

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CLORAÇÃO EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

**ANDRÉ LUÍS DE ALCÂNTARA RAMOS
ORIENTADOR: ARTHUR TAVARES SCHLEICHER**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL II**

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**AValiação DE ESTRATÉGIAS DE CLORAÇÃO EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

ANDRÉ LUÍS DE ALCÂNTARA RAMOS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**ARTHUR TAVARES SCHLEICHER, MsC (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)**

**ALEXANDRE KEPLER SOARES, Dr (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PEDRO AUGUSTO FERNANDES PEREIRA, Dr. (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 02 DE DEZEMBRO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

RAMOS, ANDRÉ LUÍS DE ALCÂNTARA

Avaliação de estratégias de cloração em redes de distribuição de água.

xi, 73 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Desinfecção

2. Processo de cloração

3. Qualidade da água

4. Rede de distribuição de água

5. Residual de cloro

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Ramos, A.L.A. (2019). *Avaliação de estratégias de cloração em redes de distribuição de água*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME: André Luís de Alcântara Ramos

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação de estratégias de cloração em redes de distribuição de água.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

ANDRÉ LUÍS DE ALCÂNTARA RAMOS
andresrdf@gmail.com

RESUMO

O seguinte trabalho tem como objetivo analisar estratégias presentes na literatura com relação à cloração mais efetiva em uma rede de distribuição de água, a fim de se atingirem os limites mínimos e/ou máximos de cloro residual estabelecidos na lei.

O local de estudo escolhido para o trabalho foi a rede exemplo “*Net2*” presente nos arquivos de instalação do programa EPANET. Foram definidos 3 casos, cada um com diferentes coeficientes de reação do cloro ao longo do escoamento e com as paredes. Após, foram definidos 3 cenários para análise e para cada cenário foi feita a simulação dos 3 casos. O primeiro cenário considerou uma injeção de cloro apenas na origem de concentração igual a 2 mg/L. O segundo cenário considerou uma injeção apenas na origem, aumentando gradativamente a concentração até que o limite mínimo da regulação fosse atingido. E por último, o terceiro cenário considerou injeção na origem e 4 injeções intermediárias de cloro ao longo da rede distribuição, as quais tiveram suas concentrações aumentadas gradativamente até que tanto os limites mínimos e os máximos fossem atingidos.

Como conclusão do trabalho, pôde-se perceber uma melhora considerável no consumo de cloro do terceiro cenário em comparação aos outros dois cenários, com destaque especial ao caso 1, onde foi possível reduzir a concentração de cloro injetada na origem de 81,7 mg/L (Cenário 1) para apenas 2,0 mg/L (Cenário 2), possibilitando um uso mais racional de recursos e garantindo a saúde da população abastecida.

Palavras-chave: desinfecção, processo de cloração, qualidade da água, residual de cloro, rede de distribuição de água.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL.....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	4
3.1.1	Características gerais do sistema de distribuição	4
3.1.2	Desinfecção	7
3.1.3	Qualidade da água nas estruturas de armazenamento	10
3.1.4	Regulação	12
3.2	PERDA DE CARGA NA SIMULAÇÃO HIDRÁULICA	13
3.3	MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA	14
3.3.1	Princípios Governantes da Modelagem da Qualidade da água:	15
3.4	REAÇÕES DENTRO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	18
3.5	OTIMIZAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO:	20
4	METODOLOGIA	25
4.1	LOCAL DE ESTUDO.....	25
4.1.1	Características topográficas e geométricas da rede de distribuição	26
4.1.2	Parâmetros de qualidade da água na rede de distribuição	30
4.2	MODELAGEM	31
4.2.1	Programa utilizado	31
4.2.2	Linguagem de programação utilizada	32
4.2.3	Parâmetros da simulação hidráulica e de qualidade	32
4.2.4	Cenário base	34
4.2.5	Cenário 1 – Atendendo apenas ao limite mínimo	36
4.2.6	Cenário 2 – Atendendo aos limites mínimos e máximos	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	CENÁRIO BASE	38
5.2	CENÁRIO 1 - ATENDENDO APENAS AO LIMITE MÍNIMO	43
5.3	CENÁRIO 2 - ATENDENDO AOS LIMITES MÍNIMOS E MÁXIMOS	51
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

ANEXOS	67
CÓDIGO DA ROTINA DE PROGRAMAÇÃO PARA O CENÁRIO 1	67
CÓDIGO DA ROTINA DE PROGRAMAÇÃO PARA O CENÁRIO 2	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Posições dos reservatórios em relação ao terreno. (Tsutiya, 2006).....	5
Figura 3.2 - Esquema de uma rede ramificada. (Tsutiya, 2006)	6
Figura 3.3 - Esquema de uma rede malhada com quatro anéis ou malhas. Porto (1998).....	6
Figura 3.4 - Esquema de uma rede mista. Tsutiya (2006).....	7
Figura 3.5 - Efeito dos compostos de cloro no pH da água. (Lauer e Sanchez, 2006).....	9
Figura 3.6 - Forma geral de um trihalometano (Fonte: CDC).....	10
Figura 3.7 – Tipos de reatores: (A) mistura completa (B) mistura de dois compartimentos (C) primeiro a entrar, primeiro a sair (D) último a entrar, primeiro a sair. (Rossman, 2000).....	17
Figura 4.1 - Fluxograma Geral do Trabalho.....	25
Figura 4.2 – Representação da rede de distribuição de água denominada “Net2” com a identificação dos nós.....	26
Figura 4.3 - Janela de configurações das opções de tempo da simulação.	33
Figura 4.4 - Padrão de consumo dos nós da rede de distribuição.....	33
Figura 4.5 - Padrão de tempo de funcionamento da estação de bombeamento no nó 1 da rede de distribuição.....	34
Figura 4.6 - Janela de configurações do campo origem da qualidade para o nó do reservatório. Fonte: EPANET.....	35
Figura 4.7 - Janela de configurações do editor de padrão temporal. Fonte: EPANET	36
Figura 5.1 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário base, às 192h, para o caso 1.	38
Figura 5.2 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 1.	39
Figura 5.3 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 1.	39
Figura 5.4 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário base, às 192h, para o caso 2.	40
Figura 5.5 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 2.	40
Figura 5.6 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 2.	41

Figura 5.7 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário base, às 192h, para o caso 3.	42
Figura 5.8 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 3.	42
Figura 5.9 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 3.	43
Figura 5.10 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 1, às 192h, para o caso 1.	44
Figura 5.11 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 1.	45
Figura 5.12 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 1.	45
Figura 5.13 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 1, às 192h, para o caso 2.	47
Figura 5.14 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 2.	47
Figura 5.15 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 2.	48
Figura 5.16 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 1, às 192h, para o caso 3.	50
Figura 5.17 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 3.	50
Figura 5.18 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 3.	51
Figura 5.19 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 2, às 192h, para o caso 1.	52
Figura 5.20 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 1.	52
Figura 5.21 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 1.	53
Figura 5.22 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 2, às 192h, para o caso 2.	54
Figura 5.23 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 2.	54

Figura 5.24 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 2.	55
Figura 5.25 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 2, às 192h, para o caso 3.	56
Figura 5.26 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 3	56
Figura 5.27 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 3.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde - Adaptado da Portaria de Consolidação PRC nº 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX do Ministério da Saúde.....	13
Tabela 4.1 – Características do dos nós da rede de distribuição de água	27
Tabela 4.2 – Características do dos nós da rede de distribuição de água (continuação).	28
Tabela 4.3 – Características do tanque existente na rede de distribuição de água	28
Tabela 4.4 – Características dos trechos/tubulações da rede de distribuição de água.....	29
Tabela 4.5 – Características dos trechos/tubulações da rede de distribuição de água (continuação).	30
Tabela 4.6 – Parâmetros das reações relacionadas à qualidade da água na rede de distribuição em estudo.	31
Tabela 5.1 - Resultados para o cenário 1 - caso 1	43
Tabela 5.2 - Resultados para o cenário 1 - caso 2	46
Tabela 5.3 - Resultados para o cenário 1 - caso 3	49
Tabela 5.4 - Resultados para o cenário 2 - caso 1	51
Tabela 5.5 - Resultados para o cenário 2 - caso 2	53
Tabela 5.6 - Resultados para o cenário 2 - caso 3	55
Tabela 5.7 - Comparação do caso 1 para os 3 cenários.....	58
Tabela 5.8 - Comparação do caso 2 para os 3 cenários.....	59
Tabela 5.9 - Comparação do caso 3 para os 3 cenários.....	60

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

CCS	Cyclical Constrained Species
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
DBP	Disinfection by-product
EPA	Environmental Protection Agency
EUA	Estados Unidos da América
HSA	Harmony Search Algorithm
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
MS	Ministério da Saúde
NOM	Natural Organic Matter
NSGA	Non-dominated Sorting Algorithm
PE	Polietileno
PSO	Particle Swarm Optimization
PVC	Policloreto de Vinila
RCS	Repetitive Cyclical Simulations
THM	Trihalometano
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
WNTR	Water Network Tool for Resilience
WQI	Water Quality Index

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos do tratamento de água está ligado à saúde pública. A água pode conter uma variedade de substâncias as quais podem deixar a população doente e ainda possuir a característica de atuar como um rápido meio transmissor dessas doenças para um grande número de pessoas. Grandes avanços no tratamento público de água para consumo humano começaram a se desenvolver na segunda metade do século XIX depois que o Dr. John Snow (1813 – 1858), médico inglês, identificou a conexão entre a contaminação da água de abastecimento humano e algumas doenças como a cólera, por exemplo. Sua descoberta, mais tarde, foi apoiada pela defesa da teoria dos germes da doença pelo cientista francês Louis Pasteur (1822 – 1895) na década de 1860 assim como a descoberta de importantes microrganismos patogênicos (agentes capazes de causar doenças) pelo cientista alemão Robert Koch (1843 – 1910). Como resultado, diversas estratégias foram desenvolvidas para se ter uma separação entre os sistemas de água potável e sistemas de controle de resíduos humanos, já que estes eram os grandes contribuintes de contaminação. Entre essas estratégias incluem-se o uso de fontes de água que não estejam expostas à contaminação por esgoto, o tratamento da água quando oriunda de fontes contaminadas, o uso de sistemas de abastecimento continuamente pressurizados que assegurem que a água tratada, uma vez obtida, possa chegar ao consumidor sem nenhum contato com outros tipos de contaminação, e o uso de indicadores bacterianos de contaminação fecal humana.

A cloração contínua da água potável como um meio de controle bacteriológico começou no início do século XX, com a implementação do tratamento de água convencional e a desinfecção por cloro das fontes superficiais de água, sendo o foco das 4 décadas seguintes. Já por volta da década de 1940, a maioria das fontes de água em países desenvolvidos tinham um sistema de tratamento completo e eram considerados microbiologicamente seguros. A partir de 1974, contudo, estudos nos Estados Unidos e em países da Europa começaram a mostrar que o cloro e outros produtos químicos geralmente usados na desinfecção do tratamento de água reagem com a matéria orgânica natural presente na água ou com o próprio material da parede dos condutos, dando origem a compostos orgânicos carcinogênicos (Rook, 1974; Richardson, 2001 e Lin, 2000).

Controlar a dosagem de cloro apenas na saída do sistema de tratamento pode não ser a forma mais efetiva de se melhorar a situação. Diversos trabalhos, dentre eles os de Boccelli *et al.* (1998) e Tryby *et al.* (2002) mostraram ser possível, a partir de uma modelagem computacional hidráulica e de qualidade da água, a obtenção de uma estratégia baseada na

otimização da injeção de cloro ao longo da rede em pontos chamados estações impulsionadoras. Assim, minimiza-se a quantidade de cloro usada e melhora-se a concentração nas áreas periféricas da rede, mantendo o cloro residual livre entre um nível mínimo e máximo estabelecidos em lei, o que favorece também o controle da formação de subprodutos de desinfecção, que podem ser carcinogênicos.

A partir desse contexto, o presente trabalho propõe a análise de estratégias apresentadas na literatura para otimizar a quantidade de cloro injetada em uma rede de abastecimento, a fim de se atingirem os limites de cloro residual estabelecidos na lei. Seguem as seções: objetivos, fundamentação teórica e revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussões e conclusões e recomendações.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar comparações com resultados com relação à cloração mais efetiva em uma rede de distribuição e abastecimento de água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as propostas de regras operacionais de cloração em redes de distribuições de abastecimento;
- Analisar as propostas de cloração ao longo da rede de abastecimento;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais tópicos relativos aos assuntos de sistemas de distribuição de água, perda de carga na simulação hidráulica, modelagem da qualidade da água, reações dentro da rede de distribuição de água e otimização em redes de distribuição, os quais são importantes para a fundamentação teórica do presente trabalho.

3.1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

3.1.1 Características gerais do sistema de distribuição

O reservatório é o elemento do sistema de distribuição de água destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição. Existem vários critérios que permitem classificar os reservatórios, entre eles destacamos os seguintes: quanto à localização no sistema, quanto à localização do terreno e quanto aos materiais de construção do reservatório (Tsutiya, 2006).

Com respeito à localização do reservatório no sistema temos: reservatório localizado a montante da rede de distribuição, sendo este que sempre fornece água à rede de distribuição; reservatório localizado a jusante da rede, também chamados de reservatórios de sobras, pois recebem água durante as horas de menor consumo e auxiliam o abastecimento durante as horas de maior consumo; detalhe que a entrada e saída de água se efetuam por uma mesma tubulação. Por último, o reservatório localizado em posição intermediária no sistema, o qual tem a função de servir de volante de regularização das transições entre bombeamento e/ou adução por gravidade (Tsutiya, 2006).

Em relação à posição em relação ao terreno, temos: reservatório enterrado, situa-se inteiramente em cota inferior à do terreno; reservatório semienterrado, apresenta pelo menos um terço de sua altura total situada abaixo do nível do terreno; reservatório apoiado, cujo o fundo encontra-se a uma profundidade correspondente a menos que um terço de sua altura total em relação ao terreno; e por último, o reservatório elevado, cuja cota de fundo é superior à do terreno (Tsutiya, 2006). A Figura 3.1 ilustra essa relação.

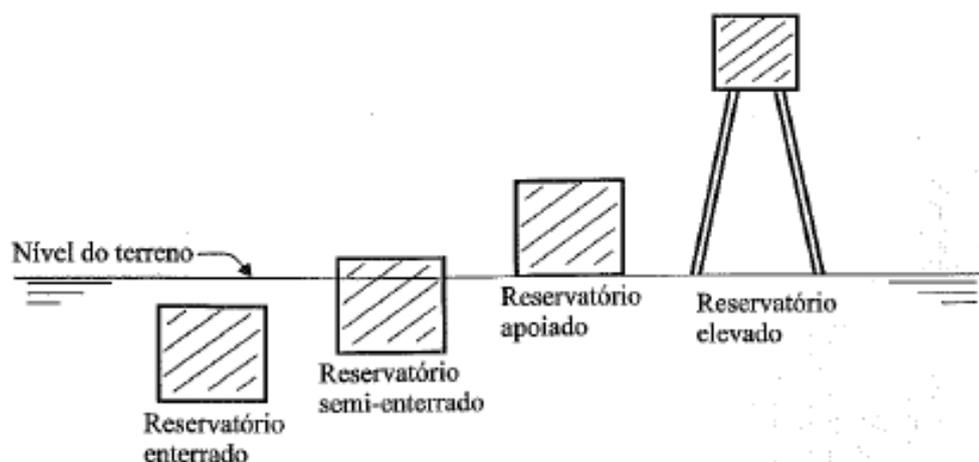


Figura 3.1 - Posições dos reservatórios em relação ao terreno. (Tsutiya, 2006)

Os reservatórios podem ser construídos com diversos materiais, como: concreto armado, aço, poliéster armado com fibras de vidro e outros materiais menos comuns como madeira, borracha e alvenaria. Fatores que influenciam na escolha do tipo de material a ser utilizado incluem a agressividade da água a ser armazenada e do ar atmosférico, que podem interferir em aspectos relacionados à qualidade d'água (Tsutiya, 2006).

A rede de distribuição é a parte do sistema de abastecimento de água formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar a água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendada. Em geral, é o componente mais caro dos sistemas de abastecimento de água sendo responsável por cerca de 50% a 75% do custo total de todas as obras do sistema. Em um sistema público de abastecimento de água, as redes de distribuição e as ligações prediais são as partes que normalmente não estão sob constante vigilância, devido ao fato de geralmente essas obras estarem enterradas, as quais se distribuem sob as vias públicas sendo o acesso às mesmas bem mais difícil, e às vezes, extremamente complexo. Como esta é a parte do sistema que se encontra mais próxima do consumidor, deve-se ter especial atenção principalmente no que se refere à qualidade da água e perdas da água nos sistemas de tubulações (Tsutiya, 2006).

Uma rede de distribuição de água é normalmente constituída por dois tipos de canalizações: principal, com tubulações de maior diâmetro que têm por finalidade abastecer as canalizações secundárias; e secundária, tubulações de menor diâmetro que têm a função de abastecer diretamente os pontos de consumo (Tsutiya, 2006). De acordo com a disposição das canalizações principais e o sentido do escoamento nas tubulações secundárias, as redes são classificadas em:

- Ramificada, quando o abastecimento se faz a partir de uma tubulação tronco, alimentada por um reservatório e a distribuição da água é feita diretamente para os condutos secundários. O sentido da vazão é conhecido em qualquer trecho, um esquema pode ser visto na Figura 3.2;
- Malhada, constituídas por tubulações principais que formam anéis ou blocos, de modo que se pode abastecer qualquer ponto do sistema por mais de um caminho, permitindo uma maior flexibilidade em satisfazer a demanda e manutenção da rede, um esquema pode ser visto na Figura 3.3;
- Mista, associação de redes ramificadas com as redes malhadas, um esquema pode ser visto na Figura 3.4.

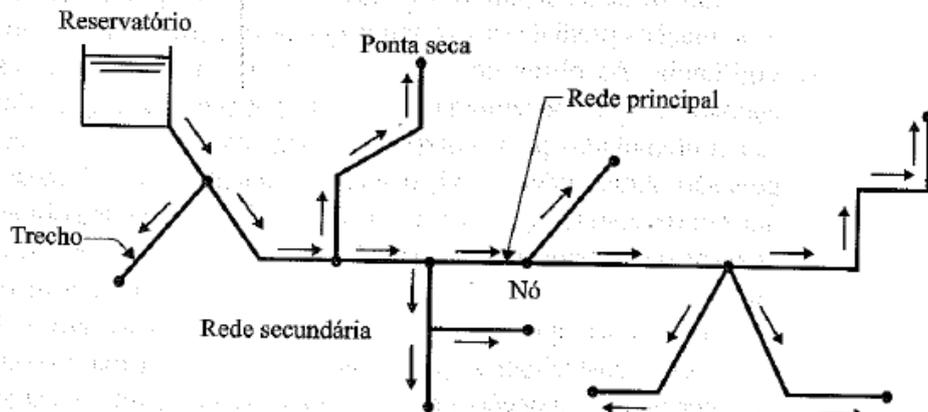


Figura 3.2 - Esquema de uma rede ramificada. (Tsutiya, 2006)

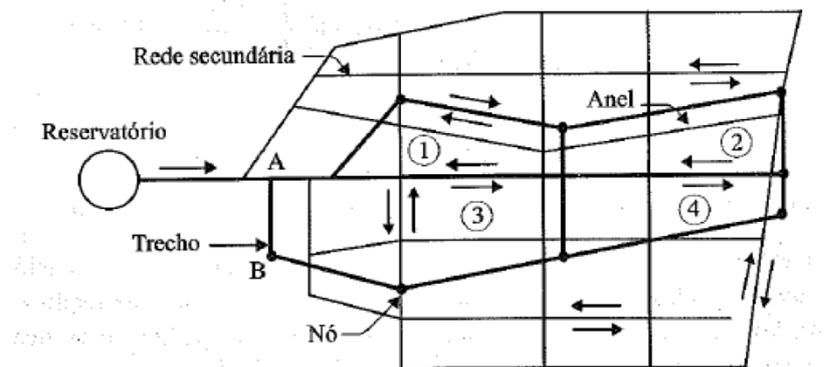


Figura 3.3 - Esquema de uma rede malhada com quatro anéis ou malhas. Porto (1998)

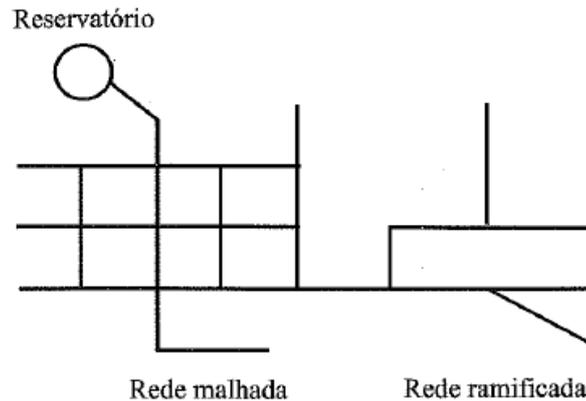


Figura 3.4 - Esquema de uma rede mista. Tsutiya (2006)

Quanto aos principais materiais dos condutos e peças de um sistema de distribuição de água temos: tubos de ferro fundido cinzento e ferro fundido dúctil, tubos de PVC (policloreto de vinila), tubos de polietileno (PE) e tubos de fibrocimento, também podem-se citar as tubulações de aço com junta elástica, plástico reforçado com fibra de vidro e poliéster reforçado com fibra de vidro. Também há a presença de órgãos e equipamento acessórios nas redes de distribuição, entre eles destacam-se: válvulas (de manobra, de descarga, redutora de pressão, sustentadora de pressão), ventosas e hidrantes (Tsutiya, 2006).

3.1.2 Desinfecção

De acordo com o Centro de Controle e Prevenção de Doenças dos EUA (*Centers for Disease Control and Prevention – CDC*), deficiências nos sistemas de distribuição são fatores que contribuem significativamente para surtos de doenças transmitidas pela água. Por isso, é preciso uma atenção cuidadosa a fim de assegurar a integridade dos sistemas de distribuição, incluindo desinfecção dos condutos e instalações de armazenamento, para reduzir a possibilidade de contaminação microbiológica. Esses agentes patogênicos podem adentrar os sistemas através de aberturas em seus componentes, durante a instalação principal destes ou reparos. Solos contendo agentes patogênicos e outros micróbios associados com a instalação e reparos dos componentes de um sistema de distribuição são a fonte mais comum de contaminação microbiológica, tanto dos condutos quanto das instalações armazenamento.

A desinfecção dos condutos e das instalações de armazenamento de água é geralmente feita utilizando-se uma das várias formas do cloro: gás cloro (liquefeito sob pressão em cilindros), solução de hipoclorito de sódio, e hipoclorito de cálcio em forma granular, com os limites estabelecidos pelas regulações pertinentes do Ministério da Saúde. Também podem ser utilizadas cloraminas ou dióxido de cloro. As cloraminas apresentam menor poder de

desinfecção que o cloro livre, porém possibilitam minimizar a formação de compostos organoclorados (THMs). Quanto ao dióxido de cloro, este normalmente é obtido por meio de soluções de clorito de sódio e ácido clorídrico. O residual de dióxido de cloro na água é bastante estável, o que é vantajoso para prevenir eventuais contaminações que possam ocorrer, (Heller e Pádua, 2006). O presente estudo focará apenas no cloro, que é o desinfetante mais comum, amplamente utilizado em Brasília e em outros locais do Brasil.

O cloro, em suas várias formas citadas anteriormente, reage com água e forma o ácido hipocloroso (HClO), além de outros produtos. Esse ácido pode se dissociar em água resultando no íon hipoclorito. As reações estão representadas pelas Equações 3.1 a 3.4. O ácido hipocloroso junto como íon hipoclorito é o que se chama de cloro residual livre, sendo que o ácido é 100 vezes mais efetivo como desinfetante do que o íon, (Lauer e Sanchez, 2006). As quantidades relativas desses dois compostos na água são determinadas pelo pH, como pode ser visto na Figura 3.5. Condições de baixo pH favorecem a formação do ácido hipocloroso.

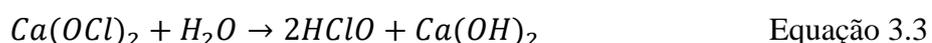
Reação do cloro líquido com a água:



Reação do hipoclorito de sódio com a água:



Reação do hipoclorito de cálcio com a água:



Dissociação do ácido hipocloroso em meio aquoso:



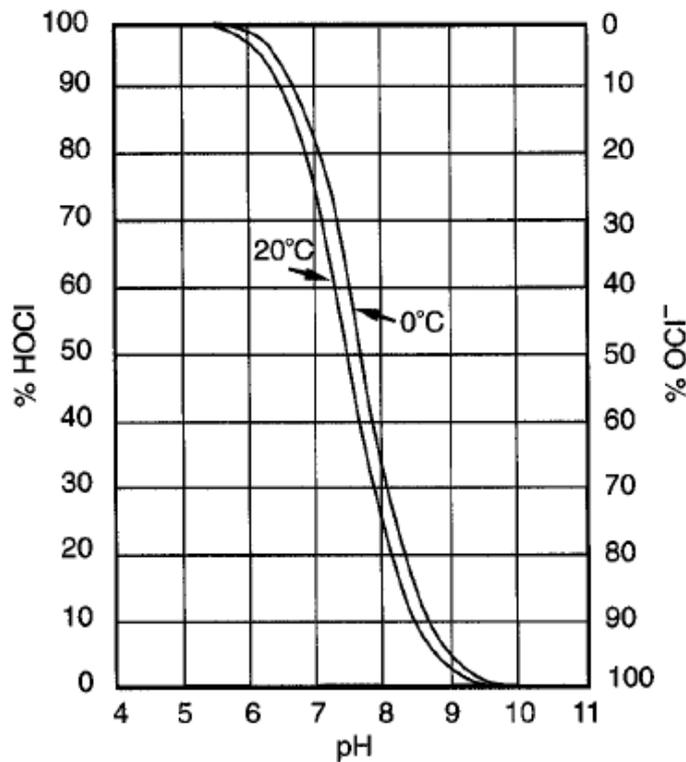


Figura 3.5 - Efeito dos compostos de cloro no pH da água. (Lauer e Sanchez, 2006)

Uma importante observação é a de que o cloro líquido, ao reagir com água, produz outro ácido (HCl) além do ácido hipocloroso. Isso resulta em um baixo pH que favorece a formação de mais cloro residual livre na forma de HClO. Por outro lado, ambos os hipocloritos de sódio e de cálcio ao reagirem com água também formam hidróxidos que favorecem um aumento do pH, isso consequentemente favorece a formação de cloro residual livre na forma do íon hipoclorito. Em um pH de 10, todo o cloro residual livre disponível está na forma do íon, o que reduz fortemente a eficácia da desinfecção. (Lauer e Sanchez, 2006)

Particularmente as reações dos ácidos hipocloroso (HClO) e ácidos hipobromoso (HOBr) dão origem a compostos trihalometanos (THM) como clorofórmio (CHCl_3), bromodiclorometano (CHCl_2Br), dibromoclorometano (CHClBr_2) e bromofórmio (CHBr_3) (Rook, 1974). Vários estudos vêm mostrando que o cloro é o responsável pela formação de um grande número de produtos secundários da desinfecção (DBP, *disinfection by-products*) assim como produtos químicos alternativos também produzem DBPs próprios (Richardson, 2001) os quais podem ser extremamente prejudiciais à saúde humana.

Quanto à contaminação, esta pode-se dar por via oral, dermatológica, ou até mesmo inalação de água clorada (Lin, 2000). Proteger o público de doenças transmissíveis pela água é um

desafio com o qual os engenheiros têm de lidar balanceando um mínimo de desinfecção necessário para o tratamento da água e um máximo para controlar a formação de DBPs. Na Figura 3.6 tem-se a forma geral de um trihalometano.

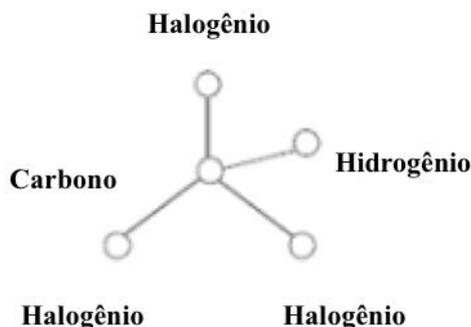


Figura 3.6 - Forma geral de um trihalometano (Fonte: CDC)

O cloro está presente no abastecimento de água na maioria dos casos na forma do íon cloreto (Cl^-), embora alguns produtos da hidrólise do cloro (HClO e OCl^-) possam existir temporariamente onde o cloro foi adicionado como um desinfetante.

3.1.3 Qualidade da água nas estruturas de armazenamento

Matéria orgânica natural (*natural organic matter* – NOM) é o termo utilizado para descrever a matriz de compostos orgânicos que vêm de fontes naturais, como secreções do metabolismo de organismos como algas e protozoários, assim como decaimento de matéria orgânica por bactérias, e estão presentes nos corpos d'água e redes de distribuição. Historicamente, a significância que a matéria orgânica natural tinha na água potável estava relacionada ao impacto em aspectos estéticos e de qualidade, devido ao fato desta deixá-la com um aspecto amarelado. Mais recentemente, a preocupação acerca das NOM tem foco em sua capacidade de reagir com o cloro, pois além de consumir o agente desinfetante, fazendo com que a dose necessária para alcançar o efeito desejado de desinfecção seja mais alta, aumenta o perigo de formação de substâncias carcinogênicas.

Na concepção do sistema de reservação, algumas variáveis devem ser consideradas e investigadas, visando à preservação da qualidade da água. Uma razão (volume do reservatório)/(vazão aduzida) muito alta resulta em tempos de detenção mais longos, que juntos com a configuração inadequada dos dispositivos de entrada e saída de água no reservatório – acarretando a estratificação das águas de diferentes idades – podem afetar negativamente as características da água. Tempos muito longos de detenção nos

reservatórios favorecem o crescimento e a aclimação das bactérias nitrificantes às condições de pH e à presença do desinfetante residual, favorecendo a nitrificação. Em águas cloradas, esse fenômeno representa uma queda nas concentrações do cloro residual, o qual é utilizado como agente oxidante na oxidação, por bactérias, da amônia (Heller e Pádua, 2006).

Em unidades com dispositivo comum de entrada e saída, geralmente situado próximo ao fundo da estrutura do reservatório, como por exemplo reservatórios de jusante, observa-se uma situação do tipo “primeiro a entrar, último a sair”, em que as águas mais distantes do mesmo, mais acima no reservatório, apresentam elevadas idades e, com isso baixos valores de cloro residual. Por outro lado, em reservatórios com dispositivos de chegada e saída distintos, como por exemplo reservatórios de montante, geralmente posicionados em lados opostos na estrutura de reservação, o fluxo comporta-se da forma “primeiro a chegar, primeiro a sair”, situação na qual a idade média das águas no interior da estrutura será dependente da condição de mistura (Heller e Pádua, 2006).

Em relação à condição de mistura, os reservatórios podem contribuir para o aumento da idade média da água, dependendo de sua operação, locação e geometria. Estruturas com elevada razão comprimento/largura ou altura/raio comportam-se como reatores de fluxo de pistão, podendo apresentar pouca ou nenhuma mistura da massa líquida. Observa-se, por amostragem em diversas profundidades, uma variação significativa das concentrações de cloro, sendo maiores nas regiões próximas ao dispositivo de entrada. De outra maneira, em reservatórios com elevada razão altura/largura e cujo dispositivo de chegada encontra-se no fundo do mesmo, não há uma mistura entre as águas das camadas superiores (maiores idades) e inferiores (menores idades). Nestes casos, o tempo de detenção tem significativo efeito sobre a idade média do efluente, a qual se manifestará na concentração do cloro residual, sendo reduzidas para águas de maior idade (Heller e Pádua, 2006).

A qualidade da água de reservatórios do tipo mistura completa é mais sensível à variação volumétrica. Em unidades de reservação nas quais não há uma flutuação substancial no volume, a idade média das águas verificada em seu interior pode ser muito elevada, podendo atingir dias ou semanas. Então um fator importante a ser considerado é a posição relativa do reservatório no terreno, já que estruturas elevadas são preferíveis devido à condição mais favorável de “mistura completa” e à maior variação volumétrica durante os ciclos de enchimento e esvaziamento (Heller e Pádua, 2006).

Aliado a fatores como decaimento do cloro residual combinado ou livre em função da oxidação de compostos orgânicos e/ou inorgânicos e florescimento de algas, a qualidade da

água pode sofrer alterações devido ao contato da água armazenada com o concreto das paredes do reservatório. Este fenômeno é explicado pelas distintas concentrações de carbonato de cálcio na água e na superfície de contato das unidades de reservação, observando-se uma deterioração do concreto. Essa preocupação com a deterioração do concreto justifica-se na medida em que tal fenômeno implica a formação de uma superfície rugosa e, conseqüentemente, de um substrato bem mais propício à adesão de patogênicos e outros microrganismos (Heller e Pádua, 2006).

3.1.4 Regulação

As regulações e práticas inerentes ao tratamento de água são influenciadas pelo efeito do contaminante na saúde das pessoas, os quais em água potável podem ser agudos ou crônicos. Estes dois termos estão ligados ao tempo de exposição a certo contaminante necessário para que os efeitos e sintomas comecem a aparecer nos indivíduos. Um contaminante é identificado como de efeito agudo quando sintomas na saúde podem começar a aparecer após uma breve exposição, por exemplo, aos agentes patogênicos (bactérias e microrganismos patogênicos em geral). Por outro lado, um contaminante é dito como de efeito crônico quando sintomas na saúde estão associados a exposições contínuas ao longo do tempo, por exemplo substâncias carcinogênicas, como os DBPs. Contaminantes agudos normalmente têm um indicador máximo o qual não pode ser excedido em qualquer hipótese, enquanto os crônicos são mais apropriadamente regulados na base de indicadores médios e estudos de longo-prazo. No projeto dos sistemas de tratamento, a confiabilidade é fundamental para um esquema que objetiva reduzir riscos agudos à saúde da população, porém, com robustez suficiente para também mitigar riscos crônicos. O desafio que predomina hoje é abordar os constituintes que geram as conseqüências de longo-prazo.

No Brasil, com o objetivo de garantir a prevenção a inúmeras doenças e a promoção da saúde da população, a Portaria de Consolidação PRC nº 5, de 28 de setembro de 2017, Anexo XX do ministério da saúde estabelece as responsabilidades por parte de quem trata a água (os sistemas de abastecimentos de água e/ou soluções alternativas), a quem cabe o exercício de “controle de qualidade de água”, e das autoridades sanitárias do governo, a quem cabe a “vigilância da qualidade da água para o consumo”. Ela dispõe também sobre os procedimentos inerentes ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano, estabelece seu padrão de potabilidade e dá outras providências.

De acordo com a portaria citada, no controle do processo de desinfecção da água por meio de cloração, cloraminação ou da aplicação de dióxido de cloro devem ser observados os

tempos de contato específicos assim como os valores de concentrações residuais de desinfetante na saída do tanque de contato expressos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde - Adaptado da Portaria de Consolidação PRC n° 5, de 28 de setembro de 2017,

Anexo XX do Ministério da Saúde

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido
Desinfetantes e produtos secundários da desinfecção ⁽¹⁾		
Ácidos haloacéticos total	mg/L	0,08
Bromato (BrO ₃ ⁻)	mg/L	0,01
Clorito (ClO ₂ ⁻)	mg/L	1
Cloro livre ⁽¹⁾	mg/L	5
Cloraminas Total	mg/L	4,0
2,4,6 Triclorofenol	mg/L	0,2
Trihalometanos total	mg/L	0,1

Nota: (1) Análise exigida de acordo com o desinfetante utilizado.

Quanto ao processo de desinfecção, após o uso do cloro, a água deve conter um teor mínimo de cloro residual livre de 0,2 mg/L, ou 2mg/L de cloro residual combinado ou de 0,2mg/L de dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede). No caso do uso de ozônio ou radiação ultravioleta como desinfetante, deverá ser adicionado cloro ou dióxido de cloro, de forma a manter residual mínimo no sistema (reservatório e rede), de acordo com os valores apresentados anteriormente. Outras recomendações com relação ao padrão de aceitação para consumo são que o pH da água seja mantido na faixa de 6,0 a 9,5 e que o teor máximo de cloro residual livre em qualquer ponto do sistema de abastecimento, seja de 2,0 mg/L.

3.2 PERDA DE CARGA NA SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

A simulação hidráulica consiste na determinação das vazões nos trechos da rede de distribuição e das pressões nos nós. Para isso, parte-se de parâmetros como o nível do reservatório da rede, o valor das cotas em cada nó e os diâmetros e comprimentos da tubulação, também é necessário o cálculo das perdas de carga que ocorrem nas tubulações da rede.

As duas principais equações utilizadas no cálculo da perda de carga é a de Darcy-Weisbach e a de Hazen-Williams.

A equação de Darcy-Weisbach para a perda de carga na tubulação é dada pela Equação 3.5:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

- h_f = perda de carga [m];
- f = fator de atrito, depende da natureza do material utilizado na tubulação e do número de Reynolds [m/m];
- L = comprimento da tubulação [m];
- D = diâmetro da tubulação [m];
- V = velocidade do escoamento na tubulação [m/s]; e
- g = aceleração da gravidade [m/s²].

A equação de Hazen-Willians para a perda de carga na tubulação é dada pela Equação 3.6:

$$J = 10,643 \cdot \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

- J = perda de carga unitária [m/m];
- Q = vazão na tubulação [m³/s];
- D = diâmetro da tubulação [m]; e
- C = fator C de Hazen-Willians, coeficiente que depende da natureza e estado do material das paredes das tubulações.

3.3 MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA

A variação no espaço e no tempo da qualidade da água em um sistema de distribuição envolve fenômenos complexos por causa tanto dos padrões de mistura hidráulicos na rede assim como a transformação da qualidade da água que ocorre dentro desta. A topologia da rede de condutos e a dinâmica da mudança dos padrões de uso da água ao longo do tempo cria uma infinidade de caminhos pelos os quais a água pode percorrer desde a estação de tratamento até o consumidor. Modelos matemáticos bem estudados e aplicados ao sistema podem originar métodos para a estimativa da movimentação, transformação e qualidade da água na rede. (Robinson *et al.*, 2012).

Modelos de qualidade da água são usados para prever a distribuição espacial e temporal de uma variedade de constituintes e características da água dentro do sistema de distribuição. Dentre elas podem-se destacar as seguintes com suas respectivas técnicas:

- A porção de água originária de uma fonte particular que chega em qualquer nó de junção da rede. O nó fonte pode ser qualquer tanque ou reservatório na rede, sendo tratado como uma fonte constante de um composto não-reagente que entrará no sistema com uma concentração de 100%. Isto mostrará como se dá o padrão de mistura no espaço e no tempo da mistura da água de diferentes fontes;
- A idade da água, que é o tempo de detenção de uma parcela de água na rede. A água entra pelo reservatório ou qualquer outra fonte com idade zero, e assim é tratada no modelo como um reagente que segue uma cinética de ordem zero com taxa constante igual a 1, ou seja, a cada segundo a água aumenta sua idade em um segundo.
- A concentração e a taxa de decaimento de desinfetantes residuais (p.e. cloro ou cloramina) ou a concentração e a taxa de crescimento dos produtos de desinfecção (DBPs) (p.e. trihalometanos totais e ácidos haloacéticos); mais tarde se detalhará esse modelo.

A partir desses modelos, podem-se dar origem a diversos estudos como:

- Localização e dimensionamento das instalações de armazenamento e modificação da operação do sistema a fim de reduzir a idade média da água;
- Modificação da operação do sistema a fim de prover uma mistura adequada da água vinda de diversas fontes;
- Determinação da melhor localização, melhor taxa de dosagem e/ou melhor cronograma para as estações de recloração;
- Diminuir o risco de exposição dos consumidores aos DBPs.

3.3.1 Princípios Governantes da Modelagem da Qualidade da água:

Assim como os modelos hidráulicos seguem as leis de conservação de massa e energia de um fluido, os modelos de qualidade de água são baseados na conservação de massa dos constituintes (reagentes, produtos, água, etc.). Os modelos representam os seguintes fenômenos ocorrendo no sistema de distribuição: (Clark, 2012):

- Transporte advectivo do fluido, onde se tem uma substância dissolvida percorrendo o comprimento dos condutos com a mesma velocidade média do fluido do meio enquanto ao mesmo tempo reage (crescendo ou decaindo) a uma determinada taxa. A dispersão longitudinal geralmente não é um importante mecanismo de transporte na maioria dos casos de operação, isto quer dizer que se pode considerar que não há

mistura de massa entre duas parcelas adjacentes de água percorrendo um conduto. A equação governante do transporte advectivo se dá conforme a Equação 3.7:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde:

C_i = concentração [massa/volume] no conduto i como uma função da distância x e do tempo t ;

u_i = velocidade do fluido [comprimento/tempo] no conduto i ;

r = taxa de reação [massa/volume/tempo] com uma função da concentração;

- A mistura do fluido é completa e instantânea nas intersecções da rede que recebem fluxo de um ou mais condutos. Então a concentração de uma substância deixando a intersecção é simplesmente a soma ponderada das concentrações dos condutos de origem, onde os pesos são as vazões. A equação governante dessa mistura para um nó k (início do conduto i) é, conforme a Equação 3.8:

$$C_{i,x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j,x=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + Q_{k,ext}} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde:

j = conduto com vazão chegando no nó k ;

I_k = conjunto de condutos com vazão chegando no nó k ;

L_j = comprimento [comprimento] do conduto j ;

Q_j = vazão [volume/tempo] no conduto j ;

$Q_{k,ext}$ = vazão [volume/tempo] da fonte externa entrando na rede no nó k ;

$C_{k,ext}$ = concentração [massa/volume] da vazão da fonte externa entrando na rede no nó k ;

A notação $C_{i,x=0}$ indica uma concentração localizada no início do conduto i , enquanto a notação $C_{j,x=L_j}$ indica uma concentração localizada no final do conduto j .

- A mistura do fluido dentro dos tanques de armazenamento pode ser modelada de 4 diferentes maneiras: mistura completa; do tipo primeiro a entrar, primeiro a sair; do

tipo último a entrar, primeiro a sair e mistura de dois compartimentos. Na Figura 3.7 pode ser visto um esquema desses 4 tipos de mistura.

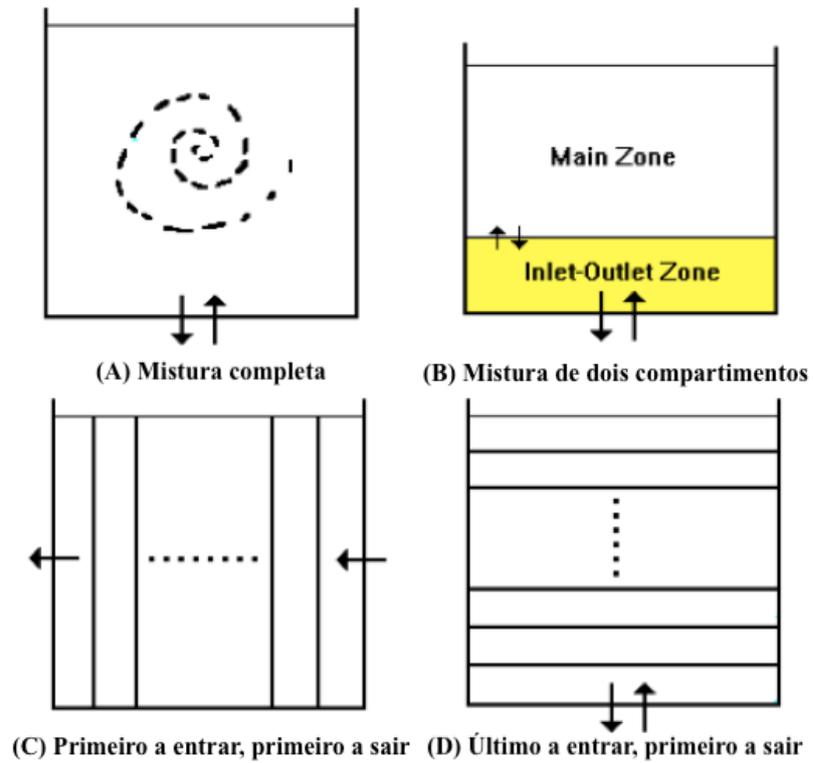


Figura 3.7 – Tipos de reatores: (A) mistura completa (B) mistura de dois compartimentos (C) primeiro a entrar, primeiro a sair (D) último a entrar, primeiro a sair. (Rossman, 2000)

3.4 REAÇÕES DENTRO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Enquanto uma substância percorre um conduto ou permanece dentro de um reservatório ou tanque, ela pode passar por reações. A taxa dessas reações [massa reagida/volume/tempo] depende do tipo de reagente em questão. Alguns desses, como o flúor, não reagem e são tratados como conservativos, outros, como trihalometanos, crescem com o tempo, enquanto outros como o residual de cloro, decaem com o tempo. Este, além de reagir com os materiais presentes no meio fluido, pode ainda reagir com os materiais nas paredes do conduto. Conforme a Figura 3.8, o cloro residual (HOCl) reage com a matéria orgânica natural (NOM) no meio fluido e também com o ferro (Fe) das tubulações.

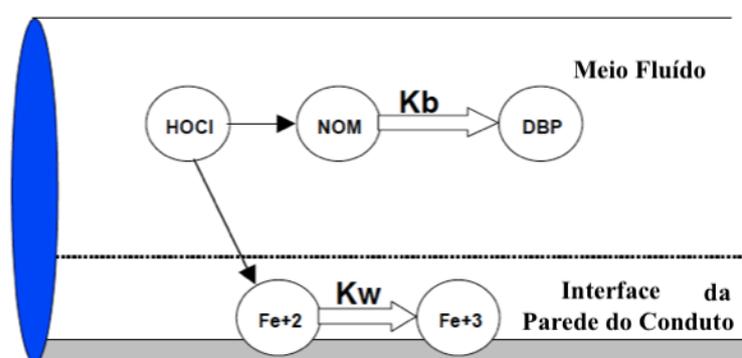


Figura 3.8 - Zonas de reação do cloro residual dentro de uma tubulação.

O modelo para descrever os tipos e taxas de reação explicados acima geralmente é descrito como uma função potência da concentração, conforme a Equação 3.9:

$$r = kC^n \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

k = constante da reação, valor geralmente dado por experimentos de laboratórios ou estudos analíticos acerca da reação;

n = ordem da reação;

C = concentração.

Quando há a presença de um reagente com concentração limitante tanto na reação de decaimento quanto na de crescimento, a equação anterior pode ser escrita conforme a Equação 3.10 para o caso de reação de decaimento, e conforme a Equação 3.11, para o caso de reação de crescimento, na qual o n continua sendo a ordem da reação.

$$r = k(C - C_L)C^{(n-1)} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde:

C_L = concentração limitante

e $k < 0$ indicando uma reação de decaimento

$$r = k(C_L - C)C^{(n-1)} \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde:

$k > 0$, indicando uma reação de crescimento

De acordo com Powell *et al.* (2000), a performance de vários modelos cinéticos alternativos de decaimento do cloro teve apenas um benefício marginal em relação ao modelo de primeira ordem. A partir de análise experimental, feita pelo mesmo autor, do perfil de decaimento longitudinal em dois diferentes sistemas, concluiu-se que o modelo de primeira ordem é o mais adequado para a modelagem *in situ* do decaimento no meio fluido. Com isso o modelo mais adequado para o presente estudo com relação ao decaimento do cloro é o de primeira ordem, como apresentado na Equação 3.12:

$$r = kC \quad \text{Equação 3.12}$$

O modelo para descrever o crescimento dos produtos de desinfecção como trihalometanos mais adequado é o modelo de primeira ordem com reagente limitante, como apresentado na Equação 3.13:

$$r = kC(C_L - C) \quad \text{Equação 3.13}$$

O modelo para descrever uma reação de primeira ordem com as paredes da tubulação será o apresentado na Equação 3.14, de acordo com Rossman (2000):

$$r = \frac{2k_w k_f C}{R(k_w + k_f)} \quad \text{Equação 3.14}$$

Onde:

- k_w = constante da reação da espécie química na interface com a parede
 k_f = coeficiente de transferência de massa;
 C = concentração;
 R = raio do conduto;

3.5 OTIMIZAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO:

Ferramentas de otimização permitem ao seu usuário definir uma função objetivo (aquilo que se quer maximizar ou minimizar) e suas restrições, e assim é possível chegar à escolha das melhores alternativas para resolução de determinado problema. Na área de sistemas de distribuição de água os modelos de otimização são utilizados com propósitos operacionais, para calibração de parâmetros ou para o próprio projeto da rede. Neste trabalho será abordada a otimização de operação de um sistema e da localização de instalações impulsoras de cloração.

A otimização da operação de um sistema pode ser utilizada no gerenciamento de custos ligados a energia, como os relacionados a bombeamento, (López-Ibáñez *et al.*, 2008; Kang e Lansey, 2010; Bagirov *et al.*, 2013; Kurek e Ostfeld, 2013; Reza *et al.*, 2014; Babaei *et al.*, 2015; Price e Ostfeld, 2016; Makaremi *et al.*, 2017) e também pode ser utilizada em aspectos relativos a qualidade da água, (Boccelli *et al.*, 1998; Constans *et al.*, 2000; Tryby *et al.*, 2002; Munavalli e Kumar, 2003; Broad *et al.*, 2005; Lansey *et al.*, 2007; Gibbs *et al.*, 2010; Afshar e Mariño, 2012; Kurek e Ostfeld, 2013; Li *et al.*, 2014; Ohar e Ostfeld, 2014; Ayvaz e Kentel, 2015; Wu *et al.*, 2015; Babaei *et al.*, 2015; Al-Zahrani, 2016; Goyal e Patel, 2016; Sharif *et al.*, 2016; Goyal e Patel, 2017; Islam *et al.*, 2017a; Islam *et al.*, 2017b e Yoo *et al.*; 2018). Outros estudos na área operacional focaram em otimização da reposição de condutos defeituoso, Giustolisi e Berardi (2009) e Malm *et al.* (2012)

Boccelli *et al.* (1998) propuseram um método para otimizar a programação de desinfecção (por meio da cloração) com o auxílio de impulsadores (reforço), isto é, adição do desinfetante ao longo da rede de distribuição de água, ao invés do método convencional com injeção de cloro apenas no reservatório. O método teve o objetivo de minimizar a massa total de desinfetante requerida, de forma a manter um nível de cloro residual mínimo ao longo da rede, e assim reduzir o potencial de formação de produtos de desinfecção (DBPs). Os autores simplificaram o problema da programação da desinfecção ao longo do tempo, transformando um problema com horizonte de tempo infinito em um problema com horizonte de tempo

finito considerando a programação como periódica. Eles resolveram o problema por meio de uma formulação em programação linear e utilizando o algoritmo simplex.

Tryby *et al.* (2002), complementando o trabalho de Boccelli *et al.* (1998), propuseram um método para otimizar a escolha dos locais dos impulsionadores da desinfecção e assim poder minimizar a dosagem de cloro na rede. A formulação do problema foi expressa na decisão de construir ou não construir as estações impulsionadoras juntamente com a decisão da quantidade dosada e foi feita por meio de programação linear mista e inteira, a parte da dosagem sendo representada por variáveis reais contínuas e a da localização por variáveis binárias (0 = não construir, 1 = construir). Os autores concluíram que além de ajudar a reduzir a exposição da população ao cloro, e potencialmente aos produtos de desinfecção (DBPs), o método pode ajudar a melhorar os níveis do cloro residual na periferia da rede de distribuição.

Constans *et al.* (2000) também propuseram um método a fim de otimizar a concentração de cloro na rede de distribuição de água sob condições periódicas e não estacionárias utilizando programação linear. Assim como em Tryby *et al.* (2002), propõe-se uma resolução que desse como resultado as melhores localizações para as estações impulsionadoras de desinfecção e as quantidades ótimas de cloro que deveriam estar presentes nos reservatórios (fontes) e nos impulsionadores.

Munavalli e Kumar (2003), contrapondo-se às soluções anteriores em que se utilizava programação linear, e devido ao caráter não-linear dos problemas de otimização da programação de injeção de cloro a partir de múltiplas fontes, resolveram o problema utilizando-se de um algoritmo genético, no qual a variável de decisão (quantidade de cloro) é uma sequência binária de “uns” e “zeros” e com restrições de cloro residual mínimo e máximo.

Gibbs *et al.* (2010) a fim de melhorar o processo de calibração de parâmetros envolvidos em um algoritmo genético, como tamanho da população, crossover, taxas de mutação, fizeram uma comparação entre dois métodos baseados no campo de ciências da computação e ainda não largamente utilizados em problemas “reais” como os de otimização em sistemas de distribuição de água. O primeiro método empregado foi o *parameterless genetic algorithms*, que envolve utilizar um pequeno tamanho de população até que o algoritmo convirja para uma solução, após isso dobra-se o tamanho da população e a melhor solução da primeira parte é incluída nessa segunda população. O algoritmo continua até que se convirja para outra solução e assim por diante, continuando o processo até não haver substancial melhora

entre as soluções de populações de diferentes tamanhos. A segunda solução aplicada foi a *convergence due to genetic drift*, que envolve a utilização de um limite inferior para o tamanho da população, o qual pode ser determinado a partir da probabilidade de quando a população irá aleatoriamente convergir devido à deriva genética. Os autores concluíram que a calibragem por meio do segundo método gerou melhores soluções, porém sugerem que mais estudos devem ser feitos para determinar se os resultados presentes no artigo se estendem para casos mais gerais de otimização de redes de distribuição de água.

Lansley *et al.* (2007) propuseram uma formulação para o problema de otimização da dosagem do cloro e da quantidade e localização dos impulsionadores, em que adicionam restrições que requerem que a concentração no início e ao final do período de projeto sejam as mesmas para todos os nós, admitindo uma periodicidade da resolução do problema e reduzindo significativamente a carga computacional utilizada para a resolução do problema, pois apenas um ciclo de injeções precisa ser considerado. Essa formulação é dividida em duas partes: a primeira define as localizações ótimas por meio de um algoritmo genético ou uma enumeração e a segunda parte resolve o problema da dosagem ótima do cloro com uma formulação de programação linear. Os resultados dos autores mostraram o *trade-off* existente entre a escolha do número de estação impulsionadoras de cloro adicionadas ao sistema e a quantidade de cloro injetada no mesmo sistema.

Li *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo da qualidade da água e dos custos de recloração em um sistema de distribuição de água, primeiramente, utilizando o programa EPANET-MSX (EPANET acrescido de um extensão para simulações multiespécies) para simular o decaimento de cloro e formação dos DBPs, em seguida utilizando um algoritmo genético de ordenação não-dominada (*non-dominated sorting algorithm* - NSGA-II) a fim de obter a fronteira de Pareto dos parâmetros ajustáveis do problema (constantes de decaimento do cloro, número de nós de cloração, coeficiente de formação dos THMs, concentração dos THMs, etc.) sob diferentes condições. Concluíram que a diminuição das constantes de decaimento do cloro é o método mais econômico de melhorar o nível de serviço do sistema antes de proceder na construção de estações de recloração.

Ohar e Ostfeld (2014) avaliaram um método para minimizar o custo geral de projeto das estações de reforço de cloração assim como sua operação, envolvendo a quantidade requerida de cloro nos dosadores para que o limites de cloro residual fossem atendidos, assim como limites máximos de concentração de trihalometanos totais. O método foi desenvolvido

relacionando um algoritmo genético com o programa EPANET-MSX, este sendo utilizado para o cálculo da reação que descreve a cinética tanto do decaimento do cloro quanto da formação dos trihalometanos totais. Foram feitas duas abordagens para lidar com as condições iniciais do problema e a periodicidade das espécies envolvidas: simulações cíclicas repetitivas (*repetitive cyclical simulations* - RCS) e espécies cíclicas restritas (*cyclical constrained species* – CCS), com a primeira mostrando-se preferível caso o tempo computacional não fosse um fator de decisão determinante. Os resultados finais do artigo mostraram que a configuração ótima das estações de reforço e a concentração dos trihalometanos totais são objetivos conflitantes, necessitando assim de um estudo melhor dos custos de oportunidades entre esses dois objetivos.

Goyal e Patel (2016), de forma semelhante a Boccelli *et al.* (1998) propuseram um método para minimizar a massa total da dosagem de cloro a ser aplicada nos vários pontos dos impulsionadores, satisfazendo uma concentração mínima de 0,2 mg/l em todos os locais do sistema de distribuição de água, para isso eles também utilizaram a técnica de programação linear junto com o programa Microsoft Excel para sua resolução. Porém eles não solucionaram o problema para todos os nós, apenas alguns nós críticos determinados pelos próprios autores, para reduzir a carga computacional do problema. Os valores das constantes relacionados aos parâmetros hidráulicos e de qualidade da água foram obtidas a partir de uma simulação no programa EPANET. Dessa forma, concluíram que poderia haver uma economia de aproximadamente 33% nos custos de cloração relacionados a um dos casos estudados no artigo. Sequentemente, Goyal e Patel (2017) propuseram para a resolução do mesmo problema citado anteriormente a utilização do programa EPANET junto com um algoritmo de *particle swarm optimization* (PSO), aquele para obtenção dos dados da simulação hidráulica e da qualidade da água e este para a otimização das localizações das estações de reforço de cloração e sua programação.

Islam *et al.* (2017a) desenvolveram uma abordagem baseada em índice para a localização dos impulsionadores de cloro em um sistema de distribuição de pequena escala (máximo de 300 nós), isto é, a partir de dados oriundos de programas de simulação da qualidade de água (quantidades de cloro residual livre e trihalometanos totais, por exemplo) calculou-se o índice de qualidade da água (water quality index – WQI). Um algoritmo heurístico foi utilizado para maximizar o WQI e para prever a formação de trihalometanos específicos foi utilizada otimização quadrática. Ao final fizeram a análise de custo de oportunidade para o número de estações impulsionadoras baseado no WQI, no ciclo de vida e custo de reforço

na cloração, além dos riscos potenciais advindos das espécies químicas. Concluíram que houve melhora na qualidade da água ao adicionar impulsionadores de cloro ao longo da rede. Yoo *et al.* (2018) propuseram um método para a otimização da localização das estações de reforço de cloração e da quantidade de dosagem, baseado em um algoritmo de busca harmônica (*harmony search algorithm* – HSA), uma técnica meta-heurística de otimização que relaciona a busca da solução ótima de um problema de engenharia à ideia de encontrar o acorde ou harmônico ótimo no campo da teoria musical. Os autores concluíram que os resultados foram superiores aos resultados derivados de algoritmos genéticos, em termos da quantidade de massa injetada na rede.

4 METODOLOGIA

Este estudo propõe-se a analisar estratégias de injeção de cloro em uma rede de distribuição por meio da melhor quantidade injetada em um só ponto e/ou pontos adicionais. Na Figura 4.1 pode ser visto um fluxograma geral do trabalho.

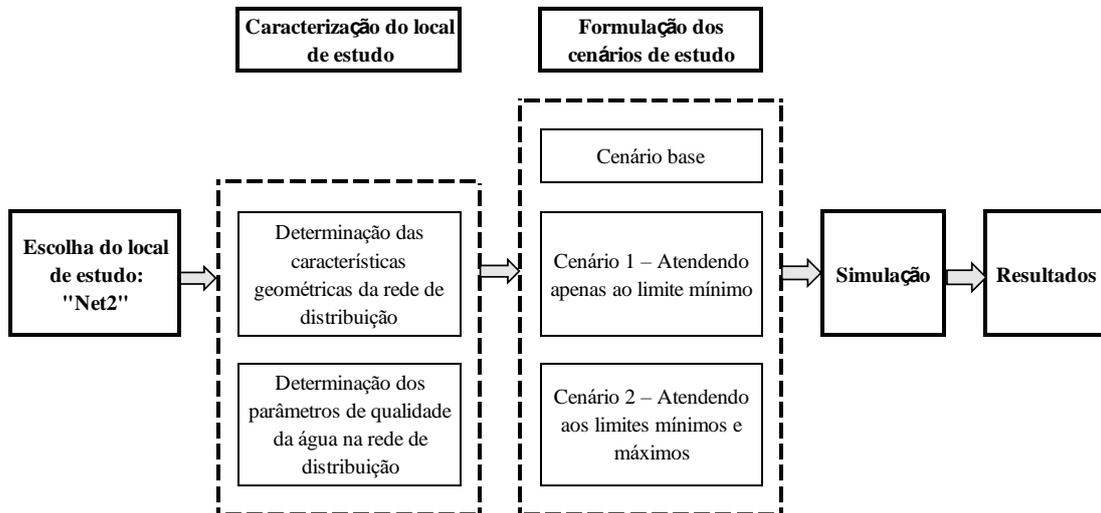


Figura 4.1 - Fluxograma Geral do Trabalho

4.1 LOCAL DE ESTUDO

O estudo foi feito em uma rede de abastecimento e distribuição de água denominada “Net2” presente nos arquivos exemplos do EPANET. Essa rede foi escolhida por ser uma rede bastante utilizada na literatura como referência para estudos referentes a redes de abastecimentos, além de ser uma rede de simples uso e estudo. A Figura 4.2 representa a rede de distribuição escolhida:

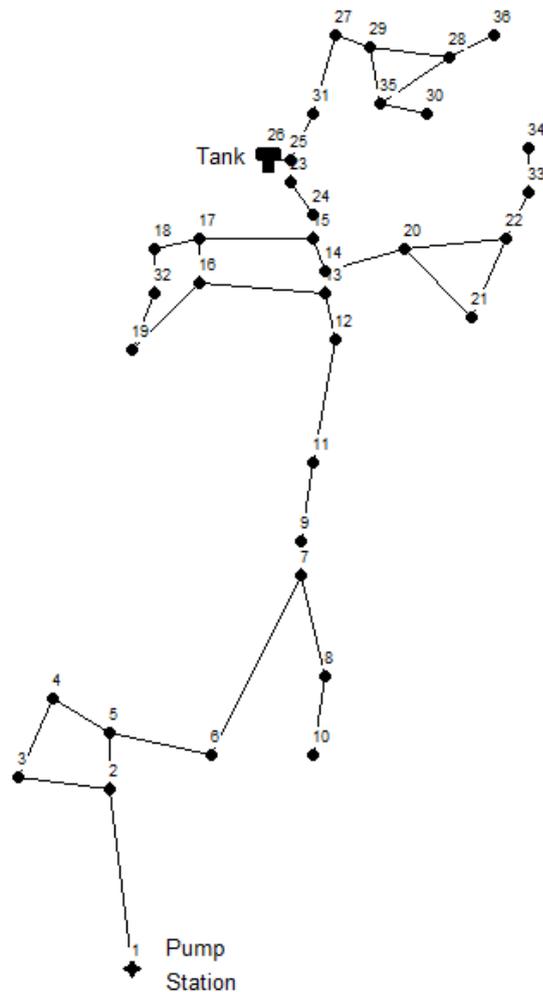


Figura 4.2 – Representação da rede de distribuição de água denominada “Net2” com a identificação dos nós.

4.1.1 Características topográficas e geométricas da rede de distribuição

A rede de distribuição denominada “Net2” é composta por 36 nós, sendo 1 referente a um tanque de mistura (nó 26) e 1 referente à estação bombeamento da rede (nó 1), os outros 34 nós restantes são junções de tubulações na rede. A rede de distribuição também se compõe por 40 tubulações/trechos fixos. A única fonte de abastecimento disponível é a estação de bombeamento representada pelo nó 1, localizado numa cota de 15,24 m. Na Tabela 4.1 são mostradas as características relativas aos nós da rede

Tabela 4.1 – Características do dos nós da rede de distribuição de água

Nós		
Identificação	Cota [m]	Demanda/consumo [L/s]
1	15,24	-43,810
2	30,48	0,505
3	18,288	0,883
4	18,288	0,505
5	30,48	0,505
6	38,1	0,315
7	48,768	0,252
8	33,528	0,568
9	54,864	0,883
10	39,624	0,315
11	56,388	2,194
12	64,008	1,009
13	64,008	0,126
14	60,96	0,126
15	57,912	0,126
16	45,72	1,262
17	54,864	1,262
18	30,48	1,262
19	45,72	0,315
20	51,816	1,199
21	45,72	1,009
22	60,96	0,631
23	70,104	0,505
24	57,912	0,694
25	70,104	0,379
27	39,624	0,505
28	33,528	0,000
29	33,528	0,442
30	39,624	0,189

Tabela 4.2 – Características do dos nós da rede de distribuição de água (continuação).

Identificação	Cota [m]	Demanda/consumo [L/s]
31	57,912	1,073
32	33,528	1,073
33	54,864	0,095
34	57,912	0,095
35	33,528	0,000
36	33,528	0,063

Na Tabela 4.3 são mostradas as características do tanque de mistura presente no nó 26 da rede de distribuição, como cota, níveis de água inicial, mínimo e máximo no tanque e diâmetro.

Tabela 4.3 – Características do tanque existente na rede de distribuição de água

Tanque de Mistura (mistura completa)					
Identificação	Cota [m]	Nível Inicial [m]	Nível Mínimo [m]	Nível Máximo [m]	Diâmetro [m]
26	71,628	17,282	15,24	21,336	15,24

A Tabela 4.4 mostra as características relativas aos trechos (tubulações) da rede de distribuição como identificação, nós de extremidade dos trechos, comprimento, diâmetro e o fator C de Hazen-Willians.

Tabela 4.4 – Características dos trechos/tubulações da rede de distribuição de água.

Trechos/Tubulações					
Identificação	Nó de início	Nó de fim	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Fator C de Hazen-Willians
1	1	2	731,52	304,8	100
2	2	5	243,84	304,8	100
3	2	3	396,24	203,2	100
4	3	4	365,76	203,2	100
5	4	5	304,8	304,8	100
6	5	6	365,76	304,8	100
7	6	7	822,96	304,8	100
8	7	8	365,76	304,8	140
9	7	9	121,92	304,8	100
10	8	10	304,8	203,2	140
11	9	11	213,36	304,8	100
12	11	12	579,12	304,8	100
13	12	13	182,88	304,8	100
14	13	14	121,92	304,8	100
15	14	15	91,44	304,8	100
16	13	16	457,2	203,2	100
17	15	17	457,2	203,2	100
18	16	17	182,88	203,2	100
19	17	18	213,36	304,8	100
20	18	32	106,68	304,8	100
21	16	19	426,72	203,2	100
22	14	20	335,28	304,8	100
23	20	21	396,24	203,2	100
24	21	22	396,24	203,2	100
25	20	22	396,24	203,2	100
26	24	23	182,88	304,8	100
27	15	24	76,2	304,8	100
28	23	25	91,44	304,8	100
29	25	26	60,96	304,8	100

Tabela 4.5 – Características dos trechos/tubulações da rede de distribuição de água
(continuação).

Identificação	Nó de início	Nó de fim	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Fator C de Hazen-Willians
30	25	31	182,88	304,8	100
31	31	27	121,92	203,2	100
32	27	29	121,92	203,2	100
34	29	28	213,36	203,2	100
35	22	33	304,8	203,2	100
36	33	34	121,92	203,2	100
37	32	19	152,4	203,2	100
38	29	35	152,4	203,2	100
39	35	30	304,8	203,2	100
40	28	35	213,36	203,2	100
41	28	36	91,44	203,2	100

4.1.2 Parâmetros de qualidade da água na rede de distribuição

Para os parâmetros das reações químicas que ocorrem ao longo da rede, ligadas principalmente ao decaimento do cloro, como a ordem da reação foram adotados valores baseados nos estudos de Powell *et al.* (2000) e para os coeficientes da reação foram adotados valores arbitrários. Em todos os casos foram escolhidas ordem da reação igual a 1. Para o caso 1, adotaram-se parâmetros extremos que buscassem simular altas taxas de decaimento, semelhante ao que acontece em redes mais velhas. Para o caso 2, adotaram-se valores intermediários para os coeficientes e para o caso 3, adotaram-se valores que priorizassem ainda mais a reação de decaimento do cloro com as paredes das tubulações, visto que a rede é composta por tubulações de diâmetros da ordem 200 a 300 mm, favorecendo o maior contato do fluido com as paredes dos condutos. Os parâmetros encontram-se compilados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros das reações relacionadas à qualidade da água na rede de distribuição em estudo.

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ordem da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento	1 (Primeira)	1 (Primeira)	1 (Primeira)
Ordem da reação de decaimento do cloro ao reagir com as paredes da tubulação	1 (Primeira)	1 (Primeira)	1 (Primeira)
Coefficiente da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento (k_b) [dia^{-1}]	-1	-0.5	-0.1
Coefficiente da reação de decaimento do cloro ao reagir com as paredes da tubulação (k_w) [m/dia]	-1	-0.5	-0.5

4.2 MODELAGEM

4.2.1 Programa utilizado

Optou-se pelo uso do programa EPANET, por tratar-se de programa gratuito sem restrições de uso e bastante utilizado na literatura reconhecida nacional e internacionalmente, com resultados confiáveis.

O EPANET é um programa de computador desenvolvido pela agência de proteção ambiental (*Environmental Protection Agency – EPA*) dos Estados Unidos da América que produz simulações de período estendido do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes de condutos pressurizados como os do presente estudo. O programa calcula a vazão em cada conduto, a pressão em cada nó, o nível de água em cada tanque e principalmente a concentração de espécies químicas ao longo da rede durante um período de simulação composto por vários intervalos de tempo. O programa pode ser utilizado para análises de

cloro residual livre na rede e pode ajudar no desenvolvimento de estratégias alternativas de aumento da qualidade da água ao longo da rede entre elas o uso de estações de reforço de cloração ao longo do sistema e não apenas no reservatório. (Rossman, 2000).

A versão do EPANET utilizada nesse trabalho foi a versão modificada pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS – UFPB).

4.2.2 Linguagem de programação utilizada

Optou-se pelo uso da linguagem de programação *Python*, por tratar-se de linguagem de distribuição livre e gratuita sem restrições de uso e a ampla gama de bibliotecas para uso em computação científica.

Pequenos programas escritos em *Python* com auxílio da biblioteca WNTR (*Water Network Tool for Resilience*) proposta por Klise *et al.* (2017) foram responsáveis pela importação automática dos dados da rede de distribuição fornecidos por um arquivo de dados de formato “.inp”, o qual também é lido pelo EPANET, e pela simulação hidráulica e de qualidade da água. Esses programas também ajudaram na rotina de teste de vários cenários, variando-se os parâmetros entre um cenário e outro até se atingir o objetivo requerido.

4.2.3 Parâmetros da simulação hidráulica e de qualidade

A simulação hidráulica foi feita para um período de 192 horas (8 dias corridos) com início às 8h da manhã, onde as primeiras 48 horas funcionam como um aquecimento do modelo, devido ao fato de o cloro injetado não chegar ao mesmo tempo em todos os nós da rede. Foram configurados intervalos básicos de tempo para os cálculos hidráulicos e de qualidade de 5 minutos. Os intervalos foram escolhidos com igual duração para se ter uma melhor coesão das simulações, visto que a simulação de qualidade da água depende dos modelos computacionais da simulação hidráulica. Na Figura 4.3 apresentam-se os dados de tempos escolhidos para as simulações.

Propriedade	h:min
Duração Total	192:00
Intervalo de Cálculo Hidráulico	0:05
Intervalo de Cálculo de Qualidade	0:05
Intervalo de Tempo Padrão	1:00
Tempo de Início Padrão	0:00
Intervalo de Tempo do Relatório	1:00
Tempo de Início do Relatório	0:00
Tempo do Início da Simulação	08:00:00 AM
Estatística	NONE

Figura 4.3 - Janela de configurações das opções de tempo da simulação.

Também foi adotado um padrão de consumo para os nós, este presente no próprio arquivo exemplo da “Net2” do EPANET. O padrão original presente no arquivo era composto por 55 multiplicadores, referentes a uma simulação de 55 horas de duração do rastreamento de flúor. Para o presente estudo, relacionado ao cloro residual na rede, optou-se por retirar as últimas 7 horas do padrão original, de forma a se obter um padrão múltiplo de 24 horas (48 horas). A Figura 4.4 apresenta o padrão de consumo dos nós da rede de distribuição e a Figura 4.5 apresenta o padrão de tempo do funcionamento da estação de bombeamento de água na origem da rede.

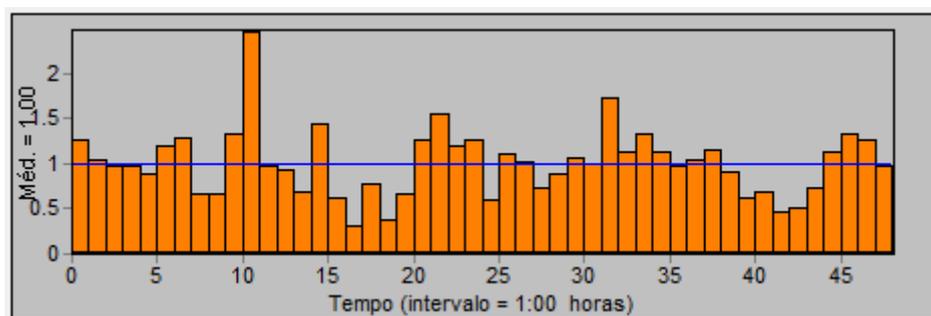


Figura 4.4 - Padrão de consumo dos nós da rede de distribuição.

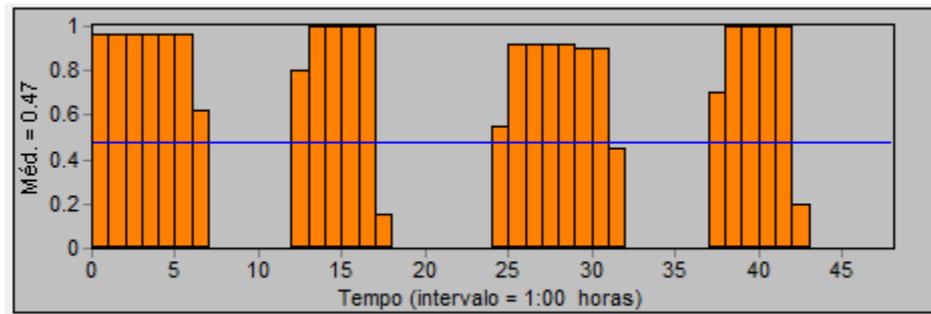


Figura 4.5 - Padrão de tempo de funcionamento da estação de bombeamento no nó 1 da rede de distribuição.

4.2.4 Cenário base

O cenário base definido para a modelagem, ou seja, aquele cenário com o qual se deseja comparar os demais cenários e propostas de otimização que serão apresentados no decorrer deste estudo, também chamado de cenário controle, foi o seguinte: injeção de cloro na rede de distribuição a partir da estação de bombeamento (nó 1) de forma a se obter uma concentração permanente de cloro na saída deste de 2 mg/L.

Neste cenário, foram feitas simulações utilizando-se os parâmetros de qualidade da água, como ordem e coeficiente da reação, apresentados no Casos 1, 2 e 3 da Tabela 4.6

Essa concentração de cloro constante na estação de bombeamento foi modelada no programa EPANET utilizando o campo “origem da qualidade” disponível na característica do nó 1. Para a utilização desse campo foram necessários 3 parâmetros: origem de QA, padrão temporal e tipo de origem. A Figura 4.6 apresenta a janela do editor de origem de qualidade para o reservatório (nó 1):

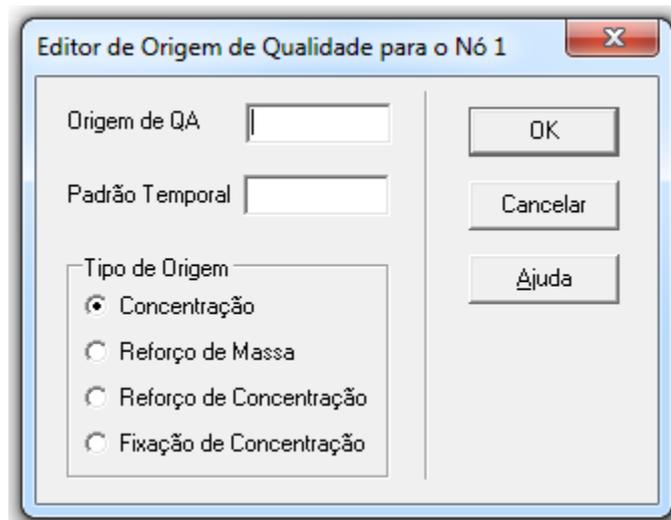


Figura 4.6 - Janela de configurações do campo origem da qualidade para o nó do reservatório. Fonte: EPANET

A origem de QA é a concentração-base, média ou nominal da origem, o padrão temporal é utilizado para variar o valor base da Origem de QA com o tempo e o tipo de origem é o que define de que forma aquele valor de concentração-base (modificado ou não pelo padrão temporal) será percebido pela rede. Esta última categoria se divide em 4 tipos:

- Concentração: fixa a concentração [massa/volume] de qualquer entrada externa de vazão na rede, tal como a vazão vinda de um reservatório ou de um ponto de consumo negativo localizado em um nó;
- Reforço de Massa: adiciona um fluxo de massa [massa/tempo] fixo à vazão total que entra no nó, a partir de outros pontos na rede;
- Reforço de Concentração: adiciona uma concentração fixa [massa/volume] àquela resultante da mistura de toda a vazão que entra no nó, a partir de outros pontos na rede;
- Fixação de concentração: fixa a concentração [massa/volume] de qualquer vazão que deixa o nó (desde que a concentração resultante de toda a vazão que entra no nó esteja abaixo da concentração desejada).

Para se modelar uma concentração constante de 2 mg/L de cloro saindo do nó 1, o campo origem de QA foi preenchido com o número 2.

Caso se quisesse por exemplo variar a concentração de cloro ou o padrão de consumo ao longo do tempo por meio de fatores multiplicativos, a Figura 4.7 apresenta o editor de padrão da qualidade.

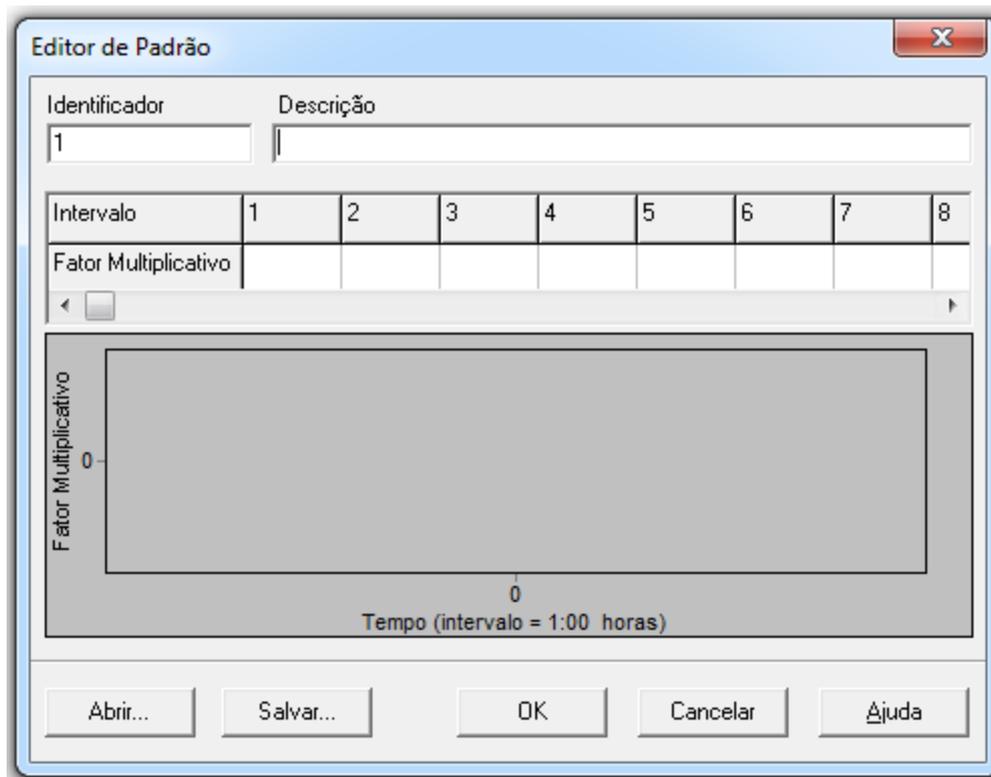


Figura 4.7 - Janela de configurações do editor de padrão temporal. Fonte: EPANET

Os fatores multiplicativos são os valores que multiplicarão determinada grandeza (no caso em questão: a concentração) em cada período de tempo do padrão.

4.2.5 Cenário 1 – Atendendo apenas ao limite mínimo

No cenário 1, quis-se atender o limite mínimo de concentração previsto em lei para o cloro residual. Para isso buscou-se aumentar gradativamente de 0,1 em 0,1 mg/L a concentração do cloro sendo injetado no abastecimento da rede (nó 1) até que a concentração mínima prevista em regulação (0,2 g/mL) fosse atingida em todos os nós, sem se preocupar com os limites máximos previstos em regulação.

Como critério de parada foi adotado que as concentrações em todos os nós da rede no 6º e 7º dia de simulação, ou seja, no intervalo de 145 h até 192 h, satisfizessem o limite mínimo de 0,2 mg/L.

Neste cenário, foram feitas simulações utilizando-se os parâmetros de qualidade da água, como ordem e coeficiente da reação, apresentados no Casos 1, 2 e 3 da Tabela 4.6

O código escrito em *Python* para esse cenário se encontra nos ANEXOS do trabalho.

4.2.6 Cenário 2 – Atendendo aos limites mínimos e máximos

No cenário 2, quis-se atender tanto o limite mínimo de concentração quanto o limite máximo previsto em lei e para isso foram previstas adições de cloro adicional ao longo da rede, semelhante ao feito por Boccelli *et al.* (1998).

Com isso, buscou-se a partir de uma concentração inicial de 0,2mg/L aumentar gradativamente de 0,2 em 0,2 mg/L a concentração do cloro sendo injetado no abastecimento da rede (nó 1) até um limite de 2mg/L.

Ao mesmo tempo em que se injetava o cloro na origem da rede, também eram adicionados gradativamente de 0,1 em 0,1 mg/L até o limite de 2 mg/L em pontos de adição de cloro ao longo da rede em 4 pontos (nós 7, 20, 25 e 33) de maneira a reforçar a concentração do cloro residual em nós os quais foram observadas, de forma qualitativa, concentrações muito pequenas no cenário base.

Como critério de parada foi adotado que as concentrações em todos os nós da rede no 6º e 7º dia de simulação, ou seja, no intervalo de 145 h até 192 h, satisfizessem o limite mínimo de 0,2 mg/L assim como também não tivessem ultrapassado o limite máximo de 2 mg/L nesse mesmo período.

Neste cenário, também foram feitas simulações utilizando-se os parâmetros de qualidade da água, como ordem e coeficiente da reação, apresentados no Casos 1, 2 e 3 da Tabela 4.6

O código escrito em *Python* para esse cenário se encontra nos ANEXOS do trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações de qualidade da água para os três cenários propostos na metodologia.

5.1 CENÁRIO BASE

Em todos os casos dos cenários base considerou-se uma injeção de cloro apenas na origem, de tal forma que a concentração permanecesse constante em 2,0 mg/L.

Para o caso 1, em que o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento foi definido em -1 dia^{-1} e o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao reagir com as paredes da tubulação foi definido em -1 m/dia , os resultados obtidos são mostrados na Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3.

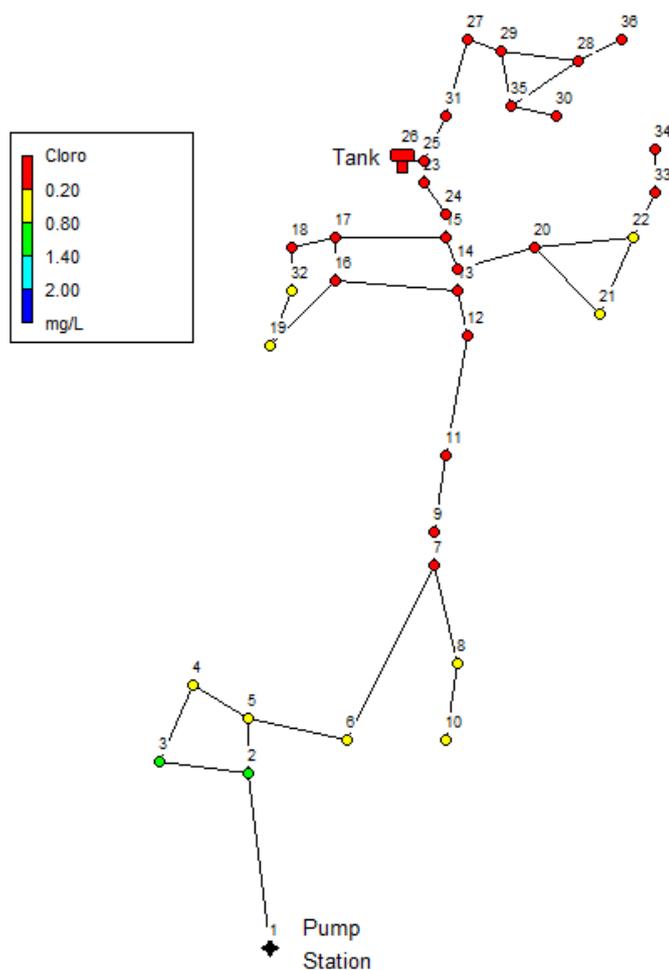


Figura 5.1 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário base, às 192h, para o caso 1.

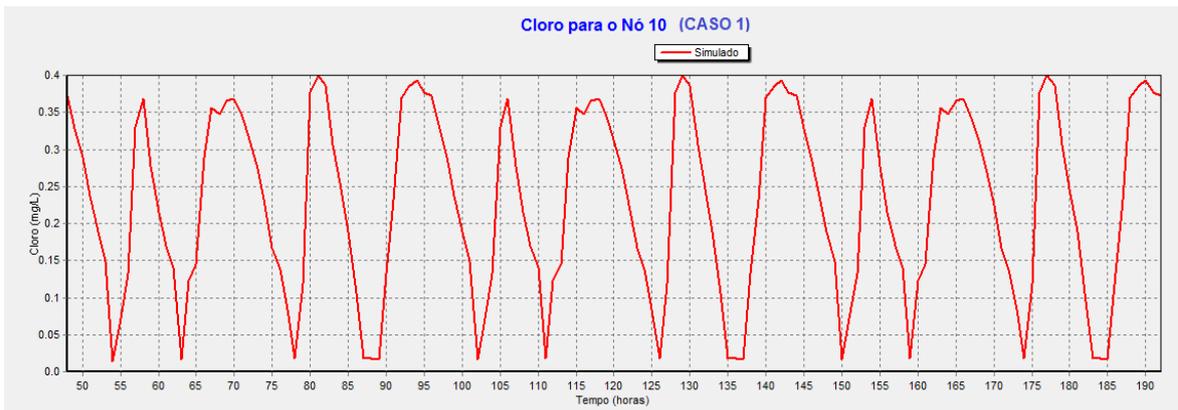


Figura 5.2 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 1.

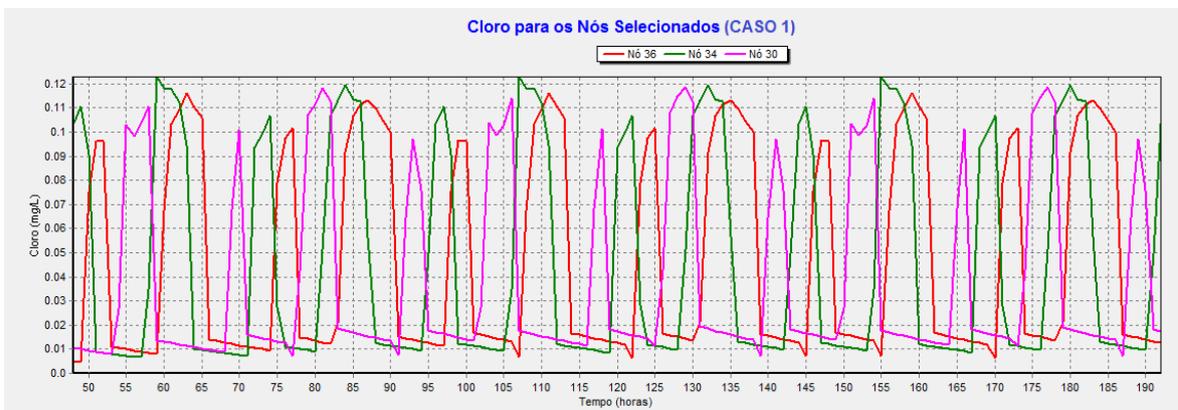


Figura 5.3 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 1.

Podemos observar pela Figura 5.1, que no caso 1, ao final da simulação, às 192h, havia muitos nós com concentração de cloro abaixo do limite de 0,2 mg/L, sendo a situação mais crítica a dos nós de final da rede (30, 34 e 36).

Durante todo o período da simulação, pode-se observar pelo gráfico mostrado na Figura 5.3 que a concentração de cloro nos nós 30, 34 e 36 ficou abaixo do limite mínimo de 0,2 mg/L e observa-se pela Figura 5.2 que a concentração no nó 10 também ficou abaixo desse limite mínimo em boa parte da simulação.

Para o caso 2, em que o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento foi definido em $-0,5 \text{ dia}^{-1}$ e o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao reagir com as paredes da tubulação foi definido em $-0,5 \text{ m/dia}$, os resultados obtidos são mostrados na Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6.

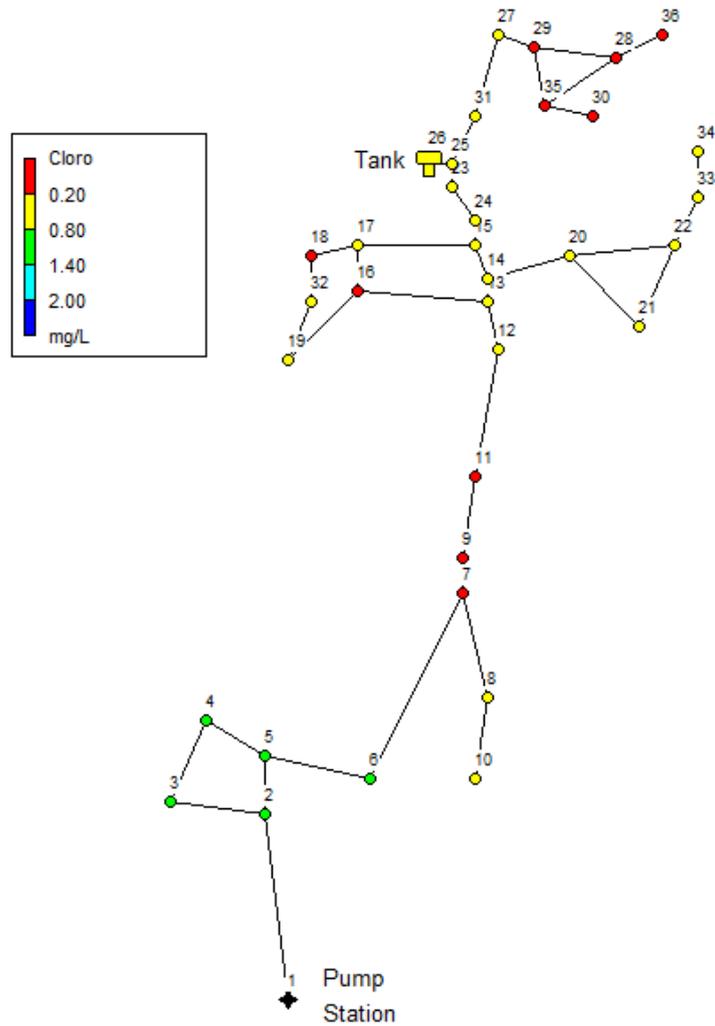


Figura 5.4 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário base, às 192h, para o caso 2.

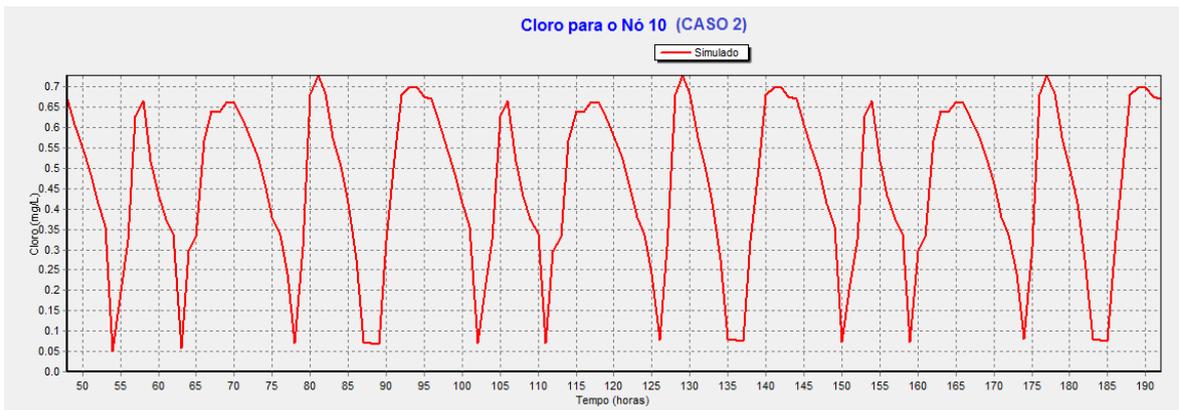


Figura 5.5 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 2.

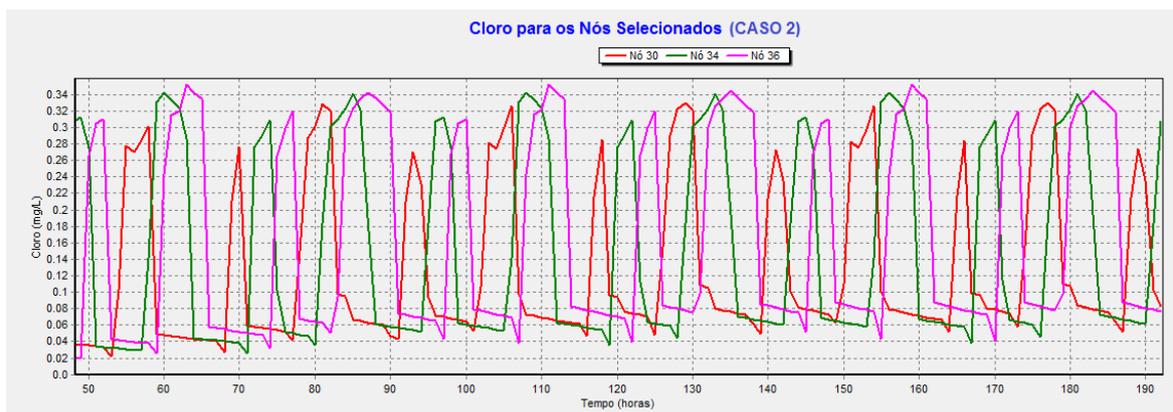


Figura 5.6 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 2.

Observa-se pela Figura 5.4, ao final da simulação, às 192 h, que havia menos nós com concentração de cloro abaixo do limite de 0,2 mg/L se comparado ao caso 2, continuando a situação crítica em nós de final de rede (30 e 36).

Durante grande parte da simulação, pode-se observar pelo gráfico mostrado na Figura 5.6 que a concentração no nós 30, 34 e 36 ficou abaixo do limite mínimo de 0,2 mg/L e observa-se pela Figura 5.5 que a concentração no nó 10 também ficou abaixo desse limite mínimo em pequena parte da simulação.

Para o caso 3, em que o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento foi definido em $-0,1 \text{ dia}^{-1}$ e o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao reagir com as paredes da tubulação foi definido em $-0,5 \text{ m/dia}$, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.7 a 5.9.

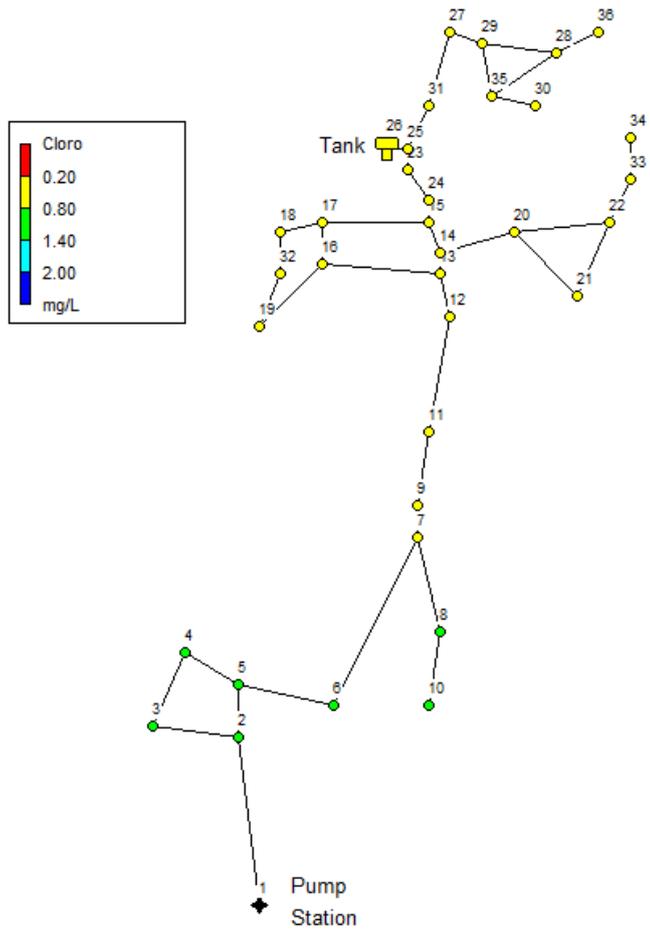


Figura 5.7 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário base, às 192h, para o caso 3.

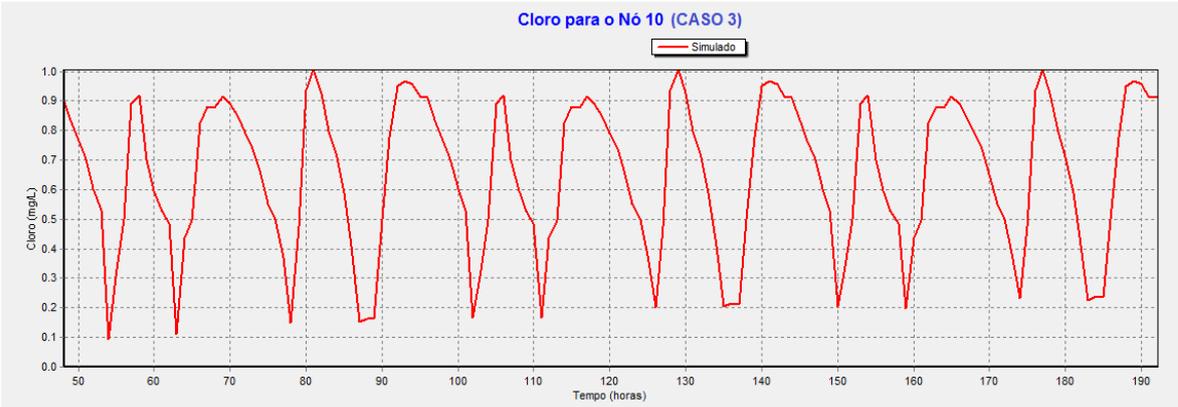


Figura 5.8 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 3.

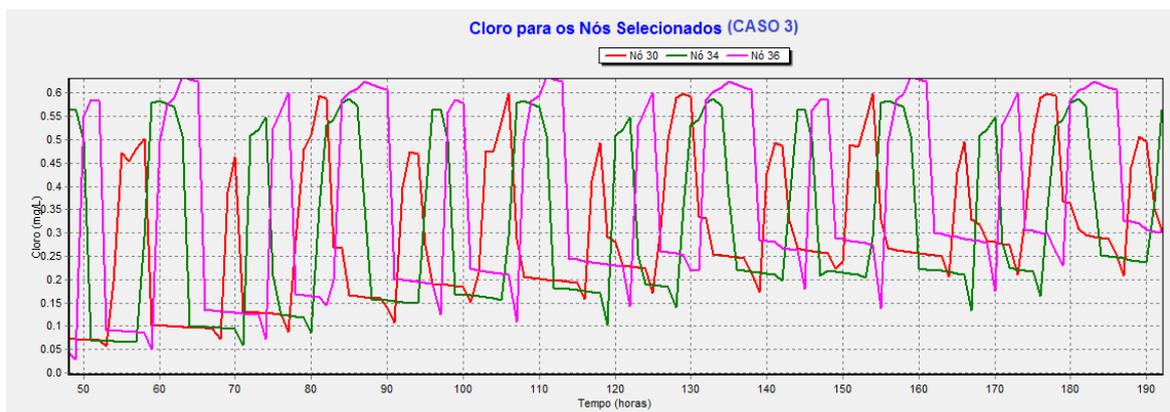


Figura 5.9 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário base no caso 3.

Neste caso 3, ao final da simulação, às 192 h, não havia nenhum nó com concentração de cloro abaixo do limite de 0,2 mg/L como pode ser observado pela Figura 5.7.

A concentração de cloro em nós de final de rede (10, 30, 34 e 36) durante grande parte da simulação ficou acima do limite mínimo de 0,2 mg/L como pode ser observado pela Figura 5.8 e Figura 5.9.

5.2 CENÁRIO 1 - ATENDENDO APENAS AO LIMITE MÍNIMO

Para o caso 1, em que o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento foi definido em -1 dia^{-1} e o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao reagir com as paredes da tubulação foi definido em -1 m/dia , os resultados obtidos foram os seguintes, apresentados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Resultados para o cenário 1 - caso 1

Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	81,7 mg/L
Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	36
Maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	34
Hora da maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L):	180 h
Maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	29
Hora da maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L):	151 h
Tempo aproximado de duração da simulação	605 s

Exportando a rede com os novos dados obtidos pela rotina de programação em *Python* e abrindo-a no programa EPANET, após rodar a simulação são obtidos os resultados mostrados na Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12.

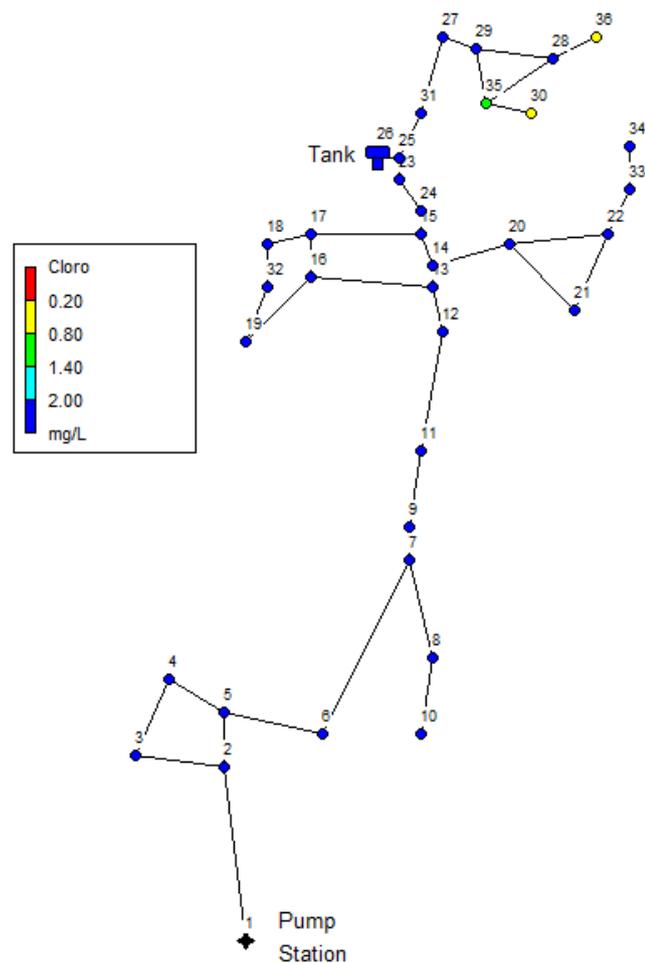


Figura 5.10 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 1, às 192h, para o caso 1.

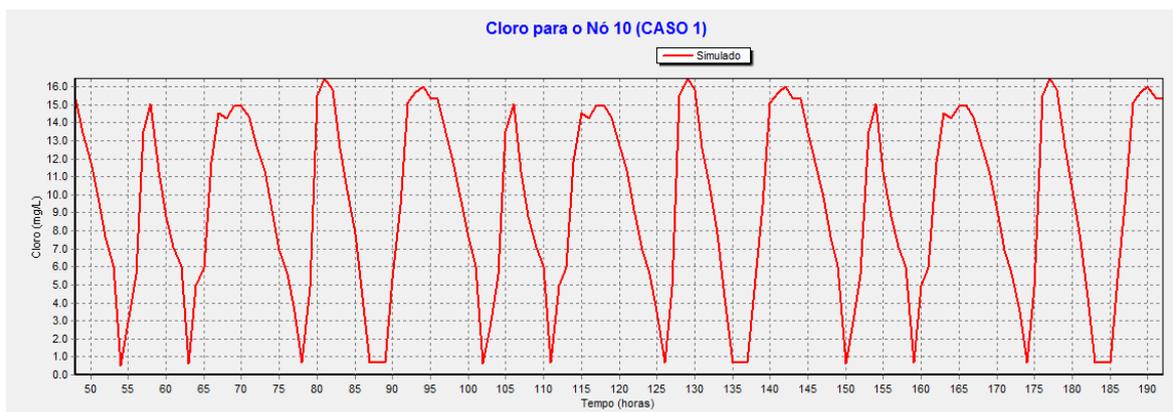


Figura 5.11 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 1.

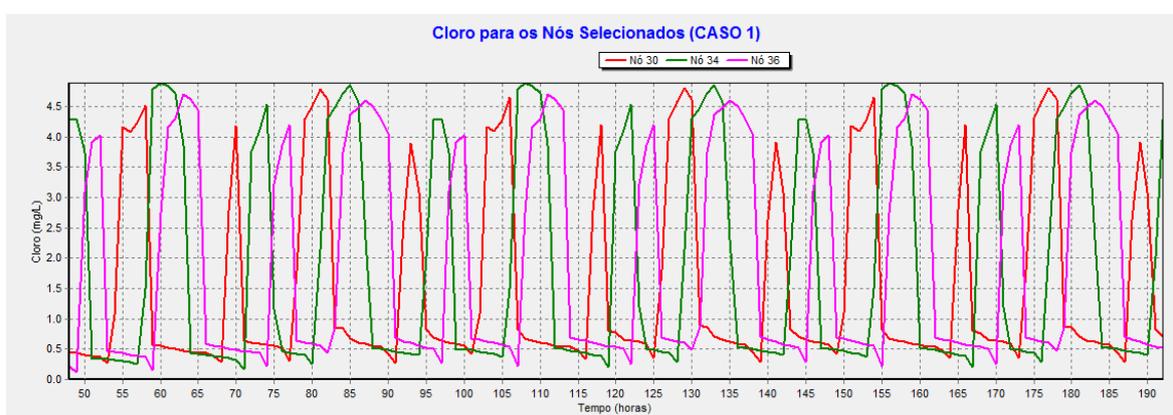


Figura 5.12 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 1.

Observa-se que, mesmo com os limites mínimos de concentração atingidos, se comparados com o cenário base, é obtida a uma situação pior. Uma rede com altos coeficientes de reação, o que faz ser necessário uma quantidade absurda de cloro sendo injetado na rede a partir da origem, o equivalente para se obter um concentração constante de 81,7 mg/L, cerca de mais de 40 vezes o limite máximo previsto na regulação de 2,0 mg/l e também cerca de mais de 16 vezes o limitem máximo, o qual se ultrapassado pode incorrer em sérios riscos à saúde, de 5,0 mg/L.

Além disso, observa-se que ao longo da rede que houve momentos em que a concentração de mais de 90% dos 36 nós estava acima dos limites de 2,0 mg/L (34 nós às 180 h) e acima do limite de 5,0 mg/L (29 nós às 151 h). Na Figura 5.11, pode-se observar que a concentração de cloro no nó periférico 10 fica acima do limite máximo previsto em lei de 2,0 mg/L durante boa parte do tempo de simulação.

Para o caso 2, em que o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento foi definido em $-0,5 \text{ dia}^{-1}$ e o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao

reagir com as paredes da tubulação foi definido em -0,5 m/dia, os resultados obtidos foram os seguintes, apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Resultados para o cenário 1 - caso 2

Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	11,3 mg/L
Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	36
Maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	26
Hora da maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L):	148 h
Maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	20
Hora da maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L):	149 h
Tempo aproximado de duração da simulação	72 s

Exportando a rede com os novos dados obtidos pela rotina de programação em *Python* e abrindo-a no programa EPANET, após rodar a simulação obtemos os resultados mostrados na Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15.

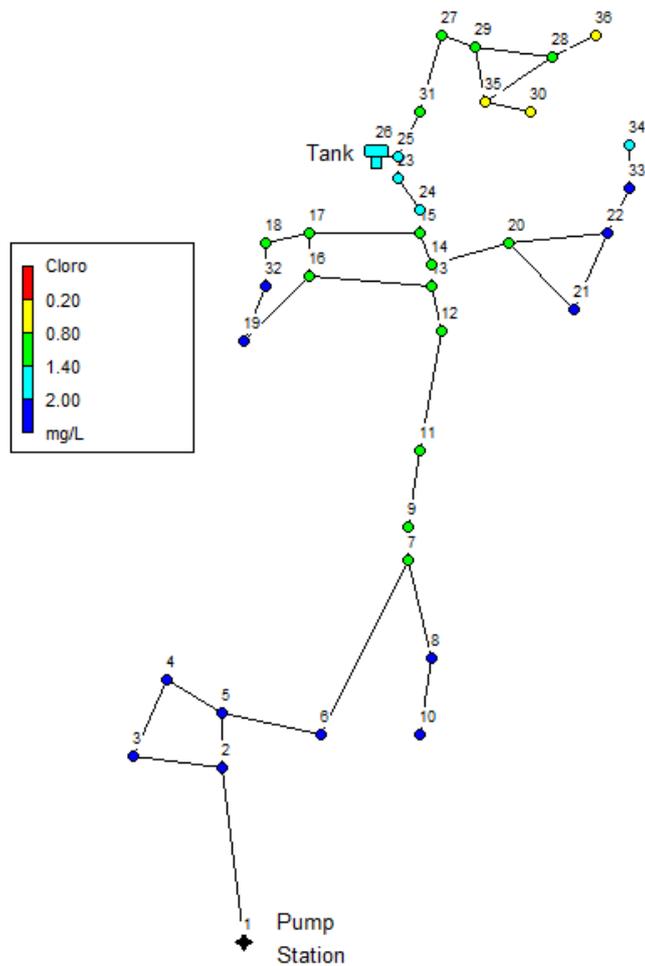


Figura 5.13 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 1, às 192h, para o caso 2.

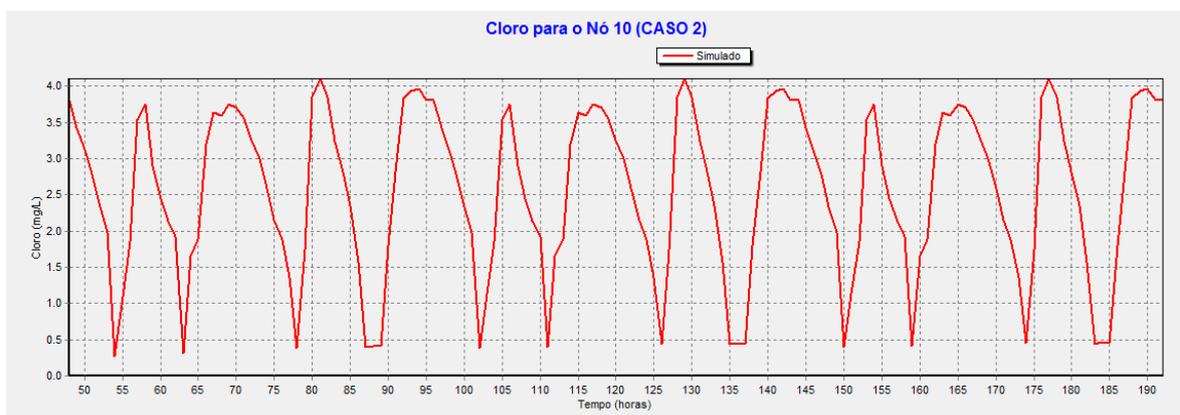


Figura 5.14 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 2.

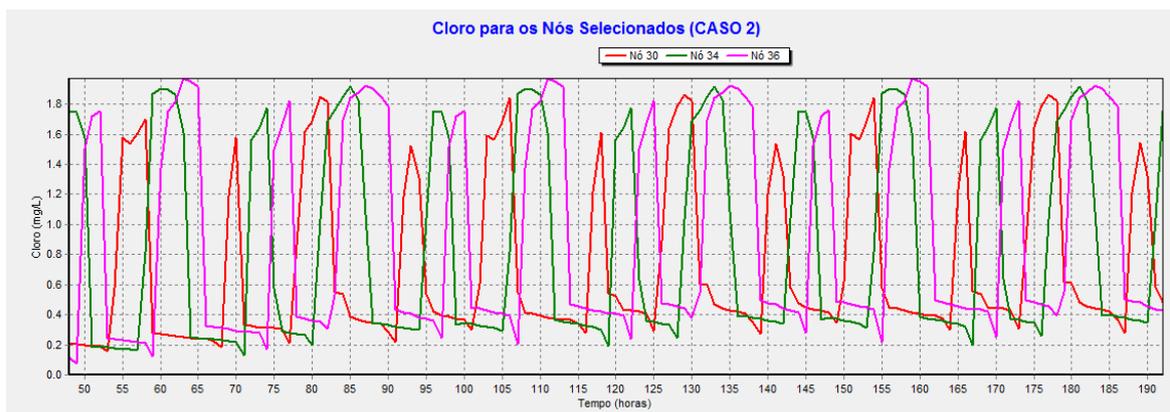


Figura 5.15 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 2.

Neste caso 2, também mesmo com o limite mínimo atingido, ainda ocorre uma situação péssima para uma rede com coeficientes de reação em valores intermediários, sendo necessária uma quantidade cloro suficiente para se obter uma concentração constante de 11,3 mg/L na origem da rede de distribuição, cerca de mais de 5 vezes o limite máximo previsto na regulação de 2,0 mg/l e também cerca de mais de 2 vezes o limitem máximo, o qual se ultrapassado pode incorrer em sérios riscos à saúde, de 5,0 mg/L.

Além disso, ao longo da rede houve momentos em que uma grande quantidade dos 36 nós estava acima dos limites de 2,0 mg/L (26 nós às 148 h) e acima do limite de 5,0 mg/L (20 nós às 149 h). Na Figura 5.14, também pode-se observar que a concentração de cloro no nó periférico 10 fica acima do limite máximo previsto em lei de 2,0 mg/L durante parte considerável do tempo de simulação

Para o caso 3, em que o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao longo do escoamento foi definido em $-0,1 \text{ dia}^{-1}$ e o coeficiente da reação de decaimento do cloro ao reagir com as paredes da tubulação foi definido em $-0,5 \text{ m/dia}$, os resultados obtidos foram os seguintes, apresentados na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Resultados para o cenário 1 - caso 3

Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	3,1 mg/L
Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	36
Maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	12
Hora da maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L):	160 h
Maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve
Hora da maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L):	Não houve
Tempo aproximado de duração da simulação	20 s

Exportando a rede com os novos dados obtidos pela rotina de programação em *Python* e abrindo-a no programa EPANET, após rodar a simulação obtemos os resultados mostrados na Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18.

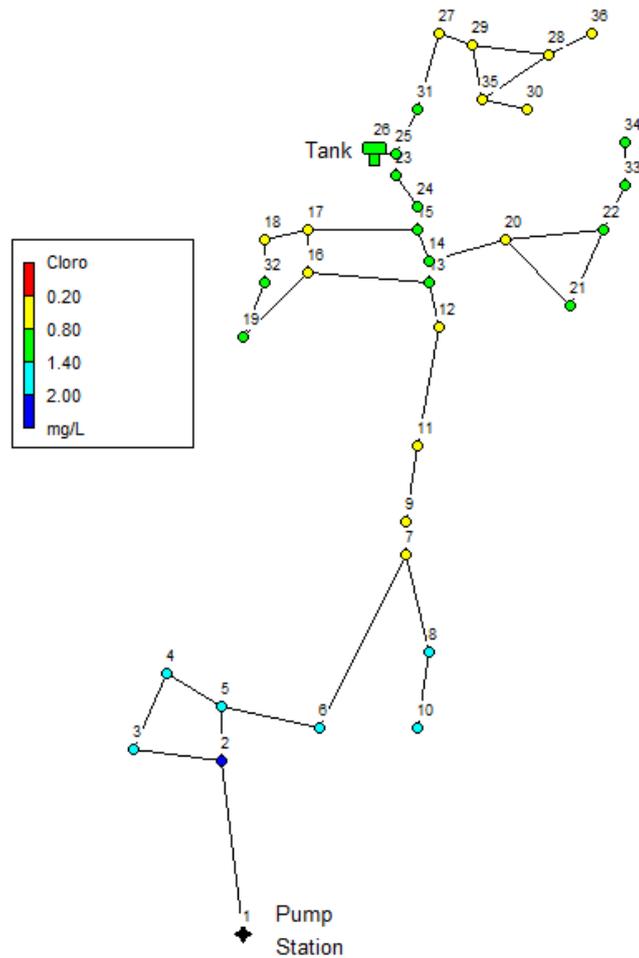


Figura 5.16 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 1, às 192h, para o caso 3.

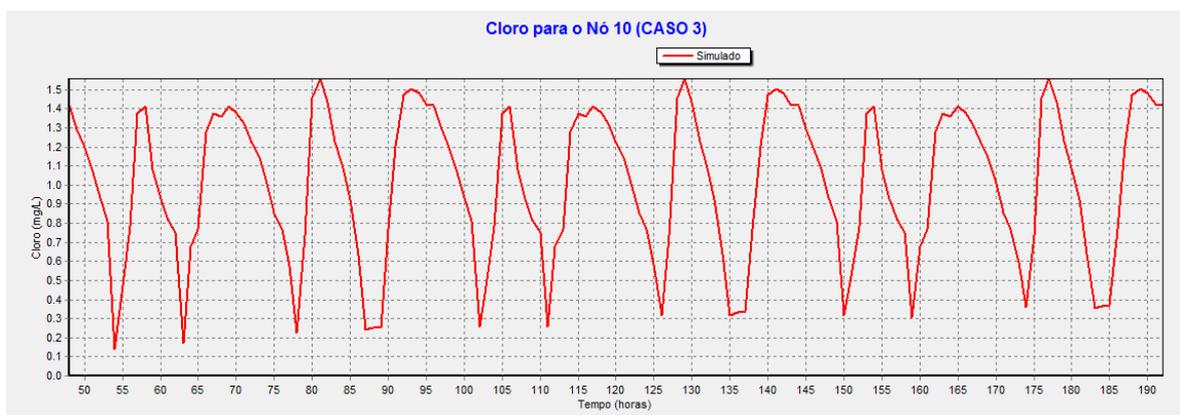


Figura 5.17 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 3.

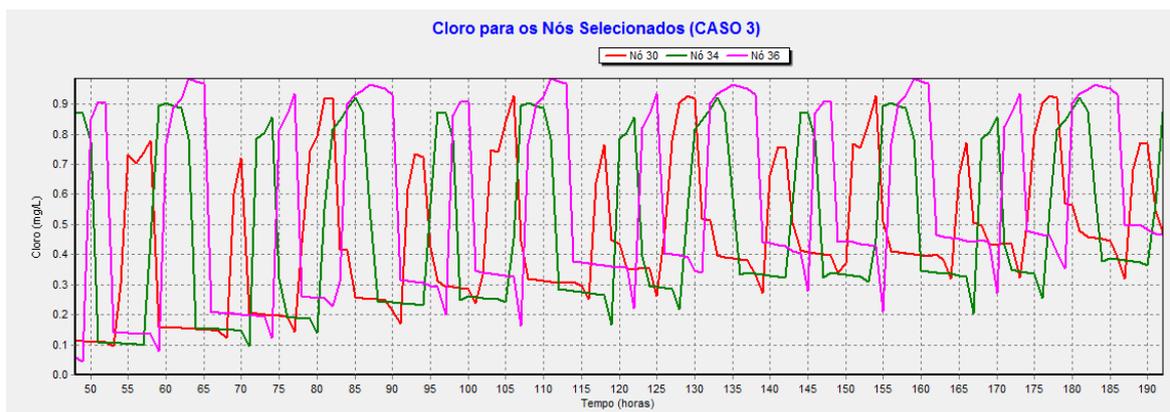


Figura 5.18 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 1 no caso 3.

Neste caso 3, não se teve uma situação boa para uma rede com coeficientes menores, mas que priorizassem a parte da reação de decaimento que acontece com o cloro ao reagir com as paredes da tubulação.

Foi necessária uma quantidade de cloro suficiente para se obter uma concentração constante de 3,1 mg/L sendo injetada na origem da rede de distribuição, cerca de 1,5 vezes o limite máximo previsto em regulação de 2,0 mg/L, porém não foi ultrapassado o limite de 5,0 mg/L. Também foi observado ao longo da rede que houve momentos em que uma quantidade considerável de nós, cerca de um terço do total, estava acima do limite de 2,0 mg/L (12 nós às 160h)

5.3 CENÁRIO 2 - ATENDENDO AOS LIMITES MÍNIMOS E MÁXIMOS

Na simulação do caso 1, os resultados obtidos foram os seguintes, apresentados na Tabela 5.4:

Tabela 5.4 - Resultados para o cenário 2 - caso 1

Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	2,0 mg/L
Concentração de cloro injetada nos nós 7, 20, 25 e 33:	1,7 mg/L
Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	36
Total de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve
Total de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve
Tempo aproximado de duração da simulação	65 s

Exportando-se a rede com os novos dados obtidos pela rotina de programação em *Python* e abrindo-a no programa EPANET, após rodar a simulação são obtidos os resultados mostrados nas Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21.

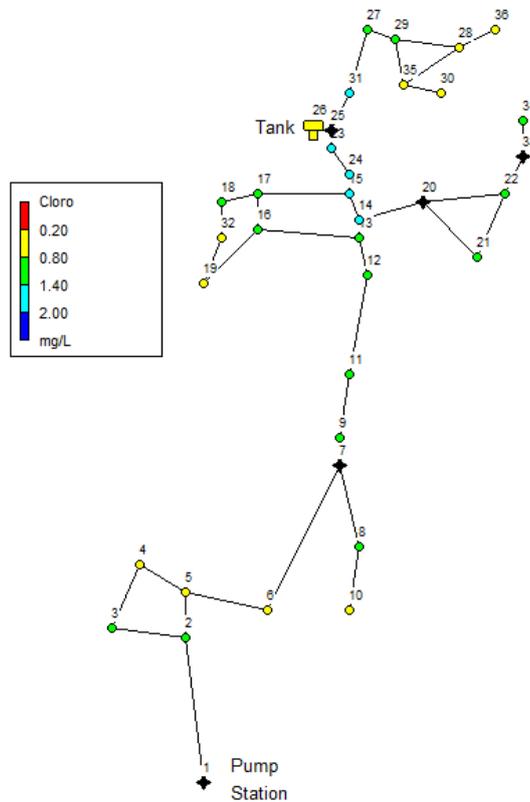


Figura 5.19 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 2, às 192h, para o caso 1.

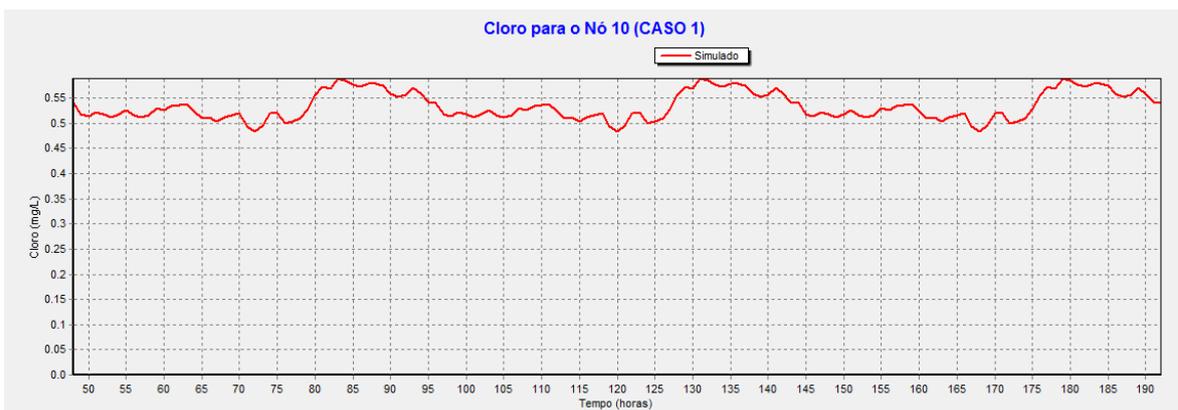


Figura 5.20 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 1.

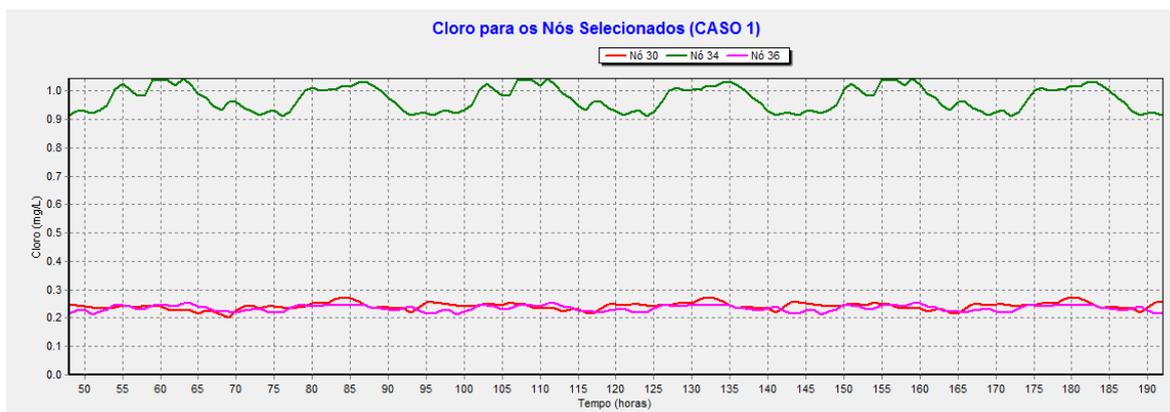


Figura 5.21 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 1.

Já na simulação do caso 2, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5:

Tabela 5.5 - Resultados para o cenário 2 - caso 2

Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	2,0 mg/L
Concentração de cloro injetada nos nós 7, 20, 25 e 33:	0,8 mg/L
Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	36
Total de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve
Total de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve
Tempo aproximado de duração da simulação	43 s

Exportando a rede com os novos dados obtidos pela rotina de programação em *Python* e abrindo-a no programa EPANET, após rodar a simulação obtemos os resultados mostrados nas Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24.

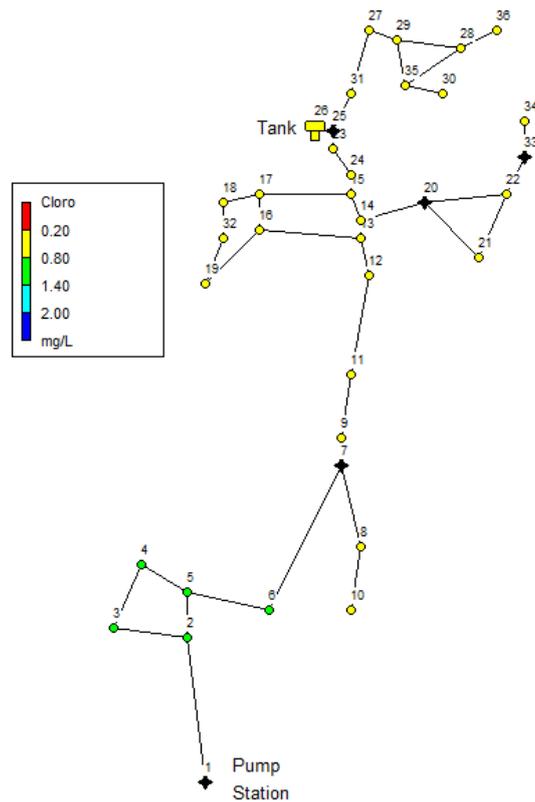


Figura 5.22 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 2, às 192h, para o caso 2.

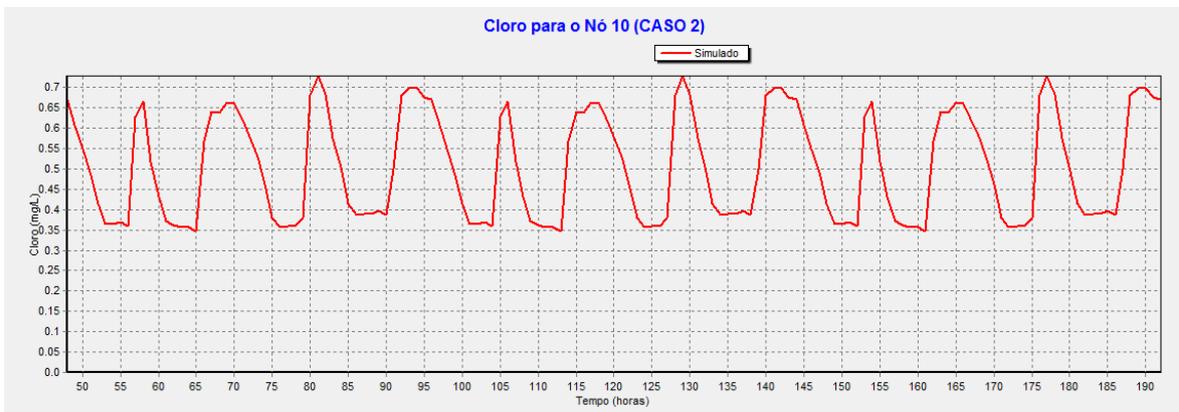


Figura 5.23 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 2.

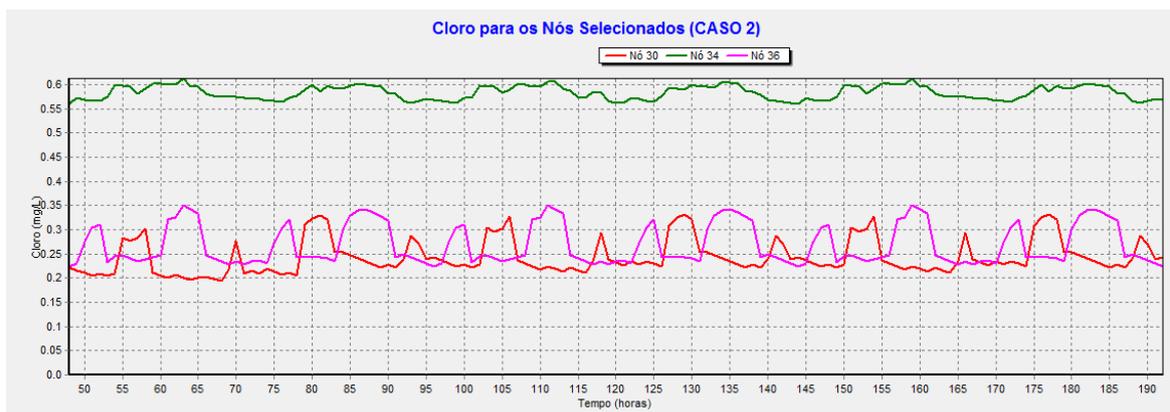


Figura 5.24 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 2.

Por fim, para a simulação do caso 3, apresentam-se os resultados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resultados para o cenário 2 - caso 3

Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	2,0 mg/L
Concentração de cloro injetada nos nós 7, 20, 25 e 33:	0,4 mg/L
Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	36
Total de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve
Total de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve
Tempo aproximado de duração da simulação	37 s

Exportando a rede com os novos dados obtidos pela rotina de programação em *Python* e abrindo-a no programa EPANET, após rodar a simulação obtemos os resultados mostrados nas Figura 5.25, Figura 5.26 e Figura 5.27.

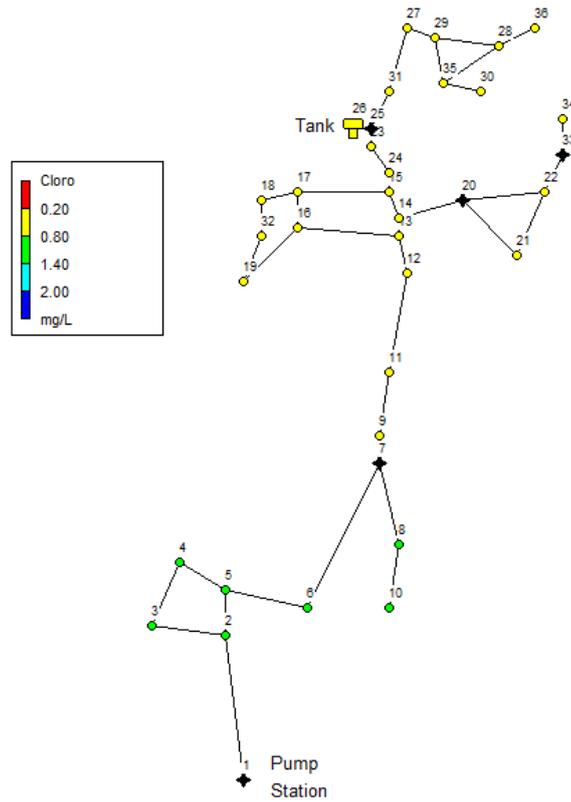


Figura 5.25 - Concentração do cloro residual na rede "Net2" ao final da simulação do cenário 2, às 192h, para o caso 3.

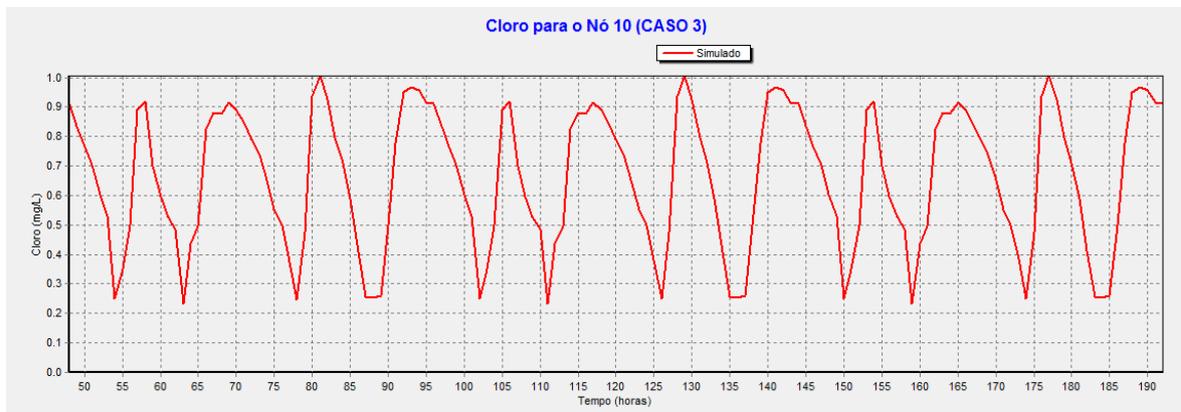


Figura 5.26 - Concentração do cloro residual em mg/L no nó 10 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 3

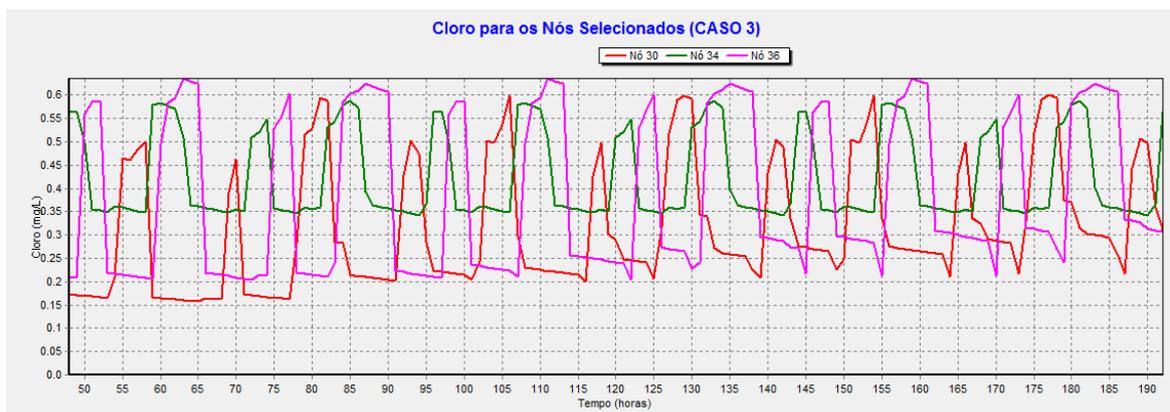


Figura 5.27 - Concentração do cloro residual em mg/L nos nós 30, 34 e 36 entre 48h e 192h da simulação do cenário 2 no caso 3.

Nos 3 casos apresentados, mesmo se tendo alguns resultados como o apresentado na Figura 5.27, onde a concentração do nó 30 ficou abaixo do limite mínimo de 0,2 mg/L durante alguns intervalos iniciais, pode-se observar que houve melhora tanto em relação ao cenário base quanto ao cenário 1.

A melhora mais significativa comparando-se com o cenário 1 foi em relação ao caso 1. A injeção do cloro em estações intermediárias propiciou uma diminuição na quantidade de cloro injetada na rede, por exemplo, a concentração de injeção na origem foi de 81,7 mg/L para 2,0 mg/L. Além disso foi possível atingir tanto os limites mínimos quanto o limites máximos de concentração do cloro ao longo da rede.

Para os casos 2 e 3 também houve melhora com relação ao total de cloro injetado na rede, propiciando uma aplicação mais racional do cloro.

Na Tabela 5.7, Tabela 5.8 e Tabela 5.9 estão resumidos os principais resultados para cada caso em cada cenário.

Tabela 5.7 - Comparação do caso 1 para os 3 cenários.

CASO 1	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2
Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	2,0 mg/L	81,7 mg/L	2,0 mg/L
Concentração de cloro injetada nos nós 7, 20, 25 e 33:	0 mg/L	0 mg/L	1,7 mg/L
Atendeu ao limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) em todos os nós, entre 145 h e 192 h da simulação?	Não	Sim	Sim
Maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve	34	Não houve
Maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve	29	Não houve
Tempo aproximado de duração da simulação:	3 s	605 s	65 s

Tabela 5.8 - Comparação do caso 2 para os 3 cenários.

CASO 2	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2
Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	2,0 mg/L	11,3 mg/L	2,0 mg/L
Concentração de cloro injetada nos nós 7, 20, 25 e 33:	0 mg/L	0 mg/L	0,8 mg/L
Atendeu ao limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) em todos os nós, entre 145 h e 192 h da simulação?	Não	Sim	Sim
Maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve	26	Não houve
Maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve	20	Não houve
Tempo aproximado de duração da simulação:	3 s	72 s	43 s

Tabela 5.9 - Comparação do caso 3 para os 3 cenários.

CASO 3	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2
Concentração de cloro injetada na origem (nó 1):	2,0 mg/L	3,1 mg/L	2,0 mg/L
Concentração de cloro injetada nos nós 7, 20, 25 e 33:	0 mg/L	0 mg/L	0,4 mg/L
Atendeu ao limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L) em todos os nós, entre 145 h e 192 h da simulação?	Não	Sim	Sim
Maior quantidade de nós acima do limite máximo previsto em regulação (2,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve	12	Não houve
Maior quantidade de nós acima do limite máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L) entre 145 h e 192 h da simulação:	Não houve	Não houve	Não houve
Tempo aproximado de duração da simulação:	3 s	20 s	37 s

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir deste trabalho, foi possível ver a grande possibilidade de melhora nos processos de cloração da água com uma injeção de cloro na rede de abastecimento de maneira mais racionalizada, o que contribui para a diminuição da quantidade total de cloro sendo utilizada, podendo-se chegar a uma economia financeira para as empresas operadoras das redes de abastecimento de água nas cidades.

Mais importante que a economia financeira, a possibilidade de se ter uma rede de distribuição oferecendo água com potabilidade mais segura para a população a que venha abastecer. Essa diminuição do cloro injetado mitiga os riscos de formação de compostos trihalometanos, os quais ao longo do tempo podem atuar como compostos carcinogênicos, contribuindo para a ocorrência de problemas de saúde pública.

Esse trabalho também pode beneficiar empresas de engenharia, fornecendo novos insumos nos projetos de redes de distribuição de água, assim como os órgãos reguladores do tema com a possibilidade de adoção de novos critérios para as atividades de fiscalização inerentes a essas instituições.

Para estudos futuros, recomenda-se uma análise da viabilidade econômica e de segurança da construção de estações intermediárias de cloração ao longo da rede de distribuição de água. Além disso, seria interessante uma melhor análise do código da rotina de programação utilizado, para otimizar o tempo de duração da simulação, visto que mesmo sendo uma rede de pequeno porte, levou-se um tempo considerável para finalizar a simulação.

Outras recomendações ficam por conta de análise de outras formas de otimizar a cloração como a variação desta ao longo do tempo, em vez de uma cloração contínua, assim como a otimização na escolha dos locais das estações intermediárias, visto que neste trabalho esta escolha foi feita de forma qualitativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afshar, A. e Mariño, M. A. (2012). “Multi-objective Coverage-based ACO Model for Quality Monitoring in Large Water Networks” In: *Water Resources Management*, 26, 2159-2176
- Al-Zahrani, M. A. (2016). “Optimizing Dosage and Location of Chlorine Injection in Water Supply Networks”. In: *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Ayvaz M. T. e Kentel, E. (2015). “Identification of the Best Booster Station Network for a Water Distribution System.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Babaei, N., Tabesh, M. e Nazif, S. (2015). “Optimum Reliable Operation of Water Distribution Networks by Minimizing Energy Cost and Chlorine Dosage.” In: *Water SA*, 41(1), 149-156.
- Bagirov, A. M., Barton, A. F., Mala-Jetmarova, H., Al Nuaimat, A., Ahmed, S. T., Sultanova, N. e Yearwood, J. (2013). “An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling.” In: *Mathematical and Computer Modelling*, 57, 873-886.
- Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., Rossman, L. A., Zierolf, M. L. e Polycarpou M. M. (1998). “Optimal Scheduling of Booster Disinfection in Water Distribution Systems.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(2), 99-111.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017, Anexo XX
- Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF.
- Broad, D. R., Dandy, G. C. e Maier H. R. (2005). “Water Distribution System Optimization Using Metamodels” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3), 172-180.
- CDC. Referência disponível em <https://www.cdc.gov/safewater/chlorination-byproducts.html#five> acessado em 20/11/2018
- Clark, R. M. (2012). “Modelling Water Quality in Water Distribution Systems”. 2ª edição. American Water Works Association, Denver, CO, EUA

- Constans, S., Brémond, B. e Morel, P. (2000). “Using Linear Programs to Optimize the Chlorine Concentration in Water Distribution Networks.” In: *Water Resources*.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. e Tchobanoglous, G. (2012). “MWH's Water Treatment: Principles and Design”. 3ª edição. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, EUA.
- Gibbs, M. S., Maier, H. R. e Dandy, G. C. (2010). “Comparison of Genetic Algorithm Parameter Setting Methods for Chlorine Injection Optimization.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 288-291.
- Giustolisi, O. e Berardi, L. (2009). “Prioritizing Pipe Replacement: From Multiobjective Genetic Algorithms to Operational Decision Support.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), 484-492.
- Goyal, R. V. e Patel H. M. (2016). “Optimal location and scheduling of booster chlorination stations for drinking water distribution system.” In: *Journal of Applied Water Engineering and Research*.
- Goyal, R. V. e Patel H. M. (2017). “Optimal location and scheduling of booster chlorination stations using EPANET and PSO for drinking water distribution system.” In: *Indian Society for Hydraulics: Journal of Hydraulic Engineering*.
- Heller, L. e Pádua, V. L. (2006). “Abastecimento de Água para consumo humano”, 1ª edição. Editora UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil
- Howe, K. J., Hand, D. W., Crittenden, J. C., Trussell, R. R. e Tchobanoglous, G. (2012). “Principles of Water Treatment”. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, EUA.
- Islam, N., Sadiq, R. e Rodriguez, M. J. (2017a). “Optimizing Locations for Chlorine Booster Stations in Small Water Distribution Networks.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Islam, N., Rodriguez, M. J., Farahat, A. e Sadiq, R. (2017b). “Minimizing the impacts of contaminant intrusion in small water distribution networks through booster chlorination optimization.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*.
- Kang, D. e Lansey, K. (2010). “Real-Time Optimal Valve Operation and Booster Disinfection for Water Quality in Water Distribution Systems.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 463-473.
- Klise, K.A., Hart, D.B., Moriarty, D., Bynum, M., Murray, R., Burkhardt, J., Haxton, T. (2017). Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual, U.S. Environmental Protection Agency Technical Report, EPA/600/R-17/264, 47p.

- Klise, K.A., Bynum, M., Moriarty, D., Murray, R. (2017). “A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study” In: *Environmental Modelling and Software*, 95, 420-431,
- Klise, K.A., Murray, R., Haxton, T. (2018). “An overview of the Water Network Tool for Resilience (WNTR)” In: *Proceedings of the 1st International WDSA/CCWI Joint Conference*, Kingston, Ontario, Canada, July 23-25, 075, 8p.
- Kurek, W. e Ostfeld, A. (2013). “Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems.” In: *Journal of Environmental Management*, 115, 189-197.
- Lansley, K., Pasha, F., Pool, S., Elshorbagy, W. e Uber, J. (2007). “Locating Satellite Booster Disinfectant Stations.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(4), 372-376.
- Lauer, W. C. e Sanchez, F. J. (2006). “Disinfection of Pipelines and Storage Facilities Field Guide”. 1ª edição. American Water Works Association, Denver, CO, EUA.
- Li C., Yu, J. Z., Zhang, T. Q., Mao, X. W. e Hu, Y. J. (2014). “Multiobjective optimization of water quality and rechlorination cost in water distribution systems.” In: *Urban Water Journal*.
- Lin, T. F., Hoang, S. W. (2000) “Inhalation exposure to THMs from drinking water in south Taiwan.” In: *The Science of the Total Environment*, 246, 41-49.
- López-Ibáñez, M., Prasad, T. D. e Paechter, B. (2008). “Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), 337-346.
- Lourenço, I. M. M. (2018) “Análise do decaimento do cloro residual livre com contaminação pontual na rede de distribuição de água do Lago Norte – DF em situação de intermitência.” *Monografia de Projeto Final*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.
- Makaremi, Y., Haghghi, A. e Ghafouri, H. R. (2017). “Optimization of Pump Scheduling Program in Water Supply Systems Using a Self-Adaptive NSGA-II; a Review of Theory to Real Application.” In: *Water Resources Management*.
- Malm, A., Ljunggren, O., Bergstedt, O., Pettersson, T. J. R. e Morrison, G. M. (2012). “Replacement predictions for drinking water networks through historical data”. In: *Water Research*, 46, 2149-2158.
- Munavalli, G. R. e Kumar M. S. M. (2003). “Optimal Scheduling of Multiple Chlorine

- Sources in Water Distribution Systems.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(6), 322-333.
- Ohar, Z. e Ostfeld, A. (2014). “Optimal design and operation of booster chlorination stations layout in water distribution systems” In: *Water Research*, 58, 209-220.
- Porto, R.M. (1998). “Hidráulica básica”. EESC/USP – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil
- Powell, J. C., West, J. R., Hallam, N. B., Forster, C. F. e Simms, J. (2000). “Performance of Various Kinetic Models for Chlorine Decay.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(1), 13-20.
- Price, E. e Ostfeld A. (2016). “Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Systems Using Graph Theory under Hydraulic and Chlorine Constraints.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Reca, J., García-Manzano, A. e Martínez, J. (2014). “Optimal Pumping Scheduling for Complex Irrigation Water Distribution Systems.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 630-637.
- Richardson, S. D. (2001) “The role of GC-MS and LC-MS in the discovery of drinking water disinfection by-products.” In: *Journal of Environmental Monitoring*, 4, 1-9.
- Robinson, L., Edwards, J. A. e Willnow, L. D. (2012). “Computer Modelling of Water Distribution Systems”. Manual of Water Supply Practices – M32, 3ª edição. American Water Works Association, Denver, CO, EUA.
- Rook, J.J. (1974) “Formation of Haloforms during Chlorination of natural Waters”. In: *Water Treatment Examination*, 23, 234-243.
- Rossman, L. A. (2000). “EPANET 2 User’s Manual”. US Environmental Protection Agency, EPA, Cincinnati, OH, EUA.
- Sharif, M. N., Farahat, A., Al-Zahrani, M. A., Islam, N., Rodriguez, M. J. e Sadiq, R. (2016). “Optimization of chlorination boosters in drinking water distribution network for Al-Khobar City in Saudi Arabia.” In: *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 546-556
- Tryby, M. E., Boccelli, D. L., Uber, J. G. e Rossman, L. A. (2002). “Facility Location Model for Booster Disinfection of Water Supply Networks.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(5), 322-333.
- Tsuiya, M.T. (2006). “Abastecimento de Água”, 3ª edição. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Wu, W., Dandy, G. C. e Maier, H. R. (2015). “Optimal Control of Total Chlorine and Free

Ammonia Levels in a Water Transmission Pipeline Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management*.

Yoo, D. G., Lee, S. M., Lee, H. M., Choi, Y. H. e Kim, J. H. (2018). “Optimizing Re-Chlorination Injection Points for Water Supply Networks Using Harmony Search Algorithm.” In: *Water*, 10, 547-565.

ANEXOS

CÓDIGO DA ROTINA DE PROGRAMAÇÃO PARA O CENÁRIO 1

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Fri Oct 18 15:18:25 2019

@author: andre
"""

import wntr
import numpy as np
import time

inicio = time.time()

# Leitura do arquivo .inp

inp_file = 'Net2_mod_caso_1.inp'
wn = wntr.network.WaterNetworkModel(inp_file)

# Roda a simulação hidráulica e já salva os dados referentes a ela em um
# arquivo .hyd

sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn)
results = sim.run_sim(save_hyd=True, hydfile='Sim_hyd')

# Começo do loop em que a quantidade de cloro sendo injetada na rede vai
# sendo incrementada de 0,01 em 0,01 mg/L

sum_q = 0

i_qual = 0

for t in range(1000):

    i_qual = t*0.0001
    print(t)

    wn.add_source('Source1', '1', 'CONCEN', i_qual)

    sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn)
    results = sim.run_sim(use_hyd=False, hydfile='Sim_hyd')

    chem = results.node['quality'].loc[145*3600:192*3600, :]
    chem_threshold = 0.0002
    mask = wntr.metrics.query(chem, np.greater, chem_threshold)
```

```

sum_q = 0

for i in range(48):
    for j in range(36):
        if mask.iloc[i][j] == False:
            sum_q = sum_q + 2
        if mask.iloc[i][j] == True:
            sum_q = sum_q + 1

    if sum_q == 1728:
        break
    if sum_q != 1728:
        wn.remove_source('Source1')
        wn.reset_initial_values()

# Começo do loop em que será mostrado quantos nós ficaram acima dos limites
# máximos previstos em lei (2 mg/l) e que incorrem em danos à saúde (5 mg/l)

sum_q_1_max = 0
hora_1_max = 0

for k in range(48):

    chem_1 = results.node['quality'].loc[(145+k)*3600, :]

    chem_threshold_1 = 0.002
    mask_1 = wntr.metrics.query(chem_1, np.greater, chem_threshold_1)
    chem_above_regulation_1 = mask_1.any(axis=0)

    sum_q_1 = 0

    for l in range(36):
        if mask_1.iloc[l] == True:
            sum_q_1 = sum_q_1 + 1
    if sum_q_1 > sum_q_1_max:
        sum_q_1_max = sum_q_1
        hora_1_max = k + 145

sum_q_2_max = 0
hora_2_max = 0

for m in range(48):

    chem_2 = results.node['quality'].loc[(145+m)*3600, :]

    chem_threshold_2 = 0.005
    mask_2 = wntr.metrics.query(chem_2, np.greater, chem_threshold_2)
    chem_above_regulation_2 = mask_1.any(axis=0)

```

```

sum_q_2 = 0

for n in range(36):
    if mask_2.iloc[n] == True:
        sum_q_2 = sum_q_2 + 1
    if sum_q_2 > sum_q_2_max:
        sum_q_2_max = sum_q_2
        hora_2_max = m + 145

print('\n')
print('Concentração de cloro sendo injetada na origem da rede:', i_qual*1000,'mg/L\n')

print('Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L)'
      ' no intervalo de 145h até 192h:',
      int(sum_q/48), '\n')

if sum_q_1_max == 0:
    print('Não houve nós acima do limites máximo previsto em regulação\n')
else:
    print('Em', hora_1_max, 'h havia', sum_q_1_max, 'nós acima do limite máximo'
          ' previsto em regulação (2,0 mg/L)\n')

if sum_q_2_max == 0:
    print('Não houve nós acima do limite máximo que incorre em danos à'
          ' saúde\n')
else:
    print('Em', hora_2_max, 'h havia', sum_q_2_max, 'nós acima do limite '
          ' máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L)\n')

fim = time.time()

print('Tempo de duração da simulação (s):',fim - inicio)

# Grava a rede de distribuição em um novo arquivo .inp

wn.write_inpfile('Net2_mod_caso_1_v2.inp')

```

CÓDIGO DA ROTINA DE PROGRAMAÇÃO PARA O CENÁRIO 2

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Fri Oct 18 15:18:25 2019

@author: andre
"""

import wntr
import numpy as np
import time

inicio = time.time()

# Leitura do arquivo .inp

inp_file = 'Net2_mod_caso_1.inp'
wn = wntr.network.WaterNetworkModel(inp_file)

# Roda a simulação hidráulica e já salva os dados referentes a ela em um
# arquivo .hyd

sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn)
results = sim.run_sim(save_hyd=True, hydfile='Sim_hyd')

sum_q = 0

i_qual = 0

sum_q_1_max = 0
hora_1_max = 0

sum_q_2_max = 0
hora_2_max = 0

# Começo do loop em que a quantidade de cloro sendo injetada na rede vai
# sendo incrementada de 0,1 em 0,1 mg/L no nós selecionados (7, 20, 25, 33)
# e a partir de ua concentração inicial de 0,2 mg/L na origem, esta vai sendo
# incrementada de 0,2 em 0,2 mg/L.

for z in range (6):

    print(z, '.....\n')

    for w in range (21):

        print(w,\n')
```

```

wn.add_source('Source2', '20', 'SETPOINT', (0.0001*w))

wn.add_source('Source3', '33', 'SETPOINT', (0.0001*w))

wn.add_source('Source4', '7', 'SETPOINT', (0.0001*w))

wn.add_source('Source5', '25', 'SETPOINT', (0.0001*w))

wn.add_source('Source1', '1', 'SETPOINT', (0.0004*z))

sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn)
results = sim.run_sim(use_hyd=True,hydfile='Sim_hyd')

chem = results.node['quality'].loc[145*3600:192*3600, :]
chem_threshold = 0.0002
mask = wntr.metrics.query(chem, np.greater, chem_threshold)

sum_q = 0

```

Começo do loop de checagem se atende aos critérios de limite mínimo 0,2 mg/L

```

for i in range(48):
    for j in range(36):
        if mask.iloc[i][j] == False:
            sum_q = sum_q + 2
        if mask.iloc[i][j] == True:
            sum_q = sum_q + 1

```

```

if sum_q == 1728:

```

```

    sum_q_1_max = 0
    hora_1_max = 0

```

Começo do loop de checagem se atende aos critérios de limite máximo de 2,0 mg/L

```

for k in range(48):

```

```

    chem_1 = results.node['quality'].loc[(97+k)*3600, :]

```

```

    chem_threshold_1 = 0.002

```

```

    mask_1 = wntr.metrics.query(chem_1, np.greater, chem_threshold_1)

```

```

    chem_above_regulation_1 = mask_1.any(axis=0)

```

```

    sum_q_1 = 0

```

```

    for l in range(36):

```

```

        if mask_1.iloc[l] == True:

```

```

            sum_q_1 = sum_q_1 + 1

```

```

    if sum_q_1 > sum_q_1_max:

```

```

sum_q_1_max = sum_q_1
hora_1_max = k + 145

sum_q_2_max = 0
hora_2_max = 0

# Começo do loop de checagem se atende aos critérios de limite máximo de 5,0 mg/L

for m in range(48):

    chem_2 = results.node['quality'].loc[(97+m)*3600, :]

    chem_threshold_2 = 0.005
    mask_2 = wntr.metrics.query(chem_2, np.greater, chem_threshold_2)
    chem_above_regulation_2 = mask_1.any(axis=0)

    sum_q_2 = 0

    for n in range(36):
        if mask_2.iloc[n] == True:
            sum_q_2 = sum_q_2 + 1
        if sum_q_2 > sum_q_2_max:
            sum_q_2_max = sum_q_2
            hora_2_max = m + 145

    if (sum_q_1_max == 0 and sum_q_2_max == 0):
        break

if sum_q != 1728:
    wn.remove_source('Source1')
    wn.remove_source('Source2')
    wn.remove_source('Source3')
    wn.remove_source('Source4')
    wn.remove_source('Source5')
    wn.remove_pattern('SourcePattern1')
    wn.reset_initial_values()

if (sum_q/48 != 36 or sum_q_1_max != 0 or sum_q_2_max != 0):
    print ('Ponto ótimo não atingido\n')
else:

    print("Total de nós acima do limite mínimo previsto em regulação (0,2 mg/L)"
          ' no intervalo de 145h até 192h:', int(sum_q/48), '\n')

if sum_q_1_max == 0:
    print('Não houve nós acima do limites máximo previsto em regulação\n')
else:
    print('Em', hora_1_max, 'h havia', sum_q_1_max, 'nós acima do limite '
          'previsto na regulação (2,0 mg/L)\n')

```

```

if sum_q_2_max == 0:
    print('Não houve nós acima do limite máximo que incorre em danos à'
          'saúde\n')
else:
    print('Em', hora_2_max, 'h havia', sum_q_2_max, 'nós acima do limite '
          'máximo que incorre em dano a saúde (5,0 mg/L)\n')

    print('Concentração constante sendo injetada no nó 1: {:2.2f}
mg/L\n'.format((0.0004*z)*1000))

    print('Concentração constante sendo injetada no nós 7, 20, 25 e 33: {:2.2f}
mg/L\n'.format((0.0001*w)*1000))

fim = time.time()

print('Tempo de duração da simulação (s):',fim - inicio)

# Grava a rede de distribuição em um novo arquivo .inp
wn.write_inpfile('Net2_mod_caso_1_v3_cen_2.inp')

```