



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

BEATRIZ MALTA TORRES SILVA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO UTILIZANDO O CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSOS**

Recife

2023

BEATRIZ MALTA TORRES SILVA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO UTILIZANDO O CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr^a. Marta Maria Menezes Bezerra Duarte

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Beatriz Malta Torres.

Avaliação da eficiência de uma estação de tratamento de efluentes de
esgotamento sanitário utilizando o controle estatístico de processos / Beatriz
Malta Torres Silva. - Recife, 2023.

56 : il., tab.

Orientador(a): Marta Maria Menezes Bezerra Duarte

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Controle estatístico de processos.. 2. Estação de tratamento de esgoto.. 3.
Saneamento básico. I. Duarte, Marta Maria Menezes Bezerra. (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)

BEATRIZ MALTA TORRES SILVA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO UTILIZANDO O CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal de Pernambuco, Centro de
Tecnologia e Geociências, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Química

Aprovado em: 02/05/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Marta Maria Menezes Bezerra Duarte (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Elisa Soares Leite (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dra. Rafaella de Figueiredo Sales (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

A todos que confiaram em mim e me apoiaram para que eu chegasse até aqui. Especialmente a minha família, marido e amigos, que foram e são inspiração e incentivo durante a minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial a minha mãe Carmen Malta, meu padrasto Gustavo D’Anunciação, meu irmão Henrique Malta e meu pai Fábio Torres, que sempre me apoiaram e me deram forças para enfrentar as adversidades que surgiram ao longo da graduação. Por serem minha base, minha inspiração e meu porto seguro.

Ao meu marido Lázaro Guimarães, que me acompanhou de perto durante todo o processo de elaboração deste trabalho de conclusão de curso, oferecendo seu apoio incondicional, paciência e amor. Por ser o meu grande companheiro de vida, meu melhor amigo e meu maior incentivador.

À minha orientadora Prof.^a Dr^a. Marta Maria Menezes Bezerra Duarte, que me guiou com sabedoria, paciência e muita competência ao longo do processo de pesquisa e escrita deste trabalho. Por compartilhar seus conhecimentos, suas experiências e seus valiosos *feedbacks*.

Aos meus colegas de trabalho, que compreenderam minha ausência e me apoiaram em momentos de estresse e ansiedade. Por me ajudarem a manter o equilíbrio entre a vida profissional e acadêmica.

A todos os demais professores e funcionários da Instituição de ensino, que contribuíram para minha formação e me proporcionaram uma experiência acadêmica enriquecedora e inesquecível.

Por fim, a Deus por me conceder a oportunidade de concluir mais uma etapa em minha vida acadêmica e profissional, e por ter me agraciado com pessoas tão especiais ao meu redor.

RESUMO

A escassez de água e a poluição dos corpos d'água se tornaram um problema cada vez mais preocupante nas últimas décadas. Por isso, as empresas de saneamento básico, em conjunto com o governo, têm a responsabilidade de tratar os efluentes gerados pela população em estação de tratamento de esgoto (ETE) para atender aos limites estabelecidos por lei e garantir a qualidade dos corpos d'água. No entanto, a composição dos efluentes recebidos nas ETES é altamente variável, tornando o tratamento mais complexo. É necessário usar técnicas para identificar melhorias no processo e garantir a estabilidade dos resultados. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho e a estabilidade de uma estação de tratamento de esgoto sanitário em Pernambuco, utilizando técnicas de controle estatístico de processo. Foram utilizados os gráficos de controle individual de *Shewhart*, juntamente com testes de normalidade e análise de capacidade do processo, para avaliar o controle do processo. Foram avaliados os parâmetros de coliformes fecais, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), óleos e graxas, pH, sólidos sedimentáveis e temperatura entre os anos de 2020 e 2022. Uma análise estatística dos dados foi realizada para identificar os pontos discrepantes, ocasionados por motivos não aleatórios e suas possíveis causas. Os gráficos de controle indicaram que, embora a maioria dos parâmetros estivesse dentro do limite de especificação estabelecido pela Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente e pelas normas técnicas nº 2.002/2000 e 2.007/2001 da Agência Estadual do Meio Ambiente, encontravam-se fora do controle estatístico de processo tendo em vista a presença de arranjos, sendo sequência e mudanças na média os mais frequentes. Foi confirmada, pelos testes de normalidade, que dois dos dados disponíveis não podiam ser representados por uma distribuição normal, visto que seus p-value foram menores que 0,05. A análise de capacidade do processo mostrou que a maioria dos parâmetros tinha seus processos classificados como capazes ou razoavelmente capazes, com exceção dos coliformes fecais. Desta forma, pode-se afirmar que as ferramentas e índices de controle utilizados foram eficazes para mostrar a realidade da ETE em estudo, destacando a necessidade de melhorias no processo de tratamento do esgoto sanitário. Além disso, demonstrou-se que o uso de controle estatístico de processo pôde ajudar a identificar oportunidades de melhoria e garantir a estabilidade do processo.

Palavras-chave: Controle estatístico de processos. Estação de tratamento de esgoto. Saneamento básico.

ABSTRACT

The scarcity of water and pollution of water bodies have become an increasingly concerning issue in recent decades. Therefore, basic sanitation companies, in conjunction with the government, have the responsibility to treat the effluent generated by the population in sewage treatment plants (STP) to meet the limits established by law and ensure the quality of water bodies. However, the composition of effluents received in STPs is highly variable, making treatment more complex. Techniques are required to identify process improvements and ensure stability of results. In this context, the objective of this study was to evaluate the performance and stability of a sanitary sewage treatment plant in Pernambuco, using statistical process control techniques. Shewhart individual control charts, along with normality tests and process capability analysis, were used to evaluate process control. Parameters of fecal coliforms, biochemical oxygen demand (BOD), oils and greases, pH, sedimentable solids, and temperature were evaluated between the years 2020 and 2022. Statistical analysis of the data was performed to identify discrepant points caused by non-random reasons and their possible causes. The control charts indicated that although most parameters were within the specification limit established by Resolution No. 430/2011 of the National Environment Council and technical standards No. 2.002/2000 and 2.007/2001 of the State Environmental Agency, they were out of statistical process control due to the presence of patterns, with sequence and mean shifts being the most frequent. It was confirmed by normality tests that two of the available data could not be represented by a normal distribution, as their p-values were less than 0.05. The process capability analysis showed that most parameters had their processes classified as capable or reasonably capable, except for fecal coliforms. Therefore, it can be stated that the control tools and indices used were effective in showing the reality of the STP under study, highlighting the need for improvements in the sewage treatment process. In addition, it demonstrated that the use of statistical process control could help identify improvement opportunities and ensure process stability.

Keywords: Statistical process control. Sewage treatment plant. Basic sanitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Fluxograma da ETE em estudo.....	19
Figura 2 -	Exemplo de gráfico de controle.....	24
Figura 3 -	Gráfico de controle com as zonas dos critérios da norma ISO 7870-2:2013.....	27
Figura 4 -	Ilustrações dos testes de causas especiais aplicadas a gráficos de controle conforme norma ISO 7870-2:2013. A) Critério 1; B) Critério 2; C) Critério 3; E) Critério 5; F) Critério 6; G) Critério 7 e H) Critério 8.....	28
Figura 5 -	Gráfico de controle. A) Coliformes fecais; B) Sólidos sedimentáveis para os dados do ano de 2020. Os limites de controle estão em cor amarela, de especificação em verde e a linha média em laranja.....	38
Figura 6 -	Gráfico de controle. A) Coliformes fecais; B) Remoção de DBO; C) O&G; D) pH; E) Sólidos sedimentáveis; F) Temperatura. Os limites de controle estão em cor amarela, de especificação em verde e a linha média em laranja.....	41
Figura 7 -	Gráficos de probabilidade acumulada para os parâmetros de estudo. A) Coliforme fecais; B) Remoção de DBO; C) O&G; D) pH; E) Sólidos sedimentáveis e F) Temperatura.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Níveis de tratamento de esgoto sanitários.....	17
Tabela 2 -	Nível de remoção de carga orgânica bruta de acordo com NT nº 2.002/2000 do CPRH.....	20
Tabela 3 -	Parâmetros da NT 2.007/2001 do CPRH.....	22
Tabela 4 -	Crítérios para a detecção de causas especiais em gráficos de controle.....	26
Tabela 5 -	Classificação do sistema de acordo com valor da capacidade do processo.....	32
Tabela 6 -	Parâmetros de monitoramento mensal na ETE em estudo conforme legislação ambiental.....	34
Tabela 7 -	Limites para a construção dos gráficos de controle dos parâmetros coliformes fecais e sólidos sedimentáveis.....	38
Tabela 8 -	Limites de controle para construção dos gráficos de controle dos parâmetros analisados.....	39
Tabela 9 -	Índices de capacidade do processo em estudo.....	45

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	Carga orgânica bruta
CEP	Controle estatístico de processo
CF	Coliformes fecais
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRH	Agência Estadual do Meio Ambiente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de esgoto
H ₀	Hipótese nula
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LC	Linha central
LCL	<i>Lower control limit</i>
LIC	Limite inferior de controle
LIE	Limite inferior de especificação
LSC	Limite superior de controle
LSE	Limite superior de especificação
NBR	Normas brasileiras
NMP	Número máximo permitido
NMPCF	Número máximo permitido de coliformes fecais
NT	Norma técnica
O&G	Óleos e graxas
pH	Potencial hidrogeniônico
PPP	Parceria público-privada
R _m	Amplitude móvel
S-W	<i>Shapiro-Wilk</i>
UASB	<i>Up Flow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UCL	<i>Upper control limit</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Capacidade do processo
C_{pi}	Capacidade do processo inferior
C_{pk}	Capacidade do processo unilateral
C_{ps}	Capacidade do processo superior
k	Tamanho da amostra
σ	Desvio-padrão do processo
$\bar{R}m$	Média dos valores da amplitude móvel
Rm_i	Amplitude móvel para o ponto i
\bar{x}	Média
x_i	Valor do parâmetro no ponto i
x_{i+1}	Valor do parâmetro no ponto $i + 1$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 POLUIÇÃO AMBIENTAL.....	14
2.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	16
2.2.1 Estação de tratamento de esgoto da unidade em estudo.....	19
2.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO.....	22
2.3.1 Gráficos de controle.....	23
2.3.1.1 <i>Análises do gráfico de controle.....</i>	26
2.3.1.2 <i>Teste de Normalidade.....</i>	30
2.3.1.3 <i>Capacidade do processo.....</i>	31
3 METODOLOGIA.....	34
3.1 PARÂMETROS DE CONTROLE.....	34
3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	34
3.3 GRÁFICOS DE CONTROLE.....	35
3.3.1 Análises do gráfico de controle.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	37
4.2 GRÁFICO DE CONTROLE.....	37
5 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A empresa estudada neste trabalho do ramo de esgotamento sanitário, que não foi permitida identificação por conta das normas de *compliance*, foi criada em 2008 através da separação dos ativos de uma organização ambiental. Em 2013, começou a parceria público-privada (PPP) entre a empresa e a companhia de saneamento do estado.

A referida PPP tem como objetivo levar esgotamento sanitário para 15 municípios da região metropolitana, visando fornecer serviços de esgoto a 90% da população, desta região, até 2037. Em 2021 a parceria chegou ao seu oitavo ano de execução e registrou a taxa de cobertura de 40%

Além de levar esgotamento sanitária para a população, no Brasil, existe uma grande preocupação quanto ao tratamento dos afluentes e seu destino final. Desta forma, as Estação de tratamento de esgoto (ETE) têm como função principal remover a matéria orgânica, sólidos em suspensão e os organismos patógenos presentes nos esgotos coletados. Esse procedimento é realizado através da combinação de processos preliminar, primário, secundário e, se necessário, processos terciários que poderão remover nitrogênio e fósforo, entre outros (LEME, 2010). Assim, após o tratamento adequado visando atender à legislação vigente, o efluente pode ser lançado em um corpo de água receptor (BRASIL, 2011).

No Brasil, a Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) dispõe sobre as condições e padrões de despejo de efluentes em corpo receptor (BRASIL, 2011). No âmbito estadual, é necessário observar duas normas técnicas (NT) da Agência Estadual do Meio Ambiente (CPRH). A primeira é a NT nº 2.002/2000, que dispõe sobre os critérios e padrões de lançamento cujo objetivo é reduzir a carga orgânica não industrial lançada nos recursos hídricos do Estado de Pernambuco. A segunda NT é a nº 2.007/2001, que visa estabelecer a estimativa da densidade média de bactérias de coliformes fecais (CF) para o lançamento de efluentes domésticos ou industriais nos corpos de águas receptores (PERNAMBUCO, 2000, 2001).

Os parâmetros estabelecidos pela legislação para lançamento de efluentes em corpos hídricos é uma ferramenta que visa facilitar a fiscalização dos poluidores, a detecção e autuação dos responsáveis pela degradação. Sendo assim, para atendimento à legislação, com o intuito de preservação e conservação dos corpos

hídricos, há a necessidade de realizar o acompanhamento dos parâmetros físico-químicos dos efluentes tratados antes do seu descarte em um corpo hídrico receptor. Esse monitoramento é realizado através de coletas do efluente antes e após o tratamento, seguidas de análises laboratoriais. Com os resultados, pode ser realizado o acompanhamento através das ferramentas da qualidade (MORAIS; SANTOS, 2019).

As ferramentas da gestão da qualidade, de maneira conceitual, são mecanismos para selecionar, implantar ou avaliar alterações no processo produtivo por meio de análises objetivas de partes bem definidas (CARVALHO; PALADINI, 2012). De acordo com a finalidade desejada, é possível definir a melhor ferramenta para ser utilizada no processo, tais como: diagrama de *Ishikawa*, fluxograma, folha de verificação, diagrama de Pareto, carta de controle e diagrama de dispersão.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de uma estação de tratamento de esgoto sanitário no estado de Pernambuco, através do controle estatístico do processo, utilizando os parâmetros de lançamento de efluentes em um corpo hídrico. Para tal, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Identificar quais parâmetros de controle foram elegíveis para o monitoramento;
- Realizar o levantamento dos dados dos parâmetros analíticos avaliados;
- Construir os gráficos de controle e avaliar a existência de arranjos;
- Verificar se os dados seguiam uma distribuição normal;
- Verificar a existência de não conformidades através dos índices de capacidade do processo;
- Avaliar a eficiência da ETE através das análises dos gráficos de controle.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Foram abordados neste item as questões ambientais de uma forma geral, um panorama sobre uma ETE localizada no estado de Pernambuco, as características do efluente após tratamento e as legislações aplicáveis referentes aos parâmetros de controle para lançamento do efluente no corpo receptor. Além disso, foram apresentadas as ferramentas da qualidade aplicáveis para implementação do controle estatístico do processo no caso em estudo.

2.1 POLUIÇÃO AMBIENTAL

Conforme Casa-Coila *et al.* (2023) o meio ambiente é o receptor final dos poluentes despejados, seja na atmosfera, no solo ou na água. Tendo em vista que a poluição ambiental, se trata de conceito amplamente debatido em todo o mundo, pode variar de acordo ao contexto que é inserido, sendo objeto de estudo em diversas áreas do conhecimento (BRUSSEAU; PEPPER; GERBA, 2019). Nesse sentido, sob o ponto de vista legal, por exemplo, no Brasil, a Lei Federal 6.938/81 prevê, em seu artigo 3º, que a poluição é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente e lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (BRASIL, 1981).

A poluição pode variar a partir dos diversos tipos de agentes nocivos, por exemplo: agentes químicos, esgotos, resíduos orgânicos e eletrônicos (HOJJATI-NAJAFABADI *et al.* 2022). Também é possível analisar os impactos da poluição pelos seus efeitos provocados no ambiente, podendo esses impactos serem classificados como primário, que é aquele identificado de imediato, ou secundário, que se apresenta de maneira mais sutil, com perturbações que alteram o equilíbrio de cadeias alimentares que apenas são detectados a longo prazo (UKAOGO; EWUZIE; ONWUKA, 2020).

Especificamente, quanto à poluição hídrica, esta pode ser definida pela modificação da qualidade da água a partir da introdução de uma ou mais substâncias

que a impacte de forma negativa, causando possíveis danos para os seres-humanos, animais e seus habitats e o ambiente em geral (MACHADO; SOUSA; SILVA, 2022).

Segundo Singh *et al.* (2020), as principais fontes de poluição hídrica são os lixões, microplásticos, resíduos farmacêuticos, eventos naturais como tempestades, os de fontes agrícolas e os efluentes industriais e esgotos domésticos. Os efluentes industriais são aqueles provenientes de processos e produtos de indústrias. Nesse sentido, por exemplo, a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), define em seu Regulamento, no art. 39, que é obrigatório o tratamento de despejos industriais que, por suas características, não podem ser lançados in natura diretamente na rede de esgoto (PERNAMBUCO, 1994)¹.

Por outro lado, os principais problemas da poluição gerada pela agricultura são: o esgotamento dos lençóis freáticos, alagamentos, salinização por aplicação de fertilizantes, pesticidas e manejo de rebanhos (EVANS *et al.* 2019), podendo ser provocada também com a ajuda de deslocamentos de água em tempestades e temporais (PALANI *et al.* 2021).

Quanto à poluição de lixões, a qual provoca a contaminação principalmente da água subterrânea, ocorre quando a água provinda de precipitações ou irrigações, entra em contato com o lixo, formando uma mistura de inúmeras substâncias, dentre elas nocivas e não-nocivas, como sais, minerais, metais, e substâncias orgânicas (SILVA *et al.* 2023).

Quanto à poluição Municipal, considera-se uma das preocupações os despejos de resíduos farmacêuticos e de microplástico nos ambientes aquáticos (SHAH; SHAH, 2020). Finalmente, às fontes da poluição de esgotos domésticos, em sua maioria, são aquelas provenientes de residências, estabelecimentos comerciais, instituições e repartições públicas (SINGH *et al.* 2020).

Como visto, um dos principais fatores para redução da qualidade da água dos rios é o contato com esgoto doméstico, o que pode resultar na diminuição da biodiversidade, afetando ainda a saúde da população com a transmissão de doenças que possuem veiculação pela água (AISSA-GROUZ; GARNIER; BILLEN, 2018). Uma das possíveis soluções é a implementação de rede coletora que conduza os esgotos para estações de tratamento de efluente, substituindo os processos de tratamento individuais ou completa falta de tratamento (BARILE, 2018).

¹ Regulamento aprovado pelo Decreto nº 18.251/94 do Governo do Estado de Pernambuco.

2.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

As estações de tratamento de esgoto são unidades operacionais que têm como objetivo através de todas as suas etapas, estabilizar a carga orgânica presente no esgoto. Desta forma, torna possível o retorno deste ao corpo hídrico sem maiores danos ao mesmo a fim de se adequarem às legislações ambientais vigentes (PEREIRA; SILVA, 2018).

Segundo Von Sperling (2014), a remoção dos poluentes no tratamento, para obter um efluente com os parâmetros de lançamento de qualidade adequados está associada aos conceitos de nível e eficiência do tratamento.

Os métodos de tratamento dividem-se em operações e processos unitários, e a conexão destes compõe os sistemas de tratamento. A definição de operação e processo unitário, muitas das vezes são usadas como sinônimos, em razão de poderem ocorrer simultaneamente numa ETE. De forma geral, é possível adotar as seguintes definições (METCALF; EDDY, 2016):

- Processos unitários físicos: métodos de tratamento que predominam as forças físicas (peneiramento, mistura, sedimentação e filtração);
- Processos unitários químicos: métodos de tratamento nos quais a remoção de constituintes é realizada por meio de compostos químicos ou de outras reações químicas (precipitação, transferência de gases, adsorção e desinfecção);
- Processos unitários biológicos: métodos de tratamento nos quais a remoção dos contaminantes ocorre por meio de atividade biológica por ação de microorganismos (remoção de substâncias orgânicas biodegradáveis, desnitrificação e remoção de fosforo).

Para a remoção dos contaminantes presentes em afluentes, alguns processos unitários são agrupados para formar os níveis de tratamento classificados como preliminar, primário, secundário e terciário (Tabela 1). De maneira geral, uma ETE que apenas utiliza sedimentação como a maior operação de tratamento, é usualmente considerada uma estação de tratamento primária. Caso haja o acréscimo de tratamento biológico, será nomeada uma estação de tratamento secundário. Adicionando-se ainda o tratamento físico-químico, tem-se uma estação de tratamento de esgoto avançada ou terciária (DROSTE; GEHR, 2018).

Tabela 1 – Níveis de tratamento de esgoto sanitários.

Nível de tratamento	Descrição
Preliminar	Remoção de constituintes, como trapos, galhos, areia e graxa, que possam causar problemas operacionais ou de manutenção às operações e aos processos de tratamento e sistemas auxiliares.
Primário	Remoção de parte de sólidos suspensos e matéria orgânica do esgoto.
Primário avançado	Remoção melhorada de sólidos suspensos e de matéria orgânica do esgoto. Tipicamente efetuada pela adição de compostos químicos ou filtração.
Secundário	Remoção de matéria orgânica biodegradável (em solução ou suspensão) e sólidos suspensos. A desinfecção é, também, tipicamente incluída na definição de tratamento secundário convencional.
Secundário com remoção de nutrientes	Remoção de compostos orgânicos biodegradáveis, sólidos suspensos e nutriente (nitrogênio, fósforo ou ambos).
Terciário	Remoção de sólidos suspensos residuais (após tratamento secundário), usualmente por filtros granulares, filtros de pano ou microtelas. Bem como, a desinfecção e a remoção de nutrientes.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016)

Como pode ser observado na Tabela 1, é importante definir como cada nível de tratamento é realizado. No tratamento preliminar, a remoção dos sólidos grosseiros é feita frequentemente por meio de grades, podendo também ser realizada por peneiras rotativas ou trituradores. A remoção de areia é através de desarenadores, ou caixas de areia. O efluente, depois de passar pelo tratamento preliminar, contém os sólidos em suspensão não grosseiros, que podem ser parcialmente removidos em unidades de sedimentação primária. Esse processo de tratamento primário ajuda na redução da carga orgânica, e normalmente é realizado em tanques de decantação (VON SPERLING, 2014).

O principal objetivo do tratamento secundário é a remoção da matéria orgânica, de forma a acelerar os mecanismos que ocorrem de forma natural nos corpos receptores. Essa remoção, diferentemente do tratamento primário, é realizada por reações bioquímicas. Existe uma grande variedade de métodos de nível secundário, sendo que os mais comuns são: lagoas de estabilização, lodos ativados, filtro biológico, tratamento anaeróbio e disposição sobre o solo (CAVALCANTI, 2016).

O sistema de lodos ativados normalmente é utilizado visando à otimização do processo, tendo como o tanque de aeração (reator) e de decantação (decantador secundário), unidades essenciais no sistema. A concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração é mais de 10 vezes superior à de uma lagoa aerada de mistura completa. O tempo de detenção do líquido é baixo, variando de 6 a 8 horas, devido ao tamanho reduzido do tanque de aeração quando comparado a lagoas que necessitam de um tempo de 3 dias. (METCALF; EDDY, 2016).

No entanto, devido à recirculação dos sólidos, o tempo de retenção dos sólidos no sistema é denominado idade do lodo, sendo de 4 a 10 dias no sistema de lodos ativados convencional. É esta maior permanência dos sólidos que garante a elevada eficiência dos lodos ativados, já que a biomassa tem tempo suficiente para metabolizar praticamente toda a matéria orgânica dos esgotos (VON SPERLING, 2014).

Para o tratamento de efluentes com alto teor de matéria orgânica, têm sido aplicados os reatores biológicos anaeróbios, em virtude das vantagens técnicas e econômicas, e um dos principais é o reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo, ou em inglês, *Up flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB). No tratamento anaeróbio, ocorre elevada remoção de material orgânico suspenso e solúvel, inclusive substâncias tóxicas, como os fenóis, porém, a remoção de nutrientes é baixa (CHERNICHARO, 2016).

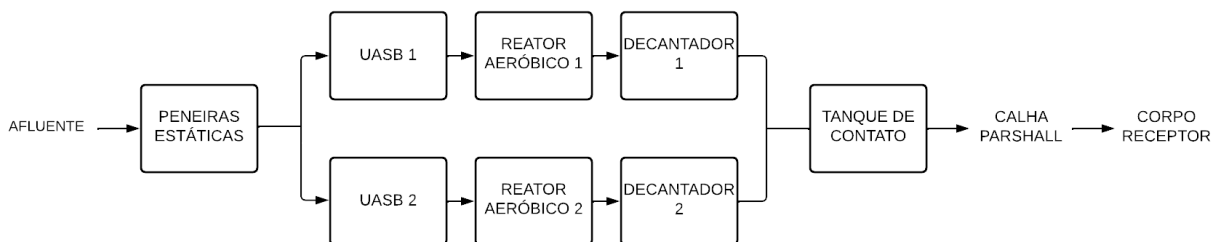
De acordo com o último diagnóstico temático de serviços de água e esgoto, disponibilizado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, embora o tratamento de esgoto sanitário esteja em foco em vários países, no Brasil, ainda existe uma defasagem em alguns estados, principalmente nos estados das regiões Norte e Nordeste do país. Até 2020 o índice de atendimento urbano com redes de esgoto em Pernambuco era 35,7%, o percentual de tratamento de esgotos coletado era 72,3%. Entretanto, apenas 32,4% do total do esgoto gerado é tratado. Logo, pode-se observar que grande parte do esgoto gerado pela população pernambucana não é

encaminhado para um sistema de esgotamento sanitário. Conhecendo o cenário de maneira ampla do sistema de tratamento de efluentes em Pernambuco, destaca-se a importância de um tratamento de esgoto eficiente, que é responsável não só pela preservação do meio ambiente, mas por diversos fatores sociais e econômicos que são influenciados, direta ou indiretamente, pela interação do homem com o ambiente (BRASIL, 2021).

2.2.1 Estação de tratamento de esgoto da unidade em estudo

A estação de tratamento de esgoto (ETE) da unidade em estudo, é composta por um tratamento preliminar, secundário e terciário. Um fluxograma da ETE em estudo está apresentado na Figura 1, que foi elaborado a partir da observação realizada *in loco*.

Figura 1 - Fluxograma da ETE em estudo.



Fonte: Autora (2023)

Conforme pode ser observado na Figura 1, o processo inicia com um tratamento preliminar, através das peneiras estáticas que objetiva a remoção de sólidos grosseiros. Em seguida, o efluente é distribuído para dois reatores UASB, para remoção de parte da matéria orgânica do efluente, que prossegue para os reatores aeróbicos. Por se tratar de um sistema de lodo ativado, após os tanques aerados, o efluente segue para os decantadores secundários. A desinfecção é realizada no tanque de contato, onde acontece a dosagem do cloro. Após o tratamento, o efluente é despejado no corpo hídrico classe 2, de acordo com a Resolução nº430/2011 do CONAMA (BRASIL, 2011).

Desta forma, o efluente após tratado deve obedecer às seguintes condições e padrões (BRASIL, 2011):

- a) pH entre 5 e 9;
- b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá extrapolar 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 mL·L⁻¹ em teste de 1 hora em cone *Inmhoff*.
- d) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) 5 dias, 20°C: máximo de 120 mg·L⁻¹, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;
- e) substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg·L⁻¹;
- f) ausência de materiais flutuantes.

Por se tratar de uma ETE presente no estado de Pernambuco, além de atender aos requisitos legais exigidos pelo CONAMA, também é necessário o cumprimento da legislação presente em duas normas técnicas da Agência Estadual do Meio Ambiente (CPRH). A primeira Norma Técnica (NT) é a nº 2.002/2000 que dispõe sobre os critérios e padrões de lançamento. Esta tem como exigências de controle, o nível de remoção de carga orgânica não industrial de acordo com a Tabela 2 (PERNAMBUCO, 2000).

Tabela 2 – Nível de remoção de carga orgânica bruta de acordo com NT nº 2.002/2000 do CPRH.

Carga Orgânica Bruta (C) kg DBO·dia⁻¹	Eficiência Mínima de Remoção (%)
$C \leq 2$	40
$2 < C \leq 6$	70
$6 < C \leq 50$	80
$C > 50$	90

Fonte: Pernambuco (2000)

Na NT 2.002/2000 do CPRH é adotada a definição de carga orgânica, sendo a quantidade de matéria orgânica expressa em massa por unidade de tempo (kg DBO·dia⁻¹), transportada ou lançada num corpo receptor, ou sistema de tratamento de

águas residuárias. Antes de calcular a eficiência mínima de remoção, como é estabelecido na Tabela 2, é importante considerar os seguintes pontos (PERNAMBUCO, 2000):

- Concentração média de DBO no esgoto sanitário = 300 mg·L⁻¹;
- Contribuição de uma pessoa = 0,054 kg DBO·dia⁻¹.

Tendo em vista que, o parâmetro DBO é reportado como remoção mínima de 90%, conforme a NT 2.002/2000, o percentual de remoção deve ser calculado pela Equação 1:

$$\% \text{ Remoção} = \frac{C_{\text{entrada}} - C_{\text{saída}}}{C_{\text{entrada}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

sendo: C_{entrada} é o valor do parâmetro na entrada da ETE e $C_{\text{saída}}$ é o valor do parâmetro na saída da ETE.

A segunda NT que deve ser cumprida, é a nº 2.007/2001, que estabelece o número máximo permitido (NMP) de coliformes fecais (CF) para o lançamento de efluentes domésticos ou industriais nos corpos de águas receptores. Sendo NMP a estimativa da densidade média de bactérias do grupo coliforme em uma amostra, calculada a partir da combinação de resultados positivos e negativos, obtidos mediante a técnica de tubos múltiplos (PERNAMBUCO, 2001).

O número máximo permitido de coliformes fecais (NMPCF/ 100 mL) é definido em função da classificação das águas doces, salobras e salinas, de acordo com seus usos preponderantes, estabelecidos na Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005). O NMPCF permitido por classe e os parâmetros básicos que definem essas classes são apresentados na Tabela 3. (PERNAMBUCO, 2001).

Tabela 3 – Parâmetros da NT 2.007/2001 do CPRH.

Classes (corpos d'água)	1	2	3	4	5	6	7	8
DBO 20 (mg·L⁻¹ O₂)	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 10,0	-	≤ 5,0	≤ 10,0	≤ 5,0	-
OD (mg·L⁻¹ O₂)	≥ 6,0	≥ 5,0	≥ 4,0	≥ 2,0	≥ 6,0	≥ 4,0	≥ 5,0	≥ 3,0
Turbidez (UNT)	≤ 40	≤ 100	≤ 100	-	-	-	-	-
pH	6,0- 9,0	6,0- 9,0	6,0- 9,0	6,5- 9,0	6,5- 8,5	6,5- 8,5	6,5- 8,5	5,0- 9,0
Coliformes fecais (NMP/100 mL)	200	1.000	4.000	-	14	4.000	14	4.000
Coliforme total (NMP/100 mL)	1.000	5.000	20.000	-	1.000	20.000	1.000	20.000

Fonte: Pernambuco (2001)

Ao analisar a Tabela 3, obtida na NT nº2.007/2001, e os parâmetros estabelecidos, pode-se observar a importância do tratamento e qualidade do efluente que sai da estação de tratamento de esgoto para ser descartado no corpo hídrico receptor (BRASIL, 2021). Com isso, é necessário que o processo, como um todo, opere sob controle. Para alcançar tal objetivo, o controle estatístico de processo pode ser utilizado com o intuito principal que os resultados fora dos padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais não sejam reproduzidos, e assim possibilita que planos de ação sejam elaborados de forma a controlar o processo (RAMOS, 2000).

2.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

O controle estatístico do processo (CEP) é definido como um conjunto de princípios de gerenciamento, de técnicas e de habilidades oriundas da Estatística e da Engenharia. Este conjunto possui como objetivo garantir a estabilidade e a

melhoria contínua de um processo de produção, seja técnico ou administrativo. Em resumo, visa o controle e a melhoria do processo (TODELO *et al.* 2012).

Para a implantação do CEP, são utilizadas ferramentas, que também são aplicadas para monitorar e melhorar o processo. Essas principais técnicas de apoio ao controle estatístico do processo, são conhecidas como as sete ferramentas da qualidade. Estas ferramentas são: fluxograma, diagrama de *Ishikawa* (causa e efeito), folha de verificação, histograma, diagrama de dispersão, diagrama de pareto e os gráficos de controle (também chamados de cartas de controle ou gráficos de *Shewhart*) (PALADINI, 2019). Dentre as ferramentas da qualidade a mais utilizada para monitoramento de processo é o gráfico de controle.

2.3.1 Gráficos de controle

O CEP pode ser operacionalizado através dos gráficos de controle, que são utilizados na detecção de alterações inusitadas em uma ou mais características de um processo ou produto, a partir da definição de uma faixa de controle aceitável, ao longo do tempo. Este modelo de gráfico, além de permitir medir, monitorar e controlar os resultados, permite a comparação com os limites de especificação definidos pelo cliente ou pela legislação (PALADINI, 2019). O gráfico de controle, é a ferramenta da qualidade utilizada neste trabalho, pois a sua atuação de controle do processo acontece nas fases de avaliar, comparar, analisar e decidir.

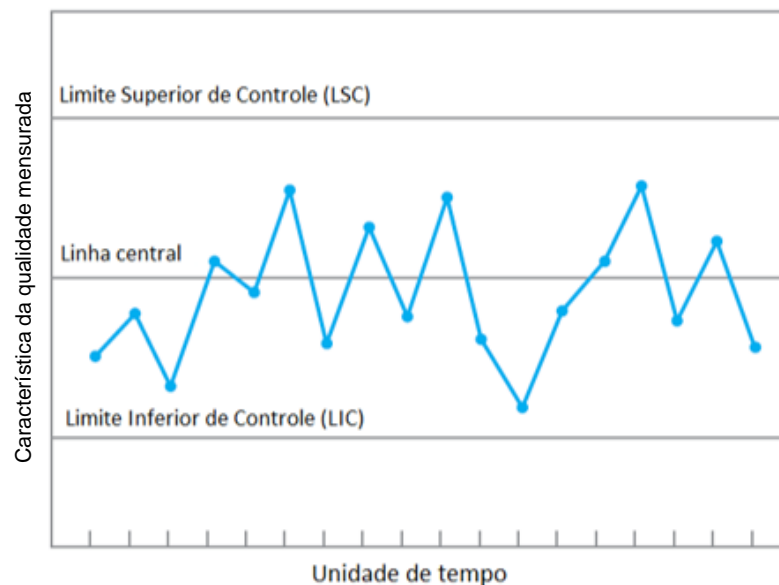
A partir do tipo das informações mensuradas, os gráficos de controle podem ser divididos em dois modelos: atributos ou variáveis. O primeiro se refere às características de qualidade que classificam itens em conformes ou não conformes, ou seja, são aqueles cujas variáveis são obtidas através de uma classificação ou contagem. Os gráficos de variáveis se baseiam na medida das características de qualidade, em que os resultados são obtidos através de uma medição (HENNING *et al.* 2014).

A elaboração do gráfico de controle ocorre em duas fases distintas (HENNING, 2016). Na primeira fase (Fase I), há a obtenção de uma amostra representativa dos dados a serem avaliados, visando à determinação dos limites de controle, sendo em geral um estudo com dados retrospectivos. Nesta fase também é realizado um minucioso estudo verificando se o processo está sob controle estatístico em que se verifica se os dados são independentes e identicamente distribuídos. A Fase I é

concluída somente quando todas as causas especiais do processo são eliminadas. Na segunda fase (Fase II), as informações obtidas na Fase I são utilizadas para testar se o processo permanece sob controle quando as observações futuras são monitoradas (SMETI *et al.* 2007; PEDRINI, 2009).

Inicia-se o gráfico de controle, ou carta de controle, escolhendo o instrumento de coleta de dados. O gráfico consiste na plotagem de três linhas e os pontos que representam as amostras que estão apresentados na Figura 2, onde no eixo x se encontra a dimensão temporal nos quais foram obtidos os dados, enquanto no eixo y há a característica da qualidade analisada (TODELO *et al.* 2012).

Figura 2 – Exemplo de gráfico de controle.



Fonte: Adaptado de Montgomery; Runger (2018)

Compondo o gráfico da Figura 2, há as três linhas que representam dois limites de controle, o Limite Superior de Controle (LSC) e o Limite Inferior de Controle (LIC), e a do meio sendo o Linha Central (LC), que é a média da variável ou o alvo da característica (SOUZA, 2021).

Quando os dados a serem avaliados são gerados mensalmente, o gráfico de controle que mais se adapta é o de valor individual (\bar{x}). Sendo assim, os limites de controle podem ser calculados fazendo uso das Equações 2-7 (HENNING *et al.* 2014):

$$\bar{x} = \frac{\sum_k^i x_i}{k} \quad (2)$$

$$Rm_i = |x_i - x_{i+1}| \quad (3)$$

$$\bar{R}m = \frac{\sum_{k-1}^i Rm_i}{k - 1} \quad (4)$$

$$LC_X = \bar{x} \quad (5)$$

$$LSC_X = \bar{x} + E_2 \cdot \bar{R}m \quad (6)$$

$$LIC_X = \bar{x} - E_2 \cdot \bar{R}m \quad (7)$$

Em que: \bar{x} é a média dos valores do parâmetro; x_i é o valor do parâmetro no ponto i ; x_{i+1} é o valor do parâmetro no ponto $i + 1$; k é o tamanho da amostra; Rm_i é a amplitude móvel para o ponto i ; $\bar{R}m$ é a média dos valores da amplitude móvel; E_2 é o parâmetro de ajuste para gráfico de x ; LSC_X é o limite superior de controle para o gráfico de x ; LC_X é a linha central para o gráfico de x e LIC_X é o limite inferior de controle para o parâmetro x para o gráfico de x .

Os valores do parâmetro de ajuste (E_2) é uma constante tabelada (ANEXO A). O valor utilizado varia de acordo com o tipo de gráfico de controle e o tamanho da amostra (n).

Tradicionalmente, as linhas de controle ficam numa distância de três desvios-padrão da média ou do alvo do processo. Não é uma regra o uso de três, porém, na prática, funciona de maneira satisfatória na maioria dos casos. O desvio-padrão utilizado é o desvio-padrão das médias (erro-padrão), porém também pode ser estimado com base na amplitude. Os limites de controle definem uma área razoavelmente grande que vai evitar alarmes falsos, em termos estatísticos, definem um intervalo de confiança com nível de precisão de 99,73%. Estes alarmes falsos, conhecidos como *outliers*, são dados que distanciam bruscamente dos demais dados que compõem a amostra analisada (PALADINI, 2019).

2.3.1.1 Análises do gráfico de controle

Para que possam ser observadas situações na qual o processo estará fora de controle, é necessário realizar a análise nos gráficos de controle. Essa condição fora de controle não acontece apenas quando um ou mais pontos ultrapassam os limites de controle, mas também ocorre quando os dados exibem algum padrão de comportamento não aleatório (MONTGOMERY; RUNGER, 2018).

A norma *International Organization for Standardization (ISO) 7870-2:2013 - Control Charts – Part 2: Shewhart control charts* prevê oito critérios de avaliação do controle de processo em busca de padrões não aleatórios, os quais são apresentadas a seguir pela Tabela 4 e Figura 3.

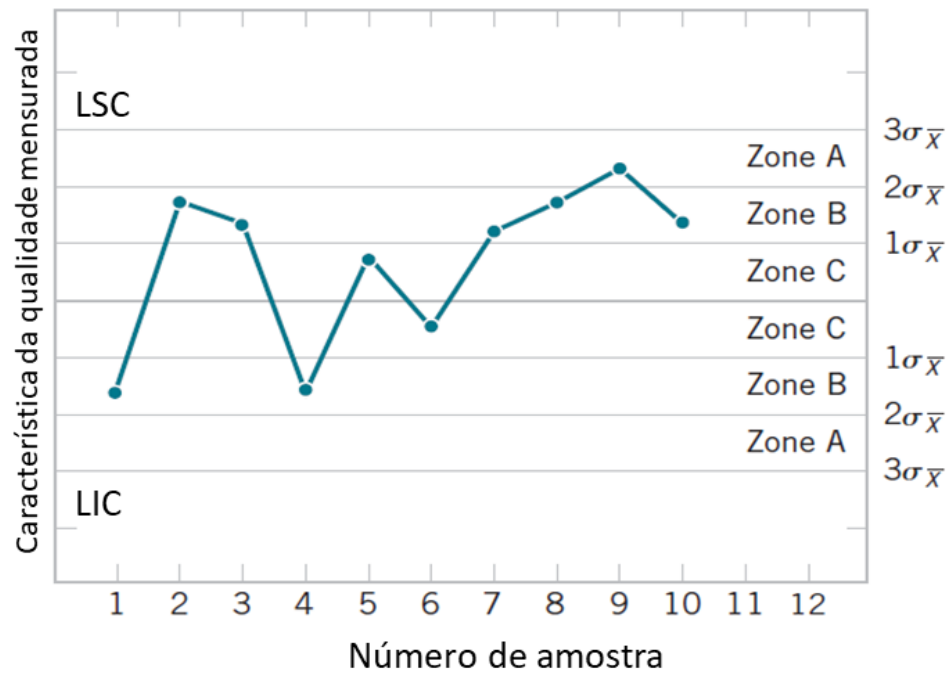
Tabela 4 – Critérios para a detecção de causas especiais em gráficos de controle.

Critério	Especificações
1	Qualquer ponto fora dos limites de controle
2	Seis pontos consecutivos na zona C ou além, no mesmo lado da linha central;
3	Seis pontos consecutivos no sentido ascendente e descendente.
4	Quatorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente.
5	Dois de três pontos consecutivos na zona A, do mesmo lado da linha central;
6	Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, do mesmo lado da linha central;
7	Quinze pontos consecutivos na zona C acima e abaixo da linha central;
8	Oito pontos consecutivos em ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C.

Fonte: norma ISO 7870-2:2013

Na Tabela 4 são apresentados os critérios presentes na ISO 7870-2:2013. Para aplicar estes critérios é necessário dividir o intervalo entre os limites de controle, como pode ser observado na Figura 3, onde há um gráfico de controle com os limites para 1σ , 2σ e 3σ que servem como limites de aviso, também chamados como Zona A, B e C, respectivamente em cada lado da linha central.

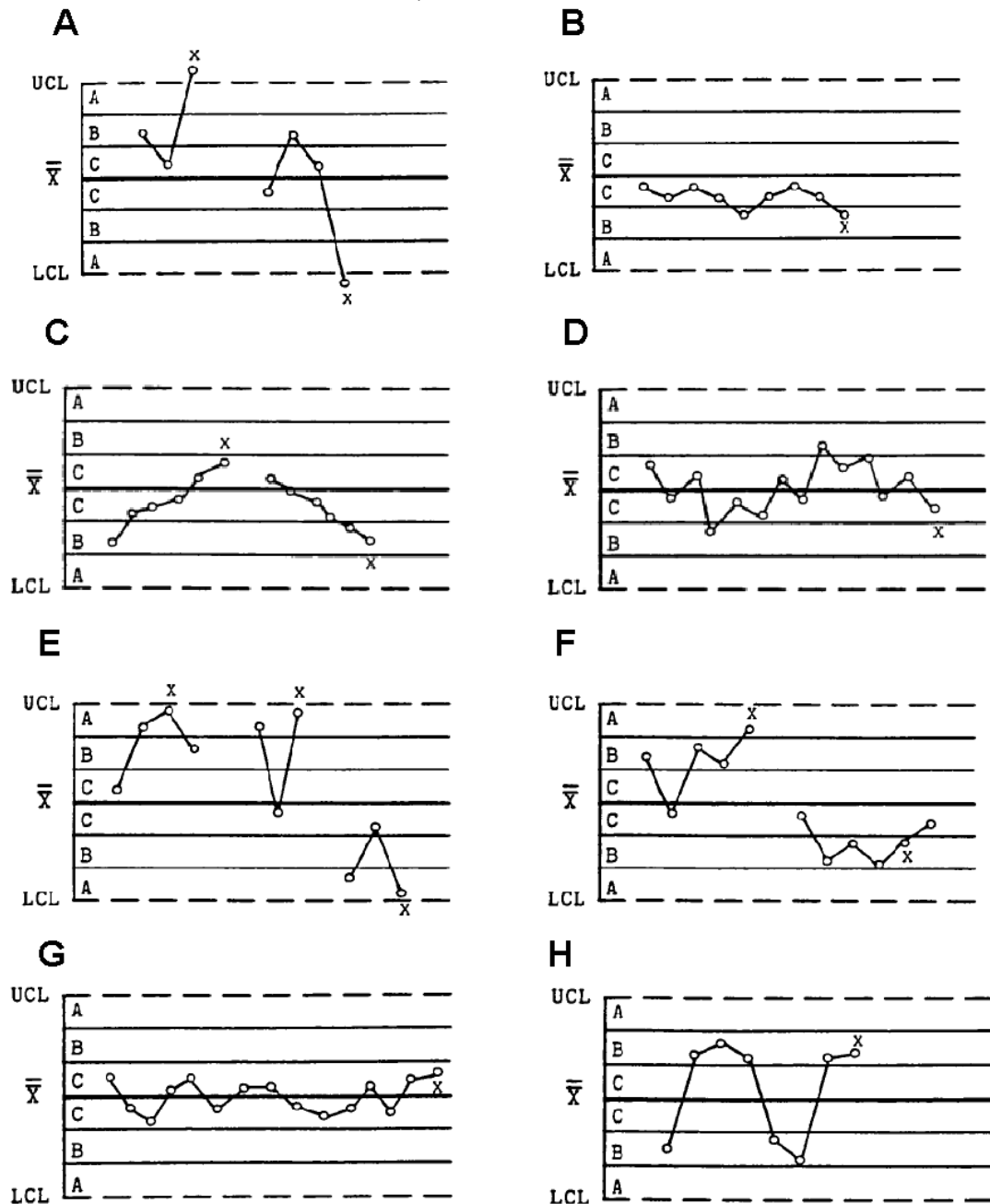
Figura 3 – Gráfico de controle com as zonas dos critérios da norma ISO 7870-2:2013.



Fonte: Adaptado de Montgomery; Runger (2018).

Nelson (1985) interpretou cada um dos 8 critérios supramencionados, exemplificando as possíveis origens para cada causa especial. A Figura 4 ilustra exemplos para cada causa, sendo UCL e LCL referentes aos LSC e LIC respectivamente, e \bar{x} a média das médias do parâmetro a ser analisado do processo.

Figura 4 – Ilustrações dos testes de causas especiais aplicadas a gráficos de controle conforme norma ISO 7870-2:2013. A) Critério 1; B) Critério 2; C) Critério 3; E) Critério 5; F) Critério 6; G) Critério 7 e H) Critério 8



Fonte: Nelson (1984).

Na Figura 4A, o padrão é pacificamente aceito como essencial para perceber eventos fora de controle e, em dadas circunstâncias, o único que é considerado como utilizável. A partir do citado método, é previsto um comportamento que irá produzir um sinal, caso haja elevação no desvio padrão, como também, alteração no posicionamento médio. Importante também mencionar a relação de proporcionalidade entre o tamanho da mudança e o tempo de ocorrência do sinal, ou seja, quanto mais

elevada for a alteração, mais rápido o sinal será dado. Portanto, se o intervalo de dado gráfico de controle permanece constante e seguro, é possível afastar a hipótese de sua elevação. O critério 1 também responderá a uma única anomalia no processo, como erros aritméticos ou de cálculo do operador, erros de tamanho de amostra, defeito ou quebra do equipamento e assim por diante (NELSON, 1985).

Ainda segundo Nelson (1985) a Figura 4B indica uma sequência de possível alteração na distribuição do processo, caracterizada por nove ou mais pontos consecutivos, somente em um dos lados da linha central. Este tipo de ocorrência possivelmente é devido à mudança de matérias primas ou máquinas; mudança no modo de inspeção, introdução de novos operadores, falta de experiência na atividade, treinamento inadequado, falta de atenção ou motivação por parte destes.

Em seguida, na Figura 4C, a situação de permanência ou desvio na média do processo, podendo ser representada tanto por uma tendência de crescimento como de baixa. As possíveis causas para esse arranjo podem ser a melhora ou piora na habilidade do operador, desgaste da ferramenta ou mudanças nas condições ambientais (NELSON, 1985). Na Figura 4D, observa-se uma variação sistemática, como produzido por duas máquinas, fusos, operadores ou fornecedores usados alternadamente. A seleção do número de pontos foi feita com base nos testes de Monte Carlo que mostraram que 14 pontos ascendendo ou decaindo alternadamente (NELSON, 1985).

Verificando a Figura 4E, pode-se notar padrões que detectam pequenas variações no processo, caracterizadas por mudanças na média. O excesso de ajustes no parâmetro estudado pode ser uma das causas para esses tipos de variações.

Parecido com o caso citado anteriormente, a Figura 4F avalia uma mudança na média do processo, porém, com variações mais sutis do que o teste supracitado (NELSON, 1985).

Ao observar inicialmente a configuração de pontos na Figura 4G mesmo parecendo estar sob controle, esse padrão pode demonstrar um problema de limites de controles muito espaçosos. Isto pode ocorrer por conta de dados estratificados, que ocorrem quando uma fonte sistemática de variação está presente dentro de cada subgrupo. Encerrando a interpretação de Nelson (1985), a Figura 4H evidencia um gráfico de controle com um padrão de mistura, onde os pontos tendem a se encaixar perto dos limites.

Nos casos em que nenhuma desses padrões são encontrados, adota-se que o processo está variando apenas por causas naturais. Porém, há a necessidade de verificar essa suposição, e a forma mais comum de fazer isso é através do teste de normalidade (NETTO, 2017).

2.3.1.2 Teste de normalidade

A curva simétrica em torno do seu ponto médio, que apresenta o famoso formato de sino, é conhecida como distribuição normal ou distribuição gaussiana. O teste de normalidade é usado para constatar se um conjunto de dados de uma variável, é bem modelada por uma distribuição normal ou não. Dentre as opções para se verificar se uma distribuição é normal, o histograma, *box plot* e o gráfico de dispersão normal *Q-Q plot* são normalmente usados, porém, eles não informam se a distribuição está suficientemente próxima da normalidade. Logo, para complementar às análises gráficas, métodos objetivos são necessários para determinar se uma distribuição é ou não normal (SARDANHA *et al.* 2015).

Um tipo de teste de normalidade muito utilizado para amostras reduzidas é o de *Shapiro-Wilk* (S-W), que fornece o parâmetro valor de prova (valor-p, *p-value* ou significância), que é utilizado nesse teste de hipótese, e representa a probabilidade de que os dados da amostra tenham sido selecionados de uma população com distribuição normal. Quanto menor for o *p-value*, menor é a consistência entre os dados e a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição normal. Logo, a regra de decisão adotada para saber se a distribuição é normal ou não é rejeitar H_0 (HANUSZ, TARASINSKA, ZIELINSKI, 2016):

- se $p\text{-value} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , ou seja, não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição normal;
- se $p\text{-value} > \alpha$, não se rejeita H_0 , ou seja, a distribuição normal é uma distribuição possível para o conjunto de dados em questão.

Alfa (α) é nível de significância ou o risco, em porcentagem, de se concluir que os dados não seguem a distribuição normal e é usualmente adotado como igual a 0,05 ou 5%. De forma sucinta, no teste de normalidade na qual o valor p for maior que 0,05 é possível considerar que os dados seguem uma distribuição normal (HANUSZ, TARASINSKA, ZIELINSKI, 2016).

Para o cálculo da estatística de *Shapiro-Wilk*, utiliza-se a Equação 8:

$$W = \frac{b^2}{s^2} = \frac{(\sum_{i=1}^n a_1 \cdot x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

Em que: n é quantidade total de dados; x_i é valor do parâmetro no ponto i ; \bar{x} é a média dos valores do parâmetro e a_1 são coeficientes tabeladas.

2.3.1.3 Capacidade do processo

Quando o assunto é implantação do CEP, a análise de capacidade do processo também é uma avaliação necessária, pois tem como objetivo determinar se um processo que tenha o comportamento conhecido é capaz de produzir ou prestar o serviço seguindo as especificações predeterminadas. As métricas mais utilizadas para isso são capacidade do processo (Cp) e a capacidade do processo unilateral (Cpk). O Cp é dado pela razão entre a faixa de especificação e a variação natural do processo, quanto maior o seu valor, melhor o processo consegue atender às especificações. Enquanto o Cpk é o valor mínimo entre a capacidade do processo superior (Cps) e a capacidade do processo inferior (Cpi). Esses parâmetros são calculados como a razão do valor absoluto da diferença entre o limite superior, ou inferior, e 3σ (PALADINI, 2019), como se pode observar nas Equações 9 a 12:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (9)$$

$$Cpk = \min\{Cpi, Cps\} \quad (10)$$

$$Cpi = \frac{\bar{x} - LIE}{3\sigma} \quad (11)$$

$$Cps = \frac{LSE - \bar{x}}{3\sigma} \quad (12)$$

Em que: LIE é o limite inferior de especificação; LSE é o limite superior de especificação e \bar{x} , média dos valores do parâmetro.

Quando o desvio-padrão do processo (σ) é desconhecido, então se faz necessário o emprego de fatores de correção, transformando as Equações 9, 11 e 12 nas Equações 13, 14 e 15, respectivamente:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6 \cdot \frac{Rm}{d_2}} \quad (13)$$

$$Cpi = \frac{\bar{x} - LIE}{3 \cdot \frac{Rm}{d_2}} \quad (14)$$

$$Cps = \frac{LSE - \bar{x}}{3 \cdot \frac{Rm}{d_2}} \quad (15)$$

Os parâmetros de ajuste d_2 e c_4 são tabelados e podem ser encontrados no ANEXO A.

Para os índices de capacidade, quanto maior o seu valor, melhor o processo consegue atender às especificações. Os possíveis valores do Cp e a respectiva classificação em relação à capacidade do processo estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação do sistema de acordo com valor da capacidade do processo.

Valor do parâmetro	Classificação do sistema
$Cp > 1,33$	Capaz
$1,00 \leq Cp \leq 1,33$	Razoavelmente capaz
$Cp < 1,00$	Incapaz

Fonte: Kent (2016)

Conforme a Tabela 5, quando $Cp < 1,00$, o processo é classificado como incapaz, pois pode-se afirmar que parte dos resultados obtidos estão ou estarão, caso nenhuma ação seja tomada, fora da tolerância determinada. Quando se calcula um Cp que está entre 1,00 e 1,33, isto indica que 6σ é igual ou muito próximo da faixa de tolerância especificada. Apenas cerca de 0,27% das saídas deste processo estarão fora da especificação. Devido a esta pequena porcentagem de resultados fora dos limites, é possível afirmar que o processo é razoavelmente capaz de atender ao desejado (PALADINI, 2019).

Ainda analisando a Tabela 5, se $C_p > 1,33$ então 6σ é menor que a largura da faixa de tolerância. Neste caso, os resultados fora da tolerância geralmente não serão produzidos, sendo mais de 99,73% dos resultados, considerando-se, nesse caso, o processo capaz. Processos classificados como capaz permitem que pequenas variações de causas especiais em materiais, homens, métodos, máquinas e ambiente aconteçam sem que os comprometam (KENT, 2016).

3 METODOLOGIA

Neste tópico será apresentada a metodologia para desenvolver o presente trabalho, no que diz respeito aos parâmetros de controle da ETE de estudo, levantamento de dados, construção e análise dos gráficos de controle.

3.1 PARÂMETROS DE CONTROLE

Inicialmente, foram avaliados os parâmetros legislados e definidos quais seriam utilizados para monitoramento visando o despejo do efluente após tratamento em corpo receptor. De acordo com a Resolução Nº 430/2011 do CONAMA e das Normas Técnicas 2.002/2000 e 2.007/2001 do CPRH, os parâmetros físico-químicos que são analisados e controlados mensalmente estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de monitoramento mensal na ETE em estudo conforme legislação ambiental.

Parâmetro	Método Analítico	Faixa Aceitável	Fonte
Coliformes fecais	SM 9223	≤ 1000 NMP 100 mL ⁻¹	CPRH NT 2.007/2001
DBO	SM 5210 D	Remoção $\geq 90\%$	CPRH NT 2.002/2000
O&G	ASTM D7066	< 100 mg·L ⁻¹	CONAMA 430/2011
pH	SM 4500 H+ B	5,0 – 9,0	CONAMA 430/2011
Sólidos sedimentáveis	SM 2540 F	≤ 1 mg·L ⁻¹	CONAMA 430/2011
Temperatura	SM 2550 B	< 40 °C	CONAMA 430/2011

Fonte: A autora (2023)

Vale enfatizar que os parâmetros listados na Tabela 6 foram analisados conforme métodos analíticos descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd. Edition, 2017* e *American Society for Testing and Materials*.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

Foram levantados os dados dos parâmetros listados na Tabela 6 do item 3.1, pela equipe do setor de meio ambiente, no período de janeiro de 2020 a dezembro de

2022. As análises foram realizadas por um laboratório com licença ambiental e certificado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira (NBR) ISO 9001:2015 - Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos e pela ABNT NBR ISO 14001:2015 - Sistemas de Gestão Ambiental - Requisitos, junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). As amostras de efluentes analisadas foram coletadas mensalmente no período avaliado e seus resultados disponibilizados no *software myLims Web*. Os dados foram organizados e as planilhas foram elaboradas com os dados mensais para construção dos gráficos de controle, análise da normalidade, cálculo da capacidade do processo e avaliação da eficiência da ETE durante três anos da pandemia do vírus COVID-19.

3.3 GRÁFICOS DE CONTROLE

Por motivo dos dados analisados serem gerados mensalmente, o gráfico de controle que mais se adapta ao trabalho em questão é o de valor individual (\bar{x}). Como mencionado no item 2.3.1, os limites de controle foram calculados através das Equações 2-7.

Os valores do parâmetro de ajuste (E_2) podem ser encontrados no ANEXO A. No caso do presente trabalho por ser um gráfico de controle para valores individuais, para determinar o valor a ser utilizado de E_2 , foi considerado o tamanho da amostra (n) como sendo igual a 2. Este foi o valor definido, pois é o tamanho das amostras empregadas para o cálculo das amplitudes móveis.

Os resultados do ano de 2020 foram aplicados para calcular os limites de controle dos gráficos, sendo a Fase I. Os cálculos dos limites de controle foram realizados no *software* Microsoft Excel ®. Já a Fase II é composta pelo processo de avaliação dos gráficos com os dados referentes aos três anos.

3.3.1 Análises do gráfico de controle

Os gráficos gerados foram avaliados segundo a norma ISO 7870-2:2013 - *Control Charts – Part 2: Shewhart control charts*. Os testes foram realizados, de modo manual, em conjunto com a criação dos gráficos no *software* Microsoft Excel ®.

Os testes de normalidade de *Shapiro-Wilk*, foram realizados também com o auxílio do *software* Microsoft Excel® e do suplemento *Real Statistics*, em relação aos cálculos das capacidades do processo, foram calculados de maneira manual no *software* Microsoft Excel®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos para os gráficos de controle, teste de normalidade e capacidade de processo. Serão discutidos também os principais fatores que contribuíram para os resultados obtidos e a comparação dos valores com os requisitos regulatórios, quando aplicáveis.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Os relatórios mensais com os resultados dos parâmetros definidos pela legislação ambiental, descritos na Tabela 6 no item 3.1, foram obtidos no *software myLims* disponibilizado pelo laboratório licenciado responsável pelas análises.

Os dados referentes aos anos 2020, 2021 e 2022, estão disponíveis nos APÊNDICES A, B e C e foram utilizados para a construção dos gráficos de controle e demais avaliações realizadas.

4.2 GRÁFICO DE CONTROLE

Foram calculados a média e os limites de controle superior e inferior conforme Equações 2 a 7. Após construção dos gráficos de controle, os dados referentes ao ano de 2020, utilizados para os cálculos dos limites, foram plotados e observou-se que para os parâmetros coliformes fecais e sólidos sedimentáveis ocorreram pontos fora do limite de controle. Os resultados preliminares para estes dois parâmetros estão apresentados na Figura 5, já que foram os únicos que apresentaram pontos fora dos limites de controle.

Vale salientar que o limite inferior para os coliformes fecais e sólidos sedimentáveis foram negativos. Nestes casos os limites foram considerados zero, como pode ser observado na Tabela 7.

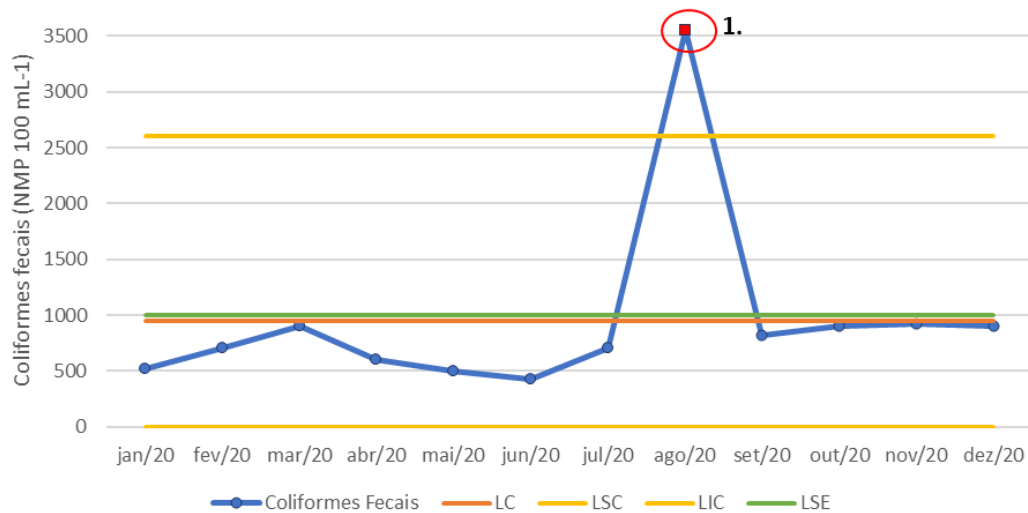
Tabela 7 – Limites para a construção dos gráficos de controle dos parâmetros coliformes fecais e sólidos sedimentáveis.

Parâmetro	Unidade	Média	LIC	LSC
Coliformes fecais	NMP 100 mL ⁻¹	954	0,0	2605
Sólidos sedimentáveis	mg·L ⁻¹	0,3	0,0	1,8

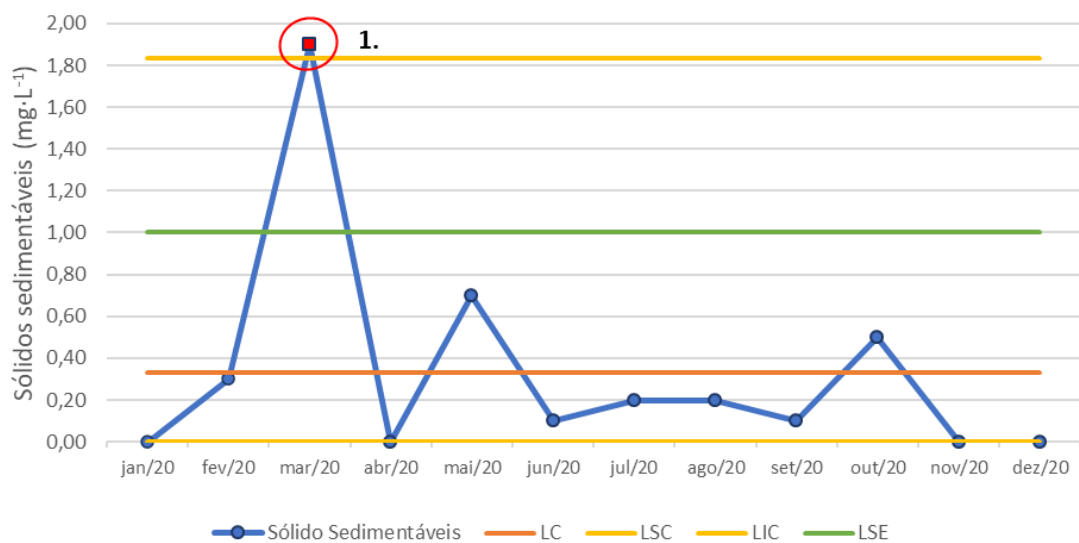
Fonte: A autora (2023)

Figura 5 – Gráfico de controle. A) Coliformes fecais; B) Sólidos sedimentáveis para os dados do ano de 2020. Os limites de controle estão em cor amarela, de especificação em verde e a linha média em laranja.

A



B



Fonte: A autora (2023)

Para coliformes fecais, observa-se na Figura 5A que o valor referente ao mês de agosto está fora do limite de controle (critério 1 da norma ISO 7870-2:2013). Além disso, todas as demais amostras estão abaixo de linha média, este comportamento pode ter ocorrido devido a drástica variação entre os valores das amostras e o ponto fora do limite de controle.

No caso dos sólidos sedimentáveis, Figura 5B, é possível notar também um ponto fora dos limites de controle superior no mês de março. Tendo em vista que a Figura 5A (coliformes fecais) e 5B (sólidos sedimentáveis) apresentaram pontos fora dos limites de controle para o ano de 2020, esses pontos foram eliminados, novos limites foram calculados e os dados foram novamente plotados. Desta vez, todos os pontos ficaram dentro dos limites de controle, os quais estão apresentados na Tabela 8 para todos os parâmetros.

Tabela 8 – Limites de controle para construção dos gráficos de controle dos parâmetros analisados.

Parâmetro	Unidade	Média	LIC	LSC
Coliformes fecais	NMP 100 mL ⁻¹	717,7	351,6	1084
Remoção DBO	%	96,5	91,0	100
O&G	mg·L ⁻¹	11,4	5,6	17,2
pH	-	7,0	5,6	8,5
Sólidos sedimentáveis	mg·L ⁻¹	0,2	0,0	1,0
Temperatura	°C	29,8	27,2	32,4

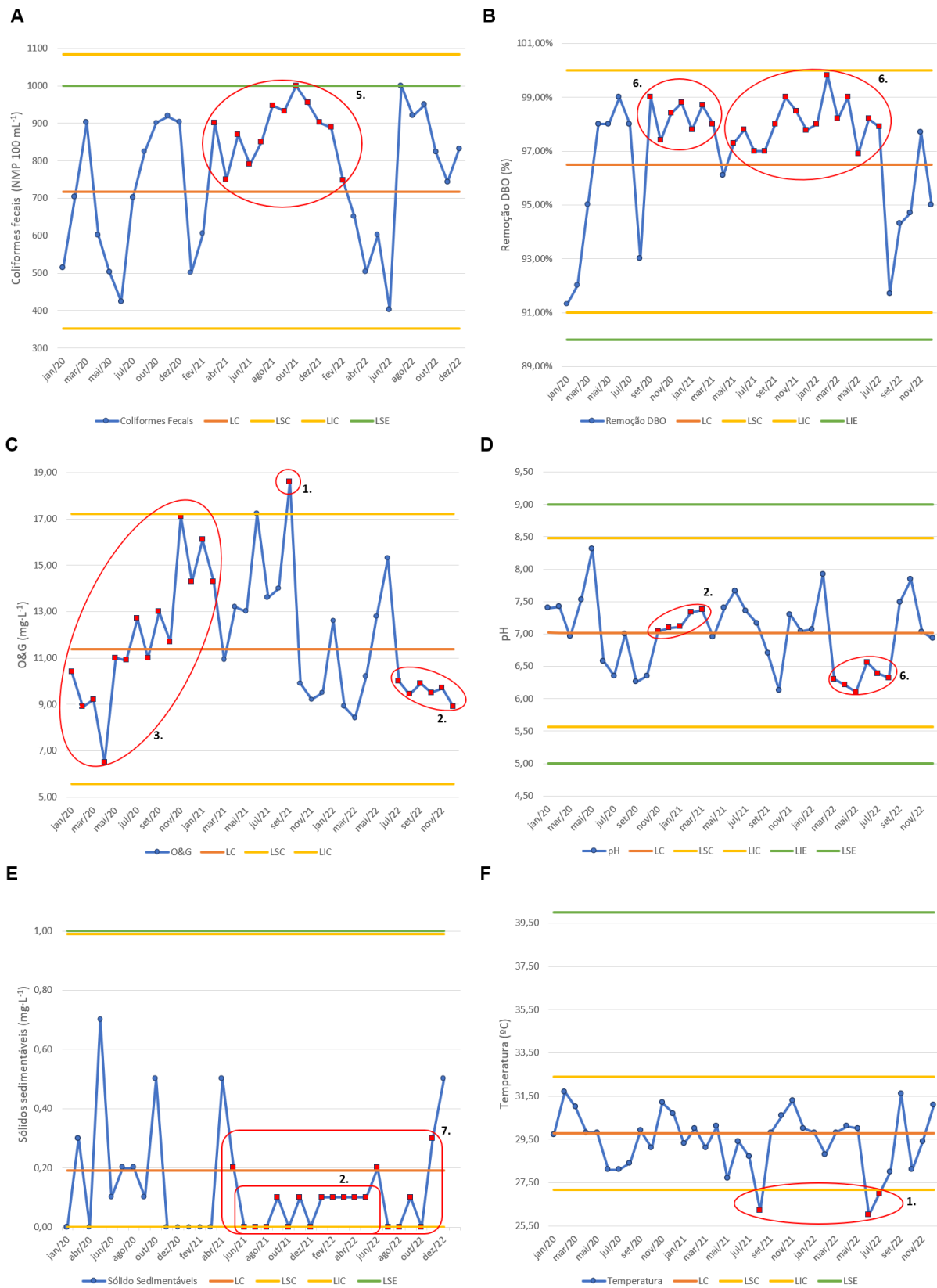
Fonte: A autora (2023)

O limite superior para remoção de DBO na Tabela 8 foi considerado 100%, uma vez que quando calculado foi superior a esse valor. Pode ser observado ainda pela Tabela 8, que, exceto pelo limite de controle do parâmetro coliformes fecais, todos os outros limites calculados atenderam aos estabelecidos pela Legislação (Tabela 6, Item 3.1).

Após os cálculos dos limites, os gráficos de controle, com os dados de 2020 a 2022, foram construídos, os valores foram plotados e estão apresentados na Figura 6. Posteriormente à construção dos gráficos, foram realizadas as análises dos

processos conforme critérios supramencionados no item 3.2. Vale salientar que o limite superior de especificação para óleos e graxas de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ não foi plotado no gráfico por conta da escala, já que o valor para o LSC foi de $17,2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Figura 6 – Gráfico de controle. A) Coliformes fecais; B) Remoção de DBO; C) O&G; D) pH; E) Sólidos sedimentáveis; F) Temperatura. Os limites de controle estão em cor amarela, de especificação em verde e a linha média em laranja.



Fonte: A autora (2023)

Na Figura 6, pode-se observar de uma maneira geral que os arranjos mais frequentes são os de sequência, critério 2 da norma ISO 7870-2:2013, e de mudanças na média, representadas pelos critérios 5 e 6. As sequências, provavelmente ocorreram devido à variação das características e composição do efluente a ser tratado, já que existe a variação do efluente de chegada ao longo do ano. Já as mudanças na média, podem ter sido causadas pela tentativa de ajuste nos parâmetros ou em outros pontos, que, quando alterados, interfiram nos valores dos parâmetros. Em relação aos pontos fora dos limites de controle, provavelmente ocorreram devido a algum erro no registro dos dados pelo laboratório responsável pelas análises e/ou defeitos ou ações incorretas nos equipamentos do processo de tratamento do efluente. Outro fator que pode ter influenciado nesses resultados está relacionado às alterações na matéria prima (afluente), por conta do aumento de pessoas isoladas em suas residências devido à pandemia gerada pelo vírus COVID-19, durante 2020 a 2022, onde é possível observar o comportamento da ETE durante a pandemia.

Pela Figura 6^a, foi possível detectar uma região em que ocorreu mudança na média do processo, representado pelo critério 5 da norma ISO 7870-2:2013. Outro fato importante é que pontos antes muito próximos da LC, depois ficaram mais afastados, comprovando o efeito positivo ao eliminar o ponto fora dos limites de controle da Figura 5.

Observada a Figura 6B nota-se uma mudança na média no fim de 2020, provavelmente devido a um excesso de ajuste no processo devido à pandemia da COVID-19. A partir de junho de 2022, quando as atividades voltaram à normalidade, o parâmetro voltou a ter um comportamento aleatório. No entanto, vale ressaltar que para remoção de DBO, um dos parâmetros mais usados para avaliar a carga orgânica do efluente a ser enviado ao corpo receptor, o CPRH estipula remoção pelo tratamento de no mínimo 90%. A ETE em estudo apresentou todos os valores acima do limite inferior de controle de 91%, o que coloca todos os resultados dentro do que é especificado pela legislação.

A tendência crescente (critério 3 da norma ISO 7870-2:2013) observada na Figura 6C, para o parâmetro óleos e graxas, pode ser devido às alterações na matéria prima, consequência do aumento de pessoas isoladas em suas residências devido a pandemia gerada pelo vírus COVID-19. Ao analisar o gráfico, há um ponto fora do limite de controle superior, que foi corrigido nos meses seguintes, como pode ser visto

pela inversão dos dados para abaixo da linha média observado através de uma sequência (critério 2 da norma ISO 7870-2:2013)

Para o pH, o processo mostrou resultados muito bons, com pontos próximos da linha central, como podem ser vistos na Figura 7D. A partir de março de 2022, houve uma mudança de média, provavelmente uma leve quantidade de ajustes foram efetuados durante essa janela de tempo, causando essa anomalia e os dados mais próximos da linha inferior de controle.

No novo gráfico de controle para sólidos sedimentáveis (Figura 6E), ficaram mais ressaltadas as sequências de pontos próximos da linha média (critério 7 da norma ISO 7870-2:2013) por consequência da faixa estreita entre a linha média e o limite inferior de controle. Esses arranjos podem ter acontecido devido às mudanças no processo para corrigir as variações que ocorreram em maio e em outubro de 2020, como também em abril de 2021. Vale ressaltar que, quanto menor for esse parâmetro melhor é o resultado.

Para a Temperatura, na Figura 6F, foram encontrados pontos fora dos limites de controle inferior em três meses. O que pode ter ocorrido devido às variações climáticas já que aconteceram em períodos do inverno brasileiro. Tendo em vista que o limite superior de especificação para Temperatura é de 40°C, é possível observar que o processo de tratamento do efluente em estudo mantém a temperatura bem abaixo deste limite determinado.

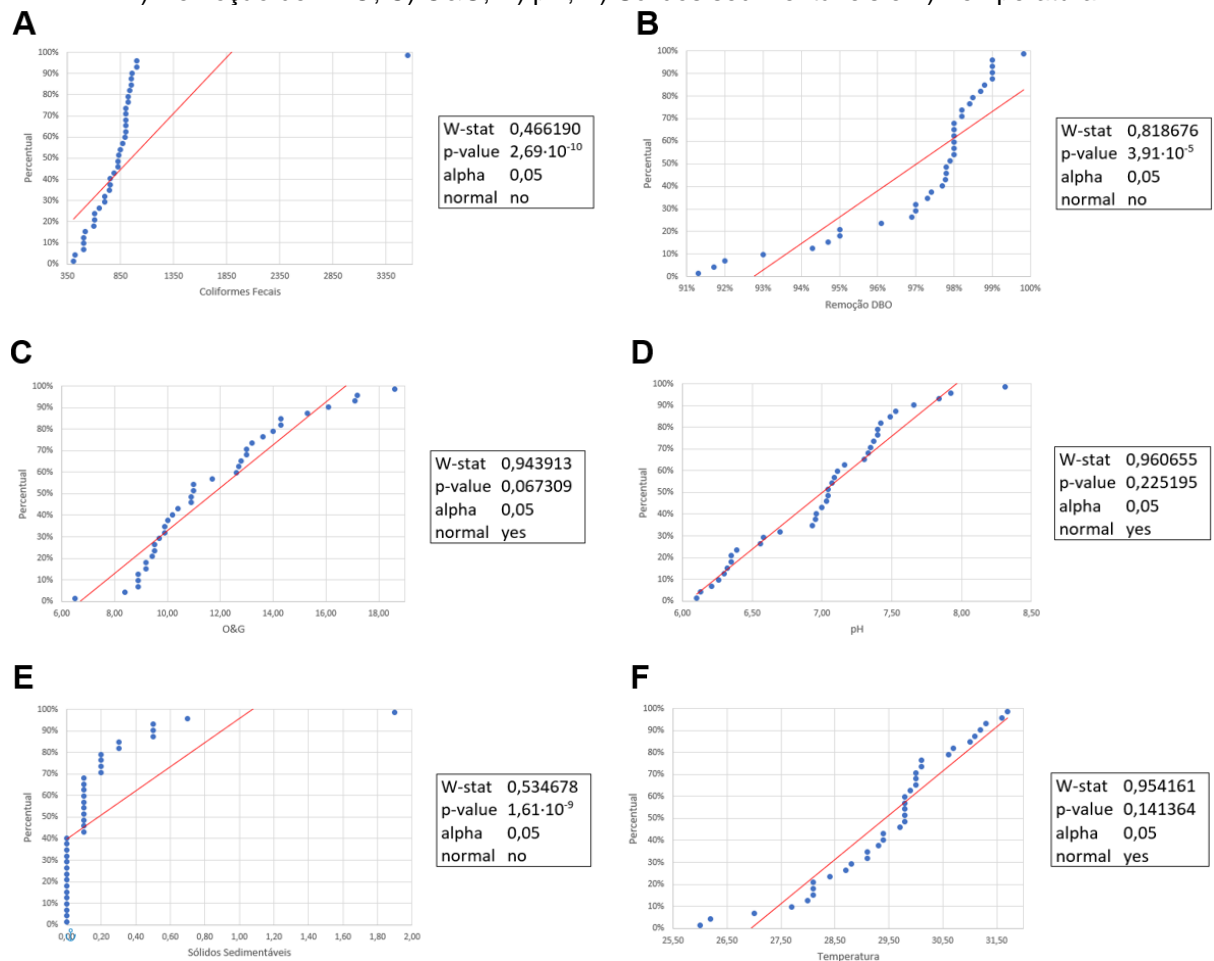
Analisando os gráficos da Figura 6, com seus respectivos limites de especificação, é possível afirmar que, embora apresentem arranjos, demonstrando que os dados não estão sobre controle estatísticos, quase todos os valores medidos estão atendendo aos requisitos estabelecidos pelos órgãos ambientais. Em relação aos parâmetros que não atenderam à legislação em 2020, isso provavelmente devesse a erros humanos e/ou de equipamentos. Porém, o fato da alta variabilidade do afluente na estação de tratamento devido a variações no uso do esgotamento sanitário pela população contribuiu para a variabilidade do afluente.

A partir da análise dos gráficos de controle, notou-se a necessidade de ações para corrigir as causas dos arranjos encontrados. Para evitar os erros humanos, foi criado um procedimento operacional padronizado sobre o processo. Entretanto, é importante treinamentos constantes de reciclagem sobre o tema. Para os erros de equipamentos, foi sugerida a criação de um cronograma de manutenções preventivas. Em relação à alta variação do afluente, é necessária conscientização da população

de como usar o sistema de esgotamento sanitário de maneira correta. Para tal, seria necessária criação de campanhas publicitárias de educação ambiental.

Após a avaliação dos gráficos de controle, foram realizados os testes de Normalidade. Na Figura 7, estão os gráficos de probabilidade acumulada para cada parâmetro estudado através do gráfico de controle.

Figura 7 – Gráficos de probabilidade acumulada para os parâmetros de estudo. A) Coliforme fecais; B) Remoção de DBO; C) O&G; D) pH; E) Sólidos sedimentáveis e F) Temperatura.



Fonte: A autora (2023)

De uma forma geral, metade dos conjuntos de dados tiveram p-value < 0,05, mostrando que 3 dos 6 parâmetros estudados são representados por uma distribuição normal. Através da Figura 7 é possível observar que os resultados referentes a coliformes fecais (7A), remoção DBO (7B) e sólidos sedimentáveis (7E), não são bem representados pela reta em vermelho que se refere a um ajuste à distribuição normal. Esta não normalidade dos dados provavelmente é devida às diversas causas especiais identificadas nos gráficos de controle. Em relação aos parâmetros O&G

(7C), pH (7D) e temperatura (7F), mesmo existindo anomalias no processo, foi possível observar que obtiveram um bom ajuste à distribuição normal.

Após os resultados do teste de normalidade, os índices de capacidade foram calculados para uma melhor avaliação do processo.

Nos casos em que houve somente um valor mínimo ou máximo, o cálculo do C_p se tornou impraticável, já que ou LIE ou LSE foram inexistentes. Este é o caso para todos os parâmetros estudados neste trabalho, exceto para o pH.

Devido à falta de um dos limites de especificação, o cálculo da C_{pk} foi afetado, pois somente foi possível calcular o índice de capacidade inferior (C_{pi}) ou superior (C_{ps}). Apesar desses índices serem geralmente utilizados para dados que seguem uma distribuição normal, nota-se pelos resultados apresentados na Tabela 9, que atendeu para os dados deste trabalho.

Tabela 9 – Índices de capacidade do processo em estudo.

Parâmetro	C_p	C_{pk}	C_{pi}	C_{ps}
Coliformes fecais	-	0,20	-	0,20
Remoção DBO	-	1,65	1,65	-
O&G	-	14,89	-	14,89
pH	1,62	1,62	1,62	1,62
Sólidos sedimentáveis	-	1,24	-	1,24
Temperatura	-	2,95	-	2,95

Fonte: A autora (2023)

Através dos resultados obtidos da Tabela 9, observou-se que, para alguns parâmetros os processos foram capazes, como Remoção DBO, O&G, pH e Temperatura. Pode-se classificá-los desta maneira, pois o C_{pk} foi maior que 1,33. Considerando o C_{pk} para Sólidos sedimentáveis, foi plausível classificar o processo como razoavelmente capaz, por conta dos índices entre 1,00 e 1,33. No entanto, para coliformes fecais, o processo foi incapaz considerando C_{pk} menor que 1,00.

Mesmo com os resultados da ETE, de forma geral, estarem atendendo os requisitos legais, como processo é possível ver que o mesmo não está sob controle estatístico. Esse processo fora de controle estatístico pode ter diversos fatores, sendo

alguns deles: alta variabilidade das características e composição dos efluentes, principalmente devido ao isolamento social e uso de medicamentos por conta da pandemia. Outros fatores foram as mudanças recorrentes de operadores e falta de procedimento operacional padronizado condizente com a realidade do processo.

A variabilidade da composição do afluente é uma das causas mais difíceis de se resolver, pois esta sofre flutuação de acordo com uso do esgotamento sanitário pela população. A periodicidade da coleta também contribuiu para os resultados obtidos. Uma única coleta representar os resultados mensal de um tratamento que opera ininterruptamente é um ponto de melhoria a ser estudado. Dados com maior periodicidade permitiriam uma resposta muito mais rápida para trazer o processo ao controle, assim como poderiam indicar de forma mais clara e objetiva quais causas especiais ocorreram e assim propor ações mais efetivas para as suas eliminações ou mitigações.

5 CONCLUSÃO

Após avaliação do comportamento dos parâmetros de monitoramento da ETE em estudo, ficou evidente a necessidade de implementação do controle estatístico de processos para operacionalização da estação de tratamento de esgoto sanitário, com o objetivo de aumentar a qualidade do tratamento e a adequação à legislação ambiental vigente.

Faz-se a ressalva de que o tipo do gráfico de controle escolhido para análise foi o de valor individual, devido à periodicidade das análises. Através dos gráficos de controle, evidenciou-se a presença de diversos tipos de padrões de não aleatoriedade, com os mais comuns sendo as sequências e regiões com mudanças na média do processo. Além de erros humanos e de maquinários, o principal fator encontrado, neste estudo, para estas causas especiais, se deu pela alta variabilidade do afluente da estação de tratamento devido às variações no uso do esgotamento sanitário pela população.

Portanto, os testes de normalidades confirmaram a presença as causas especiais sobre o processo, mostrando que dois dos parâmetros estudados não podem ser representados pela distribuição normal, visto que o p-value foi abaixo de 0,05. Nas análises de capacidade do processo, foi possível comprovar que os processos dos parâmetros representados pela distribuição normal foram classificados como capaz. Enquanto um processo foi classificado como razoavelmente capaz, sendo o parâmetro de coliformes fecais o único incapaz.

Vale ressaltar que a maioria dos parâmetros estavam dentro dos limites estipulados pelos órgãos ambientais, tanto à nível federal (CONAMA) quanto estadual (CPRH). Os dois casos apresentados que não atenderam à legislação, provavelmente foram causados por falhas no processo, as quais foram corrigidas de maneira que não se repetiram.

Por fim, o presente trabalho é apenas o primeiro passo rumo ao desenvolvimento dos processos de tratamento de efluente. Análises com maior periodicidade, elaboração de procedimentos de operação, capacitação dos operadores e planos de ações para tratar as não aleatoriedades serão algumas das ações necessárias para trazer os processos à normalidade e elevar o nível de tratamento da estação.

REFERÊNCIAS

AISSA-GROUZ, N.; GARNIER, J.; BILLEN, G. Long trend reduction of phosphorus wastewater loading in the Seine: determination of phosphorus speciation and sorption for modeling algal growth. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 23515-23528, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9001:2015: **Sistemas de Gestão da Qualidade – Requisitos**, Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14001:2015: **Sistemas de Gestão Ambiental – Requisitos**, Rio de Janeiro, 2015

BARILE, P.J. Widespread sewage pollution of the Indian River Lagoon system, Florida (USA) resolved by spatial analyses of macroalgal biogeochemistry. **Marine Pollution Bulletin**, v. 128, p. 557-574, 2018.

BRASIL. **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1981.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. Secretaria Nacional de Saneamento (SNS). Brasília, DF, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, DF, 2011. Disponível em: <<http://conama.mma.gov.br/component/sisconama/?view=atosnormativos>>. Acesso em: 21 de maio de 2022

BRUSSEAU, M. L.; PEPPER, I. L.; GERBA, C. **Environmental and Pollution Science**. Academic Press, 2019.

CARVALHO, M. M.; PALADINI, E. P. **Gestão da qualidade: teoria e casos**. p. 351-413, 2012.

CASA-COILA, M, D.; MAMANI-JILAJA, D.; CERVANTES-ALAGÓN, S, L.; MAMANI-VILCA, P, S.; YANA-SALLUCA, M.; ALANOCA-GUTIERREZ, R. Perceptions of Pollution and Environmental Attitudes Among University Students in the Puno Region, Peru. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 1-14, 2023.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual De Tratamento De Efluentes Industriais**. 3ª Ed., São Paulo: Ambiental do Brasil, 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. v.5., 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

MACHADO, C, R, A.; SOUSA, D, P, B.; SILVA, G, C, S. A busca por soluções para a poluição hídrica: um estudo de caso sobre tratamento de efluentes. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 14115-14122, 2022.

DROSTE, Ronald L.; GEHR, Ronald L. **Theory and practice of water and wastewater treatment**. John Wiley & Sons, 2018.

EVANS, A. E. V.; SAGASTA, J. M.; QADIR, M.; BOELEE, E.; IPPOLITO, A. **Agricultural water pollution**: key knowledge gaps and research needs. Current opinion in environmental sustainability, v. 36, p. 20-27, 2019.

HANUSZ, Z; TARASINSKA, J; ZIELINSKI, W. Shapiro–Wilk test with known mean. **REVSTAT-Statistical Journal**, v. 14, n. 1, p. 89–100, 2016.

HENNING, E; KONRATH, A. C; ZOLDAN, I. M.; MATTOS, V. L. D; SILVESTRE, I. B. M. Controle Estatístico de Processos: Uma aplicação em características sensoriais. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis, SC, v. 8, n. 15, p. 50-71, 2016.

HENNING, E; WALTER, O. M. C. F.; SOUZA, N. S.; SAMOHYL, R.W. Um estudo para a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo em indicadores de qualidade de água potável. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v.9, p 2-13, 2014.

HOJJATI-NAJAFABADI, A.; MOJTABA, M.; LIANG, T.; SHAHIN, K.; KARIMI-MALEH, H. A review on magnetic sensors for monitoring of hazardous pollutants in water resources. **Science of The Total Environment**, v. 824, p. 153844, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7872-2**: Control charts — Part 2: Shewhart control charts. Genève, 2013.

KENT, R. J. **Quality management in plastics processing**: strategies, targets, techniques and tools. Amsterdam: Elsevier, 2016.

LEME, E. J. A. **Manual prático de tratamento e águas residuárias**. São Carlos: Edufscar, p. 595, 2010.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5ª Ed. McGraw Hill Brasil, 2016.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. [s.l.] Hoboken, Nj Wiley, 2018.

MORAIS, N. W. S. M.; SANTOS, A. B. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista DAR**, v.67, n 215, p. 40-55, 2019.

NELSON, L. S. Interpreting Shewhart \bar{X} Control Charts. **Journal of Quality Technology**, v. 17, n. 2, p. 114–116, 1985.

NELSON, L. S. The Shewhart Control Chart—Tests for Special Causes. **Journal of Quality Technology**, v. 16, n. 4, p. 237–239, 1984.

NETTO, A. P. **Controle estatístico do processo**. 1ª ed. Indaial: Uniasselvi, 2017.

PALADINI, E. P. **Gestão da Qualidade: Teoria e Prática**. 4ª ed, 2019.

PALANI, G.; ARPUTHALATHA, A.; KANNAN, K.; LAKKABOYANA, S. K.; HANAFIAH, M. M.; KUMAR, V.; MARELLA, R. K. Current trends in the application of nanomaterials for the removal of pollutants from industrial wastewater treatment: a review. **Molecules**, v. 26, n. 9, p. 2799, 2021.

PEDRINI, D. C. **Proposta de um método para a aplicação do gráfico de controle de regressão no monitoramento de processos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PEREIRA, J. A. R.; SILVA, J. M. S. **Rede coletora de Esgoto Sanitário: Projeto, Construção e Operação**. Belém, 3ª ed, 2018.

PERNAMBUCO, Norma Técnica nº 2.002, de 21 de fevereiro de 2000. Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH). Recife, PE, 2000. Disponível em <<http://www2.cprh.pe.gov.br/publicacoes-e-transparencia/normas-tecnicas/>>. Acesso em 21 de maio de 2022.

PERNAMBUCO, Norma Técnica nº 2.007, de 07 de agosto de 2001. Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH). Recife, PE, 2001. Disponível em <<http://www2.cprh.pe.gov.br/publicacoes-e-transparencia/normas-tecnicas/>>. Acesso em 21 de maio de 2022.

PERNAMBUCO, Decreto nº 18.251/94, de 21 de dezembro de 1994. Governo do Estado de Pernambuco, Recife, PE, 1994. Disponível em <<https://legis.alepe.pe.gov.br/texto.aspx?id=342>>

RAMOS, A. **CEP para processos contínuos e em bateladas**. São Paulo: Edgard Blucher/Fundação Vanzolini, 2000.

SARDANHA, P.; ROTHE, K. C; PACHECO, D, A, J; JUNG, C, F; CATEN, C, S. Contribuições do uso do controle estatístico de processos na análise do desempenho na indústria química. **Revista Ingeniería Industrial**, v 14, n. 1, p. 37-40, 2015.

SHAH, A.; SHAH, M. Characterisation and bioremediation of wastewater: a review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, p. 100383, 2020.

SILVA, S. S.; RUBIO, F.; RAMIREZ, K. G.; SOARES, L. M.; FRIGO, J. P.; COLDEBELLA, P. F.; GONCALVES, C. C. S.; BOROKOSI, M. Estudo da contaminação da água superficial e subterrânea de um lixão desativado: Arroio Dourado–Foz do Iguaçu-PR. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 19, n. 55, p. 345-365, 2023.

SINGH, J; YADAV, P; PAL, A; MISHRA, V. Water pollutants: Origin and status. In: **Sensors in water pollutants monitoring: Role of material**. Springer, Singapore, p. 5-20, 2020.

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

SOUZA, J. O. L. **As 7 Ferramentas da Qualidade**: Aprenda como utilize-las de forma integrada. 2021. E-book.

TODELO, J. C.; BORRÁS, M, A, A.; MERGULHÃO, R, C.; MENDES, G, H, S. **Qualidade: Gestão e Métodos**. 1ª ed, 2012.

UKAOGO, P. O.; EWUZIE, U.; ONWUKA, C. V. Environmental pollution: causes, effects, and the remedies. In: **Microorganisms for sustainable environment and health**. Elsevier. p. 419-429, 2020.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

ANEXO

ANEXO A – Fatores para cálculo de limites de controle

n	E₂	D₃	D₄	d₂	c₄
2	2,660	0,000	3,267	1,128	0,798
3	1,772	0,000	2,574	1,693	0,886
4	1,457	0,000	2,282	2,059	0,921
5	1,290	0,000	2,115	2,326	0,940
6	1,184	0,000	2,004	2,534	0,952
7	1,109	0,076	1,924	2,704	0,959
8	1,054	0,136	1,864	2,847	0,965
9	1,010	0,184	1,816	2,970	0,969
10	0,975	0,223	1,777	3,078	0,973

Fonte: Adaptado de Montgomery; Runger (2018)

APÊNDICE

APÊNDICE A – Levantamento de dados das amostras da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2020

Parâmetro	Unidade	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20	jun/20	jul/20	ago/20	set/20	out/20	nov/20	dez/20
Coliformes fecais	NMP .100 mL ⁻¹	515	703	902	601	503	425	701	3550	823	901	919	902
Remoção de DBO	%	91,30	92,00	95,00	98,00	98,00	99,00	98,00	93,00	99,00	97,40	98,40	98,80
Óleos e Graxas	mg·L ⁻¹	10,40	8,90	9,20	6,50	11,00	10,90	12,70	11,00	13,00	11,70	17,10	14,30
pH	-	7,40	7,42	6,96	7,53	8,31	6,58	6,35	7,00	6,26	6,35	7,04	7,09
Sólidos sedimentáveis	mL·L ⁻¹	0,00	0,30	1,90	0,00	0,70	0,10	0,20	0,20	0,10	0,50	0,00	0,00
Temperatura	°C	29,70	31,70	31,00	29,80	29,80	28,10	28,10	28,40	29,90	29,10	31,20	30,70

APÊNDICE B – Levantamento de dados das amostras da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2021

Parâmetro	Unidade	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21 ₂	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21
Coliformes fecais	NMP .100 mL ⁻¹	502	605	900	750	870	790	850	948	933	1000	954	902
Remoção de DBO	%	97,80	98,70	98,00	96,10	97,30	97,80	97,00	97,00	98,00	99,00	98,49	97,78
Óleos e Graxas	mg·L ⁻¹	16,10	14,30	10,90	13,20	13,00	17,20	13,60	14,00	18,60	9,90	9,20	9,50
pH	-	7,11	7,33	7,37	6,95	7,40	7,66	7,35	7,16	6,70	6,13	7,30	7,04
Sólidos sedimentáveis	mL·L ⁻¹	0,00	0,00	0,00	0,50	0,20	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00
Temperatura	°C	29,30	30,00	29,10	30,10	27,70	29,40	28,70	26,20	29,80	30,60	31,30	30,00

APÊNDICE C – Levantamento de dados das amostras da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2022

Parâmetro	Unidade	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22
Coliformes fecais	NMP .100 mL ⁻¹	889	748	650	503	602	403	1000	920	950	823	743	832
Remoção de DBO	%	98,00	99,81	98,20	99,00	96,90	98,20	97,90	91,70	94,30	94,70	97,70	95,00
Óleos e Graxas	mg·L ⁻¹	12,60	8,90	8,40	10,20	12,80	15,30	10,00	9,43	9,90	9,50	9,70	8,90
pH	-	7,07	7,92	6,30	6,21	6,10	6,56	6,39	6,32	7,49	7,84	7,03	6,93
Sólidos sedimentáveis	mL·L ⁻¹	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,00	0,00	0,10	0,00	0,30	0,50
Temperatura	°C	29,80	28,80	29,80	30,10	30,00	26,00	27,00	28,00	31,60	28,10	29,40	31,10