



MARIA CAROLINA OLIVEIRA SILVA DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA OTIMIZAÇÃO NO
PROCESSO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM
UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

MARIA CAROLINA OLIVEIRA SILVA DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA OTIMIZAÇÃO NO
PROCESSO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM
UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís - MA
2019

Silva dos Santos, Maria Carolina Oliveira.

Análise estatística para otimização no processo da estação de tratamento de água em uma indústria cervejeira / Maria Carolina Oliveira Silva dos Santos. - 2019.

52 p.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

1. Otimização. 2. Six Sigma. 3. Tratamento de água.
I. Villa Vélez, Harvey Alexander. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dra. ANNAMARIA DORIA SOUZA VIDOTTI
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE S. L. COELHO
COEQ/CCET/UFMA

16 de dezembro de 2019

Dedico este trabalho a toda minha família, especialmente aos meus pais e a minha avó, por sempre acreditarem no meu potencial e me apoiar nos estudos, mostrando o valor da educação para minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por sempre estar presente na minha vida em todos os momentos, me dando forças para nunca desistir do meu propósito.

Agradeço aos meus pais, Maria José e José Ribamar, por todo o esforço e apoio na minha formação educacional.

Agradeço também a minha avó Rita, por ser essa pessoa iluminada que eu amo tanto, pelos seus conselhos e seu carinho, sempre tendo participação fundamental em todas as etapas da minha vida.

Aos meus amigos mais próximos, pelos momentos de descontração e seriedade, dando apoio e aconselhando uns aos outros nos momentos mais decisivos, sinto-me agradecida por ter vocês por perto.

Ao meu orientador, Harvey, por toda paciência e dedicação comigo, me auxiliando na conclusão deste trabalho.

DOS SANTOS, Maria Carolina. **Análise estatística para otimização no processo da Estação de Tratamento de Água em uma indústria cervejeira**. 2019. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

RESUMO

O propósito deste trabalho foi avaliar, por meio dos parâmetros analíticos, as etapas do processo de tratamento da ETA em uma indústria cervejeira, a fim de encontrar pontos de melhorias que pudessem ser implementados, visando a otimização desse processo. Para isso, utilizou-se o modelo DMAIC contido na metodologia Six Sigma, com o intuito de reduzir a taxa de defeitos nas etapas de tratamento e conseqüentemente, aumentar o desempenho do processo. A partir da coleta de dados obtidos dos últimos três anos (2017, 2018 e 2019) de 8 parâmetros do pré-tratamento e 7 parâmetros do pós-tratamento, pôde-se obter resultados médios mensais e o desvio padrão de cada parâmetro, assim como, os limites inferiores e superiores médios, LIM e LSM, respectivamente. Após isto, realizou-se uma análise da variabilidade no processo com o auxílio de cartas de controle e histogramas. Os parâmetros do pré-tratamento que apresentaram maiores desvio padrão foram o ácido carbônico, alcalinidade, condutividade e dureza da água, e no pós-tratamento foram a alcalinidade, condutividade, dureza e CO₂ livre. A redução de 15% sobre os LIM e LSM apresentou-se mais adequado quando comparada à redução de 25%, para todos os parâmetros, exceto para a alcalinidade da água bruta. Para os parâmetros que não apresentaram dispersões significativas ao longo dos anos, tal redução foi inviável, como por exemplo, o pH da água bruta e água tratada. Sendo assim, dois pontos de melhorias puderam ser avaliados: a supercloração no início do tratamento, diminuindo a incidência de matéria orgânica no sistema e a retrolavagem manual dos filtros de areia e antracito, com o intuito de remover sujidades e evitar a saturação do leito filtrante.

Palavras-chave: Tratamento de água. Six Sigma. Otimização.

DOS SANTOS, Maria Carolina. **Statistical analyses for optimization of water treatment station process in the beer industry**. 2019. 52p. Undergraduate thesis for the course of Chemical Engineering, Center of Science Exactly and Technologies, University State of Maranhão, São Luís, 2019.

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate, through analytical parameters, the stages of the WTP treatment process in a brewing industry, in order to find improvement points that could be implemented, aiming at optimizing this process. For this, we used the DMAIC model contained in the Six Sigma methodology, in order to reduce the defect rate in the treatment steps and, consequently, increase the process performance. From the collection of data obtained from the last three years (2017, 2018 and 2019) of 8 pre-treatment parameters and 7 post-treatment parameters, it was possible to obtain monthly average results and the standard deviation of each parameter, as well as the lower and upper mean limits, LML and UML, respectively, for further analysis of process variability with the aid of control charts and histograms. The pretreatment parameters that presented the highest standard deviation were carbonic acid, alkalinity, conductivity and water hardness, and after the treatment were alkalinity, conductivity, hardness and free CO₂. The 15% reduction over the LML and UML was more appropriate when compared to the 25% reduction for all parameters except raw water alkalinity. For parameters that did not show significant dispersions over the years, such reduction was not feasible, such as the pH of raw water and treated water. Thus, two points of improvement could be evaluated: overchlorination at the beginning of treatment, reducing the incidence of organic matter in the system and manual backwashing of sand and anthracite filters, in order to remove dirt and avoid saturation of the filter bed.

Keywords: Water treatment. Six-sigma. Otimization process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das águas naturais para abastecimento público.	19
Figura 2 - Principais processos e operações unitárias de tratamento de água para abastecimento público.	20
Figura 3 - Árvore CTQ.	25
Figura 4 - Diagrama de fluxo atual do processo.	25
Figura 5 - Carta de controle de ácido carbônico da água bruta.	33
Figura 6 - Carta de controle de alcalinidade da água bruta.	33
Figura 7 - Histograma do ácido carbônico da água bruta.	34
Figura 8 - Histograma da alcalinidade da água bruta.	34
Figura 9 - Carta de controle da condutividade da água bruta.	35
Figura 10 - Carta de controle da dureza da água bruta.	35
Figura 11 - Carta de controle do pH da água bruta.	36
Figura 12 - Carta de controle do pH na descarbonatação.	36
Figura 13 - Carta de controle da turbidez da água bruta.	37
Figura 14 - Carta de controle da turbidez na saída do filtro.	37
Figura 15 - Carta de controle de alcalinidade da água tratada.	38
Figura 16 - Carta de controle de CO ₂ livre na água tratada.	38
Figura 17 - Carta de controle de condutividade da água tratada.	39
Figura 18 - Carta de controle de dureza da água tratada.	39
Figura 19 - Carta de controle da matéria orgânica na água tratada.	40
Figura 20 - Carta de controle do pH da água tratada.	40
Figura 21 - Carta de controle da turbidez da água tratada.	41
Figura 22 - Diagrama de causa e efeito do processo.	42
Figura 23 - Carta de controle do ácido carbônico da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	42
Figura 24 - Carta de controle de alcalinidade da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	43
Figura 25 - Carta de controle de condutividade da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	43
Figura 26 - Carta de controle de dureza da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	44

Figura 27 - Carta de controle de pH da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	44
Figura 28 - Carta de controle de pH na decarbonatação com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	45
Figura 29 - Carta de controle de turbidez da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	45
Figura 30 - Carta de controle de turbidez na saída do filtro com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	46
Figura 31 - Carta de controle de alcalinidade da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	46
Figura 32 - Carta de controle de CO2 livre da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	47
Figura 33 - Carta de controle de condutividade da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	47
Figura 34 - Carta de controle de dureza da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	48
Figura 35 - Carta de controle de matéria orgânica da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	48
Figura 36 - Carta de controle de pH da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	49
Figura 37 - Carta de controle de turbidez da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.	49
Figura 38 - Diagrama de fluxo do processo após melhorias.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados médios de ácido carbônico da água bruta.	26
Tabela 2 - Resultados médios de alcalinidade da água bruta.	26
Tabela 3 - Resultados médios de condutividade da água bruta.	26
Tabela 4 - Resultados médios de dureza da água bruta.	27
Tabela 5 - Resultados médios de pH da água bruta.	27
Tabela 6 - Resultados médios de pH descarbonatação da água bruta.	28
Tabela 7 - Resultados médios de turbidez da água bruta.	28
Tabela 8 - Resultados médios de turbidez na saída do filtro.	28
Tabela 9 - Resultados médios de alcalinidade da água tratada.	29
Tabela 10 - Resultados médios de CO ₂ livre da água tratada.	29
Tabela 11 - Resultados médios de condutividade da água tratada.	30
Tabela 12 - Resultados médios de dureza total da água tratada.	30
Tabela 13 - Resultados médios de matéria orgânica da água tratada.	30
Tabela 14 - Resultados médios de pH da água tratada.	31
Tabela 15 - Resultados médios de turbidez da água tratada.	31
Tabela 16 - Média total, desvio padrão e limites inferior e superior médio e normativo para análises do pré-tratamento da água.	32
Tabela 17 - Média total, desvio padrão e limites inferior e superior médio e normativo para análises do pós-tratamento da água.	32

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 <i>Objetivo Geral</i>	14
2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 <i>Qualidade da água</i>	15
3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	15
3.1.1.1 Temperatura.....	15
3.1.1.2 Cor	16
3.1.1.3 Turbidez.....	16
3.1.1.4 Condutividade Elétrica	17
3.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	17
3.1.2.1 pH	17
3.1.2.2 Alcalinidade e Acidez.....	17
3.1.3 CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS	18
3.2 <i>Processos de tratamento da água</i>	18
3.3 <i>Metodologia Six Sigma</i>	21
4 MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1 <i>Material</i>	22
4.2 <i>Tratamento Estatístico – metodologia Six Sigma</i>	22
4.2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	22
4.2.2 MEDIÇÃO DOS DADOS.....	23
4.2.3 ANÁLISE DOS DADOS	23
4.2.4 MELHORIA DO PROCESSO	23
4.2.5 CONTROLE DO PROCESSO.....	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 <i>Estudo de caso</i>	24
6 CONCLUSÃO.....	50
7 REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água em uma indústria cervejeira tem fator preponderante, já que constitui a maior parcela volumétrica do produto final. Todavia, para garanti-la, o acompanhamento durante todo o processo, desde o uso de reagentes que reduzam as impurezas e constituintes desfavoráveis como também o monitoramento de cada etapa são fundamentais para o sucesso do tratamento. O acompanhamento operacional durante as fases de tratamento também favorecem a eficiência da estação, juntamente com um controle efetivo por meio dos parâmetros analíticos obrigatórios.

Tais parâmetros seguem normativas ambientais de órgãos municipais, estaduais e federais, além das especificações pré-determinadas pela própria empresa, que determinam com base em estudos prévios faixas ideais de trabalho que atendam aos requisitos ambientais competentes e garantam um produto adequado para o consumo humano. Nota-se então uma relação substancial entre a qualidade do produto e os parâmetros analíticos.

Diante de tais aspectos, o presente trabalho visa realizar uma análise estatística com o objetivo de otimizar o processo de uma Estação de Tratamento de Água numa indústria cervejeira utilizando de resultados médios das principais análises durante as etapas, buscando pontos ótimos no pré e pós tratamento (água bruta e água tratada) para minimizar variações que possam comprometer a eficiência da estação e conseqüentemente as etapas seguintes no processo de produção da cerveja. Diminuir essas dispersões significa adequar o processo conforme característica do sistema, facilitando a operação e também a identificação de anomalias decorrentes do próprio processo ou geradas por falhas, sejam elas operacionais, estruturais ou naturais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de uma ETA em uma indústria cervejeira com o intuito de otimizar o processo de tratamento por meio de uma análise estatística dos parâmetros técnicos operacionais em cada etapa.

2.2 Objetivos Específicos

- Gerar uma base histórica dos últimos 3 (três) anos com os resultados das principais análises de cada etapa do processo no pré e pós tratamento (água bruta e tratada).
- Analisar os parâmetros usando os softwares Excel 2010 e STATISTICA 7, por meio do método Six Sigma verificando as maiores variações durante o processo e associar às causas prováveis.
- Propor melhorias durante o processo a partir dos resultados encontrados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Qualidade da água

Para que se estabeleça a qualidade da água tratada com a finalidade de consumo humano, deve-se atentar para alguns parâmetros físico-químicos e microbiológicos que possam afetar na integridade de sua composição final. Além disso, o não atendimento as especificações adequadas ocasionadas pela presença ou ausência seja de microrganismos, reagentes químicos ou fatores naturais/operacionais provocam anomalias no sistema. A seguir, será comentado sobre as principais análises que devem ser monitoradas para aumentar a eficiência de tratamento de uma ETA.

3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

As características físicas da água ocasionam um maior impacto ao consumidor, já que é facilmente perceptível pelo mesmo, como na cor, gosto ou odor. A seguir são mencionados alguns parâmetros importantes para o controle e qualidade da água (LIBÂNIO, 2010).

3.1.1.1 Temperatura

Segundo Dezuane (1997, apud LIBÂNIO, 2010), a temperatura pode influenciar diretamente em outros fatores como a velocidade das reações químicas, solubilidade das substâncias, concentração do oxigênio dissolvido, metabolismo dos organismos presentes no meio, formação de subprodutos da desinfecção, intensidade da presença microbiológica e aumento da taxa de corrosão das tubulações constituintes da rede de abastecimento.

Variações de temperaturas podem ser advindas de condições climáticas características da região local ou ocasionadas por origens antrópicas, como exemplo temos o descarte de despejos industriais, principalmente oriundos de indústrias de bebidas e/ou águas de refrigeração de máquinas e caldeiras. No Brasil, para regiões tropicais, em relação ao tratamento da água apresenta vantagem, uma vez que, não há variações significativas de temperatura. Com exceção das regiões Sul e Sudeste, as demais raramente apresentam temperaturas inferiores a 18°C em água afluentes (água bruta) à estação de tratamento (LIBÂNIO, 2010).

Ainda segundo Libânio (2010) em decorrência da insignificância dos efeitos à saúde e dificuldade na alteração da temperatura de água para abastecimento de grandes populações, os padrões de potabilidade e da OMS não determinam temperatura máxima para água de consumo.

3.1.1.2 Cor

A cor constitui-se como um parâmetro visível, facilmente influenciada pela presença da matéria orgânica em excesso juntamente com a parcela húmica do solo, além disso, pode ser alterada por metais pesados como o ferro e outros, provenientes naturalmente dos mananciais, produtos de corrosão ou gerados por contaminação de efluentes industriais (HELLER e PÁDUA, 2010, vol.1).

Ainda segundo os mesmos autores, a cor pode variar conforme pH da água, sendo mais facilmente removida a valores de pH mais baixos. É considerada como cor verdadeira aquela medida sem interferências de partículas em suspensão, sendo obtida após etapa de filtração, e cor aparente aquela medida sem a remoção das partículas suspensas na água.

Conforme Libânio (2010), a cor passou a ser parâmetro de qualidade da água após evidências na década de 1970, da formação de produtos de potencial cancerígeno, como os THM's (trihalometanos), subprodutos de desinfecção em decorrência da cloração de águas com cores significativas.

3.1.1.3 Turbidez

De acordo com Von Sperling (2005, apud SILVEIRA, 2017), a turbidez é ocasionada por sólidos em suspensão, interferindo na passagem da luz através da água, conferindo aspecto turvo da mesma. Tais sólidos podem ser provenientes de origem natural (rocha, argila, microrganismos, etc.) ou de despejos domésticos, industriais e erosão.

A turbidez da água bruta é um parâmetro fundamental para selecionar a tecnologia de tratamento e controle operacional dos processos de tratamento. Valores de turbidez em torno de 8 uT são considerados imperceptíveis visualmente, já valores abaixo de 5 uT são aceitáveis para consumidores. A turbidez precisa ser baixa o suficiente para garanti a desinfecção adequada, pois as partículas orgânicas podem proteger os microrganismos e aumentar o crescimento bacteriano no sistema de distribuição, necessitando de valores menores que 1 uT,

sendo que a média ideal de turbidez deve estar concentrada abaixo de 0,1 uT (HELLER e PÁDUA, 2010, vol. 1).

3.1.1.4 Condutividade Elétrica

A condutividade também denominada condutância específica determina a capacidade da água natural de transmitir corrente elétrica em virtude da presença de substâncias solúveis que se dissociam em ânions e cátions, geralmente ferro e manganês. É expressa em $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microSiemens) (LIBÂNIO, 2010). O autor também correlaciona a condutividade com o teor de salinidade, ou seja, quanto maior a concentração iônica maior será a condutividade dessa água, característica de águas de captações subterrâneas. Valores de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ são comumente encontradas em águas naturais, podendo chegar até 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para locais com cargas elevadas de despejos industriais.

3.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

3.1.2.1 pH

Para Libânio (2010) o pH constitui-se como o parâmetro de maior frequência de monitoramento operacional nas ETA's devido a sua interferência em diferentes processos do tratamento e operações relacionadas a potabilização de água (coagulação, desinfecção, controle de corrosividade, remoção da dureza).

Segundo Von Sperling (1996), o pH indica a condição de acidez, alcalinidade e neutralidade da água, e sua variação pode advir de origens naturais como dissolução de rochas, absorção de gases atmosféricos, oxidação da matéria orgânica e fotossíntese, ou de origens antropogênicas, como despejos industriais e domésticos. É comumente utilizado para caracterizar águas de abastecimento brutas e tratadas, águas residuárias brutas e corpos d'água, além de auxiliar efetivamente no controle operacional da estação de tratamento de água (coagulação e grau de incrustação/corrosão) e esgotos (digestão anaeróbia).

3.1.2.2 Alcalinidade e Acidez

Heller e Pádua (2010, vol.1) conceituam a alcalinidade e acidez como a capacidade da água em neutralizar bases e ácidos, respectivamente. É importante ter conhecimento da acidez

da água, pois na etapa final de tratamento pode ser necessária a adição de alcalinizantes para manter a estabilidade do carbonato de cálcio, evitando as incrustações nas tubulações e problemas de corrosão no sistema de distribuição. Já a alcalinidade possui influência na coagulação química durante o tratamento da água, pois os principais coagulantes usados (sulfato de alumínio e cloreto férrico) possuem caráter ácido. Dessa forma, se a alcalinidade da água estiver muito baixa, será necessária a adição de coagulante, caso contrário, a coagulação com cloreto férrico será mais eficiente.

3.1.3 CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS

A presença de microrganismos em águas naturais torna-se relevante na medida em que podem ocasionar a transmissão de inúmeras doenças, além de transformar a matéria orgânica em outros elementos, como o nitrogênio (LIBÂNIO, 2010).

Bactérias coliformes, como *E. coli*, cianobactérias e protozoários são exemplos de microrganismos que podem afetar a qualidade da água e conseqüentemente ser prejudicial ao consumo humano. Ações preventivas como a pré-cloração para minimizar a quantidade de matéria orgânica no início do tratamento e uso de coagulantes químicos auxiliam na inibição desses seres (LIN, 2007).

3.2 Processos de tratamento da água

Lin (2007) aborda sobre alguns fatores que interferem na escolha da tecnologia mais adequada para o tratamento de águas naturais. Arelado a isso, o autor também explica que a função principal da estação de tratamento de água consiste em remover a matéria orgânica e qualquer outra substância que possa vir a prejudicar a saúde humana. Sendo assim, deve-se definir uma tecnologia de tratamento que atenda às características da água de origem com os menores custos de implantação, operação e manutenção, e que não gere maiores impactos ambientais nas redondezas da estação.

Alguns fatores devem ser levados em consideração na definição da tecnologia de tratamento, como: a característica da água bruta captada, o custos de implantação, operação e manutenção, manuseio e confiabilidade dos equipamentos, flexibilidade operacional, localização geográfica, características da comunidade e a disposição final do lodo (LIBÂNIO, 2010).

O autor aborda também sobre a classificação das águas naturais para abastecimento público elaborado pela ABNT de 1990, onde baseados em 5 parâmetros (DBO, concentração de coliformes, pH, cloretos e fluoretos) determina linhas básicas de tratamento, de acordo com a figura 1 abaixo.

Figura 1 - Classificação das águas naturais para abastecimento público.

Parâmetro/Tipos de Água	A	B	C	D
Descrição	Subterrâneas ou superficiais, bacias protegidas atendendo ao padrão de potabilidade quanto aos demais parâmetros	Subterrâneas ou superficiais, bacias não protegidas atendendo ao padrão de potabilidade após tratamento sem coagulação	Superficiais, bacias não protegidas, exigindo coagulação para atendimento do padrão de potabilidade	Superficiais, bacias não protegidas, sujeitas a fonte de poluição, exigindo processos especiais de tratamento
DBO5 média (mg/L)	< 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 4,0	> 4,0
DBO5 máxima em qualquer amostra (mg/L)	1 – 3	3 – 4	4 – 6	> 6
Coliformes Totais média mensal em qualquer mês (NMP/100 mL)	50 – 100	100 – 5000	5000 – 20000	> 20000
Coliformes Totais máxima (NMP/100 mL)	> 100 em menos de 5% das amostras	> 5000 em menos de 20% das amostras	> 20000 em menos de 5% das amostras	X
Cloretos	< 50	50 – 250	250 – 600	> 600
pH	5 - 9	5 - 9	5 - 9	3,8 – 10,3
Fluoretos	< 1,5	1,5 – 3,0	> 3,0	X

Fonte: LIBÂNIO (2010, p. 137).

Sendo o tratamento do tipo A – desinfecção e correção de pH; tipo B – desinfecção, correção de pH e sedimentação simples desde que o efluente se enquadre no padrão de potabilidade ou filtração (precedido ou não de decantação) para águas afluentes à estação com turbidez inferior a 40 uT e cor aparente a 20 uC; tipo C – coagulação, seguida ou não de decantação, filtração rápida, desinfecção e correção de pH e tipo D – tratamento mínimo tipo C e complementar apropriado a cada caso.

Sabogal-Paz (2010) avalia a tecnologia de tratamento de água natural em função dos riscos (microbiológicos e físicos) e eficiência da ETA baseado nos seguintes fatores: qualidade da água bruta, vazão afluente à ETA, tipo de ETA, variáveis de risco a serem reduzidos, processos e operações de tratamento de água para combater o risco, tipos de tecnologias de tratamento de água, produtos químicos utilizados no tratamento, legislação federal brasileira, particularidades da área de estudo e desempenho e limitações das estações. Heller e Pádua (2010, vol.2) apresentam as principais etapas de tratamento de águas naturais, descrevendo para cada uma os seus princípios fundamentais, como mostra a figura 2.

Figura 2 - Principais processos e operações unitárias de tratamento de água para abastecimento público.

Processo/ operação unitária	Descrição/finalidade
Micropeneiramento	Passagem da água por peneiras com malhas de pequena abertura, visando a remoção de material particulado.
Oxidação/aeração	Oxidar matéria orgânica e inorgânica presente na água, facilitando sua remoção posterior.
Adsorção	Remover compostos orgânicos e inorgânicos indesejáveis, incluindo os que causam sabor e odor, fazendo a água entrar em contato com uma substância adsorvente (em geral carvão ativado).
Troca iônica	Destinado a remover contaminantes inorgânicos presentes na água, fazendo-a passar por uma coluna contendo material sintético especial (resina).
Coagulação	Adição de coagulante, visando desestabilizar impurezas presentes na água e facilitar o aumento do tamanho das mesmas na etapa de floculação.
Floculação	Agitação da água realizada após a coagulação, com o objetivo de promover o contato entre as impurezas e, assim, aumentar o tamanho das mesmas.
Decantação	Passagem da água por tanques, no fundo dos quais as impurezas ficam depositadas.
Flotação	Arraste das impurezas para a superfície de um tanque, por meio da ação de microbolhas.
Filtração em meio granular	Remoção de material particulado presente na água, fazendo-a passar por um leito contendo meio granular (usualmente areia e/ou antracito).
Filtração em membrana	Remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, incluindo material dissolvido, passando a água por membranas com abertura de filtração inferior a 1µm (ver Figura 12.33).
Desinfecção	Processo destinado a inativar microrganismos patogênicos presentes na água.
Abrandamento	Processo destinado a reduzir a dureza da água e remover alguns contaminantes inorgânicos.
Fluoretação	Adição de compostos contendo o íon fluoreto, com a finalidade de combater a cárie infantil.
Estabilização química	Acondicionamento da água, com a finalidade de atenuar efeitos corrosivos ou incrustantes no sistema abastecedor e nas instalações domiciliares.

Fonte: Heller e Pádua (2010, vol. 2, p.534).

Para a potabilização da água, três fases primordiais são necessárias, sendo elas: clarificação, filtração e desinfecção. Dependendo da qualidade da água bruta, apenas a etapa de desinfecção é suficiente para atender aos padrões de potabilidade, como é o caso da maioria dos mananciais subterrâneos. A etapa de clarificação engloba a coagulação, floculação e decantação, objetivando remover os sólidos suspensos e parcela dos sólidos dissolvidos. Por conseguinte, a filtração removendo o restante de sólidos dissolvidos no meio, como microrganismos e por fim a desinfecção, inativando organismos patogênicos (LIBÂNIO, 2010).

Conforme Heller e Pádua (2010, vol.2) os coagulantes geralmente empregados são o sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso clorado, sulfato férrico e o hidróxi-cloreto de alumínio (HCA ou PAC). Os autores ainda afirmam que o desconhecimento da dosagem adequada do coagulante pode comprometer o desempenho da ETA.

3.3 Metodologia Six Sigma

Montgomery e Woodall (2008, apud NOORI e LATIFI, 2017) definem a metodologia Six Sigma como uma abordagem aplicada a projetos para reduzir a variação e o defeito do processo, ou seja, aumentar a sua capacidade. Ainda segundo Noori e Latifi (2017), esse método foi desenvolvido pela primeira vez na Motorola Inc. em 1986, com o intuito de melhorar a qualidade do processo e reduzir a taxa de defeitos. Em sua pesquisa, eles avaliam a implantação do método em uma indústria automotiva e afirmam em seus resultados o sucesso da metodologia.

Conger (2015) define técnicas do Six Sigma por meio de um estudo de caso, mostrando como elas podem melhorar processos deficientes, removendo etapas desnecessárias e identificando processos ineficientes ou etapas ineficazes. Dessa forma, podem-se determinar quais etapas devem ser focadas para melhoria do processo.

Ganguly (2012) aborda sobre a aplicação do método em uma grande empresa de alumínio, utilizando da metodologia DMAIC (do inglês, *Define, Measure, Analyze, Improve and Control*) no projeto para definir as principais causas do problema encontrado, identificando fontes de variações e aplicando planos de controle, a fim de buscar maneiras mais econômicas dentro do processo e melhor utilização de seus recursos. A metodologia citada é dividida nas seguintes etapas, conforme Stamatis (2004, apud FINAMORE JR, 2008):

- *Define*: o foco desta fase é a identificação dos problemas e situações que possam ser melhoradas nos processos com o intuito de atender as expectativas dos clientes da organização, sejam estes afetados por baixa qualidade do produto ou serviço entregue. É realizada uma correlação entre a realidade atual com a situação desejada, a partir de um mapeamento do processo, analisando áreas de retrabalho, atividades que não agregam valor ao resultado final, atividades que estão fora do padrão de mercado, seja por tempo ou uso de recursos e também problemas com recursos humanos específicos dentro do processo.
- *Measure*: nesta fase são discutidos os procedimentos para coletar as informações do processo que posteriormente serão analisados na fase de análise. A partir desta coleta, é possível avaliar o desempenho atual do processo, verificando as variações encontradas, sejam elas comuns ou especiais. O primeiro tipo refere-se a variações que acontecem por instabilidade do processo devido a fatores – recursos humanos,

máquinas, procedimentos, materiais e meio ambiente; já o segundo tipo são variações que ocorrem de maneira imprevisível, que não se pode controlar ou prever.

- *Analyze*: é a consolidação dos pontos de melhorias identificadas na fase Define e as coletas de informações checadas na fase Measure. Em conjunto, elas permitem tirar conclusões sobre as melhorias que devem ser priorizadas, identificar as origens dos problemas e principalmente, os verdadeiros benefícios das melhorias mapeadas.
- *Improve*: propor melhorias no processo baseados nos resultados das fases anteriores e implementá-las, analisando o custo benefício dessas mudanças ou ajustes. Posteriormente deve ser checado o desempenho do processo, comparando-o com a situação anterior aos ajustes, para então validar a implementação, que deve ser constante no decorrer do tempo.
- *Control*: com as melhorias implementadas, deve-se aplicar medidas de controle durante o processo, com o objetivo de monitorar cada etapa a fim de tomar ações preventivas para problemas previamente analisados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Por motivo de sigilo de dados oficiais da indústria em estudo, foram utilizados resultados médios mensais de alguns parâmetros analíticos (ácido carbônico, alcalinidade, condutividade, dureza, pH, turbidez, CO₂ livre e matéria orgânica), no pré e pós-tratamento, água bruta e água tratada, respectivamente, no período de janeiro/2017 a outubro/2019, com o intuito de conter um conjunto de dados relevantes e significativos para posterior análise.

Para o tratamento dos dados foram utilizados os softwares STATISTICA, versão 7.0 (Copyright StatSoft, Inc. 1984-2004) e Microsoft Excel 2010.

4.2 Tratamento Estatístico – metodologia Six Sigma

4.2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Inicialmente foi montada a árvore CTQ, associando a necessidade de melhoria no processo com os fatores de qualidade e seus respectivos requisitos para alcançá-los, juntamente com o fluxograma do processo, definindo todas as etapas atuais e melhorar a

compreensão das mesmas, na busca de pontos de melhorias.

4.2.2 MEDIÇÃO DOS DADOS

Em seguida, houve o tratamento dos dados coletados, a fim de obter uma média total e desvio padrão para cada parâmetro no decorrer dos três anos e calcular com base nesses resultados os limites inferiores e superiores médio, LIM e LSM, respectivamente, conforme desempenho do processo e compará-lo com os limites inferiores e superiores normativos, LIN e LSN, respectivamente, determinados pelo padrão técnico de processos (PTP) da empresa e de potabilidade.

4.2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Após tratamento dos dados, os mesmos foram analisados por meio de gráficos de frequência e cartas de controle, com o intuito de avaliar as faixas de trabalho mais recorrentes do processo, bem como quais parâmetros apresentaram maiores variações ao longo do tempo e com isso, montar um diagrama de causa e efeito (Ishikawa) para mapear as principais causas associadas à variabilidade do processo (efeito). Dessa forma, um teste de hipótese foi aplicado com o intuito de minimizar a variação de cada parâmetro, aplicando uma redução percentual de 15% e 25% sobre o LIM e LSM, para avaliar a dispersão dos resultados em relação aos novos limites médios dos dados.

4.2.4 MELHORIA DO PROCESSO

Cartas de controle foram plotadas com os novos LIM e LSM e juntamente com as análises pertinentes para o melhor desempenho do processo, alguns ajustes foram mapeados e simulados visando otimizar a eficiência da estação.

4.2.5 CONTROLE DO PROCESSO

Por fim, um novo diagrama do processo foi montado com as devidas modificações realizadas a partir das melhorias propostas na fase anterior.

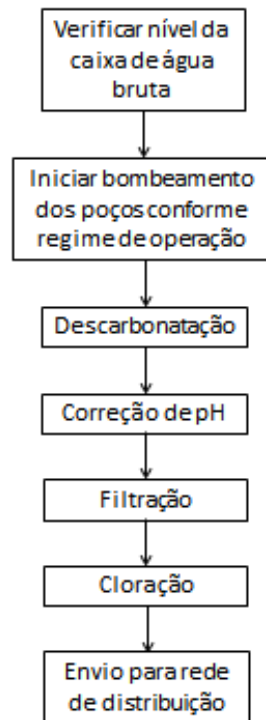
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estudo de caso

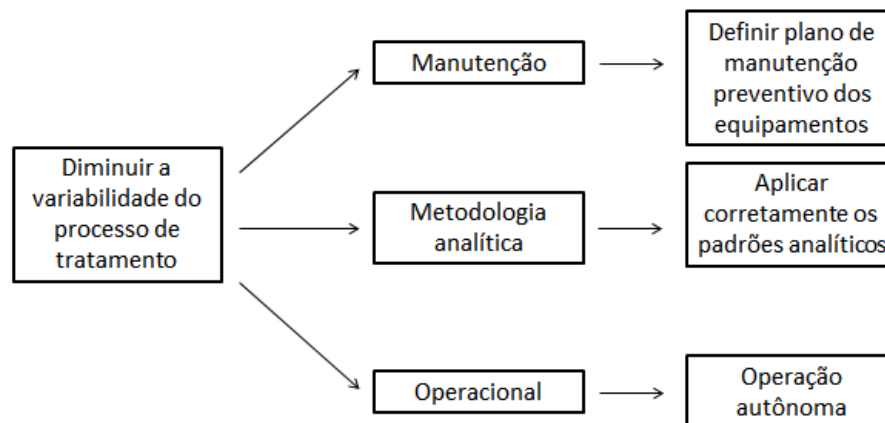
Foi analisado o desempenho de uma Estação de Tratamento de Água em uma indústria cervejeira no Estado do Maranhão, avaliando os parâmetros analíticos nas etapas inicial e final do processo. Alguns desses parâmetros apresentaram variações significativas no decorrer dos meses, despertando o interesse por compreender os fatores que ocasionaram tais mudanças e encontrar uma maneira mais adequada de eliminá-las, adequando o sistema conforme característica do processo.

A água é proveniente de captação subterrânea, sendo alimentada por cinco poços, com uma vazão média de alimentação de 220 m³/h. A estação possui tratamento simples, uma vez que, as características da água bruta não exigem etapas mais complexas. O processo inicia-se pela captação da água bruta, seguindo para o descarbonatador, tendo a função de reduzir a dureza da água captada. Em seguida é realizada a correção do pH, adicionando cal hidratada, para posterior etapa de filtração, em filtros de areia e antracito, retirando excesso de matéria orgânica. Por fim, já nas caixas de água tratada é feita a desinfecção com hipoclorito de sódio e ser distribuído para a cervejaria. O fluxograma desse processo de tratamento de água atual é esquematizado na figura 3.

A seguir, foi montada a árvore CTQ, baseado no problema foco do processo analisado (alta variabilidade de parâmetros no tratamento da água), estratificando os fatores de qualidade para resolução desse problema e associando cada fator aos requisitos de desempenho, de acordo com a figura 4. Foi verificada a necessidade de melhorias no pilar manutenção, uma vez que, a maioria dos equipamentos apresentava-se comprometidos, seja por desgaste natural ou forçado, sendo este último consequência da deficiência de manutenção autônoma da operação, ocasionando paradas durante o tratamento para correção dessas anomalias. Além disso, as falhas durante execução dos procedimentos analíticos (como por exemplo, quantidades equivocadas de reagentes e soluções, além de pontos de amostragens em campo incorretos) comprometiam os resultados obtidos, diminuindo a confiabilidade e impossibilitando tomadas de ações efetivas para resolução das anomalias avaliadas.

Figura 3 - Diagrama de fluxo atual do processo.

Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 4 - Árvore CTQ.

Fonte: Próprio autor (2019).

A partir de um conjunto de dados analíticos adquiridos, obteve-se um resultado médio em cada mês para 8 análises no pré-tratamento (água bruta) e 7 análises no pós-tratamento (água tratada) nos anos de 2017, 2018 e 2019, como mostram as tabelas 1 a 15. Vale ressaltar que para os meses que não apresentaram resultados, foi considerado o valor médio total a fim

de facilitar na plotagem das cartas de controle e posterior análise das mesmas, sem que houvesse interferência no resultado final.

Tabela 1 - Resultados médios de ácido carbônico da água bruta.

	Resultados (mg/L)		
	2017	2018	2019
Janeiro	16,48	5	15,15
Fevereiro	15,45	7,15	12
Março	13,87	10,25	12,95
Abril	13,03	15,35	15,85
Mai	15,18	0,75	12,15
Junho	18,1	10,1	14,8
Julho	15,03	15,35	15,05
Agosto	21,7	13,4	15,33
Setembro	13,79	15,55	13,79
Outubro	13,79	19,85	13,79
Novembro	13,79	19,5	
Dezembro	13,79	11,8	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 2 – Resultados médios de alcalinidade da água bruta.

	Resultados (mg/L)		
	2017	2018	2019
Janeiro	16,03	18,18	21,25
Fevereiro	19,60	18,18	15,15
Março	12,83	18,18	25,62
Abril	13,83	18,18	13,93
Mai	17,00	18,18	20,25
Junho	15,00	18,18	17,30
Julho	17,80	14,42	13,72
Agosto	20,44	17,35	18,27
Setembro	18,18	18,20	18,18
Outubro	18,18	15,45	18,18
Novembro	18,18	24,87	
Dezembro	18,18	31,57	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 3 – Resultados médios de condutividade da água bruta.

	Resultados ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		
	2017	2018	2019
Janeiro	38,75	30,28	25,02
Fevereiro	48,13	30,28	15,28
Março	55,93	30,28	21,00

Abril	34,20	30,28	21,30
Mai	25,80	30,28	19,70
Junho	24,13	30,28	26,98
Julho	25,83	35,65	45,06
Agosto	22,00	26,70	39,52
Setembro	30,28	30,27	30,28
Outubro	30,28	29,87	30,28
Novembro	30,28	30,00	
Dezembro	30,28	24,94	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 4 – Resultados médios de dureza da água bruta.

	Resultados (mg/L)		
	2017	2018	2019
Janeiro	10,50	19,59	25,40
Fevereiro	10,90	19,59	21,50
Março	8,27	19,59	22,97
Abril	7,90	19,59	21,93
Mai	9,78	19,59	25,07
Junho	14,28	19,59	20,75
Julho	15,35	29,80	8,63
Agosto	14,64	32,37	18,50
Setembro	19,59	23,23	19,59
Outubro	19,59	28,10	19,59
Novembro	19,59	32,82	
Dezembro	19,59	28,32	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 5 - Resultados médios de pH da água bruta.

	Resultados		
	2017	2018	2019
Janeiro	5,51	5,22	4,65
Fevereiro	6,66	5,22	4,65
Março	6,18	5,22	4,95
Abril	4,65	5,22	4,95
Mai	6,05	5,22	5,03
Junho	5,02	5,22	4,80
Julho	4,91	4,63	6,78
Agosto	5,66	4,70	5,03
Setembro	5,22	4,97	5,22
Outubro	5,22	5,32	5,22
Novembro	5,22	5,00	
Dezembro	5,22	4,73	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 6 – Resultados médios de pH decarbonatação da água bruta.

	Resultados		
	2017	2018	2019
Janeiro	6,88	7,14	6,85
Fevereiro	6,98	7,23	6,84
Março	6,84	6,87	6,76
Abril	7,03	6,53	6,74
Mai	6,93	6,51	6,56
Junho	6,96	7,03	6,97
Julho	7,00	6,97	6,58
Agosto	6,99	6,88	7,25
Setembro	6,90	7,12	6,90
Outubro	6,90	7,04	6,90
Novembro	6,90	7,11	
Dezembro	6,90	6,52	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 7 - Resultados médios de turbidez da água bruta.

	Resultados (NTU)		
	2017	2018	2019
Janeiro	0,63	1,40	0,46
Fevereiro	0,42	1,40	7,46
Março	0,49	1,40	0,59
Abril	0,36	1,40	0,52
Mai	0,21	1,40	0,04
Junho	0,34	1,40	0,14
Julho	0,35	0,24	0,33
Agosto	3,14	5,51	0,26
Setembro	1,40	0,25	1,40
Outubro	1,40	0,31	1,40
Novembro	1,40	8,27	
Dezembro	1,40	0,53	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 8 - Resultados médios de turbidez na saída do filtro.

	Resultados (NTU)		
	2017	2018	2019
Janeiro	0,30	0,32	0,31
Fevereiro	0,30	0,29	0,32
Março	0,30	0,31	0,33
Abril	0,33	0,31	0,31
Mai	0,31	0,30	0,18
Junho	0,32	0,33	0,29

Julho	0,30	0,32	0,24
Agosto	0,29	0,30	0,33
Setembro	0,30	0,30	0,30
Outubro	0,30	0,31	0,30
Novembro	0,30	0,29	
Dezembro	0,30	0,28	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 9 - Resultados médios de alcalinidade da água tratada.

	Resultados (mg/L)		
	2017	2018	2019
Janeiro	2,00	15,00	0,00
Fevereiro	3,00	12,00	4,30
Março	5,79	9,60	1,40
Abril	5,79	5,80	1,60
Mai	7,00	4,00	2,90
Junho	9,00	7,80	2,80
Julho	11,00	6,00	7,90
Agosto	1,00	6,30	3,40
Setembro	5,79	6,20	5,79
Outubro	5,79	14,00	5,79
Novembro	5,79	3,80	
Dezembro	5,79	2,80	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 10 - Resultados médios de CO₂ livre da água tratada.

	Resultados (mg/L)		
	2017	2018	2019
Janeiro	22,00	2,00	10,00
Fevereiro	21,00	5,00	11,50
Março	8,12	7,45	10,00
Abril	8,12	2,00	12,00
Mai	5,00	0,00	13,00
Junho	6,20	1,00	14,00
Julho	8,00	1,00	11,00
Agosto	2,00	8,00	11,00
Setembro	8,12	7,00	8,12
Outubro	8,12	5,00	8,12
Novembro	8,12	5,00	
Dezembro	8,12	11,00	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 11 - Resultados médios de condutividade da água tratada.

	Resultados ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		
	2017	2018	2019
Janeiro	54,00	83,50	90,30
Fevereiro	55,00	97,00	82,45
Março	121,32	98,00	255,80
Abril	121,32	95,00	204,40
Mai	98,00	96,00	151,50
Junho	46,15	99,00	262,10
Julho	89,00	121,32	197,20
Agosto	52,10	121,32	166,60
Setembro	121,32	121,32	121,32
Outubro	121,32	121,32	121,32
Novembro	121,32	132,00	
Dezembro	121,32	164,00	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 12 - Resultados médios de dureza total da água tratada.

	Resultados (mg/L)		
	2017	2018	2019
Janeiro	12,00	9,20	12,80
Fevereiro	11,90	8,30	12,75
Março	14,27	16,30	13,90
Abril	14,27	16,60	16,20
Mai	17,30	12,00	15,60
Junho	19,50	11,00	12,40
Julho	13,20	23,00	15,60
Agosto	18,00	20,00	18,00
Setembro	14,27	22,00	14,27
Outubro	14,27	0,00	14,27
Novembro	14,27	9,00	
Dezembro	14,27	14,50	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 13 - Resultados médios de matéria orgânica da água tratada.

	Resultados (mg/L)		
	2017	2018	2019
Janeiro	0,03	0,30	0,78
Fevereiro	0,05	0,60	1,24
Março	0,66	0,49	1,16
Abril	0,66	0,36	1,05
Mai	0,88	0,29	0,91
Junho	0,95	0,08	0,92

Julho	0,30	0,66	1,05
Agosto	0,25	0,66	1,13
Setembro	0,66	0,66	0,66
Outubro	0,66	0,66	0,66
Novembro	0,66	0,80	
Dezembro	0,66	0,92	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 14 - Resultados médios de pH da água tratada.

	Resultados		
	2017	2018	2019
Janeiro	6,65	6,81	6,54
Fevereiro	6,65	6,73	6,75
Março	6,63	6,61	6,59
Abril	6,67	6,64	6,77
Maiο	6,71	6,83	6,84
Junho	6,70	6,75	6,86
Julho	6,75	6,73	6,81
Agosto	6,77	6,88	6,72
Setembro	6,74	6,75	6,74
Outubro	6,74	7,00	6,74
Novembro	6,74	6,71	
Dezembro	6,74	6,74	

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 15 - Resultados médios de turbidez da água tratada.

	Resultados (NTU)		
	2017	2018	2019
Janeiro	0,19	0,21	0,20
Fevereiro	0,21	0,23	0,20
Março	0,19	0,20	0,17
Abril	0,20	0,24	0,19
Maiο	0,20	0,24	0,19
Junho	0,20	0,22	0,26
Julho	0,20	0,20	0,23
Agosto	0,22	0,20	0,24
Setembro	0,21	0,21	0,21
Outubro	0,21	0,20	0,21
Novembro	0,21	0,21	
Dezembro	0,21	0,17	

Fonte: Próprio autor (2019).

As tabelas 16 e 17 mostram a média total e o desvio padrão para cada análise no decorrer dos três anos, bem como o LIM e LSM, calculado a partir da diferença (limite

inferior) e soma (limite superior) entre a média e o desvio. O LIN e LSN foram adquiridos de acordo com as especificações técnicas disponibilizadas pela empresa. Posteriormente, as cartas de controle foram plotadas conforme informações dessas duas últimas tabelas mencionadas com o intuito de facilitar a análise do processo em questão, onde o eixo x contém os meses dos anos representados da seguinte forma – meses de 2017, de 0 a 12, meses de 2018, de 13 a 24 e meses de 2019, de 25 a 36, como mostram as figuras 5 a 21.

Tabela 16 - Média total, desvio padrão e limites inferior e superior médio e normativo para análises do pré-tratamento da água.

	Média	Desvio Padrão	LIM	LSM	LIN	LSN
Ácido carbônico (mg/L)	13,79	3,94	9,85	17,73	0,5	30
Alcalinidade (mg/L)	18,18	3,63	14,55	21,81	-	-
Condutividade (µS/cm)	30,28	8,03	22,25	38,3	-	-
Dureza (mg/L)	19,59	6,52	13,07	26,11	-	-
pH	5,22	0,52	4,7	5,74	-	-
pH descarbonatação	6,9	0,19	6,71	7,09	6	8
Turbidez (NTU)	1,4	1,94	-0,54	3,34	-	-
Turbidez saída do filtro (NTU)	0,30	0,03	0,27	0,33	-	0,5

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 17 - Média total, desvio padrão e limites inferior e superior médio e normativo para análises do pós-tratamento da água.

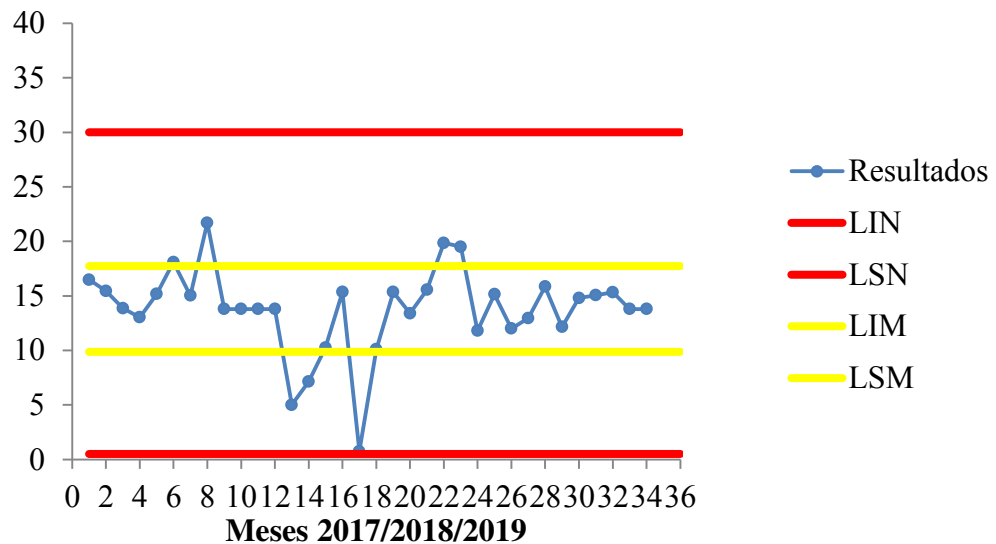
	Média	Desvio Padrão	LIM	LSM	LIN	LSN
Alcalinidade (mg/L)	5,79	3,52	2,27	9,32	-	50
CO2 livre (mg/L)	8,12	4,92	3,2	13,04	-	30
Condutividade (µS/cm)	121,32	50,24	71,08	171,56	-	400
Dureza (mg/L)	14,27	4,19	10,08	18,46	-	160
Matéria orgânica (mg/L)	0,66	0,31	0,35	0,98	-	1,5
pH	6,74	0,09	6,65	6,82	6	8
Turbidez (NTU)	0,21	0,02	0,19	0,23	-	1

Fonte: Próprio autor (2019).

Observa-se nas cartas de controle do ácido carbônico e alcalinidade da água bruta, figuras 5 e 6 respectivamente, picos de variações ao longo dos anos, ocasionado por incorporação de dióxido de carbono na água bruta (proveniente do ar atmosférico ou decomposição de matéria orgânica no meio). Nota-se também um valor atípico (*outlier*) no mês de maio/2018 para o ácido carbônico, que pode ter sido ocasionado por algum problema

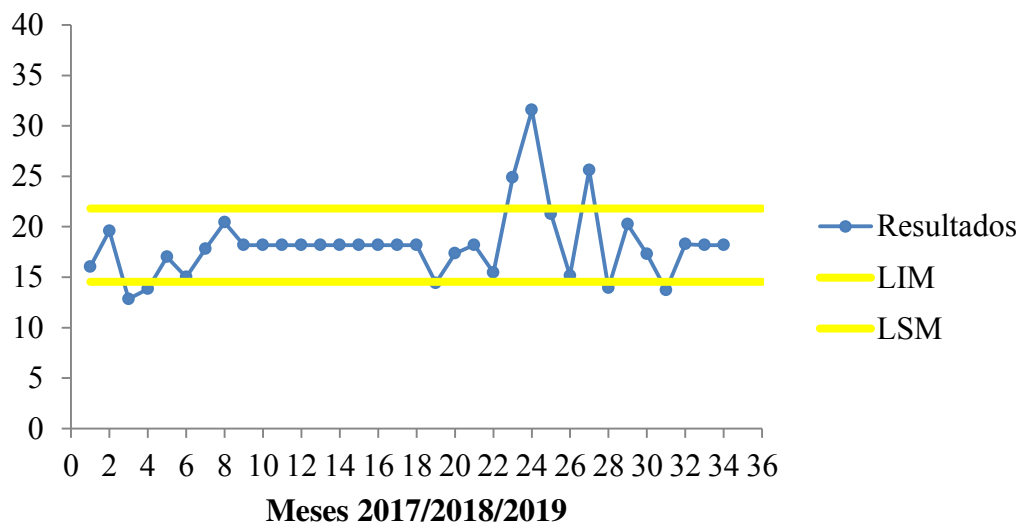
pontual nessa etapa do tratamento ou erro analítico. Os histogramas destes parâmetros refletem essa anomalia, onde os pequenos agrupamentos separados uns dos outros representam anormalidades no processo, como mostram as figuras 7 e 8.

Figura 5 – Carta de controle de ácido carbônico da água bruta.

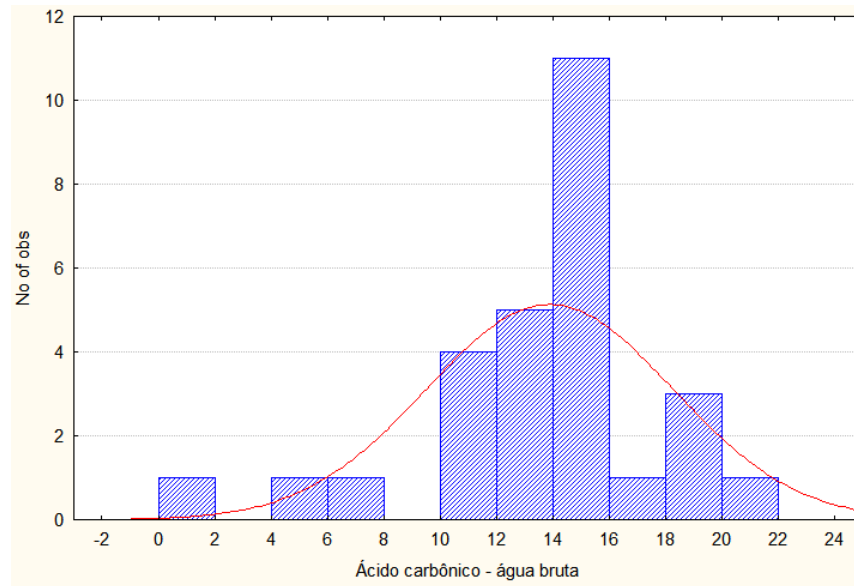


Fonte: Próprio autor (2019).

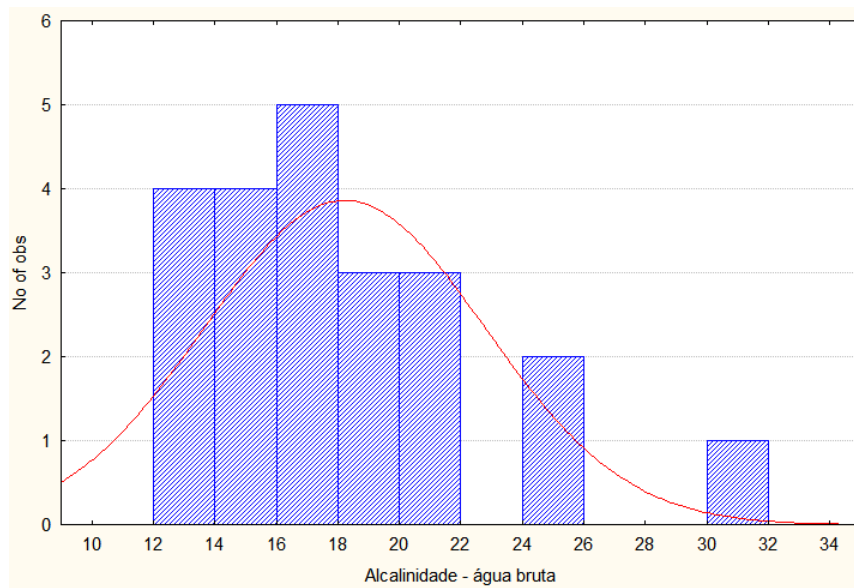
Figura 6 – Carta de controle de alcalinidade da água bruta.



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 7 – Histograma do ácido carbônico da água bruta.

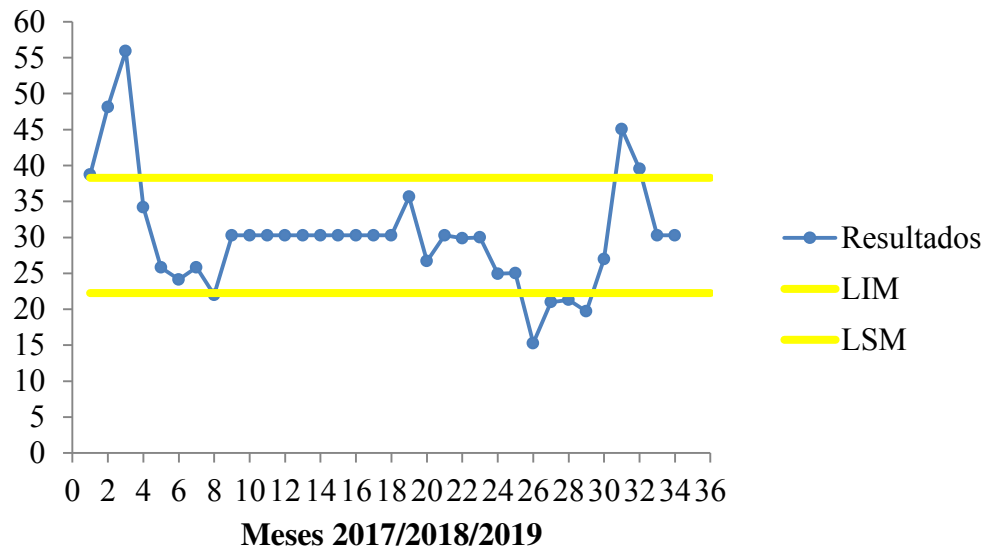
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 8 – Histograma da alcalinidade da água bruta.

Fonte: Próprio autor (2019).

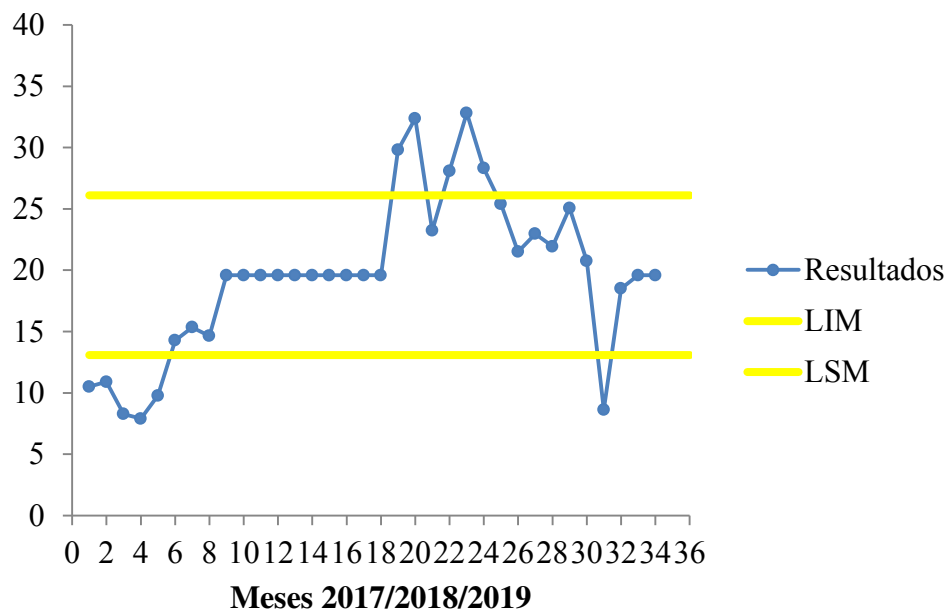
Variações de condutividade e dureza da água bruta no processo, figuras 9 e 10, definem a característica da água captada, com forte presença de íons de Ferro, Cálcio e Magnésio provindos dos mananciais subterrâneos. Vale salientar que apesar das variações nas concentrações de carbonato de cálcio (CaCO_3), a água bruta da estação em análise é considerada do tipo água mole, conforme a literatura.

Figura 9 – Carta de controle da condutividade da água bruta.



Fonte: Próprio autor (2019).

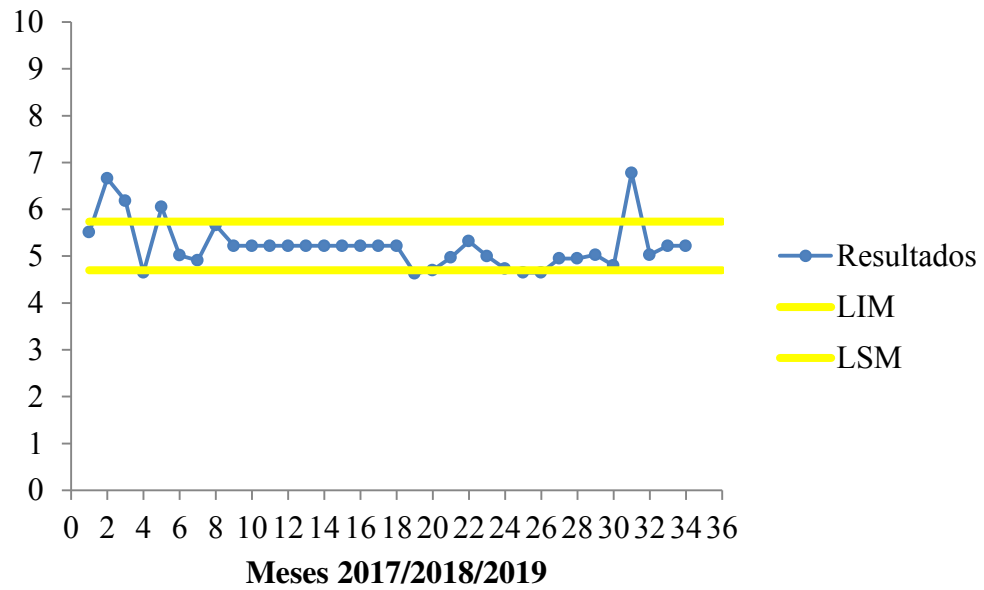
Figura 10 – Carta de controle da dureza da água bruta.



Fonte: Próprio autor (2019).

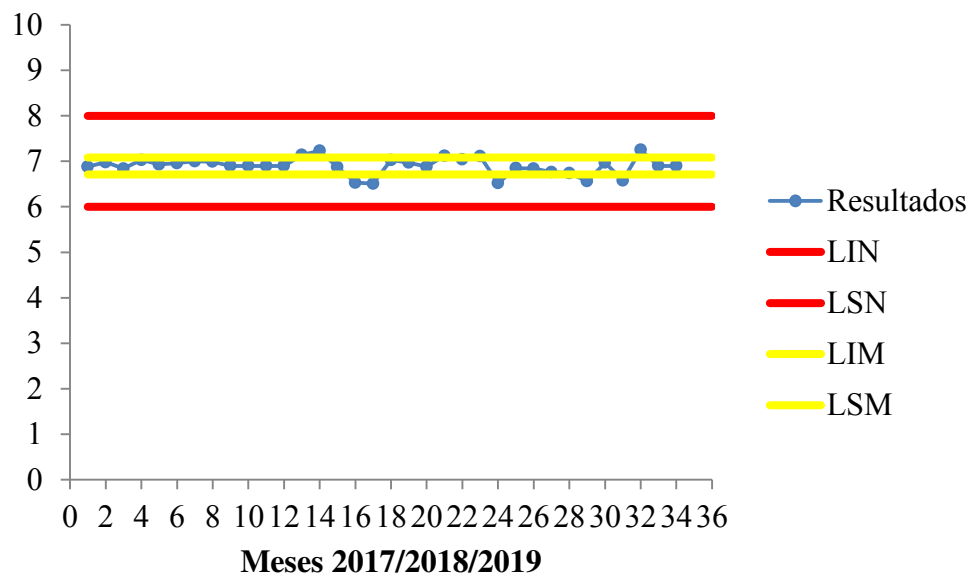
O pH da água bruta, conforme mostra a figura 11, não apresentou dispersões significativas, caracterizando a água captada levemente ácida, variando em torno de 5, não necessitando de dosagens elevadas de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , para neutralizá-la. O mesmo foi observado para o pH na decarbonatação (figura 12).

Figura 11 – Carta de controle do pH da água bruta.



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 12 – Carta de controle do pH na decarbonatação.

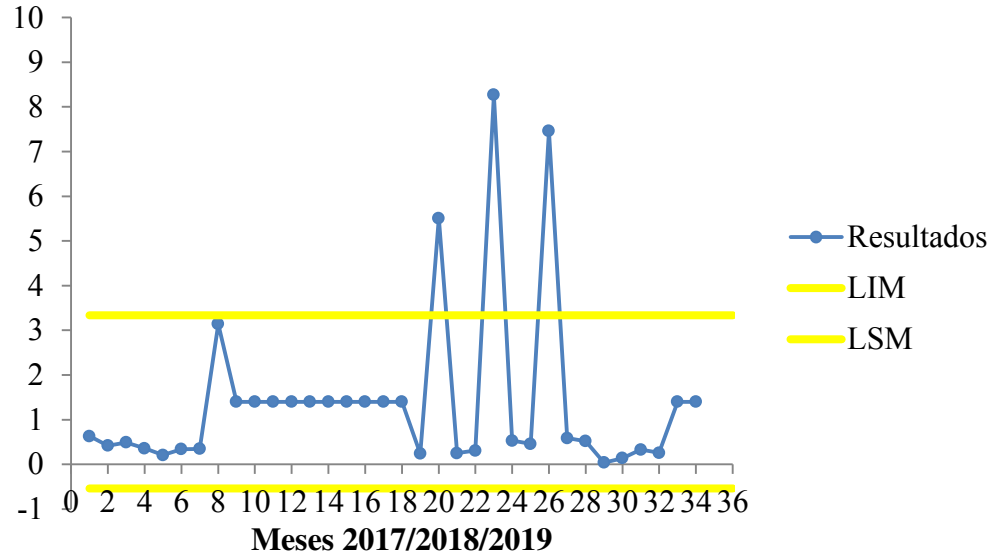


Fonte: Próprio autor (2019).

A partir dos resultados da turbidez na água bruta, figura 13, pode-se verificar a presença considerada de impurezas, sejam elas de partículas sólidas contidas nos mananciais ou presença de microrganismos. Quando se avalia a turbidez na saída do filtro, podemos perceber a eficiência de tratamento nessa etapa do processo, como mostra a figura 14, pois os valores

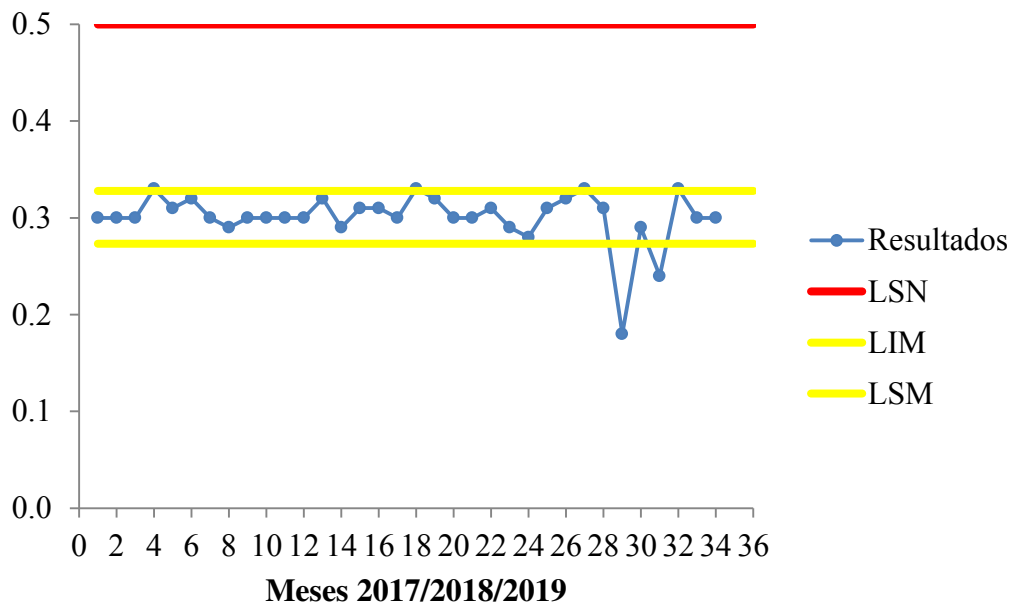
decrecem significativamente em torno de 0,30 NTU, ou seja, a maior parte de sólidos foi retida nos filtros.

Figura 13 – Carta de controle da turbidez da água bruta.



Fonte: Próprio autor (2019).

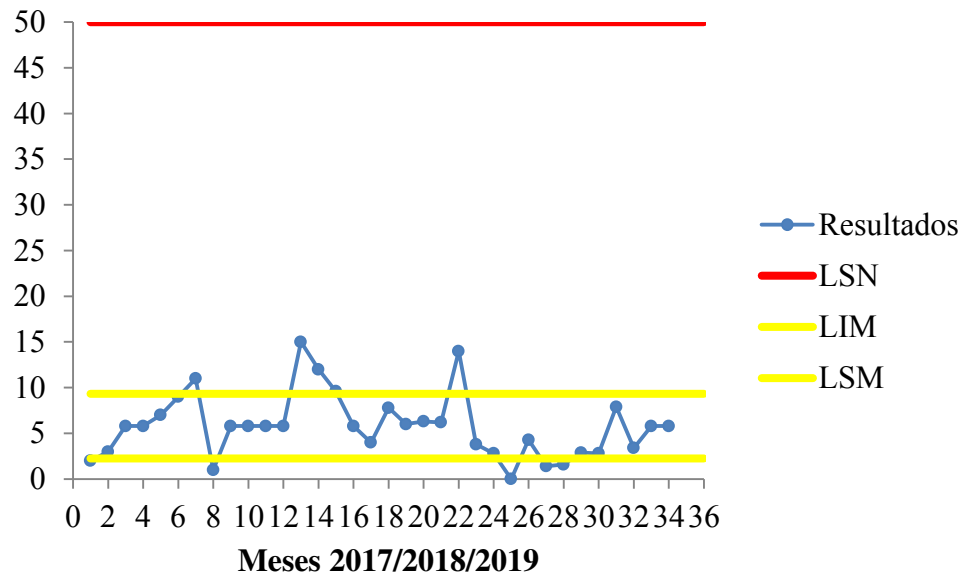
Figura 14 – Carta de controle da turbidez na saída do filtro.



Fonte: Próprio autor (2019).

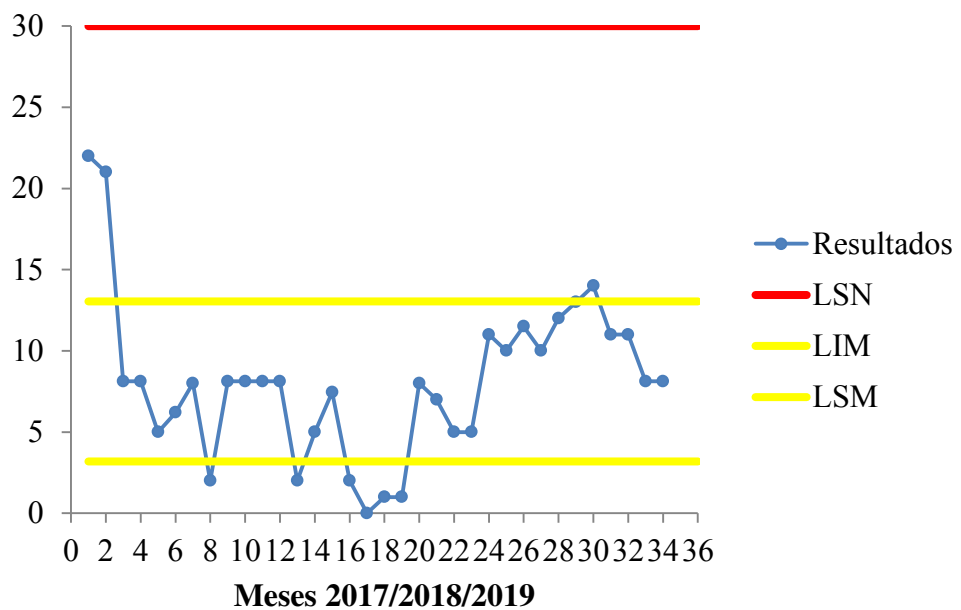
Em relação ao pós-tratamento, a alcalinidade da água tratada apresentou resultados menores em comparação ao da água bruta, representando a remoção de matéria orgânica no início do processo, após etapa de filtração, porém ainda com variações, uma vez que, a diluição de CO₂ livre na água permanece, como mostram as figuras 15 e 16 abaixo.

Figura 15 – Carta de controle de alcalinidade da água tratada.



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 16 – Carta de controle de CO₂ livre na água tratada.

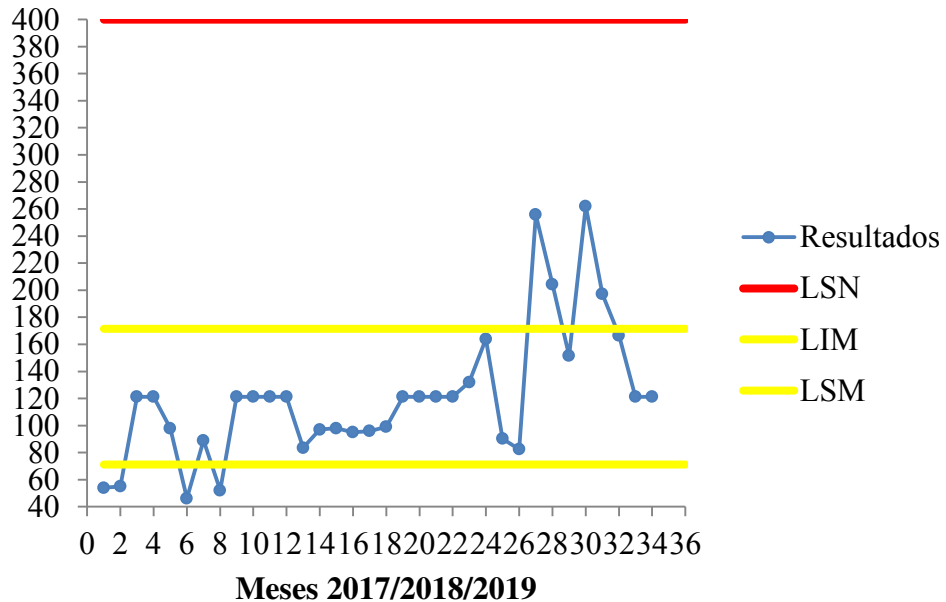


Fonte: Próprio autor (2019).

Comparando os resultados de condutividade antes e depois do tratamento, percebe-se um aumento brusco no valor médio dos resultados, justificado pelo aumento de íons de Cálcio após correção de pH nas etapas iniciais do processo, além disso não houve redução relevante

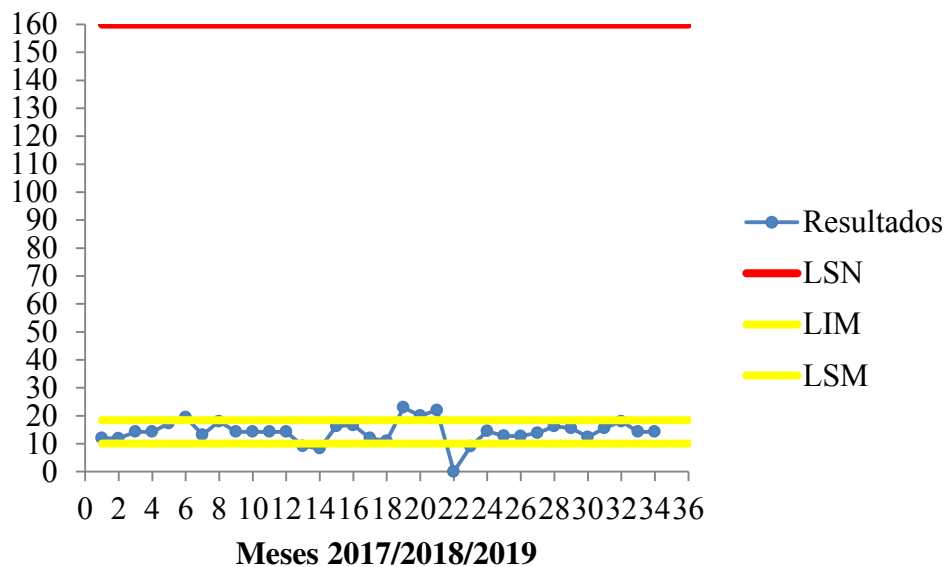
nos resultados de dureza da água tratada quando comparada a água bruta, conforme mostrado nas figuras 17 e 18.

Figura 17 – Carta de controle de condutividade da água tratada.



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 18 – Carta de controle de dureza da água tratada.

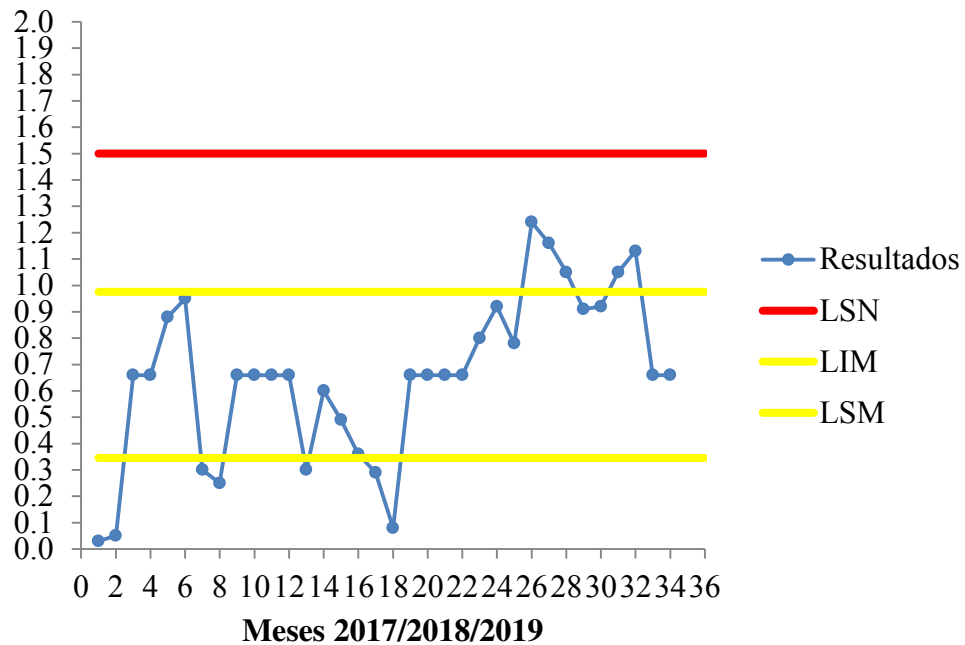


Fonte: Próprio autor (2019).

Um parâmetro que apresentou um comportamento preocupante foi a matéria orgânica (figura 19), onde apesar de todo o tratamento da água, os resultados ainda mostram concentrações consideravelmente próximas ao limite superior normativo, ou seja, ainda

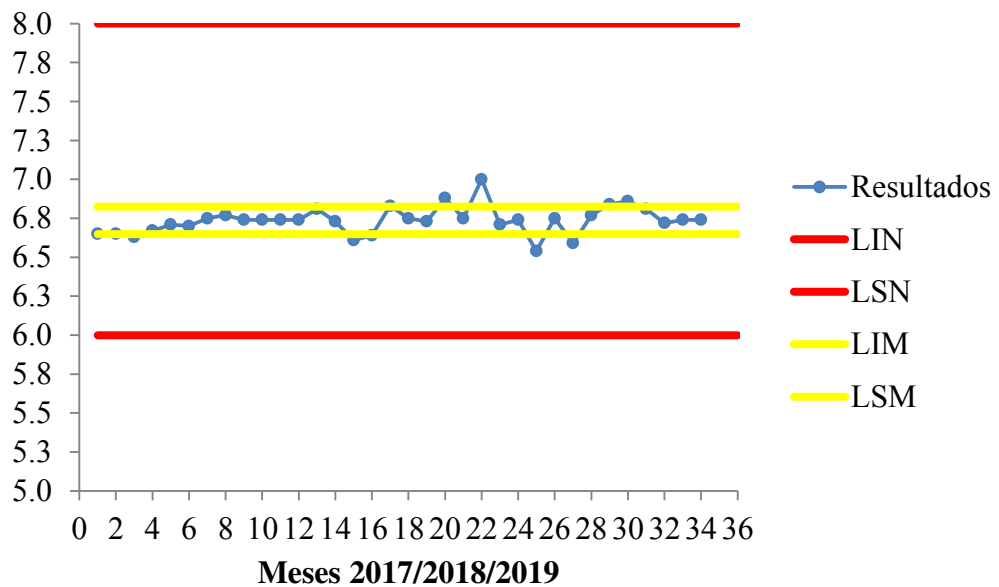
persistindo um teor significativo de matéria orgânica no sistema. Já o pH e turbidez da água tratada, figuras 20 e 21 respectivamente, apresentaram o comportamento desejado, em ambas as cartas de controle.

Figura 19 – Carta de controle da matéria orgânica na água tratada.



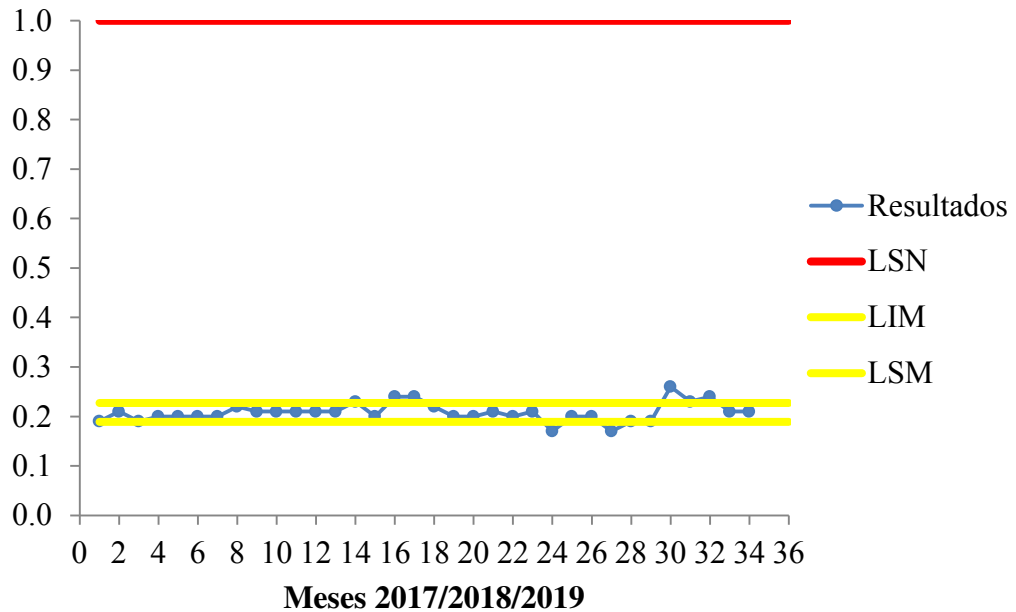
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 20 – Carta de controle do pH da água tratada.



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 21 – Carta de controle da turbidez da água tratada.

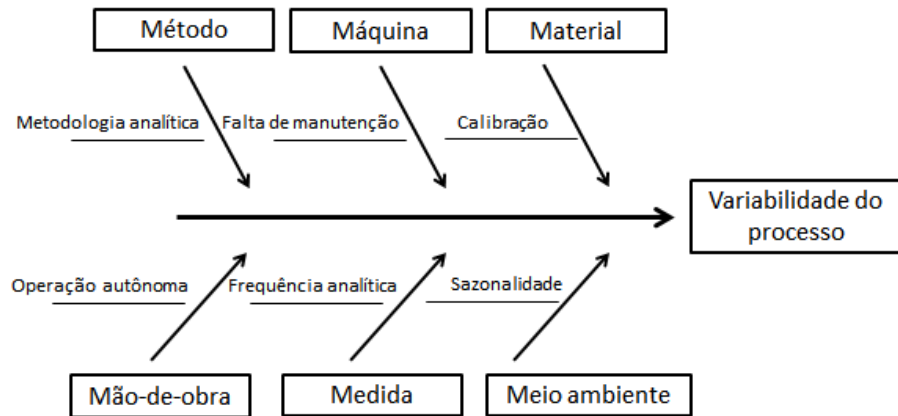


Fonte: Próprio autor (2019).

Ainda na fase de análise do processo, o diagrama de espinha de peixe ou diagrama Ishikawa foi feito, como mostra a figura 22. Em seguida, aplicando o teste de hipótese, foi reduzido em 15% e 25% os LIM e LSM com o intuito de verificar a possibilidade de redução da variação do processo e consequentemente melhoria do mesmo, avaliando a partir da concentração dos resultados nessas novas faixas delimitadas, como mostram as cartas de controle atualizadas (figuras 23 a 37).

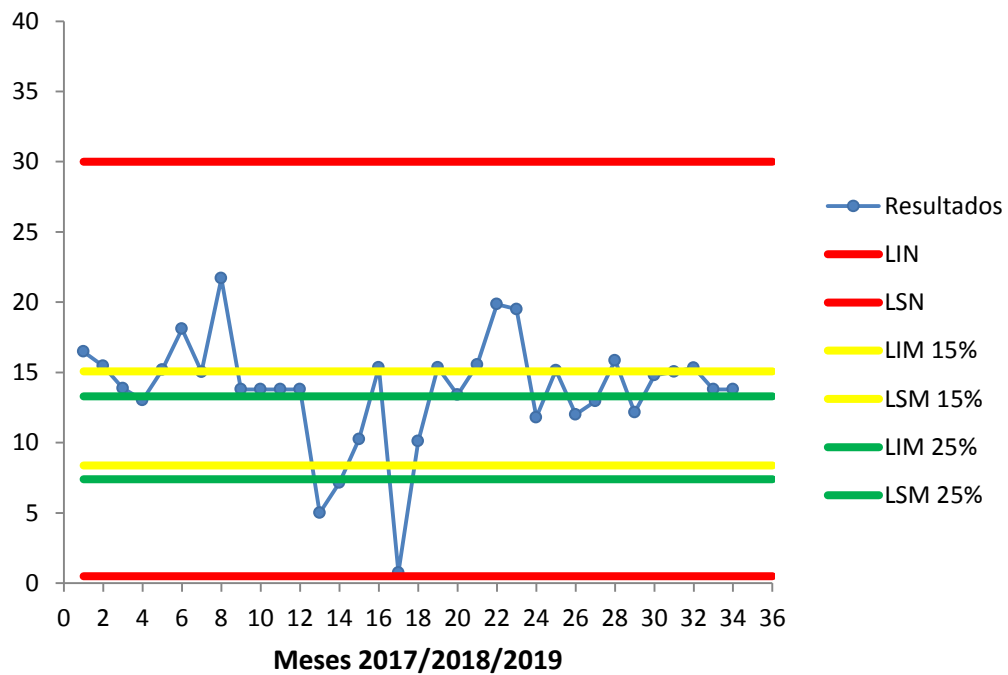
Dessa forma, pôde-se constatar que a redução de 15% mostrou-se mais adequada para o processo quando comparada a redução de 25%, uma vez que, a maior parte dos resultados estava nessa faixa de redução, em outras palavras, pôde-se minimizar a variação do processo em torno de 15% atendendo aos limites normativos. Para os parâmetros que não apresentaram variações significativas antes das modificações dos limites inferiores e superiores médios, como foi o caso do pH da água tratada, a redução percentual desses limites médios se mostrou desnecessária, já que esses parâmetros mostravam estabilidade durante o tratamento.

Figura 22 - Diagrama de causa e efeito do processo.



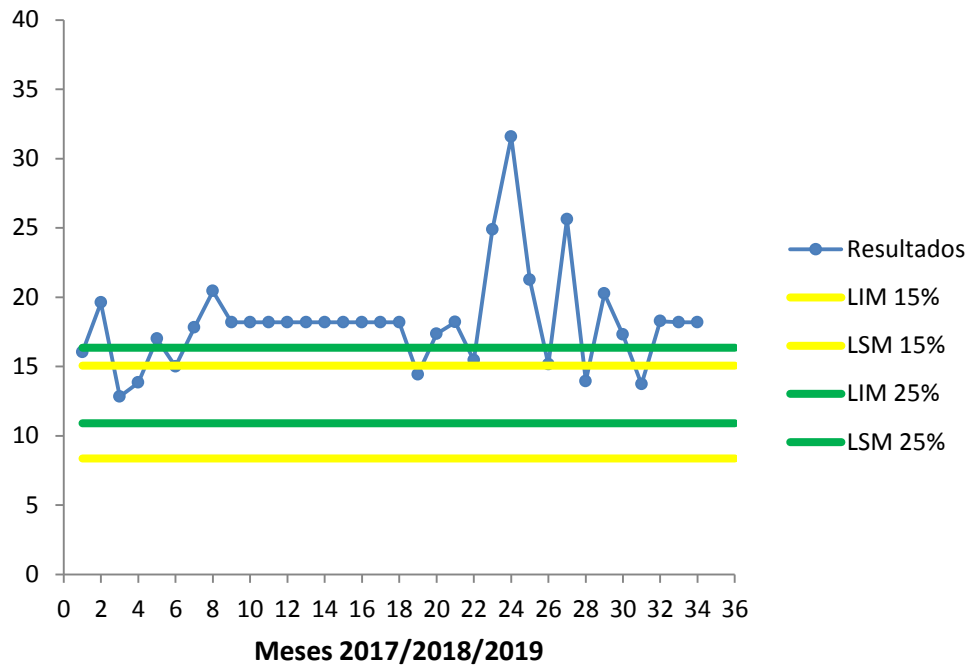
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 23 - Carta de controle do ácido carbônico da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



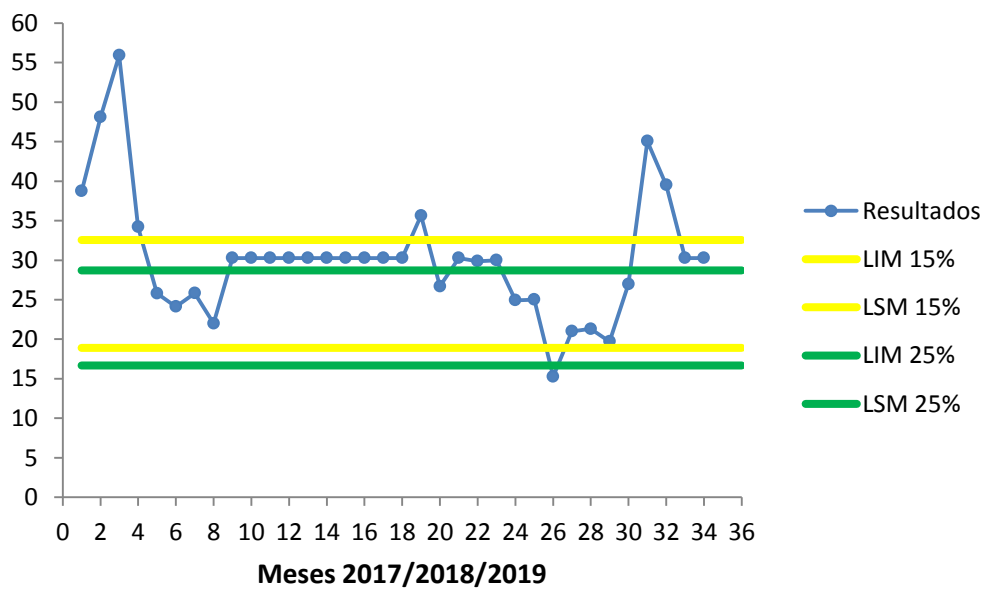
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 24 - Carta de controle de alcalinidade da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



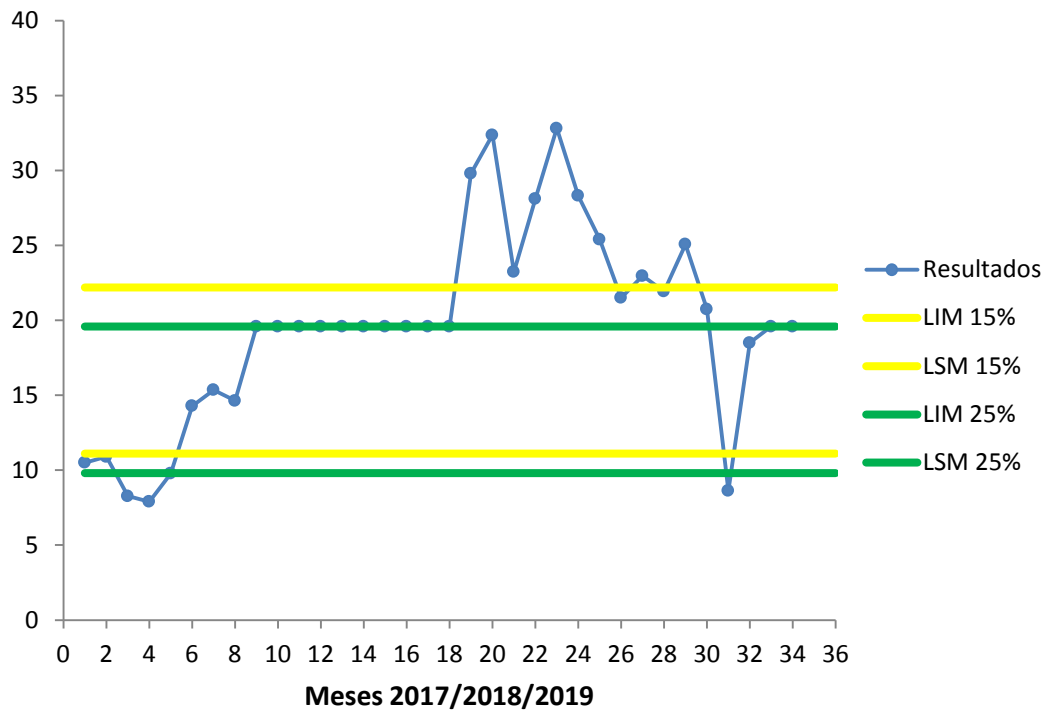
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 25 - Carta de controle de condutividade da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



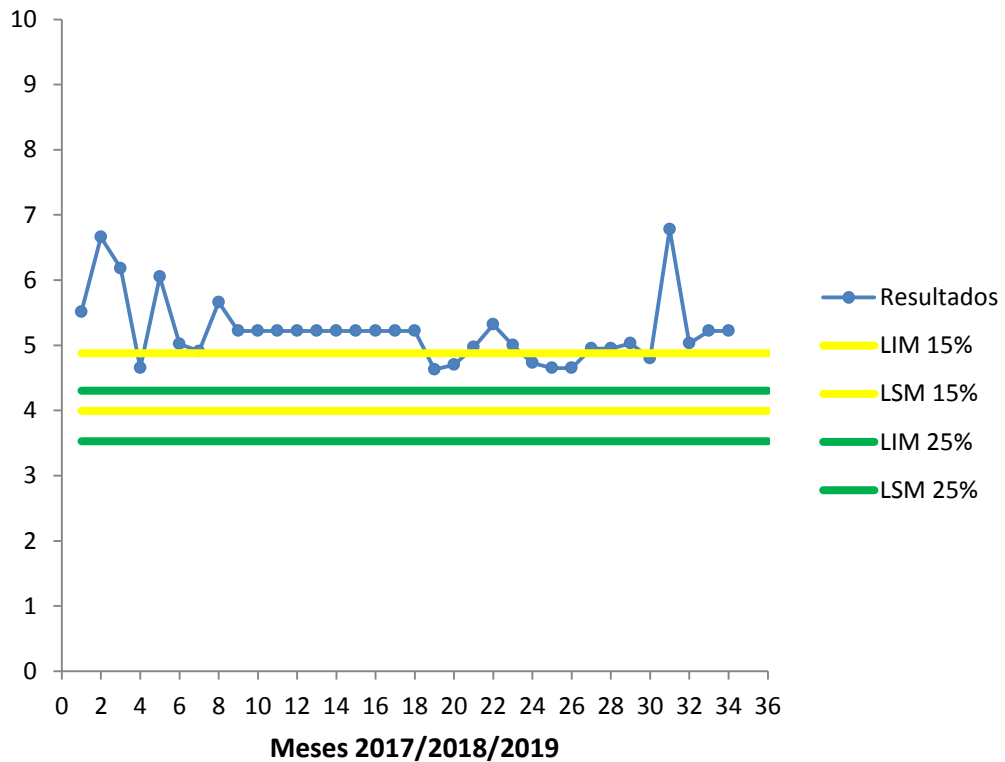
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 26 - Carta de controle de dureza da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



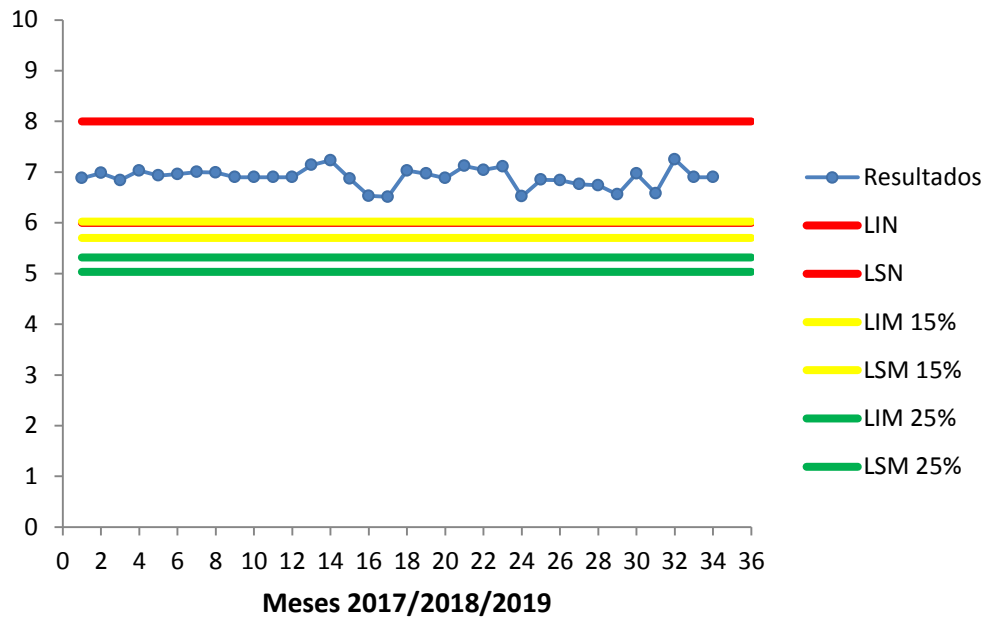
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 27- Carta de controle de pH da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



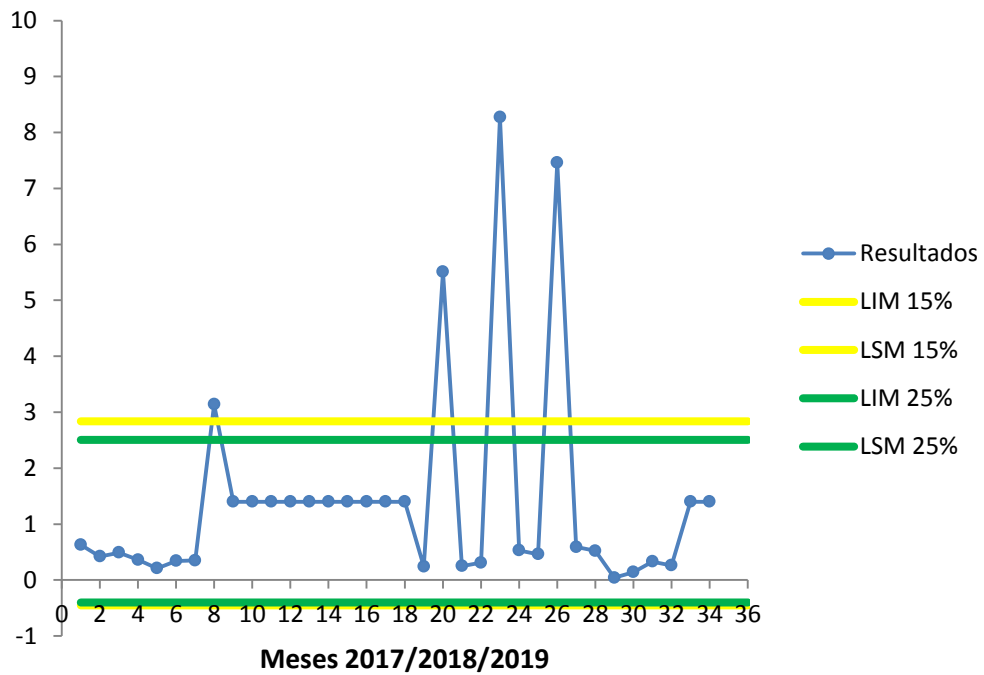
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 28 - Carta de controle de pH na descarbonatação com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



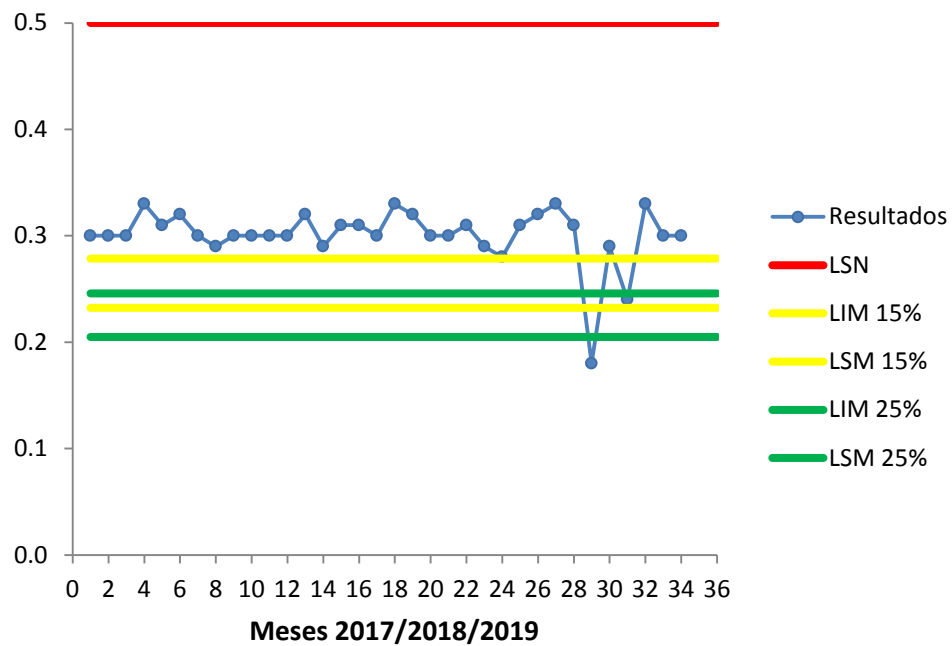
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 29 - Carta de controle de turbidez da água bruta com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



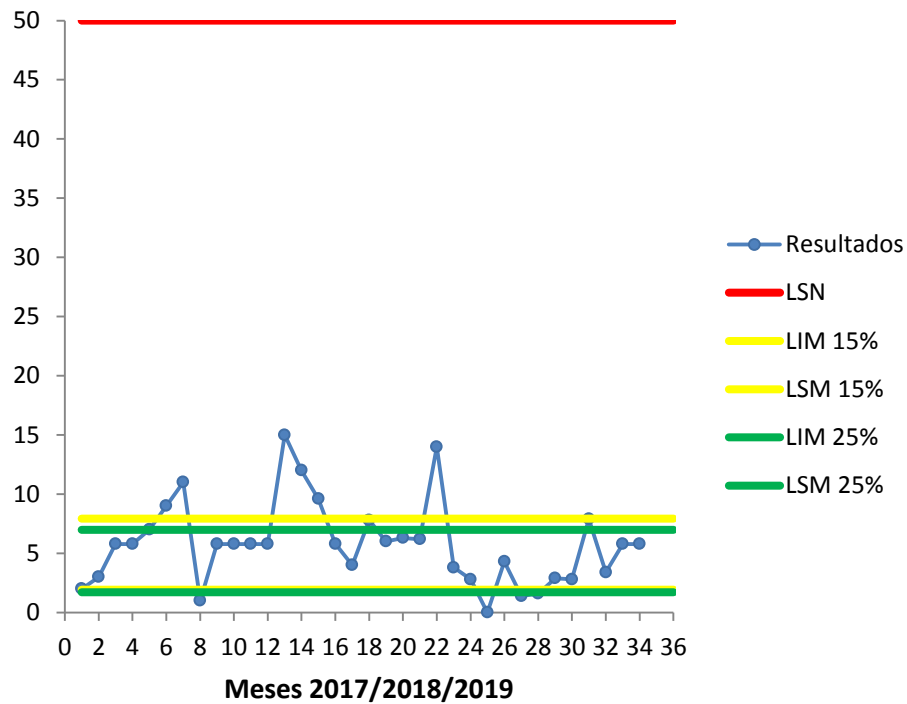
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 30 - Carta de controle de turbidez na saída do filtro com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



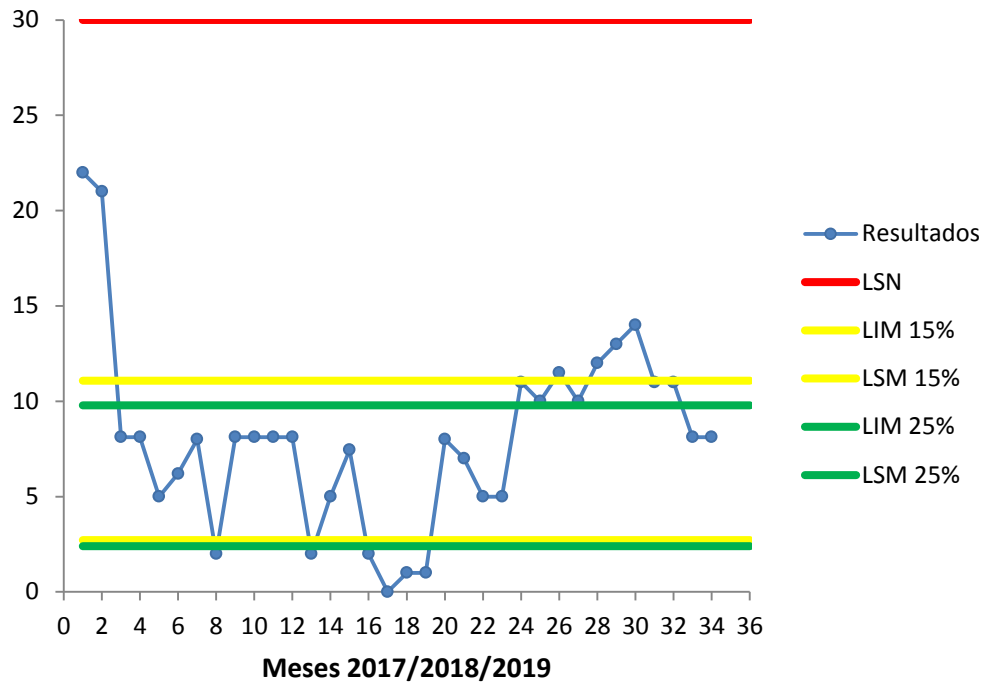
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 31 - Carta de controle de alcalinidade da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



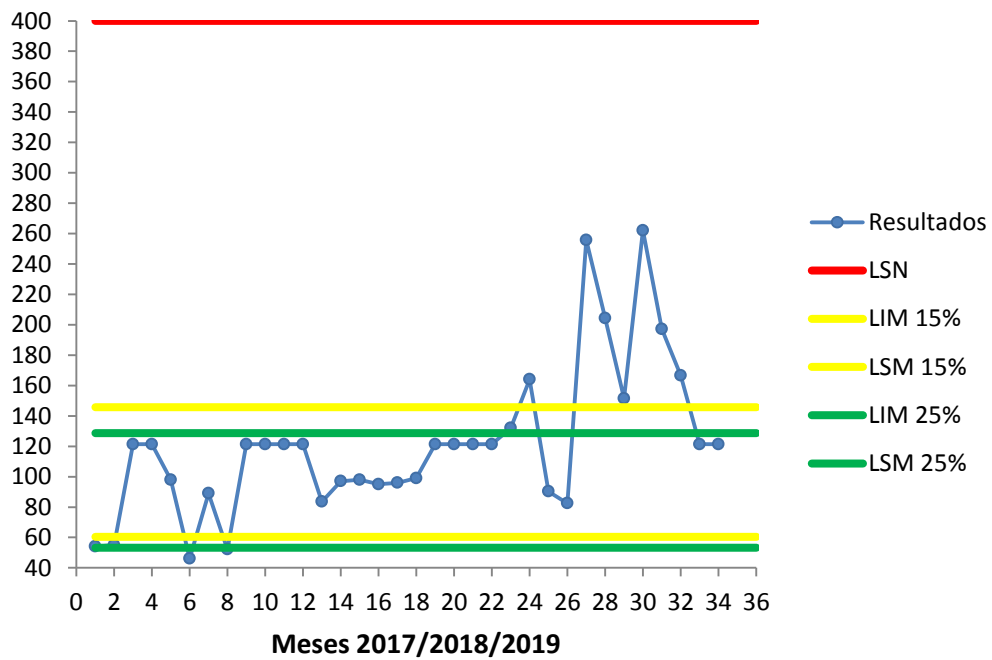
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 32 - Carta de controle de CO2 livre da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



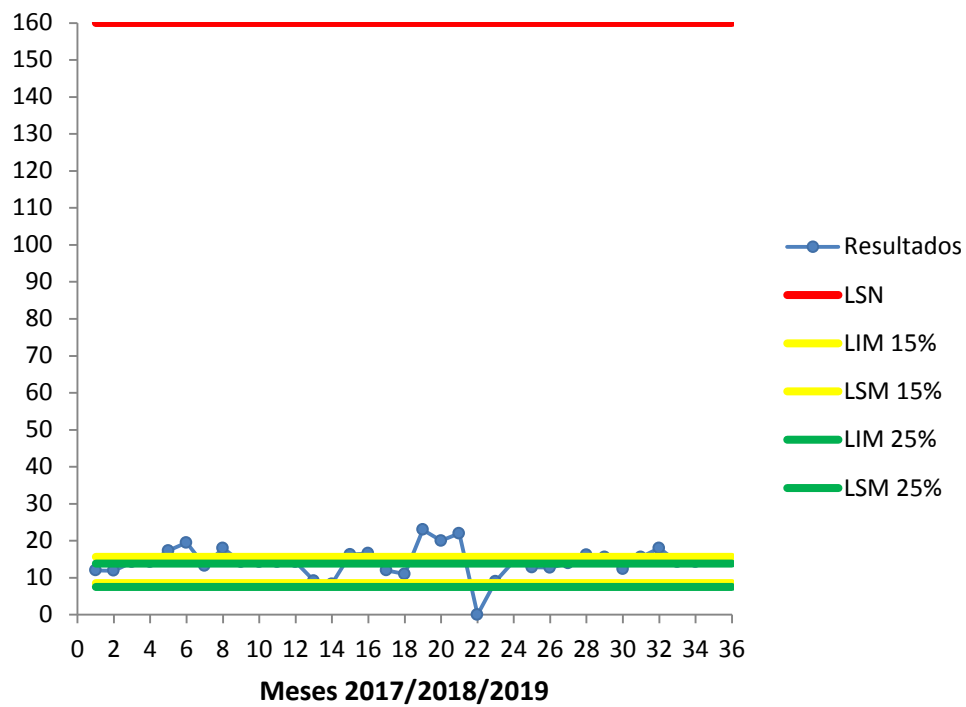
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 33 - Carta de controle de condutividade da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



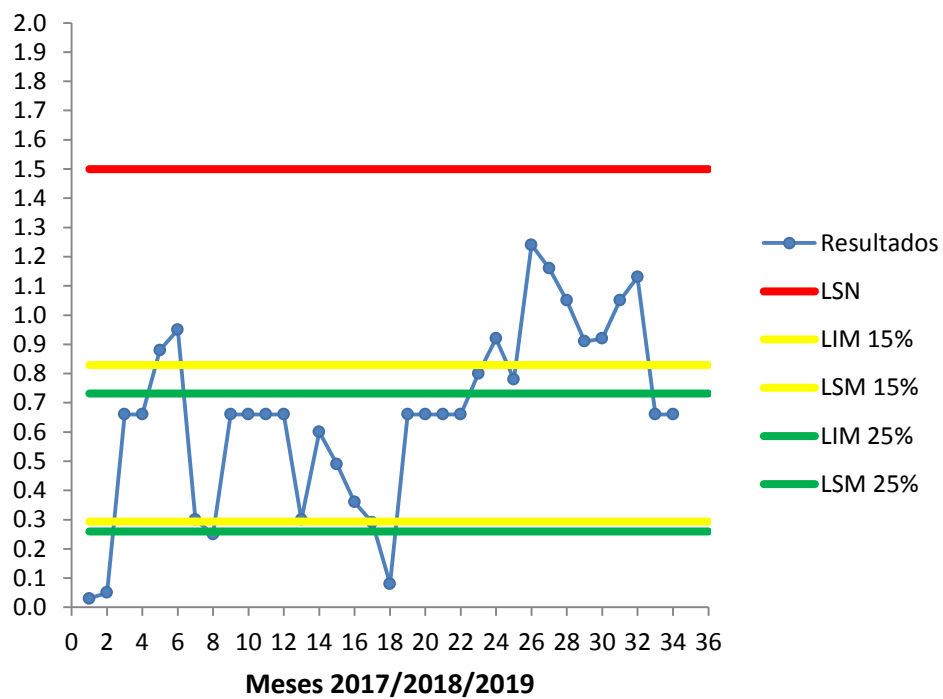
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 34 - Carta de controle de dureza da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



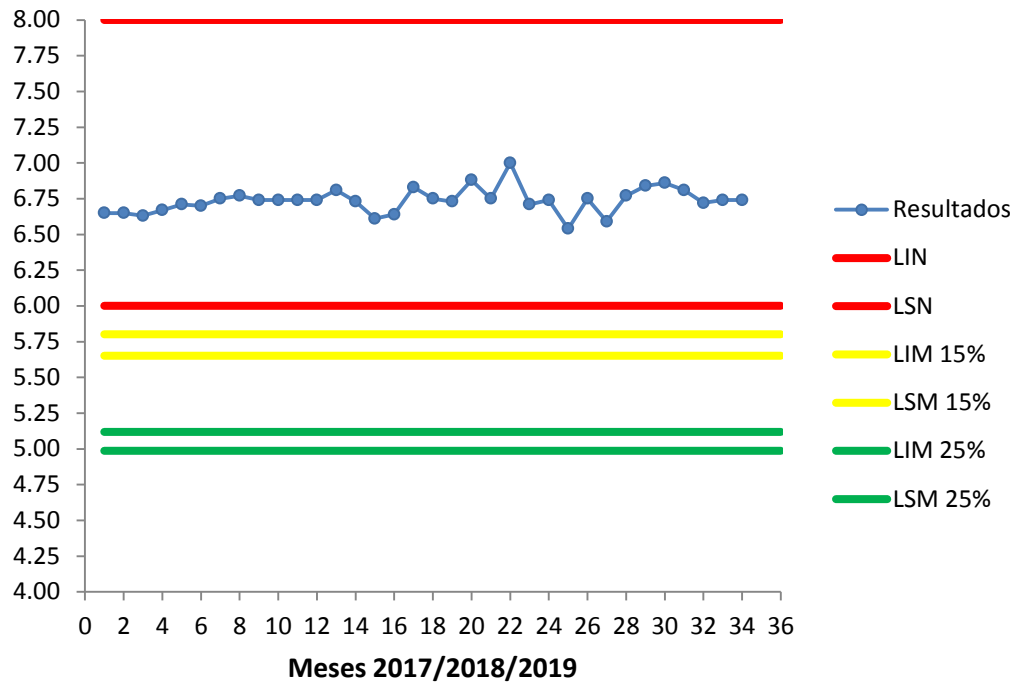
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 35 - Carta de controle de matéria orgânica da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



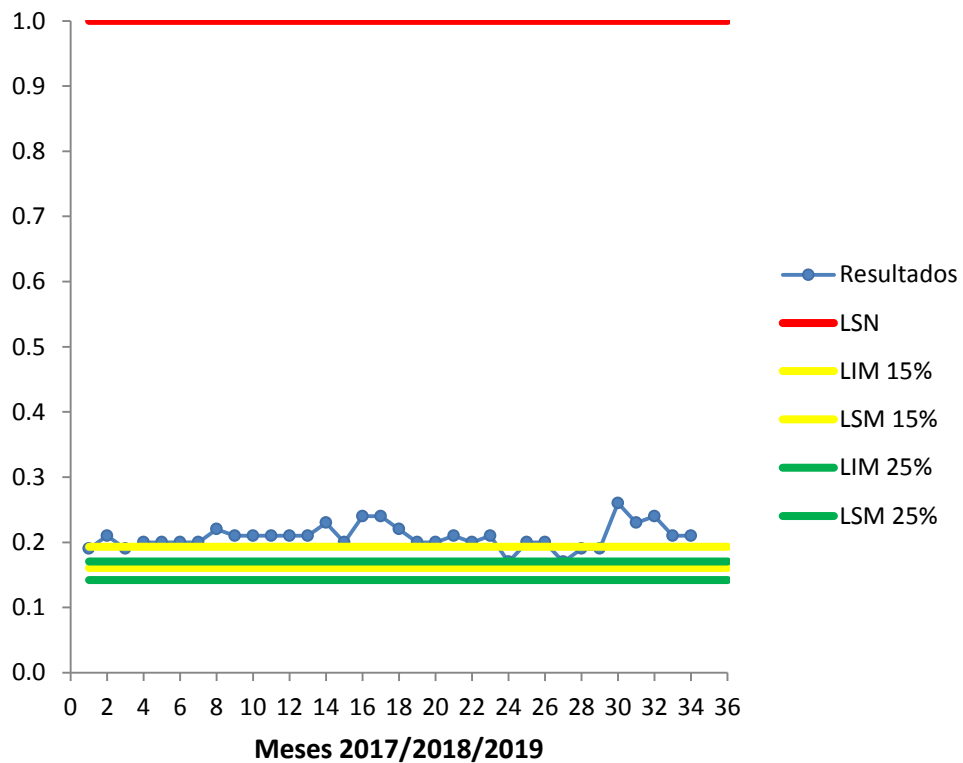
Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 36 - Carta de controle de pH da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



Fonte: Próprio autor (2019).

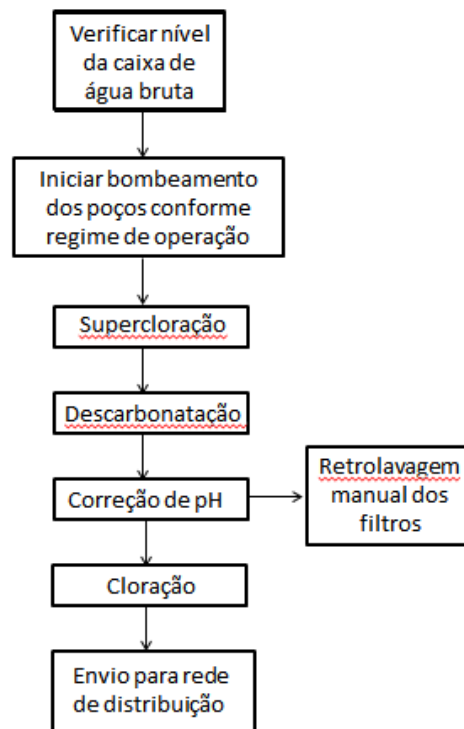
Figura 37 - Carta de controle de turbidez da água tratada com redução de 15 e 25% nos LIM e LSM.



Fonte: Próprio autor (2019).

Por fim, diante das análises realizadas e melhorias observadas no processo, um novo diagrama de fluxo foi montado, como mostra a figura 38 abaixo. A supercloração na água bruta, com o propósito de reduzir o teor de matéria orgânica no início do processo, minimizando a variabilidade de parâmetros da água bruta, como por exemplo, ácido carbônico e alcalinidade, além de diminuir o impacto no pós-tratamento, como a redução na dosagem de cloro na etapa final de tratamento. Além disso, a etapa de retrolavagem manual dos filtros deve ser incluída também, a fim de retirar excesso de sujidades dentro dos filtros, evitando saturação do leito filtrante e melhorando os resultados de parâmetros da água tratada impactadas por este fator, como foi o caso da matéria orgânica no final do processo.

Figura 38 - Diagrama de fluxo do processo após melhorias.



Fonte: Próprio autor (2019).

6 CONCLUSÃO

Diante do exposto, algumas conclusões puderam ser obtidas, sendo elas: a aplicabilidade da metodologia Six Sigma como um método eficaz para otimização de processos que requerem melhorias de resultados e redução de etapas ineficientes, como citado em estudos referenciados, e especificamente neste trabalho, fornecendo análises relevantes sobre o processo de tratamento da água na busca de melhorias do mesmo; a redução de 15%

sobre os LIM e LSM apresentou-se mais favorável em relação à redução de 25%, para os parâmetros no pré e pós-tratamento, exceto para a alcalinidade da água bruta, onde a maioria dos valores no decorrer dos anos se concentraram nessa faixa percentual, como mostradas nas cartas de controle, indicando possibilidades de modificações no sistema para diminuir a variabilidade do processo; para os parâmetros que não obtiveram variações significativas, como o pH da água nas duas etapas do processo, a redução foi desnecessária, uma vez que, tais parâmetros já encontravam-se praticamente estabilizados ao longo do tratamento, como evidenciado nas cartas de controle; e por fim, a inclusão de duas novas etapas no diagrama de fluxo do processo foram adaptadas visando otimizar o tratamento, a supercloração na água bruta e a retrolavagem manual dos filtros de areia e antracito.

7 REFERÊNCIAS

CONGER, S. **Six Sigma and Business Process Management**. Satish and Yasmin Gupta College of Business, University of Dallas, Irving, TX, USA, 2015.

GANGULY, K. **Improvement process for rolling mil through the DMAIC Six Sigma approach**. International Journal for Quality research, vol.6, No.3, 2012.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (Orgs). **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: UFMG, 2010, vol. 1 e 2.

JR, W. A. F. Trabalho de Conclusão de Curso – **Aplicação do modelo Six Sigma na administração de operações – estudo de caso no tempo de entrada de materiais importados**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2008.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2010.

LIN, C. D. **Water and wastewater calculations manual**. 2 ed. McGraw-Hill: Boca Raton, 2007. 961 p.

NOORI, B.; LATIFI, M. **Development of Six Sigma methodology to improve grinding processes – a change management approach**. International Journal of Lean Six Sigma – Vol. 9 No. 1, 2018.

SABOGAL-PAZ, L.P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água em função do risco e eficiência das ETAs**. Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2010.

SILVEIRA, B. A. **Tratamento de água de abastecimento com aplicação da *Moringa oleifera* líquida e em pó em diferentes concentrações de solução salina** – Trabalho de Conclusão de Curso. UTFP – Campus Londrina, 2017.

VON SPERLING, M. 2005. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2a . edição, DESA, Ed. UFMG, 1996.