



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



PRISCILLA VITÓRIA FERREIRA DA SILVA

**CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE
DECAIMENTO DO CLORO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO
DE CAMPUS UNIVERSITÁRIO**

Uberlândia, 2025

PRISCILLA VITÓRIA FERREIRA DA SILVA

**CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE
DECAIMENTO DO CLORO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO
DE CAMPUS UNIVERSITÁRIO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Ismarley Lage Horta
Morais

Uberlândia, 2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2025	Silva, Priscilla Vitória Ferreira da, 1994- Calibração de coeficientes cinéticos de decaimento do cloro em rede de distribuição de campus universitário [recurso eletrônico] / Priscilla Vitória Ferreira da Silva. - 2025. Orientador: Ismarley Lage Horta Moraes. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.66 Inclui bibliografia. 1. Engenharia civil. I. Moraes, Ismarley Lage Horta , 1984-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título. CDU: 624
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 311, PPGEC				
Data:	31 de janeiro de 2025	Hora de início:	14h00	Hora de encerramento:	15h48
Matrícula do Discente:	12222ECV009				
Nome do Discente:	Priscilla Vitória Ferreira da Silva				
Título do Trabalho:	Calibração de coeficientes cinéticos de decaimento do cloro em rede de distribuição de campus universitário				
Área de concentração:	Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Tratamento convencional e avançado de água de abastecimento e residuária				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Iván Andrés Sánchez Ortiz - UDENAR, Nelson Barbosa Júnior - UFU e Ismarley Lage Horta Moraes, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Ismarley Lage Horta Moraes, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ismarley Lage Horta Moraes**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2025, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nelson Barbosa Junior, Técnico(a) de Tecnologia da Informação**, em 31/01/2025, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ, Usuário Externo**, em 31/01/2025, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6024514** e o código CRC **F93EC725**.

Referência: Processo nº 23117.002512/2025-65

SEI nº 6024514

*Dedico este trabalho à todas as pessoas queridas
que torceram por mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus pelo dom da vida, pela saúde, pela força e pela sabedoria que me permitiram chegar até aqui. Sem o seu cuidado e orientação, esta jornada não teria sido possível.

Ao meu amado esposo Lucas, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e compreensão durante todo o desenvolvimento do meu trabalho. Sua presença foi essencial para que eu conseguisse manter o equilíbrio entre a vida pessoal e acadêmica.

À minha querida mãe, Sandra, que sempre se empolgou com cada conquista e me motivou a seguir em frente, sou muito grata por tudo o que é e faz por mim. Ao meu pai, Márcio, por sua disposição em sempre me ajudar e incentivar. O exemplo e apoio constante de vocês com certeza fez toda a diferença para conseguir chegar até aqui.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), nas pessoas de funcionários e professores, que proporcionaram excelente ensino.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ismarley Lage Horta Moraes, por todo apoio, ensinamentos, atenção e disponibilidade em todos os momentos.

À Diretoria de Sustentabilidade (DIRSU) e à Prefeitura Universitária (PREFE) da UFU, por autorizarem minha Ação de Desenvolvimento em Serviço e disponibilizarem o espaço e equipamentos do Laboratório de Qualidade da Água para o desenvolvimento dos trabalhos, e por todo o apoio necessário para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao Prof. Dr. Nassau de Nogueira Nardez, por disponibilizar o GPS do Laboratório de Topografia (LabTOPO), e ajuda no tratamento dos dados.

Aos meus colegas de trabalho da DIRSU obrigada por todo apoio, incentivo e ajuda.

E a todos aqueles que de forma direta e indireta colaboraram com a elaboração deste trabalho. Muito obrigada!

RESUMO

O acesso a água de qualidade é um direito humano essencial para a manutenção da vida e prevenção de doenças de veiculação hídrica. Nesse sentido, são estabelecidos, por meio de normativas, padrões de qualidade da água para torná-la segura para o consumo humano. O processo de desinfecção tem como objetivo a inativação dos microrganismos patogênicos na água e evitar que ocorra a recontaminação no sistema de distribuição. Um dos principais desinfetantes utilizados no tratamento de água é o Cloro. A manutenção da concentração mínima de Cloro Residual Livre (CRL) até o ponto de consumo é uma das principais preocupações dos responsáveis pelo tratamento, pois a sua concentração na água decai conforme ele reage com as substâncias presentes no volume da massa de água e nas paredes das tubulações. O presente trabalho consistiu no estudo do decaimento do cloro residual livre na rede de distribuição interna do Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, por meio da determinação dos coeficientes cinéticos de decaimento na massa de água (k_b), pelo teste da garrafa, e nas paredes das tubulações (k_w), pelo método da tentativa e erro, utilizando o *software* EPANET 2.0. Para a modelagem do sistema de distribuição do campus, foram levantadas as características da rede de distribuição e dos dados históricos do monitoramento do CRL e do consumo de água, e foi realizado o monitoramento dos hidrômetros, para definição da curva padrão de consumo, e dos dados de pressão, para a calibração do modelo. Os resultados obtidos mostraram que o modelo de qualidade da água pode ser utilizado para simular o comportamento do cloro na rede de distribuição do campus, e que o decaimento do CRL é mais influenciado pelas reações que ocorrem na parede da tubulação, do que pelas reações na massa de água. O que contribui para uma gestão mais eficiente e estratégica da qualidade da água fornecida à comunidade acadêmica.

Palavras-chave: Qualidade da água; Decaimento do cloro; Modelagem.

ABSTRACT

Access to quality water is an essential human right for sustaining life and preventing waterborne diseases. Accordingly, regulations establish water quality standards to ensure its safety for human consumption. The disinfection process aims to inactivate pathogenic microorganisms in water and prevent recontamination within the distribution system. One of the primary disinfectants used in water treatment is chlorine. Maintaining the minimum concentration of Free Residual Chlorine (FRC) up to the point of consumption is a key concern for treatment operators, as its concentration in water decreases due to reactions with substances present in the water mass and the pipe walls. This study focused on examining the decay of free residual chlorine in the internal distribution network of the Santa Mônica Campus at the Federal University of Uberlândia. It determined the kinetic decay coefficients in the water mass (k_b) through bottle tests and in the pipe walls (k_w) using a trial-and-error method with the EPANET 2.0 software. To model the campus distribution system, the network's characteristics and historical data on FRC monitoring and water consumption were collected. Additionally, hydrant monitoring was conducted to define the standard consumption curve, and pressure data were analyzed for model calibration. The results showed that the water quality model can be effectively used to simulate chlorine behavior in the campus distribution network. Furthermore, it was observed that FRC decay is more influenced by reactions occurring on the pipe walls than by those in the water mass. This contributes to more efficient and strategic management of water quality provided to the academic community.

Keywords: Water quality; Chlorine Decay; Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Dissociação do ácido hipocloroso em função do pH.....	20
Figura 2 -	Exemplo de reação do cloro no interior de uma tubulação de ferro....	30
Figura 3 -	Mapa de localização do Campus Santa Mônica.....	33
Figura 4 -	Área e Edificações do Campus Santa Mônica.....	34
Figura 5 -	Reservatório central de distribuição - Reservatório inferior.....	36
Figura 6 -	Reservatório central de distribuição - Reservatório castelo.....	36
Figura 7 -	Identificação das edificações que possuem reservatório.....	37
Figura 8 -	Georreferenciamento dos nós da rede com o GPS.....	40
Figura 9 -	Rede de distribuição de água no modelo construído no EPANET.....	41
Figura 10 -	Histórico de consumo de água do Campus Santa Mônica.....	42
Figura 11 -	Curva de padrão de consumo inserida no EPANET.....	43
Figura 12 -	Etapas para a determinação dos coeficientes cinéticos de decaimento do cloro.....	45
Figura 13 -	Representação gráfica dos valores médios de CRL em pontos distintos do Campus Santa Mônica.....	50
Figura 14 -	Localização dos nós do sistema de distribuição.....	51
Figura 15 -	Gráfico de isolinhas das cotas topográficas do sistema de abastecimento de água no EPANET 2.0.....	52
Figura 16 -	Relatório de calibração de pressão do sistema no EPANET.....	53
Figura 17 -	Gráfico de comparação entre os valores médios de pressão observados e simulados.....	54
Figura 18 -	Idade máxima, em horas, simulada na rede.....	54
Figura 19 -	Definições das opções de reação na simulação do EPANET.....	75
Figura 20 -	Ajuste do coeficiente k_w para o ponto N3.....	76
Figura 21 -	Ajuste do coeficiente k_w para o ponto N12.....	77
Figura 22 -	Ajuste do coeficiente k_w para o ponto N14.....	77
Figura 23 -	Relatório de calibração do EPANET para o k_w médio.....	78
Figura 24 -	Relatório das taxas de reação no EPANET.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Principais doenças de veiculação hídrica.....	18
------------	---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Volume Total dos reservatórios do campus Santa Mônica.....	38
Tabela 2 -	Características dos trechos da rede.....	41
Tabela 3 -	Intervalos de tempo dos testes de garrafa.....	47
Tabela 4 -	Variação da Concentração de Cloro Residual Livre do DMAE.....	49
Tabela 5 -	Variação do CRL nos blocos sem reservatório próprio.....	50
Tabela 6 -	Variação do CRL nos blocos com reservatório próprio.....	51
Tabela 7 -	Comparativo entre as pressões medidas e simuladas.....	53
Tabela 8 -	Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do DMAE à 28°C...	56
Tabela 9 -	Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do DMAE à 28°C...	56
Tabela 10 -	Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do DMAE à 22°C...	57
Tabela 11 -	Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do DMAE à 22°C...	57
Tabela 12 -	Resultado do K _b das amostras do DMAE.....	58
Tabela 13 -	Resultados dos testes dos resíduos das amostras do DMAE.....	59
Tabela 14 -	Resultado da análise de pH das amostras do DMAE.....	59
Tabela 15 -	Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N1 à 28°C.....	60
Tabela 16 -	Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N1 à 28°C.....	60
Tabela 17 -	Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do Ponto N3 à 28°C.....	61
Tabela 18 -	Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do Ponto N3 à 28°C.....	61
Tabela 19 -	Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do Ponto N12 à 28°C.....	62
Tabela 20 -	Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do Ponto N12 à 28°C.....	62
Tabela 21 -	Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do Ponto N14 à 28°C.....	63
Tabela 22 -	Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do Ponto N14 à 28°C.....	63
Tabela 23 -	Resultado do K _b das amostras da rede à 28°C.....	64
Tabela 24 -	Resultados dos testes dos resíduos das amostras da rede à 28°C...	65

Tabela 25 - Resultado da análise de pH das amostras da rede à 28°C.....	66
Tabela 26 - Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N1 à 22°C.....	67
Tabela 27 - Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N1 à 22°C.....	67
Tabela 28 - Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N3 à 22°C.....	68
Tabela 29 - Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N3 à 22°C.....	68
Tabela 30 - Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N12 à 22°C.....	69
Tabela 31 - Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N12 à 22°C.....	69
Tabela 32 - Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N14 à 22°C.....	70
Tabela 33 - Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N14 à 22°C.....	70
Tabela 34 - Resultado do K _b das amostras da rede à 22°C.....	71
Tabela 35 - Resultados dos testes dos resíduos das amostras da rede à 22°C...	73
Tabela 36 - Resultado da análise de pH das amostras da rede à 22°C.....	74
Tabela 37 - Concentrações de CRL simulado e resíduos sem reação na parede.....	75
Tabela 38 - Resumo dos coeficientes cinéticos de decaimento na parede.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CRL – Cloro Residual Livre

DIRSU – Diretoria de Sustentabilidade

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto

DPD – N, N-dietil-p-fenilenediamina

EPA – Environmental Protection Agency

EPANET – Simulador hidráulico desenvolvido pela EPA

ETA – Estação de Tratamento de Água

GM – Gabinete do Ministro

IC – Intervalo de confiança

k_b – Constante cinética de decaimento do cloro residual livre no volume da massa de água

k_w – Constante cinética de decaimento do cloro residual livre devido ao contato com as paredes das tubulações

MO – Matéria orgânica

MS – Ministério da Saúde

pH – Potencial Hidrogeniônico

PREFE – Prefeitura Universitária

R^2 – Coeficiente de determinação

RNF – Reservatório de nível fixo

RNV – Reservatório de nível variável

SDA - Sistema de distribuição de água

SPD – Subprodutos da desinfecção

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

VMP – Valor Máximo Permitido

TDH – Tempo de detenção hidráulica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. OBJETIVOS.....	16
1.1.1. Objetivo geral.....	16
1.1.2. Objetivos específicos.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. QUALIDADE DA ÁGUA.....	17
2.2. DESINFECÇÃO.....	18
2.2.1. O cloro como desinfetante.....	19
2.2.2. Os desafios da cloração.....	21
2.3. PLANO DE SEGURANÇA DA ÁGUA.....	23
2.3.1. Plano Institucional de Segurança da Água da Universidade Federal de Uberlândia.....	24
2.4. MODELAGEM MATEMÁTICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	25
2.4.1. Software EPANET.....	26
2.5. MODELAGEM HIDRÁULICA.....	27
2.6. MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	29
2.6.1. Decaimento do Cloro na rede de distribuição de água.....	30
2.6.2. Constante de decaimento do cloro na massa de água (Kb).....	31
2.6.3. Constante de decaimento do cloro na parede da tubulação (Kw).....	32
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	33
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE ABASTECIMENTO DO CAMPUS SANTA MÔNICA.....	35
3.3. PARÂMETROS DE ANÁLISE.....	38
3.3.1. Método de determinação do cloro residual livre.....	38
3.3.2. Método de determinação dos parâmetros pH e temperatura.....	39
3.4. MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	39
3.4.1. Modelagem Hidráulica.....	39
3.4.2. Modelagem da qualidade da água.....	44
3.4.3. Determinação do coeficiente cinético de decaimento na massa de água (kb) do reservatório central e da rede de distribuição.....	45
3.4.4. Determinação do coeficiente cinético de decaimento na parede da tubulação (kw).....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49

4.1.	Resultados do levantamento dos dados de qualidade da água do Campus Santa Mônica	49
4.2.	Modelagem hidráulica	51
4.3.	Modelagem da Qualidade da água	55
4.3.1.	Determinação do coeficiente cinético de decaimento no volume do escoamento (kb)	55
4.3.1.1.	Teste de decaimento do CRL das amostras do DMAE.....	55
4.3.1.2.	Teste de decaimento do CRL das amostras dos pontos da rede à 28°C 60	
4.3.1.3.	Teste de decaimento do CRL das amostras dos pontos da rede à 22°C 66	
4.3.2.	Determinação do coeficiente cinético de decaimento na parede (kw) 74	
5.	CONCLUSÃO	80
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida e desempenha um importante papel em diversas áreas, como consumo humano, agricultura, indústria e nos ecossistemas naturais. A manutenção da qualidade da água é fundamental para a saúde e o bem-estar de todos os seres vivos. O consumo de água fora dos parâmetros de potabilidade, pode levar a problemas de saúde, como doenças gastrointestinais, diarreia, hepatite A, entre outras doenças transmitidas pela água. Dessa forma, é essencial garantir a qualidade da água por meio de práticas adequadas de tratamento, controle e monitoramento.

O monitoramento regular da qualidade da água desempenha um papel crucial na avaliação da conformidade com os padrões estabelecidos pelas autoridades reguladoras. Isso assegura que a água esteja em conformidade com os requisitos de saúde e segurança para consumo humano. A Portaria GM/MS Nº 888, emitida pelo Ministério da Saúde em 04 de maio de 2021, é uma regulamentação de extrema importância no Brasil. Seu objetivo é garantir a segurança da água destinada ao consumo da população, protegendo a saúde pública e prevenindo doenças transmitidas pela água. A portaria estabelece parâmetros e limites máximos permitidos para diversos indicadores de qualidade da água, como agentes microbiológicos, turbidez, cor e substâncias químicas, como o Cloro Residual Livre (CRL). Além disso, enfatiza a necessidade de vigilância contínua, melhoria dos sistemas de abastecimento e adoção de medidas preventivas para garantir a segurança da água.

A adoção de ferramentas de controle de qualidade da água de abastecimento é fundamental devido aos riscos potenciais de degradação da água ao longo das várias etapas do sistema de abastecimento. Nesse sentido, a Portaria GM/MS Nº 888/2021, estabelece a obrigatoriedade da manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) e nos pontos de consumo. Isso é essencial para garantir que a água seja segura para o consumo humano e não transmita doenças, pois como agente desinfetante, a principal função do cloro é eliminar microrganismos presente na água, e a sua

manutenção até o ponto de consumo garante que não haja recontaminação na rede de distribuição e armazenamento.

O cloro é um elemento não conservativo, pois apresenta redução em sua concentração na água à medida que reage com outros elementos nas tubulações e reservatórios dos sistemas de distribuição. Por essa razão, é necessário o monitoramento da sua concentração ao longo de todo o sistema (SILVA E KISHI, 2003).

Os modelos matemáticos de qualidade da água possibilitam estratégias eficazes de controle para manter e aprimorar a qualidade da água nos sistemas de distribuição. Eles facilitam a avaliação de diferentes operações e a otimização do processo de desinfecção (SILVA E KISHI, 2003).

O software EPANET é uma ferramenta valiosa para engenheiros e gestores de recursos hídricos, pois permite a realização de análises detalhadas e a tomada de decisões embasadas na modelagem do comportamento de redes de distribuição de água potável. E se destaca como uma contribuição significativa para o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de abastecimento de água em todo o mundo.

Outro aspecto relevante para o controle da qualidade da água e a prevenção de riscos à saúde é a criação de um Plano de Segurança da Água (PSA), proposto pela Organização Mundial da Saúde (OMS). No âmbito universitário, Barbosa Júnior (2022) desenvolveu um Plano Institucional de Segurança da Água (PISA), com o objetivo de adaptar o modelo à realidade da gestão do abastecimento de água dentro de um campus universitário. Nesse estudo foi destacado a importância do monitoramento e controle da concentração do cloro residual livre nos pontos de consumo como uma barreira para conter os riscos relacionados a contaminação microbiana.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. *Objetivo geral*

O objetivo deste trabalho foi estudar o decaimento do cloro residual livre dentro do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por meio da calibração dos coeficientes cinéticos de decaimento do cloro no sistema de abastecimento, a fim de otimizar o processo de cloração adicional.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Realizar o levantamento das características conhecidas do sistema de abastecimento.
- Construir um modelo hidráulico representativo do sistema de abastecimento do campus no software EPANET 2.0.
- Determinar os coeficientes cinéticos de decaimento da concentração de cloro residual livre na água fornecida pela companhia de abastecimento, e na rede de distribuição de água do Campus Santa Mônica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. QUALIDADE DA ÁGUA

A água potável é um direito fundamental e essencial para a vida e para uma sociedade saudável. No entanto, esse recurso ainda permanece inacessível para 1,1 milhão de pessoas em todo o mundo. Nos países em desenvolvimento, garantir acesso a esse recurso, com qualidade e em quantidade adequada, representa um grande desafio devido às limitações financeiras, técnicas e institucionais (OKAFOR, et. al., 2024).

Para que a água seja considerada potável, ou seja, própria para o uso e consumo humano, é necessário que esteja livre de contaminantes orgânicos, inorgânicos e de microrganismos patogênicos (RICHTER, 2009). Estes contaminantes, quando presentes na água podem causar doenças e atingir rapidamente muitas pessoas. Portanto, o tratamento da água tem como objetivo principal a proteção da saúde pública contra doenças de veiculação hídrica (HOWE et. al., 2016).

É indispensável a criação de normas que regulem e controlem a qualidade da água destinada ao consumo humano. Dessa forma, é fundamental verificar a conformidade desses parâmetros com base em normas ou padrões estabelecidos pela legislação, os quais definem os valores aceitáveis para determinados usos (GONÇALVES, 2015). A avaliação dessa qualidade envolve a determinação de diversos parâmetros físicos, químicos, biológicos e microbiológicos (JAFFAR et al., 2020).

No Brasil, foi promulgado em 09 de março de 1977, o Decreto Federal nº. 79.367, que atribuiu ao Ministério da Saúde (MS) a competência de elaborar normas e estabelecer padrões de potabilidade da água que devem ser seguidos em todo o país. Com base nessa competência, o MS publicou a Portaria GM/MS Nº 888/2021, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Com relação ao tratamento da água, essa portaria estabelece no art. 24 que “toda água para consumo humano fornecida coletivamente deverá passar por processo de desinfecção ou adição de desinfetante para manutenção dos residuais mínimos”, demonstrando a importância da desinfecção para a manutenção da qualidade da água.

2.2. DESINFECÇÃO

Entre as etapas do tratamento da água a desinfecção se destaca como uma importante etapa para garantir o fornecimento de água potável, pois tem como objetivo a destruição ou inativação dos microrganismos patogênicos presentes na água, que são capazes de causar doenças (OBAYOMI, et. al., 2024). No Quadro 1 estão apresentadas as principais doenças que possuem veiculação hídrica, quais os agentes etiológicos e os sintomas relacionados.

Quadro 1 – Principais doenças de veiculação hídrica

Doenças	Agente etiológico	Sintomas
Febres tifóide e paratifóide	<i>Salmonella typhi</i> <i>Salmonella paratyphi A e B</i>	Febre elevada, diarreia
Disenteria bacilar	<i>Shigella dysenteriae</i>	Diarreia
Disenteria amebiana	<i>Entamoeba histolytica</i>	Diarreia, abscessos no fígado e intestino delgado
Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>	Diarreia e desidratação
Giardíase	<i>Giardia lamblia</i>	Diarreia, náusea, indigestão, flatulência
Hepatite A e B	Vírus da hepatite A e B	Febre, icterícia
Poliomielite	Vírus da poliomielite	Paralisia
Criptosporidiose	<i>Cryptosporidium parvum</i> , <i>Cryptosporidium muris</i>	Diarreia, anorexia, dor intestinal, náusea, indigestão, flatulência

Gastroenterite	<i>Escherichia coli</i> , <i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Yersinia enterocolitica</i> , <i>Aeromonas hydrophila</i> , <i>Rotavírus</i> e outros vírus entéricos	Diarreia
Melioidose	<i>Burkholderia pseudomallei</i>	Febre, dores no corpo, tosse, falta de ar

Fonte: Adaptado de Daniel (2001) e TAKCI, et. al. (2023)

Os agentes desinfetantes mais comumente empregados para o tratamento da água são: cloro gás, hipoclorito, dióxido de cloro, ozônio e radiação ultravioleta (BRASIL, 2021).

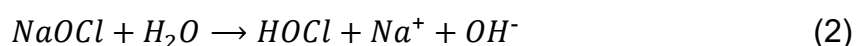
Entre eles o cloro se destaca como o mais amplamente utilizado. Isso se deve à algumas de suas características, como o fato de ser capaz de destruir a maioria dos microrganismos patogênicos, ser facilmente disponível e aplicado, possuir um preço acessível, deixar uma concentração residual na água para garantir a desinfecção contínua durante o armazenamento e a distribuição, não ser prejudicial à saúde, e ser de fácil medição e controle de sua concentração (OBAYOMI, et. al., 2024; RICHTER, 2009).

2.2.1. O cloro como desinfetante

O processo de desinfecção por meio do cloro livre pode ser realizado pelo uso do gás Cloro (Cl_2) ou Hipoclorito de Sódio ($NaOCl$). O gás cloro quando é adicionado na água, ele se dissolve rapidamente e como resultado da reação há a formação do ácido hipocloroso ($HOCl$) e o ácido clorídrico (HCl):



Dessa mesma forma, a reação da água com o Hipoclorito de Sódio resulta na formação do ácido hipocloroso e o hidróxido de sódio ($NaOH$):



O Ácido Hipocloroso é o agente com maior força de desinfecção, com isso, a capacidade desinfetante dos dois compostos são exatamente iguais em base molar

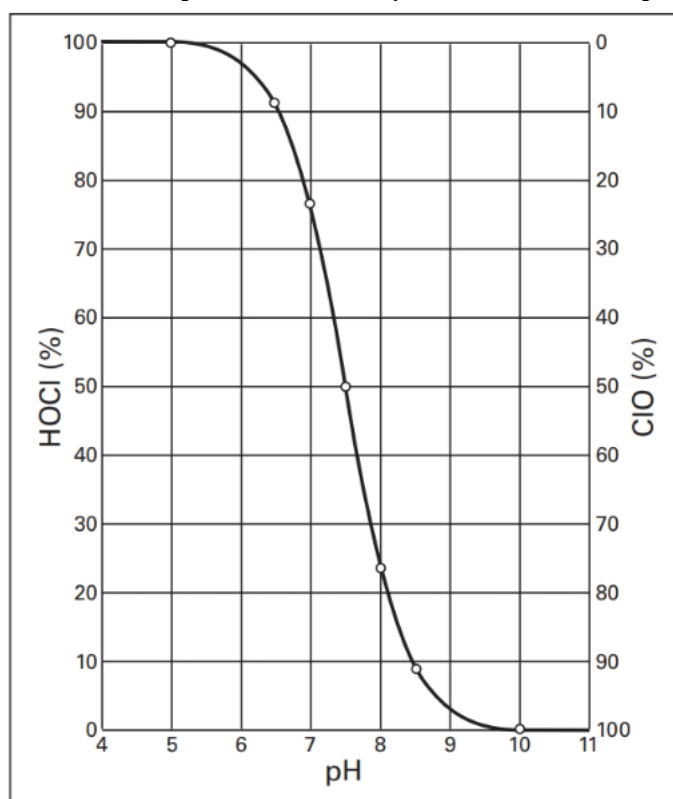
(HOWE et. al., 2016). O ácido hipocloroso é um ácido fraco que ao se dissociar forma o íon hipoclorito (ClO^-):



A presença das formas de cloro residual livre HOCl e ClO^- é dependente do pH do meio (Figura 1). Para valores menores ou iguais a pH 5 o ácido hipocloroso não se dissocia, então o residual é devido somente ao HClO. Para valores maiores ou iguais a pH 10, ocorre completa dissociação, ou seja, todo o residual de cloro passa a ser somente de ClO^- . Além disso, em pH 7,5 as concentrações de ClO^- e HOCl são praticamente iguais (RICHTER, 2009).

Nos processos de desinfecção essa dissociação é muito importante, visto que o ácido hipocloroso possui um ótimo efeito biocida, enquanto o íon hipoclorito é praticamente inativo em termos de desinfecção. Portanto, o tratamento da água é mais eficaz quando o pH é menor (USEPA, 1999).

Figura 1 - Dissociação do ácido hipocloroso em função do pH



Fonte: Richter (2009)

2.2.2. Os desafios da cloração

O residual de cloro na saída da etapa de desinfecção é importante para manutenção da qualidade da água no sistema de distribuição, pois protege contra a contaminação e crescimento microbiológico dentro da rede (WHO, 2017). Bocelli et. al. (2003) afirmaram que a dosagem do agente desinfetante deve ser adequada para assegurar a inativação eficaz dos organismos microbianos antes que a água tratada chegue ao primeiro consumidor (desinfecção primária) e, simultaneamente, deve ser suficiente para garantir a presença de um resíduo de cloro nas extremidades do sistema de distribuição, prevenindo o recrescimento microbiano (desinfecção secundária).

Para que, ao final do processo de cloração, haja cloro residual livre, é fundamental que a quantidade de cloro aplicada seja suficiente para atender toda a demanda de cloro. Porém, a quantidade de cloro a ser dosada não é padronizada, pois a quantidade necessária varia conforme a qualidade da água e do requisito de desinfecção (GELETE, et. al., 2020).

Em vista disso, o artigo nº32 da Portaria GM/MS Nº 888/2021 estabelece que após o tratamento da água, é obrigatório a manutenção de no mínimo 0,20mg/L de Cloro Residual Livre (CRL) em toda a extensão do sistema de distribuição, incluindo a rede, os reservatórios, e nos pontos de consumo.

Em alguns casos, a quantidade de cloro inicialmente adicionada pode não ser suficiente para manter um mínimo residual de cloro em pontos mais distantes do sistema de distribuição, como em adutoras longas, redes distribuidoras extensas, ou em sistemas com grandes reservatórios. Nessas situações, realiza-se a recloração da água, ou seja, a adição de mais cloro para garantir que a água mantenha um nível adequado de CRL até o consumidor final. A recloração é, portanto, uma medida corretiva necessária para manter a eficácia da desinfecção e garantir que a água fornecida à população esteja livre de microrganismos patogênicos, prevenindo riscos à saúde pública (AZEVEDO NETTO, 1974).

Outra preocupação que tem sido objeto de pesquisas em relação à manutenção da qualidade da água de abastecimento refere-se aos reservatórios prediais. Esses reservatórios fazem parte do sistema interno de abastecimento

predial, e recebem a água potável fornecida pelo sistema de distribuição de água (SDA), seguindo os padrões de qualidade estabelecidos pela Portaria GM/MS Nº 888/2021. No entanto, diversos estudos têm observado o recrescimento de microrganismos nesses reservatórios, frequentemente associados a baixos níveis de cloro residual livre, longos tempos de detenção da água e problemas de manutenção dessas estruturas, como a falta de limpeza e deficiências no isolamento (DASSAN, 2014).

Entretanto, embora a cloração seja benéfica do ponto de vista microbiológico, pois reduz o risco de doenças transmitidas por agentes etiológicos, por outro lado, ela pode gerar reações secundárias que resultam na formação de Subprodutos de Desinfecção (SPD). Esses SPD podem ser potencialmente nocivos à saúde, como os resultantes da reação do cloro com a matéria orgânica natural, que formam os trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (HAAs), que são considerados cancerígenos, tornando essencial o monitoramento e controle desses subprodutos na água tratada (PADHI, et. al., 2019).

Entretanto, como destacado por Meyer (1994), a substituição do cloro por outro desinfetante no tratamento da água pode trazer mais riscos do que benefícios, considerando-se que a diminuição da incidência de doenças transmissíveis pela água somente foi alcançada com a difusão do emprego da técnica de cloração.

Nesse sentido, a Portaria GM/MS Nº 888/2021, na tabela de padrão de potabilidade para subprodutos da desinfecção que representam risco à saúde do Anexo 9, estabelece um Valor Máximo Permitido (VMP) de Cloro Residual Livre (CRL) de 5mg/L.

Assim, os gestores enfrentam o desafio constante de equilibrar a eficácia do processo de desinfecção, garantindo a inativação dos microrganismos, a minimização da formação dos SPD e a manutenção de um nível residual adequado de desinfetante ao longo do sistema de distribuição, assegurando a proteção sanitária (NEVES, 2016).

Portanto, o decaimento do cloro na água potável é um tema de grande importância para garantir a qualidade e a segurança da água fornecida à população. A compreensão desse processo é fundamental para otimizar as práticas de

desinfecção e evitar a presença de microrganismos patogênicos na água consumida (DASSAN, 2014).

2.3. PLANO DE SEGURANÇA DA ÁGUA

Os Planos de Segurança da Água (PSA), como são conceituadas pela Organização Mundial de Saúde (OMS), surgiram como o resultado de uma abordagem abrangente, com o objetivo de garantir a segurança contínua no fornecimento de água potável. Esse instrumento consiste na aplicação de uma avaliação completa dos riscos, combinada com uma estratégia de gestão que percorra todas as etapas do abastecimento de água, desde a captação até o ponto de consumo (WHO, 2017).

De acordo com o Ministério da Saúde (2012) os Planos de Segurança da Água (PSA) geralmente englobam as seguintes etapas:

1. Etapas preliminares - Planejamento das atividades, levantamento das informações necessárias, e a constituição da equipe técnica multidisciplinar para a elaboração e implantação do PSA.
2. Avaliação do sistema - Descrição do sistema de abastecimento de água, a construção e validação do diagrama de fluxo, a identificação e análise de perigos potenciais e caracterização de riscos, e o estabelecimento de medidas de controle dos pontos críticos.
3. Monitoramento operacional - Determinação de medidas de controle dos sistemas de abastecimento de água, seleção dos parâmetros de monitoramento, e o estabelecimento de limites críticos e de ações corretivas.
4. Planos de gestão - Verificação constante do PSA e o estabelecimento de ações em situações de rotina e emergenciais, a organização da documentação da avaliação do sistema e o estabelecimento de comunicação de risco.
5. Revisão do PSA - Verificação dos dados coletados no monitoramento, alterações dos mananciais e bacias hidrográficas, alterações no tratamento e na distribuição, implementação de programas de melhoria e atualização, e os perigos e riscos emergentes. O PSA deve ser revisado após desastres e emergências para garantir que estes não se repitam.

6. Validação e verificação do PSA - Avaliar o funcionamento do PSA e saber se as metas de saúde estão sendo alcançadas.

2.3.1. Plano Institucional de Segurança da Água da Universidade Federal de Uberlândia

A responsabilidade da concessionária de tratamento de água com relação a segurança da água, está relacionada com a entrega dentro dos padrões de potabilidade até a entrada no hidrômetro dos consumidores. A partir desse ponto, cada um é responsável por cuidar das instalações internas, limpeza e conservação dos reservatórios.

Dentro de grandes instituições, como um campus universitário, cabe aos gestores a manutenção da qualidade da água, visto que a água potável que chega percorre toda a extensão da rede de distribuição interna, composta por tubulações e estruturas de armazenamento geral e individual das edificações, antes de chegar no ponto de consumo. Dessa forma, surge a necessidade de elaboração e estruturação de um plano de segurança para garantir que não ocorra contaminação dessa água, e que ela chegue dentro dos padrões de potabilidade para o consumo pela comunidade acadêmica (BARBOSA JÚNIOR, 2022).

Nesse sentido, Barbosa Júnior (2022) realizou um estudo para o desenvolvimento de um Plano Institucional de Segurança da Água (PISA) para o Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Nesse estudo, foi realizado a caracterização física das edificações, descrição do sistema de distribuição de água, diagnóstico das causas de não potabilidade, construção do mapa de riscos e identificação dos Pontos Críticos de Controle (PCC), definição dos procedimentos de monitoramento, determinação de limites críticos e ações de contingenciamento.

Na fase de diagnóstico do estudo, em colaboração com os servidores técnicos da Diretoria de Sustentabilidade (DIRSU) da Prefeitura Universitária (PREFE), foram levantados alguns dos fatores que atuam no comprometimento da qualidade da água. Em especial, foi realizado o monitoramento do Cloro Residual Livre nos blocos do

campus, e na água fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) de Uberlândia (MG).

Com o monitoramento foram verificados pontos com concentração de cloro abaixo do valor mínimo recomendado pela Portaria GM/MS Nº 888/2021.

Dessa forma, como plano de ação para manutenção da qualidade água em todo o campus, a instituição iniciou o processo de cloração adicional no reservatório central para garantir a concentração mínima de cloro residual nos pontos de consumo, e rebaixo de boia de alguns dos reservatórios prediais para diminuir o tempo de detenção hidráulica (TDH).

Com a realização da recloração verificou-se que a manutenção deste parâmetro atua como barreira de atuação dos riscos potenciais, evidenciando a importância do monitoramento e controle desse parâmetro de qualidade da água

O presente trabalho se enquadra nas etapas de avaliação e monitoramento operacional do sistema de abastecimento de água do campus Santa Mônica, buscando contribuir no desenvolvimento do PISA da UFU, e otimizar o processo de cloração realizado pela Universidade.

2.4. MODELAGEM MATEMÁTICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A análise completa da variação da qualidade da água ao longo do percurso entre a Estação de Tratamento de Água (ETA) e o consumidor é algo desafiador devido à complexidade e extensão dos sistemas de distribuição (SILVA E KISHI, 2003). A operação desses sistemas durante muito tempo foi realizada somente por meio do conhecimento e experiência dos responsáveis pela gestão do abastecimento. Mas, nos últimos anos, foram desenvolvidos modelos computacionais (softwares) que possuem a capacidade de representar os sistemas físicos de abastecimento e simular sua operação ao longo do tempo (GOMES, 2009).

A modelagem matemática nos sistemas de abastecimento pode ser dividida em duas partes: a modelagem hidráulica e a modelagem da qualidade da água.

O uso de modelos matemáticos de qualidade da água para analisar a variação das características físicas e químicas da água no espaço e no tempo, oferece benefícios significativos às empresas de saneamento, permitindo a previsão do comportamento da qualidade da água nas redes de distribuição e reservatórios. Esses modelos podem ser usados para identificar locais ideais de instalação de estações de cloração adicional, resultando na redução do consumo de desinfetante e, conseqüentemente, nos custos do tratamento, e garantindo o fornecimento de água dentro dos padrões de potabilidade (SILVA E KISHI, 2003).

Existem diversos softwares disponíveis para a modelagem matemática de redes e análise hidráulica e de qualidade da água, como, por exemplo, EPANET, WaterCAD, Pipe2000, AQUIS, Infowater H2ONET, entre outros. Contudo, somente o EPANET é disponibilizado gratuitamente (RODRIGUES, 2013).

2.4.1. Software EPANET

O EPANET é um software de modelagem hidráulica e de qualidade da água desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency - EPA) para simular o comportamento hidráulico e de qualidade dos sistemas de distribuição de água (KELLNER, 2022). É uma ferramenta amplamente utilizada por engenheiros e profissionais da área de recursos hídricos para analisar e projetar redes de distribuição de água.

O software possibilita a realização de simulações estáticas e dinâmicas que analisam o comportamento hidráulico e a qualidade da água em sistemas de tubulações pressurizadas (ROSSMAN, 2000).

É possível criar modelos detalhados de sistemas de abastecimento de água, incluindo reservatórios, tubulações, nós, bombas, válvulas e outras estruturas, representando as interações entre esses componentes. Com base nas informações inseridas, o EPANET realiza simulações para prever o comportamento do sistema ao longo do tempo (GOMES, 2009).

O uso dessa ferramenta, oferece a capacidade de obter dados de vazão em cada uma das tubulações, pressão em cada nó, altura da água em reservatórios de

nível variável e a concentração de substâncias químicas ao longo da rede durante o período da simulação. Além disso, o modelo realiza a determinação da idade da água e o rastreia a sua origem em qualquer ponto da rede (ROSSMAN, 2000).

2.5. MODELAGEM HIDRÁULICA

A modelagem hidráulica é uma técnica que utiliza modelos matemáticos para simular o comportamento de sistemas hidráulicos, ou seja, sistemas que envolvem o movimento, a distribuição e o controle da água. Essa abordagem é amplamente utilizada para compreender e prever como a água se comporta em diferentes situações e condições. O desenvolvimento do modelo hidráulico é a base para a aplicação do modelo de qualidade da água.

Para que um modelo possa representar um sistema real de distribuição de água, é essencial realizar o levantamento de informações cadastrais, dados geográficos, operacionais e de demanda da rede (LEAL, 2011).

De acordo com Junqueira (2010), os dados de entrada, para o desenvolvimento do modelo hidráulico, podem ser descritos como:

- Trechos e Nós da Rede:

É necessário o levantamento das informações referentes as tubulações utilizadas para transportar a água, como o diâmetro, comprimento, rugosidade, idade, material e condições físicas de cada trecho, e as coordenadas dos pontos de conexão dos tubos. Essas informações podem ser encontradas nos mapas e projetos do sistema, e em casos de dúvida quanto dados das redes existentes, podem ser realizadas sondagens em campo para verificação.

- Elementos da Rede:

As válvulas de controle, válvulas redutoras de pressão e elevatórias de recalque, presentes na rede de distribuição, devem ser identificadas e incluídas no desenvolvimento do modelo hidráulico.

- Dados das Bombas:

As bombas são responsáveis por fornecer a pressão necessária para distribuir água até os pontos de consumo. Por isso é essencial conhecer sua localização no sistema e suas características operacionais, como os pontos de vazão em relação à altura manométrica, que formam a curva da bomba.

- Dados sobre Reservatório:

Os reservatórios do sistema podem ser elevados, apoiados e/ou enterrados, e são utilizados para o armazenamento e distribuição da água, que pode ser por gravidade ou bombeamento. Os volumes de armazenamento dos reservatórios, suas dimensões, faixas de operação, válvulas de controle e as áreas atendidas são elementos importantes para o desenvolvimento do modelo hidráulico.

Os níveis de água nos reservatórios oscilam de acordo com a demanda pelo consumo, variando entre os níveis máximos e mínimos.

- Dados de Campo:

É necessário realizar a coleta de dados de medições de campo para testar e documentar a localização de diversos elementos do sistema. Isso abrange uma série de registros, como os valores de pressão nos nós antes e depois das válvulas redutoras de pressão, vazão, demanda de água nas áreas de medição e coeficientes de rugosidade das tubulações. Essas medidas são essenciais para complementar o modelo e realizar uma primeira validação das informações fornecidas pelos registros do sistema de distribuição de água.

- Condições de Demanda:

Os dados de demanda de água devem ser coletados e integrados ao modelo de forma geográfica e temporal, levando em conta suas flutuações ao longo do dia e da noite.

A alocação geográfica refere-se à distribuição percentual da demanda total média atribuída a cada nó da rede de distribuição. Isso pode seguir uma distribuição proporcional à área ou ao número e perfil dos consumidores atendidos, considerando também os padrões reais de consumo medidos em nível micro.

As variações diárias no uso da água estão relacionadas aos hábitos e costumes de cada região. É possível estabelecer fatores horários que, quando aplicados à demanda média, representem a demanda em momentos específicos. Esses fatores horários, combinados, compõem o perfil de demanda, o qual pode ser derivado de uma série de medições de vazão do sistema.

No EPANET, o módulo de simulação hidráulica realiza cálculos para estimar o valor da pressão nos nós e da vazão nos trechos da rede. A cada intervalo de cálculo do modelo, os níveis de água nos reservatórios de nível fixo (RNFs) e os consumos nos nós são atualizados conforme seus padrões temporais associados. Já a altura de água nos reservatórios de nível variável (RNVs) é ajustada de acordo com a vazão de saída do sistema. (GOMES, 2009; KELLNER, 2022; ROSSMAN, 2000)

Para realizar os cálculos da simulação, o EPANET realiza o "Balanço Hidráulico" da rede, resolvendo simultaneamente a equação da continuidade (conservação da massa) para cada nó, e a equação da conservação da energia, para cada trecho. Para resolver as equações não lineares envolvidas no processo, que requerem a utilização de técnicas matemáticas iterativas, o software utiliza um Método Híbrido Nó-Malha, conhecido como Método do Gradiente (ROSSMAN, 2000).

2.6. MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA

A modelagem da qualidade da água tem como objetivo compreender as alterações que ocorrem nos parâmetros de qualidade da água dentro do sistema de distribuição, que engloba o trajeto da Estação de Tratamento de Água (ETA) até o ponto de consumo, local aonde a água deve chegar dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde (PEREIRA, 2009).

Com a modelagem da qualidade da água realizada no EPANET é possível acompanhar, o aumento ou decaimento (devido às reações que ocorrem dentro da rede), de uma substância presente na água. Essas reações podem ocorrer no volume da massa de água, entre as espécies químicas presentes na água, ou na interface com as paredes das tubulações e reservatórios (ROSSMAN, 2000).

Uma das aplicações da modelagem da qualidade é o estudo do decaimento do cloro residual livre, pois durante o percurso da água no sistema de distribuição, a concentração do CRL aplicada no processo de desinfecção não permanece constante.

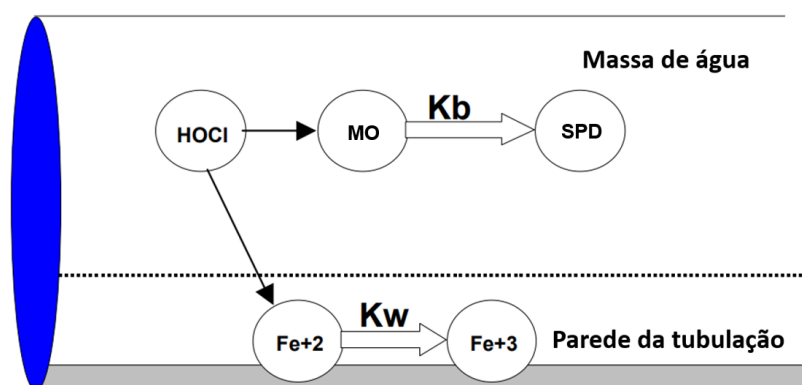
A compreensão de como as concentrações de cloro irão diminuir com o tempo, devido a reações que ocorrem no sistema, é fundamental para a gestão da qualidade da água (HALLAM et al., 2002).

2.6.1. Decaimento do Cloro na rede de distribuição de água

Depois que a água passa pelo processo de desinfecção na ETA, e segue para o sistema de distribuição, a concentração de cloro residual livre na água tende a se dissipar. Alguns dos fatores que contribuem para esse processo são: (1) reações com substâncias químicas orgânicas e inorgânicas (amônia, sulfetos, íon ferroso, íon manganoso, material húmico, entre outros) presentes na massa de água; (2) reações com o biofilme presente na parede da tubulação; e (3) consumo pelo processo de corrosão (MUNAVALLI; MOHAN KUMAR, 2005).

A Figura 2 ilustra esse processo, uma parte do cloro livre (HOCl) reage com a matéria orgânica (MO) na massa de água, formando subprodutos da desinfecção (SPD), enquanto outra parte reage com o ferro liberado pela corrosão na parede da tubulação. As reações de decaimento na massa de água também podem ocorrer no interior de reservatórios de nível variável (GOMES, 2009; ROSSMAN, 2000).

Figura 2 – Exemplo de reação do cloro no interior de uma tubulação de ferro



Fonte: Adaptado de Rossman (2000)

As reações de decaimento do cloro são caracterizadas pelas constantes cinéticas: k_b (K_{bulk}) - que caracteriza o decaimento do cloro no volume da massa de água; e k_w (K_{wall}) - que caracteriza o decaimento do cloro na parede da tubulação (PEREIRA, 2009). Desta forma, a constante de decaimento geral (K) do CRL é definida como a soma das constantes k_b e k_w (Equação 4) (POWELL et al., 2000):

$$K = K_b + K_w \quad (4)$$

O modelo mais amplamente utilizado em software de rede para análise do cloro é o decaimento de primeira ordem (Equação 5) no qual a taxa de decaimento na massa de água é proporcional à concentração de cloro restante (FISHER; KASTL; SATHASIVAN, 2011; HALLAM et al., 2002; POWELL et al., 2000):

$$\frac{dc}{dt} = -KC \quad (5)$$

Ou

$$C = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (6)$$

Onde: C é a concentração de cloro (mg Cl/L) no instante t (h); C_0 é a concentração de cloro no início da simulação; e K é o coeficiente de decaimento do cloro (h^{-1}).

2.6.2. Constante de decaimento do cloro na massa de água (k_b)

O decaimento do cloro na massa de água (volume de escoamento) é influenciado por diversos fatores, alguns dos que mais contribuem são: a dosagem de cloro aplicada (o aumento da dosagem, aumenta a velocidade do decaimento); a concentração de matéria inorgânica oxidável (fase rápida do decaimento); o teor de matéria orgânica (fase lenta do decaimento); o valor do pH da água (pH alto aumenta a velocidade do decaimento); e a temperatura da água (altas temperatura aumentam a velocidade do decaimento) (PEREIRA, 2009).

A constante de decaimento do cloro na massa de água (k_b) não está associada ao tipo de material utilizado nas tubulações, nos sistemas de armazenamento ou nas características hidráulicas do escoamento. Ela está relacionada apenas às reações

ocorridas no volume de escoamento, sendo influenciada exclusivamente pelas características químicas da água (TRIMBOLI, 2006).

Portanto, a qualidade da água e suas características físico-químicas influenciam diretamente nas reações que ocorrem na massa de água, sendo difícil realizar uma padronização do valor da constante cinética k_b para diferentes sistemas de distribuição, pois o parâmetro é muito ligado à natureza da água em questão. Entretanto, o valor de k_b pode ser estimado através de análises laboratoriais (MORAES, 2008).

O teste para estimar o valor da constante cinética k_b , é chamado de “teste de garrafa”. Nesse ensaio uma amostra de água é colocada em garrafas de vidro não reativas e realiza a análise da concentração de cloro em diferentes intervalos de tempo pré-definidos (POWELL et al., 2000).

2.6.3. Constante de decaimento do cloro na parede da tubulação (k_w)

O decaimento do cloro na parede da tubulação pode ser influenciado pelo tipo de material e diâmetro da tubulação, idade do tubo e a presença de camada de biofilme (PEREIRA, 2009). Quantificar o consumo do cloro residual livre na parede da tubulação é um desafio, pois normalmente as redes são formadas por tubulações com uma grande diversidade de diâmetros, de idades diferentes, e muitas redes não possuem o cadastro desses dados (MORAES, 2008).

A constante cinética de decaimento do cloro na tubulação (k_w) não pode ser medida diretamente na rede. Dessa forma, o processo de definição do k_w é realizado indiretamente, utilizando o processo de tentativa-erro, por comparação entre os resultados da simulação e os dados de calibração obtidos a partir da coleta de dados em campo (ROOSMAN, 2000).

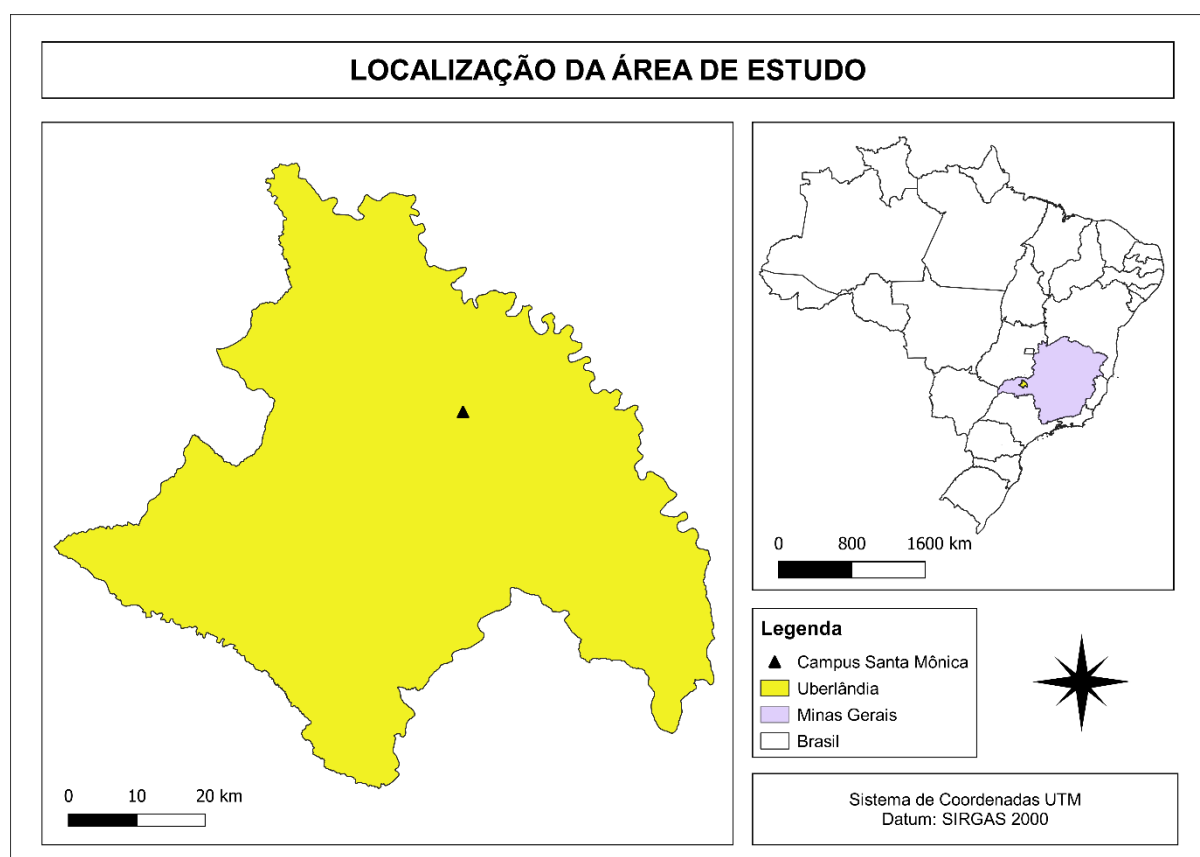
3. METODOLOGIA

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A Universidade Federal de Uberlândia (UFU) é uma instituição de ensino superior localizada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. Fundada em 1969, a UFU tem se destacado como uma das principais universidades federais do país.

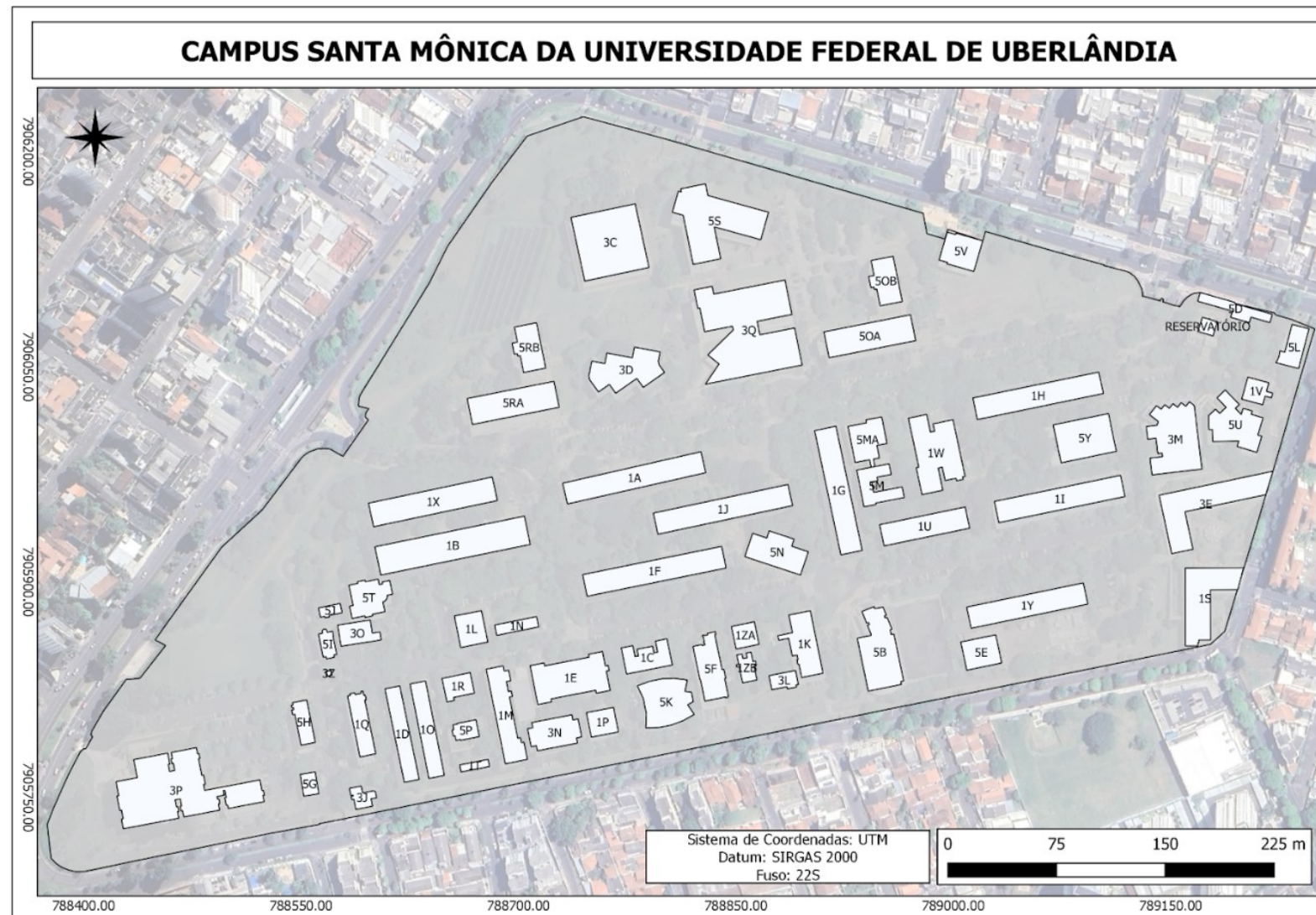
Entre seus diversos campi, destaca-se o Campus Santa Mônica (Figura 3), que ocupa uma área de 280.119 m². Esse campus abriga várias unidades acadêmicas, instalações administrativas e espaços de convivência, atendendo a uma comunidade de 14.064 pessoas, composta por 11.465 estudantes, 1.780 técnicos administrativos e 818 docentes (BARBOSA JÚNIOR, 2022). A delimitação da área do campus e suas edificações estão apresentadas na Figura 4.

Figura 3 - Mapa de localização do Campus Santa Mônica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 4 - Área e Edificações do Campus Santa Mônica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE ABASTECIMENTO DO CAMPUS SANTA MÔNICA

O abastecimento das edificações do campus Santa Mônica é realizado por meio de uma infraestrutura de armazenamento central de água potável. Essa estrutura conta com um reservatório inferior, dividido em quatro compartimentos interligados (Figura 5), conectados a quatro sistemas independentes de motobombas. Esses sistemas são responsáveis por bombear a água para três reservatórios superiores, conhecidos como "castelo" (Figura 6). O reservatório superior mais elevado é destinado exclusivamente à reserva para combate a incêndios, enquanto os outros dois (Reservatórios 1 e 2) abastecem, por gravidade, todas as edificações do campus. A capacidade total de armazenamento da central é de 350m³ de água.

A partir dos reservatórios 1 e 2 do castelo, a água era distribuída para o campus por meio de duas redes distintas. Entretanto, conforme descrito por Barbosa Júnior (2022), um problema em uma das redes levou a equipe de manutenção a interligá-las, permitindo que funcionassem como sistemas de backup mútuo. Contudo, devido à diferença de altura entre os dois reservatórios, o fluxo de água do reservatório 1 era interrompido pela maior pressão proveniente do reservatório 2.

Como consequência, a água armazenada no reservatório inferior permanecia estagnada por longos períodos, sendo liberada aleatoriamente pela equipe para renovação. Quando essa água era liberada para o campus, observava-se que a concentração de cloro nos blocos ficava abaixo do mínimo exigido pela legislação, resultado do decaimento do cloro no reservatório devido ao prolongado tempo de armazenamento.

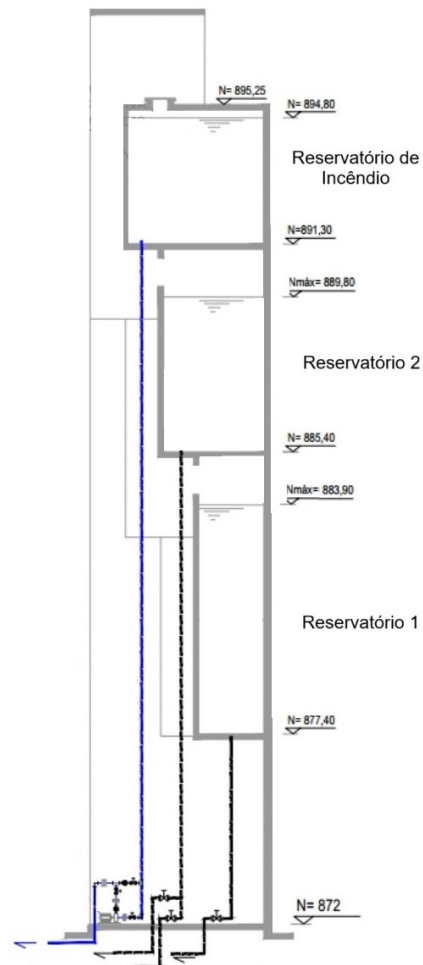
Para assegurar que a concentração de cloro permanecesse dentro dos padrões exigidos, foi estabelecido que o reservatório 2 abasteceria permanentemente as duas redes do campus, enquanto o reservatório 1 seria utilizado exclusivamente como backup, ativado apenas quando necessário.

Figura 5 - Reservatório central de distribuição - Reservatório inferior.



Fonte: Arquivo pessoal (2024)

Figura 6 - Reservatório central de distribuição - Reservatório castelo.

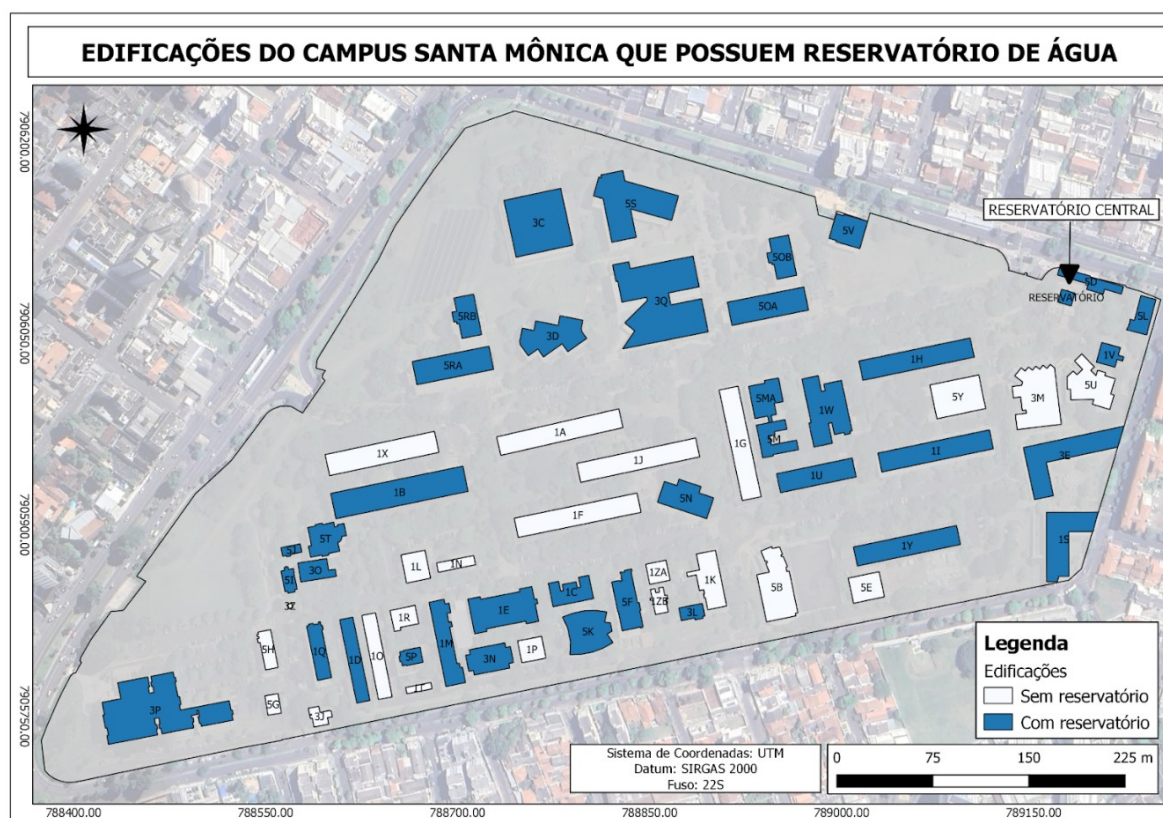


Fonte: Arquivo pessoal (2024) e adaptado de Barbosa Júnior (2022)

Na Figura 7 é apresentado o mapa temático com a localização da estrutura do Reservatório Central do campus e a identificação das 37 edificações que possuem reservatórios individuais de água potável, destinadas ao fornecimento de água para a população que utiliza o bloco. Com exceção do Bloco 5L (CIAEM), todos os demais são abastecidos pelo reservatório central.

A capacidade de armazenamento total dos reservatórios de cada um dos blocos está apresentada da Tabela 1. Portanto, a capacidade total de armazenamento de água nas edificações do Campus Santa Mônica é de 652.500 litros. Quando somada com a quantidade armazenada nos reservatórios centrais, obtêm-se um total de 1002,5m³ de água em todo o campus.

Figura 7 - Identificação das edificações que possuem reservatório



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 1 – Volume Total dos reservatórios do campus Santa Mônica

Bloco	Volume Total (L)	Bloco	Volume Total (L)	Bloco	Volume Total (L)
1B	6.000	3C	25.500	5K	20.000
1C	5.000	3D	20.000	5L	2.000
1D	4.000	3E	1.000	5M	33.000
1E	5.000	3L	1.000	5N	4.000
1H	6.000	3N	35.000	5OA	38.700
1I	6.000	3O	25.000	5OB	19.300
1M	6.000	3P	96.000	5P	3.000
1Q	8.000	3Q	15.000	5RA	60.000
1S	20.000	5D	1.000	5RB	30.000
1U	2.000	5F	15.000	5S	8.000
1V	5.000	5I	1.000	5T	10.000
1Y	5.000	5J	1.000	5V	10.000

Fonte: Adaptado de Barbosa Júnior (2022)

3.3. PARÂMETROS DE ANÁLISE

3.3.1. Método de determinação do cloro residual livre

O método adotado para realizar as medições da concentração do cloro residual livre foi método colorimétrico DPD (N, N-dietil-p-fenilenodiamina) preconizado pelo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023). Esse método consiste em uma reação química entre o cloro livre presente na amostra e o reagente DPD, resultando no desenvolvimento de uma cor rosada. A intensidade da cor é diretamente proporcional à concentração de cloro livre e pode ser medida utilizando um clorímetro digital.

Para a determinação do cloro livre nas amostras, foi utilizado o medidor de cloro livre portátil da marca MS TECNOPON, modelo CL-800, que possui um comprimento de onda de 520 nm, e faixa de trabalho de 0 a 5,0 ppm. A precisão de leitura do equipamento varia de $\pm 0,02$ ppm. A calibração do aparelho foi realizada conforme as orientações do fabricante.

3.3.2. Método de determinação dos parâmetros pH e temperatura

A determinação dos valores de pH das amostras foi realizada por meio do método potenciométrico, utilizando o medidor de pH portátil AK103 da marca AKSO. O equipamento foi calibrado utilizando as soluções tampões padrões de pH4, pH7 e pH10.

As medidas de temperatura das amostras durante o experimento foram determinadas pelo sensor de temperatura conectado ao aparelho de medição do pH.

3.4. MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

3.4.1. Modelagem Hidráulica

A qualidade da água em um sistema de abastecimento de água está intimamente relacionada às vazões e pressões dentro da rede, que são definidos pelos cálculos hidráulicos, desta forma, a modelagem hidráulica é um passo essencial para a simulação da qualidade da água (COELHO et. al., 2006).

Para realizar a simulação da qualidade da água no EPANET foi necessário a prévia modelagem hidráulica da rede de abastecimento do campus Santa Mônica, para isso, foi realizado um levantamento dos dados de demanda hídrica, como volume dos reservatórios, consumo diário dos hidrômetros que abastecem o campus, população atendida em cada nó da rede.

Além disso, também são necessários dados cadastrais do sistema (localização dos nós da rede, cotas das tubulações, comprimento, diâmetro e material da rede). Porém, a rede de abastecimento do campus é antiga, possui mais de 20 anos, e a Prefeitura Universitária (PREFE/UFU) não possui cadastro dos dados reais da rede de abastecimento. Desta forma, foi realizado um levantamento em campo junto com servidores da área de manutenção hidráulica do campus, dos dados conhecidos por eles para simular uma rede que mais se aproxima da realidade do campus universitário.

Foram identificadas algumas das principais caixas de passagem da rede de abastecimento do campus, e identificado o tipo de material e o diâmetro da tubulação. O georreferenciamento dos nós da rede foi realizado utilizando a Antena GPS S100 RTK da Polaris GNSS (Figura 8) do Laboratório de Topografia (LabTOPO) da Faculdade de Engenharia Civil da UFU.

Figura 8 – Georreferenciamento dos nós da rede com o GPS



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Para realizar a modelagem hidráulica e de qualidade da água foi utilizado o software livre EPANET 2.0, na versão em português do Brasil, traduzido pelo laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba - LENHS UFPB.

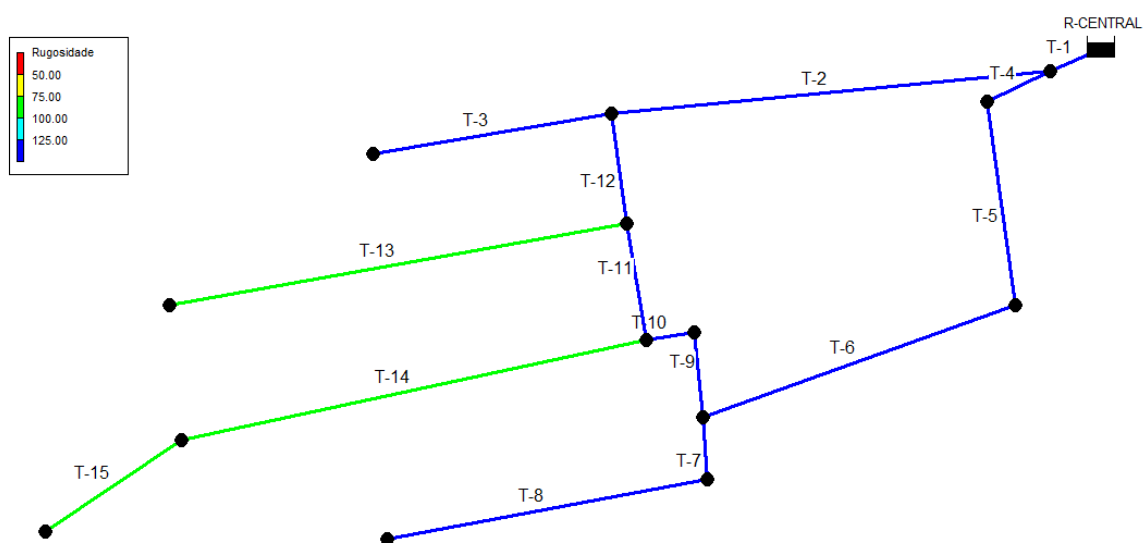
As informações dos trechos da rede principal obtidas a partir do levantamento realizado em campo estão apresentadas na Tabela 2. O valor do coeficiente C utilizado foi obtido por meio do levantamento realizado por Azevedo Netto (2015) para a fórmula de Hazen-Williams para tubulações com mais de 20 anos de idade.

Tabela 2 – Características dos trechos da rede

Trechos (EPANET)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Material	Coefficiente C - Hazen-Williams
1	33,29	100	PVC	132,5
2	266,06	100	PVC	132,5
3	146,39	100	PVC	132,5
4	42,29	100	PVC	132,5
5	124,09	100	PVC	132,5
6	203,99	100	PVC	132,5
7	34,19	50	PVC - Rosqueável	132,5
8	196,75	50	PVC - Rosqueável	132,5
9	60,65	100	PVC	132,5
10	14,21	100	PVC	132,5
11	65,01	100	PVC	132,5
12	73,48	100	PVC	132,5
13	284,48	75	Ferro fundido	90
14	291,17	75	Ferro fundido	90
15	99,31	75	Ferro fundido	90

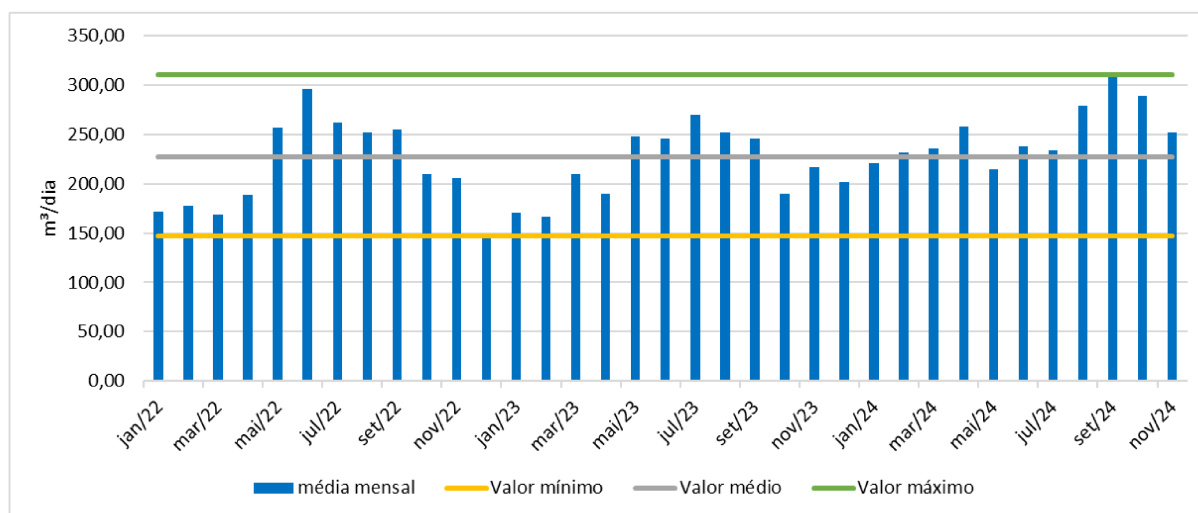
O modelo hipotético da rede de abastecimento do Campus Santa Mônica construído no software EPANET 2.0, a partir das informações obtidas da rede de distribuição de água pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 - Rede de distribuição de água no modelo construído no EPANET



Para determinar o padrão de consumo do campus, foram utilizados os dados do histórico de leitura diária dos dois hidrômetros que abastecem o Reservatório Central, dos anos de 2022 a 2024, disponibilizados pela DIRSU/PREFE. O gráfico com a vazão média consumida por mês está apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Histórico de consumo de água do Campus Santa Mônica



Fonte: Elaborado pelo autor.

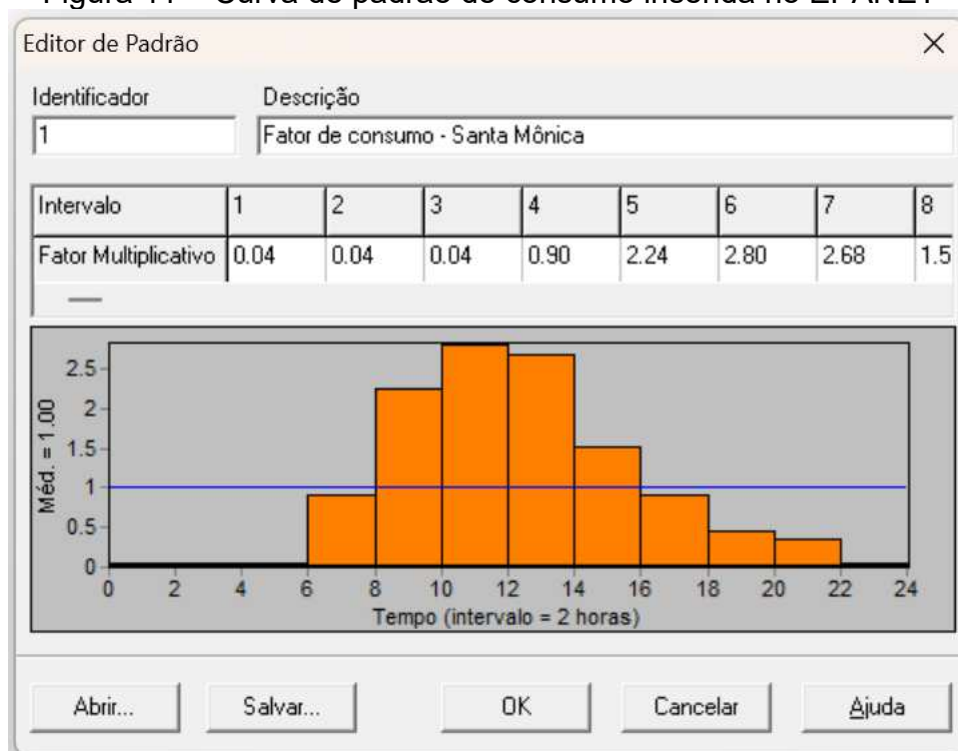
Na modelagem foram utilizados os dados de vazão do mês de maior consumo (setembro/2024), onde a média diária de consumo do sistema foi de 311,1 m³/dia, representando um consumo de 3,6 L/s.

Para determinar a curva de consumo, primeiramente foi realizado o monitoramento dos hidrômetros que abastecem o campus, porém ao analisar os dados de vazão da água entregue pelo DMAE, percebe-se que a vazão durante o período noturno é em média quase 5 vezes maior que no período diurno, não refletindo o valor real da vazão consumida no campus.

Desta forma, devido à ausência da curva de consumo do sistema de abastecimento do campus, e impossibilidade de instalação de um hidrômetro na saída do reservatório castelo, foi realizado o monitoramento do consumo de água dos dois blocos que possuem hidrômetros, Bloco 3P (Reitoria) e Bloco 3N (Faculdade de Engenharia Elétrica). As leituras dos hidrômetros foram realizadas a cada 2 horas, e a partir das vazões registradas na entrada dos reservatórios durante os períodos avaliados, foram calculados os consumos médios horários. Esses valores, divididos

pelo consumo médio diário, resultaram nos fatores multiplicativos, que foram considerados para determinar a curva padrão de consumo, os quais foram definidos como o padrão temporal de consumo inserido no programa EPANET para realizar as simulações. A curva teórica de consumo obtida está apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Curva de padrão de consumo inserida no EPANET



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a distribuição da vazão total do campus para os nós simulados da rede, foi utilizada a população média de cada edificação do campus, calculada por Barbosa Júnior (2022). Desta forma, considerando as edificações abastecidas por cada nó da rede e a taxa de ocupação populacional, foi possível distribuir a vazão total para cada um dos nós da rede.

O reservatório castelo de alimentação da rede, é de nível variado (RNV), mas como ele é constantemente abastecido pelo reservatório inferior, foi admitido que ele seria representado computacionalmente como reservatório de nível fixo (RNF).

A simulação hidráulica do sistema foi realizada, no modo Dinâmico, em que indicam as condições operacionais do sistema durante o período de 24 horas, com

intervalo de cálculo hidráulico de 1 hora, e intervalo de 5 minutos para o cálculo de qualidade. E a duração total da simulação foi de 240 horas.

Para realizar a calibração do modelo hidráulico foram necessários dados de pressões do sistema. Visto que no campus não existe sistema de medição e registro de pressões na rede, foi realizada uma campanha de medição da pressão utilizando um manômetro da marca Genebre, para pressões de 0 a 60 PSI, conectado nas torneiras de jardim. Foram selecionados quatro pontos da rede, onde a pressão foi aferida a cada 2 (duas) horas. Os valores medidos foram acrescidos de 0,40 m.c.a. para compensar a elevação das torneiras em relação ao nível do terreno,

Os dados obtidos foram inseridos no EPANET para realizar a calibração do modelo. Após a calibração, o software emite um relatório de calibração informando os erros estatísticos entre os dados de medição e os valores simulados, para cada local de medição e para a rede como um todo.

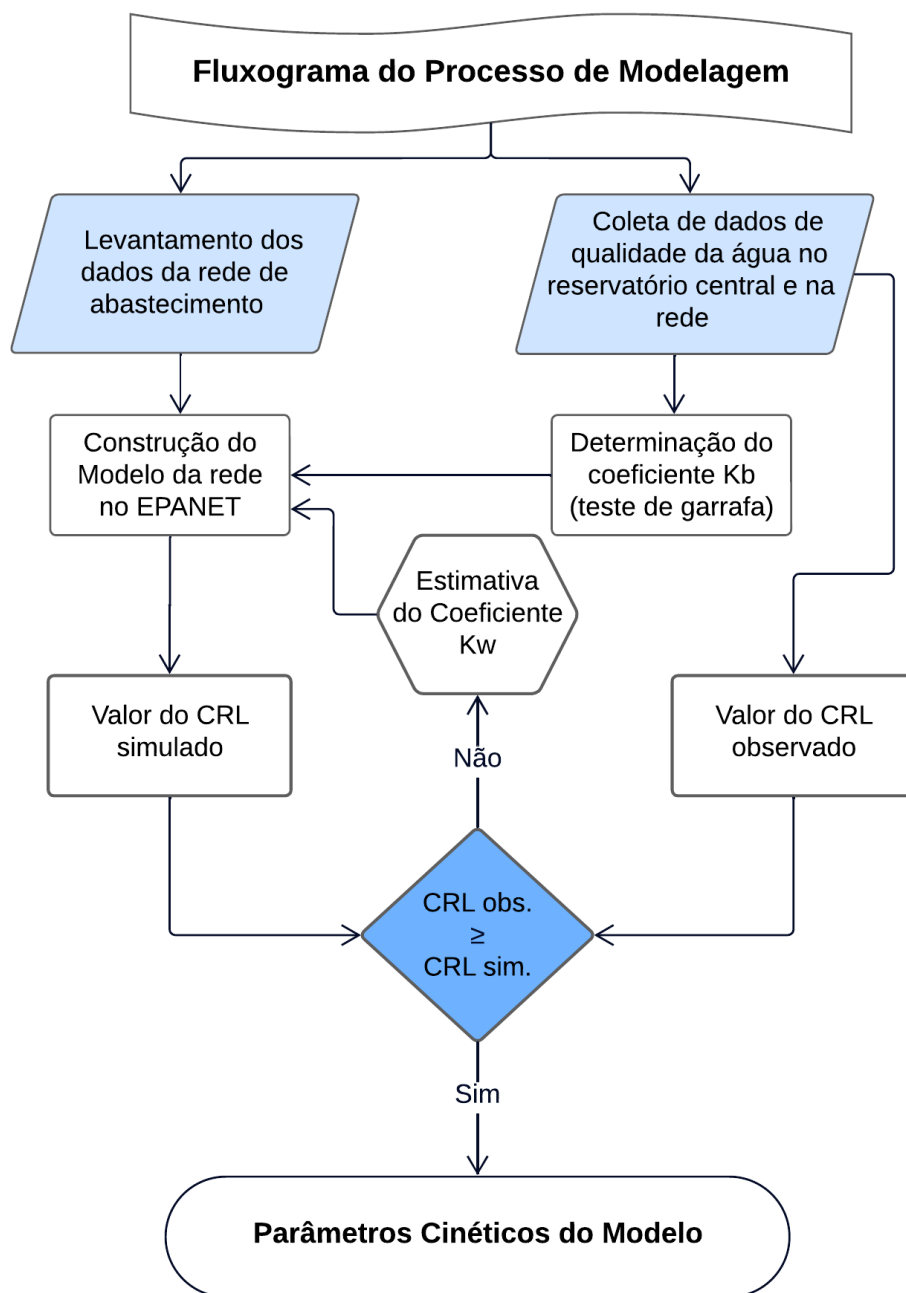
Os dados estatísticos fornecidos para cada local de medição são: número total de observações, a média dos valores observados, a média dos valores simulados, o erro médio absoluto entre cada valor observado e simulado, e o desvio padrão (raiz do erro quadrático médio) entre o observado e o valor simulado. Esses dados estatísticos também são calculados para a rede como um todo, utilizando todas as medições e erros do modelo.

Esse relatório também apresenta o valor da correlação entre o valor médio observado e o valor médio simulado em cada local (ROSSMAN, 2000).

3.4.2. *Modelagem da qualidade da água*

Para o desenvolvimento do modelo de qualidade da água, é necessária a determinação dos coeficientes cinéticos de decaimento do CRL na massa de água (k_b) e na parede da tubulação (k_w). Na Figura 12 está apresentado um esquema das principais etapas para a determinação desses parâmetros, que serão detalhados nos tópicos a seguir.

Figura 12 – Etapas para a determinação dos coeficientes cinéticos de decaimento do cloro



Fonte: Adaptado de Leal (2012)

3.4.3. Determinação do coeficiente cinético de decaimento na massa de água (k_b) do reservatório central e da rede de distribuição

Para determinar o coeficiente cinético (k_b) e o modelo que melhor descreve o decaimento do cloro residual livre na massa de água do reservatório central e na rede

de distribuição foram realizados ensaios laboratoriais chamados de "teste de garrafa". Por se tratar de um teste que não possui um modelo de execução pré-definido, foi realizado um estudo dos procedimentos citados por diversos autores (DASSAN, 2014; POWELL et al., 2000; SANTOS, 2017) e definido o roteiro apresentado a seguir.

1. Preparo das vidrarias:

Para a coleta das amostras foram utilizados frascos de vidro âmbar de 1L, para proteger as amostras da exposição solar. Para que as vidrarias estivessem livres de demanda por cloro, foi seguido o procedimento descrito por Powell et al. (2000), onde após a lavagem, as vidrarias foram preenchidas com água destilada e dosada a 10 mg/L de cloro livre usando solução concentrada de hipoclorito de sódio 12% e deixadas em repouso por 24 horas. Em seguida foram esvaziadas, enxaguadas com água destilada e deixadas secar.

2. Coleta das amostras:

As amostras de água das tubulações da rede, foram coletadas nas torneiras de jardim, que são conectadas diretamente na rede de distribuição do campus. Durante a coleta, foi realizada a ambientação dos frascos com a água do local, e eles foram completamente cheios e hermeticamente fechados.

3. Análise das amostras:

A medição inicial do Cloro Residual Livre foi realizada no local da coleta das amostras. Após a coleta, as amostras foram armazenadas em caixas térmicas e transportadas rapidamente para o Laboratório de Qualidade da Água da UFU, localizado no Bloco 5J do Campus Santa Mônica, onde foram realizadas as análises.

Tendo em vista que os coeficientes de reação em massa tendem a aumentar com o aumento da temperatura, realizar o teste a diferentes temperaturas ajuda a avaliar com mais precisão como esse coeficiente varia com as mudanças sazonais. Desta forma, no laboratório, as amostras foram separadas em duas incubadoras. As temperaturas foram definidas com base na média histórica dos meses de maior e menor temperatura registradas durante o monitoramento anual da água no reservatório do campus, sendo a maior 28°C e a menor 22°C.

Foram definidos intervalos de tempo específicos para a determinação do cloro residual livre nas amostras (Tabela 3).

Tabela 3 – Intervalos de tempo dos testes de garrafa

Ensaio	Duração	Intervalo
1		0min
2		1h
3		2h
4		3h
5		6h
6	7 dias (168h)	12h
7		24h
8		48h
9		72h
10		96h
11		144h
12		168h

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4. Determinação do coeficiente de decaimento:

Após a conclusão do teste de garrafa, o coeficiente de decaimento k_b foi determinado pelo método do gráfico, conforme estabelecido por ROSSMAN (2000), para reação de primeira ordem, que consiste em plotar um gráfico do logaritmo natural de (C_t/C_0) em função do tempo, que resulta em uma linha reta, onde C_t representa a concentração de cloro no tempo t e C_0 é a concentração inicial (tempo zero). O valor de k_b é determinado a partir da inclinação dessa linha.

3.4.4. Determinação do coeficiente cinético de decaimento na parede da tubulação (k_w)

Para estimar o valor do k_w , coeficiente de decaimento na parede da tubulação (comprimento/tempo), foi utilizado o método de tentativa e erro.

Primeiramente adotou-se k_w igual a zero, e com o uso da constante k_b , obtida pelo teste de garrafa realizado no laboratório, foi utilizado o modelo hidráulico no EPANET, para simular o valor do Cloro Residual Livre (CRL).

O critério de calibração dos parâmetros do modelo foi a redução do resíduo (diferença) entre o valor de CRL simulado e observado. Se o valor do CRL simulado estiver menor que o CRL observado por meio de análises de ponta de rede, adota-se k_w igual a zero. E sempre que o CRL simulado for superior ao observado, estima-se valores de k_w até que o CRL simulado seja menor ou igual que o valor observado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os dados do monitoramento de qualidade da água obtidos em campo, durante o período de janeiro a novembro de 2024, os dados referentes à modelagem hidráulica da rede do Campus Santa Mônica, e os resultados do ajuste dos parâmetros cinéticos de decaimento do Cloro Residual Livre, obtidos a partir do teste de garrafa, realizado durante os meses de outubro a dezembro de 2024.

4.1. Resultados do levantamento dos dados de qualidade da água do Campus Santa Mônica

Foram obtidos os dados do monitoramento da concentração de cloro residual realizado pela UFU, no ano de 2024. A partir desses dados, obteve-se os valores máximo, mínimo e médio de CRL observados nas leituras das amostras nos pontos de entrada da água fornecida pelo DMAE/Uberlândia no Reservatório Central, para cada um dos meses analisados (Tabela 4).

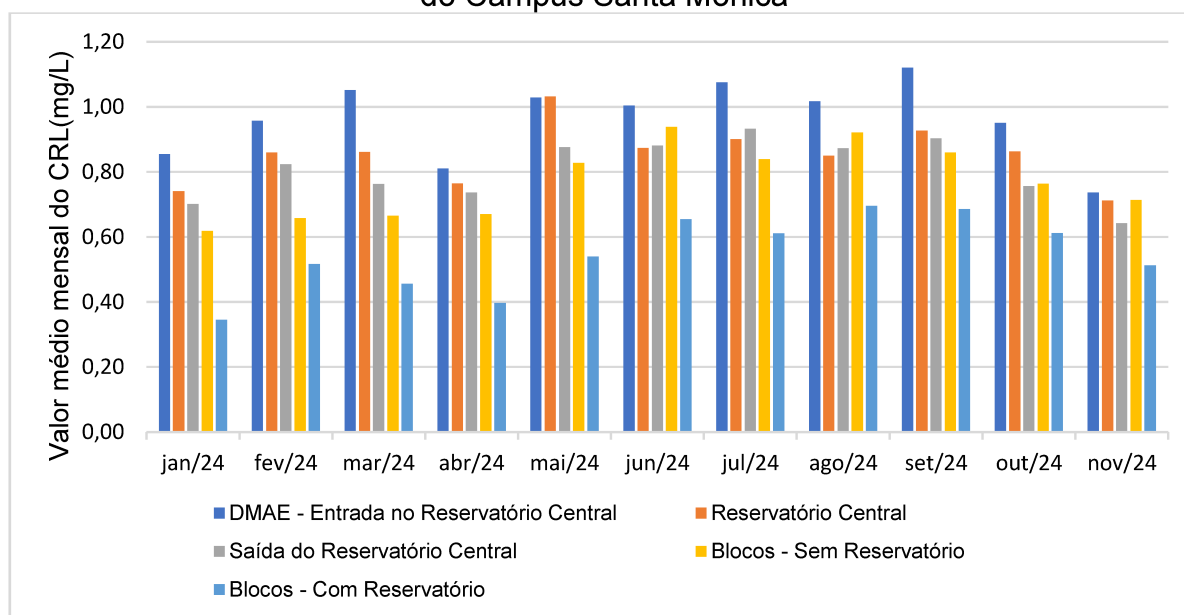
Os valores apresentados na Tabela 4 demonstram que durante o período analisado, a água fornecida pelo DMAE manteve-se dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, variando de 0,27mg/L a 1,62mg/L, e o valor médio observado para todo o período analisado foi de 0,96mg/L.

Tabela 4 - Variação da Concentração de Cloro Residual Livre do DMAE

Cloro Residual Livre nas amostras DMAE			
Período	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Médio
jan/24	1,62	0,27	0,85
fev/24	1,33	0,60	0,96
mar/24	1,59	0,56	1,05
abr/24	1,28	0,38	0,81
mai/24	1,30	0,77	1,03
jun/24	1,40	0,72	1,00
jul/24	1,41	0,67	1,08
ago/24	1,29	0,84	1,02
set/24	1,50	0,88	1,12
out/24	1,60	0,58	0,95
nov/24	1,08	0,43	0,74
MÉDIA	1,40	0,61	0,96

Com relação ao monitoramento do CRL no campus Santa Mônica, foram realizadas diariamente, pela Diretoria de Sustentabilidade (DIRSU), a análise da concentração do Cloro dentro do Reservatório Central, na torneira após a saída do reservatório, e nas torneiras internas dos blocos. Os valores obtidos nas análises dos blocos foram separados em dois grupos, os que possuem reservatório próprio e os que são alimentados diretamente pelo Reservatório Central. Na Figura 13 foram apresentados os valores médios mensais de cada grupo de análise.

Figura 13 – Representação gráfica dos valores médios de CRL em pontos distintos do Campus Santa Mônica



As amostras das torneiras internas dos Blocos são coletadas para análise após um período de 2 minutos de escoamento, a fim de esgotar a água estagnada na tubulação do ponto de coleta. Na Tabela 5 foram apresentados os valores máximo, mínimo e médio do CRL, e o desvio padrão da média para os blocos que não possuem reservatório individual. Destaca-se que para essas edificações que os valores mínimos e máximos encontrados dentro de cada mês estão de acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021.

Tabela 5 – Variação do CRL nos blocos sem reservatório próprio

Blocos - Sem Reservatório												
CRL	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	MÉDIA
Máximo	0,77	0,89	0,90	1,07	1,06	1,09	0,98	1,08	1,11	0,99	0,96	0,99
Médio	0,62	0,66	0,67	0,67	0,83	0,94	0,84	0,92	0,86	0,76	0,71	0,77
Mínimo	0,22	0,36	0,22	0,23	0,45	0,62	0,57	0,50	0,40	0,26	0,22	0,37
Desvio Padrão	0,14	0,13	0,18	0,18	0,15	0,11	0,11	0,12	0,15	0,15	0,16	0,14

Os valores obtidos para os blocos que possuem reservatório, foram apresentados na Tabela 6. Observa-se que os valores máximo e médio em todos os meses estão de acordo com legislação. Entretanto, na maioria dos meses foram encontrados valores abaixo do mínimo recomendado de 0,20mg/L, o que evidencia a ação do decaimento do cloro nos reservatórios prediais.

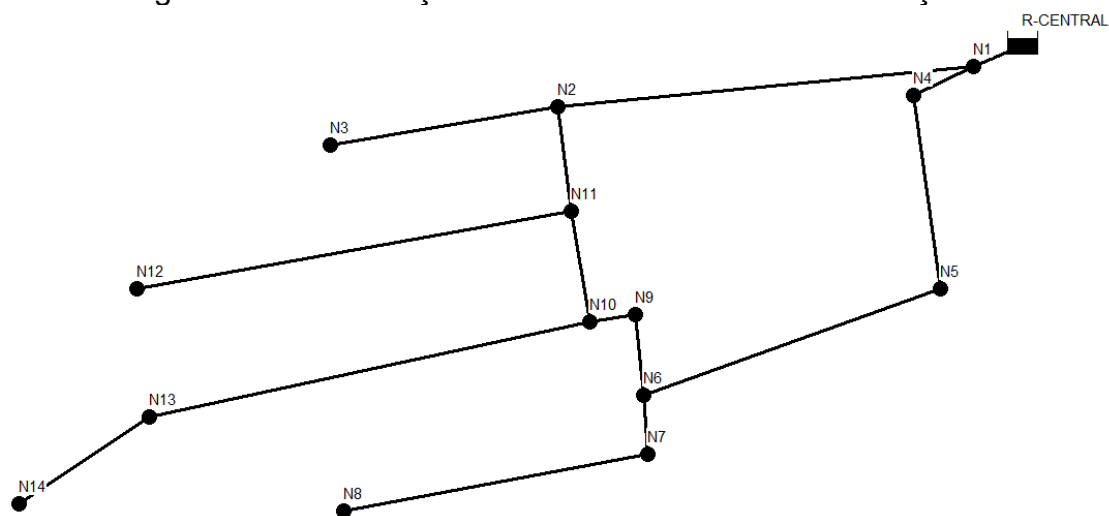
Tabela 6 – Variação do CRL nos blocos com reservatório próprio

Blocos - Com Reservatório												
CRL	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	MÉDIA
Máximo	0,76	0,88	0,80	0,85	0,96	1,03	0,97	1,02	1,04	0,90	1,08	0,94
Médio	0,34	0,52	0,46	0,40	0,54	0,65	0,61	0,70	0,69	0,61	0,51	0,55
Mínimo	0,01	0,17	0,10	0,06	0,06	0,17	0,13	0,04	0,21	0,24	0,10	0,12
Desvio Padrão	0,22	0,20	0,22	0,25	0,31	0,26	0,24	0,22	0,24	0,19	0,27	0,24

4.2. Modelagem hidráulica

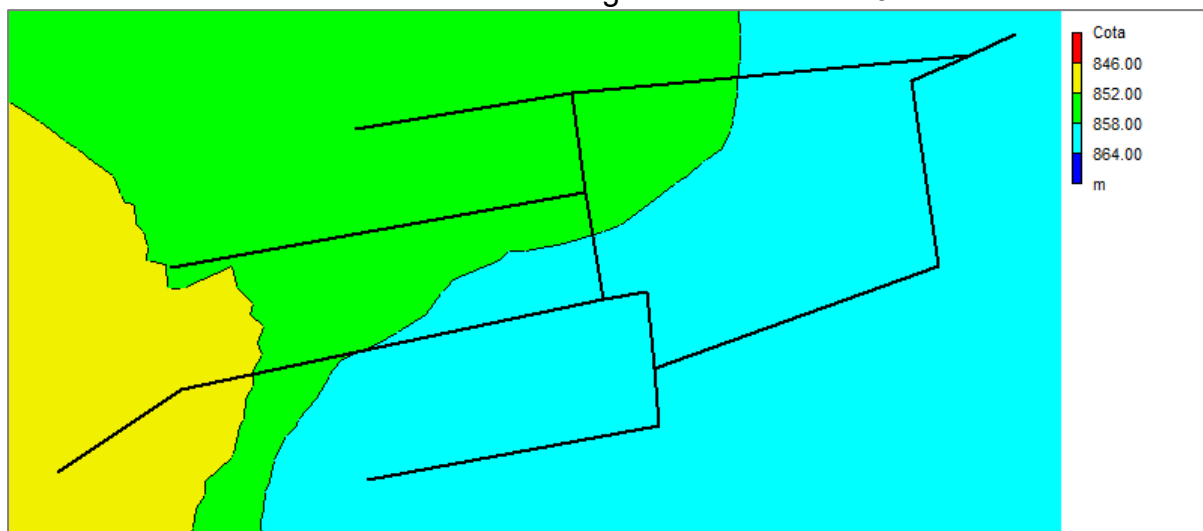
A modelagem hidráulica do sistema de distribuição de água permite simular o comportamento da água na rede de distribuição sob diferentes condições. A dinâmica hidráulica influencia diretamente a propagação e o transporte de substâncias dentro da rede, como cloro. A simulação hidráulica da rede do campus, realizada no *software* EPANET 2.0, serviu como a base sobre a qual as simulações de qualidade foram feitas. Na Figura 14 estão apresentadas as localizações dos principais nós do sistema de distribuição do campus.

Figura 14 – Localização dos nós do sistema de distribuição



A partir do georreferenciamento dos nós da rede do Campus Santa Mônica foi gerado no EPANET o mapa de isolinhas de cotas topográficas da rede (Figura 15), com a classificação da variação altimétrica por cores com intervalos iguais. As cotas altimétricas da área de estudo variam entre 848 e 864 m.

Figura 15 – Gráfico de isolinhas das cotas topográficas do sistema de abastecimento de água no EPANET 2.0



Como o modelo incide sobre um sistema existente, é necessária a sua calibração, por meio da aferição e validação dos resultados obtidos com o modelo. A calibração do modelo tem como objetivo aproximá-lo o máximo possível do sistema real, e verificar até que ponto as medidas se aproximam da realidade, de modo a permitir que a sua utilização possa ser feita com confiança suficiente para a análise pretendida (COELHO et. al., 2006).

Para a validação do modelo foi realizado o monitoramento das pressões nos pontos N1, N3, N12 e N14, em diferentes horários. A Tabela 7 apresenta um comparativo entre as pressões máximas e mínimas, obtidas pelo manômetro e as pressões obtidas da simulação, calculadas para cada ponto. A porcentagem da diferença entre os valores máximo e mínimo encontrados, variou de 3% a 10%, conforme apresentado na tabela.

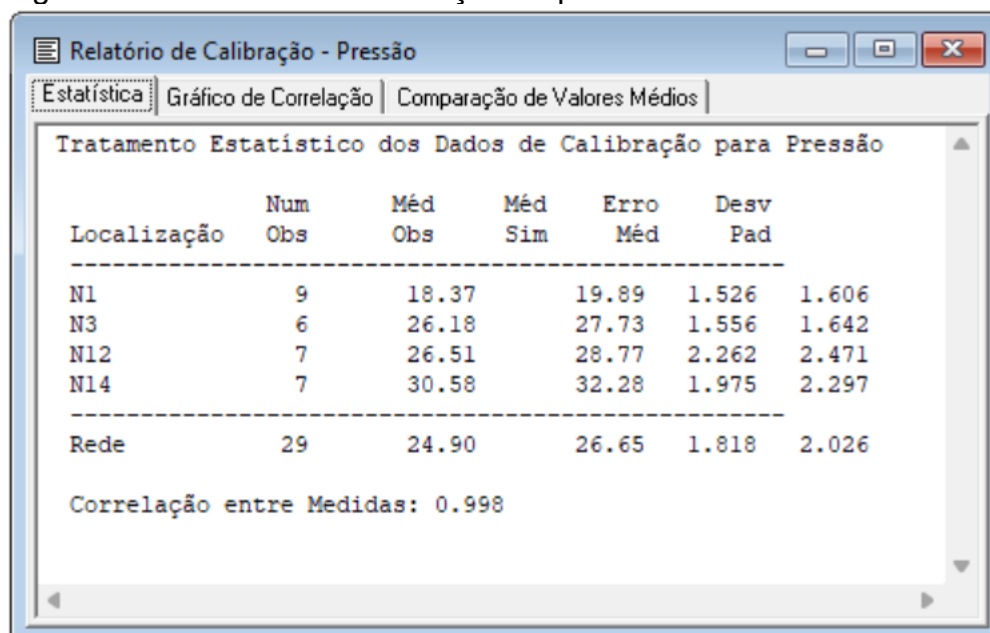
Tabela 7 – Comparativo entre as pressões medidas e simuladas

ID	Pressões - Manômetro		Pressões - Simulação		Diferença Manômetro x Simulação	
	Máx (m.c.a.)	Mín (m.c.a.)	Máx (m.c.a.)	Mín (m.c.a.)	Máx (%)	Mín (%)
N1	19,73	17,62	20,25	19,63	3%	10%
N3	27,82	25,01	28,63	26,70	3%	6%
N12	28,52	25,01	29,98	27,41	5%	9%
N14	32,04	28,52	33,30	30,89	4%	8%

Os dados obtidos foram inseridos no EPANET na seção de calibração. Na Figura 16 está apresentado o relatório estatístico de calibração emitido pelo software, com a comparação entre os valores reais e os valores simulados pelo modelo nos respectivos pontos, através da apresentação dos dados estatísticos erro médio absoluto, desvio padrão e correlação entre as médias.

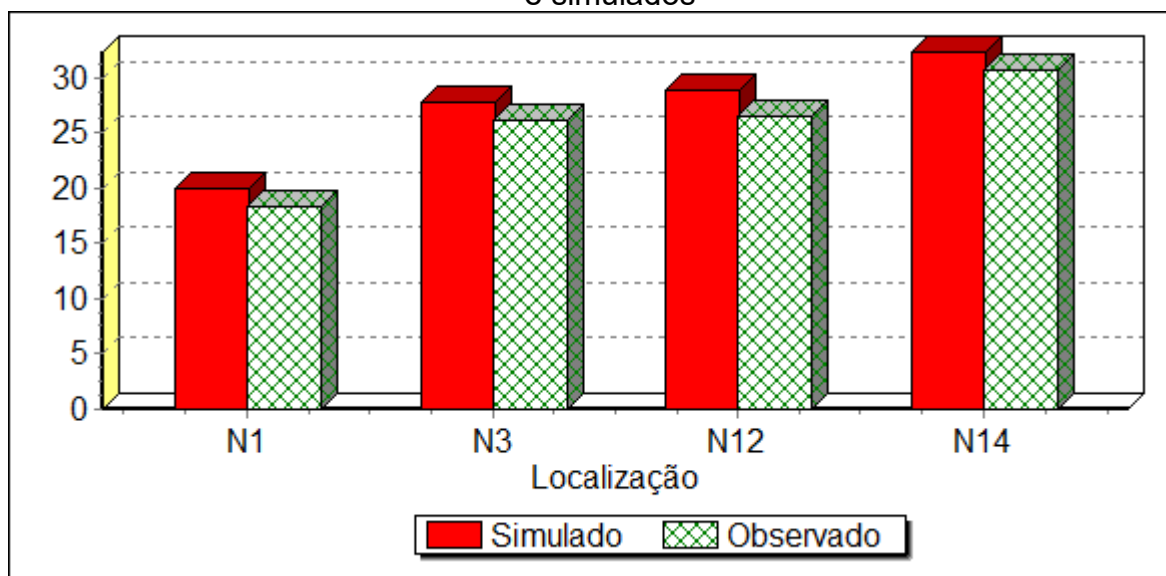
Como a correlação entre as médias dos valores observados e simulados é de 0.998, pode-se considerar que o modelo reflete o comportamento da pressão na rede de distribuição em estudo.

Figura 16 – Relatório de calibração de pressão do sistema no EPANET



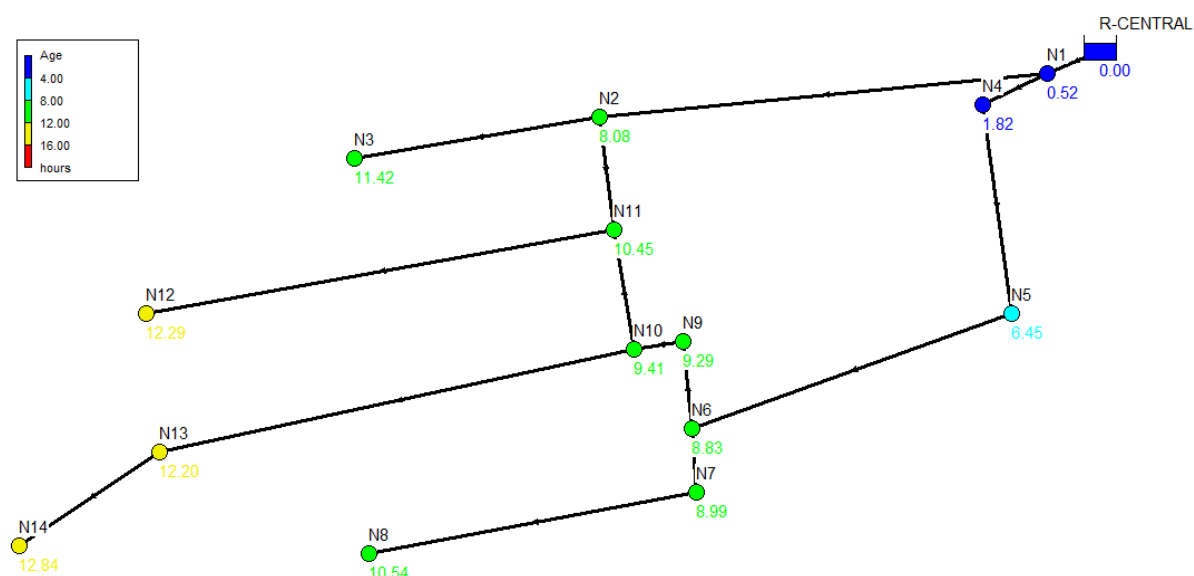
Também foi gerado pelo *software* o gráfico de comparação entre os valores médios de pressão observados e simulados (Figura 17).

Figura 17 – Gráfico de comparação entre os valores médios de pressão observados e simulados



Segundo Pierezan (2009) a duração do experimento para calibração dos coeficientes cinéticos de decaimento do cloro deve englobar o tempo de residência da água na rede, dessa forma, verificou-se pelo modelo hidráulico que a idade máxima da água na rede foi de 12,84h (Figura 18). Assim, embora o teste de decaimento tenha sido realizado para um período maior, para a modelagem da qualidade da água as constantes foram estimadas considerando apenas as primeiras 24 horas do teste de garrafa.

Figura 18 – Idade máxima, em horas, simulada na rede



4.3. Modelagem da Qualidade da água

4.3.1. *Determinação do coeficiente cinético de decaimento no volume do escoamento (k_b)*

A determinação do coeficiente cinético decaimento, para um modelo de 1ª ordem, no volume do escoamento foi baseada no teste da garrafa, através da determinação das concentrações de CRL em amostras coletadas em pontos finais dos trechos, em duas campanhas para cada ponto, durante o mês de outubro de 2024, sendo a primeira realizada antes do início das chuvas, e a segunda após o início do período chuvoso.

As amostras foram coletadas em 5 pontos do sistema de abastecimento do Campus Santa Mônica, sendo um no ponto de chegada da água fornecida pelo DMAE no reservatório central, e os demais nas torneiras de jardim dos Nós N1, N3, N12 e N14 da rede de distribuição.

As amostras foram submetidas a duas temperaturas de incubação (22°C e 28°C), para analisar o comportamento das constantes cinéticas sob diferentes temperaturas.

4.3.1.1. *Teste de decaimento do CRL das amostras do DMAE*

Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os dados obtidos com o teste de garrafa das amostras do DMAE, sob temperatura de 28°C, da primeira e segunda coleta, respectivamente. E nas Tabelas 10 e 11, os dados do teste sob temperatura de 22°C, da primeira e segunda coleta, respectivamente.

Tabela 8 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do DMAE à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	07:55	0	0,00	0,98	28,80
2	08/out.	09:07	72	1,20	0,93	28,80
3	08/out.	09:52	117	1,95	0,93	28,50
4	08/out.	11:05	190	3,17	0,93	28,20
5	08/out.	14:05	370	6,17	0,86	28,10
6	08/out.	19:52	717	11,95	0,78	28,10
7	09/out.	08:42	1.487	24,78	0,63	28,10
8	10/out.	08:33	2.918	48,63	0,48	28,00
9	11/out.	08:08	4.333	72,22	0,33	28,00
10	12/out.	09:15	5.840	97,33	0,28	28,00
11	14/out.	09:00	8.705	145,08	0,16	28,10
12	15/out.	08:44	10.129	168,82	0,13	28,10

Tabela 9 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do DMAE à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	09:46	0	0,00	0,77	25,30
2	22/out.	11:05	79	1,32	0,72	26,30
3	22/out.	13:39	233	3,88	0,65	27,30
4	22/out.	15:08	322	5,37	0,62	27,50
5	22/out.	17:21	455	7,58	0,60	27,80
6	22/out.	21:05	679	11,32	0,56	27,90
7	23/out.	09:11	1.405	23,42	0,43	27,80
8	24/out.	09:53	2.887	48,12	0,30	28,00
9	25/out.	09:56	4.330	72,17	0,21	28,00
10	26/out.	09:35	5.749	95,82	0,15	27,80
11	28/out.	09:38	8.632	143,87	0,05	28,20
12	29/out.	09:42	10.072	167,87	0,04	28,20

Tabela 10 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do DMAE à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	07:55	0	0,00	1,01	29,10
2	08/out.	09:02	67	1,12	0,95	27,80
3	08/out.	09:49	114	1,90	0,93	25,70
4	08/out.	11:03	188	3,13	0,91	24,60
5	08/out.	14:02	367	6,12	0,89	23,20
6	08/out.	19:51	716	11,93	0,87	22,50
7	09/out.	08:36	1.481	24,68	0,80	22,50
8	10/out.	08:29	2.914	48,57	0,65	22,60
9	11/out.	07:58	4.323	72,05	0,65	22,70
10	12/out.	09:10	5.835	97,25	0,57	22,50
11	14/out.	08:56	8.701	145,02	0,54	22,60
12	15/out.	08:35	10.120	168,67	0,51	22,50

Tabela 11 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do DMAE à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	09:42	0	0,00	0,77	25,30
2	22/out.	11:00	78	1,30	0,73	24,00
3	22/out.	13:34	232	3,87	0,71	23,20
4	22/out.	15:05	323	5,38	0,69	22,80
5	22/out.	17:18	456	7,60	0,64	22,80
6	22/out.	21:00	678	11,30	0,62	22,60
7	23/out.	09:05	1403	23,38	0,54	22,70
8	24/out.	09:45	2883	48,05	0,43	22,60
9	25/out.	09:52	4330	72,17	0,36	22,50
10	26/out.	09:30	5748	95,80	0,31	22,60
11	28/out.	09:33	8631	143,85	0,23	22,40
12	29/out.	09:36	10071	167,85	0,20	23,10

Para determinar o valor do coeficiente cinético de decaimento do cloro no volume do escoamento (k_b), foi seguido o procedimento estabelecido por ROSSMAN (2000). Os parâmetros do modelo foram determinados por meio da regressão linear

com o auxílio do software R. As estimativas dos parâmetros, os valores dos coeficientes de determinação (R^2), o Intervalo de Confiança (IC) e o p-valor do teste ANOVA estão mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultado do k_b das amostras do DMAE

Local	Temp.	Coleta	k_b (dia ⁻¹)	Média	Desvio Padrão	R^2	IC (95%)		ANOVA p-valor
							Limite inferior	Limite superior	
DMAE	28°C	1 ^a	-0,4176	-0,4909	0,104	0,9934	-0,4569	-0,3784	1,22E-06
		2 ^a	-0,5641			0,9727	-0,6726	-0,4555	4,21E-05
DMAE	22°C	1 ^a	-0,1855	-0,2692	0,118	0,8581	-0,2723	-0,0988	2,72E-03
		2 ^a	-0,3528			0,9582	-0,4375	-0,2681	1,23E-04

Para a temperatura de incubação de 28°C, foi estimado para a 1^a coleta um coeficiente cinético de decaimento k_b igual a -0,4176 d⁻¹. E considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de -0,3784 d⁻¹ e inferior de -0,4569 d⁻¹. Para a 2^a coleta, o coeficiente k_b aumentou, assumindo o valor de -0,5641 d⁻¹, e um IC com limite superior de -0,4555 d⁻¹ e limite inferior -0,6726 d⁻¹. Observa-se pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) que os dois modelos se ajustaram bem aos dados observados à 28°C.

Com relação a temperatura de 22°C, obteve-se que um coeficiente k_b igual a -0,1855 d⁻¹, e o IC ficou entre o limite superior de -0,0988 d⁻¹ e inferior de -0,2723 d⁻¹ para a 1^a coleta. Na 2^a coleta obteve-se o coeficiente k_b igual a -0,3528 d⁻¹, e o IC ficou entre o limite superior de -0,2681 d⁻¹ e -0,4375 d⁻¹. Com relação ao coeficiente de determinação (R^2), o modelo de decaimento gerado pela 2^a coleta demonstrou um melhor ajuste aos dados observados à 22°C.

Comparando os resultados dos modelos para as duas temperaturas analisadas, nota-se que a temperatura menor resultou em um valor menor de coeficiente de decaimento no volume da massa de água.

Com a aplicação da ANOVA no modelo de regressão, obteve-se para todas as amostras um p-valor menor que 0,05. Portanto, com significância de 5%, considera-se que as constantes são adequadas para explicar o decaimento do cloro em função

do tempo. Porém, para a validação dos modelos, é necessário verificar se os resíduos seguem os pressupostos do modelo de regressão, ou seja, tenham média zero, sejam normalmente distribuídos, independentes e possuam variância constante. Na Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos testes.

Tabela 13 – Resultados dos testes dos resíduos das amostras do DMAE

Validação do modelo - Resíduos								
Temp.	Coleta	Média zero	Teste de Shapiro-Wilk		Teste de Breusch- Pagan		Teste de Dubin Watson	
			p-valor	Distribuição normal	p-valor	Variância constante	p-valor	Independência
28°C	1ª	Sim	0,7349	Sim	0,1146	Sim	0,6325	Sim
	2ª	Sim	0,8461	Sim	0,2030	Sim	0,0007	Não
22°C	1ª	Sim	0,2034	Sim	0,2878	Sim	0,0096	Não
	2ª	Sim	0,9280	Sim	0,9782	Sim	0,1776	Sim

Com relação à temperatura de 28°C observa-se que somente a 1ª coleta atendeu a todos os pressupostos do modelo de regressão, e embora o modelo da 2ª coleta tenha se mostrado adequado, ele não atendeu ao quesito de independência dos resíduos. Para a temperatura de 22°C, o modelo da 2ª coleta se mostrou válido, atendendo a todos os pressupostos, já o modelo da 1ª coleta também não atendeu ao quesito de independência dos resíduos.

É mostrado na Tabela 14 os resultados das análises do pH das amostras no início e ao final do teste de garrafa. Verifica-se que houve uma pequena diminuição do valor do pH para as duas temperaturas, o que pode ser explicado pelo consumo do hipoclorito (ClO^-) durante o processo de decaimento, e consequentemente a liberação do íon H^+ no meio, diminuindo pH das amostras (ROSSI-FEDELE et. al. 2011).

Tabela 14 – Resultado da análise de pH das amostras do DMAE

Local	Coleta	28°C		22°C	
		pH - inicial	pH - final	pH - inicial	pH - final
DMAE	1ª	8,07	7,66	8,05	7,72
	2ª	7,54	7,16	7,53	7,18

4.3.1.2. Teste de decaimento do CRL das amostras dos pontos da rede à 28°C

A seguir estão apresentados os resultados obtidos com o teste de decaimento do CRL, realizado sob a temperatura de 28°C para os pontos N1 (Tabelas 15 e 16), N3 (Tabelas 17 e 18), N12 (Tabelas 19 e 20) e N14 (Tabelas 21 e 22), da primeira e segunda coleta, respectivamente.

Tabela 15 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N1 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	07:38	0	0,00	0,59	32,30
2	08/out.	09:13	93	1,55	0,58	30,30
3	08/out.	09:58	138	2,30	0,54	29,50
4	08/out.	11:12	212	3,53	0,52	28,80
5	08/out.	14:12	392	6,53	0,49	28,20
6	08/out.	19:58	645	10,75	0,37	28,20
7	09/out.	08:50	1.510	25,17	0,21	28,10
8	10/out.	08:39	2.939	48,98	0,06	28,10
9	11/out.	08:13	4.353	72,55	0,01	28,10
10	12/out.	09:20	5.860	97,67	0,00	28,00

Tabela 16 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N1 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	07:43	0	0,00	0,90	24,80
2	22/out.	09:01	78	1,30	0,86	25,90
3	22/out.	10:12	149	2,48	0,85	26,70
4	22/out.	13:46	363	6,05	0,82	27,70
5	22/out.	16:06	503	8,38	0,82	27,80
6	22/out.	20:35	772	12,87	0,77	28,10
7	23/out.	08:35	1.373	22,88	0,71	27,70
8	24/out.	09:10	2.848	47,47	0,62	28,00
9	25/out.	09:23	4.301	71,68	0,54	28,10
10	26/out.	08:53	5.711	95,18	0,47	28,00
11	28/out.	08:56	8.594	143,23	0,33	28,30
12	29/out.	08:46	10.034	167,23	0,30	27,80

Tabela 17 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do Ponto N3 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	08:39	0	0,00	0,80	28,50
2	08/out.	09:17	38	0,63	0,79	28,30
3	08/out.	10:05	86	1,43	0,79	28,20
4	08/out.	11:18	159	2,65	0,78	28,10
5	08/out.	14:19	302	5,03	0,76	28,20
6	08/out.	20:09	604	10,07	0,75	28,20
7	09/out.	09:02	1.468	24,47	0,68	28,10
8	10/out.	08:51	2.897	48,28	0,59	28,10
9	11/out.	08:20	4.306	71,77	0,57	28,10
10	12/out.	09:33	5.819	96,98	0,51	28,10
11	14/out.	09:15	8.681	144,68	0,41	28,10
12	15/out.	08:57	10.103	168,38	0,41	28,10

Tabela 18 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do Ponto N3 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	07:51	0	0,00	0,87	24,70
2	22/out.	09:08	77	1,28	0,88	25,80
3	22/out.	10:20	149	2,48	0,82	26,30
4	22/out.	13:54	363	6,05	0,84	27,40
5	22/out.	16:14	503	8,38	0,81	27,70
6	22/out.	20:42	771	12,85	0,80	28,00
7	23/out.	08:45	1.383	23,05	0,76	27,70
8	24/out.	09:22	2.860	47,67	0,65	27,80
9	25/out.	09:28	4.306	71,77	0,58	28,00
10	26/out.	09:04	5.722	95,37	0,52	28,00
11	28/out.	09:07	8.605	143,42	0,45	28,30
12	29/out.	09:03	10.045	167,42	0,37	28,30

Tabela 19 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do Ponto N12 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	08:48	0	0,00	0,81	28,20
2	08/out.	09:22	34	0,57	0,78	28,20
3	08/out.	10:14	86	1,43	0,78	28,10
4	08/out.	11:24	156	2,60	0,78	28,00
5	08/out.	14:25	303	5,05	0,76	28,20
6	08/out.	20:17	603	10,05	0,72	28,30
7	09/out.	09:12	1.464	24,40	0,66	28,20
8	10/out.	09:01	2.893	48,22	0,56	28,00
9	11/out.	08:26	4.298	71,63	0,48	28,10
10	12/out.	09:43	5.815	96,92	0,42	28,10
11	14/out.	09:24	8.676	144,60	0,40	28,10
12	15/out.	09:09	10.101	168,35	0,28	28,10

Tabela 20 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do Ponto N12 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	08:10	0	0,00	0,86	24,70
2	22/out.	09:19	69	1,15	0,86	25,60
3	22/out.	10:29	139	2,32	0,83	26,20
4	22/out.	14:04	354	5,90	0,81	27,30
5	22/out.	16:23	493	8,22	0,76	27,70
6	22/out.	20:50	760	12,67	0,77	28,00
7	23/out.	08:55	1.393	23,22	0,72	27,70
8	24/out.	09:29	2.867	47,78	0,60	28,00
9	25/out.	09:40	4.318	71,97	0,51	28,10
10	26/out.	09:18	5.736	95,60	0,46	28,00
11	28/out.	09:20	8.618	143,63	0,38	28,40
12	29/out.	09:14	10.058	167,63	0,34	28,50

Tabela 21 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do Ponto N14 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	08:52	0	0,00	0,83	27,80
2	08/out.	09:29	37	0,62	0,82	27,80
3	08/out.	10:20	88	1,47	0,80	27,90
4	08/out.	11:31	159	2,65	0,82	28,00
5	08/out.	14:30	338	5,63	0,81	28,10
6	08/out.	20:29	697	11,62	0,73	28,20
7	09/out.	09:18	1.466	24,43	0,68	28,10
8	10/out.	09:15	2.903	48,38	0,62	28,00
9	11/out.	08:35	4.303	71,72	0,56	28,10
10	12/out.	09:51	5.819	96,98	0,51	28,10
11	14/out.	09:34	8.682	144,70	0,40	28,00
12	15/out.	09:18	10.106	168,43	0,37	28,10

Tabela 22 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do Ponto N14 à 28°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	08:51	0	0,00	0,65	23,60
2	22/out.	09:53	62	1,03	0,63	25,20
3	22/out.	11:14	143	2,38	0,65	26,40
4	22/out.	14:55	364	6,07	0,63	27,80
5	22/out.	17:13	502	8,37	0,63	28,00
6	22/out.	20:55	724	12,07	0,62	28,10
7	23/out.	09:01	1.399	23,32	0,56	28,00
8	24/out.	09:39	2.877	47,95	0,54	28,10
9	25/out.	09:47	4.325	72,08	0,46	28,20
10	26/out.	09:26	5.744	95,73	0,42	28,10
11	28/out.	09:27	8.625	143,75	0,34	28,40
12	29/out.	09:23	10.065	167,75	0,33	28,60

Os parâmetros do modelo foram determinados por meio da regressão linear com o auxílio do software R, as estimativas dos parâmetros, os valores dos coeficientes de determinação (R^2), os Intervalo de Confiança (IC) e os p-valor do teste ANOVA estão mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultado do k_b das amostras da rede à 28°C

Local	Temp.	Coleta	k_b (dia ⁻¹)	Média	Desvio Padrão	R^2	IC (95%)		ANOVA p-valor
							Limite inferior	Limite superior	
N1	28°C	1 ^a	-1,0111	-0,6207	0,552	0,9913	-1,1199	-0,9023	2,40E-06
		2 ^a	-0,2302			0,9699	-0,2768	-0,1836	5,39E-05
N3	28°C	1 ^a	-0,1529	-0,1452	0,011	0,9862	-0,1737	-0,1321	7,64E-06
		2 ^a	-0,1375			0,8396	-0,2066	-0,0684	3,72E-03
N12	28°C	1 ^a	-0,1869	-0,1865	0,001	0,9643	-0,2283	-0,1456	8,28E-05
		2 ^a	-0,1861			0,8856	-0,2630	-0,1092	1,57E-03
N14	28°C	1 ^a	-0,1987	-0,1694	0,041	0,9361	-0,2583	-0,1390	3,58E-04
		2 ^a	-0,1401			0,8828	-0,1987	-0,0814	1,67E-03

Na primeira coleta do ponto N1, obteve-se um k_b de $-1,0111\text{d}^{-1}$, e considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de $-0,9023\text{d}^{-1}$ e inferior de $-1,1199\text{d}^{-1}$. Para a 2^a coleta, o coeficiente k_b assumiu o valor de $-0,2302\text{d}^{-1}$, e um IC com limite superior de $-0,1836\text{d}^{-1}$ e limite inferior $-0,2768\text{d}^{-1}$. Por meio dos valores do coeficiente de determinação (R^2) verifica-se que os dois modelos se ajustaram bem aos dados observados. Entretanto, observa-se que o k_b do modelo da 1^a coleta foi quase 5 vezes maior que o da 2^a coleta, alguns fatores que podem ter contribuído para esse alto valor, foram a baixa concentração inicial de CRL ($\text{Co}=0,59\text{mg/L}$), e a alta temperatura inicial da amostra no momento da coleta ($T=32,30^\circ\text{C}$), registrados na Tabela 15.

Para o ponto N3, foi calculado para a 1^a coleta um coeficiente cinético de decaimento k_b igual a $-0,1529\text{d}^{-1}$. E considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de $-0,1321\text{d}^{-1}$ e inferior de $-0,1737\text{d}^{-1}$. Para a 2^a coleta o coeficiente k_b assumiu o valor de $-0,1375\text{d}^{-1}$, e um IC com limite superior de $-0,0684\text{d}^{-1}$ e limite inferior $-0,2066\text{d}^{-1}$. Observa-se pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) que o modelo da primeira coleta teve um melhor ajuste.

Na primeira coleta do ponto N12, obteve-se um k_b de $-0,1869\text{d}^{-1}$, e considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de $-0,1456\text{d}^{-1}$ e inferior de $-0,2283\text{d}^{-1}$. E na 2^a coleta, o coeficiente k_b assumiu o valor de $-0,1861\text{d}^{-1}$, e um IC com limite superior de $-0,1092\text{d}^{-1}$ e limite inferior $-0,2630\text{d}^{-1}$. Observa-se pelo desvio padrão

(DP=0,001) que as duas coletas resultaram modelos de decaimento muito próximos. E por meio dos valores do coeficiente de determinação (R^2) verifica-se que os dois modelos se ajustaram bem aos dados observados, sendo que a primeira obteve um R^2 maior.

Com relação ao ponto N14, obteve-se para a 1ª coleta um coeficiente cinético de decaimento k_b igual a $-0,1987d^{-1}$. E considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de $-0,1390d^{-1}$ e inferior de $-0,2583d^{-1}$. Para a 2ª coleta o coeficiente k_b assumiu o valor de $-0,1401d^{-1}$, e um IC com limite superior de $-0,0814d^{-1}$ e limite inferior $-0,1987d^{-1}$. Observa-se pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) que os dois modelos se ajustaram bem aos dados observados, sendo que a primeira obteve um R^2 maior.

Com a aplicação da ANOVA nos modelos de regressão, obteve-se para todas as amostras um p-valor menor que 0,05. Portanto, com significância de 5%, considera-se que as constantes são adequadas para explicar o decaimento do cloro na massa de água em função do tempo.

Para a validação dos modelos, foi verificado se os resíduos seguem os pressupostos do modelo de regressão (média zero, distribuição normal, variância constante e independência). Na Tabela 24 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos testes.

Tabela 24 – Resultados dos testes dos resíduos das amostras da rede à 28°C

Validação do modelo - Resíduos									
Local	Temp.	Coleta	Média zero	Teste de Shapiro-Wilk		Teste de Breusch-Pagan		Teste de Dubin Watson	
				p-valor	Distribuição normal	p-valor	Variância constante	p-valor	Independência
N1	28°C	1ª	Sim	0,6124	Sim	0,8406	Sim	0,3160	Sim
		2ª	Sim	0,0767	Sim	0,1574	Sim	0,6059	Sim
N3	28°C	1ª	Sim	0,2651	Sim	0,7053	Sim	0,8333	Sim
		2ª	Sim	0,6666	Sim	0,1900	Sim	0,3732	Sim
N12	28°C	1ª	Sim	0,9418	Sim	0,6079	Sim	0,7429	Sim
		2ª	Sim	0,0875	Sim	0,9767	Sim	0,3532	Sim
N14	28°C	1ª	Sim	0,8478	Sim	0,8777	Sim	0,5536	Sim
		2ª	Sim	0,7381	Sim	0,9922	Sim	0,7240	Sim

Em relação à temperatura de 28°C, verifica-se que, tanto na 1ª quanto na 2ª coleta, os resíduos atenderam plenamente aos pressupostos do modelo de regressão. Todos os resíduos apresentaram distribuição normal, média igual a zero, variância constante e independência.

A Tabela 25 apresenta os resultados das análises de pH das amostras, tanto no início quanto ao final do teste de garrafa. Observa-se a tendência de redução do valor do pH das amostras, o que está relacionado com as reações de consumo do íon hipoclorito, e liberação de H⁺ no meio.

Tabela 25 – Resultado da análise de pH das amostras da rede à 28°C

Local	Coleta	28°C	
		pH - inicial	pH - final
N1	1ª	7,59	7,52
	2ª	7,64	7,41
N3	1ª	7,60	7,50
	2ª	7,55	7,36
N12	1ª	7,57	7,54
	2ª	7,50	7,23
N14	1ª	7,47	7,43
	2ª	7,46	7,32

4.3.1.3. Teste de decaimento do CRL das amostras dos pontos da rede à 22°C

A seguir, são apresentados os resultados obtidos no teste de decaimento, realizado à temperatura de 22°C, para os pontos N1 (Tabelas 26 e 27), N3 (Tabelas 28 e 29), N12 (Tabelas 30 e 31) e N14 (Tabelas 32 e 33), da primeira e segunda coleta, respectivamente.

Tabela 26 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N1 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	07:40	0	0,00	0,80	30,50
2	08/out.	09:09	91	1,52	0,80	28,70
3	08/out.	09:57	139	2,32	0,78	26,70
4	08/out.	11:08	210	3,50	0,76	24,70
5	08/out.	14:08	390	6,50	0,76	23,10
6	08/out.	19:55	737	12,28	0,74	22,10
7	09/out.	08:44	1.506	25,10	0,71	22,20
8	10/out.	08:35	2.937	48,95	0,64	22,30
9	11/out.	08:11	4.353	72,55	0,63	22,40
10	12/out.	09:19	5.861	97,68	0,58	22,20
11	14/out.	09:04	8.726	145,43	0,55	22,30
12	15/out.	08:48	10.150	169,17	0,49	22,40

Tabela 27 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N1 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	07:38	0	0,00	0,89	24,80
2	22/out.	08:56	78	1,30	0,86	23,80
3	22/out.	10:08	150	2,50	0,88	23,30
4	22/out.	13:40	362	6,03	0,84	22,80
5	22/out.	16:03	505	8,42	0,87	22,80
6	22/out.	20:30	772	12,87	0,84	22,70
7	23/out.	08:31	1.369	22,82	0,84	22,70
8	24/out.	09:07	2.845	47,42	0,72	22,60
9	25/out.	09:18	4.296	71,60	0,71	22,70
10	26/out.	08:48	5.706	95,10	0,69	22,70
11	28/out.	08:51	8.589	143,15	0,58	23,20
12	29/out.	08:42	10.029	167,15	0,55	22,30

Tabela 28 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N3 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	08:34	0	0,00	0,80	28,60
2	08/out.	09:14	40	0,67	0,79	27,20
3	08/out.	10:01	87	1,45	0,72	25,60
4	08/out.	11:15	161	2,68	0,76	24,20
5	08/out.	14:15	301	5,02	0,75	23,20
6	08/out.	20:02	601	10,02	0,74	22,30
7	09/out.	08:55	1.461	24,35	0,72	22,70
8	10/out.	08:43	2.889	48,15	0,67	22,40
9	11/out.	08:16	4.302	71,70	0,62	22,30
10	12/out.	09:29	5.815	96,92	0,60	22,20
11	14/out.	09:06	8.672	144,53	0,55	22,60
12	15/out.	08:50	10.096	168,27	0,50	22,80

Tabela 29 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N3 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	07:45	0	0,00	0,86	25,00
2	22/out.	09:04	79	1,32	0,87	23,90
3	22/out.	10:16	151	2,52	0,87	23,30
4	22/out.	13:49	364	6,07	0,86	22,80
5	22/out.	16:10	505	8,42	0,82	22,60
6	22/out.	20:38	773	12,88	0,80	22,50
7	23/out.	08:39	1.377	22,95	0,77	22,70
8	24/out.	09:16	2.854	47,57	0,74	22,60
9	25/out.	09:26	4.304	71,73	0,70	22,60
10	26/out.	08:55	5.713	95,22	0,62	22,60
11	28/out.	09:00	8.598	143,30	0,56	22,90
12	29/out.	08:52	10.038	167,30	0,54	22,80

Tabela 30 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N12 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	08:45	0	0,00	0,78	28,30
2	08/out.	09:20	35	0,58	0,80	26,70
3	08/out.	10:10	85	1,42	0,79	25,40
4	08/out.	11:22	157	2,62	0,79	24,30
5	08/out.	14:22	302	5,03	0,78	23,20
6	08/out.	20:13	603	10,05	0,76	22,50
7	09/out.	09:05	1.460	24,33	0,69	22,50
8	10/out.	08:56	2.891	48,18	0,65	22,30
9	11/out.	08:23	4.298	71,63	0,64	22,70
10	12/out.	09:39	5.814	96,90	0,59	22,50
11	14/out.	09:20	8.675	144,58	0,52	22,50
12	15/out.	09:03	10.098	168,30	0,49	22,50

Tabela 31 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N12 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	08:07	0	0,00	0,87	24,80
2	22/out.	09:12	65	1,08	0,86	24,00
3	22/out.	10:24	137	2,28	0,85	23,40
4	22/out.	14:00	353	5,88	0,84	23,10
5	22/out.	16:19	492	8,20	0,78	22,90
6	22/out.	20:46	759	12,65	0,82	22,70
7	23/out.	08:47	1.385	23,08	0,77	22,80
8	24/out.	09:25	2.863	47,72	0,65	22,70
9	25/out.	09:34	4.312	71,87	0,63	22,60
10	26/out.	09:12	5.730	95,50	0,62	22,80
11	28/out.	09:11	8.609	143,48	0,55	23,00
12	29/out.	09:08	10.049	167,48	0,51	23,50

Tabela 32 – Resultado do teste de decaimento da 1ª coleta do ponto N14 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	08/out.	08:49	0	0,00	0,79	28,30
2	08/out.	09:26	37	0,62	0,79	26,60
3	08/out.	10:18	89	1,48	0,78	25,10
4	08/out.	11:26	157	2,62	0,77	23,80
5	08/out.	14:27	338	5,63	0,76	23,20
6	08/out.	20:24	658	10,97	0,74	22,70
7	09/out.	09:14	1.465	24,42	0,66	22,60
8	10/out.	09:10	2.901	48,35	0,63	22,60
9	11/out.	08:29	4.300	71,67	0,62	22,30
10	12/out.	09:46	5.817	96,95	0,55	22,20
11	14/out.	09:30	8.681	144,68	0,50	22,80
12	15/out.	09:16	10.107	168,45	0,48	22,70

Tabela 33 – Resultado do teste de decaimento da 2ª coleta do ponto N14 à 22°C

Ensaio	Dia	Hora	Tempo decorrido (min.)	Tempo decorrido (horas)	Leitura (mg/L)	Temperatura (°C)
1	22/out.	08:48	0	0,00	0,67	23,50
2	22/out.	09:49	61	1,02	0,65	23,10
3	22/out.	11:08	140	2,33	0,64	23,00
4	22/out.	14:48	360	6,00	0,65	22,80
5	22/out.	17:10	502	8,37	0,65	22,70
6	22/out.	20:56	728	12,13	0,64	22,60
7	23/out.	08:59	1.397	23,28	0,61	22,90
8	24/out.	09:33	2.871	47,85	0,54	22,70
9	25/out.	09:43	4.321	72,02	0,50	22,70
10	26/out.	09:22	5.740	95,67	0,47	22,60
11	28/out.	09:22	8.620	143,67	0,44	23,00
12	29/out.	09:19	10.060	167,67	0,39	23,30

Os valores estimados dos parâmetros do modelo de regressão linear, os coeficientes de determinação (R^2), os Intervalos de Confiança (IC) e os p-valores do teste ANOVA, obtidos por meio do software R, estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultado do k_b das amostras da rede à 22°C

Local	Temp.	Coleta	k_b (dia ⁻¹)	Média	Desvio Padrão	R^2	IC (95%)		ANOVA p-valor
							Limite inferior	Limite superior	
N1	22°C	1 ^a	-0,1099	-0,0803	0,042	0,8841	-0,1557	-0,0642	1,62E-03
		2 ^a	-0,0506			0,4901	-0,1099	-0,0087	7,99E-02
N3	22°C	1 ^a	-0,0908	-0,1138	0,033	0,7610	-0,1615	-0,0202	2,34E-02
		2 ^a	-0,1369			0,9150	-0,1848	-0,0889	7,39E-04
N12	22°C	1 ^a	-0,1365	-0,1286	0,011	0,9525	-0,1716	-0,1014	1,70E-04
		2 ^a	-0,1207			0,7336	-0,2043	-0,0371	1,39E-02
N14	22°C	1 ^a	-0,1729	-0,1231	0,070	0,9889	-0,1940	-0,1519	4,41E-03
		2 ^a	-0,0732			0,7656	-0,1198	-0,0266	9,91E-03

Na 1^a coleta do ponto N1 (22°C) obteve-se um valor de k_b de -0,1099d⁻¹, e considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b está entre -0,1557 d⁻¹ e -0,0642 d⁻¹. Isso significa que, com 95% de certeza, o verdadeiro valor de k_b se encontra dentro deste intervalo. O coeficiente de determinação (R^2) é de 0,8841, o que indica que 88,41% da variabilidade observada nos dados de k_b pode ser explicada pelo modelo de regressão ajustado, o que sugere um bom ajuste aos dados observados.

Com relação a 2^a coleta (N1), o coeficiente k_b assumiu o valor de -0,0506d⁻¹, relativamente menor que o estimado para a 1^a coleta. E um IC (95%) com limite superior de -0,0087d⁻¹ e limite inferior -0,1099d⁻¹. O coeficiente de determinação do modelo foi significativamente mais baixo, assumindo o valor de 0,4901. Isso indica que o modelo de regressão não se ajustou bem aos dados da segunda coleta, explicando apenas 49,01% da variabilidade observada. Com a aplicação da ANOVA no modelo de regressão, obteve-se para a segunda coleta um p-valor maior que 0,05. Portanto, com significância de 5%, considera-se que o modelo estimado não é adequado para explicar o decaimento do cloro dessa amostra.

Para o ponto N3, foi calculado para a 1ª coleta um coeficiente cinético de decaimento k_b igual a $-0,0908d^{-1}$. E considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de $-0,0202d^{-1}$ e inferior de $-0,1615d^{-1}$. Esse modelo obteve um R^2 de 0,7610, o que implica que cerca de 23,90% dos dados não podem ser explicados pelo modelo.

Para a 2ª coleta do N3 o coeficiente k_b assumiu o valor de $-0,1369d^{-1}$, e um IC com limite superior de $-0,0889d^{-1}$ e limite inferior $-0,1848d^{-1}$. Verificou-se pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) que o modelo da segunda coleta teve um melhor ajuste ($R^2=0,9150$), em relação ao da 1ª coleta, indicando que 91,05% da variação dos dados é explicada por esse modelo de regressão.

Na 1ª coleta do ponto N12, obteve-se um k_b de $-0,13685d^{-1}$, e considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de $-0,1014d^{-1}$ e inferior de $-0,1716d^{-1}$. O coeficiente de determinação (R^2), demonstrou um bom ajuste, indicando que 95,25% da variação dos dados pode ser explicada por esse modelo de regressão.

Com relação a 2ª coleta (N12), o coeficiente k_b assumiu o valor de $-0,1207d^{-1}$, e um IC com limite superior de $-0,0371d^{-1}$ e limite inferior $-0,2043d^{-1}$. O coeficiente de determinação (R^2) do modelo da segunda coleta foi mais baixo, indicando que somente 73,36% dos dados podem ser explicados pelo modelo. Entretanto, observa-se uma grande proximidade entre os valores estimados para o coeficiente de decaimento k_b , para as duas coletas, o que é evidenciado pelo baixo valor do desvio padrão ($DP=0,011$).

Para o ponto N14, obteve-se para a 1ª coleta um coeficiente cinético de decaimento k_b igual a $-0,1729d^{-1}$. E considerando um intervalo de confiança (IC) de 95%, para esse modelo o valor do k_b pode assumir valores entre o limite superior de $-0,1519d^{-1}$ e inferior de $-0,1940d^{-1}$. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9889, demonstrando um ótimo ajuste do modelo. Para a 2ª coleta, o k_b assumiu o valor de $-0,0732d^{-1}$, e um IC variando entre o limite superior de $-0,0266d^{-1}$ e limite inferior $-0,1198d^{-1}$. Esse modelo obteve um R^2 de 0,7656, menor que o da 1ª coleta, o que implica que cerca de 23,44% dos dados não podem ser explicados pelo modelo.

Com a aplicação da ANOVA nos modelos de regressão, obteve-se para as duas coletas dos pontos N3, N12 e N14 um p-valor menor que 0,05. O que indica que

as constantes dos modelos são adequadas para explicar o decaimento do cloro na massa de água em função do tempo, com significância de 5%. Já para o ponto N1, somente o modelo da 1ª coleta se mostrou adequado.

Para a validação dos modelos, foi verificado se os resíduos seguem os pressupostos do modelo de regressão (média zero, distribuição normal, variância constante e independência). Na Tabela 35 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos testes.

Tabela 35 – Resultados dos testes dos resíduos das amostras da rede à 22°C

Validação do modelo - Resíduos									
Local	Temp.	Coleta	Média zero	Teste de Shapiro-Wilk		Teste de Breusch-Pagan		Teste de Dubin Watson	
				p-valor	Distribuição normal	p-valor	Variância constante	p-valor	Independência
N1	22°C	1ª	Sim	0,8772	Sim	0,3123	Sim	0,0528	Sim
		2ª	Sim	0,2289	Sim	0,3584	Sim	0,0949	Sim
N3	22°C	1ª	Sim	0,1883	Sim	0,1423	Sim	0,0122	Não
		2ª	Sim	0,1858	Sim	0,5121	Sim	0,3460	Sim
N12	22°C	1ª	Sim	0,0643	Sim	0,4500	Sim	0,2978	Sim
		2ª	Sim	0,0011	Não	0,9049	Sim	0,7244	Sim
N14	22°C	1ª	Sim	0,5959	Sim	0,4959	Sim	0,9263	Sim
		2ª	Sim	0,7474	Sim	0,1582	Sim	0,2774	Sim

Conclui-se com a aplicação dos testes, que a 1ª coleta de N3 apresenta um problema de dependência, o que pode afetar a qualidade do modelo, e para a 2ª coleta de N12, verificou-se a não normalidade dos resíduos, o que é um pressuposto importante do modelo de regressão, pois afeta a confiabilidade das inferências feitas a partir do modelo.

Para as outras coletas, os resultados indicam que o modelo está ajustado adequadamente, pois os resíduos atenderam a todos os pressupostos do modelo de regressão.

Na Tabela 36 estão apresentados os resultados das análises de pH das amostras, no início e ao final do teste de garrafa. Observa-se que, para a temperatura

de incubação de 22° C, o valor do pH das amostras também diminuiu devido as reações de consumo do íon hipoclorito.

Tabela 36 – Resultado da análise de pH das amostras da rede à 22°C

Local	Coleta	22°C	
		pH - inicial	pH - final
N1	1 ^a	7,87	7,59
	2 ^a	7,66	7,42
N3	1 ^a	7,68	7,51
	2 ^a	7,61	7,35
N12	1 ^a	7,69	7,54
	2 ^a	7,48	7,34
N14	1 ^a	7,61	7,47
	2 ^a	7,54	7,34

4.3.2. Determinação do coeficiente cinético de decaimento na parede (k_w)

Para determinação do coeficiente cinético de decaimento na parede (k_w) foi seguido o passo a passo descrito no fluxograma da Figura 12.

Com os dados da constante k_b obtidos pelo teste de garrafa, foram realizadas simulações de qualidade no EPANET para estimar o coeficiente de reação com a parede (k_w), por meio da redução do resíduo positivo obtido pela diferença entre os valores de CRL simulado e observado.

Foi utilizado o valor médio de k_b obtido para os pontos da rede (N1, N3, N12 e N14), para a temperatura de 28°C, que foi a temperatura mais próxima da temperatura das amostras na hora da coleta. Entretanto, foi excluído do cálculo da média o valor do k_b da primeira coleta do ponto N1, pela grande variação com relação aos outros valores obtidos. Assim, foi introduzido o valor do coeficiente cinético de decaimento no volume do escoamento (k_b) igual a $-0,1761d^{-1}$ (Figura 19). E nas opções de reação do EPANET, foram definidas reações de primeira ordem, para as reações no escoamento e na parede. Desta forma, foram testados valores de k_w , até obter uma maior aproximação entre os valores de CRL para cada ponto analisado.

Figura 19 – Definições das opções de reação na simulação do EPANET

Reações Opções	
Propriedade	Valor
Ordem da Reação no Escoamento	1
Ordem da Reação na Parede	First
Coef. Reação no Escoamento	-0.1761
Coef. Reação na Parede	0
Concentração-Limite	0
Coef. Dependência c/ Rugosidade	0

Para o ajuste, a média da concentração de CRL das amostras coletadas no ponto N1 (ponto após a saída do reservatório) foi considerada como o valor da Qualidade Inicial na saída do reservatório RNF. E como valor do CRL observado foi utilizado os valores iniciais de CRL no momento da coleta em cada um dos pontos (N3, N12 e N14).

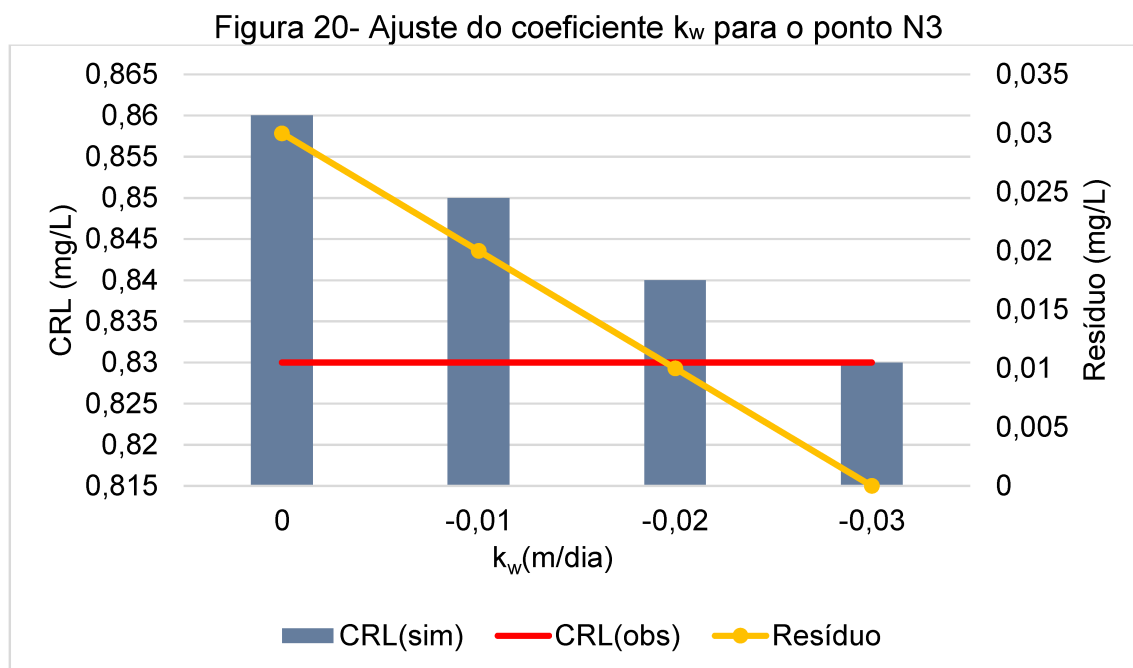
Os dados das análises foram inseridos no EPANET na área de calibração do parâmetro de Qualidade, e a cada simulação extraiu-se um relatório de calibração do sistema, que apresenta a comparação entre os valores observados nas coletas e os valores simulados pelo modelo, para cada ponto e a média da rede.

Primeiramente, adotou-se para todos os pontos o valor do coeficiente de reação na parede (k_w) igual a zero, e os resultados da simulação demonstraram que os valores do CRL simulados foram maiores que os obtidos nas análises. Na tabela 37, estão apresentados os resultados da simulação com $k_w = 0$, e o valor dos resíduos para cada ponto.

Tabela 37 – Concentrações de CRL simulado e resíduos sem reação na parede

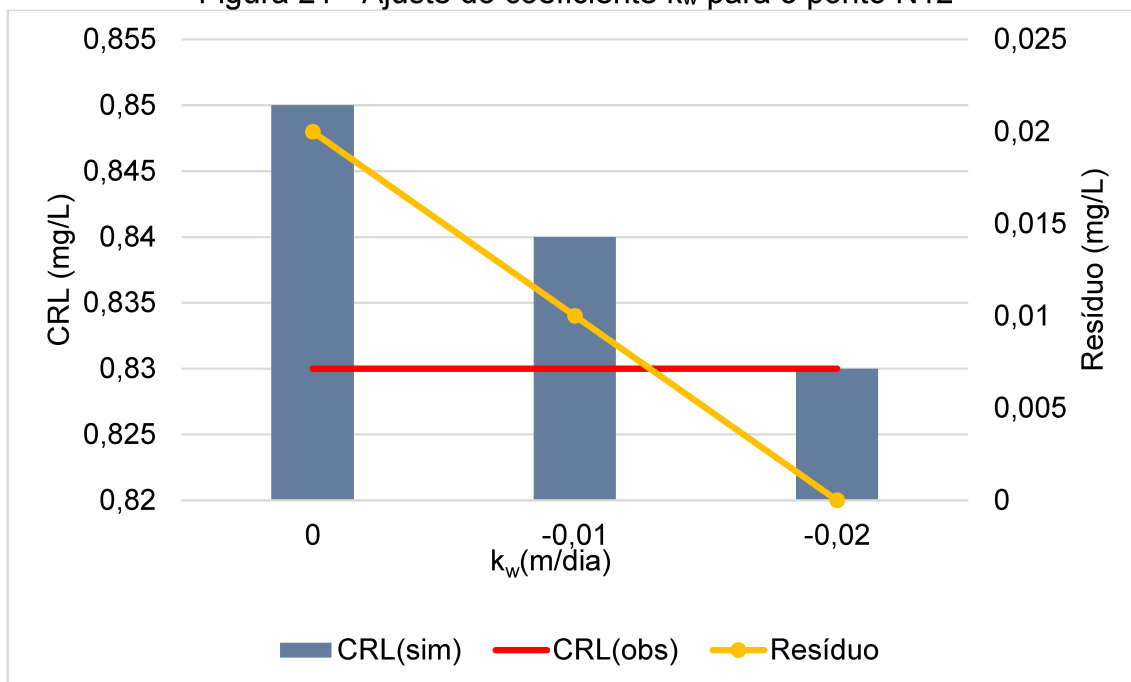
Valores	N1	N3	N12	N14	Médias no EPANET
CRL(obs)	0,86	0,83	0,83	0,74	0,82
CRL(sim)	0,86	0,86	0,85	0,85	0,86
Resíduo	0	-0,03	-0,02	-0,12	-0,04

Nas simulações o valor de k_w foi reajustado em intervalos de $-0,01(\text{m/dia})$. O valor do coeficiente de decaimento na parede k_w para o ponto N3 foi ajustado de acordo com as simulações para o valor de $-0,03\text{m/dia}$, como demonstrado na Figura 20. O relatório de calibração do EPANET demonstrou que, para esse valor de k_w , a média do CRL simulado para a rede foi de $0,83\text{mg/L}$, enquanto o valor médio observado foi de $0,82\text{mg/L}$. O coeficiente de correlação entre medidas ficou em $0,863$ o que indica uma relação positiva forte.



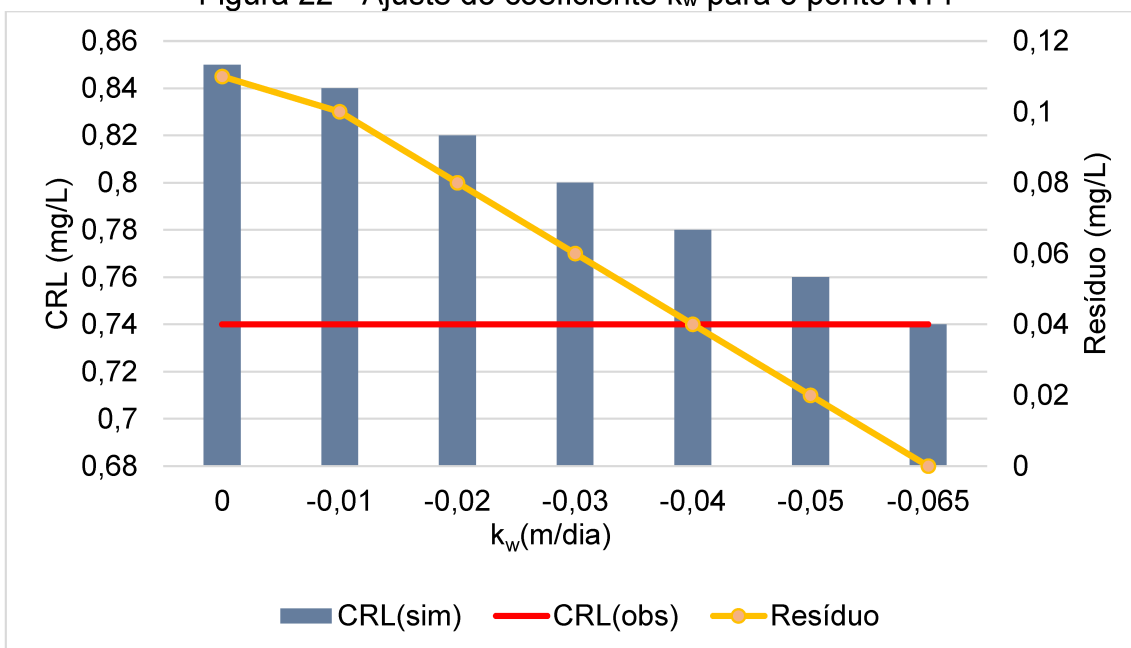
O ponto N12 foi o que apresentou o menor resíduo, e seu ajuste foi mais rápido, encontrando o valor do coeficiente k_w de $-0,02\text{m/dia}$, como pode ser observado na Figura 21. Por meio do relatório de calibração, obteve-se que a média do CRL simulado na rede foi de $0,84\text{mg/L}$, maior que o valor médio observado ($0,82\text{mg/L}$). Já a correlação entre as medidas foi maior, igual a $0,893$, o que também indica uma relação positiva forte.

Figura 21 - Ajuste do coeficiente k_w para o ponto N12



O N14 foi o ponto da rede que apresentou maior resíduo negativo, e consequentemente obteve-se o maior valor do coeficiente de decaimento k_w , o ajuste do resíduo se deu para o k_w igual a -0,065m/dia (Figura 22). Por meio do relatório de calibração, obteve-se o menor valor de CRL médio simulado para a rede (0,79mg/L). O coeficiente de correlação entre medidas também foi menor, igual a 0,836.

Figura 22 - Ajuste do coeficiente k_w para o ponto N14



Na Tabela 38 estão apresentados os valores das simulações de k_w dos pontos N3, N12 e N14. A partir dos valores de k_w obtidos em cada um dos pontos, foi calculada a média do valor do coeficiente de decaimento na parede para a rede e obteve-se o valor de -0,038m/dia. Realizando a simulação com o valor médio de k_w , verificou-se que o valor do CRL médio simulado para a rede ficou igual ao valor do CRL médio observado (Figura 23). E o coeficiente de correlação entre medidas foi de 0,863 demonstrando uma forte correlação dos dados.

Tabela 38 – Resumo dos coeficientes cinéticos de decaimento na parede

Dados	N3	N12	N14	k_w médio
	$k_w = -0,03\text{m/dia}$	$k_w = -0,02\text{m/dia}$	$k_w = -0,065\text{m/dia}$	$k_w = -0,038\text{m/dia}$
CRL médio observado	0,82	0,82	0,82	0,82
CRL médio simulado	0,83	0,84	0,79	0,82
Correlação entre medidas	0,863	0,893	0,836	0,863

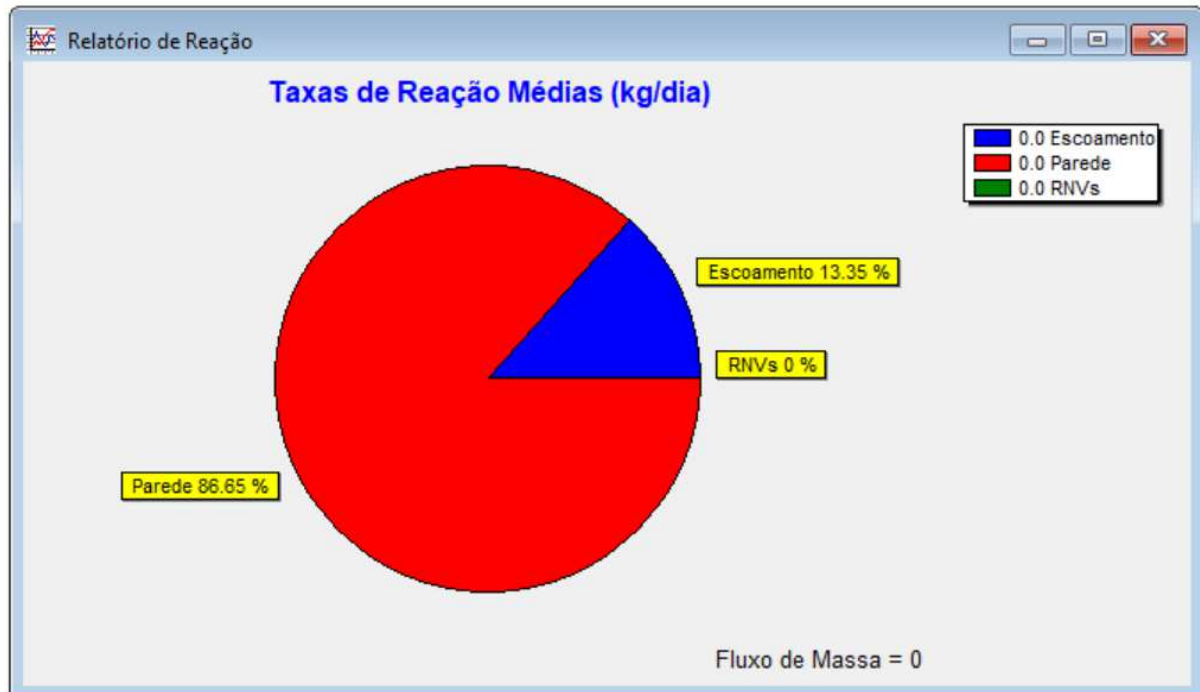
Figura 23 – Relatório de calibração do EPANET para o k_w médio



Após a calibração dos coeficientes cinéticos de decaimento, foi gerado um relatório da reação para a simulação com k_b e k_w médios no EPANET, e obteve o gráfico da Figura 24. Pode-se observar que 13,35% do decaimento do cloro acontece no volume do escoamento, enquanto a maior parcela, 86,65% é devido ao

decaimento nas paredes das tubulações. O decaimento no Reservatório RNV é nula, pois como descrito anteriormente o reservatório considerado foi um RNF, e não foi analisado o decaimento dentro do reservatório.

Figura 24 – Relatório das taxas de reação no EPANET



5. CONCLUSÃO

Os resultados do levantamento dos dados de qualidade da água do Campus Santa Mônica, no ano de 2024, demonstraram que, durante o período analisado, a água fornecida pelo DMAE manteve-se dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. A concentração de CRL variou entre 0,27 mg/L e 1,63 mg/L, com valor médio de 0,96 mg/L para o período total. Com relação aos dados internos do campus Santa Mônica, verificou-se que nos blocos sem reservatório predial as concentrações de cloro mantiveram-se dentro do limite estabelecido pela legislação, mesmo nos meses de maior temperatura e de férias acadêmicas. Entretanto, é necessária uma atenção especial com relação aos blocos com reservatórios próprios, pois os resultados revelaram alguns pontos críticos no sistema, com concentrações de CRL abaixo do mínimo recomendado, resultando na redução da barreira contra a contaminação da água. O decaimento do cloro nos reservatórios prediais pode estar relacionado ao alto tempo de detenção da água, desta forma, para auxiliar no melhor dimensionamento dos reservatórios é necessário o monitoramento do consumo de água por tipo de uso das edificações.

Para a construção e calibração do modelo hidráulico do campus Santa Mônica, foram enfrentados diversos desafios, como o fato da Universidade não possuir registro dos dados reais da rede de distribuição de água, e a falta de recursos para a instalação de hidrômetros em pontos estratégicos do campus. Entretanto, com o levantamento dos dados da rede em campo foi possível realizar, de forma aproximada da realidade, a modelagem hidráulica do sistema de distribuição de água do campus no software EPANET 2.0. E apesar das incertezas, com as medições de pressão foi possível realizar a calibração do modelo, e simular de modo satisfatório o comportamento da água na rede sob diferentes condições operacionais.

Para a calibração dos coeficientes cinéticos de decaimento foram realizadas duas campanhas de coleta para analisar o decaimento do CRL na massa de água, pelo teste de garrafa, em 5 pontos do sistema de distribuição do campus. Nas coletas de água do DMAE, obteve-se um k_b médio de $-0,4909d^{-1}$, para a temperatura de $28^{\circ}C$, e $-0,2692d^{-1}$ para $22^{\circ}C$. Nos demais pontos (N1, N3, N12 E N14) obteve-se um k_b médio igual a $-0,1761$ para a temperatura de $28^{\circ}C$ e $-0,1115d^{-1}$ para $22^{\circ}C$. Observa-

se a tendência de que quanto maior a temperatura da água, maior é a constante de decaimento. Além disso, pode-se observar que as amostras do DMAE (sem cloração adicional) decaíram mais rapidamente, cerca de 2,6 vezes mais rápido, do que as amostras da rede (com cloração adicional no reservatório central).

A determinação do coeficiente cinético de decaimento na parede (k_w) no sistema de distribuição do Campus Santa Mônica foi realizada com base nas simulações no EPANET, utilizando os dados experimentais de CRL coletados nos pontos da rede. Após os sucessivos ajustes e validação dos resultados, foi obtido um valor médio de k_w igual a -0,038 m/dia. O coeficiente de correlação entre as medidas simuladas e observadas, foi de 0,863, o que demonstra uma forte relação positiva e valida a confiabilidade do modelo para representar o comportamento do cloro na rede. O modelo de qualidade também revelou que a maior parcela do decaimento do cloro ocorre nas paredes das tubulações (86,65%), enquanto apenas 13,35% está relacionado a massa de água.

A análise dos dados mostra que o modelo de decaimento ajustado pode ser utilizado para simular o comportamento do cloro no sistema de abastecimento de água do campus Santa Mônica. O que permite aos gestores uma melhor compreensão da cinética de decaimento do cloro na rede, trazendo maior segurança para o processo de cloração adicional, bem como a melhoria da qualidade da água fornecida à comunidade acadêmica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 24th ed. Washington, 2023.

AZEVEDO NETTO, J. M. (org.). **Desinfecção de águas**. São Paulo. CETESB, 1974.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

BARBOSA JÚNIOR, N. **Elaboração do plano institucional de segurança da água para Instituição de Ensino Superior**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental). Universidade de Ribeirão Preto, 111p. Ribeirão Preto, 2022.

BIONDO, F. D. **Modelo de gerenciamento da qualidade da água: Estudo do decaimento de cloro na rede de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 134 p. Cascavel, 2019.

BOCCELLI D.L., TRYBY M. E., UBER J. G., SUMMERS R. S. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. **Water Research**, v.37, n.11, p. 2654-2666, jun. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00067-8)

BRASIL. Decreto Federal nº. 79.367, de 9 de março de 1977. Dispõe sobre normas e o padrão de potabilidade de água e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 mar. 1977.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Guia prático de inspeção sanitária em formas de abastecimento de água para consumo humano**. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. Brasília, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de Maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS no 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html>. Acesso em: 15 nov. 2023.

COELHO, S. T., LOUREIRO, D., ALEGRE H. **Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água**. Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 2006, 357p. Disponível em: <https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ersar_modelacao_e_analise_de_sistemas_d_e_abastecimento_de_agua_2006.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2024.

DANIEL, L. A. Métodos Alternativos de Desinfecção da Água. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. Coordenador Luiz Antônio Daniel. PROSAB. São Carlos, 2001.

DASSAN, K. R. F. DE O. **Qualidade da água em reservatórios prediais: análise e proposição de modelo matemático**. Tese (Doutorado em Tecnologias Ambientais). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 178p. Campo Grande, 2014.

FISHER, I.; KASTL, G.; SATHASIVAN, A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. **Water Research**, v. 45, n. 16, p. 4896–4908, out. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.032>

GELETE, G., GOKCEKUS, H., OZSAHIN, D. U., UZUN, B., GICHAMO, T. Evaluating disinfection techniques of water treatment. **Desalination and Water Treatment**, v.177, p. 408-415. 2020. DOI: 10.5004/dwt.2020.25070

GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**. 3 ed. João Pessoa. Editora Universitária/UFPB, 2009.

GONÇALVES, N. M. R. **Monitorização e gestão dos Recursos Geológicos e seus impactes ambientais no concelho de São Domingos, ilha de Santiago - Cabo Verde, com ênfase na qualidade da Água**. Dissertação (Mestrado). Escola de Ciências. Universidade do Minho. 107p. Portugal, 2015.

HALLAM, N. B. et al. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. **Water Research**, v. 36, n. 14, p. 3479–3488, ago. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00056-8)

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. Tradução Noveritis do Brasil. São Paulo, SP: Cengage Learning Brasil, 2016. *E-book*. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522124084/>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

HUA, F., WEST, J. R., BARKER, R. A., & FORSTER, C. F. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. **Water Research**, v.33, n12, p.2735–2746, ago. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00519-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00519-3)

JAFFAR, A., THAMRIN, N. M., MEGAT ALI, M. S. A., MISNAN, M. F., YASSIN, A. I. M. The Influence of Physico-Chemical Parameters to Determine Water Quality: A Review. **Journal of Electrical And Electronic Systems Research**, v. 17, p.116-121. 2020. DOI: <https://doi.org/10.24191/jeesr.v17i1.016>.

JUNQUEIRA, R. F. **Modelagem matemática de cloro residual em redes de distribuição de água – Estudo de caso no Jardim Higienópolis em Maringá-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, 69 p. Maringá, 2010.

KELLNER, E. **Introdução ao EPANET: Simulação e dimensionamento de sistemas de abastecimento de água**. São Carlos: UFSCar/CPOI, 2022. 186 p. Disponível em: <<https://www.sibi.ufscar.br/arquivos/cpoi/introducao-ao-epanet-simulacao-e-dimensionamento-de-sistemas-de-abastecimento-de-agua.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

LEAL, E.S. **Modelagem da degradação de cloro residual livre em sistemas de adução de água de abastecimento de porte médio**. UFCG. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

MEYER, S. T. O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **Cadernos de Saúde Pública**, v.10, n.1, p.99-110, jan/mar, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X1994000100011>

MORAES, F. A. **Calibração de modelo de decaimento de cloro aplicado a setor de rede de distribuição de água**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). à Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 253p. São Carlos, 2008.

MUNAVALLI, G. R., & MOHAN KUMAR, M. S. Water quality parameter estimation in a distribution system under dynamic state. **Water Research**, v.39, n.18, p.4287–4298, nov. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.043>

NEVES, L. I. P. **Estudo do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água – Caso de Estudo Águas da Azambuja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Biológica). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 177p. Lisboa, 2016.

OBAYOMI, O. V., OLAWOYIN, D. C., OGUNTIMEHIN, O., MUSTAPHA, L. S., KOLADE, S. O., OLADOYE, P. O., OH, S., OBAYOMI, K. S. Exploring emerging water treatment technologies for the removal of microbial pathogens. **Current Research in Biotechnology**. v.8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100252>.

OKAFOR, C. O., UDE, U. I., OKOH, F. N., EROMONSELE, B. O. Safe Drinking Water: The Need and Challenges in Developing Countries. **Water Quality - New Perspectives**. IntechOpen. 2024. DOI: 10.5772/intechopen.108497

PADHI, R. K., SUBRAMANIAN, S., MOHANTY, A. K., SATPATHY, K. K. Comparative assessment of chlorine reactivity and trihalomethanes formation potential of three different water sources. **Journal of Water Process Engineering**, v. 29, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.009>

PEREIRA, R. F. **Calibração do coeficiente de decaimento do cloro (Kw) em redes de abastecimento de água utilizando o método iterativo do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, 106 p. Fortaleza, 2009.

PIEREZAN, M. L. **Monitoramento contínuo do residual do cloro em sistemas de distribuição de água para abastecimento**. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 131 p. Campo Grande, 2009.

POWELL, J. C. et al. Factors which control bulk chlorine decay rates. **Water Research**, v. 34, n. 1, p. 117-126, jan. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00097-4)

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009. *E-book*. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217244/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

RODRIGUES, K. P. **Calibração de modelo hidráulico para monitoramento de redes de distribuição de água: estudo da rede de distribuição de água da Universidade Estadual de Maringá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, 68p. Maringá, 2013.

ROSSI-FEDELE, G., GUASTALLI, A. R., DOGRAMACI, E. J., STEIER, L., FIGUEIREDO, J. A. P. Influence of pH changes on chlorine-containing endodontic irrigating solutions. **International Endodontic Journal**, v.44, n.9, p.792–799, jun. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01911.x>

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 user's manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

SANTOS, W. B. DOS. **Modelagem da degradação de cloro residual livre na rede de distribuição de água da cidade de Campina Grande-PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, 75p. Campina Grande, 2017.

SILVA, K. R. G., KISHI, R. T. Modelagem matemática do cloro em redes de distribuição de água. **Revista Técnica da Sanepar (Sanare)**, v. 19, n. 19, p. 26-40. 2003.

TAKCI, H. A. M., OZDENEFE, M. S., KAYIS, F. B., DINCER, S. Bacteriological Perspective of Water Quality. **Water Quality - New Perspectives**. IntechOpen. 2024. DOI: 10.5772/intechopen.112874.

TRIMBOLI, M. J. **Aplicação e análise de um modelo de qualidade de água para a determinação da concentração de cloro residual livre em um setor de abastecimento de água**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Eng. Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. 153p. Campinas, 2006.

USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Alternative Disinfectants and oxidants guidance manual, EPA 815-R-99-014**. 1999, 346 p.

WHO. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum.** Geneva: WHO, 2017.