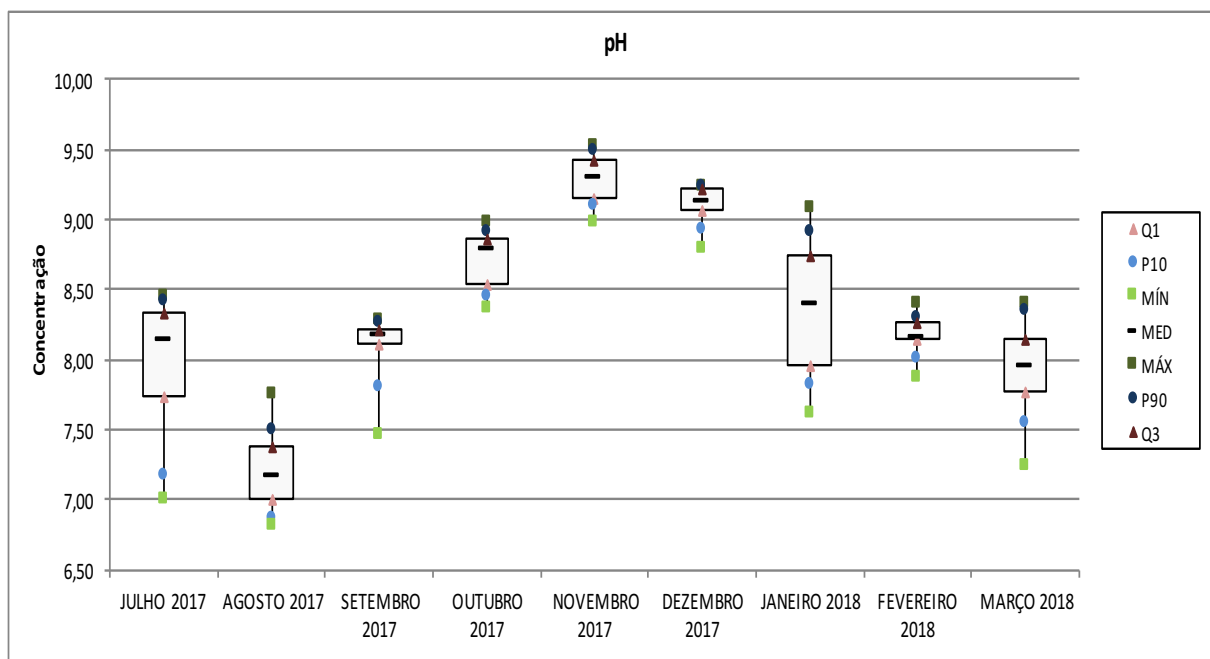


Figura 16 – Box-plot do parâmetro pH – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

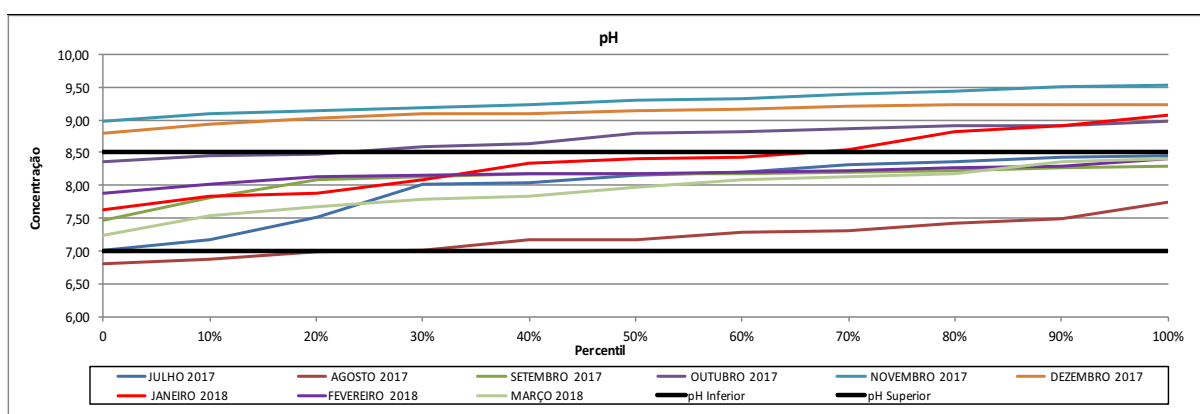


Figura 17 – Frequência acumulada do pH – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro pH, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 18, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 19. Percebe-se que, apenas nos meses de julho e agosto de 2017, 100% dos dados estiveram dentro dos padrões de qualidade. Em setembro, 20% dos dados estiveram abaixo do limite inferior e, nos demais meses, cerca de 70% dos valores estiveram dentro dos limites estabelecidos.

Observa-se que houve uma certa homogeneidade, uma vez que o maior desvio padrão encontrado foi de 0,84 no mês de dezembro. Em fevereiro, houve a menor amplitude, com desvio padrão de 0,19. É importante salientar que não necessariamente uma menor

amplitude indica um bom desempenho, pois nesse caso, em fevereiro apenas cerca de 65% dos dados estiveram de acordo com os padrões de qualidade.

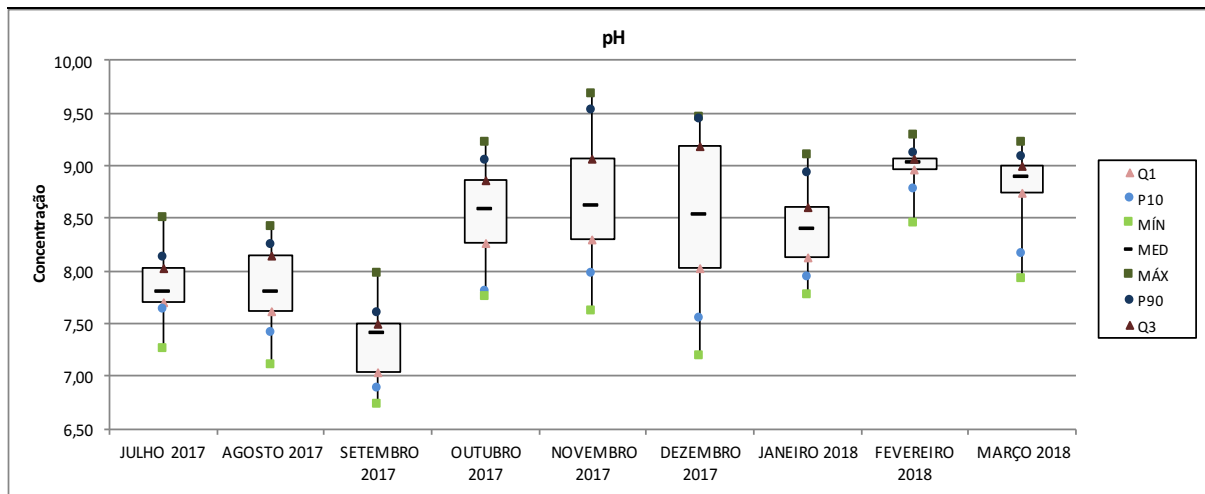


Figura 18 – Box-plot do parâmetro pH – Tanque de Armazenamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

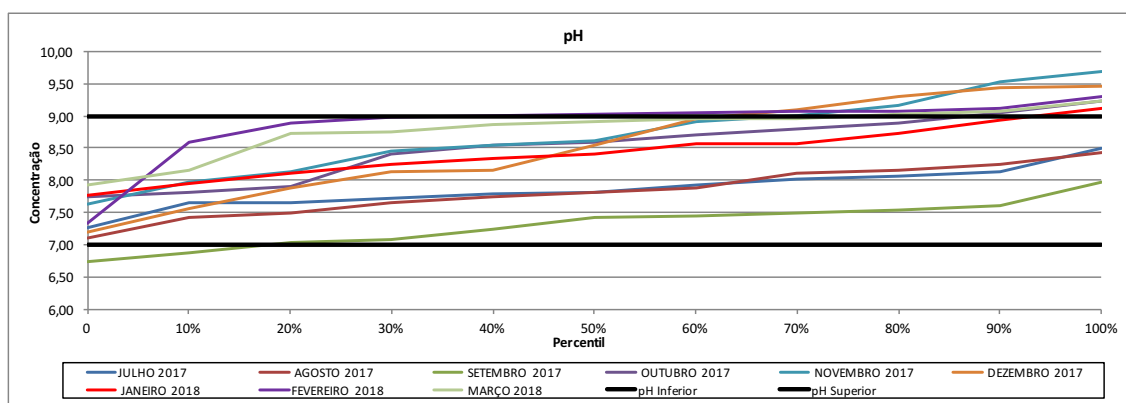


Figura 19 – Frequência acumulada do pH – Tanque de Armazenamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.2.2 Condutividade

Os valores mensais do parâmetro condutividade, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 20, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 21. O mês que obteve melhor desempenho foi julho de 2017, pois 95% dos dados estiveram abaixo do limite estabelecido. Setembro e agosto de 2017, janeiro e março de 2018, tiveram cerca de 80% dos dados dentro dos padrões e os demais meses, em torno de 40% dos dados estiveram abaixo do padrão de qualidade.

Em janeiro de 2018, observa-se uma maior amplitude com desvio padrão de 1546 uS/cm, essa amplitude foi devido às férias coletivas realizada em dezembro, com isso houve o esvaziamento da torre de resfriamento para manutenção e em janeiro houve a reposição da água, atingindo um valor mínimo de 1617 uS/cm. O mês com menor amplitude foi agosto, com desvio padrão de 651 uS/cm.

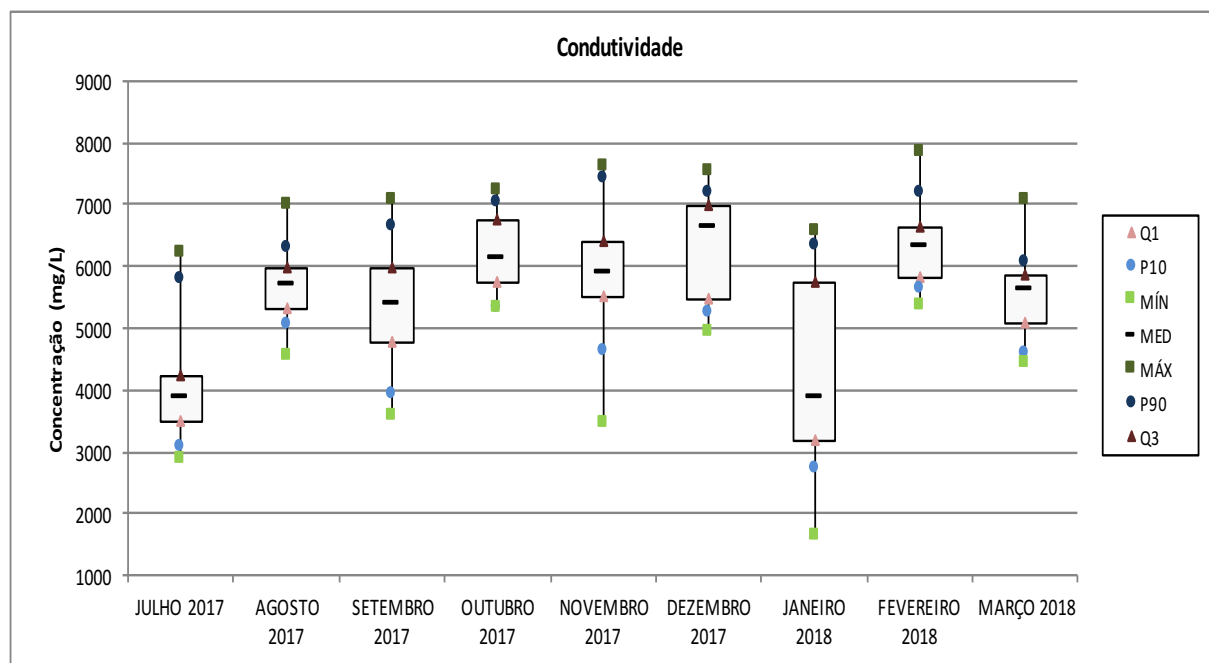


Figura 20 – Box-plot do parâmetro condutividade – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

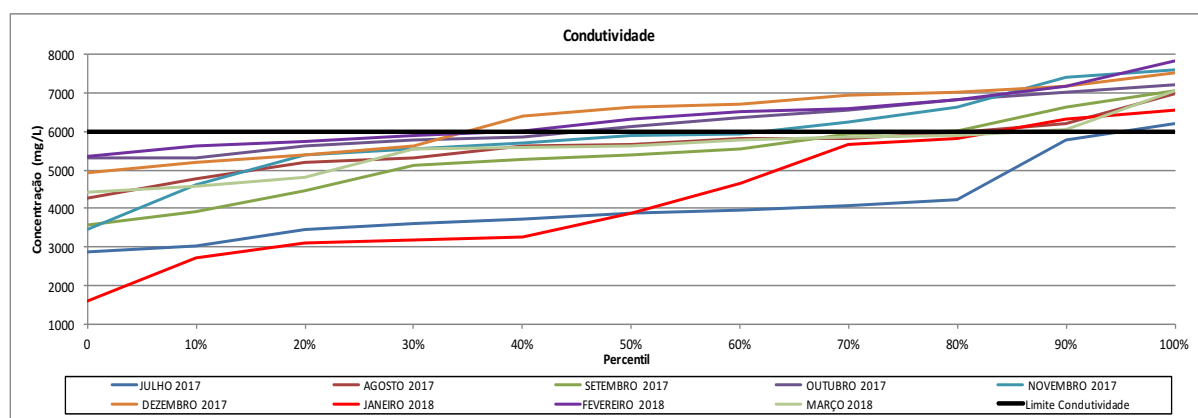


Figura 21 – Frequência acumulada da condutividade – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro condutividade, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 22, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 23. Nesse parâmetro, observa-se um bom desempenho, pois 100% dos dados de todos

os meses estiveram abaixo do limite de padrão de qualidade. Nota-se que em janeiro foi o mês em que houve uma maior dispersão dos dados, devido ao mesmo motivo para o caso da torre de resfriamento.

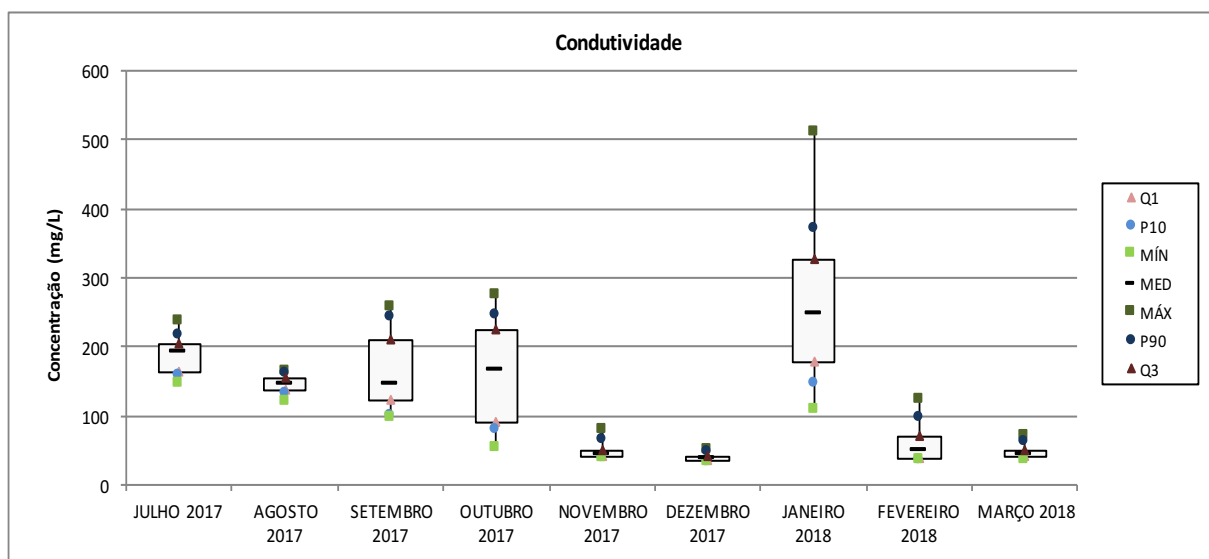


Figura 22 – Box-plot do parâmetro condutividade – Tanque de Armazenamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

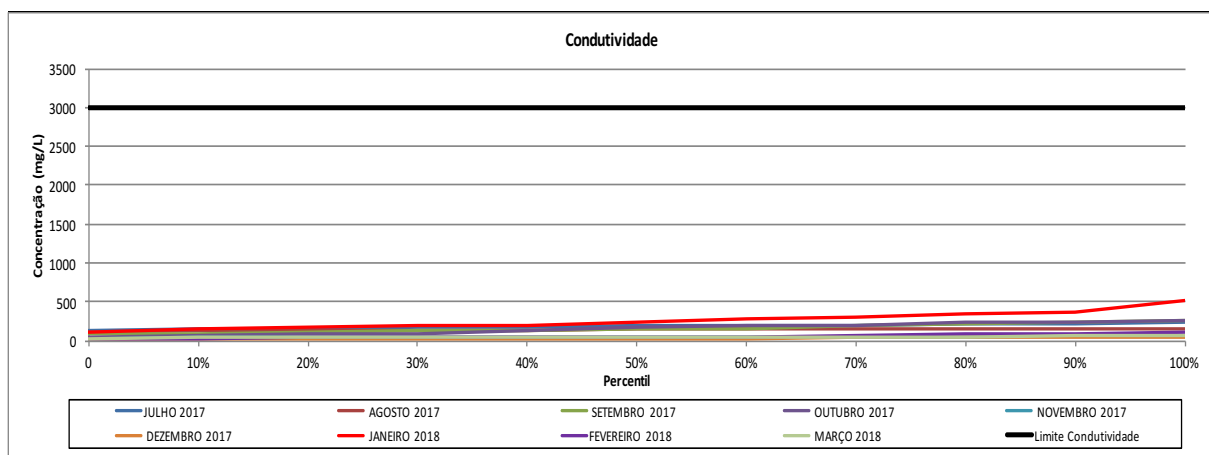


Figura 23 – Frequência acumulada da condutividade – Tanque de Armazenamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

### 4.2.3 STD

Os valores mensais do parâmetro STD, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 24, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 25. Nesse parâmetro também se observa um bom desempenho, visto que todos os dados de todos os meses estiveram abaixo do limite estabelecido. Em janeiro houve maior variação de valores,



também devido às férias coletivas. Em fevereiro houve uma maior homogeneização dos dados com o menor desvio padrão observado.

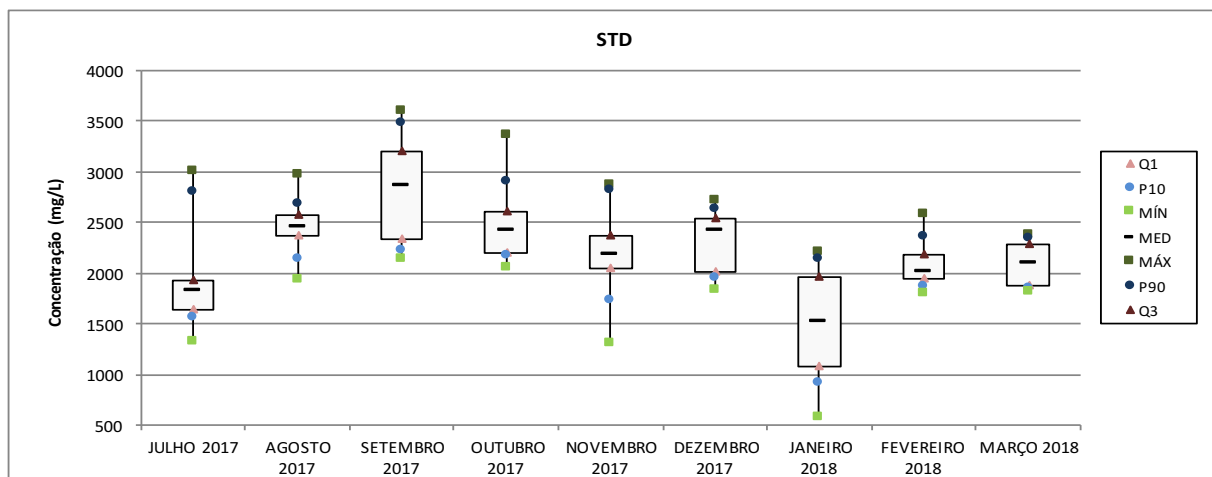


Figura 24 – Box-plot do parâmetro STD – Torre de Resfriamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

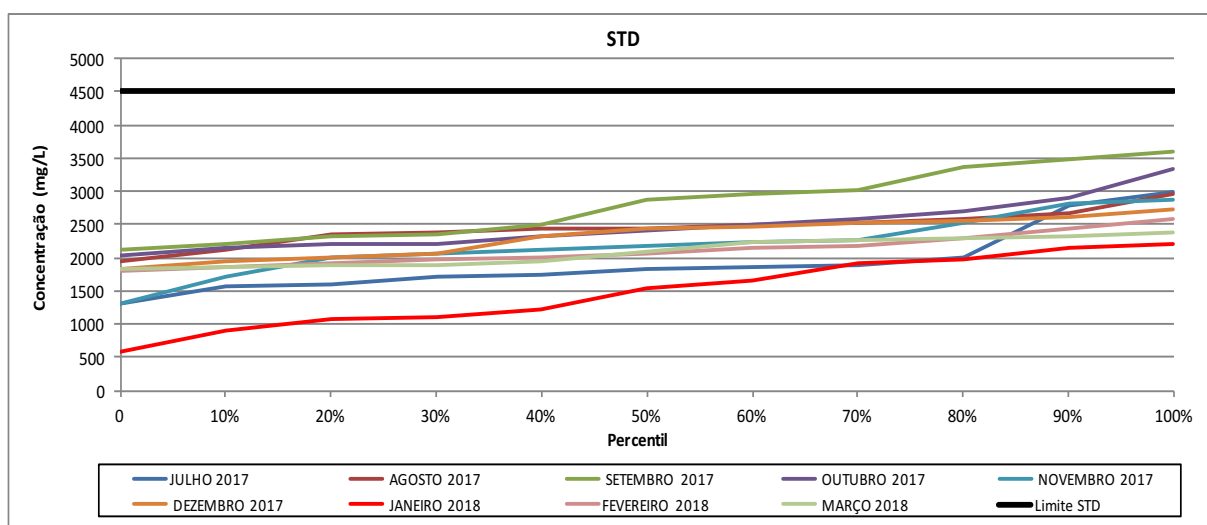


Figura 25 – Frequência acumulada de STD – Torre de Resfriamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro STD, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 26, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 27. No caso do tanque de armazenamento, esse parâmetro também obteve 100% dos dados dentro dos padrões de qualidade. Em outubro teve uma maior dispersão dos valores com desvio padrão igual a 42 mg/L. Em dezembro, por sua vez, teve uma menor dispersão com desvio padrão igual a 3 mg/L.

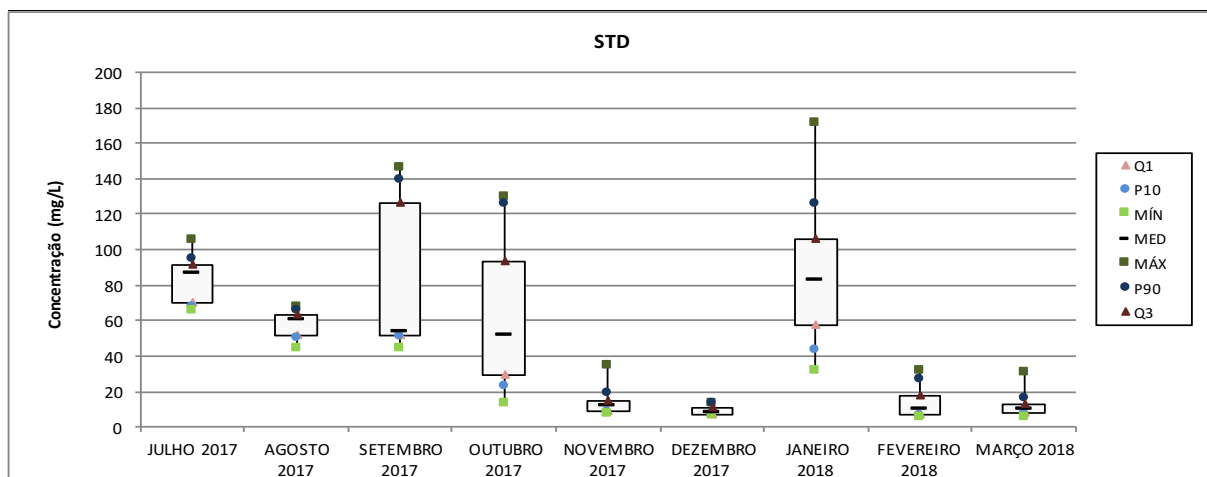


Figura 26 – Box-plot do parâmetro STD – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

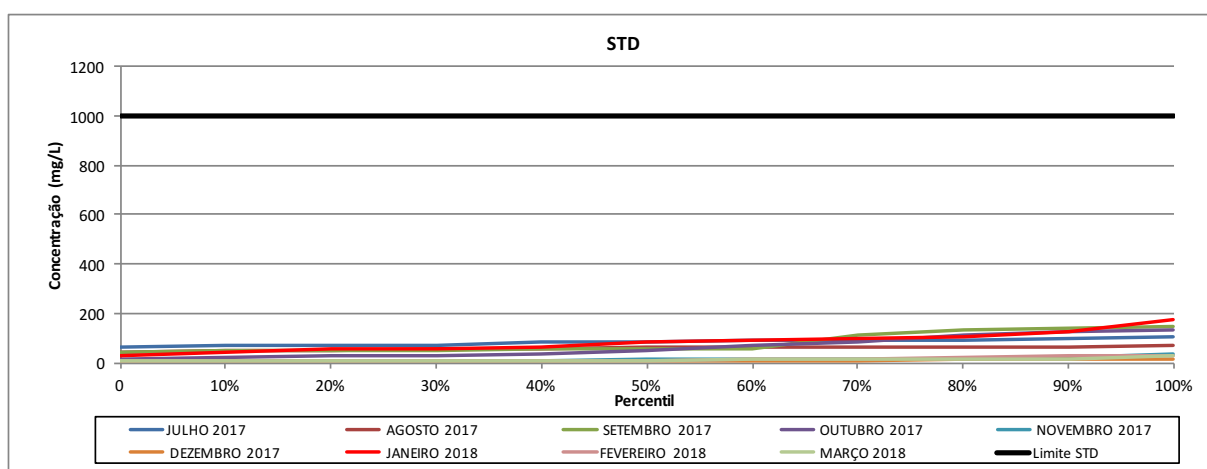


Figura 27 – Frequência acumulada de STD – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.2.4 Turbidez

Os valores mensais do parâmetro turbidez, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 28, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 29. Observa-se que de outubro a dezembro de 2017, todos os dados estiveram acima do limite estabelecido. Em fevereiro de 2018, cerca de 98% dos dados estiveram abaixo do valor máximo exigido e nos demais meses, entre 50 e 70% dos dados estiveram dentro dos padrões de qualidade.

Em julho não houve coleta de dados de turbidez, por isso os valores deram zero. Em agosto, houve uma maior amplitude dos dados. Em março houve mais homogeneidade.

A turbidez é influenciada diretamente pela dosagem de produtos. Quanto maior a quantidade de produtos, mais turva é a água. Então, quando os resultados estiveram elevados é porque houve mais dosagem de produtos visando corrigir problemas em outros parâmetros.

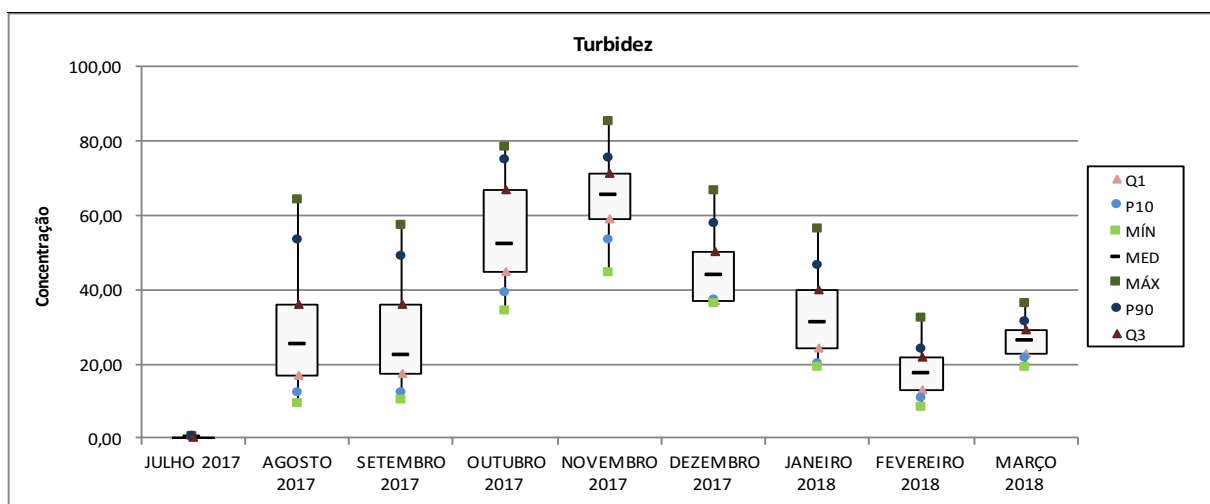


Figura 28 – Box-plot do parâmetro turbidez – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

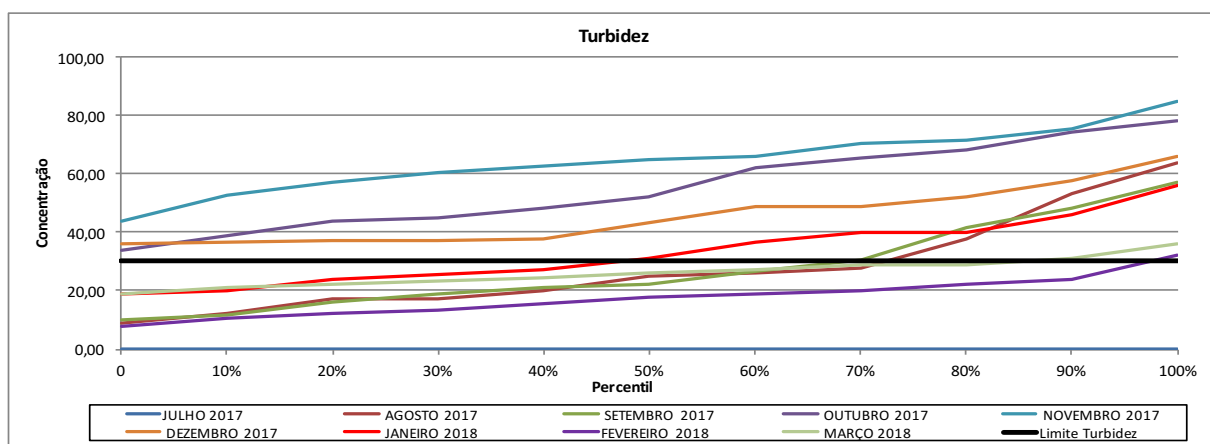


Figura 29 – Frequência acumulada de turbidez – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro turbidez, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 30, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 31. Percebe-se que em agosto e setembro apenas 20% dos dados estiveram de acordo com os padrões, em outubro cerca de 90% dos valores obtidos estiveram abaixo do limite estabelecido e nos demais meses 100% dos dados estiveram dentro dos limites.

Nesse caso, também não houve coleta de dados em julho de 2017. Em janeiro, verifica-se o maior desvio padrão. O menor desvio padrão foi obtido em novembro.

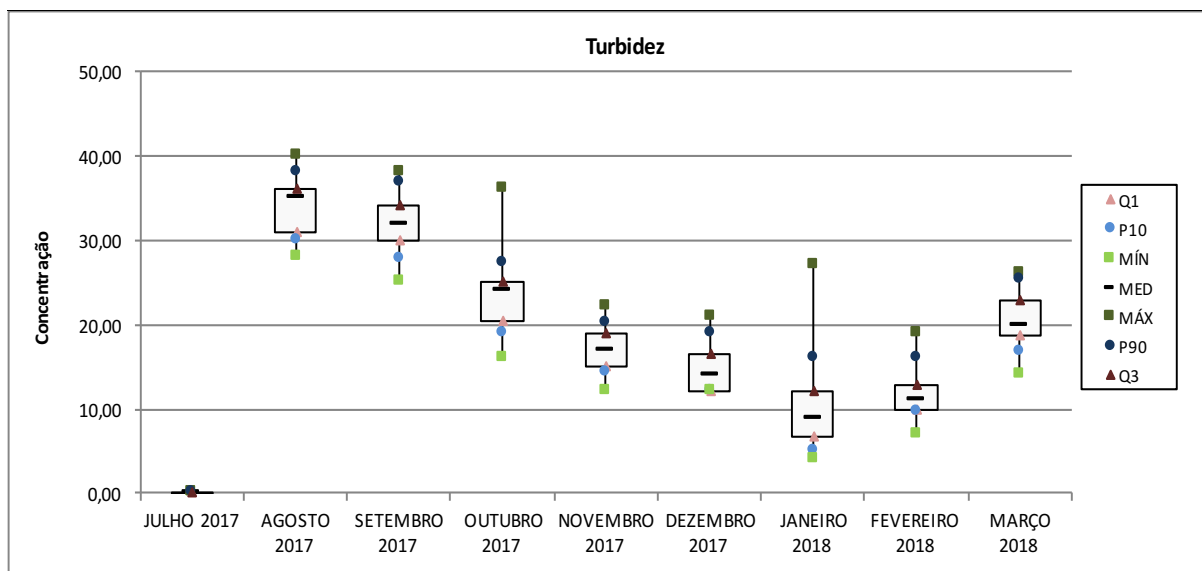


Figura 30 – Box-plot do parâmetro turbidez – Tanque de Armazenamento  
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

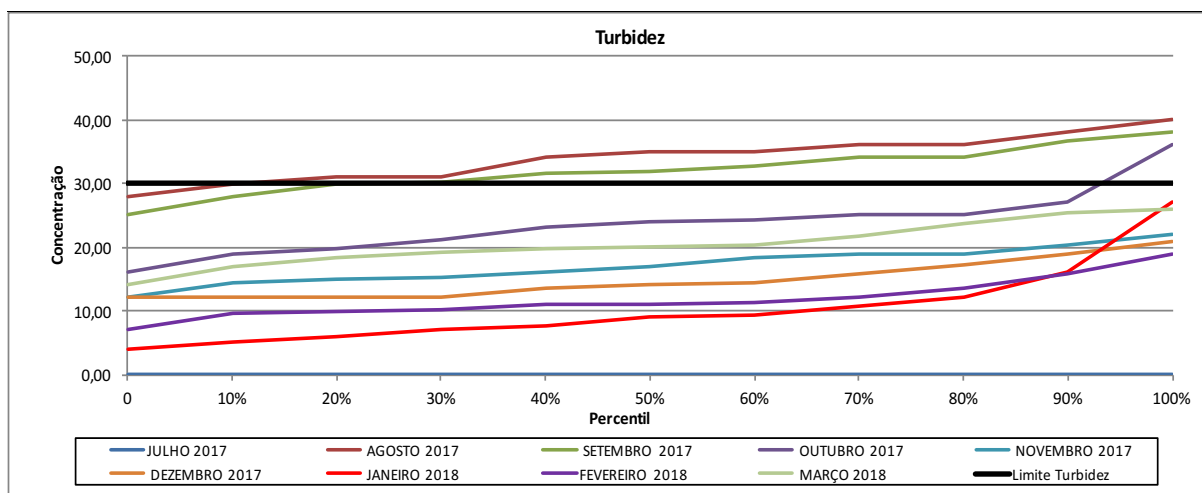


Figura 31 – Frequência acumulada da turbidez – Tanque de Armazenamento  
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.2.5 Cloro Livre

Os valores mensais do parâmetro cloro livre, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 32, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 33. É perceptível que em todos os meses houve valores abaixo do limite inferior. Em julho de 2017, obteve-se o melhor resultado com valor mínimo de 0,28. Em agosto houve o menor desvio padrão, no entanto os valores estão abaixo dos padrões exigidos.

Em fevereiro e março, 55% e 45% dos dados estiveram abaixo do limite inferior, respectivamente, apresentando uma melhoria devido a mudanças no sistema de dosagem do produto químico.

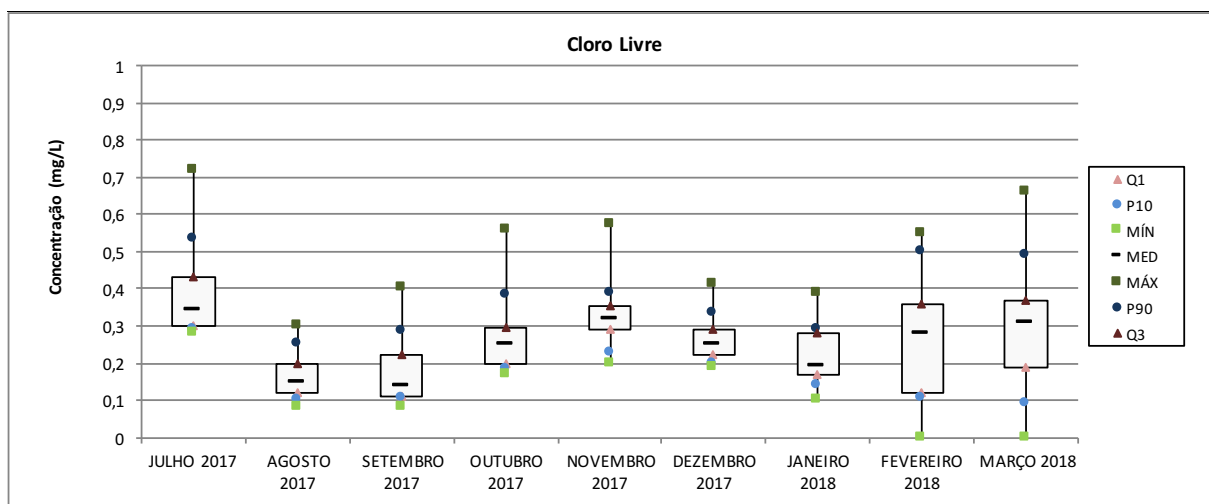


Figura 32 – Box-plot do parâmetro cloro livre – Torre de Resfriamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

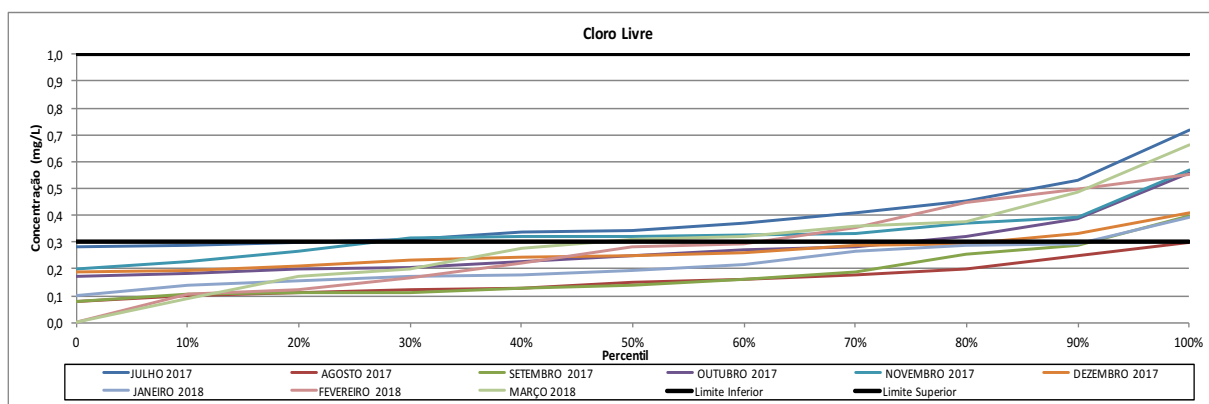


Figura 33 – Frequência acumulada de cloro livre – Torre de Resfriamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro cloro livre, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 34, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 35. Para esse caso, observa-se que 100% dos dados estiveram dentro dos padrões de qualidade. Julho e março foram os meses com maior desvio padrão, correspondendo a 0,06 mg/L. Agosto, novembro e dezembro foram os meses com menor desvio padrão, sendo de 0,02 mg/L.

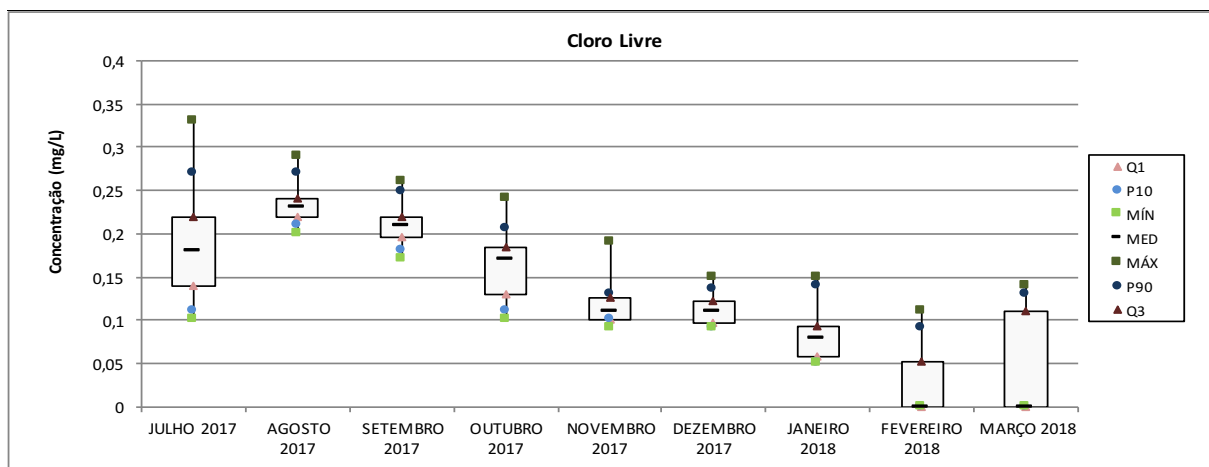


Figura 34 – Box-plot do parâmetro cloro livre – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

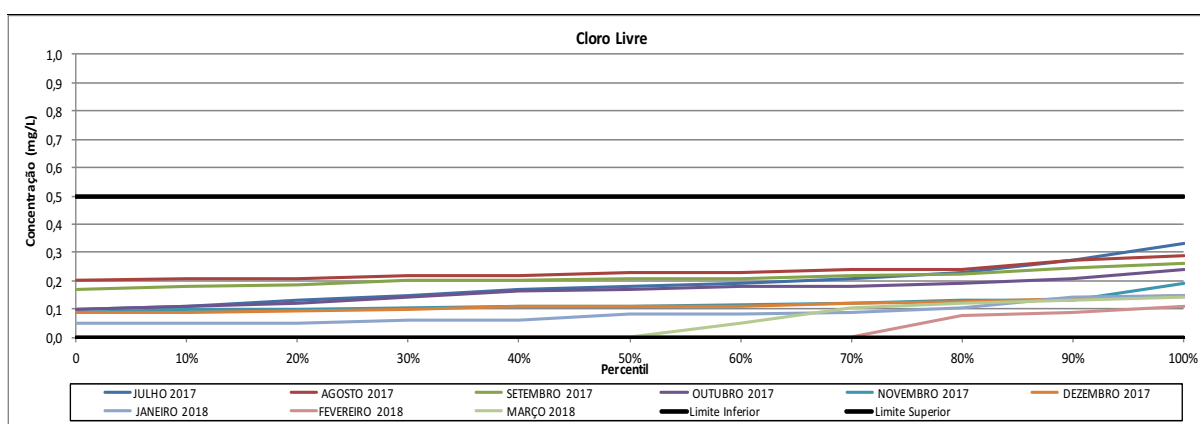


Figura 35 – Frequência acumulada de cloro livre – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.2.6 Alcalinidade

Os valores mensais do parâmetro alcalinidade, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 36, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 37. Nesse parâmetro também houve um ótimo desempenho, pois 100% dos dados estiveram abaixo do limite requerido. Em dezembro houve a maior amplitude observada com valor mínimo igual a 92 mg/L e máximo igual a 370 mg/L.

Em março nota-se uma menor amplitude, com valores mínimo e máximo de 90 e 130 mg/L, respectivamente.

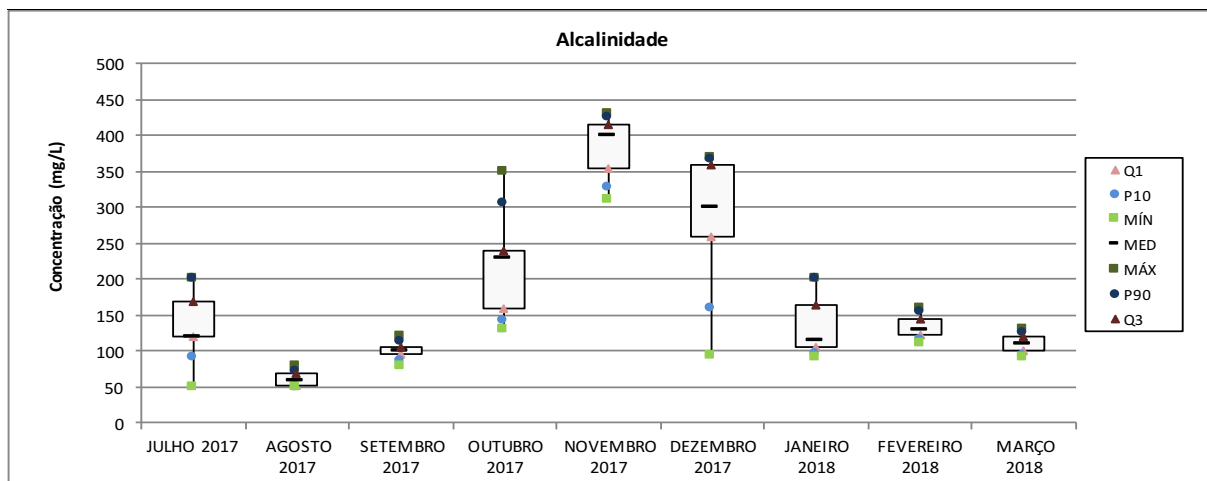


Figura 36 – Box-plot do parâmetro alcalinidade – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

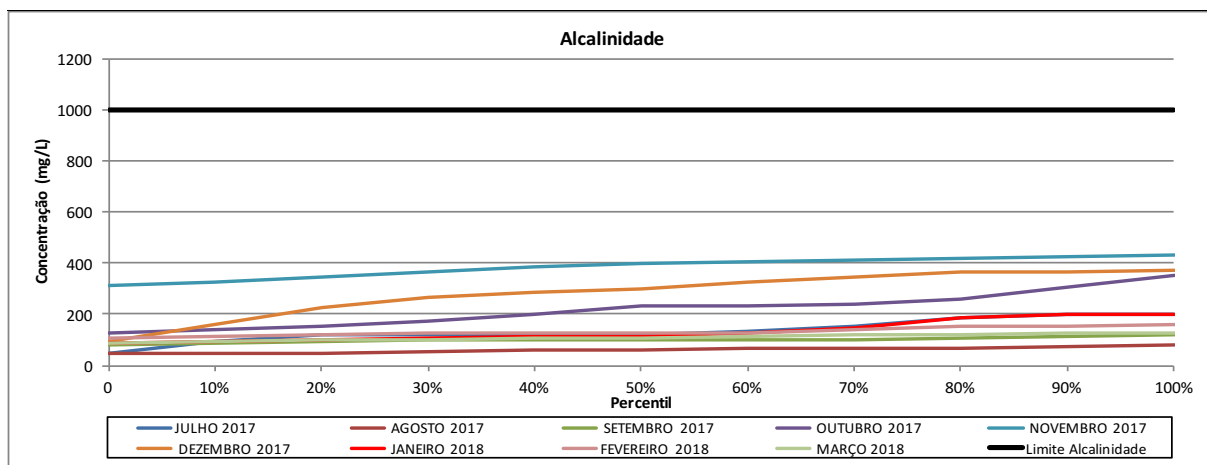


Figura 37 – Frequência acumulada de alcalinidade – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro alcalinidade, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 38, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 39. Para o caso da água proveniente do tanque de armazenamento, também se obteve 100% dos dados dentro dos padrões exigidos. Em julho, agosto e setembro os resultados foram zero, pois não era realizada análise desse parâmetro, que foi iniciada em outubro. Em outubro e dezembro só foi coletado um dado de cada mês não podendo medir variações.

Em janeiro houve uma maior amplitude com valores máximo e mínimo iguais a 80 e 35 mg/L, respectivamente.

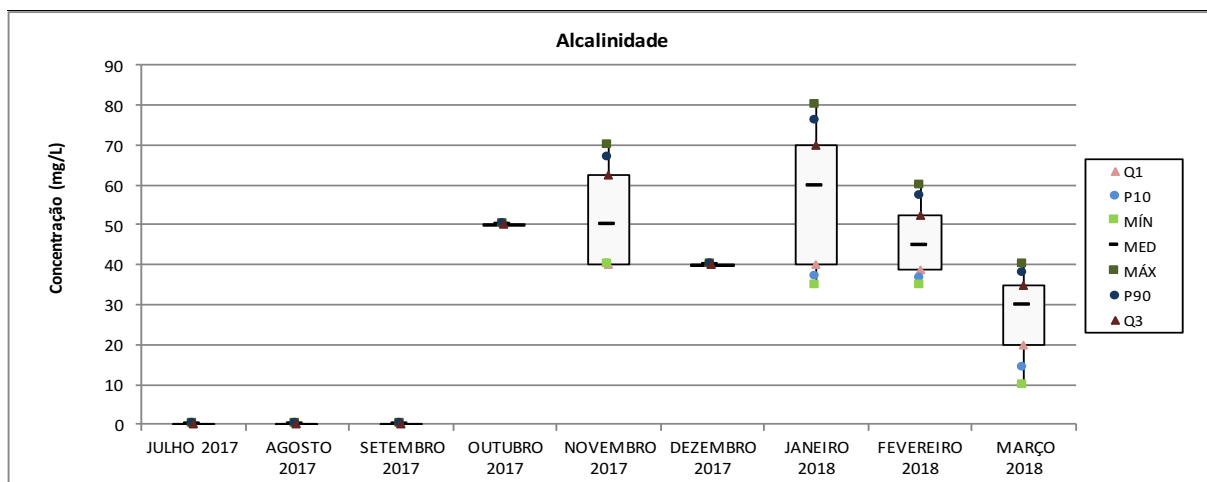


Figura 38 – Box-plot do parâmetro alcalinidade – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

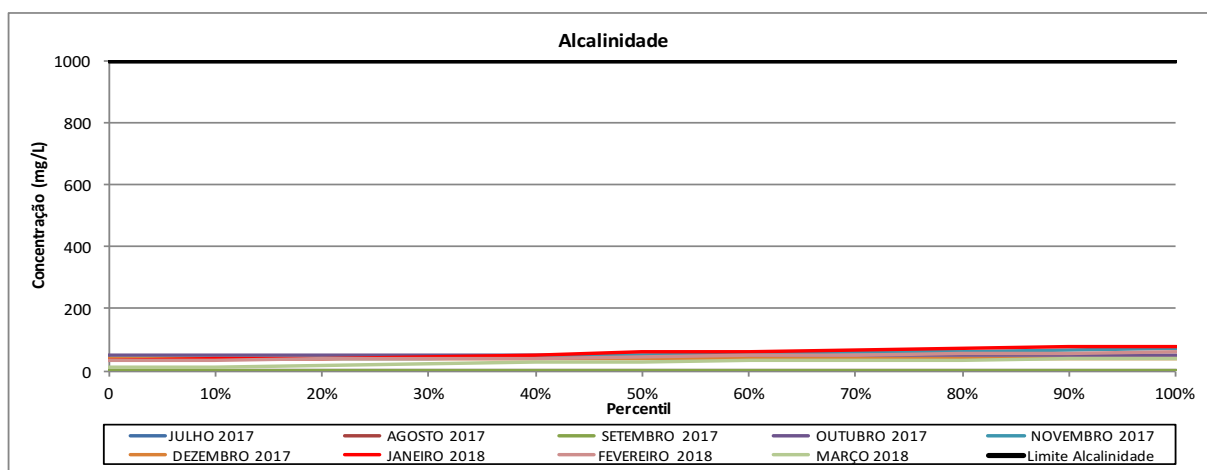


Figura 39 – Frequência acumulada de alcalinidade – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.2.7 Cloretos

Os valores mensais do parâmetro cloretos, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 40, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 41. É possível perceber que 100% dos dados de todos os meses estiveram de acordo com os padrões de qualidade da água. Sendo janeiro o mês com maior amplitude de dados, também devido às férias coletivas realizadas em dezembro, tendo a torre sido abastecida novamente em janeiro.



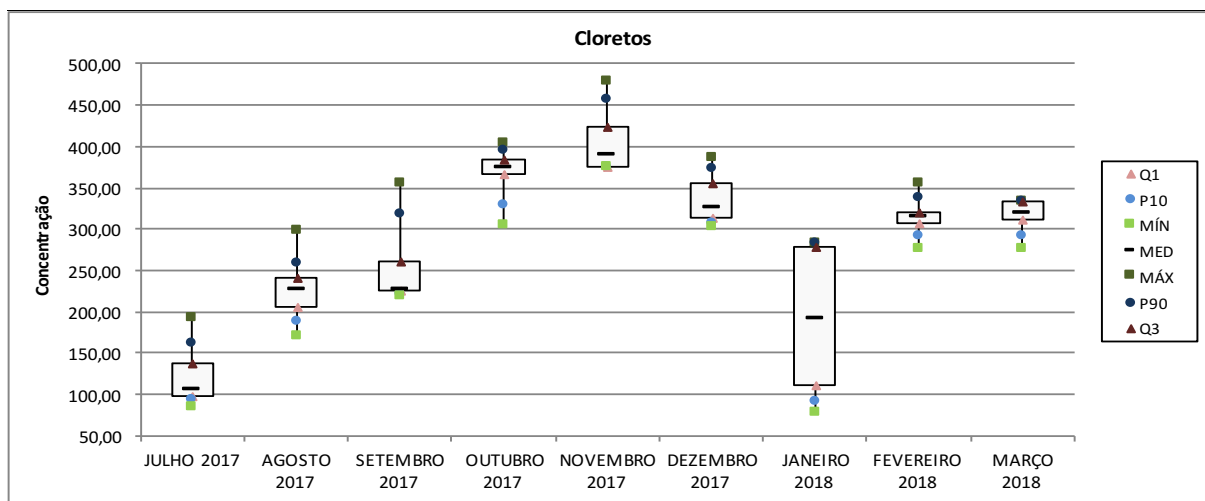


Figura 40 – Box-plot do parâmetro cloretos – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

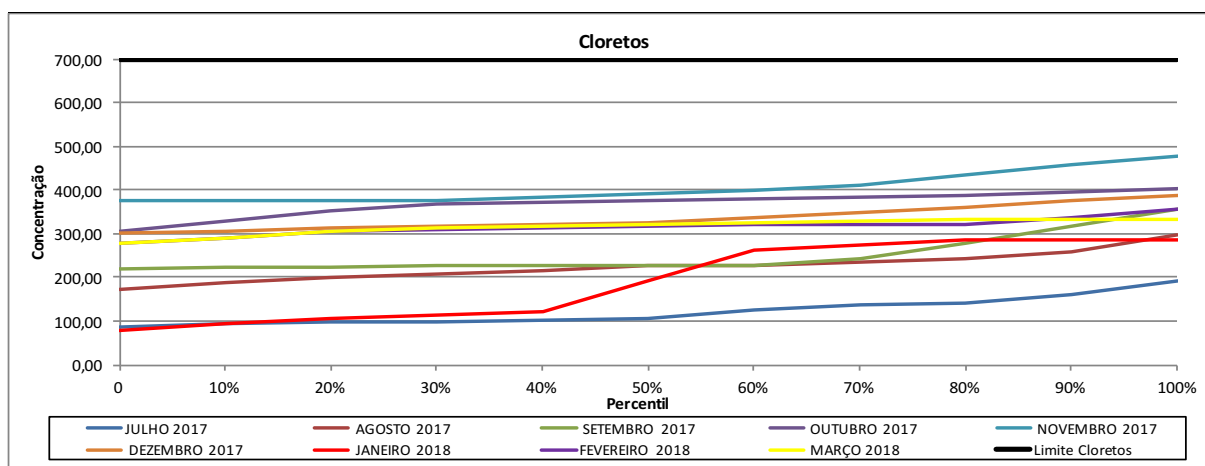


Figura 41 – Frequência acumulada de cloretos – Torre de Resfriamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro cloretos, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 42, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 43. Também para o caso da água do tanque de armazenamento, 100% dos dados estiveram de acordo com os padrões de qualidade. A análise de cloretos não era feita com essa água, foi iniciada em outubro e por isso, não houveram dados nos meses de julho, agosto e setembro. Em outubro e dezembro só obtive um dado e por isso não é possível medir variações. Em janeiro observa-se uma maior variação dos dados.

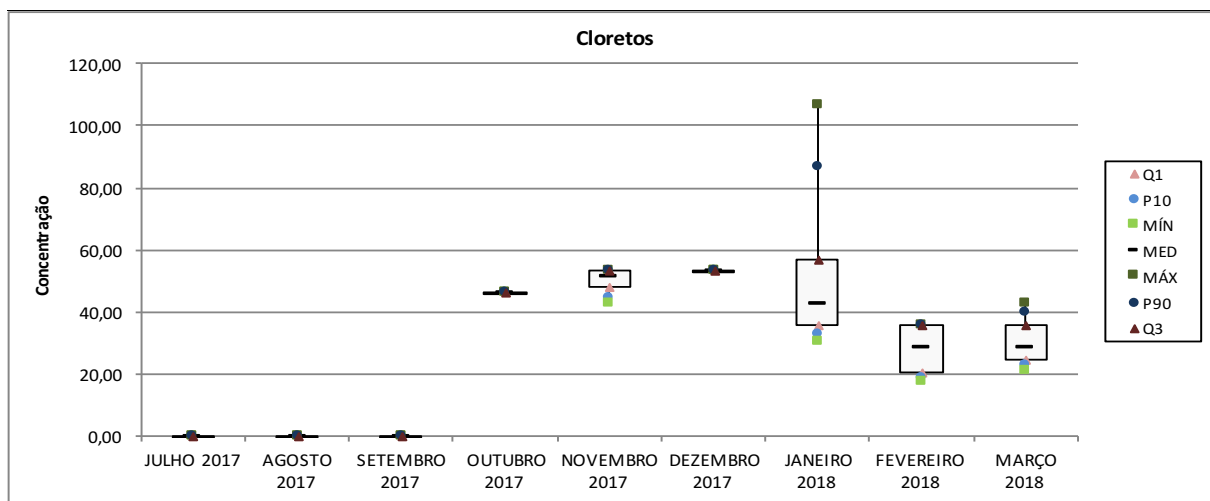


Figura 42 – Box-plot do parâmetro cloretos – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

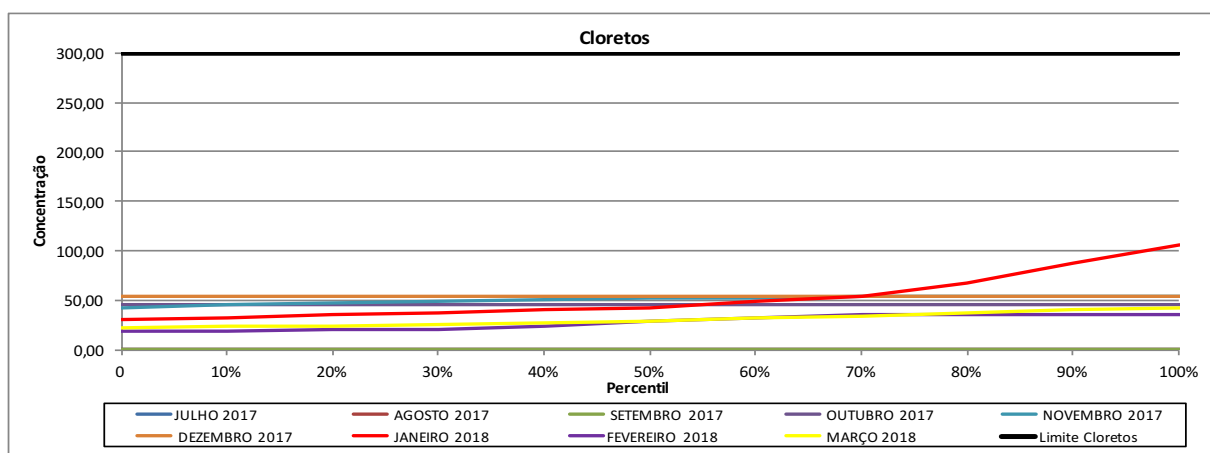


Figura 43 – Frequência acumulada de cloretos – Tanque de Armazenamento  
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.2.8 Fosfato

Os valores mensais do parâmetro fosfato, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 44, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 45. Observa-se que em agosto cerca de 70% dos dados estiveram dentro dos limites estabelecidos. Também é notório que em janeiro 10% dos valores estiveram abaixo do limite inferior determinado. Isso é consequência de altas ou baixas dosagens de produtos anticorrosivos que possuem fosfatos em sua composição.

Em agosto constata-se uma maior amplitude. Porém, o maior coeficiente de variação e o maior desvio padrão foram obtidos em janeiro.

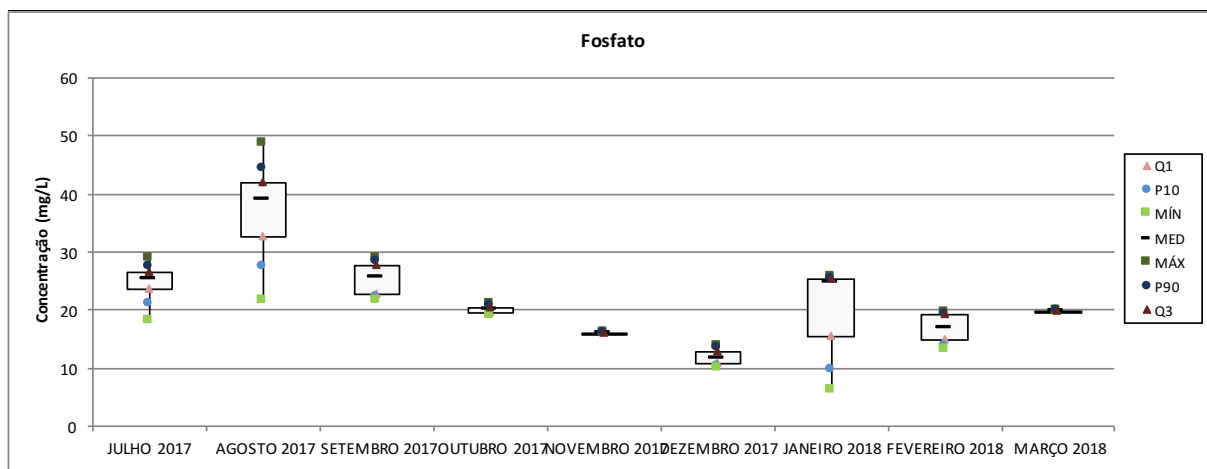


Figura 44 – Box-plot do parâmetro fosfato – Torre de Resfriamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

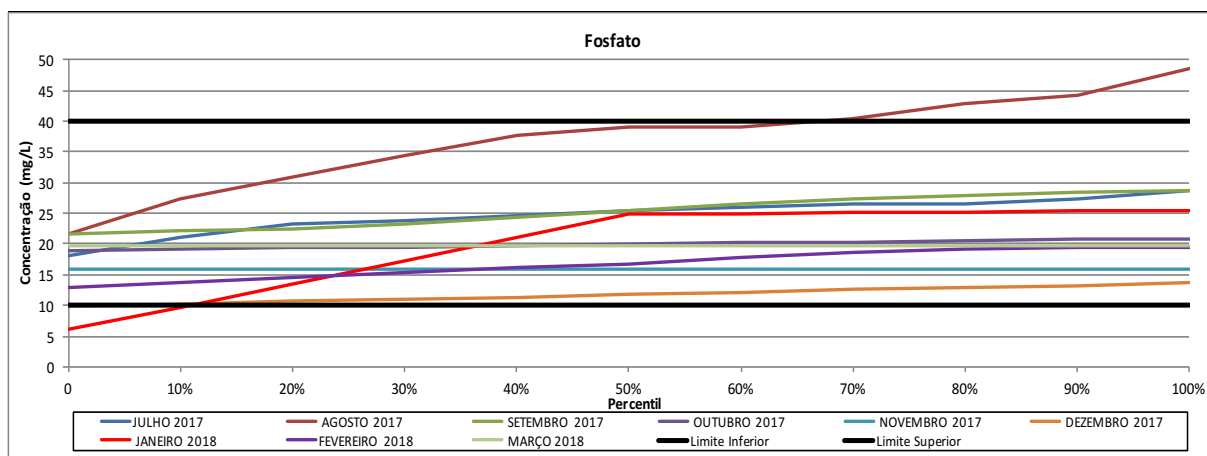


Figura 45 – Frequência acumulada de fosfato – Torre de Resfriamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os valores mensais do parâmetro fosfato, avaliados para o tanque de armazenamento, são apresentados na Figura 46, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 47. Para esse parâmetro, no caso 2, nota-se um desempenho ruim, pois os dados estão quase totalmente fora dos padrões desejados. Mais uma vez, o fosfato encontra-se presente nos produtos anticorrosivos e com isso a alta dosagem ou a baixa dosagem desse produto influencia diretamente no resultado dessa análise.

Destaca-se o mês de fevereiro com valor máximo e mínimo discrepantes e um elevado desvio.

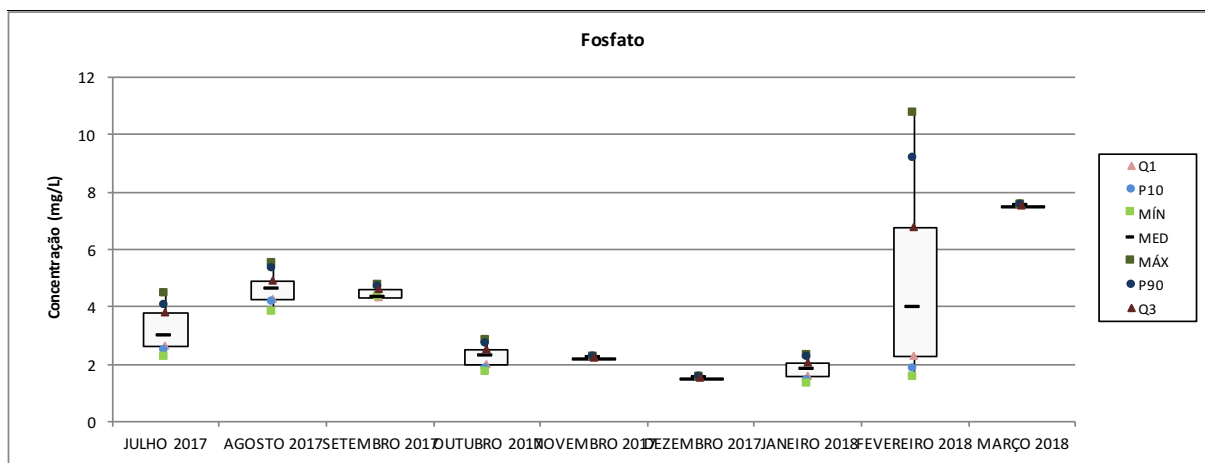


Figura 46 – Box-plot do parâmetro fosfato – Tanque de Armazenamento  
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

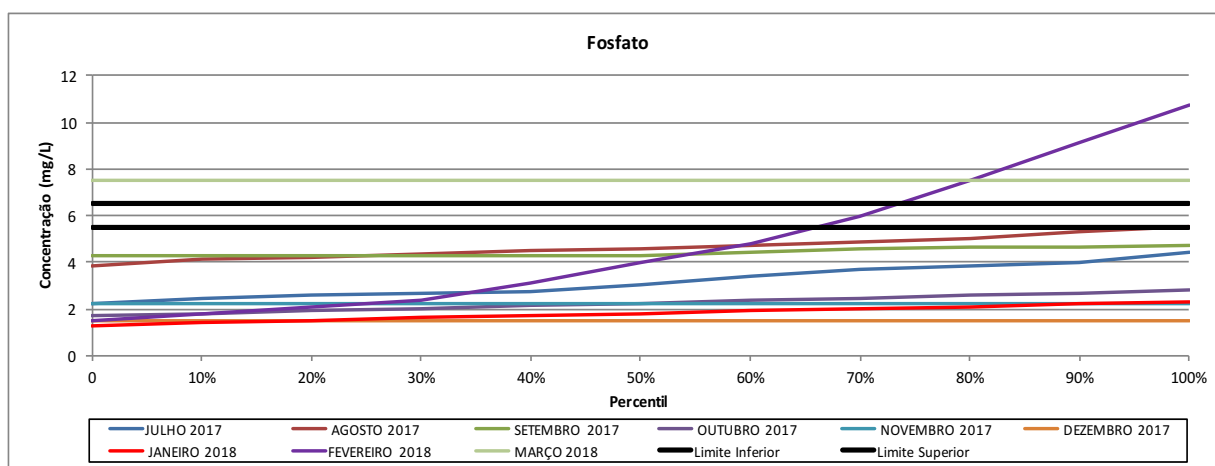
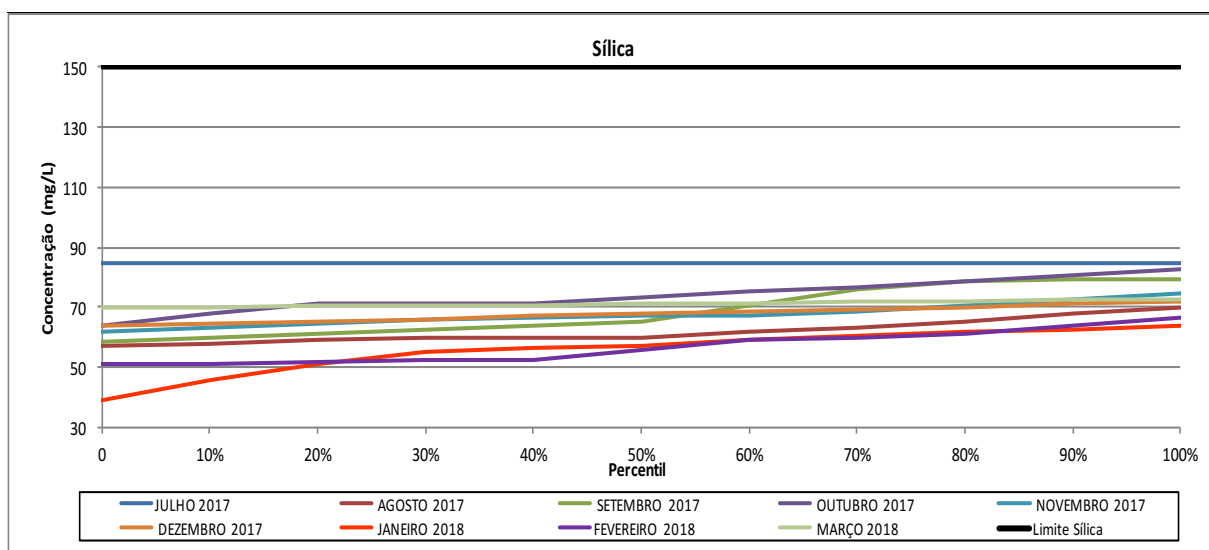
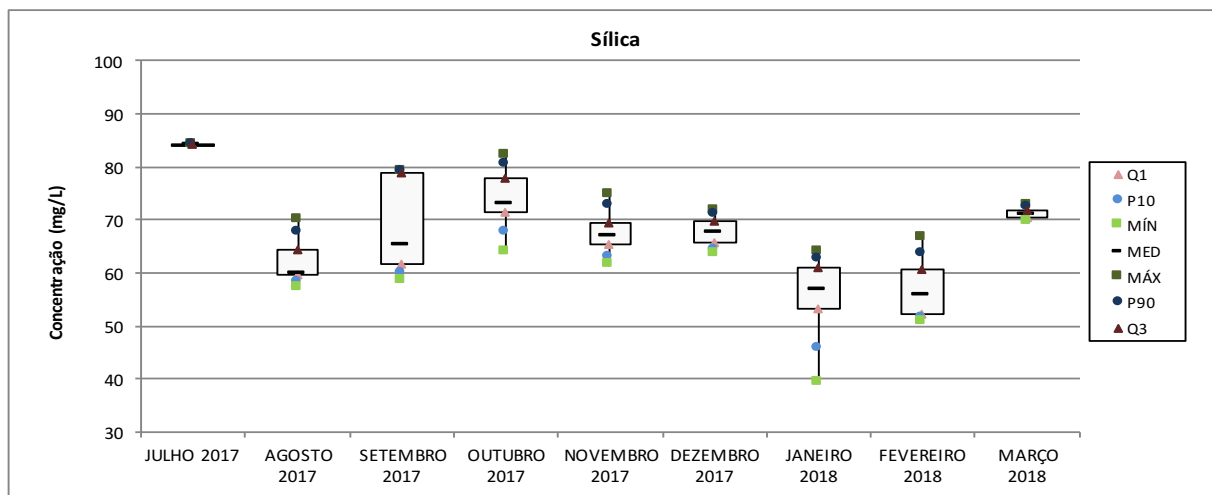


Figura 47 – Frequência acumulada de fosfato – Tanque de Armazenamento  
 Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.2.9 Sílica

Os valores mensais do parâmetro sílica, avaliados para a torre de resfriamento, são apresentados na Figura 48, sendo a frequência acumulada apresentada na Figura 49. Observa-se um ótimo desempenho nesse parâmetro, pois 100% dos dados estão dentro dos padrões de qualidade exigidos. Em janeiro há maior amplitude e em setembro percebe-se que o desvio padrão foi maior que em janeiro.

Para a água proveniente do tanque de armazenamento não é feita a análise de sílica.



### 4.3 Cálculo das Concentrações de Projeto

As Tabelas 6 e 7 apresentam os valores da média ( $\mu$ ), do desvio padrão ( $\delta$ ), do padrão de qualidade ( $X_s$ ), do resultado do cálculo do coeficiente de variação (CV), do resultado do cálculo do coeficiente de confiabilidade (CDC) e do resultado da concentração média de projeto ( $m_s$ ) para obter 95% de confiabilidade com todos os dados, sem distinção de mês, para todos os parâmetros.

Tabela 6 – Cálculo das concentrações de projeto para 95% de confiabilidade – Torre de Resfriamento

<b>Confiabilidade - Torre de Resfriamento</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\delta</math></b>	<b><math>X_s</math></b>	<b>CV</b>	<b>CDC</b>	<b><math>m_x</math></b>
<b>pH</b>	8,22	0,66	8,5	0,080	0,879	7,47
<b>Condutividade</b>	5375	1327	6000	0,247	0,690	4142,13
<b>STD</b>	2176	542,70	4500	0,249	0,688	3096,14
<b>Turbidez</b>	37,80	24,40	30	0,646	0,451	13,52
<b>Cloro</b>	0,29	0,21	1	0,724	0,424	0,42
<b>Alcalinidade</b>	151,90	97,60	1000	0,643	0,452	451,91
<b>Cloretos</b>	265,40	98,90	700	0,373	0,590	412,78
<b>Fosfato</b>	25,90	10,50	40	0,405	0,568	22,72
<b>Sílica</b>	65,80	11,00	150	0,167	0,772	115,74

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Com isso, pode-se observar que os parâmetros pH, condutividade, turbidez e fósforo estão com as suas concentrações médias acima da concentração média de projeto. Portanto, para esses parâmetros, o tratamento não atingiu 95% de confiabilidade. Portanto, para garantir que em 95% do tempo os resultados do pH, por exemplo, atingissem o padrão de qualidade de 8,5, o tratamento da água deveria ser realizado de modo que a concentração média do pH fosse 7,47.

Tabela 7 – Cálculo das concentrações de projeto para 95% de confiabilidade – Tanque de Armazenamento

<b>Confiabilidade - Tanque de Armazenamento</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\delta</math></b>	<b><math>X_s</math></b>	<b>CV</b>	<b>CDC</b>	<b><math>m_x</math></b>
<b>pH</b>	8,26	0,70	9,0	0,085	0,873	7,86
<b>Condutividade</b>	137	89	3000	0,649	0,450	1348,72
<b>STD</b>	52	29,00	1000	0,558	0,486	486,44
<b>Turbidez</b>	21,00	10,20	30	0,486	0,521	15,64
<b>Cloro</b>	0,13	0,08	0,5	0,615	0,462	0,23
<b>Alcalinidade</b>	49,00	14,70	1000	0,300	0,644	644,15
<b>Cloretos</b>	42,96	20,50	300	0,477	0,526	157,79
<b>Fosfato</b>	3,75	1,72	6,5	0,459	0,536	3,49

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Com isso, pode-se observar que os parâmetros pH, turbidez e fósforo estão com as suas concentrações médias acima da concentração média de projeto. Portanto, para esses parâmetros, o tratamento não atingiu 95% de confiabilidade. Portanto, para garantir que em 95% do tempo os resultados da turbidez, por exemplo, atingissem o padrão de qualidade igual

a 30, o tratamento da água deveria ser realizado de modo que a concentração média da turbidez fosse 15,64.

#### 4.4 Cálculo do Percentual de Atendimento aos Padrões de Qualidade

As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados do percentual de atendimento aos padrões de qualidade por meio da distribuição normal padronizada.

Tabela 8 – Cálculo do percentual atendido ao padrão de qualidade – Torre de Resfriamento

Confiabilidade - Torre de Resfriamento	$\mu$	$\delta$	$X_s$	CV	$Z_{(1-\alpha)}$	%
pH	8,22	0,66	8,5	0,080	0,458	67,6%
pH	8,22	0,66	7,0	0,080	-1,964	2,5%
Condutividade	5375	1327	6000	0,247	0,574	71,7%
STD	2176	542,70	4500	0,249	3,081	99,9%
Turbidez	37,80	24,40	30	0,646	-0,097	46,2%
Cloro	0,29	0,21	1,00	0,724	2,231	98,7%
Cloro	0,29	0,21	0,30	0,724	0,377	64,7%
Alcalinidade	151,90	97,60	1000	0,643	3,500	100,0%
Cloretos	265,40	98,90	700	0,373	2,870	99,8%
Fosfato	25,90	10,50	40	0,405	1,309	90,5%
Fosfato	25,90	10,50	10	0,405	-2,245	1,2%
Sílica	65,80	11,00	150	0,167	5,046	100,0%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Para os parâmetros de pH, cloro livre e fosfato foi feito o cálculo do percentual atendido para os limites superior e inferior. Para o pH, tem-se que 65,2% do tempo analisado os dados estiveram entre 7,0 e 8,5. Para o cloro livre, apenas 34% do tempo de estudo os dados estiveram entre 0,30 e 1,0 mg/L. Para o fosfato, 89,2% do tempo os dados estiveram entre 10 e 40 mg/L.

Constata-se que os parâmetros STD, alcalinidade, cloretos e sílica atingiram um percentual ótimo, acima de 95%. Como previsto, os demais parâmetros obtiveram um desempenho ruim, ressaltando a turbidez e o cloro que obtiveram, respectivamente, apenas 46,2% e 34% do tempo analisado os dados atenderam aos padrões de qualidade.

Tabela 9 – Cálculo do percentual atendido ao padrão de qualidade – Tanque de Armazenamento

Confiabilidade - Tanque de Armazenamento	$\mu$	$\delta$	$X_s$	CV	$Z_{(1-\alpha)}$	%
pH	8,26	0,70	9,0	0,085	1,057	85,5%
pH	8,26	0,70	7,0	0,085	-1,908	2,8%
Condutividade	137	89	3000	0,649	5,503	100,0%
STD	52	29,00	1000	0,558	5,942	100,0%
Turbidez	21,00	10,20	30	0,486	1,005	84,3%
Cloro	0,13	0,08	0,5	0,615	2,660	99,6%
Alcalinidade	49,00	14,70	1000	0,300	10,420	100,0%
Cloretos	42,96	20,50	300	0,477	4,517	100,0%
Fosfato	3,75	1,72	6,5	0,459	1,477	93,0%
Fosfato	3,75	1,72	5,5	0,459	1,095	86,3%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Novamente, para o pH e o fosfato foi feito o cálculo do percentual atendido para os limites superior e inferior de cada parâmetro. Para o pH, 82,6% do tempo de estudo, os dados estiveram dentro dos limites inferior e superior. Para o fosfato, apenas 6,7% do tempo analisado, os dados estiveram entre 5,5 e 6,5 mg/L.

Constata-se que os parâmetros condutividade, STD, cloro livre, alcalinidade e cloretos atingiram um percentual ótimo, acima de 95%. Ressaltando a condutividade, STD, alcalinidade e cloretos que atingiram 100%. Como previsto, o pH e a turbidez obtiveram um desempenho razoável. Por sua vez, o fosfato obteve um desempenho ruim como já analisado.

#### 4.5 Otimização do Tratamento de Água

Ao longo do período de estudo desse trabalho, foram realizadas algumas mudanças que impactaram nos resultados observados. A primeira delas foi uma mudança realizada na dosagem do ácido na torre de resfriamento para controle do pH. A dosagem é feita por meio de bombas dosadoras e era realizada na corrente de água de entrada da torre. Como foi observado que de outubro a dezembro o pH estava elevado e a dosagem do ácido não estava sendo suficiente para abaixar o pH, mesmo em dosagem máxima na bomba, foi feita uma mudança em que desde janeiro de 2018 o ácido é dosado diretamente na torre de resfriamento. A partir disso, obteve-se resultados satisfatórios e dentro dos padrões de qualidade.



A outra mudança foi feita no sistema de dosagem do cloro na torre de resfriamento. A dosagem é feita por meio de pastilhas de cloro e foi observado ao longo dos meses que não estava atingindo o nível desejado de cloro livre. A partir de julho de 2017 houve a troca de fornecedor desse produto químico e foi feito um estudo pela empresa para saber se o problema era no produto ou na dosagem. Eles atestaram que era na dosagem, pois essa dosagem era realizada semanalmente e em muita quantidade. No entanto, com a dosagem dos outros produtos químicos e quando se observava que a condutividade estava elevada, era feita a purga.

A purga é realizada manualmente e muitas vezes havia falha por parte do colaborador de deixar a purga sendo feita por horas, além do desejado. Com isso, a purga ocasionava na perda do cloro dosado e como era dosado apenas uma vez por semana, não era repostado, ao longo da semana se obtinha teores abaixo dos padrões mínimos exigidos. Portanto, a partir da metade de janeiro de 2018 foi feita a mudança na dosagem e, desde então, a dosagem é feita diariamente e em pouca quantidade, conseguindo obter um residual de cloro acima do padrão mínimo de qualidade exigido.

Uma sugestão a ser feita é que a purga seja feita de modo contínuo em vazão baixa, para que não haja perdas elevadas de produto químico e a troca da água seja constante na torre para manter a condutividade equilibrada e assim, melhorar os resultados obtidos para a turbidez.

## 5. CONCLUSÃO

Ao longo do tempo de estudo desse trabalho, foi possível fazer uma análise de confiabilidade do tratamento de água para o sistema de refrigeração de uma indústria de fiação e otimizar esse tratamento.

Com a análise de confiabilidade para os dois casos em estudo, ou seja, da água proveniente da torre de resfriamento e da água proveniente do tanque de armazenamento, foi possível perceber que o tratamento é confiável para alguns parâmetros, cinco deles atingiram acima de 95% de confiabilidade, porém para outros ele não está sendo suficiente para atender aos padrões de qualidade. Destaca-se para a avaliação da Torre de Resfriamento (TR), que os parâmetros cloro e a turbidez atingiram menos que 50% de confiabilidade e para o Tanque de Armazenamento (TA), o parâmetro fosfato atingiu menos que 10% de confiabilidade.

Para esses parâmetros em que o tratamento não está adequado, possivelmente é decorrente de problemas na dosagem de produtos químicos e problemas operacionais. Algumas mudanças foram realizadas ao longo do tempo de estudo desse trabalho e um maior acompanhamento é necessário para melhor avaliação de eficácia das medidas. Há também uma sugestão de melhoria pela realização de purga contínua.

Também se obteve os resultados das concentrações médias que devem ser alcançadas para cada parâmetro. Com isso, esses resultados podem ser utilizados na empresa para que os parâmetros atinjam essas concentrações e assim, o tratamento tenha 95% de confiabilidade.

Portanto, ao atingir esse nível de confiabilidade com 5% de falha, o tratamento é confiável e, desse modo, evitará problemas de corrosão, incrustação e de proliferação de microrganismos nos equipamentos de transferência de calor, ocasionando em uma eficiência de troca térmica alta, refrigerando a fábrica com um bom rendimento.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se estudar os modelos de distribuição de frequência para saber qual se adequa melhor para dados de água industrial e realizar um estudo sobre o cálculo de confiabilidade para parâmetros com limites inferior e superior.

## REFERÊNCIAS

A disponibilidade de água no mundo e no Brasil. Disponível em: <<https://saveh.com.br/artigos/a-disponibilidade-de-agua-no-mundo-e-no-brasil/>> Acesso em: 5 de março de 2018.

DANTAS, E.V. Tratamento de água de refrigeração e caldeiras. Rio de Janeiro: José Olympio, 1988.

DI BERNARDO, L. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2ª ed. São Paulo: RIMA, 2005.

HELLER, L.; PÁDUA, V.L. Abastecimento de água para consumo humano. 1ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

LIBÂNIO, Marcelo. Fundamentos de Qualidade e tratamento de água. 3ª ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.

METCALF ET EDDY. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. 3. Ed. Metcalf et Eddy. Inc., 1991. In: Nutrientes de Esgoto Sanitário: Utilização e Remoção, ABES, Cap. 11, 2009.

METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment, and reuse. New York: Metcalf & Eddy, 4a Ed., 2003, 1819p;

MONTEIRO, C. L. R..Análise da eficiência e confiabilidade em 56 estações de tratamento de esgotos localizadas na região metropolitana de Fortaleza. Dissertação. 2009.

MORIAS, Nassom W. Sales. Inventário sobre os padrões de lançamento de efluentes e reuso de água e análise de eficiência e confiabilidade de um efluente industrial. Monografia – Universidade Federal do Ceará, 2016.

MOTA, S.B.; SPERLING, M. Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

NIKU, S. et al. Performance of activated sludge process and reliability-based design, Journal Water Pollution Control Association, v. 51, n. 12, p. 2841 - 2857, 1979. In: Nutrientes de Esgoto Sanitário: Utilização e Remoção, ABES, Cap. 11, 2009.

OLIVEIRA, S.C.; VON SPERLING, M. Análise de confiabilidade de estações de tratamento de esgotos. Revista Engenharia sanitária e ambiental, v. 12, n. 4, p. 389-398, 2007.

PEGAN, Erika Viana. Reuso da Água Industrial: Estudos de Casos em Indústrias Têxteis. Monografia – Universidade Federal do Ceará, 2011.

PIVELI, R.P.; KATO, M.T. Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos. São Paulo: ABES, 2005.

Setor têxtil reduziu em 90% o uso da água na produção, na última década. Disponível em: <<http://www.administradores.com.br/noticias/negocios/setor-textil-reduziu-em-90-o-uso-da-agua-na-producao-na-ultima-decada/85711/>> Acesso em: 7 de março de 2018.

SILVA, Ruam Magalhães da. Análise de Desempenho e Confiabilidade de 19 reatores UASB operados pela CAGECE em Fortaleza e em sua região metropolitana. Monografia – Universidade Federal do Ceará, 2013.

SILVEIRA, A.G.M. Análise de Eficiência e Confiabilidade em Sistemas de Baixo Custo de Tratamento do Tipo Lagoas de Estabilização. CE. 2011.

SPERLING, Marcos von. Introdução à qualidade das águas. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005.

SPERLING, M.; PINTO, M. T.; OLIVEIRA, S.C. Síntese Global do Desempenho e da Confiabilidade dos Sistemas de Tratamento de Esgoto. In: Nutrientes de Esgoto Sanitário: Utilização e Remoção, ABES, Cap. 11, 2009.