



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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOSÉ MAX SILVESTRE

**MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES EM ATERRO SANITÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE PROCESSOS**

RECIFE
2024

JOSÉ MAX SILVESTRE

**MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES EM ATERRO SANITÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE PROCESSOS**

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

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

RECIFE

2024

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

Silvestre, José Max.

Monitoramento e avaliação de parâmetros de tratamento de efluentes em aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos utilizando ferramentas de análise de processos / José Max Silvestre. - Recife, 2024.

64 p. : 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, 2024.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Efluentes. 2. Meio ambiente. 3. Qualidade. 4. Resíduos sólidos urbanos. I. Duarte, Marta Maria Menezes Bezerra. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

JOSÉ MAX SILVESTRE

**MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES EM ATERRO SANITÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE 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 à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 30/09/2024.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
MARTA MARIA MENEZES BEZERRA DUARTE
Data: 04/10/2024 07:50:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa^o. Dra. Marta Maria Menezes Bezerra Duarte (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco



Documento assinado digitalmente
FERNANDA ARAUJO HONORATO
Data: 04/10/2024 08:00:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa^o. Dra. Fernanda Araújo Honorato
Universidade Federal de Pernambuco



Documento assinado digitalmente
ALEX LEANDRO ANDRADE DE LUCENA
Data: 04/10/2024 09:54:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Alex Leandro Andrade de Lucena
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais, Denize Lúcia e José
Silvestre, a minha esposa Gabriela Lucena
Silvestre, a minha irmã Myrela Silvestre e
aos meus amigos e apoiadores, Cristianne
Barros e Luan dos Santos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar e guiar meu caminho, me atribuindo forças para enfrentar os obstáculos, saúde física e mental para concluir com êxito essa jornada acadêmica.

A toda minha família, especialmente minha mãe, Denize Lúcia, e ao meu pai, José Silvestre, por todo apoio nos momentos difíceis, não teria conseguido concluir esta etapa da vida sem seu amor e cuidado.

A minha esposa, Gabriela Lucena, por todo amor e carinho prestado durante minha vida, que contribuiu para que eu chegasse a este momento.

A minha orientadora, Dr^a Marta Duarte, pela orientação, paciência e ensinamentos prestados durante a graduação e elaboração do presente trabalho de conclusão de curso.

A minha supervisora, Cristianne Araújo Gomes Barros, por toda orientação, paciência e ensinamentos prestados, por me ensinar na prática tudo o que sei sobre tratamento de efluentes, juntamente com toda equipe na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

Aos meus amigos de graduação, Augusto Simas, Humberto Andrade, José Guilherme, Luiz Filipe, Rafaela Mendes, Nívea Beatriz, pelos momentos de descontração, ensinamentos compartilhados e suporte.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que eu alcançasse esta etapa da minha vida e realizasse meus objetivos.

*“Combati o bom combate, terminei a
carreira, guardei a fé”*

2 Timóteo 4:7

RESUMO

A destinação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados pela sociedade é uma das principais preocupações ambientais, devido à relação direta entre sua disposição inadequada e a contaminação do solo, água e ar. O aterro sanitário surge como a forma de disposição final dos RSU com maiores benefícios sociais e econômicos, além de apresentar menores riscos à degradação ambiental. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi aplicar ferramentas de análises de processos no monitoramento de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de lixiviado de um aterro sanitário em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, buscando atender às normas ambientais para o lançamento de efluentes. Para tanto, foram determinados parâmetros físico-químicas, realizando coleta de dados semanais para pH, nitrogênio amoniacal, sólidos sedimentáveis, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e temperatura, no ano de 2023, do lixiviado. O lixiviado foi coletado em dois pontos distintos da ETE: na entrada (lixiviado bruto) e na saída do tratamento terciário (lixiviado tratado). Visando o monitoramento destes dados, foram aplicadas ferramentas de análise de processos, como, fluxograma, gráficos de controle, teste de normalidade e avaliação da capacidade do processo. Através do monitoramento da ETE, foram coletados dados que comprovam a eficácia do tratamento do lixiviado, a fim de mitigar a contaminação ambiental. A DQO do lixiviado bruto por exemplo, apresentou variações que poderiam causar danos ambientais caso não fossem tratados, no entanto, após o tratamento, os níveis foram ajustados para os padrões aceitáveis pela legislação vigente. A remoção de nitrogênio amoniacal e sólidos suspensos foram igualmente eficientes, atingindo níveis seguros para o descarte, indicando que cada etapa do processo de tratamento desempenha um papel crucial. Além disso, os gráficos de controle utilizados no estudo demonstraram a estabilidade do processo, com poucas variações significativas ao longo do tempo, o que sugere que o sistema de tratamento está bem controlado e capaz de lidar com flutuações na composição do lixiviado. A análise de capacidade do processo revelou que o processo é capaz de operar dentro dos limites especificados, reforçando que o sistema é eficiente e confiável. A estação de tratamento de efluentes demonstrou uma eficiência superior a 90% de remoção com relação aos parâmetros analisados no tratamento do lixiviado, indicando conformidade com os padrões de lançamento estipulados pela legislação vigente.

Palavras-chave: Efluentes; Meio ambiente; Qualidade; Resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

The disposal of municipal solid waste (MSW) generated by society is one of the main environmental concerns due to the direct relationship between improper disposal and the contamination of soil, water, and air. Sanitary landfills emerge as the form of final disposal of MSW with the greatest social and economic benefits, in addition to presenting lower risks of environmental degradation. Thus, the objective of this work was to apply process analysis tools in the monitoring of a Leachate Treatment Plant (LTP) at a sanitary landfill in Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, aiming to comply with environmental standards for effluent discharge. To this end, physicochemical parameters were determined, with weekly data collection for pH, ammonia nitrogen, settleable solids, Chemical Oxygen Demand (COD), and temperature, in 2023, for the leachate. The leachate was collected at two distinct points in the LTP: at the entrance (raw leachate) and at the outlet of the tertiary treatment (treated leachate). To monitor this data, process analysis tools such as process flowcharts, control charts, normality tests, and process capability evaluation were applied. Through the monitoring of the LTP, data was collected proving the effectiveness of the leachate treatment to mitigate environmental contamination. The COD of the raw leachate, for example, showed variations that could cause environmental damage if not treated; however, after treatment, the levels were adjusted to standards acceptable by current legislation. The removal of ammonia nitrogen and suspended solids was equally efficient, reaching safe levels for disposal, indicating that each stage of the treatment process plays a crucial role. Furthermore, the control charts used in the study demonstrated the stability of the process, with few significant variations over time, suggesting that the treatment system is well controlled and capable of handling fluctuations in the composition of the leachate. The process capability analysis revealed that the process is capable of operating within the specified limits, reinforcing that the system is efficient and reliable. The effluent treatment plant demonstrated an efficiency of over 90% in terms of removal of the analyzed parameters in the treatment of leachate, indicating compliance with the discharge standards stipulated by current legislation.

Keywords: Effluents; Environment; Quality; Urban solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Esquema de percolação de água no aterro.	16
Figura 2 -	Definição das zonas dos critérios da norma ISO 7870-2:2013.	27
Figura 3 -	Regras de identificação de causas especiais de acordo com a ISO 7870-2:2013.	28
Figura 4 -	Fluxograma com as etapas do sistema de tratamento do lixiviado da ETE em estudo.	38
Figura 5 -	Gráficos de controle efluente bruto. Sólidos sedimentáveis (A); Nitrogênio amoniacal (B); DQO (C) e Temperatura (D).	40
Figura 6 -	Gráficos de controle. Sólidos sedimentáveis: efluente bruto (A) e efluente tratado (B); Nitrogênio amoniacal: efluente bruto (C) e efluente tratado (D); DQO: efluente bruto (E) e efluente tratado (F); pH: efluente bruto (G) e efluente tratado (H); Temperatura: efluente bruto (I) e efluente tratado (J).	42
Figura 7 -	Gráficos de normalidade. Sólidos sedimentáveis: efluente bruto (A) e efluente tratado (B); Nitrogênio amoniacal: efluente bruto (C) e efluente tratado (D); DQO: efluente bruto (E) e Remoção % (F); pH: efluente bruto (G) e efluente tratado (H); Temperatura: efluente bruto (I) e efluente tratado (J).	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Fatores que influenciam na formação do lixiviado.	17
Tabela 2 -	Características físico-químicas de lixiviados de aterros sanitários em diferentes idades do aterro.	19
Tabela 3 -	Níveis de tratamento de lixiviado.	20
Tabela 4 -	Critérios para a detecção de causas especiais em gráficos de controle.	26
Tabela 5 -	Classificação do sistema de acordo com valor da capacidade do processo.	33
Tabela 6 -	Parâmetros de monitoramento mensal na ETE em estudo conforme legislação ambiental.	34
Tabela 7 -	Limites de controle calculados com os dados coletados do efluente bruto para o ano 2023.	40
Tabela 8 -	Limites de controle calculados com os dados coletados do efluente bruto e tratado para o ano 2023.	41
Tabela 9 -	Índices de capacidade do processo em estudo.	48

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEP	Controle estatístico de processo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRH	Companhia Pernambucana do Meio Ambiente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de efluentes
H ₀	Hipótese nula
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IT	Instrução de trabalho
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LC	Linha central
LIC	Limite inferior de controle
LIE	Limite inferior de especificação
LSC	Limite superior de controle
LSE	Limite superior de especificação
NBR	Normas brasileiras
NT	Norma técnica
pH	Potencial hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POP	Procedimento operacional padrão
RSU	Resíduos sólidos urbanos

LISTA DE SÍMBOLOS

a_1	Coeficiente tabelado
$^{\circ}C$	Graus Celsius
C_p	Capacidade do processo
C_{pi}	Capacidade do processo inferior
C_{pk}	Capacidade do processo unilateral
C_{ps}	Capacidade do processo superior
c_4	Fator de correção para corrigir a estimativa do desvio padrão amostral
d_2	Fator de correção para estimativa da amplitude média
D_3	Fator de correção para limite inferior em amplitude das amostras
D_4	Fator de correção para limite superior em amplitude das amostras
E_2	Fator de correção para controle da média usando amplitude
k	Tamanho da amostra
$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Miligrama por litro
$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	Mililitro por litro
n	Quantidade total de dados
Rm	Amplitude móvel
$R\bar{m}$	Média dos valores da amplitude móvel
Rm_i	Amplitude móvel para o ponto i
s	Desvio padrão amostral
W	Valor estatístico de <i>Shapiro-wilk</i>
x_{i+1}	Valor do parâmetro no ponto $i + 1$
\bar{x}	Média
x_i	Valor do parâmetro no ponto i
σ	Desvio-padrão do processo
α	Nível de significância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	LIXIVIADO DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	15
2.1.1	Composição do lixiviado	17
2.2	SISTEMAS DE TRATAMENTO DO LIXIVIADO	20
2.3	CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO	22
2.3.1	Gráficos de controle	23
2.3.2	Teste de normalidade	29
2.3.3	Capacidade do processo	31
3	METODOLOGIA	34
3.1	PARÂMETROS DE CONTROLE	34
3.2	FLUXOGRAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO	35
3.3	COLETA DE DADOS	35
3.4	GRÁFICOS DE CONTROLE	36
3.5	TESTE DE NORMALIDADE	36
3.6	CAPACIDADE DO PROCESSO	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1	FLUXOGRAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO	37
4.2	COLETA DE DADOS	39
4.3	GRÁFICOS DE CONTROLE	40
4.4	TESTE DE NORMALIDADE	45
4.5	CAPACIDADE DO PROCESSO	47
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51
	ANEXO A – Fatores para cálculo de limites de controle	56
	APÊNDICE A – Levantamento de dados da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2023	57
	APÊNDICE B – Levantamento de dados da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2023	61

1 INTRODUÇÃO

A busca pela preservação do meio ambiente é contínua e inclui o desenvolvimento de conceitos, processos e tecnologias, cujos benefícios possam contribuir para o futuro da humanidade. Nesse contexto, o cenário urbano vem experimentando significativa expansão, acompanhada pelo aumento no padrão de consumo nas cidades. Esse crescimento impulsionou o desenvolvimento e a implementação de técnicas de engenharia sanitária voltadas para proporcionar um destino seguro aos resíduos sólidos urbanos (RSU) (Saber *et al.*, 2019).

No Brasil, a Lei nº 12.305/10, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), delinea princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento desses resíduos. Mesmo quando esses processos são economicamente viáveis, persiste a necessidade de um aterro sanitário capaz de receber os rejeitos provenientes desses tratamentos. Essa abordagem busca conciliar eficiência econômica com responsabilidade ambiental na gestão dos RSU (Brasil, 2010).

Um dos principais impactos desses resíduos nos aterros sanitários é a produção do lixiviado, também conhecido como chorume ou líquido percolado, que é basicamente a mistura do líquido gerado através da decomposição da matéria orgânica e inorgânica presente no lixo com água proveniente de chuva, escoamento ou infiltração (Maroneze *et al.*, 2014). Esse líquido pode provocar impactos ambientais, por ser potencialmente contaminante apresentando por muitas vezes valores acima do que é permitido pela legislação, como, matéria orgânica, ácido húmico, amônia, metais pesados, alcalinidade, entre outros. Ademais, sua composição depende também da idade do aterro, tipo e quantidade de resíduo (Pasarari *et al.*, 2019).

Segundo Youcai (2018) a quantidade de lixiviado gerado pode ser de 20% a 30% da quantidade de resíduos sólidos que é depositado diariamente em um aterro sanitário. Assim, comparando com os valores de resíduos disposto por ano, cerca de 8,7 a 13,0 milhões de toneladas de lixiviado foram gerados no ano de 2019 no Brasil. A expectativa é que esse valor chegue entre 20 e 30 milhões de toneladas em 2033, considerando que todos os resíduos gerados serão dispostos em aterros sanitários, conforme recomendado pela PNRS.

Diante do exposto, o tratamento do lixiviado é de suma importância na

manutenção da saúde pública e na preservação do meio ambiente, destacando a necessidade contínua de monitoramento e aperfeiçoamento das práticas de tratamento de efluentes, tomando como base a Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430/2011 e no âmbito estadual, a Norma Técnica (NT) da Agência Estadual do Meio Ambiente (CPRH), 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 (Brasil, 2011; Pernambuco, 2000).

Para garantir a conformidade com essas legislações, as técnicas de controle estatístico de processo (CEP) (fluxograma do processo e gráficos de controle) em conjunto com métodos estatísticos (teste de normalidade e capacidade do processo) podem ser utilizadas para otimização e aperfeiçoamento da qualidade dos sistemas de tratamento (Voitto, 2020). Sendo assim, torna-se uma ferramenta para gerir com confiabilidade uma estação de tratamento de efluentes (ETE). Por meio desta técnica de monitoramento do processo, podem-se identificar falhas no tratamento, o que irá permitir ações corretivas antes que o efluente seja despejado em corpo hídrico, evitando-se alterações impactantes ao meio ambiente (Gomes *et al.*, 2020).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi monitorar uma ETE de lixiviado em um aterro sanitário localizado na região metropolitana do Recife, utilizando ferramentas de análise de processos, com o intuito de garantir o cumprimento das normas ambientais para o lançamento de efluentes. Para tal, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

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

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão abordadas as questões ambientais de maneira abrangente, com uma visão panorâmica que inclui uma análise específica de uma Estação de Tratamento de Efluente (ETE) de um aterro sanitário, localizado no estado de Pernambuco. Também serão descritas as características do lixiviado após o processo de tratamento, destacando os parâmetros de controle que são críticos para garantir a qualidade do efluente antes de seu despejo no corpo receptor. Além disso, serão discutidas as legislações aplicáveis, tanto em âmbito federal quanto estadual, que regulam os parâmetros de emissão de efluentes, assegurando que o processo de tratamento atenda aos padrões exigidos para a proteção ambiental e a saúde pública. De forma complementar, serão introduzidas as técnicas de controle que podem ser aplicadas para a implementação de um controle estatístico de processos (CEP) no contexto estudado, ressaltando como essas técnicas são essenciais para monitorar e melhorar o desempenho da ETE, garantindo a conformidade com as normativas e a eficiência do tratamento.

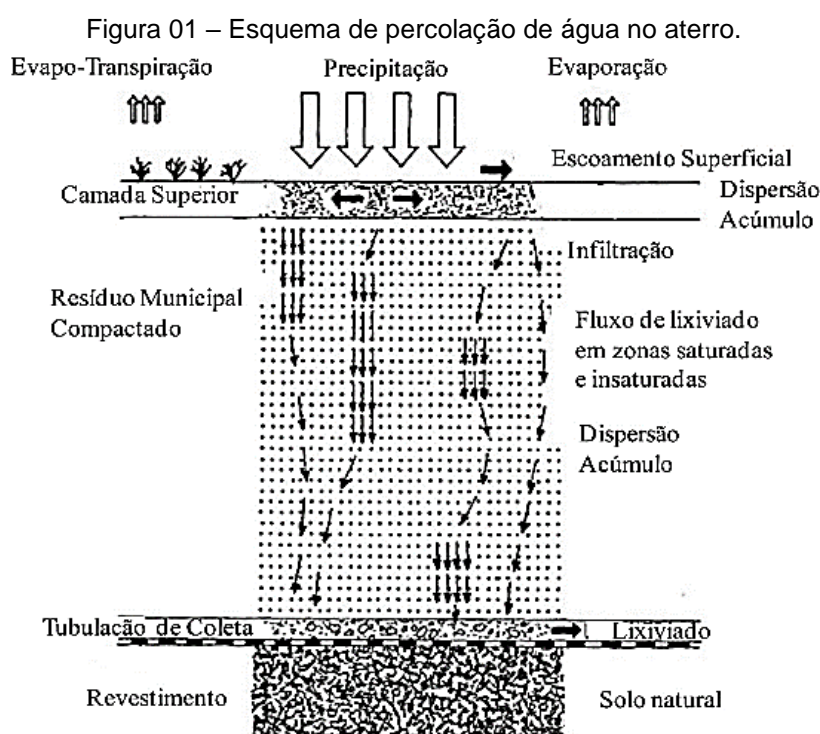
2.1 LIXIVIADO DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O lixiviado comumente conhecido como chorume é o líquido resultante da decomposição de substâncias presentes nos resíduos sólidos, caracterizado por cor escura, odor desagradável, composição complexa e elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), a qual, é dependente dos estágios de decomposição da matéria orgânica, da natureza dos resíduos lançados, das condições ambientais e da idade e modo de operação da área de aterro (Del Rey, 2020).

Apesar do aprimoramento das técnicas de gerenciamento de resíduos, a geração e o tratamento do lixiviado continuam sendo uma das demandas relevantes, associadas à gestão de aterros sanitários (Mishra *et al.*, 2019). Dentre as fontes que contribuem para formação do lixiviado a principal é a infiltração de água da chuva através das camadas de resíduos que percolam para o fundo do aterro (Ribeiro, 2020).

A formação do percolado em aterros sanitários é um processo complexo, resultante da interação de uma série de processos físico-químicos e biológicos que ocorrem durante a decomposição dos resíduos sólidos depositados. Inicialmente, a água da chuva penetra no aterro e, juntamente com a água liberada durante a

decomposição biológica dos resíduos e os ácidos orgânicos gerados por processos fermentativos, atua como agente de lixiviação. Esse processo envolve a dissolução e o transporte de substâncias químicas presentes nos resíduos, resultando na formação do percolato, o caminho que a água da chuva percorre através das camadas de resíduos é um dos principais fatores que contribuem para a geração desses efluentes. O percolato, portanto, é essencialmente o líquido que resulta da lixiviação dos resíduos nas condições específicas de disposição em aterro (Tecma, 2019). Colombo *et al.* (2019), ilustram o caminho de percolação do lixiviado através da Figura 01 em um esquema de forma clara, simples e didática.



Fonte: Adaptado de Colombo *et al.* (2019).

Conforme pode ser observado na Figura 1, esse processo de formação do percolato é contínuo e está sujeito a várias influências que determinam sua qualidade. Fatores físicos, como o balanço hídrico do aterro, combinados com fatores químicos, podem acelerar ou retardar a degradação dos resíduos sólidos e, conseqüentemente, a geração do percolato, uma vez formado, o percolato é captado por um sistema de drenos instalados no aterro, que o direcionam para uma lagoa de equalização. A função dessa lagoa é homogeneizar o efluente antes que ele seja bombeado para a ETE, onde passará por processos adicionais de tratamento para reduzir sua carga poluente antes do descarte final (Tecma, 2019).

A preocupação com a proteção ambiental levou ao entendimento de que os aterros sanitários devem ser projetados com sistemas robustos para conter os resíduos e os subprodutos de sua decomposição, como o biogás e os lixiviados, dentro dos limites físicos do local de disposição. Essa abordagem de contenção é fundamental para impedir que o biogás e o lixiviado migrem do aterro em quantidades que possam causar danos ambientais significativos. Além disso, é crucial que esses subprodutos sejam gerenciados de maneira eficaz, garantindo que seu tratamento e descarte estejam em conformidade com os padrões ambientais estabelecidos, evitando assim qualquer impacto adverso no meio ambiente (Yu *et al.*, 2022).

2.1.1 Composição do lixiviado

A composição do lixiviado é altamente complexa, sendo influenciada por uma ampla gama de fatores locais e ambientais. Entre esses fatores, as condições específicas do aterro desempenham um papel crucial na formação e na composição do lixiviado, como o tipo de operação do aterro, altura, escoamento superficial, infiltração e a topografia local (Silva, 2023). A Tabela 1 fornece uma descrição de outros fatores que afetam a qualidade e a quantidade dos lixiviados produzidos em aterros sanitários.

Tabela 1 – Fatores que influenciam na formação do Lixiviado.

Fator	Contributo
Fatores climáticos e hidrogeológicos	- Condições pluviométricas
	- Evapotranspiração
	- Temperatura
	- Irradiação Solar
	- Escoamento superficial
	- Infiltração
Características do resíduo depositado no aterro	- Lençol Freático
	- Permeabilidade
	- Idade
	- Umidade inicial do resíduo
Gerenciamento e operação	- Densidade
	- Pré-Tratamento dado ao resíduo
	- Compactação
	- Vegetação e cobertura do solo
Processos internos	- Recirculação de lixiviado
	- Co-disposição de resíduos líquidos
	- Recalque
	- Decomposição do resíduo
	- Alterações no teor de umidade
	- Geração e transporte de calor

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2021).

De acordo com a Tabela 1, a formação do lixiviado em um aterro sanitário é influenciada por uma combinação de fatores climáticos, características dos resíduos depositados, e o gerenciamento e operação do aterro. Fatores climáticos, como a precipitação e a temperatura, impactam diretamente o volume e a taxa de geração do lixiviado, sendo que solos com diferentes características hidrogeológicas podem facilitar ou impedir a sua movimentação. As características intrínsecas dos resíduos, como a composição e a quantidade, determinam a natureza do lixiviado, enquanto práticas de gerenciamento, como a compactação e a cobertura dos resíduos, junto a um sistema de drenagem eficiente, são cruciais para controlar sua produção. Além disso, os processos internos de decomposição biológica e as reações químicas entre os resíduos contribuem para a composição final do lixiviado, variando conforme a evolução do aterro (Silva, 2019)

Com a variabilidade das características do lixiviado de aterros de RSU, em função do estado de decomposição dos resíduos, há tipos de tratamentos que são aplicados preferencialmente para os lixiviados classificados como novos (aterros com idade entre 5 e 10 anos) ou velhos (aterros acima de 10 anos). Para o tratamento de lixiviado novo, são mais indicados os processos biológicos, em função de maior parcela biodegradável em sua composição, processos químicos como a coagulação, floculação, troca iônica e oxidação química apresentam melhores resultados no tratamento de lixiviado velho (Costa *et al.*, 2019).

Os mesmos autores, abordam sobre o clima tropical do Brasil, com altas temperaturas e significativa precipitação pluviométrica, o que favorece a degradação dos resíduos e a formação de lixiviados. A composição do lixiviado, apresenta alta concentração de matéria orgânica devido ao padrão de consumo da população brasileira, onde os resíduos orgânicos correspondem a cerca de metade dos resíduos sólidos urbanos produzidos em todas as regiões do país.

Como a composição do lixiviado está ligada a um conjunto de fatores, sua composição química possui alta variabilidade, pois depende das inúmeras tipologias de resíduos que são dispostos no local. Faz-se necessário, além do conhecimento das suas características, uma estimativa da quantidade de lixiviado gerado para o dimensionamento dos sistemas de drenagem, armazenamento e tratamento de efluentes em um aterro sanitário. A variabilidade dos lixiviados ao longo do tempo (de operação do aterro), com mudanças na carga orgânica e no teor de nitrogênio

amoniacal, por exemplo, podem interferir na eficiência dos sistemas de tratamento dos mesmos (Alfaia *et al.*, 2019).

A Tabela 2 fornece uma descrição das características físico-químicas do lixiviado de aterros do Brasil, com diferentes idades.

Tabela 2 – Características físico-químicas de lixiviados de aterros sanitários em diferentes idades do aterro.

Parâmetros	Características físico-químicas de lixiviados		
Idade do aterro sanitário (anos)	0-5	5-10	10-20
pH	3-6	6-7	>7,5
DBO (mg·L ⁻¹)	10.000 - 25.000	1.000 - 4.000	50 - 1.000
DQO (mg·L ⁻¹)	15.000 - 40.000	10.000 - 20.000	1.000 - 5.000
Biodegradabilidade	Média-Alta	Média	Baixa
Nitrogênio total (mg·L ⁻¹)	1.500 - 4.500	400 - 800	75 - 300
Nitrogênio amoniacal (mg·L ⁻¹)	1.500 - 4.250	250 - 700	50 - 200
Cloreto (mg·L ⁻¹)	1.000 - 3.000	500 - 2.000	100 - 500
Fósforo (mg·L ⁻¹)	100 - 300	10 - 100	-
Alcalinidade (mg·L ⁻¹)	8.000 - 18.000	4.500 - 6.000	-
Condutividade mS·cm ⁻¹	15 – 41,5	6,0 – 14,0	-
Sulfato (mg·L ⁻¹)	500 - 2.000	200 - 1.000	50 - 200
Ferro (mg·L ⁻¹)	500 - 1.500	500 - 1.000	100 - 500
Zinco (mg·L ⁻¹)	100 - 200	50 - 100	10 - 50
Sólidos dissolvidos totais (mg·L ⁻¹)	10.000- 25.000	5.000- 10.000	2.000- 5.000
Metais traços (mg·L ⁻¹)	> 2	< 2	< 2

Fonte: Adaptado de Lange *et al.* (2020).

Como pode ser visto na Tabela 2, as características físico-químicas do lixiviado de aterros sanitários, variam com a idade dos aterros. Em aterros jovens, o lixiviado tende a ser mais ácido, com alta demanda química de oxigênio (DQO) e concentrações elevadas de sólidos suspensos e nitrogênio amoniacal, refletindo a decomposição ativa dos resíduos. Com o tempo, o pH se estabiliza ou se torna alcalino, a DQO e os sólidos suspensos diminuem, e as concentrações de nitrogênio amoniacal podem reduzir. Além disso, a temperatura do lixiviado tende a ser mais alta em aterros jovens devido à atividade microbiana. Essas mudanças influenciam as estratégias de tratamento e a gestão dos lixiviados (Lange *et al.* 2020).

Embora, já existisse a norma ABNT NBR 8419/1992, que exige que todos os aterros sanitários disponham de um sistema para captação, drenagem e disposição de lixiviados, em 2021, foi aprovado na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei

Federal nº 1516/2019, que define a obrigatoriedade do tratamento de todo chorume (lixiviado) gerado em aterros sanitários (Brasil, 2019).

2.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO DO LIXIVIADO

Os sistemas de tratamento de efluentes constituem um conjunto integrado de operações unitárias aplicadas ao lixiviado, com o objetivo de maximizar a remoção de poluentes presentes. Esses sistemas são projetados para alcançar um equilíbrio entre eficiência, baixo custo operacional e de construção, sempre com o intuito de adequar o efluente final aos padrões exigidos pelo corpo receptor e em conformidade com as legislações vigentes de emissão de efluentes líquidos (Scandelai *et al.*, 2021).

Ainda segundo os mesmos autores, cada fase do sistema de tratamento de efluentes é cuidadosamente desenvolvida para eliminar tipos específicos de poluentes, que podem variar desde sólidos grosseiros até micropartículas em suspensão, além de agentes químicos ou patogênicos responsáveis por doenças. Para isso, são empregados processos físicos, físico-químicos, químicos e biológicos, que atuam de forma complementar para controlar as cargas poluentes.

Especificamente, os processos de tratamento de lixiviados, derivados dos métodos tradicionais de tratamento de esgoto, são geralmente estruturados em quatro etapas de tratamento: preliminar, primário, secundário e terciário, conforme a Tabela 3. Cada uma dessas etapas tem funções distintas, mas inter-relacionadas, que garantem a eficiência do tratamento e a segurança ambiental do efluente final (Von Sperling, 2014).

Tabela 3 – Níveis de tratamento do lixiviado (continua).

Nível de tratamento	Descrição
Preliminar	Remoção de constituintes, como trapos, galhos e areia, que possam causar problemas operacionais ou de manutenção às operações e aos processos de tratamento e sistemas auxiliares.
Primário	Remoção de material sólidos suspensos e matéria orgânica/inorgânica do lixiviado realizada em mais de um estágio. Podendo ser usada adição de compostos químicos ou filtração.
Secundário	Remoção de matéria orgânica biodegradável (em solução ou suspensão) e sólidos suspensos. Também pode remover nutrientes (nitrogênio, fósforo ou ambos).

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2014.

Tabela 3 – Níveis de tratamento do lixiviado (continuação).

Terciário	Etapa de polimento do efluente final, fazendo a remoção de sólidos suspensos residuais (após tratamento secundário), usualmente por filtros granulares, filtros e membranas de ultra e/ou nanofiltração.
-----------	--

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2014.

Na Tabela 3, são detalhados os diferentes níveis de tratamento aplicados ao lixiviado. O tratamento preliminar é o primeiro passo, focado na remoção de sólidos grosseiros, que são frequentemente retidos através de grades. De forma alternativa, esse processo pode ser realizado utilizando peneiras rotativas ou trituradores, dependendo das características dos resíduos. Além disso, a remoção de areia é realizada em desarenadores, ou em caixas de areia, que separam essas partículas do efluente. Após o tratamento preliminar, o efluente ainda contém sólidos em suspensão de menor tamanho, que podem ser parcialmente eliminados em unidades de sedimentação primária, onde o processo de decantação é aplicado. Geralmente, essa fase é realizada em tanques de decantação, com adição de coagulantes, onde a gravidade auxilia na separação dos sólidos restantes, contribuindo para uma menor carga poluente a ser tratada nos estágios seguintes (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 (Oliveira *et al.*, 2021).

O sistema de lodos ativados normalmente é utilizado visando a 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 até 3 dias (Silva, 2019).

Na etapa de polimento, tem-se a nanofiltração, a separação nestes processos ocorre pelo mecanismo de diferença de tamanho entre as moléculas no soluto e os poros das membranas. A nanofiltração opera com o tamanho de poros na ordem de 0,001µm. Inclui-se moléculas orgânicas com elevado peso molecular e alguns sais

são removidos, o que gera um efluente isento de cor. O efluente da nanofiltração, denominado de permeado, constitui o lixiviado tratado, normalmente pode ser despejado no corpo receptor (Tecma, 2019).

Para tal despejo, a norma da ABNT NBR 8419/1992 enfatiza a necessidade de que todo lixiviado seja tratado, obedecendo os padrões legais vigentes (BRASIL, 1992). 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 de que os resultados que não atendem aos padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais não sejam reproduzidos, e assim possibilita que planos de ação sejam elaborados de forma a controlar o processo (Silva *et al.*, 2022).

2.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

O Controle Estatístico do Processo (CEP) é um sistema abrangente que integra princípios de gerenciamento com técnicas estatísticas e de engenharia, visando assegurar tanto a estabilidade quanto a melhoria contínua de processos produtivos, sejam eles técnicos ou administrativos. Essa metodologia é aplicada com o objetivo de identificar e eliminar variações indesejadas nos processos, permitindo um controle mais rigoroso e promovendo melhorias constantes na qualidade do produto ou serviço (Montgomery, 2020).

A implementação do CEP pode envolver o uso de ferramentas específicas que são essenciais para o monitoramento e a melhoria dos processos. Essas ferramentas, conhecidas coletivamente como as sete ferramentas da qualidade, são amplamente reconhecidas e aplicadas no ambiente industrial e administrativo. Elas incluem a folha de estratificação, que organiza dados, objetos e pessoas em grupos distintos; o diagrama de Ishikawa, que identifica causas e efeitos de problemas; a folha de verificação, utilizada para coleta e análise de dados; o histograma, que distribui dados para identificar padrões; o diagrama de dispersão, que avalia correlações entre variáveis; o diagrama de Pareto, que prioriza problemas de maior impacto; e, por fim, os gráficos de controle (ou gráficos de *Shewhart*), que monitoram a variabilidade do processo ao longo do tempo (Paladini, 2019).

Dentre estas ferramentas o gráfico de controle permite monitorar a variabilidade de um processo ao longo do tempo, identificando se ele está sob controle ou se há desvios que precisam ser corrigidos. No contexto do tratamento de lixiviado, essa

ferramenta assegura que os parâmetros de qualidade permaneçam dentro dos padrões estabelecidos, garantindo a eficiência do processo e o cumprimento das normas ambientais.

2.3.1 Gráficos de controle

O gráfico de controle, utilizado para a detecção de variações inesperadas em uma ou mais características, compõe uma das ferramentas para controle de processos. Esses gráficos estabelecem uma faixa de controle aceitável ao longo do tempo, permitindo a medição, monitoramento e controle dos resultados obtidos. Além disso, facilitam a comparação com os limites de especificação definidos pelo cliente ou pela legislação vigente, assegurando a conformidade e a qualidade do processo (Silva *et al.*, 2021).

A aplicação dos gráficos de controle abrange diversas fases críticas, como avaliação, comparação, análise e tomada de decisão. Dependendo do tipo de informações mensuradas, os gráficos de controle podem ser classificados em dois modelos principais: gráficos de atributos e gráficos de variáveis. Os gráficos de atributos são utilizados para características de qualidade que classificam itens como conformes ou não conformes, baseando-se em classificações ou contagens. Por outro lado, os gráficos de variáveis são baseados na medição contínua em parâmetros de qualidade, em que os resultados são obtidos por meio de medições precisas (Gomes *et al.*, 2020).

A elaboração de um gráfico de controle ocorre em duas fases distintas (Martins, 2020). Na primeira fase (Fase I), coleta-se uma amostra representativa dos dados a serem avaliados com o objetivo de determinar os limites de controle, geralmente utilizando dados retrospectivos. Nesta etapa, realiza-se um estudo detalhado para verificar se o processo está sob controle estatístico, avaliando a independência e a distribuição idêntica dos dados. A Fase I é concluída somente quando todas as causas especiais do processo são identificadas e eliminadas, garantindo assim a estabilidade do processo (Ferreira *et al.*, 2022).

Na segunda fase (Fase II), as informações obtidas na Fase I são utilizadas para monitorar continuamente o processo, assegurando que ele permaneça sob controle. Este monitoramento contínuo permite a detecção precoce de desvios, facilitando a

implementação de ações corretivas antes que problemas significativos ocorram (Oliveira *et al.*, 2023).

O gráfico de controle é composto por três linhas principais: a linha central e os limites superior e inferior de controle. Os pontos que representam as amostras são plotados ao longo de um eixo temporal (eixo x), enquanto a característica de qualidade analisada é representada no eixo y (Sousa *et al.*, 2021).

Essa estrutura visual facilita a análise contínua e dinâmica do processo, permitindo a identificação de desvios e a implementação de ações corretivas de maneira eficiente (Carvalho *et al.*, 2022).

Quando não for possível realizar replicatas nos subgrupos, por situações em que a análise seja demora ou economicamente inviável (tempo e custo elevado), para os dados gerados a serem analisados, o gráfico de controle mais adequado é o gráfico de valor individual (\bar{x}).

Este tipo de gráfico é especialmente eficaz para monitorar processos em que as observações são realizadas em intervalos mensais e a variabilidade entre as amostras individuais é relevante para a análise do desempenho do processo. Os limites de controle para o gráfico de valor individual podem ser determinados utilizando-se fórmulas específicas que consideram a média e a variabilidade dos dados ao longo do tempo. As Equações de 1 a 6, são utilizadas para calcular esses limites, fundamentadas em conceitos estatísticos que garantem a sensibilidade e a precisão do gráfico na detecção de desvios no processo (Silva *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2021).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^i x_i}{k} \quad (1)$$

$$Rm_i = |x_i - x_{i+1}| \quad (2)$$

$$R\bar{m} = \frac{\sum_{k=1}^i Rm_i}{k-1} \quad (3)$$

$$LC_x = \bar{x} \quad (4)$$

$$LSC_x = \bar{x} + E_2 \cdot R\bar{m} \quad (5)$$

$$LIC_x = \bar{x} - E_2 \cdot R\bar{m} \quad (6)$$

Sendo: \bar{x} a média dos valores do parâmetro; x_i o valor do parâmetro no ponto i ; x_{i+1} o valor do parâmetro no ponto $i + 1$; k o tamanho da amostra; Rm_i a amplitude móvel

para o ponto i ; Rm a média dos valores da amplitude móvel; E_2 o parâmetro de ajuste para gráfico de x ; LSC_x o limite superior de controle para o gráfico de x ; LC_x a linha central para o gráfico de x e LIC_x 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).

Para calcular os limites de controle, considera-se a média dos valores individuais e a amplitude móvel. Isto permite capturar a variação natural do processo e estabelecer limites superior e inferior que indicam quando o processo pode estar fora de controle (Carvalho *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, os limites de controle em gráficos de controle, são estabelecidos a uma distância de três desvios-padrão (σ) da média ou do alvo do processo. Essa abordagem não é uma regra rígida, mas tem se mostrado eficaz em uma ampla variedade de casos, proporcionando um equilíbrio adequado entre sensibilidade e especificidade na detecção de desvios do processo. A escolha de três desvios-padrão reflete uma prática comum que, na maioria dos casos, oferece resultados satisfatórios ao evitar alarmes falsos, ou seja, a identificação incorreta de um processo como fora de controle quando, na verdade, está operando dentro de seus parâmetros normais (Montgomery, 2020; Qiu *et al.*, 2021).

O desvio-padrão utilizado para definir os limites de controle é geralmente o desvio-padrão das médias, conhecido como erro-padrão. No entanto, ele também pode ser estimado com base na amplitude das amostras. Esta flexibilidade na estimativa permite ajustar os limites de controle conforme a variabilidade do processo, mantendo a eficácia da monitorização. Os limites de controle estabelecem uma área de tolerância que minimiza a ocorrência de alarmes falsos. Em termos estatísticos, eles correspondem a um intervalo de confiança com nível de precisão de 99,73%, o que significa que apenas 0,27% dos dados, ou aproximadamente 3 em 1000 pontos, devem sair desses limites, assumindo que o processo está sob controle (Chan *et al.*, 2022).

Alarmes falsos, também conhecidos como *outliers*, são pontos de dados que se distanciam significativamente dos demais na amostra analisada. Esses *outliers* podem indicar problemas potenciais no processo, mas também podem ocorrer devido

a variabilidade aleatória. Por isso, a configuração de três desvios-padrão é amplamente utilizada, pois oferece um equilíbrio entre detectar verdadeiros problemas no processo e evitar a interpretação errônea de variações normais como problemas (Smith *et al.*, 2023).

Para identificar situações em que o processo está fora de controle, é fundamental realizar uma análise detalhada dos gráficos de controle. Essa condição de descontrole não se manifesta apenas quando um ou mais pontos ultrapassam os limites de controle estabelecidos. Ela também pode ocorrer quando os dados apresentam um padrão de comportamento que não é aleatório, indicando a presença de causas especiais de variação no processo (Montgomery *et al.*, 2018).

Para facilitar essa identificação, a norma da *International Organization for Standardization* (ISO) 7870-2 estabelece oito critérios de avaliação que são amplamente utilizados na análise de controle de processos. Tais critérios ajudam a detectar padrões que podem indicar problemas no processo, como tendências ascendentes ou descendentes, mudanças repentinas no nível do processo, ou flutuações que seguem um padrão regular (ISO, 2013). Esses critérios (Tabela 4) são essenciais para a análise contínua e eficaz dos gráficos de controle, permitindo que os engenheiros de qualidade e os operadores de processo identifiquem prontamente sinais de descontrole, mantendo assim a consistência e a confiabilidade do processo produtivo (Montgomery, 2020; Chan *et al.*, 2022).

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

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;

Fonte: ISO, 2013.

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

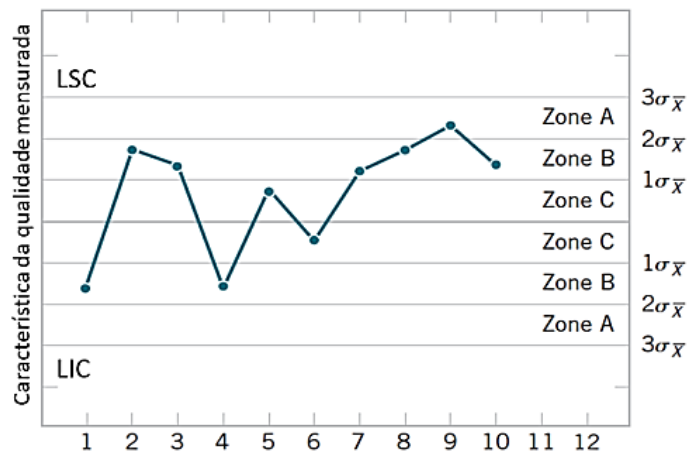
8	Oito pontos consecutivos em ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C.
---	--

Fonte: ISO, 2013.

Na Tabela 4, são detalhados os critérios estabelecidos pela norma ISO 7870-2:2013, que são fundamentais para a avaliação do controle de processos por meio de gráficos de controle. Para aplicar esses critérios de maneira eficaz, é necessário dividir o intervalo entre os limites de controle em zonas específicas.

Essas zonas, conforme ilustrado na Figura 2, representam os limites para 1σ (zona C), 2σ (zona B) e 3σ (Zona A), e são referenciadas como zonas de aviso. (ISO, 2013).

Figura 2 - Definição das zonas dos critérios da norma ISO 7870-2:2013.



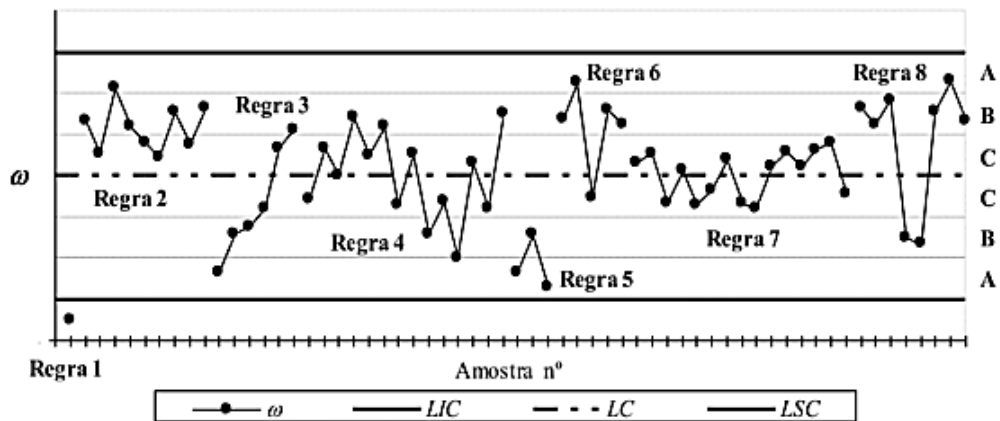
Fonte: Adaptado de Montgomery (2020).

A divisão do intervalo em zonas ilustrado na Figura 2, permite uma análise mais fidedigna do desempenho do processo. A Zona C, que fica mais próxima da linha central, indica uma área de controle rigoroso, onde pequenas variações são consideradas normais. No entanto, as Zonas B e A, que se encontram mais distante da linha central, servem como limites de alerta e indicam quando o processo pode estar se desviando da normalidade. A presença de pontos de dados nestas zonas pode sinalizar a necessidade de investigação para identificar possíveis causas especiais de variação que poderiam comprometer a estabilidade do processo (Montgomery, 2020; Chan *et al.*, 2022).

A utilização desses limites é essencial para manter o processo dentro de parâmetros aceitáveis, minimizando a ocorrência de defeitos e aumentando a

qualidade do produto ou processo. A interpretação correta das zonas de controle e a aplicação dos critérios da ISO 7870-2:2013, ilustrado na Figura 3, permitem um monitoramento contínuo e preciso, possibilitando intervenções oportunas para correção de desvios e manutenção do controle estatístico do processo (Silva *et al.*, 2020).

Figura 3 - Regras de identificação de causas especiais de acordo com a ISO 7870- 2:2013



Na Figura 3 o autor trata como regras e ilustra em exemplos os critérios da ISO 7870- 2:2013 vistos na Tabela 4. Na regra 1, o padrão apresentado é amplamente aceito como crucial para detectar eventos fora de controle em processos, sendo frequentemente considerado o único método viável em determinadas situações. Esse padrão prevê que um sinal será gerado quando houver um aumento no desvio padrão ou uma alteração na média do processo. A relação de proporcionalidade entre a magnitude da mudança e o tempo de detecção do sinal é destacada por quanto maior a alteração, mais rápido o sinal é emitido. Isso significa que, se o intervalo do gráfico de controle permanece constante e dentro dos limites de segurança, a hipótese de aumento do desvio pode ser descartada. Esse critério também é eficaz para identificar anomalias isoladas no processo, como erros aritméticos, falhas no cálculo do operador, problemas com o tamanho da amostra, defeitos no equipamento ou falhas mecânicas (Kok *et al.*, 2020).

Ainda na Figura 3 segundo os mesmos autores, a regra 2 representa uma possível alteração na distribuição do processo, identificada por seis ou mais pontos consecutivos em apenas um lado da linha central. Esse tipo de padrão geralmente resulta de mudanças em matérias-primas, máquinas, métodos de inspeção, ou da introdução de novos operadores. Fatores como falta de experiência, treinamento

inadequado, ou desmotivação dos operadores também podem contribuir para essa ocorrência.

A regra 3, aborda a questão da estabilidade ou desvio na média do processo, que pode se manifestar como uma tendência de aumento ou diminuição. Possíveis causas incluem a melhoria ou deterioração das habilidades do operador, desgaste de ferramentas, ou mudanças nas condições ambientais (Montgomery *et al.*, 2019).

A regra 4, ilustra uma variação sistemática causada por alternância entre diferentes máquinas, fusos, operadores, ou fornecedores, com base em estudos de Monte Carlo que determinaram que 14 pontos ascendentes ou descendentes alternadamente indicam esse tipo de padrão (Smeti *et al.*, 2022).

A regra 5 apresenta padrões que detectam pequenas variações na média do processo, que podem ser decorrentes de ajustes excessivos no parâmetro estudado. Similarmente, a regra 6 avalia mudanças sutis na média do processo, proporcionando uma análise mais precisa de pequenas variações (Chan *et al.*, 2022).

A regra 7, embora possa inicialmente sugerir que o processo está sob controle, pode revelar problemas relacionados a limites de controle excessivamente amplos. Esse cenário pode ser resultado de dados estratificados, onde uma fonte sistemática de variação está presente dentro de cada subgrupo. Finalmente, a regra 8 evidencia um gráfico de controle com um padrão de mistura, em que os pontos tendem a se concentrar próximos aos limites de controle, sugerindo problemas potenciais na configuração do processo (Silva *et al.*, 2020).

Nos casos em que nenhum desses padrões específicos é identificado, presume-se que o processo esteja variando apenas por causas comuns. No entanto, é essencial verificar essa suposição, sendo o teste de normalidade a abordagem mais comum para essa verificação (Smith *et al.*, 2020).

2.3.2 Teste de normalidade

A curva simétrica em torno do seu ponto médio, conhecida como distribuição normal ou distribuição gaussiana, caracteriza-se pelo seu formato de sino e é uma das distribuições estatísticas mais amplamente utilizadas em várias áreas do conhecimento. A distribuição reside em sua capacidade de descrever inúmeros fenômenos naturais e processos industriais. O teste de normalidade é um método estatístico para verificar se um conjunto de dados segue uma distribuição normal, o

que é importante para análises estatísticas subsequentes. Para realizar essa verificação, métodos gráficos, como histogramas, *box plots* e gráficos de dispersão normal Q-Q *plot*, são frequentemente utilizados. No entanto, esses métodos gráficos, embora úteis, não fornecem informações quantitativas suficientes para confirmar a normalidade dos dados, sendo necessário complementar as análises com testes estatísticos objetivos (Nunes *et al.*, 2021).

Entre os testes de normalidade mais utilizados, especialmente para amostras pequenas, destaca-se o teste de *Shapiro-Wilk*. Esse teste estatístico avalia a hipótese nula (H_0) de que os dados provêm de uma distribuição normal, fornecendo um valor-p (*p-value*), que indica a probabilidade de que a amostra observada seja consistente com uma população normalmente distribuída. Se o valor-p for pequeno, isso sugere que os dados não seguem uma distribuição normal, levando à rejeição da hipótese nula. Em termos práticos, a regra de decisão para o teste *Shapiro-Wilk* é a seguinte (Yagin *et al.*, 2024):

- Se $p\text{-value} \leq \alpha$ (em que α é o nível de significância, usualmente 0,05), rejeita-se a hipótese nula, indicando que os dados provavelmente não seguem uma distribuição normal.
- Se $p\text{-value} > \alpha$, não se rejeita a hipótese nula, sugerindo que a distribuição normal é uma hipótese viável para os dados analisados.

Ainda segundo os mesmos autores, o nível de significância (α) representa o risco, em termos percentuais, de rejeitar erroneamente a hipótese nula quando ela é verdadeira. Usualmente, adota-se α igual a 0,05, ou seja, um risco de 5%. Portanto, se no teste de normalidade o *p-value* obtido for maior que 0,05, considera-se que os dados estão suficientemente próximos de uma distribuição normal. Para o cálculo estatístico de *Shapiro-Wilk*, utiliza-se a Equação 7, 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 tabelados.

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_1 \cdot x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

Em seguida, a análise de capacidade do processo é aplicada para avaliar se o processo está apto a produzir dentro das especificações requeridas, garantindo a qualidade e a conformidade dos efluentes tratados com as normas ambientais.

2.3.3 Capacidade do processo

Ao tratar da implantação do Controle Estatístico de Processo (CEP), a análise de capacidade do processo se torna uma etapa importante. Essa análise visa determinar se um processo, cujo comportamento já foi identificado e analisado, é capaz de produzir resultados ou prestar serviços que estejam dentro das especificações pré-estabelecidas. Para realizar essa avaliação, são utilizadas métricas como o Índice de Capacidade do Processo (C_p) e o Índice de Capacidade do Processo Ajustado (C_{pk}), que ajudam a entender melhor a eficácia e a eficiência do processo em questão (Oliveira; Silva; Santos, 2023).

O Índice C_p é calculado pela razão entre a faixa de especificação (diferencial entre os limites superior e inferior) e a variação natural do processo, representada por 6σ (seis vezes o desvio-padrão do processo), como pode ser visto na equação 8.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (8)$$

Um valor de C_p maior que 1,33, indica que o processo tem uma faixa de variação menor do que a faixa de especificação, sugerindo que o processo é capaz de atender às exigências com pouca variação. No entanto, o C_p , por si só, não considera o alinhamento do processo em relação à meta central da especificação (Montgomery, 2020).

Ainda segundo o mesmo autor, o Índice C_{pk} complementa essa análise ao considerar não apenas a variação do processo, mas também o seu alinhamento com o alvo. O C_{pk} (equação 9) é definido como o valor mínimo entre a capacidade do processo superior (C_{ps}) e a capacidade do processo inferior (C_{pi}), onde ambos são calculados como a razão entre a distância do valor central do processo ao limite superior ou inferior da especificação, dividido por 3σ , como podem ser vistos respectivamente nas equações 10 e 11.

$$C_{pk} = \min \{C_{pi}, C_{ps}\} \quad (9)$$

$$C_{ps} = \frac{LSE - \bar{x}}{3\sigma} \quad (10)$$

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

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

Essa métrica é essencial para avaliar se o processo, além de ser capaz de produzir dentro das especificações, está centrado de forma a minimizar o risco de produzir fora dos limites aceitáveis (Alves; Bonini; Maiellaro, 2022).

Com base nos mesmos autores, uma análise de capacidade robusta, utilizando C_p e C_{pk} , permite que as empresas identifiquem pontos críticos no processo e implementem melhorias contínuas para garantir produtos ou serviços que atendam consistentemente às exigências de qualidade.

Segundo Paladini (2019), quando o desvio-padrão do processo (σ) é desconhecido, é essencial utilizar fatores de correção para ajustar as fórmulas que dependem dessa medida. Isso ocorre porque o desvio-padrão desconhecido impede a aplicação direta das equações originais, que pressupõem o conhecimento exato da variabilidade do processo. Nessa situação, os fatores de correção atuam para ajustar as equações de maneira que elas continuem a fornecer estimativas precisas e confiáveis dos parâmetros do processo, assim, as equações anteriormente utilizadas (Equações 8, 10 e 11) são modificadas para incorporar esses fatores de correção, resultando em novas expressões matemáticas (Equações 12, 13 e 14, respectivamente).

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6 \frac{R\bar{m}}{d_2}} \quad (12)$$

$$Cp_i = \frac{\bar{x} - LIE}{3 \frac{R\bar{m}}{d_2}} \quad (13)$$

$$Cp_s = \frac{LSE - \bar{x}}{3 \frac{R\bar{m}}{d_2}} \quad (14)$$

O parâmetro de ajuste d_2 é tabelado, disponível no ANEXO A, em que podem ser consultados para aplicação nas equações relacionadas à capacidade do processo.

Em relação aos índices de capacidade, o princípio geral é que, quanto maior o valor desses índices, melhor o processo se alinha às especificações estabelecidas. Uma categorização dos valores possíveis de C_p e suas respectivas classificações quanto à capacidade do processo, oferecendo uma referência para avaliar a

adequação do processo às especificações desejadas estão apresentados na Tabela 5 (Silva *et al.*, 2020).

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

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

Fonte: Adaptado Silva *et al.* (2020).

Como pode ser observado na Tabela 5, quando o índice de capacidade C_p é menor que 1,00, o processo é classificado como incapaz, uma vez que parte significativa dos resultados obtidos estão, ou estarão, fora das tolerâncias especificadas, caso nenhuma ação corretiva seja tomada. Essa situação indica que o processo não é capaz de atender consistentemente às especificações estabelecidas, podendo resultar em produtos ou serviços fora dos padrões aceitáveis (Paladini, 2019).

Quando o C_p varia entre 1,00 e 1,33, significa que a faixa de 6σ está igual ou muito próxima da tolerância especificada. Neste cenário, apenas cerca de 0,27% das saídas do processo estarão fora das especificações, permitindo que o processo seja classificado como razoavelmente capaz de atender às exigências, com um nível aceitável de não conformidades (Martins, 2019).

Por outro lado, se o C_p for superior a 1,33, a faixa de 6σ será menor do que a largura da tolerância, indicando que o processo é altamente capaz, com mais de 99,73% dos resultados dentro das especificações. Isso significa que o processo pode acomodar pequenas variações de causas especiais, como variações em materiais, operadores, métodos, máquinas ou ambiente, sem comprometer a qualidade do produto (Oliveira *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA

Neste tópico, será apresentada a metodologia utilizada para desenvolver o presente trabalho. Serão abordados os parâmetros de controle da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) em estudo, incluindo a caracterização da área de estudo, coleta e levantamento dos dados pertinentes. Além disso, serão descritos os processos de construção e análise dos gráficos de controle, teste de normalidade e capacidade do processo, que são essenciais para a compreensão e avaliação do desempenho da ETE.

3.1 PARÂMETROS DE CONTROLE

Foram avaliados os parâmetros legislados e definidos quais seriam utilizados para o monitoramento visando o despejo do efluente tratado em corpo receptor. Em conformidade com a Resolução Nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e com a Norma Técnica 2.002/2000 da Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH), foram identificados os parâmetros físico-químicos que necessitam de análise e controle semanal. Os parâmetros para monitoramento da ETE em estudo, selecionados conforme a legislação, estão apresentados na Tabela 6.

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

Parâmetro	Método Analítico	Faixa Aceitável	Fonte
pH	SM 4500 H+ B	5,0 – 9,0	CONAMA 430/2011
DQO	SM 5220 D	Remoção $\geq 90\%$	CPRH NT 2.002/2000
Nitrogênio amoniacal	SM 4500 NH ₃ E	$\leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	CONAMA 430/2011
Sólidos sedimentáveis	SM 2540 F	$\leq 1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$	CONAMA 430/2011
Temperatura	SM 2550 B	$< 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$	CONAMA 430/2011

Fonte: Autor (2024)

É importante salientar que os parâmetros selecionados na Tabela 6, foram analisados conforme os métodos analíticos descritos na 23ª edição do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, publicada em 2017, bem como pelos métodos estabelecidos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Esses métodos garantem a precisão e confiabilidade das análises, assegurando que os resultados obtidos estão em conformidade com os padrões internacionais, reconhecidos para a avaliação da qualidade dos efluentes.

3.2 FLUXOGRAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO

Para obter uma compreensão mais profunda do processo da estação de tratamento de efluentes (ETE) em estudo, foi realizada uma avaliação de todo o caminho que o lixiviado percorre, desde sua captação inicial até sua destinação final. Como parte dessa análise, foi desenvolvido um fluxograma que ilustra as etapas sequenciais do processo de tratamento utilizado.

3.3 COLETA DE DADOS

Foram coletados e analisados os dados dos parâmetros listados na Tabela 6 do item 4.1 pela equipe do setor de meio ambiente durante o período de janeiro de a dezembro de 2023. As análises foram conduzidas por um laboratório devidamente licenciado ambientalmente e certificado pela ABNT NBR ISO 9001 - Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos, pela ABNT NBR ISO 14001 - Sistemas de Gestão Ambiental - Requisitos e ABNT NBR ISO 17025 - Competência de laboratórios de ensaio e calibração - Requisitos, em conjunto com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

As amostras de efluentes foram coletadas semanalmente ao longo do período avaliado, e seus resultados foram disponibilizados no *software MyLims Web*. Os dados obtidos foram então organizados em planilhas, que foram utilizadas para a construção de gráficos de controle, análise da normalidade, cálculo da capacidade do processo e avaliação da eficiência da ETE. Este processo garante a precisão dos dados e a conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos, permitindo uma avaliação confiável do desempenho da ETE.

3.4 GRÁFICOS DE CONTROLE

Devido à natureza dos dados, que são gerados semanalmente, o gráfico de controle mais adequado para este trabalho foi o de valor individual (\bar{x}). Conforme discutido no item 4.1, os limites de controle foram determinados utilizando as Equações 1-6. Os valores do parâmetro de ajuste (E_2) estão disponíveis no ANEXO A. Para este trabalho, considerando que serão utilizados gráficos de controle de valores individuais, o tamanho da amostra (n) foi definido como 2. Este valor foi definido porque é o tamanho do conjunto de amostras utilizado para o cálculo das amplitudes móveis.

Os resultados do ano de 2023 foram utilizados para calcular os limites de controle dos gráficos, estabelecendo assim a Fase I. Os cálculos dos limites de controle foram realizados utilizando o *software Microsoft Excel®*. A Fase II envolveu a avaliação dos gráficos, utilizando os dados coletados ao longo do ano de estudo (2023).

Os gráficos gerados foram avaliados de acordo com a norma ISO 7870-2:2013 - *Control Charts – Part 2: Shewhart control charts*. A execução dos testes e a criação dos gráficos foram realizadas, utilizando o *software Microsoft Excel®*.

3.5 TESTE DE NORMALIDADE

Os testes de normalidade segundo *Shapiro-Wilk* foram conduzidos com o auxílio do suplemento *Real Statistics* para *Microsoft Excel®*. Esses testes permitiram verificar se os dados seguiam uma distribuição normal, condição essencial para a correta interpretação dos gráficos de controle.

3.6 CAPACIDADE DO PROCESSO

Para os cálculos das capacidades do processo, foi empregada uma abordagem manual dentro do *software Microsoft Excel®*. Este procedimento garante a precisão e a confiabilidade dos cálculos, permitindo uma análise detalhada da capacidade do processo e a identificação de áreas potenciais para melhorias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

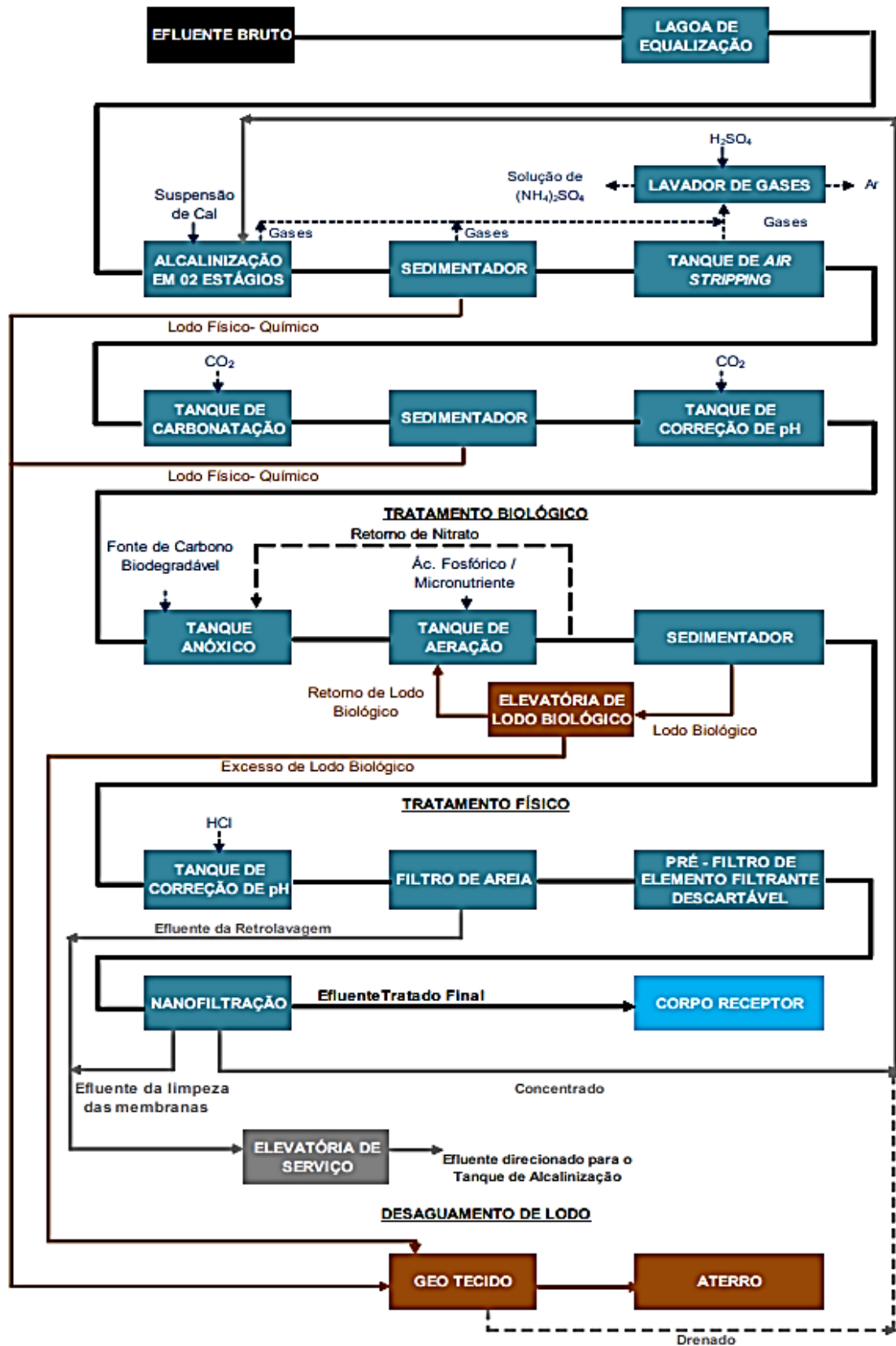
Nesta seção, são detalhados os resultados referentes ao fluxograma do processo, aos gráficos de controle, ao teste de normalidade e à análise de capacidade de processo. Serão discutidos os principais fatores que influenciaram esses resultados, assim como uma comparação dos valores obtidos com os requisitos regulatórios aplicáveis. A análise incluirá uma avaliação de cada gráfico de controle, a verificação da conformidade dos dados com a distribuição normal e a capacidade do processo em atender às especificações exigidas.

4.1 FLUXOGRAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO

O fluxograma, apresentado na Figura 4, serve como uma ferramenta visual essencial para mapear e entender cada fase do tratamento, destacando os pontos críticos e os procedimentos específicos que garantem a qualidade do lixiviado ao final do processo, assegurando sua adequação para lançamento em corpos hídricos. Passados todas as etapas de tratamento descrito no fluxograma, o efluente final é lançado em um corpo hídrico classificado como Classe 2, conforme definido pela Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

Com base na Resolução CONAMA nº 357/2005, a Classe 2 inclui corpos d'água que podem ser utilizados para abastecimento humano, após tratamento convencional, recreação de contato primário, proteção de comunidades aquáticas, irrigação de hortaliças e plantas frutíferas consumidas cruas, entre outros usos. Portanto, o lançamento de efluentes neste tipo de corpo hídrico exige o cumprimento rigoroso dos parâmetros de qualidade definidos para evitar impactos ambientais adversos e assegurar a manutenção da qualidade da água para os usos designados.

Figura 4 – Fluxograma com as etapas do sistema de tratamento do lixiviado da ETE em estudo.



Fonte: Adaptado Tecma, 2019.

Como pode ser observado na Figura 4, o efluente bruto é captado da lagoa de equalização e bombeado até a ETE. O processo de tratamento começa com a alcalinização. Esse tratamento inicial reduz significativamente a matéria orgânica, os sais dissolvidos, a cor e a amônia. Após a homogeneização, o efluente passa por gravidade para o sedimentador, onde os sólidos são separados e o lodo é direcionado para o geotecido. A precipitação química ocorre em dois estágios, utilizando hidróxido de cálcio, o sobrenadante segue para o tanque de *air stripping*, onde a amônia é removida por volatilização, auxiliada por aeradores e um sistema de difusão de ar. Os gases gerados são tratados em uma torre de lavagem de gases, removendo a amônia antes da liberação na atmosfera.

Depois da remoção da amônia, o efluente passa para o tanque de carbonatação, onde ocorre a dosagem de gás carbônico. Em seguida, é transportado para o sedimentador, e o lodo gerado é novamente sedimentado e bombeado para o geotecido. A seguir, o pH do efluente é ajustado para a faixa ideal (pH 6,5 – 8,5) do tratamento biológico (lodos ativados), que ocorre no tanque anóxico. Nesse tanque, microrganismos degradam a matéria orgânica, enquanto o processo de nitrificação transforma amônia em nitrato, seguido pela desnitrificação no tanque de aeração.

Após o tratamento biológico, o efluente passa por um ajuste de pH e uma etapa de filtração em leito de areia para remoção de materiais finos, seguido por nanofiltração, que remove partículas menores que um nanômetro, resultando em um efluente tratado isento de cor e com carga orgânica reduzida. O efluente tratado pode ser lançado no corpo receptor, enquanto o concentrado da nanofiltração retorna ao tratamento inicial. Todo o excesso de lodo biológico e físico-químico é desidratado no geotecido, com o líquido drenado retornando ao segundo estágio da alcalinização para tratamento contínuo.

4.2 COLETA DE DADOS

Os relatórios semanais dos parâmetros ambientais, conforme especificado pela legislação e descritos na Tabela 6 do item 4.1, foram gerados utilizando o *software MyLims*, fornecido pelo laboratório responsável pelas análises. Estes relatórios, que cobrem o período de janeiro a dezembro de 2023, foram fundamentais para o monitoramento contínuo e detalhado dos dados ao longo do ano. Os dados coletados,

disponíveis no APÊNDICE A, serviram como base para a elaboração e realização das análises realizadas neste estudo.

4.3 GRÁFICOS DE CONTROLE

Foram calculadas a média e os limites de controle superior e inferior conforme as Equações 1-6 do item 3.1. Os valores obtidos para os limites estão apresentados na Tabela 7.

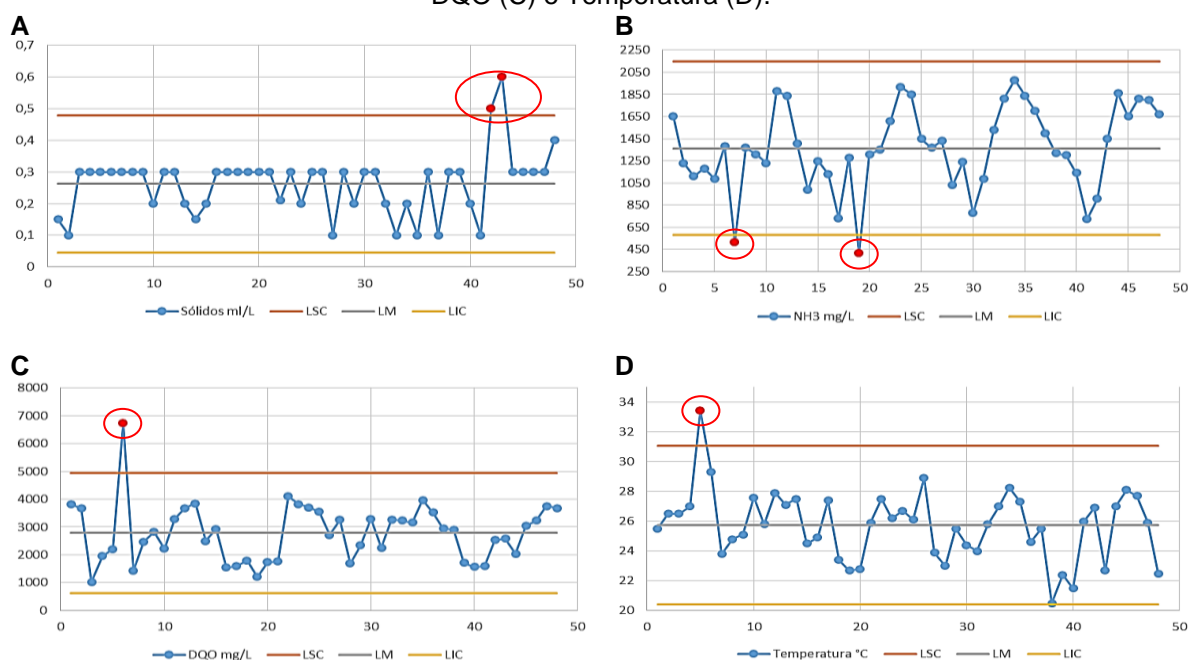
Tabela 7 – Limites de controle calculados com os dados coletados do efluente bruto para o ano 2023.

Parâmetros	Unidade	Efluente Bruto		
		Média	LIC	LSC
Sólidos sedimentáveis	mL.L ⁻¹	0,26	0,05	0,48
Nitrogênio amoniacal	mg.L ⁻¹	1363	577	2148
DQO	mg.L ⁻¹	2787	631,2	4943
Temperatura	°C	25,7	20,4	31,1

Fonte: Autor (2024).

Após obtenção dos valores apresentados na Tabela 7, foram construídos os gráficos de controle, e os dados que serviram como base para o cálculo dos limites de controle foram plotados e estão apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Gráficos de controle efluente bruto. Sólidos sedimentáveis (A); Nitrogênio amoniacal (B); DQO (C) e Temperatura (D).



Fonte: Autor (2024).

A partir da análise da Figura 5, foi possível identificar que, para os parâmetros de sólidos sedimentáveis, nitrogênio amoniacal, DQO e temperatura do efluente bruto, ocorreram pontos que ultrapassaram os limites de controle. Os pontos fora dos limites de controle foram eliminados dos gráficos A e B por picos de chuva (junho e novembro), para os gráficos C e D devido a variações de temperatura do verão (temperatura elevada). Para tanto, novos limites foram calculados e os dados foram plotados novamente. Com isso, todos os pontos ficaram dentro dos limites de controle, os quais estão apresentados na Tabela 8 para todos os parâmetros, onde foi possível notar uma correlação da temperatura com a DQO, onde, nos meses que ocorre o verão, ambas tendem a subir.

Tabela 8 – Limites de controle calculados com os dados coletados do efluente bruto (após eliminação dos pontos fora de LC) e tratado para o ano 2023.

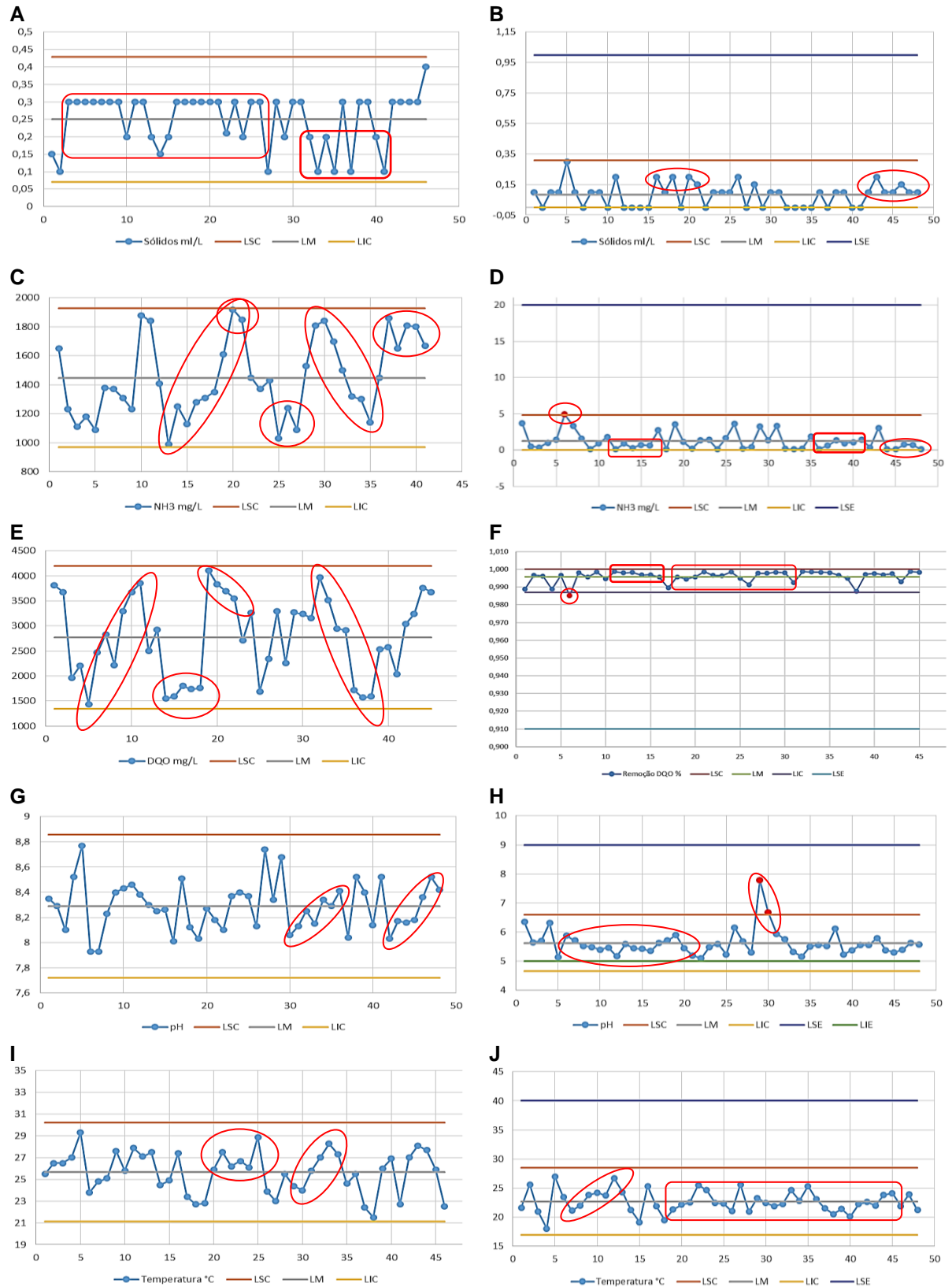
Parâmetros	Unidade	Efluente bruto			Efluente tratado				
		Média	LIC	LSC	Média	LIC	LSC	LIE	LSE
Sólidos sedimentáveis	mL·L ⁻¹	0,25	0,07	0,43	0,08	0,00	0,30	-	1,00
Nitrogênio amoniacal	mg·L ⁻¹	1448	968	1928	1,2	0,0	4,8	-	20,0
DQO	mg·L ⁻¹	2740	1278	4202	99,6	98,7	100	90,0	-
pH	-	8,3	7,7	8,8	5,6	4,6	6,6	5,0	9,0
Temperatura	°C	25,7	21,2	30,2	22,7	16,9	28,5	-	40,0

Fonte: Autor (2024)

Como pode ser observado, pela comparação entre as Tabelas 7 e 8, após a exclusão dos pontos que ficaram fora do limite de controle, a faixa entre os limites ficou mais estreita. Os limites de controle listados na Tabela 8 foram utilizados para construção dos gráficos de controle, conforme ilustrado na Figuras 6.

Esses gráficos proporcionam uma visualização clara do comportamento dos parâmetros ao longo do tempo, possibilitando a detecção de padrões, tendências ou desvios que possam indicar problemas no processo de tratamento ou na operação do aterro sanitário. A análise desses gráficos é fundamental para garantir que o tratamento do lixiviado esteja dentro dos padrões estabelecidos e para tomar medidas corretivas, caso necessário.

Figura 6 – Gráficos de controle. Sólidos sedimentáveis: efluente bruto (A) e efluente tratado (B); Nitrogênio amoniacal: efluente bruto (C) e efluente tratado (D); DQO: efluente bruto (E) e efluente tratado (F); pH: efluente bruto (G) e efluente tratado (H); Temperatura: efluente bruto (I) e efluente tratado (J).



Fonte: Autor, 2024.

Como pode ser constatado na Figura 6, foi possível identificar alguns pontos que ultrapassam o limite de controle inferior (Figura 6F) e superior (Figura 6D e 6H). Os resultados obtidos não comprometem a eficácia do tratamento do lixiviado tratado, estando em conformidade com os padrões aceitáveis estabelecidos pelas normas regulatórias vigente, mas indicam a necessidade de monitoramento contínuo para evitar que o processo saia do controle estatístico.

No novo gráfico de controle plotado, após a eliminação dos pontos atípicos para sólidos sedimentáveis (Figura 6A), podem ser observados forma mais evidente as sequências de pontos próximos à linha média, conforme identificado pelo critério 7 da norma ISO 7870-2:2013. Como pode ser visto na Figura 6B, ocorre uma faixa estreita entre a linha média e o limite inferior de controle, o que torna mais visível as oscilações mínimas ao longo do processo. Esses arranjos específicos podem ser atribuídos às intervenções realizadas para corrigir as variações observadas na Figura 6A. É importante destacar que a redução deste parâmetro é um indicador positivo, refletindo melhorias na eficiência do processo.

Na Figura 6C, gráfico de nitrogênio amoniacal para o lixiviado bruto, foram constatadas tendências crescente e decrescente (critério 3 da ISO 7870-2:2013) e mudanças na média (critérios 5 e 6 da ISO 7870-2:2013). As variações aleatórias distantes da linha central estão provavelmente associadas à composição variável do lixiviado, influenciada pelos resíduos sólidos urbanos (RSU) depositados no aterro ao longo do ano.

Na Figura 6D Nitrogênio amoniacal do lixiviado tratado, observa-se um ponto que ultrapassa o LSC (critério 1 da ISO 7870-2:2013). Isso indica que o processo saiu temporariamente de controle neste ponto, o que pode sugerir um ponto anômalo. O fato da faixa entre o LM e o LIC está estreita, pode-se notar que há muitos pontos próximos dessa área (média deslocada). Isso é um sinal de estabilidade no processo, em conformidade com o padrão 2 da ISO 7870-2:2013. Essa estabilidade sugere que, durante essas fases, o tratamento do lixiviado funcionou de maneira eficiente e sob controle estatístico. É importante ressaltar que mesmo existindo padrão critério 1, os dados se encontram com uma ampla faixa abaixo da LSE, imposto pela Resolução CONAMA Nº 430/2011, que estipula $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ como nível máximo.

Com relação ao parâmetro DQO do lixiviado bruto, Figura 6E, foram observadas tendências crescente e decrescente (critério 3 da ISO 7870-2:2013) e mudanças na média (critérios 5 e 6 da ISO 7870-2:2013). Além disso, também é

observado uma alta variabilidade dos dados ao longo do ano, provavelmente decorrente dos efeitos das mudanças climáticas, que influenciam diretamente os índices pluviométricos, alterando os padrões de precipitação ao longo do ano.

Com relação à DQO do lixiviado tratado (Figura 6F), observa-se o critério 1 da ISO 7870-2:2013, além de mudanças na média, conforme previsto no critério 6 da norma. Destacam-se também as sequências de pontos próximos à linha média, de acordo com o critério 7 da ISO 7870-2:2013. Analisando a Figura 6F, é importante destacar que, no caso da remoção percentual de DQO, um dos parâmetros cruciais para avaliar a carga orgânica do efluente destinado ao corpo receptor, a CPRH exige uma eficiência mínima de 90% no tratamento. A ETE em estudo superou essa exigência, apresentando todos os valores acima do limite inferior de especificação, com uma remoção mínima de 98%. Isso demonstra que os resultados obtidos estão muito acima do exigido, em conformidade com as especificações legais e que o tratamento tem sido eficaz em atendimento aos padrões regulatórios.

Em relação ao pH do lixiviado bruto (Figura 6G) os dados apresentaram tendência crescente (critério 3 da ISO 7870-2:2013). Maioria dos pontos demonstram aleatoriedade em torno da média, com faixas próximas à linha central, possivelmente causada por pequenos ajustes feitos durante esse período, com adição de ácido e bases a fim de manter o pH das lagoas sob controle.

Na Figura 6H, é possível notar dois pontos fora dos limites de controle (critério 1 ISO 7870-2:2013) e dados consecutivos bem próximos da linha central (critério 7 ISO 7870-2:2013). Foi possível observar que o LIC está fora da faixa mínima para descarte, normalmente quando isso acontece, se desconsidera o limite de controle e fica apenas o LIE. Embora esteja fora do intervalo, todos os valores observados estão acima do limite de especificação, mesmo havendo essa anomalia (devido à ajustes do pH no processo), os dados ainda se encontram sob controle estatístico, dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais vigentes.

No que diz respeito à temperatura do lixiviado bruto, conforme ilustrado na Figura 6I, pode ser observado pontos que crescem e decrescem consecutivamente, as quais indicam tendências no processo, correspondendo ao critério 3 da ISO 7870-2:2013, indicando ajustes realizados no processo para corrigir desvios. Além disso, essas alternâncias de crescimento e queda também se alinham ao critério 4 da norma, o que indica a presença de ciclos ou instabilidades cíclicas no processo. Ainda assim,

todos os pontos permanecem dentro dos limites de controle, demonstrando que o processo está, em termos estatísticos, sob controle.

Para o lixiviado tratado (Figura 6J), observa-se uma sequência de pontos com padrões de ascensão e queda consecutiva, o que pode indicar uma tendência ou correção no processo, conforme o critério 3 da norma ISO 7870-2:2013. É possível notar uma série de pontos próximos à linha média, sugerindo estabilidade no processo, de acordo com o critério 7 da norma, o que é considerado um sinal positivo de controle.

Ao avaliar os gráficos apresentados na Figura 6, juntamente com os limites de especificação correspondentes, é possível observar que existem indicativos de que os dados não estão completamente sob controle estatístico. Essa variabilidade se dá múltiplos fatores, como variações climáticas, que influenciam diretamente nos índices pluviométricos ao longo do ano e características intrínsecas dos RSU. Apesar de diferentes aspectos, os valores medidos se mantêm dentro dos padrões exigidos pelos órgãos ambientais competentes.

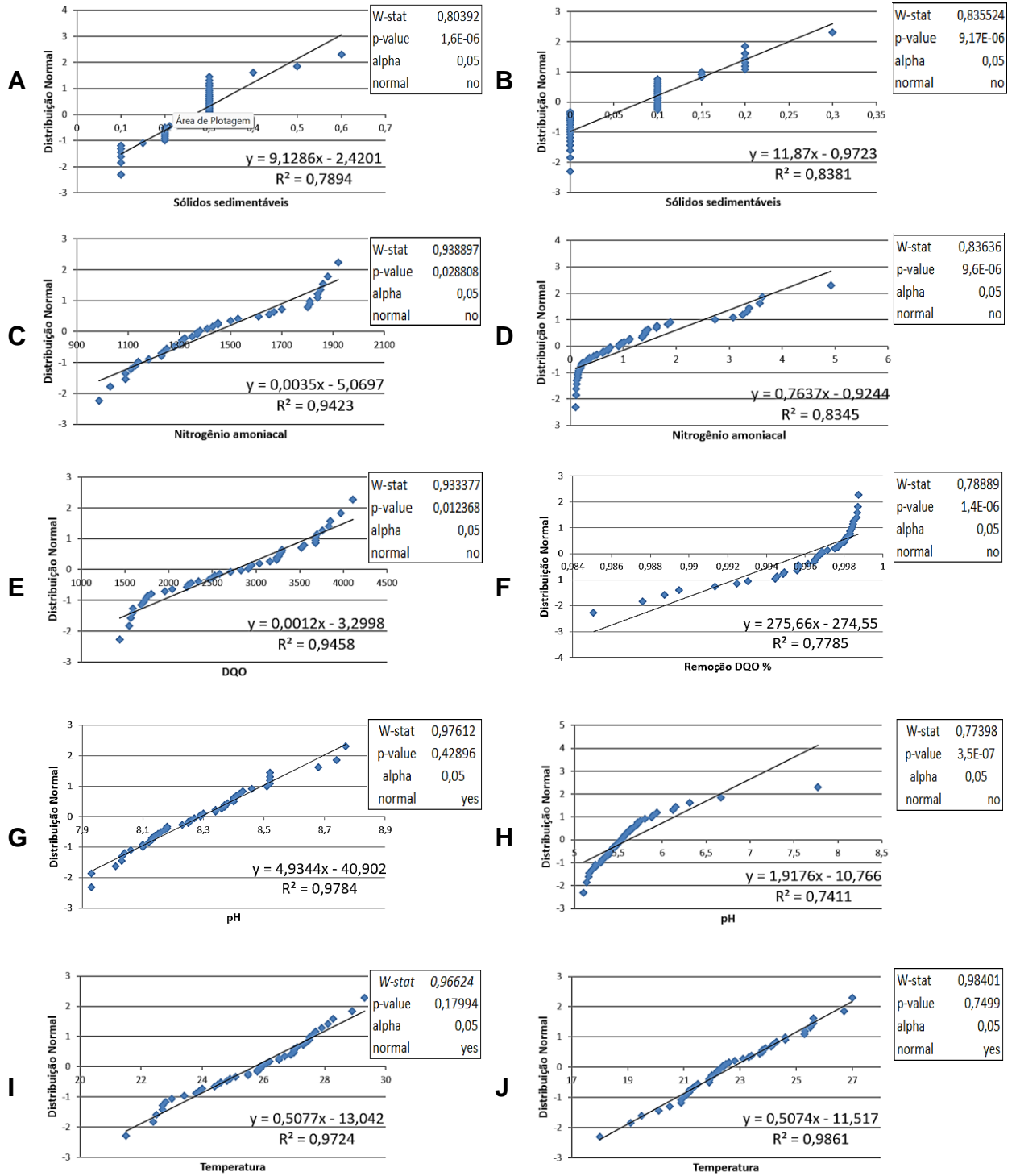
A partir da análise dos gráficos de controle, ficou clara a necessidade de ações corretivas para abordar as causas dos arranjos identificados. Para minimizar erros humanos, foi implementado procedimento operacional padronizado (POP) para o processo e instruções trabalho (IT) na padronização das coletas das amostras, contudo, é crucial a realização de treinamentos contínuos e de reciclagem sobre o tema.

Quanto à alta variabilidade do lixiviado, identificou-se a necessidade da otimização do processo, contendo ações preventivas com todos os registros de atividades realizadas, desde a dosagem de produtos químicos para controle das lagoas da estação de tratamento, até o controle de verificação, calibração e manutenção dos equipamentos do laboratório e da estação.

4.4 TESTE DE NORMALIDADE

Após a análise dos gráficos de controle, foram realizados testes de normalidade segundo o critério de *Shapiro wilk* para avaliar se os dados seguem uma distribuição normal. A Figura 7 apresenta os gráficos de probabilidade acumulada para cada parâmetro monitorado, oferecendo uma representação visual que ajuda a verificar a conformidade dos dados com a normalidade esperada.

Figura 7– Gráficos de normalidade. Sólidos sedimentáveis: efluente bruto (A) e efluente tratado (B); Nitrogênio amoniacal: efluente bruto (C) e efluente tratado (D); DQO: efluente bruto (E) e Remoção % (F); pH: efluente bruto (G) e efluente tratado (H); Temperatura: efluente bruto (I) e efluente tratado (J).



Fonte: Autor, 2024.

Em termos gerais, a análise dos dados, da Figura 7, revelou que 30% dos conjuntos testados apresentaram um *p-value* maior que 0,05, indicando que 3 dos 10 gráficos estudados seguem uma distribuição normal. Na Figura 7, observa-se que os gráficos das Figuras 7A, 7B, 7C, 7D, 7E, 7F e 7H não se alinham bem com a reta, que representa o ajuste a uma distribuição normal. Essa falta de normalidade nos dados é, provavelmente, decorrente das diversas causas especiais identificadas nos gráficos de controle e a grande variabilidade do lixiviado estudado no período em questão.

Por outro lado, para os parâmetros pH 7G, Temperaturas 7I e 7J, apesar das anomalias detectadas no processo, foi possível observar um bom ajuste à distribuição normal. Esses resultados sugerem que, mesmo com algumas irregularidades, os dados desses parâmetros seguem, em grande parte, o comportamento esperado de uma distribuição normal, o que pode indicar maior estabilidade e consistência nos processos associados a esses parâmetros.

4.5 CAPACIDADE DO PROCESSO

Após a obtenção dos resultados do teste de normalidade, procedeu-se ao cálculo dos índices de capacidade com o objetivo de realizar uma avaliação mais detalhada e precisa do processo em questão. Esses índices são essenciais para entender como o processo se comporta em relação aos limites especificados, fornecendo uma medida quantitativa de sua capacidade de produzir resultados que atendam consistentemente às exigências estabelecidas. Através dessa análise, é possível determinar a adequação do processo para operar dentro dos parâmetros desejados, identificando potenciais áreas de melhoria e garantindo que o desempenho esteja alinhado com os padrões de qualidade estabelecidos.

Quando apenas um limite mínimo ou máximo foi especificado, a análise do índice de capacidade C_p tornou-se inviável. Isso ocorreu porque a ausência de um dos limites de especificação (LIE ou LSE) impediu a realização do cálculo completo, que depende da definição precisa de ambos para avaliar a variabilidade do processo. Essa limitação foi observada para todos os parâmetros analisados neste estudo, exceto para o pH, que foi o único parâmetro para o qual estavam presentes tanto o LIE quanto o LSE, permitindo assim o cálculo adequado do índice de capacidade C_p .

A falta de um dos limites de especificação também impactou o cálculo do índice de capacidade ajustado (C_{pk}), limitando o cálculo ao índice de capacidade inferior (C_{pi})

ou superior (C_{ps}), conforme a disponibilidade do limite. Embora esses índices sejam geralmente aplicados a dados que seguem uma distribuição normal, os resultados apresentados na Tabela 9 mostram que os cálculos foram adequados para os dados deste estudo, proporcionando uma visão útil do desempenho do processo, mesmo diante das limitações impostas pela falta de normalidade em alguns casos.

Tabela 9 – Índices de capacidade do processo em estudo.

Parâmetro	C_p	C_{pk}	C_{pi}	C_{ps}
Sólidos sedimentáveis	-	4,018	-	4,018
Nitrogênio amoniacal	-	5,065	-	5,065
Remoção DQO	-	8,459	8,459	-
pH	1,464	0,461	0,461	2,467
Temperatura	-	2,981	-	2,981

Fonte: Autor, 2024.

Os resultados apresentados na Tabela 9, indicam que todos os parâmetros avaliados no processo demonstraram ser capazes, atendendo às exigências de desempenho estabelecidas. Tendo em vista que, os índices de capacidade ajustado (C_{pk}) para cada parâmetro, assim como o C_p do parâmetro pH, foi superior ao valor de 1,33, que é comumente utilizado como referência para determinar a adequação de um processo. Essa conformidade sugere que o processo não apenas opera dentro dos limites de especificação, mas também possui uma margem de segurança suficiente para acomodar variações sem comprometer a qualidade do processo. Portanto, com base nesses resultados, pode-se afirmar que o processo está bem controlado e é consistente em sua capacidade de atender às especificações exigidas.

Embora os resultados avaliados da ETE estejam em geral, atendendo aos requisitos legais, a análise do processo revela que ele não está totalmente sob controle estatístico. Essa falta de controle estatístico pode ser atribuída a vários fatores. Um dos principais é a alta variabilidade das características e da composição do lixiviado, que é influenciada pela grande diversidade de RSU depositados no aterro sanitário, e a variação climática e variabilidade do índice pluviométrico no decorrer do ano estudado.

Outros fatores que contribuem para essa situação incluem as mudanças frequentes de operadores e a deficiência de um procedimento operacional padronizado implementado, que reflita com precisão a realidade do processo. A variabilidade na composição do afluente é uma das causas mais desafiadoras de se

controlar, pois está diretamente ligada ao uso flutuante do sistema de deposição dos resíduos sólidos urbanos provenientes da população da região metropolitana do Recife.

5 CONCLUSÃO

Após uma avaliação do comportamento dos parâmetros de monitoramento da ETE em estudo, tornou-se evidente a necessidade de implementar um controle estatístico de processos para a operação da estação do aterro sanitário. Essa medida é essencial não apenas para aprimorar a qualidade do tratamento oferecido, mas também para assegurar que as operações estejam em plena conformidade com a legislação ambiental vigente.

A adoção do controle estatístico de processos permitirá uma gestão mais eficiente e rigorosa dos parâmetros operacionais, facilitando a identificação e a correção de desvios, garantindo, assim, que o tratamento do lixiviado atenda consistentemente aos padrões de qualidade exigidos pelos órgãos reguladores. Além disso, essa abordagem sistemática contribuirá para a otimização dos recursos e processos da ETE, promovendo uma operação mais sustentável e responsável, em alinhamento com os princípios de proteção ambiental e saúde pública.

O presente trabalho representa um direcionamento, para o aprimoramento dos processos de tratamento do lixiviado de aterro de RSU. A aplicação de ferramentas gerenciais e de qualidade do processo demonstrou ser eficaz ao evidenciar que atende aos limites de especificação não assegura controle estatístico do processo. Isso destaca a importância de um conhecimento profundo e detalhado dos processos para prevenir falhas e identificar as possíveis causas associadas, sendo, fundamental a implementação de ações, incluindo análises com maior frequência, elaboração de POP, a capacitação contínua dos operadores, e o desenvolvimento de planos de ação específicos para lidar com as não aleatoriedades detectadas. Essas medidas são essenciais para trazer os processos à normalidade, garantir que o tratamento de efluentes atenda aos padrões de qualidade estabelecidos, e elevar o nível geral de desempenho da estação de tratamento.

REFERÊNCIAS

Alves, G. B.; Bonini, L. M. M. de; Maiellaro, R. J. Análise da capacidade do processo de extrusão. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação-Reasae**, São Paulo, v. 8, n. 6, p. 2675-3375, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 7870-2:2013. **Controle estatístico de processos - Parte 2: Gráficos de controle de Shewhart**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 1516, de 2019**. Dispõe sobre o gerenciamento de resíduos sólidos e altera a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Aprovado em 2021. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2194711>>. Acesso em: 29/07/2024.

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. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

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

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357/2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 09 de junho de 2024.

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: 09/06/2024.

Carvalho, M. L.; Santos, E. F. A Importância dos Gráficos de Controle na Gestão da Qualidade. **Revista Brasileira de Gestão da Qualidade**, v. 19, n. 3, p. 200-215, 2022.

Chan, K.; Zhang, Y. **Quality Engineering and Statistical Process Control**. Springer, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-17886-5>>. Acesso em: 23/07/2024.

Costa, A. M.; Alfaia, R. G. S. M.; Campos, J. C. Landfill leachate treatment in Brazil—An overview. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 110-116, 2019.

Colombo, A. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário pela combinação dos processos foto-fenton e biológico**. 2019. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2019.

CPRH. Agência Estadual de Meio Ambiente. **CPRH N 2.002: Controle de carga orgânica não-industrial**. Recife, 2000. Disponível em: <<https://www2.cprh.pe.gov.br/publicacoes-e-transparencia/normas-tecnicas/>>. Acesso em 22/07/2024.

CPRH. Agência Estadual de Meio Ambiente (gov.). **Legislações e Instruções Normativas**. Disponível em: <<https://www2.cprh.pe.gov.br/publicacoes-e-transparencia/legislacoes-e-instrucoes-normativas/>>. Acesso em: 22/07/2024.

Del Rey, G. O. **Metanogênese e variações isotópicas do carbono em ambiente de disposição de resíduos sólidos: o Aterro** Controlado do Jockey Club de Brasília - DF. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geoquímica, Universidade de Brasília, 2020.

Ferreira, C. M.; Lima, R. S. Fases do Controle Estatístico de Processo e Suas Aplicações. **Revista de Controle e Automação**, v. 18, n. 1, p. 56-70, 2022.

Gomes, A. H. S.; De Siqueira, E. R.; Pereira, A. V.; De Oliveira, W. P.; De Souza, G. M. M.; De Melo, R. F. Controle estatístico aplicado a uniformidade de distribuição em unidades gotejadoras operando com água residuária. **Revista Irriga**, v. 25, n. 4, p. 719-727, 2020.

Gomes, A. P.; Pereira, F. T. Ferramentas da Qualidade no Ambiente Industrial. **Journal of Quality Management**. v. 28, n. 2, p. 89-102, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7870-2:2013 - Control Charts – Part 2: Shewhart control charts**. 2013.

Kok, K. C.; FENG, C. J.; KAMARUDDIN, S. **Short-run univariate quality control approaches**. International Journal of Productivity and Quality Management, v. 31, n. 4, p. 483-507, 2020.

Lange, L.C.; Amaral, M.C.S.; Moreira, V.R.; Lebron, T.A.R. **Avaliação de Estratégias para o Tratamento do lixiviado do aterro sanitário intermunicipal de Conceição do Mato Dentro, Alvorada de Minas e Dom Joaquim**. Relatório Técnico. Belo Horizonte: UFMG, 2020.

Lima, R. S. de; Pereira, C. M. S.; Gonçalves, E. R. C.; Costa, E. E.; Silva, F. E. da. **Desenvolvimento de uma carta de controle combinada beta-cusum binomial para monitoramento de produtos não conformes**. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/37351>>. Acesso em: 27/07/2024.

Maroneze, M. M.; Zepka, L. Q.; Vieira, J. G.; Queiroz, M. I.; Jacob-Lopes, E. A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Revista Ambiente e Água**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

Martins, D. F. Implementação de Gráficos de Controle em Processos de Fabricação. **Revista Brasileira de Estatística Aplicada**, v. 22, n. 3, p. 210-225, 2020.

Martins, L. F. **Estudo de Capacidade de Processos**. **Gestão & Produção**. v. 26, n. 1, p. 1-12, 2019.

Mishra, S.; Tiwary, D.; Ohri, A.; Agnihotri, A. **Impacto dos lixiviados do aterro de resíduos sólidos municipais na qualidade das águas subterrâneas em Varanasi, Índia**. Águas Subterrâneas para o Desenvolvimento Sustentável, 2019. p. 20.

Montgomery, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. John Wiley & Sons, 2020.

Montgomery, D. C.; Runger, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. John Wiley & Sons, 2018.

Nunes, G. S.; Mattos, VLD de; Konrath, A. C. Considerações sobre teste de normalidade utilizados pelo software GRETL. **Contemporânea**, v. 22, p. 174-178, 2021.

Oliveira, D. C. S.; De Azevedo, P. G. F.; Cavalcanti, L. A. P. Processos biológicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 18, p. 397-415, 2021.

Oliveira Júnior, A.; Silva, E.C.C. da; Hermosilla, J.L.G. Um estudo de aplicação do método FMEA: pesquisa-ação em um processo de fabricação de uma empresa de grande porte do setor metal mecânico. **Brazilian Journals of Business**, v. 2, nº 3, p. 1898- 1912, 2020.

Oliveira, T. C. de; Silva, A. C. G.; Santos, P. V. S. Aplicação do Controle Estatístico de Processo: estudo aplicado em fabricante de chapas de gesso Drywall. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 8, n. 1, p. 59-66, 2023.

Oliveira, M. A.; Santos, P. R.; Almeida, F. M.; Pereira, J. L. Capacidade de Processo e Controle de Qualidade. **Revista Brasileira de Qualidade**, v. 45, n. 2, p. 234-245, 2021.

Oliveira, T. H.; Ribeiro, S. C.; Mendes, P. A. **Monitoramento Contínuo de Processos Industriais com Gráficos de Controle**. Engenharia e Tecnologia, v. 30, n. 1, p. 45-60, 2023.

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

Pasalari, H.; Farzadkia, M.; Gholami, M.; Emamjomeh, M. M. **Management of landfill leachate in Iran: valorization, characteristics, and environmental approaches**. *Environmental Chemistry Letters*, v. 17, n. 1, p. 335–348, 2019.

Qiu, P.; Xie, X. **Transparent sequential learning for statistical process control of serially correlated data**. *Technometrics*, v. 64, n. 4, p. 487-501, 2022.

Ribeiro, V. R. A. **Análise comparativa do lixiviado bruto gerado em um aterro sanitário e o acumulado em uma lagoa de tratamento por evaporação natural**. 1. Ed. Campina Grande - PB - Editora Amplla, 2020. p. 20.

Saberi, S.; Kouhnezad, A.; Sarkis, J.; Shen, L. *Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management*. *International journal of production research*. Vol 57 n°7 (2019): 2117- 2135.

Scandelai, A. P. J.; Matos, A. C. B.; Borges, P. O.; Damaceno, J. L. O.; De Souza, M. T.; Gomes, B. S. Ozonização como tratamento de lixíviado de aterro sanitário: um estudo de revisão. **Revista Brasileira de Pesquisa Animal e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 3404-3417, 2021.

Silva, F. G. L. **Situação atual do tratamento de lixiviados de aterros sanitários do Estado do Rio de Janeiro com ênfase nos aterros de Seropédica e Sapucaia**. 2023. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Silva, F. V. da. **Alternativa para o tratamento do chorume do aterro sanitário localizado em Rosário do Catete/SE**. Anais da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) do IFS, v. 1, n. 1, p. 491-495, 2019.

Silva, J. R.; Oliveira, J. P.; Ferreira, G. A.; Almeida, M. C. Análise da Capacidade de Processo na Indústria. **Revista de Engenharia de Produção**, v. 29, n. 3, p. 112-126, 2020.

Silva, J. R.; Santos, M. A.; Costa, L. M. Controle Estatístico de Processo: Teorias e Aplicações Modernas. **Revista de Engenharia de Produção**, v. 35, n. 4, p. 123-135, 2021.

Silva, L. D. da; Pereira, M. A. C.; Moreira, P. H. S.; Costa, E. B.; Leite, J. S. Mapeamento de processos do setor de compras: caso CPRM–Serviço Geológico do Brasil-Escritório Rio de Janeiro. **REA-Revista Eletrônica de Administração**, v. 20, n. 2, p. 210-227, 2022.

Smith, R.; Martinez, J. **Advanced Quality Control Methods: Theory and Applications**. McGraw-Hill Education, 2023.

Sousa, L. A.; Almeida, V. R. Técnicas de plotagem e interpretação de gráficos de controle. **Revista de Qualidade e Produtividade**, v. 15, n. 2, p. 98-112, 2021.

TECMA, Tecnologia em Meio Ambiente. **Estação de Tratamento de Chorume (ETC) – Aterros Sanitários**. Paraná, PR, 2019. Disponível em: <<https://www.tecma-tecnologia.com.br/web/projetos/etc-aterros-sanitarios/>>. Acesso em: 09 de maio de 2024.

Voitto. **Formação de Yellow Belt em Lean Seis Sigma – Módulo 3**. 2020. E-book.

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.

Yagin, F. H.; Yagin, B.; Pinar, A. *Normality Distributions Commonly Used in Sport and Health Sciences*. **Journal of Exercise Science & Physical Activity Reviews**, v. 2, n. 1, p. 124-131, 2024.

Youcai, Z. **Leachate Generation and Characteristics. Pollution Control Technology for Leachate from Municipal**. Solid Waste, p. 1–30, 2019.

Yu, D.; Sun, Q.; Zhang, X.; Li, T.; Zhu, J.; Jiang, J.; Zhang, W.; LIU, M.; LI, Y.; LI, X. **A review on the landfill leachate treatment technologies and application prospects of three-dimensional electrode technology**. *Chemosphere*, v. 291, 2022.

ANEXO A – Fatores para cálculo de limites de controle.

N	E₃	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, 2020.

APÊNDICE A – Levantamento de dados da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2023 (continua).

JANEIRO	05/01/2023		12/01/2023		19/01/2023		26/01/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,35	6,35	8,3	5,59	8,37	5,24	8,04	5,52
Temperatura em ° C	25,5	21,6	27,1	28,8	26,1	22,3	25,5	21,5
DQO (mg·L ⁻¹)	3810	42,5	3850	5	3550	8,6	2950	8,1
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,15	0,10	0,10	0,00	0,30	0,1	0,30	0,10
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1650	3,69	1230	0,51	1100	0,37	1180	1,20
FEVEREIRO	02/02/2023		09/02/2023		16/02/2023		23/02/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,29	5,65	8,25	5,44	8,13	6,15	8,52	6,12
Temperatura em ° C	26,5	25,6	27,5	21,2	28,9	21,0	20,5	20,5
DQO (mg·L ⁻¹)	3680	12,4	2500	5	2710	125	2910	66,9
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,30	0,30	0,30	0,10	0,30	0,00	0,30	0,10
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1090	1,47	1380	4,92	514	3,38	1370	1,63
MARÇO	02/03/2023		09/03/2023		16/03/2023		23/03/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,10	5,70	8,26	5,43	8,74	5,68	8,4	5,24
Temperatura em ° C	26,5	20,9	24,5	19,1	23,9	25,6	22,4	21,4
DQO (mg·L ⁻¹)	1030	7,6	2930	5	3260	7,4	1717	7,2
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	1310	0,14	1230	0,93	1880	1,84	1240	0,11
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1410	0,33	988	0,30	1250	0,72	1130	0,62

APÊNDICE A – Levantamento de dados da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2023 (continuação).

ABRIL	06/04/2023		13/04/2023		20/04/2023		27/04/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,52	6,31	8,01	5,35	8,34	5,30	8,14	5,38
Temperatura em ° C	27,0	18,0	24,9	25,3	23,0	20,9	21,5	20,1
DQO (mg·L ⁻¹)	1960	24,9	1550	7,9	1690	5	1570	6,0
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,20	0,00	0,15	0,00	0,20	0,00	0,30	0,20
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	732	2,73	1280	0,15	416	3,58	1310	1,13
MAIO	04/05/2023		11/05/2023		18/05/2023		25/05/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,77	5,14	8,51	5,63	8,68	7,77	8,52	5,55
Temperatura em ° C	33,4	28,98	27,4	21,9	25,5	23,3	26,0	22,2
DQO (mg·L ⁻¹)	2210	5,0	1590	18,3	2340	5,5	1590	6,4
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,30	0,10	0,30	0,20	0,30	0,00	0,30	0,20
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1350	0,19	1610	1,41	1920	1,42	1850	0,20
JUNHO	01/06/2023		08/06/2023		15/06/2023		22/06/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	7,93	5,88	8,12	5,72	8,06	6,67	8,03	5,56
Temperatura em ° C	29,3	23,4	23,4	19,5	24,4	22,4	26,9	22,6
DQO (mg·L ⁻¹)	6720	36,9	1800	7,7	3290	6,5	2530	7,5
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,30	0,15	0,21	0,00	0,30	0,10	0,20	0,10
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1450	1,64	1370	3,63	1430	0,21	1030	0,45

APÊNDICE A – Levantamento de dados da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2023 (continuação).

JULHO	06/07/2023		13/07/2023		20/07/2023		27/07/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	7,93	5,72	8,03	5,90	8,13	5,94	8,17	5,8
Temperatura em ° C	23,8	21,1	22,7	21,3	24,0	21,9	22,7	22,0
DQO (mg·L ⁻¹)	1440	5,3	1210	22,8	2260	23,8	2580	22,6
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,30	0,10	0,30	0,20	0,10	0,00	0,30	0,15
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1240	3,26	777	1,37	1090	3,34	1530	0,20
AGOSTO	03/08/2023		10/08/2023		17/08/2023		24/08/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,23	5,53	8,27	5,44	8,25	5,75	8,16	5,38
Temperatura em ° C	24,8	22,0	22,8	22,1	25,8	22,2	27,0	23,8
DQO (mg·L ⁻¹)	2470	9,8	1740	16,7	3270	5	2040	5
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,20	0,00	0,30	0,10	0,30	0,10	0,20	0,00
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1810	0,12	1980	0,24	1840	1,89	1700	0,14
SETEMBRO	06/09/2023		14/09/2023		21/09/2023		28/09/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,4	5,49	8,18	5,2	8,15	5,32	8,18	5,31
Temperatura em ° C	25,1	23,8	25,9	22,5	27,0	24,6	28,1	24,1
DQO (mg·L ⁻¹)	2830	5	1760	5	3240	5,5	3040	6,0
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,10	0,00	0,20	0,00	0,10	0,00	0,30	0,10
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1500	0,63	1320	1,36	1300	0,97	1140	1,11

APÊNDICE A – Levantamento de dados da ETE de estudo no período de janeiro a dezembro de 2023 (continuação).

OUTUBRO	05/10/2023		11/10/2023		19/10/2023		26/10/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,43	5,4	8,1	5,10	8,34	5,16	8,36	5,39
Temperatura em ° C	27,6	24,2	27,5	25,5	28,3	22,8	27,7	21,9
DQO (mg·L ⁻¹)	2220	20,1	4110	12,5	3160	< 5	3240	10,1
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,10	0,00	0,30	0,10	0,30	0,10	0,20	0,00
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	724	1,42	908	0,37	1450	3,08	1860	0,10
NOVEMBRO	01/11/2023		09/11/2023		16/11/2023		23/11/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,46	5,47	8,14	5,38	8,00	5,93	8,23	5,43
Temperatura em ° C	25,8	23,7	21,9	20	23,6	22,9	25,5	24,5
DQO (mg·L ⁻¹)	3300	5	3830	9,6	3970	5,6	3760	6,8
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,10	0,00	0,50	0,10	0,60	0,20	0,30	0,10
Nitrogênio Amoniacal Total	1880	1,84	1300	1,56	517	3,01	1130	0,1
DEZEMBRO	07/12/2023		14/12/2023		21/12/2023		27/12/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
pH	8,38	5,17	8,4	5,60	8,41	5,56	8,42	5,58
Temperatura em ° C	27,9	28,1	26,7	22,4	24,6	23,1	22,5	21,2
DQO (mg·L ⁻¹)	3680	5	3700	5	3520	5,8	3680	5,7
Sólidos sedimentáveis (mL·L ⁻¹)	0,30	0,10	0,30	0,10	0,30	0,15	0,40	0,10
Nitrogênio Amoniacal Total (mg·L ⁻¹)	1650	0,11	1810	0,76	1800	0,72	1670	0,12

APÊNDICE B – Eficiência da ETE para remoção DQO (mg·L⁻¹) (continua).

JANEIRO	05/01/2023		12/01/2023		19/01/2023		26/01/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	3810	42,5	3850	5	3550	8,6	2950	8,1
Eficiência %	98,9		99,9		99,7		99,7	
FEVEREIRO	02/02/2023		09/02/2023		16/02/2023		23/02/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	3680	12,4	2500	5	2710	20,3	2910	19,7
Eficiência %	99,7		99,8		99,2		99,3	
MARÇO	02/03/2023		09/03/2023		16/03/2023		23/03/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	1030	7,6	2930	5	3260	7,4	1717	7,2
Eficiência %	99,3		99,8		99,8		99,6	
ABRIL	06/04/2023		13/04/2023		20/04/2023		27/04/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	1960	24,9	1550	7,9	1690	5	1570	6,0
Eficiência %	98,7		99,5		99,7		99,6	
MAIO	04/05/2023		11/05/2023		18/05/2023		25/05/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	2210	5,0	1590	18,3	2340	5,5	1590	6,4
Eficiência %	99,8		98,8		99,8		99,6	
JUNHO	01/06/2023		08/06/2023		15/06/2023		22/06/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	6720	36,9	1800	7,7	3290	6,5	2530	7,5
Eficiência %	99,4		99,6		99,8		99,7	
JULHO	06/07/2023		13/07/2023		20/07/2023		27/07/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	1440	5,3	1210	22,8	2260	23,8	2580	22,6
Eficiência %	99,6		98,2		98,9		99,1	

APÊNDICE B – Eficiência da ETE para remoção DQO (mg·L⁻¹) (continuação).

AGOSTO	03/08/2023		10/08/2023		17/08/2023		24/08/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	2470	9,8	1740	16,7	3270	5	2040	5
Eficiência %	99,6		99,1		99,8		99,7	
SETEMBRO	06/09/2023		14/09/2023		21/09/2023		28/09/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	2830	5	1760	5	3240	5,5	3040	6,0
Eficiência %	99,8		99,7		99,8		99,8	
OUTUBRO	05/10/2023		11/10/2023		19/10/2023		26/10/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	2220	20,1	4110	12,5	3160	5	3240	10,1
Eficiência %	99,1		99,7		99,8		99,7	
NOVEMBRO	01/11/2023		09/11/2023		16/11/2023		23/11/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	3300	5	3830	9,6	3970	5,6	3760	6,8
Eficiência %	99,8		99,7		99,8		99,8	
DEZEMBRO	07/12/2023		14/12/2023		21/12/2023		27/12/2023	
	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado	Lixiviado bruto	Lixiviado Tratado
DQO (mg·L ⁻¹)	3680	5	3700	5	3520	5,8	3680	5,7
Eficiência %	99,9		99,9		99,8		99,8	