



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

PEDRO HENRIQUE DANIEL DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA GARANTIA FUZZY DA QUALIDADE DO EFLUENTE DA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOM NIVALDO MONTE**

FORTALEZA

2021

PEDRO HENRIQUE DANIEL DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA GARANTIA FUZZY DA QUALIDADE DO EFLUENTE DA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOM NIVALDO MONTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva.

FORTALEZA

2021

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

C327a Carvalho, Pedro Henrique Daniel de.
Avaliação da garantia FUZZY da qualidade do efluente da estação de tratamento de esgotos Dom Nivaldo Monte / Pedro Henrique Daniel de Carvalho. – 2021.
35 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva.

1. Tratamento de esgoto. 2. Metodologia Fuzzy. 3. Qualidade de efluente. I. Título.

CDD 628

PEDRO HENRIQUE DANIEL DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA GARANTIA FUZZY DA QUALIDADE DO EFLUENTE DA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOM NIVALDO MONTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando José Araújo da Silva (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Marisete Dantas de Aquino (Examinadora Interna)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Engenheiro Ambiental Jefferson Hannover Faustino Magalhães
(Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Francisca Paiva, que nunca poupou esforços para que eu tivesse sucesso em minha vida por meio da educação.

À minha família, que sempre demonstrou carinho e orgulho pelo meu empenho durante o período de graduação.

Ao Prof. Fernando José Araújo da Silva, pela paciência e pela orientação na execução deste trabalho.

À CAERN, pela disponibilização dos dados que possibilitaram a execução deste trabalho.

Aos integrantes da banca examinadora.

Aos professores da graduação, pela dedicação no exercício da profissão.

Ao PET Engenharia Ambiental, por proporcionar experiências importantes para minha trajetória acadêmica e profissional.

À Ciclo Jr, que me fez entender qual meu papel como profissional e agente de mudanças.

Aos amigos de graduação, por deixarem a experiência da graduação mais leve.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de acesso ao ensino superior gratuito e de qualidade.

*A ciência nos convida a acolher os fatos, mesmo
quando eles não se ajustam às nossas concepções.*

(Carl Sagan)

RESUMO

O crescimento da população brasileira junto ao processo de urbanização desordenada vem acompanhado do aumento da geração de diferentes tipos de resíduos, como o esgoto. Com isso, é cada vez mais importante que existam técnicas confiáveis de tratamento e disposição desses resíduos, para prevenir a contaminação dos recursos hídricos e evitar o comprometimento da disponibilidade de água potável para a população. Para avaliar a confiabilidade e segurança da estação de tratamentos de esgotos (ETE) do Baldo, localizada em Natal, no Rio Grande do Norte, o presente trabalho busca analisar os parâmetros de lançamento de efluentes em um período específico e determinar a garantia dada pela ETE em relação aos padrões de lançamento exigidos pela legislação. Para tanto, foi aplicada a metodologia *Fuzzy* a fim de obter as garantias dos parâmetros. Os parâmetros estudados foram: demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), amônia total (AMT), potencial hidrogeniônico (pH) e coliformes termotolerantes (CTT). Os dados do estudo foram coletados no período entre 2014 e 2017, somando um total de 45 amostras. A partir dos resultados, é possível concluir que a maioria das amostras analisadas estavam fora do padrão exigido pela legislação ambiental vigente.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto; Metodologia Fuzzy; Qualidade de efluente.

ABSTRACT

The growth of the Brazilian population along with the disorderly urbanization process has been accompanied by an increase in the generation of different types of waste, such as sewage. As a result, it is increasingly important to have reliable techniques for the treatment and disposal of this waste, to prevent contamination of water resources and avoid compromising the availability of drinking water for the population. In order to assess the reliability and safety of the Baldo sewage treatment plant (STP), located in Natal, Rio Grande do Norte, the present work seeks to analyze the effluent discharge parameters in a specific period and determine the guarantee given by the STP in relation to the launch standards required by law. For that, the Fuzzy methodology was applied in order to obtain the guarantees of the parameters. The parameters studied were: biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total ammonia (TAN), hydrogen potential (pH) and thermotolerant coliforms (TTC). The study data were collected in the period between 2014 and 2017, adding up to a total of 45 samples. From the results, it is possible to conclude that most of the samples analyzed were outside the standard required by current environmental legislation.

Keywords: Wastewater treatment; Fuzzy methodology; Effluent quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tratamento preliminar.....	16
Figura 2 – Representação gráfica do Número <i>Fuzzy</i> Triangular.	22
Figura 3 - Localização da ETE do Baldo	24
Figura 4 - Vista aérea da ETE do Baldo	25
Figura 5 – Esquema representativo de uma das linhas de tratamento da ETE do Baldo.	25
Figura 6 - I_{CF} entre um número difuso Q e outro não difuso P.....	27
Figura 7 - I_{CF} entre um número difuso e o V como número não difuso.	28
Figura 8 - Representação das áreas de interseção entre Números <i>Fuzzy</i> Triangulares e os valores limites mínimo e máximo.	28
Figura 9 - I_{CF} da DBO ao longo do período analisado.....	31
Figura 10 - I_{CF} da DQO ao longo do período analisado.	31
Figura 11 - I_{CF} da AMT ao longo do período analisado.....	32
Figura 12 - I_{CF} do pH ao longo do período analisado.	33
Figura 13 - I_{CF} do logCTT ao longo do período analisado.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores recomendados pela CONAMA nº 430/11 por parâmetro.	30
Tabela 2 - I _{CF} dos parâmetros analisados.	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMT	Amônia Total
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTT	Coliformes Termotolerantes
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO _u	Demanda Última de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
I _{CF}	Índice de Concordância Fuzzy
NBR	Norma Brasileira
NFT	Número Fuzzy Triangular
pH	Potencial Hidrogeniônico
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UV	Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Motivações de estudo	14
1.3	Objetivo	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Importância do tratamento de esgotos.....	15
2.2	Níveis de tratamento.....	16
2.2.1	Tratamento Preliminar	16
2.2.2	Tratamento Primário.....	16
2.2.3	Tratamento Secundário.....	17
2.2.4	Tratamento Terciário.....	17
2.3	Padrões de qualidade de efluente.....	17
2.3.1	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	18
2.3.2	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	19
2.3.3	Amônia Total (AMT).....	19
2.3.4	pH.....	20
2.3.5	Coliformes Termotolerantes (CTT).....	20
2.4	Monitoramento da qualidade dos efluentes	20
2.5	Lógica <i>Fuzzy</i>	21
2.5.1	Número Fuzzy Triangular.....	22
2.6	Confiabilidade, risco e garantia	23
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Abordagem do estudo	24
3.2	Enfoque do estudo	26
3.2.1	Índice de Concordância Fuzzy (I_{CF})	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Garantias.....	30
5	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O crescimento da população brasileira e o processo de urbanização desordenada, tem provocado o surgimento de diversos impactos ambientais adversos, como o consequente aumento da geração de resíduos de todos os tipos, dentre eles o esgoto. Segundo definição da norma brasileira NBR 9648 (ABNT, 1986), esgoto sanitário é o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Logo, o esgoto possui altas concentrações de matéria orgânica e microrganismos patogênicos provenientes das diversas formas de utilização da água pela população para exercer suas atividades diárias. Por ter alto potencial poluidor, quase nunca é possível dispor o esgoto diretamente em corpos hídricos, mesmo que este tenha alta capacidade de autodepuração, que é a capacidade do meio aquático de neutralizar cargas poluidoras. Por isso, principalmente em centros urbanos, onde são produzidos elevados volumes de esgotos, faz-se necessário tratá-los por meio de uma estação de tratamento de esgotos para reduzir a degradação ao corpo receptor.

Se tratando de uma ação que infere alto risco ao meio ambiente e à saúde humana, o lançamento de efluentes tratados em uma estação de tratamento de esgoto exigiu a criação de uma série de leis e políticas ambientais que, criando padrões de qualidade, regulamentando locais de lançamento e exigindo elevados níveis de tratamento, procuram reduzir os impactos causados pela disposição desses efluentes.

Há diversos tipos de tratamento que podem ser utilizados para reduzir o potencial poluidor dos efluentes como as lagoas de estabilização, os lodos ativados, sistemas anaeróbios, sistemas aeróbios com biofilmes e disposição no solo. A escolha do sistema deve levar em consideração questões como o clima local, o espaço disponível e os parâmetros característicos do esgoto bruto a ser tratado, como a DBO, a DQO, o pH, a AMT e o CTT. Quanto mais concentrados os valores, mais eficiente deve ser o sistema escolhido para que os parâmetros avaliados estejam sempre dentro do limite permitido pela legislação vigente. No Brasil, a CONAMA 357/05 determina em âmbito federal quais são esses limites, mas estados e municípios podem criar leis mais restritivas.

É de extrema importância que se faça o controle da qualidade do tratamento visto que podem ocorrer falhas operacionais ocasionando a redução do desempenho e, conseqüentemente, acarretando a poluição de corpos hídricos e prejuízos à saúde humana. Como forma de

monitorar o nível de eficiência dos tratamentos utilizados em estações de tratamento de esgoto, faz-se necessário a utilização de uma abordagem estatística de alguns parâmetros do efluente tratado com o intuito de avaliar a eficácia da tecnologia usada. Neste trabalho, o método utilizado para avaliar a garantia oferecida pela estação de tratamento foi a Lógica *Fuzzy*.

1.2 Motivações de estudo

Considerando a necessidade da existência de estações de tratamento de esgotos eficazes em atender todos os padrões de lançamento estabelecidos pela CONAMA 357/05, de modo a garantir a segurança dos corpos receptores e da saúde humana, se faz necessária a aplicação de ferramentas capazes de avaliar o desempenho e a garantia dos sistemas de tratamento.

Impactos diretos ao meio ambiente causados pela poluição de corpos hídricos, que reduz a qualidade das águas pondo em risco a vida aquática e a saúde humana, são consequência de um sistema de tratamento incapaz de atender os padrões de lançamento exigidos por lei.

Estudos estatísticos demonstram resultados obtidos em um certo período a fim de se avaliar o comportamento de um sistema, auxiliando tomadas de decisões ou mesmo evidenciando aspectos negligenciados pelos gestores de uma área. No tratamento de esgoto, esses estudos contribuem para a análise de performance das tecnologias aplicadas e viabiliza investimentos futuros para melhorias de desempenho do tratamento.

O método do Número *Fuzzy* Triangular (NFT) é uma das ferramentas que podem auxiliar na avaliação da garantia dada pela estação de tratamento de esgotos do Baldo. Este estudo utilizará este método para obter o grau de garantia da eficiência de tratamento da ETE.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a garantia concedida pelos dados das análises de efluente a respeito dos parâmetros de DBO, DQO, pH, AMT e CCT, utilizando um método estatístico para tirar conclusões sobre a garantia e o risco de falha da ETE do Baldo, localizada em Natal no estado do Rio Grande do Norte.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância do tratamento de esgotos

Popularmente conhecidas como esgoto, as águas residuárias são denominadas assim por serem constituídas em sua maioria por resíduos provenientes de diversas atividades humanas como o banho, lavagem de roupas ou descargas do vaso sanitário. Nas cidades, o esgoto geralmente é formado por uma parcela maior de esgotos domésticos e por uma parcela menor de esgotos de outras fontes diversas.

O esgoto doméstico é composto por aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos, dentre eles partículas orgânicas, inorgânicas, suspensas, dissolvidas e microrganismos. Mesmo representando um pequeno percentual, tais sólidos são responsáveis por alterar de forma significativa as características naturais da água.

As concentrações típicas do esgoto doméstico são de aproximadamente 350 mg/L de DBO, 700 mg/L para DQO, 50 mg/L de nitrogênio total, 14 mg/L de fósforo total e 1100 mg/L de sólidos totais (VON SPERLING, 1996).

Quando há o lançamento de esgotos em corpos hídricos sem o nenhum tratamento adequado, a decomposição da matéria orgânica reduz o oxigênio dissolvido no meio, prejudicando de forma significativa a vida aquática e produzindo gases com forte odor. Podem haver também microrganismos causadores de doenças infecciosas, o que caracteriza um risco à saúde humana.

A criação de diversas legislações ambientais, critérios, políticas e revisões procuram influir, tanto na seleção dos locais de descarga quanto no nível de tratamento exigido, para garantir que os impactos ambientais provocados pela disposição destes efluentes tratados sejam aceitáveis (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em 2018 apenas 53% dos brasileiros tinham acesso à coleta de esgoto e somente 46% dos esgotos do país são tratados. Existe também uma enorme disparidade entre as regiões do país, uma vez que o acesso nas regiões Norte e Nordeste eram de apenas 10,49% e 28,01% respectivamente.

Muitas das doenças e das mortes nos países em desenvolvimento estão ligadas a doenças de veiculação hídrica como a diarreia, a febre tifoide e a desintéria. A forte correlação entre a execução de investimentos em saneamento básico e as reduções na quantidade de casos de doenças de veiculação hídrica, evidencia que o melhor a se fazer é investir na prevenção.

2.2 Níveis de tratamento

Atualmente são conhecidos diversos métodos de tratamento de esgotos. Para selecionar o método mais adequado é necessário o estudo do corpo hídrico receptor, bem como da sua capacidade de autodepuração e das características do efluente.

No tratamento de esgotos existem alguns níveis de tratamento básicos. São eles o tratamento preliminar, o primário, o secundário e o terciário.

2.2.1 Tratamento Preliminar

De acordo com Piveli (2006), o tratamento preliminar de esgotos visa, basicamente, a remoção física de sólidos grosseiros, trata-se de uma etapa inicial de preparo do esgoto para os próximos tratamentos, evitando que haja obstruções e danificações nos equipamentos eletromecânicos. Constituído principalmente de gradeamento e desarenação, o primeiro objetiva a remoção de sólidos grosseiros como materiais plásticos, papelões, madeira entre outros, enquanto a etapa da desarenação, também chamada de caixa de areia, é utilizada para a remoção de partículas sedimentáveis.

Figura 1 - Tratamento preliminar.



Fonte: Santos (2012).

2.2.2 Tratamento Primário

O tratamento primário tem como objetivo reduzir parte da matéria orgânica juntamente com os sólidos em suspensão sedimentáveis visto que, mesmo após passar pelo tratamento preliminar, os esgotos ainda possuem sólidos em suspensão que não são grosseiros o bastante para serem removidos no tratamento preliminar. A remoção desses sólidos através da

sedimentação implica também na redução de DBO para os processos posteriores, que são mais complexos e mais dispendiosos. Tanques de decantação e as fossas sépticas são exemplos de tratamento primário.

2.2.3 Tratamento Secundário

Nessa etapa a matéria orgânica do esgoto é removida por meio de processos biológicos, com microrganismos aeróbios e anaeróbios. Como o principal objetivo dessa etapa de tratamento é a eliminação da matéria orgânica, os processos são criados objetivando acelerar a degradação que ocorre de forma natural nos corpos hídricos. Lagoas de Estabilização Convencional, Tratamento por Lodos Ativados (convencional, por aeração prolongada ou de fluxo intermitente), Biofiltros e Tratamentos anaeróbios (UASB) são exemplos dessa etapa.

2.2.4 Tratamento Terciário

Essa etapa tem como objetivo, complementar a etapa de tratamento anterior, no qual sucedeu a remoção de sólidos e matéria orgânica. Aqui busca-se a remoção de nutrientes não removidos de forma eficiente na etapa anterior como fósforo e nitrogênio, a remoção de organismos patogênicos, a remoção de compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos, sólidos em suspensão remanescentes, além da desinfecção do efluente tratado (VON SPERLING, 1996).

Nesse nível de tratamento, o processo de desinfecção pode ocorrer de forma natural, com o uso de lagoas de maturação ou de forma artificial, por meio da cloração, radiação ultravioleta, adsorção por carvão ativado, osmose reversa ou ozonização, por exemplo.

De forma geral, os tratamentos terciários são empregados quando se deseja usos mais nobres para esses efluentes, como reuso agrícola, ou quando o efluente é de baixa qualidade ou gera riscos à saúde humana.

2.3 Padrões de qualidade de efluente

No Brasil, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/05 regula os padrões de lançamento de efluentes. Em linhas gerais, a CONAMA 357/05 determina que a disposição final de efluentes em corpos hídricos deve obedecer às condições de

lançamento nela estabelecidas com valores dentro dos padrões para cada de tipo de poluente. No ano de 2011 foi lançada a resolução complementar CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão de lançamento de efluentes.

Em relação ao lançamento direto de efluentes provenientes de sistemas de tratamento de esgoto em corpos d'água, a resolução nº 430/11, Art. 21, estabelece os limites padrões abaixo:

- a) pH entre 5 e 9;
- b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- d) Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO 5 dias, 20°C: máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;
- e) substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L;
- f) ausência de materiais flutuantes.

A resolução federal permite que órgãos ambientais regionais exijam condições mais restritivas, tendo em vista características específicas como disponibilidade de água e condições climáticas locais. Estes órgãos em questão, podem elaborar sua legislação própria a respeito do lançamento de efluentes usando a regulação federal como base para que não seja possível implementar critérios menos restritivos.

Foi realizado um estudo que analisou os padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reuso de águas residuárias em diversos estados do Brasil. Segundo Moraes (2019) nesse estudo não foram obtidas informações sobre a existência ou não de legislação específica a respeito de lançamento de efluentes no estado do Rio Grande do Norte. Logo, para o presente estudo, foi adotada como referência a legislação nacional.

2.3.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A DBO corresponde a quantidade de oxigênio necessária para que ocorra a oxidação da matéria orgânica biodegradável por meio de processos bioquímicos, e torná-la estável.

Para esgotos domésticos, considera-se, em termos práticos que aos 20 dias de teste a

estabilização esteja completa e é referente à Demanda Última de Oxigênio (DBO_u). Por causa da elevada quantidade de tempo até a estabilização, convencionou-se que o procedimento fosse realizado no 5º dia, pois o consumo pode ser correlacionado com o consumo total final (DBO_u), desde que as condições que permitem essa correlação sejam atendidas. A temperatura, que deve ser de 20°C para que o teste seja efetuado, é uma dessas condições por conta de sua interferência no metabolismo bacteriano (VON SPERLING, 1996).

Os maiores aumentos em termos de DBO, num corpo d'água, são provocados por despejos de matéria orgânica. A presença de uma grande quantidade de matéria orgânica na água eleva a demanda do oxigênio pelo decompositor, que por sua vez realiza a decomposição da matéria orgânica. O resultado é a concentração de oxigênio diminuindo, causando a morte dos organismos aeróbios.

2.3.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A demanda química de oxigênio (DQO), é um parâmetro que indica a quantidade de oxigênio que é consumida durante a oxidação química da parte orgânica de uma amostra.

De acordo com Von Sperling (1996), das vantagens do teste da DQO podem ser citadas: demora um curto período de tempo, entre 2 a 3 horas, para ser realizado e o resultado traz uma indicação do oxigênio requerido para a estabilização da matéria orgânica; o teste não é afetado pela nitrificação, dando uma indicação da oxidação apenas da matéria orgânica carbonácea (e não da nitrogenada). Dentre as limitações estão: no teste da DQO são oxidadas, tanto a fração biodegradável, quanto a fração inerte do despejo, logo há uma superestimação do oxigênio a ser consumido no tratamento biológico; o teste não fornece informações sobre a taxa de consumo da matéria orgânica ao longo do tempo; alguns constituintes inorgânicos podem ser oxidados e interferir no resultado.

2.3.3 Amônia Total (AMT)

Dentro do ciclo do nitrogênio, há uma variedade de formas e estados que o mesmo se encontra. Nos esgotos domésticos, o nitrogênio orgânico e a amônia são as formas mais comuns e mais relevantes. O nitrogênio é um elemento fundamental para o crescimento das algas e dos organismos cuja função é tratar os esgotos (VON SPERLING, 1996).

Como qualquer nutriente, o nitrogênio pode causar problemas de superprodução de

algas nos corpos receptores de estações de tratamento. Essa superprodução é o resultado de sistemas de tratamento de esgotos mal projetadas e executadas, onde estes não são capazes de retirar a quantidade necessária de nutrientes (SILVA, 2004).

2.3.4 pH

O potencial hidrogeniônico, ou simplesmente pH, representa a concentração de íons hidrogênio H⁺ (em escala anti-logarítmica), é utilizado para dar uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água (VON SPERLING, 1996).

O pH pode ser determinado através de um medidor de pH (pHmetro), pela adição de um indicador de pH na solução ou com um papel de tornassol, que é o método mais comum nos laboratórios. O pH é medido em uma escala de 0 a 14 e a interpretação dos resultados baseia-se na comparação com o valor 7 da escala. Caso seja menor que 7 tem-se pH ácido, se for igual tem-se pH neutro e se for maior o pH é básico.

No tratamento de esgotos o pH é comumente utilizado para controle das estações de tratamento quando há digestão anaeróbia e para caracterização das águas residuárias brutas.

2.3.5 Coliformes Termotolerantes (CTT)

Por haver uma elevada diversidade de agentes patogênicos que podem estar presentes no esgoto, existe uma dificuldade em isolar e identificar tais agentes. Uma alternativa a esse problema é o estudo dos organismos indicadores de contaminação fecal. Estes organismos não são patogênicos, porém indicam de forma satisfatória a contaminação da água por fezes humanas ou de animais, que geralmente contém microrganismos patogênicos. As bactérias do grupo coliforme são as mais usadas para essa finalidade.

Os coliformes termotolerantes, ou fecais, como a *E. coli*, são muito utilizados na análise da qualidade da água e são também parâmetros estabelecidos na legislação brasileira, utilizados na classificação do lodo de esgoto conforme a presença de agentes patogênicos (LOPES, 2015).

2.4 Monitoramento da qualidade dos efluentes

Para que possamos avaliar o desempenho e a confiabilidade de uma ETE é necessário que haja o monitoramento da mesma. A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade

de se conseguir um resultado adequado dentro do período avaliado. Sendo assim, a falha do processo de tratamento ocorrerá sempre que o padrão de lançamento for excedido. Devido às incertezas no projeto e na operação de estações de tratamento, existem alguns riscos de falha que são inevitáveis e as ETEs precisam ser projetadas com base em uma medida aceitável de risco. (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2007).

O Brasil possui uma legislação de proteção de águas que é considerado avançada. A CONAMA 357/05 estabelece critérios para classificação de corpos hídricos, bem como seus limites de qualidade aceitáveis, objetivando sua adequação de acordo com o seu uso. São exemplos de uso o consumo humano, o suporte à vida aquática e a irrigação de safras.

2.5 Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy*, ou difusa, é bastante utilizada em estudos em que não se têm dados definidos como totalmente certos ou totalmente errados, portanto, é comum na área de controle de processos.

Diferente dos sistemas lógicos clássicos, a teoria dos conjuntos *fuzzy* objetiva modelar os modos imprecisos de raciocínio que desempenham um papel importante na capacidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza. Essa capacidade depende da nossa habilidade de inferir uma resposta aproximada para uma pergunta baseada em uma reserva de conhecimento que é inexato, incompleto ou não totalmente confiável.

No mapeamento convencional das características de um conjunto clássico pode-se obter apenas dois valores: um (quando um elemento pertence ao conjunto) e zero (quando um elemento não pertence ao conjunto). Já na teoria dos conjuntos *fuzzy*, um elemento pode pertencer a um conjunto com seu grau de pertinência variando de zero a um. Conjuntos difusos são geralmente identificados com essas funções de associação. Para uma variável ambiental X , por exemplo, podemos considerar o conjunto difuso A de valores aceitáveis. Se x é um valor possível de X , então $A(x)$ denota seu grau de associação no conjunto difuso A (ADRIAENSSENS et al., 2004).

Uma propriedade importante dos conjuntos *fuzzy* é a habilidade de expressar transições graduais de pertinência para não pertinência. Isto permite a captura do sentido de expressões em linguagem natural que são, na maioria das vezes, vagas (RENTERÍA, 2006).

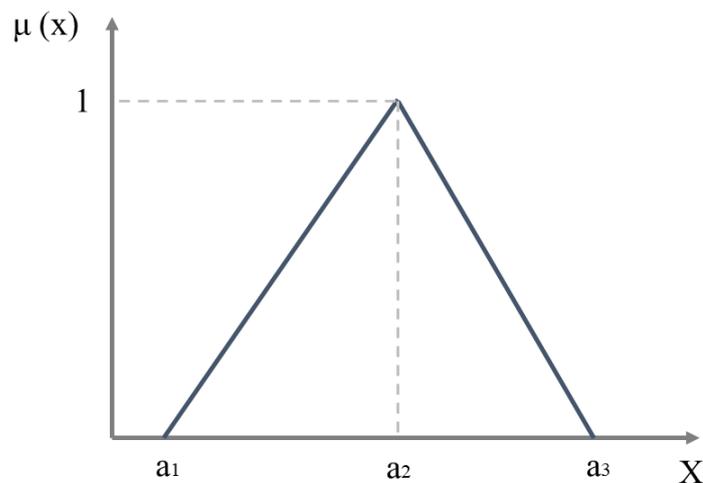
2.5.1 Número *Fuzzy* Triangular

É preciso que se mantenha interseção suficiente entre conjuntos adjacentes na construção e representação dos conjuntos *fuzzy* para que a transição entre eles aconteça de forma suave. Os conjuntos *fuzzy* podem ter uma variedade de formas, entretanto as formas triangular ou trapezóide frequentemente fornecem uma representação adequada do conhecimento especialista e, ao mesmo tempo, simplificam significativamente o processo de computação. O número *fuzzy* triangular é a aplicação mais comum, sendo representado por três pontos (MARRO et al, 2010). Esta representação é interpretada como funções de pertinência:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

A Figura 3 ilustra um número *fuzzy* triangular. Os valores da variável, a_1 , a_2 e a_3 , estão no eixo x, enquanto o grau de pertinência está no eixo y. É possível observar que, nesse caso, a variável a_2 é a que detém maior possibilidade de ocorrência.

Figura 2 – Representação gráfica do Número *Fuzzy* Triangular.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

2.6 Confiabilidade, risco e garantia

A confiabilidade de um sistema é definida como a habilidade do sistema executar sua função dentro de limites e condições operacionais, durante um determinado período. A confiabilidade de uma ETE, ou de um determinado processo do tratamento, pode ser definida como a probabilidade de desempenho satisfatório durante um período de tempo especificado, em condições especificadas, ou em termos de desempenho da estação, como a porcentagem de tempo em que as concentrações do efluente atinjam os requisitos de lançamento de efluentes. Assim, uma ETE será completamente confiável se não houver falha no desempenho, ou seja, se não houver violação dos limites preconizados pelas legislações ambientais. Para determinar a confiabilidade de uma ETE é necessário conhecer o comportamento do processo, pois devido às variações na qualidade do efluente tratado, a estação de tratamento deve ser projetada para produzir uma concentração média efluente abaixo dos padrões de lançamento (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2007). Apesar da idealização de não falha, o razoável é estabelecer valores limites correspondentes a uma probabilidade de atendimento da ordem de 95% ou 99%, quando for mais exigente.

Junto ao conceito de confiabilidade vem a ideia de falha, que, operacionalmente, deve ser vista com uma probabilidade ou possibilidade. O risco diz respeito às chances de um evento ocorrer ou ser excedido, implicando consequências. Em uma ETE, a falha se concretiza quando um efluente tem concentrações fora dos parâmetros exigidos pela norma. Ao longo de um intervalo definido, o risco de falha diz respeito à probabilidade de a ETE não atender a um preceito exigido. A garantia, por sua vez, é definida como o evento complementar à probabilidade (ou possibilidade) de falha.

3 METODOLOGIA

3.1 Abordagem do estudo

Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica para a análise da estação de tratamento em questão, tendo em vista os parâmetros e metodologias de análise definidos previamente. A análise utilizou dados extraídos da ETE do Baldo, localizada na cidade de Natal, no estado do Rio Grande do Norte.

Figura 3 - Localização da ETE do Baldo



Fonte: Google Earth Pro (2021).

A estação de tratamento de efluentes Dom Nivaldo Monte, mais conhecida como ETE do Baldo, localiza-se no município de Natal/RN e encontra-se em operação desde junho de 2011, sendo operada pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Ela foi projetada para tratar o esgoto proveniente dos bairros do Alecrim, Areia Preta, Barro Vermelho, parte do Bairro Nordeste, Candelária, Cidade Alta, Cidade da Esperança, parte de Dix-Sept Rosado, Lagoa Nova, Lagoa Seca, Mãe Luiza, Quintas, Ribeira, Rocas, Santos Reis e Tirol.

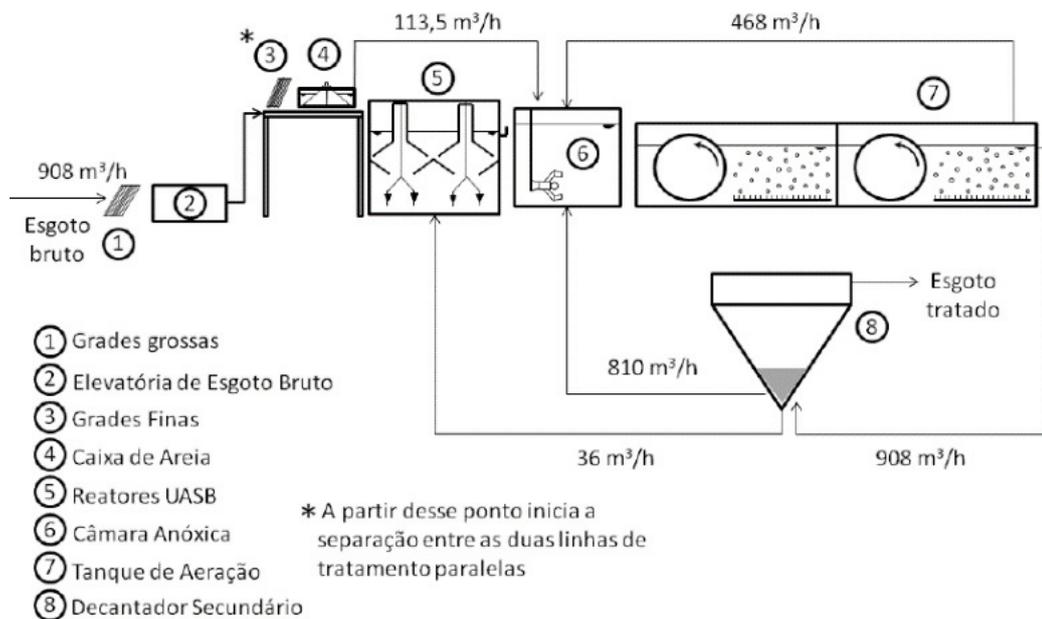
Figura 4 - Vista aérea da ETE do Baldo



Fonte: FUNCERN (2013).

A ETE do Baldo possui capacidade de tratamento para 450 L/s de efluentes. O sistema é composto por duas linhas de tratamento que trabalham em paralelo. A ETE contém tratamento preliminar a partir de gradeamento mecanizado, grosso e fino, e caixas de areia. Após o tratamento preliminar, o esgoto é encaminhado a reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) de onde seguem para a câmaras anóxicas, tanque de aeração e decantador secundário.

Figura 5 – Esquema representativo de uma das linhas de tratamento da ETE do Baldo.



Fonte: Fedrraz et al. (2014).

Como as unidades anteriores da ETE não removem de forma efetiva os microrganismos patogênicos, no passo final há uma estrutura de desinfecção por Ultravioleta. O efluente precisa estar clarificado para garantir a penetração dos raios UV. Após o fim do tratamento, o efluente é disposto no estuário do Rio Potengi.

Os dados foram coletados mensalmente de janeiro de 2014 até novembro de 2017, totalizando 45 amostragens. O sistema teve sua qualidade definida de acordo com a garantia verificada de adequação às normas vigentes.

3.2 Enfoque do estudo

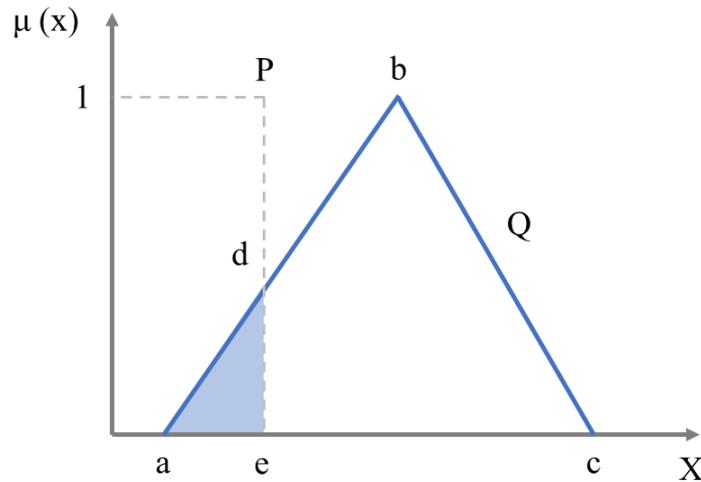
As garantias do sistema de tratamento da ETE do Baldo foram analisadas de acordo com o método do Índice de Concordância *Fuzzy* (I_{CF}) através do Número *Fuzzy* Triangular.

3.2.1 Índice de Concordância *Fuzzy* (I_{CF})

É possível fazer correlações entre números difusos (*fuzzy*) ou entre um número difuso e um não difuso (KAUFMANN; GUPTA, 1991 *apud* DA SILVA, 2010) com o objetivo de se tirar algumas conclusões através de um conjunto de dados que seriam de difícil interpretação através da lógica convencional.

O I_{CF} atende bem a necessidade de verificação dos riscos de falha ou da garantia, pois ele possibilita identificar o quão próximo do ideal se encontram os parâmetros do sistema analisado, não apenas se os mesmos se encontram ou não dentro do padrão. Foi utilizado neste trabalho o número *fuzzy* triangular (NFT) que é formado pelos valores mínimos (a_1), médios (a_2) e máximos (a_3) de cada parâmetro analisado. Tais valores delimitam uma área triangular de altura $\mu = [0,1]$ que é dividida pelo valor limite definido pela norma. No caso o valor limite exerce o papel do número não difuso.

Figura 6 - I_{CF} entre um número difuso Q e outro não difuso P.



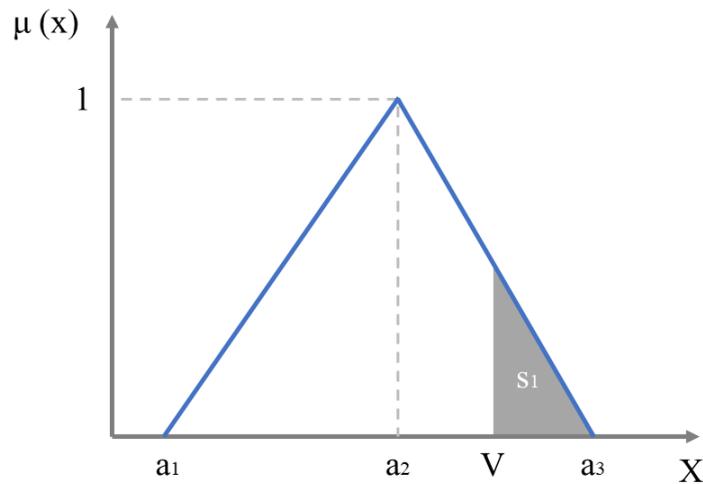
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A definição do Índice de Concordância *Fuzzy* (I_{CF}) é dada pela expressão da Equação 2, com base na Figura 7:

$$I_{CF} = \frac{\text{Área do } \Delta ade}{\text{Área do } \Delta abc} \quad (\text{Eq. 2})$$

Para os parâmetros de DBO, DQO, AMT e CTT que possuem apenas limites máximos na norma, os Números *Fuzzy* Triangulares foram formados pelos valores mínimos (a_1), médios (a_2) e máximos (a_3), e delimitaram uma área triangular de altura $\mu=[0,1]$ no eixo das ordenadas, dividida pelo valor limite definido pela CONAMA nº 430/11, Art. 21. O Índice de Concordância *Fuzzy* (I_{CF}), foi calculado pela razão entre a área que excede o limite permitido (S_1) e a área total do triângulo (S_T) segundo a Equação 3:

Figura 7 - I_{CF} entre um número difuso e o V como número não difuso.

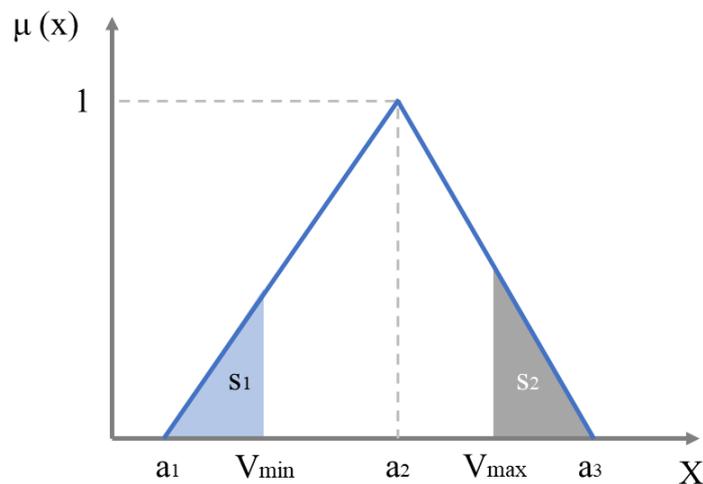


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

$$I_{CF} = 1 - \left(\frac{S_1}{S_T} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Já o parâmetro de pH possui limites mínimos e máximos de acordo com a norma. Logo, caso houvesse algum dado fora dos limites, os Números *Fuzzy* Triangulares seriam compostos pelo valor mínimo permitido (V_{\min}) e o valor máximo permitido (V_{\max}), conforme a Figura 9 logo abaixo:

Figura 8 - Representação das áreas de interseção entre Números *Fuzzy* Triangulares e os valores limites mínimo e máximo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para esse caso, calcula-se o I_{CF} a partir da divisão da soma das áreas que excederam o limite (S_1 e S_2) pela área total do triângulo (S_T) conforme a Equação 4:

$$I_{CF} = 1 - \left(\frac{S_1 + S_2}{S_T} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Garantias

Para verificar a garantia da qualidade dos efluentes da ETE do Baldo, foram utilizados nesse trabalho os limites estipulados pela CONAMA nº 430/11, Art. 21. Os valores limites definidos pela norma para a DBO, a DQO, a AMT, o pH e os CTT estão descritos na Tabela 1 a seguir, bem como suas respectivas unidades de medida.

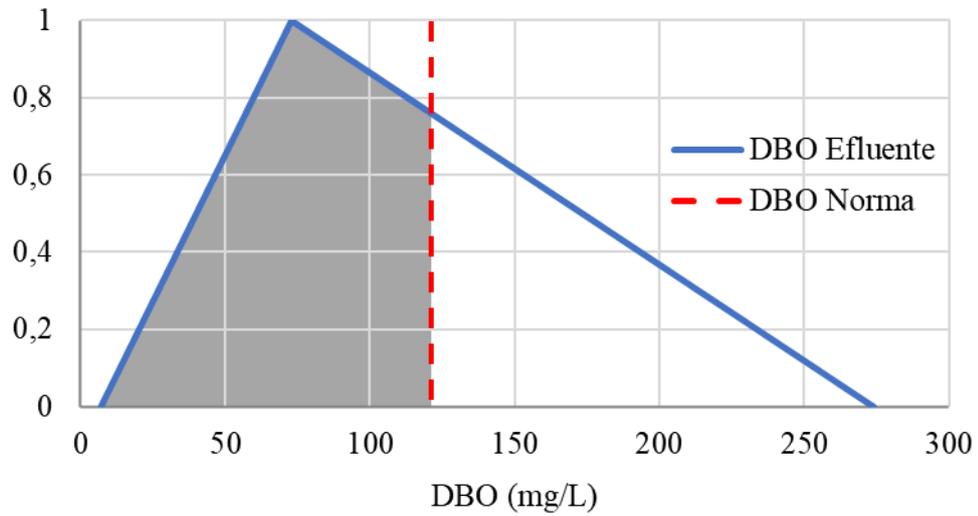
Tabela 1 - Valores recomendados pela CONAMA nº 430/11 por parâmetro.

Parâmetro	Valor Máximo	Valor Mínimo
DBO (mg/L)	120	-
DQO (mg/L)	250	-
AMT (mg/L)	20	-
pH	9	6
CTT células/100 mL	5.000	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As amostras de efluente analisadas foram coletadas no período de janeiro de 2014 a novembro de 2017. Após a aplicação dos cálculos para obter o Índice de Concordância *Fuzzy* foram obtidos os seguintes resultados de garantia (Tabela 2):

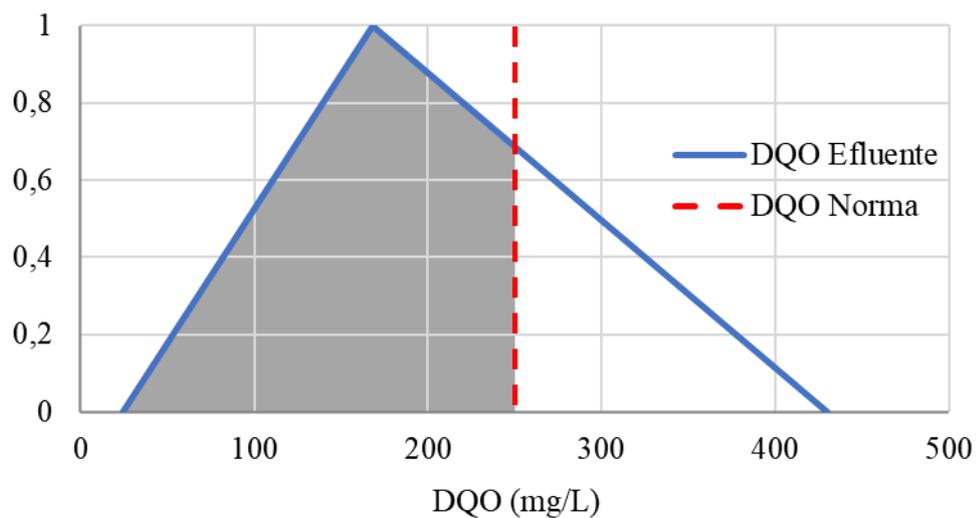
Figura 9 - I_{CF} da DBO ao longo do período analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para o parâmetro DBO temos um I_{CF} de 55,8% (0,558) no período analisado. É possível visualizar graficamente o NFT da DBO na Figura 10. Pode-se perceber pelas marcações que quase metade da área total do triângulo excede o limite permitido pela norma, representado pela linha tracejada vermelha. A média para a DBO foi de aproximadamente 73 mg/L.

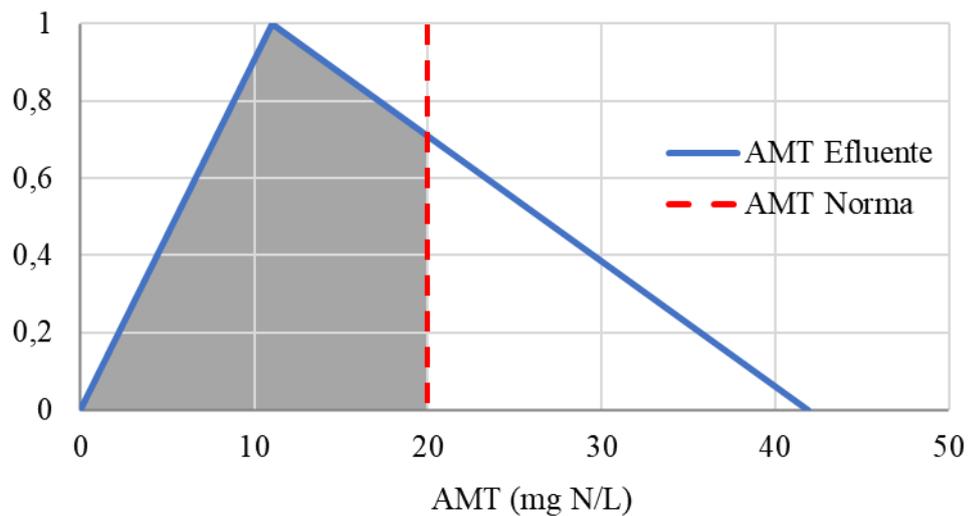
Figura 10 - I_{CF} da DQO ao longo do período analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O parâmetro DQO apresentou um I_{CF} de 69,5% (0,695) no período analisado e teve o segundo melhor desempenho dentre os parâmetros analisados. A partir da Figura 11, observa-se que a maior parte da área total do triângulo se encontra dentro do limite permitido pela norma (área tingida em cinza). A média calculada para a DQO foi de aproximadamente 168 mg/L.

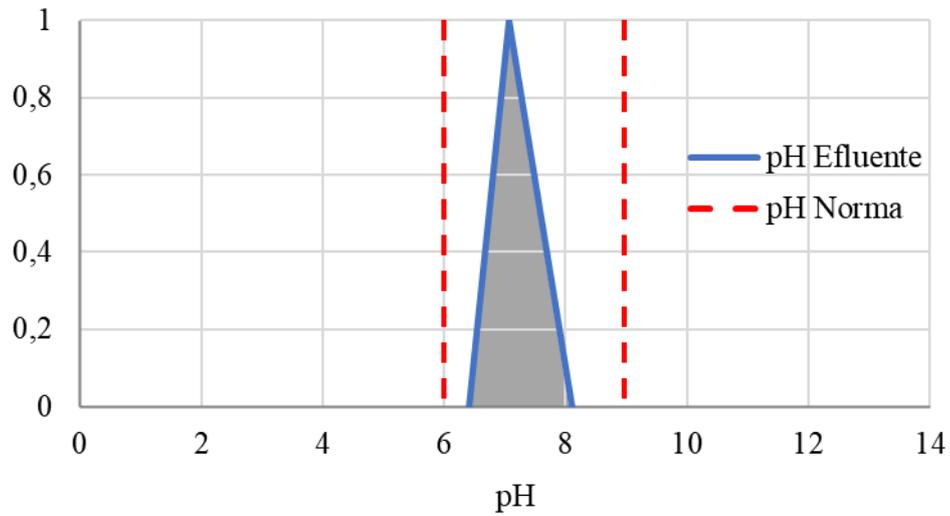
Figura 11 - I_{CF} da AMT ao longo do período analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As amostras referentes a AMT apresentaram um I_{CF} de 63,0% (0,630) no período estudado. A partir da Figura 12, observa-se que mais da metade da área total se encontra dentro do limite permitido pela norma. A média calculada para AMT foi de aproximadamente 11 mg-N/L.

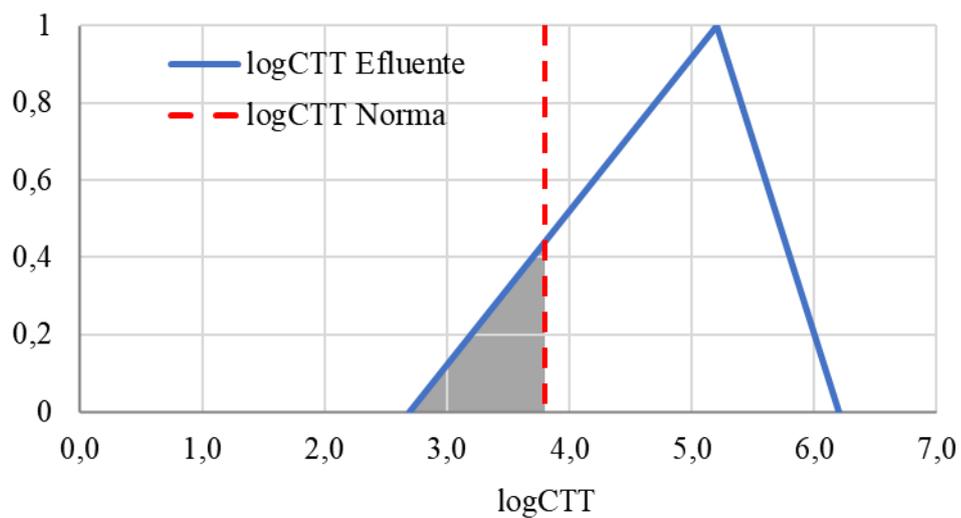
Figura 12 - I_{CF} do pH ao longo do período analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Já as amostras de pH analisadas apresentaram um I_{CF} de 100,0% (1,000) no período estudado, sendo este o único parâmetro dentre os analisados a estar totalmente dentro da norma. A partir da Figura 13, observa-se que toda a área do triângulo se encontra dentro dos limites permitidos pela norma, tais limites são representados pelas linhas tracejadas em vermelho.

Figura 13 - I_{CF} do logCTT ao longo do período analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O parâmetro CTT apresentou um I_{CF} de 11,4% (0,114) e, conseqüentemente, o pior rendimento dentre os parâmetros analisados. É possível visualizar graficamente na Figura 14, que apenas uma pequena área se encontra dentro do limite permitido pela norma representado, a área que está tingida em cinza.

Tabela 2 - I_{CF} dos parâmetros analisados.

Parâmetro	I_{CF} (%)
DBO	55,8 (0,558)
DQO	69,5 (0,695)
AMT	63,0 (0,630)
pH	100,0 (1,000)
CTT	11,4 (0,114)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

É possível observar que dos parâmetros analisados, o que apresenta menor garantia são os coliformes termotolerantes, com um índice de concordância de apenas 11,4%. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) tem o segundo pior desempenho apresentando um índice de concordância de 55,8%, enquanto a demanda química de oxigênio (DQO) tem desempenho melhor com um índice de concordância de 69,5%. A amônia total (AMT) apresentou bom desempenho com um índice de concordância de 63,0% ficando abaixo apenas do pH que não teve nenhuma falha, ou seja, teve um índice de concordância de 100,0%.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto a utilização de uma abordagem estatística para avaliação do grau de garantia da estação de tratamento de esgotos Dom Nivaldo Monte, mais conhecida como ETE do Baldo, em Natal no Rio Grande do Norte, cuja tecnologia de tratamento conta com um conjunto independente de dois reatores UASB. Analisando os resultados obtidos ao aplicar o método *fuzzy*, foi possível verificar que a maioria dos parâmetros conta com um grau de garantia insatisfatório em relação aos limites estabelecidos pela CONAMA nº 430/11. O único parâmetro que se manteve dentro dos limites normativos foi o pH, com grau de garantia de 100,0% e valor médio de 7,1 no período analisado, considerado pH neutro. O parâmetro de DQO obteve um grau de garantia de 69,5% sendo este o resultado mais alto dentre os parâmetros com grau de garantia abaixo de 100,0%. O parâmetro de DBO obteve um grau de garantia de 55,8%. Para o parâmetro de AMT tivemos um grau de garantia de 63,0%. E para o parâmetro de CTT obteve-se um grau de garantia de 11,4%, sendo este o pior resultado dentre todos os parâmetros analisados.

A partir dos resultados, é possível perceber que a garantia oferecida pela ETE do Baldo em relação a todos os parâmetros analisados, com a exceção do pH, não é considerada satisfatória entre os anos de 2014 e 2017.

Considerando os resultados obtidos, faz-se necessária uma análise mais ampla de cada parâmetro bem como do funcionamento operacional da ETE para identificação dos possíveis problemas presentes na estação, visto que, com exceção do pH, os parâmetros não apresentaram garantia satisfatória.

REFERÊNCIAS

- ADRIAENSSENS, V. et al. Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management. **Science of the Total Environment**, v. 319, n. 1-3, p. 1-12, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9648*: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 5p.
- BRASIL, **Resolução CONAMA nº357**, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 430 de 13 de maio de 2011**. Publicada no Diário Oficial da União em 16 de maio de 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em 27 de fevereiro de 2021;
- DA SILVA, F. J. A. **Índice de concordância e Risco Fuzzy na avaliação do desempenho de sistemas de lagoas de estabilização**. 2010. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- FERRAZ, D.L.M. et al. Avaliação do desempenho operacional de uma ete em escala real, composta de reator uasb seguido de tanque de aeração com 27 biodiscos. In: **SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 12., 2014, Natal. **Anais...** Natal: Abes, 2014.
- FUNDAÇÃO DE APOIO À EDUCAÇÃO E AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO RIO GRANDE DO NORTE (FUNCERN). Companhia de Água e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). **Estudo de impacto ambiental – eia do sistema de esgotamento sanitário da zona norte e ete jaguaribe natal – rio grande do norte**. Natal: Funcern, 2013.
- KAUFMANN, A.; GUPTA, M.M. **Introduction of fuzzy arithmetic: theory and applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 384 p.
- LOPES, T. R. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.
- MARRO, A.A. et al. **Lógica fuzzy: conceitos e aplicações**. Natal: **Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)**, 2010.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em 27 de fevereiro de 2021.
- MORAIS, N.W.S.; SANTOS, A.B. dos. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista Dae**, v. 67, n. 215, p. 40-55, jan./mar. 2019. *Revista DAE*. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2019.004>.

OLIVEIRA, S.C.; VON SPERLING, M. Análise da confiabilidade de estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, ABES, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, p. 389-398, 2007.

OLIVEIRA, S.M.A.C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1: análise de desempenho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 347-357, 2005.

PIVELI, R.P. Tratamento de Esgotos Sanitários. Apostila do curso de tratamento de Esgotos Sanitários. EP- USP, SP, 2006, 71 p.

RENTERÍA, A.R. **Estimación de probabilidade fuzzy a partir de dados imprecisos**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, A.S.P., Tratamento Preliminar. Notas de Aula – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

SILVA, G.H. **Sistema de alta eficiência para tratamento de esgoto residencial – estudo de caso na lagoa da conceição**. 2004. Monografia. Programa de graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Vol. 1. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. DESA-UFMG. 3ª Ed. 2005. 456p.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Vol. 3 – Lagoas de Estabilização**. 1ª Edição. Editora UFMG - Belo Horizonte, 1996. 140 p.