



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

JEFFERSON HANNOVER FAUSTINO MAGALHÃES

**MODELAGEM DO DECAIMENTO DE CLORO: ESTUDO DE CASO PARA REDE
DO GUAJIRU, EM CAUCAIA**

FORTALEZA
2019

JEFFERSON HANNOVER FAUSTINO MAGALHÃES

MODELAGEM DO DECAIMENTO DE CLORO: ESTUDO DE CASO PARA REDE DO
GUAJIRU, CAUCAIA

Trabalho de Conclusão de Curso referente ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

FORTALEZA

2019

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

M166m Magalhães, Jefferson Hannover Faustino.

Modelagem do decaimento de cloro: estudo de caso para rede do Guajiru, em Caucaia / Jefferson Hannover Faustino Magalhães. – 2019.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

1. Modelagem de cloro. 2. Decaimento de cloro. 3. Rede de abastecimento de água. 4. Qualidade da água. I. Título.

CDD 628

JEFFERSON HANNOVER FAUSTINO MAGALHÃES

MODELAGEM DO DECAIMENTO DE CLORO: ESTUDO DE CASO PARA REDE DO
GUAJIRU, EM CAUCAIA

Trabalho de Conclusão de Curso referente ao
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Ana Bárbara de Araújo Nunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Fernanda Leite Lobo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Amsterdam e Eliana.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo aos meus pais, Amsterdam e Eliana, por todo o amor que me recobre todos os dias, pelo suporte em todas as minhas decisões, por comemorarem cada conquista, estarem presentes em todos os momentos e por se dedicarem tanto a minha formação.

Agradeço também aos meus irmãos, Eduarda, Junior e Dávila, por todas as risadas, brincadeiras, discussões, mas, principalmente, por sentirem tanto orgulho do caçula.

À minha madrinha, Claudia, por todos os cafés da manhã, almoços, roupas lavadas, quarto arrumado, por seu famoso pão, tornando a vida mais fácil e estando sempre ao meu lado, aturando minhas chatices.

Às minhas avós, Maria e Lourdes, e aos meus avôs, em memória, José Maria e Edílberto, por todo o carinho que têm pelo neto.

À minha melhor amiga, Andréa, uma irmã que encontrei na engenharia, por cada nota 10, cada risada, cada história compartilhada, cada aventura, pelos momentos inesquecíveis, pelo suporte nos momentos mais sombrios, por me ajudar a me desenvolver como pessoa, fazendo-me enxergar potencialidades em mim que eu nem imaginava.

Ao trio Letícia, Carol e Bruno, por tudo o que foi vivido ao longo destes cinco anos de graduação, por serem amigos tão fieis e por fazerem toda essa jornada acadêmica muito mais fácil e divertida.

Ao meu parceiro, Emanuel, por me mostrar que o mundo não é tão sombrio quanto eu imaginava e por me ajudar a me manter de pé quando achei que estava tudo perdido.

Aos meus amigos, Fernanda, Vanessa e Anderson, por acreditarem no meu potencial, por serem amigos tão carinhosos e por serem a prova de que o que eu vivi na escola não foi, de todo, ruim.

À minha amiga Nagiele, pelas boas energias, pelas gargalhadas e por me ajudar a ser mais saudável, me oferecendo maçã.

À dupla Talison e Íris por todas as risadas e gritos dentro do carro.

Ao meu orientador, professor Iran, por todos os ensinamentos, como também por toda paciência, suporte e solicitude na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos do PET e, em especial, minha tutora, professora Ana Bárbara, que se mostrou uma grande apoiadora, torcendo pelo meu sucesso e me orientando para um aprendizado de enriquecimento acadêmico, profissional e ético.

“O mundo é um lugar perigoso de se viver, não por causa daqueles que fazem o mal, mas sim por causa daqueles que observam e deixam o mal acontecer”.

(Albert Einstein)

RESUMO

Um dos maiores desafios enfrentados por entidades gestoras de saneamento corresponde à dificuldade de se garantir a distribuição de água voltada ao abastecimento humano dentro dos padrões de potabilidade. Nesse contexto, a cloração é o processo mais utilizado no que tange a desinfecção de águas para esse fim, dada a vantagem do comportamento não-conservativo do cloro. Visualizando, portanto, a modelagem como uma ferramenta eficiente para gerenciar o cloro residual em sistemas de distribuição de água, este trabalho propôs-se a estudar o comportamento do decaimento do cloro dentro da rede de abastecimento do Guajiru, em Caucaia/CE, sendo, para isso, realizadas simulações programadas com o suporte do software EPANET 2.0. Sabendo disso, as análises foram conduzidas em dois cenários, o primeiro deles em regime permanente e o segundo em regime transiente, possibilitando chegar a conclusões sobre o comportamento do fenômeno no sistema estudado. Dessa forma, este trabalho foi capaz de definir valores para os parâmetros que regem o decaimento do cloro para todos os trechos da rede em estudo. Além disso, pelas simulações empregadas, notou-se que para vazão em regime permanente, o sistema leva, pelo menos, 16 horas para atingir um estado de equilíbrio quanto às concentrações de cloro para cada nó, enquanto que para vazão em regime transiente, um comportamento estável pode ser visualizado em 9 horas de simulação. Outrossim, para ambos os cenários foi possível notar que o cloro leva 8 horas para estar presente em todos os nós da rede e que, após atingido o estado de equilíbrio, a média das concentrações de cada nó do regime transiente se assemelha às da rede operando em regime permanente. Por fim, foi proposta uma redução na concentração de cloro imposto à água após o tratamento de forma a reduzir gastos por parte da CAGECE, sendo encontrado um valor de 1,4 mg/L de concentração inicial de cloro, representando uma redução de 30% sobre os 2,0 mg/L, comumente empregados.

Palavras-chave: Modelagem de cloro. Decaimento de cloro. Rede de abastecimento de água. Qualidade da água.

ABSTRACT

One of the biggest challenges faced by sanitation management entities is the difficulty of ensuring the distribution of water for human supply within potability standards. In this context, chlorination is the most widely used process for water disinfection for this purpose, given the advantage of non-conservative chlorine behavior. Visualizing, therefore, modeling as an efficient tool to manage residual chlorine in water distribution systems, this work aimed to study the behavior of chlorine decay within the Guajiru supply network in Caucaia / CE. For this, simulations were performed with the support of EPANET 2.0 software. Knowing this, the analyzes were conducted in two scenarios, the first of them in steady state and the second in transient regime, allowing to reach conclusions about the behavior of the phenomenon in the studied system. Thus, this work was able to define values for the parameters governing chlorine decay for all stretches of the network under study. Moreover, from the simulations employed, it was noted that for steady flow, the system takes at least 16 hours to reach a steady state of chlorine concentrations for each node, while for transient flow, a Stable behavior can be viewed in 9 hours of simulation. Moreover, for both scenarios it was noted that chlorine takes 8 hours to be present on all nodes of the network and that, after reaching steady state, the average concentration of each node of the transient regime resembles those of the operating network. on a permanent basis. Finally, a reduction in chlorine concentration imposed on water after treatment was proposed in order to reduce CAGECE expenses, with a value of 1.4 mg / L of initial chlorine concentration found, representing a 30% reduction. over the 2.0 mg / L commonly used.

Keywords: Chlorine modeling. Chlorine decay. Water supply network. Water quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das partes integrantes de um sistema de abastecimento de água.....	18
Figura 2 – Limites municipais de Caucaia.....	32
Figura 3 – Limites geográficos do bairro Guajiru.....	33
Figura 4 – Unidades de negócios do Ceará.....	33
Figura 5 – Unidades de negócios da bacia metropolitana.....	34
Figura 6 – Rede de abastecimento do Guajiru.....	35
Figura 7 – Rede de abastecimento do Guajiru no EPANET.....	37
Figura 8 – Legenda de cores para concentração de cloro.....	40
Figura 9 – Padrão de demanda temporal para rede do Guajiru no EPANET.....	40
Figura 10 – Decaimento de cloro na rede do Guajiru em regime permanente nas primeiras horas de simulação.....	43
Figura 11 – Decaimento de cloro na rede do Guajiru em regime transiente nas primeiras horas de simulação.....	46
Figura 12 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,0 mg/L – hora 28...	55
Figura 13 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,5 mg/L – hora 28...	56
Figura 14 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,25 mg/L – hora 28.....	56
Figura 15 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,4 mg/L – hora 28...	57
Figura 16 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,3 mg/L – hora 28...	57
Figura 17 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,25 mg/L – hora 28.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de cloro residual.....	26
Gráfico 2 – Padrão temporal de consumo ao longo de 24 horas da rede do Guajiru.....	37
Gráfico 3 – Concentração de cloro x tempo para o nó 13 (regime permanente).....	44
Gráfico 4 – Concentração de cloro x tempo para o nó 45 (regime permanente).....	44
Gráfico 5 – Concentração de cloro x tempo para o nó 125 (regime permanente).....	45
Gráfico 6 – Concentração de cloro x tempo para o nó 13 (regime transiente).....	47
Gráfico 7 – Concentração de cloro x tempo para o nó 45 (regime transiente).....	47
Gráfico 8 – Concentração de cloro x tempo para o nó 125 (regime transiente).....	48
Gráfico 9 – Concentração de cloro x tempo x demanda de consumo para o nó 13 (regime transiente).....	49
Gráfico 10 – Concentração de cloro x tempo x demanda de consumo para o nó 45 (regime transiente).....	50
Gráfico 11 – Concentração de cloro x tempo x demanda de consumo para o nó 125 (regime transiente).....	50
Gráfico 12 – Concentração de cloro por nó na rede do Guajiru em regime permanente....	51
Gráfico 13 – Média da concentração de cloro por nó com desvio-padrão na rede do Guajiru em regime transiente.....	52
Gráfico 14 – Comparação das médias das concentrações de cloro por nó, com desvio-padrão na rede do Guajiru.....	53
Gráfico 15 – Relatório de reação do decaimento de cloro no regime permanente na rede do Guajiru.....	54
Gráfico 16 – Relatório de reação do decaimento de cloro no regime transiente na rede do Guajiru.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais doenças de veiculação hídrica	22
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da utilização do cloro como desinfetante.....	24
Tabela 3 – Fatores multiplicativos de consumo por hora do dia da rede do Guajiru.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UV	Ultravioleta
EE	Estação Elevatória
ETA	Estação de Tratamento de Água
THC	Trihalometanos
HAA	Ácidos Haloacéticos
USEPA	United States Protection Agency
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará
UM-BME	Unidade de Negócios da Bacia Metropolitana
UN-MTS	Unidade de Negócios Metropolitana Sul
UN-MTL	Unidade de Negócios Metropolitana Leste
UN-MTO	Unidade de Negócios Metropolitana Oeste
UN-MTN	Unidade de Negócios Metropolitana Norte

LISTA DE SÍMBOLOS

k_b	Constante cinética de decaimento de cloro na massa líquida
k_w	Constante cinética de decaimento de cloro junto às paredes da tubulação
C_{cl}	Concentração de cloro
t	Tempo
C_{mon}	Concentração de compostos orgânicos que reagem com o cloro
k_f	Coefficiente de transferência de massa entre o seio líquido e a parede
D	Diâmetro da tubulação
Sh	Número de Shelford
D_{ab}	Coefficiente de difusão molecular do cloro na água
Re	Número de Reynolds
Sc	Número de Schmidt
v	Velocidade cinemática da água
ε	Rugosidade absoluta
F	Fator que relaciona a reação da parede da tubulação com a respectiva rugosidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i>	16
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i>	16
<i>1.1.3 Estrutura do Trabalho</i>	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Sistema de abastecimento de água	18
2.2 Padrões de potabilidade da água	20
2.3 Microrganismos patogênicos	21
2.4 Desinfecção	22
<i>2.4.1 Utilização do Cloro como Desinfetante</i>	23
<i>2.4.1.1 Propriedades químicas do cloro</i>	25
2.5 Decaimento de cloro em sistemas de abastecimento de água	27
<i>2.5.1 Decaimento de cloro no seio do fluido</i>	27
<i>2.5.2 Decaimento do cloro na parede da tubulação</i>	28
2.6 EPANET	30
3 METODOLOGIA	32
3.1 Caracterização da área de estudo	32
3.2 Coleta de dados operacionais e construtivos do sistema	35
3.3 Delimitação de parâmetros de decaimento de cloro k_b e k_w	38
3.4 Simulações do sistema	39
3.5 Análise dos resultados	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Modelagem da rede para o regime permanente	43
4.2 Modelagem da rede para o regime transiente	46
4.3 Análise comparativa das modelagens	51
4.4 Proposta de redução de aplicação de cloro	55
5 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

É inegável que a água desempenha um papel essencial para a sobrevivência humana e para o desenvolvimento das sociedades, diante disso, sistemas de abastecimento de água são instalações que promovem a melhoria do saneamento ambiental, proporcionando não somente a distribuição de água em quantidade e com regularidade adequada para o atendimento de comunidades de povoados ou de grandes cidades, como também para a promoção de condições de higiene adequadas, permitindo, assim, um maior controle de doenças de veiculação hídrica.

Nesse contexto, a partir desse princípio de fornecer água em quantidade e qualidade adequada, a gestão de sistemas de abastecimento de água torna-se uma tarefa com alto grau de complexidade, de forma que, segundo Silva (2017), esse serviço deve envolver planejamento e gerenciamento contínuos, necessitando-se ter o cuidado de tomar decisões apoiadas em fundamentações científicas. Portanto, a gestão da qualidade da água se dá em torno da promoção de padrões de potabilidade adequados, visando à melhoria da saúde da população.

Sabendo disso, é importante destacar que, em etapas, a função de um sistema de abastecimento é dada pela captação de água de um manancial, seguido pelo tratamento desta e subsequente distribuição para a população. Assim, para proteger a qualidade da água em redes de abastecimento, Ozdemir e Buyryk (2018) mencionam que, antes de atingir as torneiras dos consumidores, o processo de desinfecção se torna necessário. Responsável pela inativação de microrganismos patogênicos remanescentes do tratamento, a desinfecção pode ser obtida por meio de agentes desinfetantes químicos ou físicos.

Silva (2017) afirma que para a manutenção da qualidade e proteção contra a presença microbiana nos sistemas de distribuição de água, geralmente existe a presença de um residual com potencial desinfetante que deve ter ação até os pontos mais longínquos da rede. Tradicionalmente, de acordo com Zhang et al. (2017), as águas potáveis para sistemas de distribuição de água são desinfetadas com cloro, cloramina, dióxido de cloro ou UV/Cl₂. Entre eles, a cloração é um dos métodos mais utilizados devido ao seu baixo custo, estabilidade e eficácia.

A utilização da cloração como processo de desinfecção, entretanto, exige, por parte dos operadores responsáveis pelo sistema de abastecimento, o monitoramento contínuo de toda a rede de distribuição, uma vez que, por ser um elemento não conservativo, o cloro, durante o processo de cloração, tenderá a reagir com a matéria orgânica e inorgânica presente

na massa líquida, resultando, portanto, na redução da concentração deste elemento e, assim, permitindo diferença entre as condições da água tratada e a que chega ao consumidor.

Paralelamente a isso, apesar da necessidade do uso do cloro, visando à concepção de um sistema de distribuição que garanta a qualidade da água em toda a extensão da rede, a existência de concentrações residuais desse elemento, segundo o World Health Organization (2004), pode produzir subprodutos potencialmente cancerígenos, como os trihalometanos, de forma que, para que ocorra o tratamento da água de forma eficiente e sem prejuízos desastrosos para a saúde pública, há a necessidade do estabelecimento de limites mínimos e máximos de concentração de cloro que, atualmente, são estabelecidos pela portaria n.º 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

O entendimento, portanto, do comportamento da concentração do cloro residual ao longo de seu percurso no interior das redes de distribuição é essencial, por parte das entidades gestoras, uma vez que estas sentem a necessidade de compreender melhor os movimentos e transformações que a água destinada ao consumo humano está sujeita dentro dos sistemas de distribuição.

Segundo Oliveira (2018), apesar da utilização de planos de amostragem pelas unidades gestoras ser comum para a realização do monitoramento do decaimento de cloro em redes de abastecimento, este método pode não ser o mais adequado, uma vez que os períodos e locais de coleta das amostras podem não ser representativos e não demonstrarem o comportamento real do desinfetante no sistema de abastecimento. Diante disso, o uso de modelagem da água, empregando-se linguagem computacional, surge como um método que apresenta desempenho satisfatório na simulação de cenários que permitam a tomada de decisões a partir dos parâmetros analisados.

Os modelos computacionais de qualidade da água, portanto, podem servir de complemento para o monitoramento realizado em campo, permitindo a reprodução de condições hidráulicas das redes, como também conjecturar o teor de cloro residual em cada nó. Vale destacar, entretanto, que, segundo Clark et al (1993), o decaimento do cloro ao longo das tubulações das redes resulta do efeito conjunto das reações que ocorrem junto às paredes das tubulações e na massa líquida. Assim, a modelagem do decaimento do cloro dependerá de dois parâmetros cuja calibração junto ao método empregado é essencial para a garantia do seu desempenho, que são os parâmetros cinéticos de decaimento do cloro na massa líquida e junto às paredes das tubulações, respectivamente representados por k_b e k_w . Segundo SHEKHAR (2001), a determinação desses parâmetros é uma tarefa muito complexa, uma vez que estes não são globais e uniformes dentro do mesmo sistema de distribuição.

Diante disso, o EPANET 2.0 apresenta-se como um programa de computador que permite realizar simulações hidráulicas, possibilitando uma análise do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes de distribuição, constituindo-se em uma ferramenta poderosa para a calibração de modelos hidráulicos. De acordo com Madzivhandila e Chirwa (2017), o simulador pode, inclusive, ajudar a avaliar estratégias de gerenciamento alternativas para melhorar a qualidade da água em todo um sistema.

Entendendo-se a problemática envolvendo o decaimento do cloro ao longo de uma rede de abastecimento, este trabalho insere-se na necessidade de melhorar o entendimento desse fenômeno, dentro da rede estudada, ao definir valores para os parâmetros cinéticos k_b e k_w para uma rede em Caucaia e analisar o comportamento das concentrações de cloro nos nós do sistema, de forma a promover um embasamento científico que seja capaz de auxiliar entidades gestoras na tomada de decisões em torno da questão da qualidade da água distribuída.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram divididos entre gerais e específicos, como visto a seguir:

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise do comportamento das concentrações de cloro em uma rede localizada no bairro Guajiru no município de Caucaia no Ceará para os cenários de vazão em regime permanente e de regime transiente, processando-se, para isso, os parâmetros cinéticos de decaimento de cloro em simulações hidráulicas, feitas por meio da utilização do programa computacional EPANET.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir, com base nos dados obtidos, valores para os coeficientes k_b e k_w , que regem as reações de decaimento de cloro, para cada trecho da rede em estudo;
- Realizar simulações de decaimento de cloro da rede, utilizando o EPANET 2.0, para visualizar o comportamento do fenômeno no sistema estudado, para os cenários de operação da rede em regime permanente e em regime transiente.

- Avaliar o tempo de detenção necessário para que concentrações de cloro atinjam toda a extensão da rede para ambos os cenários estudados.
- Obter valores de concentrações de cloro para todos os nós da rede para as horas simuladas em ambos os cenários avaliados;
- Compreender, para os regimes estudados, o comportamento do decaimento do cloro na rede do Guajiru de forma a gerar conhecimento sobre o fenômeno e avaliar a existência de padrões, permitindo-se também uma análise comparativa entre os regimes avaliados
- Avaliar se a rede do Guajiru apresenta condições de operar dentro dos padrões estabelecidos para a qualidade da água pelo Ministério da Saúde quanto aos parâmetros de cloro, paralelamente a isso, realizando proposta de otimização da concentração inicial de forma a gerar mais economia para a entidade gestora;

1.1.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo 1, introduz-se ao tema, expondo-se, brevemente, sobre a relevância, para a gestão de companhias de saneamento, dos estudos desenvolvidos para o comportamento do cloro em redes de abastecimento de água, definindo-se a modelagem computacional como ferramenta essencial para esse fim.

Subsequentemente, no capítulo 2, compilam-se os principais conceitos teóricos e matemáticos em torno do estudo do decaimento de cloro em sistemas de abastecimento de água.

No capítulo 3, foram apresentadas as etapas metodológicas empregadas para o desenvolvimento deste trabalho, assim como premissas e critérios utilizados.

Diante disso, os resultados e discussões gerados pela execução das etapas tomadas, são apresentados no capítulo 4, contendo, portanto, os valores, tabelas e gráficos produzidos durante o processo.

Em seguida, no capítulo 5, os principais resultados obtidos são, novamente, expostos, verificando-se também o alcance dos objetivos traçados.

No capítulo 6, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

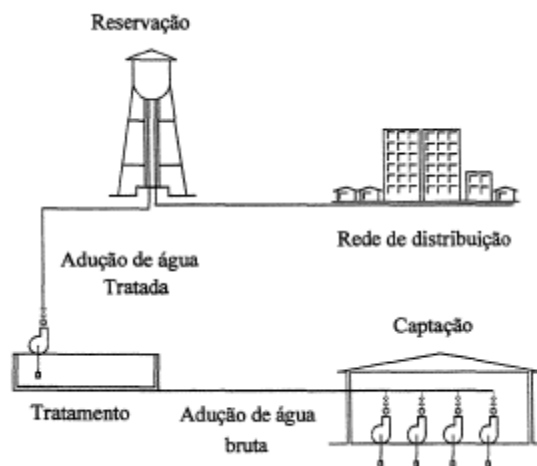
2.1 Sistema de abastecimento de água

Segundo a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, sistemas de abastecimento de água para consumo humano são definidos como instalações compostas pelo conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, destinadas à produção e distribuição canalizada de água potável para populações.

Diante dessa definição, é importante destacar que todo o conjunto é concebido e projetado para garantir a distribuição da água com potabilidade e com constância adequada para atender os usuários de forma compatível com suas necessidades.

Segundo DACACH (1975), os sistemas de abastecimento de água são divididos em captação, adução, tratamento, reservação e distribuição, conforme representado na Figura 1:

Figura 1 – Representação das partes integrantes de um sistema de abastecimento de água.



Fonte: Almeida (2001)

Nesse sentido, o manancial corresponde à fonte primária de água de um sistema de abastecimento, funcionando como um reservatório natural, podendo ser superficiais ou subterrâneos. Sabendo disso, a seleção do manancial é etapa primordial para a concepção de todo o sistema projetado, devendo-se levar em consideração a sua localização, topografia da região, vazão do manancial e a presença de possíveis focos de contaminação, uma vez que

segundo Barreira (2017), a observação desses fatores pode representar custos maiores ou menores de captação, tratamento e transporte.

A captação, por sua vez, é composta pelas instalações responsáveis por extrair a água do manancial que, assim como este, pode ser do tipo superficial ou subterrâneo. É importante destacar, ademais, que projetos de captação devem se guiar por soluções que demandem um menor custo, para isso, segundo Heller e Pádua (2010) devem-se levar em consideração as condições de escoamento, a variação do nível da água e a estabilidade do local de captação como fatores prioritários para o dimensionamento da captação.

No que tange a adução, esta é formada pelos condutos responsáveis por conduzir a água interligando as unidades de captação, tratamento, estações elevatórias, reservação e rede de distribuição, podendo ser classificadas como adutoras de água bruta ou água tratada. Além disso, quanto ao escoamento podem ser de conduto livre, forçado por gravidade ou recalque. De acordo com Heller e Pádua (2010), adutoras, normalmente, não são concebidas para atenderem demandas de consumo ao longo do seu comprimento e, quando isso ocorre, são chamadas de subadutoras.

As estações elevatórias (EE) também compõem o conjunto que constitui um sistema de abastecimento, sendo instalações responsáveis por elevar o nível da água quando esta não consegue mais escoar por gravidade. Tsutiya (2006) aponta que as estações elevatórias são formadas pelo conjunto motor-bomba, pela tubulação de sucção, de recalque e do barrilete, pelo poço de sucção e pela casa da bomba.

Além disso, as estações de tratamento de água (ETA) correspondem às estruturas essenciais para garantir a compatibilização adequada da qualidade da água bruta com os parâmetros de potabilidade requeridos pelo Ministério da Saúde. É importante destacar, portanto, que os processos envolvidos no tratamento de água em uma ETA convencional são: coagulação e floculação, decantação, filtração, desinfecção, tanque de contato, correção de pH e fluoretação.

Os reservatórios também fazem parte dos sistemas de abastecimentos e sua principal função é servir como uma estrutura de armazenamento responsável pela regularização entre as vazões de adução e de distribuição. Esses componentes podem ser classificados como de montante ou de jusante de acordo com sua posição em relação à rede de distribuição. De acordo com Barreira (2017), os reservatórios podem ajudar a condicionar pressões na rede de distribuição, reduzir custos elétricos das EEs e funcionar com reserva para combater incêndios.

Por fim, a rede de distribuição é o conjunto de tubulações, conexões e outros componentes responsáveis por distribuir a água para o consumidor final. Segundo Porto (2006), essas redes podem ser classificadas em ramificada, malhada e mista, conforme a disposição do conduto principal e o sentido do escoamento dos condutos secundários. Conforme Heller e Pádua (2010), uma rede de distribuição mal projetada ou mal operada pode ser fonte de problemas relacionados à perda de água, como também ao comprometimento da qualidade da água e a outras reclamações de usuários, visto que essa unidade do sistema deve assegurar a distribuição da água em quantidade, qualidade e pressão adequadas.

2.2 Padrões de potabilidade da água

As entidades gestoras responsáveis pelos sistemas de abastecimento são encarregadas de manter a eficiência do processo de tratamento, uma vez que a água destinada ao consumo deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação. Esses padrões são definidos pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde que requer não somente a conformidade da água com padrões microbiológicos, como também com padrões organolépticos, ou seja, de cheiro, cor e sabor.

De acordo com Sperling (2005), a qualidade da água pode ser representada através de diversos parâmetros que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas. Além disso, o autor também ressalta a existência de parâmetros microbiológicos de potabilidade da água, ocorrendo a classificação das substâncias químicas que representam riscos a saúde em orgânicas, inorgânicas, cianotoxinas, agrotóxicos e desinfetantes.

Nesse contexto, os parâmetros físicos de qualidade da água estão associados, geralmente, a sólidos presentes na água que podem ser coloidais, ou estar suspensos ou dissolvidos, dependendo do tamanho. Dessa forma, é importante destacar que os principais parâmetros físicos são turbidez, cor, gosto, odor e temperatura. O Ministério da Saúde (2006), entretanto, determina que as estratégias de caracterização da qualidade física necessitam de parâmetros que representem a concentração de sólidos, uma vez que estes comprometem a eficiência da desinfecção, pois geralmente estão associados à presença de microrganismos.

Os parâmetros químicos, por sua vez, são determinados pelas substâncias químicas presentes na água, sendo, portanto, classificadas em orgânicas ou inorgânicas. Alguns exemplos de parâmetros químicos são: cloretos, cloro residual livre, fluoretos, nitrogênio, fósforo, pH, metais, dureza e oxigênio dissolvido. Para Sperling (2005), os componentes químicos não devem estar presentes na água acima de certas concentrações

determinadas, dado que a partir de uma concentração limite, podem acometer indivíduos com enfermidades crônicas.

De acordo com o Ministério da Saúde (2006), a avaliação da qualidade biológica da água é bastante trabalhosa, tendo em vista a existência de um elevado número e de uma grande diversidade de microrganismos patogênicos que pode estar presente na água. Frente a essa problemática, a técnica mais adotada é a de se verificar a presença de organismos indicadores que são escolhidos para análise conforme sua resistência e facilidade de detecção.

Para Heller e Pádua (2010), o tratamento da água não garante a manutenção da condição de potabilidade, uma vez que a qualidade da água pode se deteriorar entre o tratamento, a distribuição, a reservação e o consumo, necessitando, portanto, de uma visão sistêmica.

2.3 Microrganismos patogênicos

É de conhecimento geral que o acesso precário ou inexistente a serviços de saneamento básico pode significar grandes problemas para a saúde pública e o bem estar da população, dado que este quadro tende a permitir condições ideais para a proliferação de microrganismos patogênicos responsáveis pela propagação de doenças de veiculação hídrica.

Segundo Motta e Rezende (1999), as doenças geralmente aceitas como associadas à precariedade de sistemas de saneamento são: cólera, infecções gastrintestinais, febre tifoide, poliomielite, amebíase, esquistossomose e shigelose. Diante disso, de acordo com Branco (1974), estas doenças, em geral, estão associadas a microrganismos patogênicos que, por serem incapazes de sobreviver e se reproduzir fora de hospedeiros, permanecem em caráter transitório em ambientes aquáticos. Observe a Tabela 1 que apresenta as principais doenças de veiculação hídrica e seus respectivos agentes etiológicos, sintomas e fontes de contaminação.

A contaminação de águas por microrganismos se dá, principalmente, por excretas humanas e animais parasitados, cuja origem, de acordo com Salgado (2008), advém da infiltração no solo, do carreamento por águas pluviais e da estrapolação da calha do rio em épocas de cheias e, em centros urbanos, deriva, principalmente, do lançamento de esgoto em mananciais.

No caso de sistemas de abastecimento de água, a existência de falhas em algum componente do conjunto, ou de rachaduras nas tubulações da rede de distribuição, por exemplo, podem permitir a entrada de contaminantes que, conseqüentemente, ocasionem a perda da qualidade da água distribuída. Conforme Silva (2017), os sistemas de abastecimento

de água, muitas vezes, sofrem contaminação por permeação, definida como a passagem de contaminantes externos por meio dos poros da tubulação para a água. Além disso, ventosas sem proteção, pontos de acesso que não são fechados, rachaduras/aberturas na cobertura do reservatório, ocorrência de pressão negativa em tubulações podem resultar também em pontos de entrada de contaminantes.

De acordo com Salgado (2008), os microrganismos encontrados em águas contaminadas são, predominantemente, vírus, bactéria, protozoários e helmintos. O autor complementa afirmando que a água natural não é o habitat original desses microrganismos, sendo naturalmente eliminados por autodepuração. Por questões de saúde, entretanto, utiliza-se a desinfecção no tratamento da água para o controle adequado dos organismos em questão no sistema de abastecimento.

Tabela 1 – Principais doenças de veiculação hídrica

Doença	Agente etiológico	Sintomas	Fontes de contaminação
Febre tifóide e paratífóide	<i>Salmonella typhi</i>	Febre elevada, diarreia	Fezes humanas
Disenteria bacilar	<i>Salmonella paratyphi</i> A e B <i>Shigella dysenteriae</i>	Diarreia	Fezes humanas
Disenteria amebiana	<i>Entamoeba histolytica</i>	Diarreia, abscesso no fígado e intestino delgado	Fezes humanas
Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>	Diarreia e desidratação	Fezes humanas e águas costeiras
Giardíase	<i>Giardia lamblia</i>	Diarreia, náusea, indigestão, flatulência	Fezes humanas e de animais
Hepatite A e B	Vírus da hepatite A e B	Febre, icterícia	Fezes humanas
Poliomielite	Vírus da poliomielite	Paralisia	Fezes humanas
Criptosporidíase	<i>Cryptosporidium parvum</i> , <i>Cryptosporidium muris</i>	Diarreia, anorexia, dor intestinal, náusea, indigestão, flatulência	Fezes humanas e de animais
Gastroenterite	<i>Escherichia coli</i> , <i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Yersinia enterocolitica</i> , <i>Aeromonas hydrophyla</i> , Rotavírus e outros vírus entéricos.	Diarreia	Fezes humanas

Fonte: Adaptado de Salgado (2008).

2.4 Desinfecção

Sabe-se que a desinfecção é um processo que se utiliza de agentes químicos e não químicos, com o objetivo de inativar microrganismos patogênicos presentes na água, entre eles, bactérias, protozoários, vírus e vermes. Desse modo, torna-se uma medida necessária, visto a existência de incerteza quanto à remoção total de patógenos por processos físico-químicos usuais no tratamento de água.

Para Azevedo Netto et al (1998), a desinfecção se trata de um procedimento preventivo ou corretivo e imprescindível para sistemas de abastecimento públicos, posto que a

partir de uma desinfecção eficiente, pode-se garantir que a água apresente qualidade adequada do ponto de vista da saúde pública. Além disso, Di Bernardo e Di Bernardo (2005) explicam que, apesar da importância da desinfecção para a remoção de microrganismos, a eliminação destes, dificilmente, ocorre em sua totalidade, processo este que receberia o nome de esterilização.

Nesse contexto, para desinfecções realizadas em ETAs são empregados agentes físicos e/ou químicos para eliminação ou inativação de patógenos presentes na água. Di Bernardo e Di Bernardo (2005) citam que entre os agentes químicos mais empregados estão cloro, bromo, iodo, ozônio, dióxido de cloro e íons metálicos de prata e de cobre, os agentes físicos, por sua vez, em geral, são calor e radiação ultravioleta. Para a escolha, entretanto, do processo de desinfecção a ser adotado devem-se levar em consideração alguns fatores que, segundo Azevedo Netto et al (1974) são o poder de desinfecção, os custos, a ação residual e a facilidade de aplicação.

É importante destacar que entre os agentes empregados para desinfecção, em geral opta-se pelos agentes químicos.

Para Rossin (1987),

Em grande parte, os agentes químicos são fortes oxidantes e, por isso, podem ser empregados em tratamentos de águas com a finalidade de controlar odor, gosto, limpeza de filtros, remoção do ferro e manganês, destruir sulfetos de hidrogênio, diminuir a cor, controlar o crescimento bacteriano nas redes, desinfecionar as adutoras, aprimorar a floculação, oxidar amônia na proteção de membranas filtrantes e controlar algas no pré-tratamento

2.4.1 Utilização do Cloro como Desinfetante

Dentre os agentes desinfetantes mais utilizados em ETAs, o cloro, em geral, é o mais largamente utilizado, principalmente, por ser mais barato, mas também por ser facilmente encontrado como gás, líquido ou sólido, além disso, é uma substância de fácil aplicação, é capaz de destruir a maioria dos microrganismos patogênicos, como também se caracteriza por ser não-conservativo, ou seja, sua concentração se reduz na água a medida que reage com outros elementos das tubulações e dos reservatórios de uma rede de distribuição.

Apesar das diversas vantagens, Richter (2009), cita que o cloro requer bastante cuidado quanto ao manuseio, dado que é uma substância muito corrosiva e venenosa, além

disso, em altas dosagens, ocasiona sabor e odor na água. Ademais, segundo Salgado (2008), outra desvantagem do cloro é que por ser um forte oxidante, em suas reações com a água pode gerar compostos orgânicos, compostos orgânicos halogenados e compostos inorgânicos perigosos ao homem.

Na Tabela 2 abaixo, encontra-se um resumo com as vantagens e desvantagens do uso do cloro como agente desinfetante:

Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens na utilização do cloro como desinfetante

<i>Agente Desinfetante</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Cloro	<ul style="list-style-type: none"> • Oxida ferro, manganês e sulfetos; • Controla a cor, o sabor e o paladar; • Biocida eficiente; • É o desinfetante mais barato, mais fácil de utilizar e mais conhecido; • Permite ser utilizado como desinfetante residual; • Pode ser utilizado na forma de hipoclorito de sódio e de cálcio; 	<ul style="list-style-type: none"> • Origina produtos halogenados e cloretos; • Pode proporcionar cheiro e sabor à água; • Menos eficiente em meio básico; • Forma subprodutos biodegradáveis que podem promover o crescimento microbiano no transporte e distribuição;

Fonte: Adaptado de Pereira (2009).

Diante do que foi exposto, após a saída da ETA, há na água certa quantidade de cloro ainda disponível para reagir, o chamado cloro residual ou cloro residual livre. Essa característica do cloro, não se nota em todos os desinfetantes, fato este, segundo Silva (2017), torna o teor residual de cloro um dos principais indicadores de qualidade da água, pois a concentração do desinfetante na água ainda lhe confere, em certo grau, proteção.

Para Figueiredo (2014),

A permanência de cloro residual na água transportada nos sistemas de adução e distribuição possibilita a inativação e previne a proliferação de microrganismos que

a possam contaminar devido a deficiências no tratamento a montante ou resultantes de infiltrações de contaminantes no sistema (decorrentes de esvaziamento para reparação ou da ocorrência de pressões transitórias inferiores à atmosférica).

Em se tratando das desvantagens do cloro, cabe destacar a formação de subprodutos da desinfecção, observando-se que, entre os vários tipos de subprodutos encontrados na água após sua saída da ETA, segundo Figueiredo (2014) são os trihalometanos (THM) e os ácidos haloacéticos (HAA) os mais comuns deles, sendo o THM o mais estudado quanto a correlação entre a sua ingestão e o aparecimento de diversos tipos de câncer.

Diante disso, conclui-se que há uma grande necessidade quanto à correta administração do cloro no processo de desinfecção, dado que sua aplicação em excesso ou deficiente pode significar que este chegue em concentrações, respectivamente, acima ou abaixo do adequado nas extremidades da rede de distribuição, podendo não só ocasionar problemas para a saúde, como os discutidos anteriormente, como também levar a problemas de gosto e de odor na água. Portanto, o anexo XX da PRC-5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) estabelece um teor máximo de cloro residual livre igual a 2,0 mg.L⁻¹ e um mínimo de 0,2 mg.L⁻¹ para THMs totais em qualquer ponto do sistema de abastecimento.

2.4.1.1 Propriedades químicas do cloro

Em solução aquosa, o cloro é facilmente absorvido por alguns compostos orgânicos comuns em ETAs, além disso, como discutido anteriormente, por ser um poderoso oxidante, tende a reagir com um grande número de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água. Segundo Richter (2009), essas reações do cloro constituem a demanda que deve ser satisfeita para que o cloro em excesso aplicado na água esteja disponível para desinfecção.

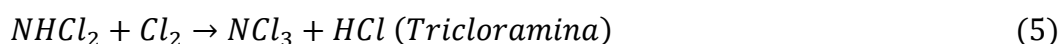
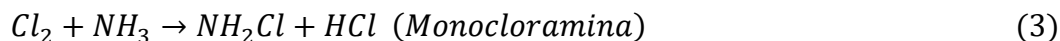
Sabendo disso, satisfeita essa demanda, de acordo com Salgado (2008), quando não há a presença de amônia, ocorrem as seguintes reações:



O autor complementa explicando que o ácido hipocloroso (HClO) é o agente mais ativo na desinfecção e o íon hipoclorito é, praticamente, inativo, de forma que pelo fato

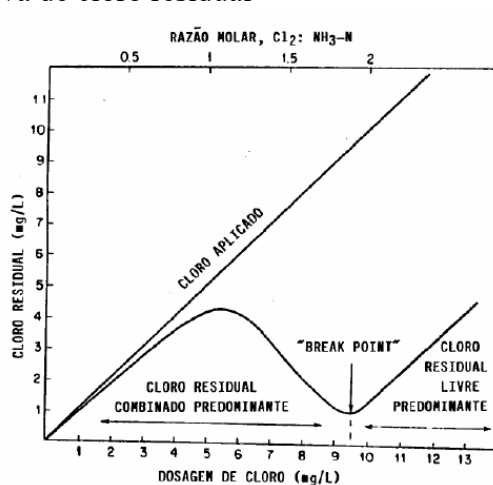
de o ácido hipocloroso prevalecer em valores de pH inferiores a 7, procura-se realizar a cloração nessa faixa de valores de pH.

Quando há a presença de amônia na água, por sua vez, conforme Richter (2009) pode resultar na formação de monocloramina (NH_2Cl), dicloramina (NHCl_2) e tricloramina (NCl_3), representadas pelas equações:



Assim, Pierezan (2009) destaca que na presença de amônia, as reações do cloro acabam por formar compostos de menor poder desinfetante, sendo, portanto, o cloro combinado formado das reações com a amônia menos ativo como desinfetante que o cloro livre. O Gráfico 1 a seguir mostra que a adição de quantidades crescentes de cloro resulta na produção de residual. Nota-se que a medida que ocorre a dosagem alcança-se um ponto máximo e, em seguida, um ponto mínimo que, segundo Richter (2009), é um ponto, conhecido com “break-point”, quando toda a amônia já reagiu com o cloro e começa a aparecer residual de cloro livre. A partir deste ponto, portanto, o gráfico volta a crescer demonstrando que qualquer adição de cloro produzirá um residual de cloro proporcional à dose aplicada.

Gráfico 1 – Curva de cloro residual



Rossin (1987).

Salgado (2008) comenta que apesar da técnica de cloração com amônia ser recomendada para alguns casos, a cloração com residual livre apresenta maiores vantagens,

pois, por possuir residual mais ativo, a desinfecção é mais segura, além disso, destroem compostos orgânicos que afetam as propriedades organolépticas da água de consumo e reduz o crescimento de microrganismos nas diversas partes do sistema.

2.5 Decaimento de cloro em sistemas de abastecimento de água

Conforme já amplamente discutido anteriormente, nota-se que há, por parte dos gestores de sistemas de abastecimento de água, questões bastante complexas relacionadas à utilização de cloro residual, principalmente, no que se refere a sua propriedade não conservativa que faz com que sua concentração diminua à medida que a água percorre a rede de distribuição ocasionando dificuldades para se determinar a concentração correta na aplicação, dado que caso esta ocorra em maior ou menor quantidade, possibilita, respectivamente, reclamações, por parte do consumidor, referentes às propriedades organolépticas da água e insegurança no que tange a eficiência do processo de desinfecção.

Nesse contexto, foi discutido também que o decaimento do cloro se dá devido a um conjunto de reações químicas e biológicas, uma vez que ele reage, facilmente, com várias espécies orgânicas e inorgânicas. Diante disso, segundo Pereira (2009), essas reações podem se dá na água ou nas paredes da tubulação de um sistema, e, portanto, atuam no decaimento do cloro na rede de distribuição, sendo influenciadas pelas constantes cinéticas k_b , que caracteriza o decaimento no fluido, e k_w que caracteriza o decaimento de cloro na parede da tubulação, sendo a velocidade de cada conjunto de reações descrita por uma lei cinética.

2.5.1 Decaimento de cloro no seio do fluido

No que tange ao decaimento de cloro no seio do líquido, ou seja, no próprio fluido, diversos modelos foram desenvolvidos para representar seu decaimento, segundo Clark e Sivaganesan (2002), o mais simples utilizado é:

$$\frac{dC_{Cl}}{dt} = -K_b C_{Cl} \quad (6)$$

Onde, C_{Cl} é a concentração de cloro, t é o tempo e K_b é a constante de velocidade de reação ou constante de decaimento no seio do líquido. De acordo com Figueiredo (2014), este modelo pressupõe que a velocidade da reação depende apenas do cloro, traduzindo-se em um decaimento exponencial. Além disso, o autor complementa afirmando que para águas que

contatam pela primeira vez com o cloro, o decaimento de cloro ocorre de forma mais rápida, portanto, sendo mais comum ajustar um expoente n , determinado experimentalmente, responsável por aumentar a ordem da reação, assim a equação anterior torna-se:

$$\frac{dC_{Cl}}{dt} = -K_b C_{Cl}^n \quad (7)$$

Para Powell et al (2000), é mais comum adotar modelos de ordem paralela quando se verifica a existência de duas fases distintas do decaimento do cloro nas águas analisadas. Esses modelos contêm duas constantes de decaimento respectivamente para cada fase e são mais bem representados pela equação:

$$\frac{dC_{Cl}}{dt} = -K_{b1} C_{Cl1} - K_{b2} C_{Cl2} \quad (8)$$

Onde K_{b1} e K_{b2} são, respectivamente, as constantes de decaimento no seio do líquido nas fases rápida e lenta e C_{Cl1} e C_{Cl2} , respectivamente, as concentrações de cloro que reagem na fase rápida e lenta. Nesse contexto, o modelo assume que existe uma fração x da concentração inicial de cloro C_{Cl0} que reage na fase rápida com uma constante de velocidade K_{b1} e que o restante cloro $(1-xC_{Cl0})$ reage na fase lenta com uma constante de velocidade K_{b2} . Figueiredo (2014) comenta que, em algumas situações, a concentração e o tipo de compostos orgânicos reativos presentes na água podem afetar a velocidade de decaimento do cloro, de forma que adicionando-se a concentração desses compostos, a equação anterior passa a ser representada por:

$$\frac{dC_{Cl}}{dt} = -K_{b1} C_{Cl1} C_{MON1} - K_{b2} C_{Cl2} C_{MON2} \quad (9)$$

Assim, C_{MON1} e C_{MON2} são, respectivamente as concentrações dos compostos orgânicos que reagem com o cloro nas fases de decaimento rápida e lenta.

2.5.2 Decaimento do cloro na parede da tubulação

Para definir o decaimento de cloro nas paredes da tubulação de um sistema de abastecimento, Rossman et al. (1994) assumiram uma cinética de primeira ordem tanto para as reações no seio líquido, como para as reações na parede dos tubos, de forma que o modelo

desenvolvido traduz um decaimento baseado na transferência de massa do seio do escoamento para a parede do condutos, sendo melhor representado pela equação a seguir:

$$\frac{dC_{Cl}}{dt} = -K_b C_{Cl} - 4 \frac{k_f}{D} (C_{Cl} - C_{Clw}) \quad (10)$$

Sendo, k_f o coeficiente de transferência de massa entre o seio líquido e a parede e C_{Clw} a concentração do junto à parede da conduta. Figueiredo (2014) explica que o termo $K_b C_{Cl}$ representam o decaimento do cloro no seio do líquido, enquanto que o termo $4k_f(C_{Cl} - C_{Clw})/D$ representa o decaimento na parede da tubulação e a transferência do cloro do seio do líquido para a parede. Por ser um modelo que usa cinética de primeira ordem, a concentração do cloro pode ser dada, de acordo com Rossman et al. (1994) por:

$$k_f(C_{Cl} - C_{Clw}) = k_w C_{Clw} \quad (11)$$

Para k_w representando a constante de velocidade de reação ou constante de decaimento. Salgado (2008) determina, a partir disso que, ainda sob as mesmas condições apresentadas anteriormente, a taxa de reação nas tubulações pode ser representada pela expressão:

$$\frac{dC_{Cl}}{dx} = \frac{4k_f k_w C_{Cl}}{D(k_f + k_w)} \quad (12)$$

Segundo Rossman (2000), k_f é dado por:

$$k_f = Sh \frac{D_{ab}}{D} \quad (13)$$

Sendo Sh o número de Sherwood e D_{ab} o coeficiente de difusão molecular do cloro na água. Rossman (2000) ainda define o número de Sheerwood é determinado por duas equações que dependem das condições de escoamento, sendo dada pelas respectivas expressões abaixo, para regimes laminares (14) e turbulentos (15):

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668 \left(\frac{D}{L}\right) Re Sc}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{D}{L}\right) Re Sc\right]^{2/3}} \quad \text{para } Re < 2300 \quad (14)$$

$$Sh = 0,0149 Re^{0,88} Sc^{1/3} \quad \text{para } Re \geq 2300 \quad (15)$$

Diante disso, L é o comprimento do conduto, Re é o número de Reynolds e Sc o número de Schimidt. Para Sc , tem-se:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{ab}} \quad (16)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática da água. Já o número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (17)$$

Segundo Hallam et al. (2002), a constante k_w é característica da conduta e varia com o material, idade, diâmetro interno do contudo, como também da existência de biofilme ou corrosão.

2.6 EPANET

Com o intuito de facilitar o diagnóstico da qualidade da água nas redes de distribuição e complementar os processos de monitoramento de campo, modelos computacionais tornam-se indispensáveis. Essas ferramentas possibilitam uma maior segurança no que tange a necessidade de adoção de medidas voltadas à otimização de processos e a evitar a deterioração da qualidade da água em diversos pontos da rede.

Diante disso, segundo Rossman (2000), desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), o EPANET é um programa computacional que executa simulações estáticas ou dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade de água de sistemas de abastecimento, permitindo obter valores de parâmetros hidráulicos e de qualidade de água ao longo do sistema durante o período de simulação.

Sabendo disso, é importante destacar que o EPANET é um software de código aberto, de domínio público, podendo ser copiado e distribuído gratuitamente e cuja interface simplificada ajuda no processo de construção de modelos de rede de tubulação e edição de suas propriedades e dados, sendo, portanto, uma ferramenta enormemente consolidada e utilizada para análise de estratégias alternativas de gestão.

De acordo com Figueiredo (2014), referindo-se a qualidade da água, o EPANET permite modelar a distribuição espacial e temporal das variáveis de qualidade, por exemplo, a idade da água, a porção de água proveniente de diferentes fontes, a concentração de um

constituente não reativo ou um constituinte reativo que pode sofrer decaimento ou crescimento. Assim, muitos gestores, conseqüentemente, utilizam o esse programa para estudar o decaimento de cloro ao longo do sistema de abastecimento, a definição dos pontos de cloração do sistema e respectivos doseamentos, o crescimento de subprodutos de desinfecção ao longo do sistema, o rastreamento da propagação de contaminantes no sistema e a localização e a dimensão dos reservatórios e respectivo funcionamento de modo a reduzir a idade da água.

A consolidação do uso do EPANET como ferramenta para análise da qualidade da água pode ser visualizada pela existência de diversos trabalhos que visam modelar o decaimento do cloro em redes de abastecimento de água utilizando o programa em questão. Abaixo se encontra um breve compilado de trabalhos que se utilizaram do software nesse sentido:

- Salgado (2008), aplicou o software na determinação da ordem para o modelo de decaimento do cloro e dos valores globais e/ou locais para o k_b e k_w em dois sistemas reais de distribuição de água, um deles localizado no Espírito Santo e o outro na França.
- Pereira (2009), utilizou o EPANET como rotina computacional para determinar o parâmetro de decaimento do cloro nas paredes da tubulação em uma rede modelo, utilizando o Método Interativo do Gradiente Hidráulico Alternativo como método de otimização.
- Figueiredo (2014) estudou a influência das condições hidráulicas do escoamento no decaimento do cloro residual em um subsistema da entidade gestora Águas do Algarve em Portugal recorrendo-se ao EPANET.
- Silva (2017) realizou a simulação, através do EPANET, do decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição do sistema integrado de abastecimento de água da cidade de Campina Grande na Paraíba.

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho seguiram-se algumas etapas metodológicas. Inicialmente, fez-se a caracterização da área de estudo, buscando-se, em seguida, coletar dados operacionais e construtivos do sistema de abastecimento. Paralelamente a isso, procurou-se na literatura os procedimentos de cálculo e definição de valores mais adequados no que tange a determinação dos parâmetros de decaimento do cloro k_b e k_w para o sistema em questão. Feito isso, deu-se continuidade realizando-se simulações para o sistema em situações de vazão em regime permanente e em regime transiente. A partir disso, buscou-se compilar os dados de concentração de cloro ao longo da rede em ambos os cenários. Além disso, foram realizadas simulações para diferentes concentrações iniciais de cloro saindo do reservatório, para gerar análise de uma proposta de economia no uso de cloro no sistema em questão. Por fim, foram feitas as análises dos resultados obtidos.

3.1 Caracterização da área de estudo

O sistema estudado fica localizado no bairro Guajiru em Caucaia, município da região metropolitana de Fortaleza no Ceará, estando a aproximadamente 3,5 km do centro de Caucaia e a 5 km de Fortaleza. Observe nos mapas (Figuras 2 e 3) abaixo a localização do município de Caucaia e do bairro Guajiru.

Figura 2 – Limites municipais de Caucaia

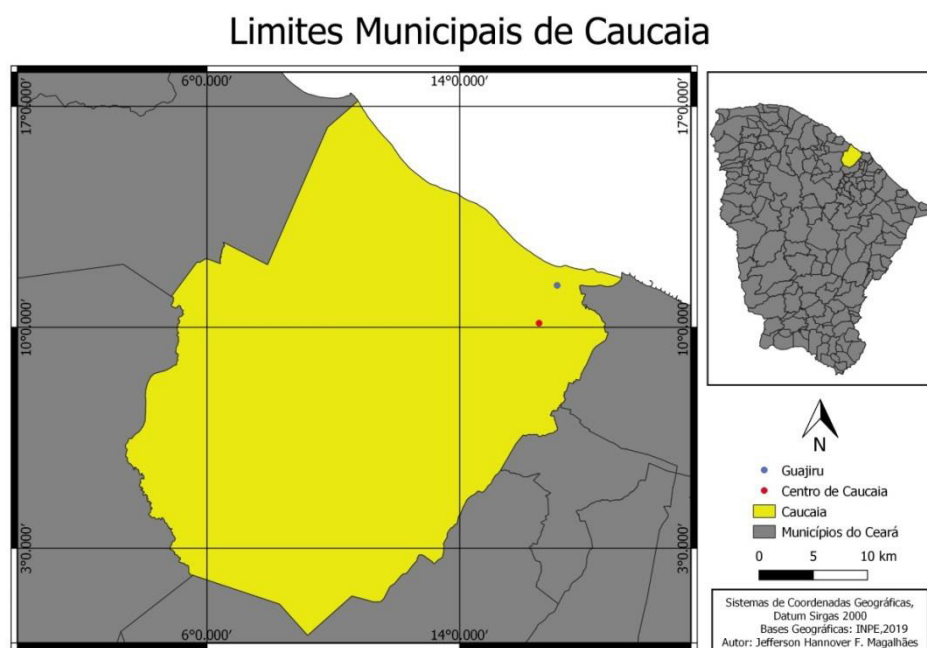
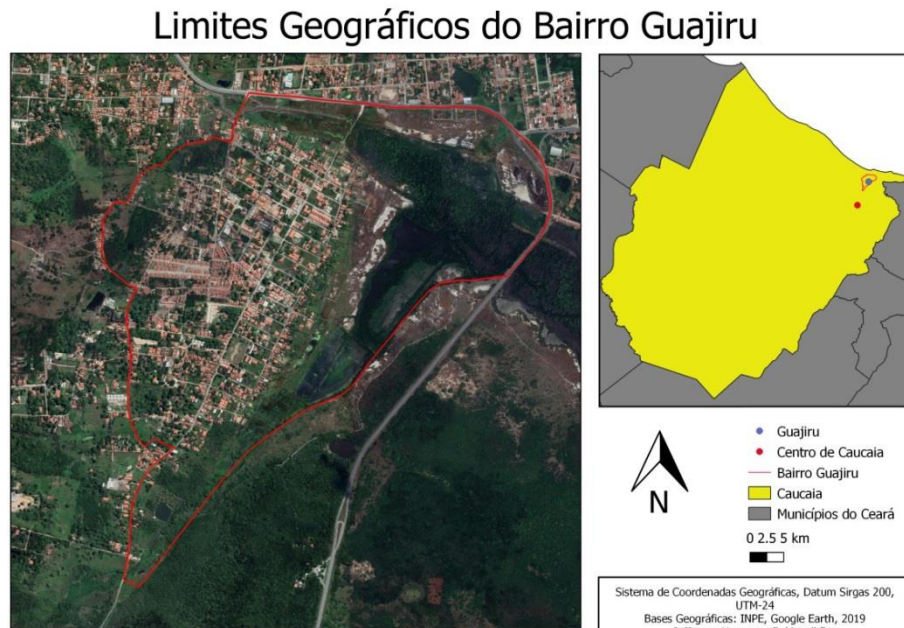


Figura 3 – Limites geográficos do bairro Guajiru



É importante destacar que a rede do Guajiru é administrada pela Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE) cuja estrutura organizacional determina a divisão do território do Estado em 9 Unidades de Negócios conforme pode ser visualizada no mapa (Figura 4) a seguir:

Figura 4 – Unidades de negócios do Ceará



Diante disso, a rede estudada está localizada na Unidade de Negócios da Bacia Metropolitana (UN-BME), que engloba Fortaleza, Caucaia e outras cidades da região metropolitana. Dessa forma, o sistema integrado de abastecimento de água de Fortaleza e região metropolitana tem como principais componentes (CAGECE, 2014):

- Captação: açude Gavião;
- Tratamento: ETA Gavião e ETA Oeste;
- Reservatório: Ancuri, capacidade de 80.000 m³;
- Elevação de água tratada: duas na ETA Gavião (Gavião Novo e Gavião Velho) e uma na ETA Oeste, totalizando três;
- Linhas de recalque: EE do Gavião Novo para o centro de reservação do Ancuri que abastece os setores hidráulicos de distribuição, EE do Gavião Velho que abastece os setores hidráulicos de distribuição da região oeste; EE da ETA Oeste para um reservatório pulmão com 11.000 m³ de capacidade.

A gestão do Sistema Integrado e de sistemas independentes da UM-BME ainda encontra-se dividida em outras quatro unidades de negócios distintas, sendo elas:

- UN-MTS – Unidade de Negócios Metropolitana Sul;
- UN-MTL – Unidade de Negócios Metropolitana Leste;
- UN-MTO – Unidade de Negócios Metropolitana Oeste;
- UN-MTN – Unidade de Negócios Metropolitana Norte;

Conforme pode ser visualizado na Figura 5 abaixo:

Figura 5 – Unidades de negócios da bacia metropolitana



Sabendo disso, a rede do bairro Guajiru inserida no município de Caucaia integra as responsabilidades da UN-MTN, sendo esta abastecida a partir de uma única saída ao norte de uma adutora de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). Observe mapa da rede do Guajiru:

Figura 6 – Rede de abastecimento do Guajiru



Fonte: Barreira (2017)

3.2 Coleta de dados operacionais e construtivos do sistema

Para que haja a realização das simulações na rede, inicialmente, faz-se necessário a aquisição dos dados operacionais do sistema disponibilizados pela entidade gestora, no caso a CAGECE. Para este trabalho, entretanto, o sistema já havia sido previamente modelado por Barreira (2017), que desenvolveu um estudo em torno do diagnóstico de problemas na rede do Guajiru, realizando, durante esse processo, o ajuste das pressões e vazões do sistema. A partir disso, optou-se por utilizarem-se esses dados e resultados obtidos como base para a condução deste trabalho.

Nesse contexto, é importante destacar que Barreira adquiriu junto a CAGECE o cadastro técnico da rede, as curvas de nível da região, os dados de consumo, dados de

macromedição, *shapefiles* de quadras e inscrições para QGIS. Inicialmente, ele desenvolveu o modelo em QGIS, com especificação da rede em nós e trechos de acordo com os dados do cadastro. Subsequentemente, calculou as demandas nodais a partir das informações de consumo, como também calculou a pressão de entrada na rede.

Dessa forma, no que tange a simulação do sistema com vazão em regime permanente, faz-se necessário definir uma vazão média de operação do sistema. Para isso, a partir do estudo realizado por Barreira (2017), sabe-se que este trabalhou com os dados obtidos da rede do Guajiru para os meses de junho, julho e agosto de 2017. Assim, o autor dispôs esses dados em uma tabela do Excel, onde pôde fazer uma análise estatística dos dados e definiu a vazão média do sistema e o desvio padrão. Em seguida, este eliminou de sua amostra os valores de vazão que não estivessem dentro da margem de três desvios padrões para mais ou para menos, obtendo, a partir disso, uma nova média de vazão de 110,53 L/s e que, portanto, será a utilizada para o cenário de operação do sistema em regime permanente deste trabalho.

Em posse da vazão média, faz-se necessário definir um padrão de consumo característico do regime transiente. Para isso, é preciso definir, a partir da vazão média, os fatores multiplicativos para cada hora do dia para os consumos de forma a simular uma variação do consumo ao longo do dia, conforme evidenciado na realidade. Dessa forma, Barreira (2017), fez essa atribuição de valores encontrando fatores bastante realísticos dentro de um intervalo de 0,86 e 1,11 conforme pode ser evidenciado nos resultados por ele obtidos dispostos na Tabela 3 e Gráfico 2 abaixo:

Tabela 3 – Fatores multiplicativos de consumo por hora do dia da rede de Guajiru

FATORES MULTIPLICATIVOS - CONSUMO			
0h00	0,988	12h00	1,129
1h00	0,945	13h00	1,103
2h00	0,910	14h00	1,098
3h00	0,881	15h00	1,093
4h00	0,898	16h00	1,080
5h00	0,984	17h00	0,950
6h00	1,071	18h00	0,907
7h00	1,125	19h00	0,904
8h00	1,020	20h00	0,911
9h00	1,142	21h00	0,910
10h00	1,146	22h00	0,910
11h00	0,970	23h00	0,929

Fonte: Barreira (2017).

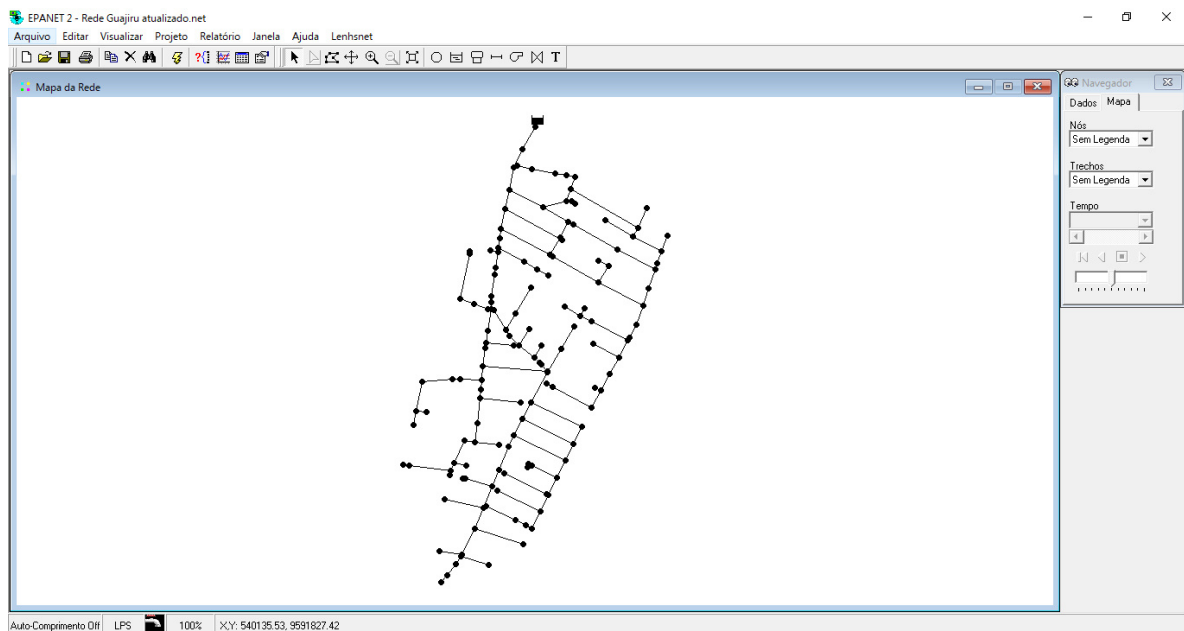
Gráfico 2 – Padrão temporal de Consumo ao longo de 24 horas da rede Guajiru



Fonte: Barreira (2017)

Sabendo disso, obteve-se o arquivo em .NET da rede do Guajiru desenvolvido por Barreira (2017) que corresponde ao formato compreendido pelo EPANET, permitindo, assim, a visualização da rede, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Rede de abastecimento do Guajiru no EPANET



Fonte: desenvolvido pelo autor (2019)

Além disso, os resultados obtidos por Barreira foram sintetizados em uma planilha do Excel e, a partir disso, deu-se início a análise da rede quanto aos dados necessários para a delimitação dos parâmetros de decaimento de cloro do sistema.

3.3 Delimitação de parâmetros de decaimento de cloro k_b e k_w

Dando continuidade a coleta de dados da rede, iniciou-se a etapa de definição dos parâmetros de decaimento do cloro. Diante disso, um aspecto importante desta etapa diz respeito à escolha do simulador hidráulico, como também da equação para o cálculo da perda de carga na tubulação utilizada pelo programa, uma vez que a forma como o coeficiente de decaimento de cloro na parede da tubulação (k_w) pode variar segundo esses aspectos.

Nesse contexto, sabendo que para neste trabalho o simulador hidráulico escolhido foi o EPANET 2.0, Rossman (1994) afirma que o programa em questão calcula o fator k_w em função do coeficiente de rugosidade, de forma que, quando a perda de carga é calculada pela fórmula de Darcy-Weisbach – escolhida para este trabalho – o valor de k_w é definido pela Equação 18:

$$k_w = - \frac{F}{\log\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)} \quad (18)$$

Onde F é o fator que relaciona a reação da parede da tubulação com a respectiva rugosidade; ε é a rugosidade absoluta e d o diâmetro da tubulação. Diante disso, ressalta-se que o EPANET 2.0 atribui a unidade em milímetros para os coeficientes da fórmula de Darcy-Weisbach.

Sabendo disso, a partir do que foi trabalhado por Pereira (2009) e por Salgado (2008), para o efeito do decaimento do cloro próximo as paredes da tubulação, foi atribuído ao fator F o valor de 1,5 m/dia, além disso, sabe-se do sistema do Guajiru que todas as tubulações são de PVC cuja rugosidade absoluta (ε) é 0,0015 mm. Assim o fator k_w foi calculado em planilha do Excel para cada trecho, cujos diâmetros foram obtidos na etapa anterior, segundo a Equação 18.

Vale ressaltar, entretanto, que, de acordo com Salgado (2008), após a realização de algumas simulações, verifica-se que para repetir os efeitos do fator F, utilizando os valores de k_w devem ser empregados no EPANET metade dos valores calculados pela Equação 18. Os valores encontrados, portanto, do coeficiente em questão para cada trecho podem ser visualizados no Anexo A.

Após definir os valores de k_w buscou-se na literatura, desta vez, a definição do valor de k_b que é o coeficiente de decaimento do cloro no seio do líquido. É importante destacar, entretanto, segundo Salgado (2008), este coeficiente é determinado por reservatório do sistema e vai variar de acordo com a influência deste no abastecimento da rede como um todo. Diante disso, como a rede do Guajiru é abastecida somente por um reservatório e que, portanto, influencia todo o sistema, optou-se por utilizar um valor médio do coeficiente k_b estipulado por Salgado e também utilizado por Pereira (2009) como sendo de $1,2 \text{ dia}^{-1}$.

Finalmente, para que seja dado início as simulações de decaimento do cloro é necessário estabelecer um valor de concentração inicial deste e seu ponto de aplicação. Assim, representando-se o ponto de aplicação do cloro no reservatório da rede, decidiu-se por trabalhar com uma concentração inicial de 2 mg/L, dado que este é o limite superior estabelecido pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde (2011), além disso, tomou-se o cuidado de atentar-se para o fato de a rede apresentar em algum nó uma concentração menor do que 0,2 mg/L, dado que este é o limite mínimo estabelecido pela mesma portaria.

3.4 Simulações do sistema

Nesta etapa do estudo deram-se início a realização das simulações para dois cenários distintos, o primeiro deles para a situação da operação do sistema em regime permanente e o segundo, por sua vez, com operação da rede em regime transiente, objetivando, dessa forma, possibilitar uma análise comparativa entre esses dois cenários.

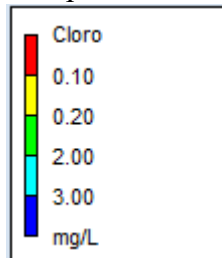
Em posse da vazão média, e dos valores dos coeficientes de decaimento do cloro k_b e k_w calculados nas etapas anteriores, buscou-se realizar a substituição dos dados obtidos na rede do EPANET a partir do arquivo .NET adquirido, assim, possibilitando o estudo do primeiro cenário de vazão em regime permanente. Depois de substituídos os dados, fez-se necessário definir um período de tempo ao longo do qual se deseja visualizar o comportamento da rede na simulação. Havendo-se a hipótese, todavia, de que a rede apresenta um tempo de detenção para que as concentrações de cloro cheguem a todos os nós do sistema, tem-se a necessidade de investigar como se dá a distribuição do cloro até que essa situação aconteça, ademais, após esse fato, outro fator importante de investigação é saber como as concentrações de cloro variam nas horas subsequentes, portanto, decidiu-se por executar a simulação por um total de 72 horas correspondentes a três dias.

Terminada a simulação, para que os estudos sobre o comportamento das concentrações de cloro na rede do Guajiru pudessem ser sucedidos, foram anotadas as concentrações de todos os nós da rede, hora a hora, para todas as 72 horas simuladas. Os resultados foram, então, sintetizados em uma planilha do Excel para posterior análise. Terminada a simulação, ainda utilizando-se o EPANET, criou-se um relatório de reação para esta simulação, gerando dessa forma um gráfico que mostra em termos médios, a quantidade de cloro perdida nas paredes das tubulações e no seio do fluido.

Paralelamente a isso, é importante lembrar que a concentração de cloro colocada no reservatório foi de 2,0 mg/L, conforme estipulado anteriormente na etapa de delimitação de parâmetros do decaimento. Sabendo disso, houve o cuidado de se observar ao longo do tempo se

os nós apresentavam as concentrações de cloro dentro da faixa de valores estabelecida pela Portaria n° 2914 do Ministério da Saúde (0,2 mg/L – 2 mg/L), para isso recorreu-se a um recurso do EPANET de inserir uma legenda de cores nos nós da rede para a qualidade da água, de forma que, conforme pode ser observado na Figura 8, os valores de concentração de cloro que estivessem dentro do intervalo apropriado, os nós deveriam apresentar coloração verde.

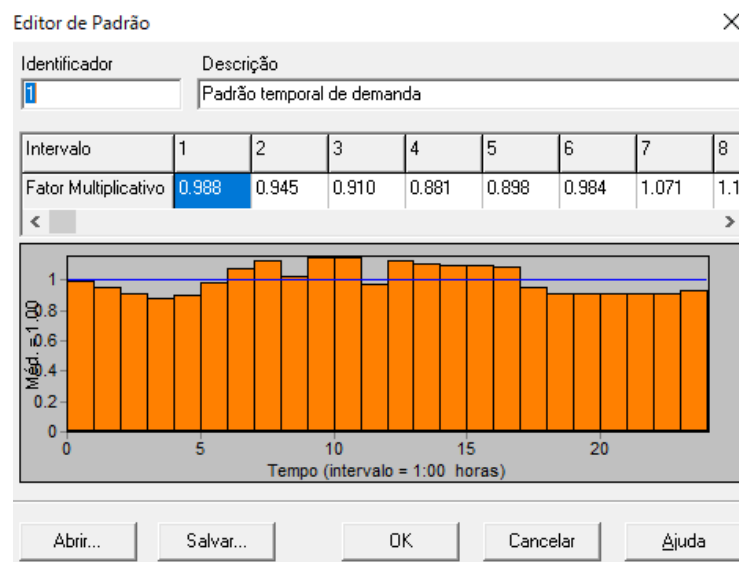
Figura 8 – Legenda de cores para concentração de cloro



Fonte: desenvolvido pelo autor (2019)

Terminada a simulação em regime permanente, inseriram-se os fatores multiplicativos calculados por Barreira (2017) contidos na Tabela 3 para definição do padrão, na rede do EPANET, de demanda temporal que caracteriza o regime transiente, conforme pode ser visualizado na Figura 9, permitindo assim a execução da rede para este novo cenário.

Figura 9 – Padrão de demanda temporal para rede do Guajiru no EPANET



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Os coeficientes de decaimento do cloro obtidos na etapa anterior foram novamente repetidos para este cenário. Além disso, realizou-se, dessa vez também, a simulação dentro do intervalo de 72 horas, sendo os resultados anotados hora a hora. A legenda de cores foi mais uma

vez utilizada para avaliar se as concentrações de cloro estavam dentro dos parâmetros. Por fim, assim como feito no cenário de regime permanente, os dados do cloro em cada nó para os intervalos avaliados foram sintetizados em uma planilha do Excel, como também se fez um relatório de reação para esta simulação.

Sabendo disso, ainda foram empregada uma série de novas simulações, desta vez com concentrações de cloro saindo do reservatório menores que 2 mg/L de forma a avaliar se o sistema é capaz de operar em condições adequadas para essas novas medidas, permitindo, assim, fazer uma proposta de redução de gastos excessivos do elemento junto a entidade gestora da rede.

3.5 Análise dos resultados

Após executadas as simulações e em posse dos valores coletados, deu-se início a etapa de análise dos resultados, investigando-se o tempo necessário para que todos os nós da rede apresentem significativas concentrações de cloro, como também com objetivo principal de fazer uma análise comparativa para o comportamento do decaimento do cloro na rede entre os dois cenários simulados.

Diante disso, para a avaliação do tempo de distribuição do cloro na rede, foram escolhidos três nós da rede do Guajiru, um mais próximo do reservatório, outro num ponto médio da rede e, por último, um ponto mais distante do reservatório, respectivamente, os nós 13, 45 e 125. Os dados de concentração de cloro nesses nós foram plotados em um gráfico, variando ao longo das 72 horas simuladas, lembrando-se de fazer uma análise para cada um tanto para o regime permanente, como para o regime transiente.

Ademais, para avaliar a variação da concentração do cloro nos nós da rede em regime transiente, plotou-se um gráfico com a média dos valores de concentração encontrados, também se mediu o desvio-padrão e, a partir disso, possibilitou-se a plotagem dos dados em um gráfico de caixa. Para a comparação deste com o regime permanente, fez-se uma média entre as médias dos valores das concentrações de cloro no regime transiente e os valores das concentrações nos mesmos nós no regime permanente, calculando-se depois o desvio-padrão e, novamente, permitindo-se a plotagem de um gráfico de caixa.

Nesse contexto, a partir dos gráficos plotados, realizou-se uma análise comparativa entre os dois cenários de forma a avaliar se o decaimento de cloro comporta-se de forma semelhante em ambos. De forma a complementar essa comparação, também foram observados os relatórios de reação em ambas às situações, assim permitindo verificar se os coeficientes de decaimento contribuem de forma semelhante para o fenômeno tanto em regime permanente quanto em regime transiente.

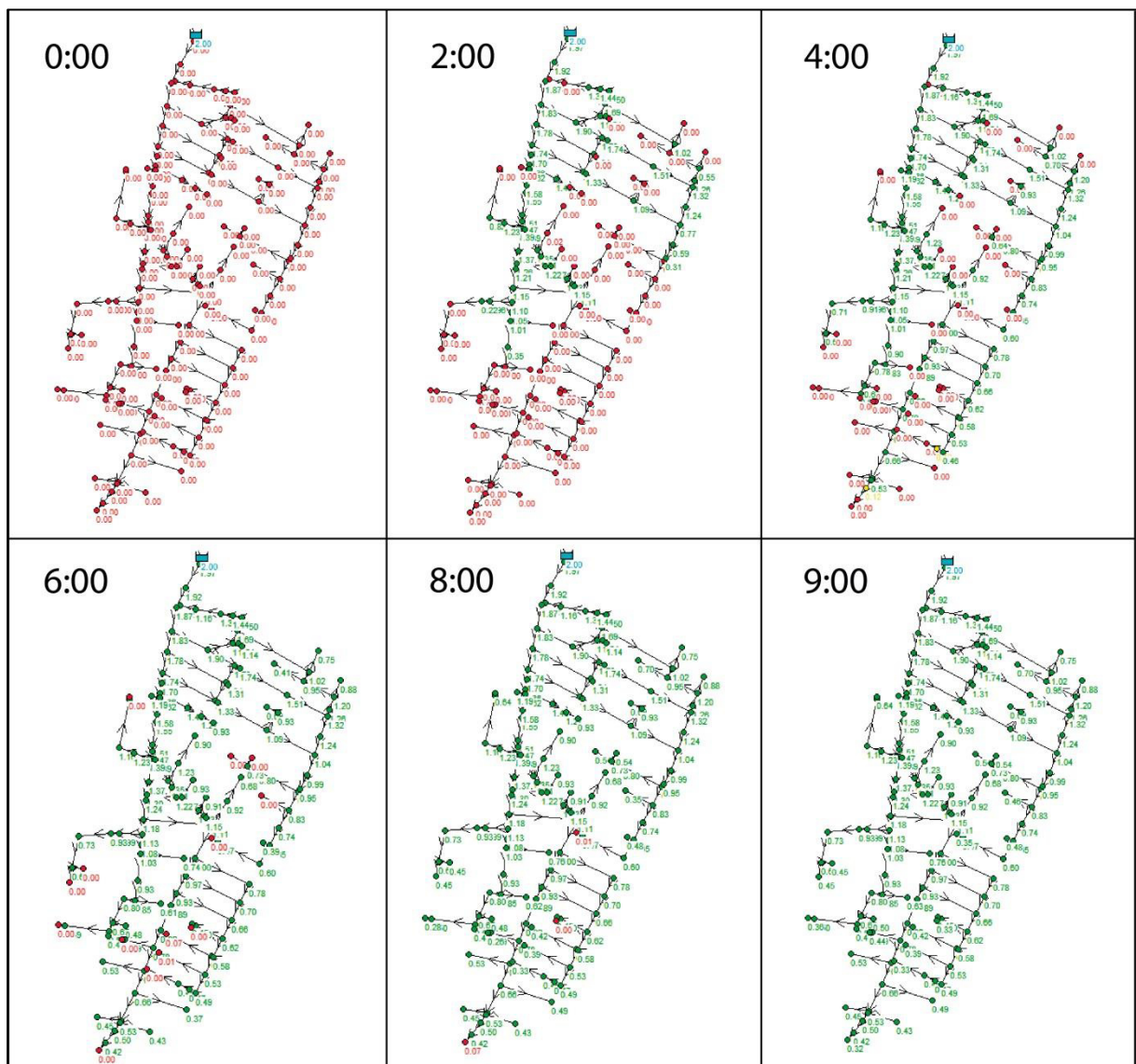
Além disso, ainda foi feita uma verificação em todos os nós do sistema para avaliar se a rede apresenta em algum nó risco de manifestar concentrações de cloro fora do intervalo estipulado pelo Ministério da Saúde, como também foram avaliados os resultados encontrados para as simulações feitas com concentrações de cloro menores do que 2,0 mg/L.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelagem da rede para o regime permanente

Conforme descrito na metodologia deste trabalho, introduziu-se, no arquivo .NET do EPANET contendo a rede do Guajiru estudada, a vazão média na rede e os valores de k_b e k_w para cada trecho calculados. Executando-se a simulação para um total de 72 horas e com concentração inicial de cloro de 2,0 mg/L saindo do reservatório, notou-se que, nas primeiras horas simuladas, o cloro demora um certo período de tempo para atingir todos os pontos do sistema. Esse fato pode ser observado na Figura 10 a seguir:

Figura 10 – Decaimento de cloro na rede do Guajiru em regime permanente nas primeiras horas de simulação

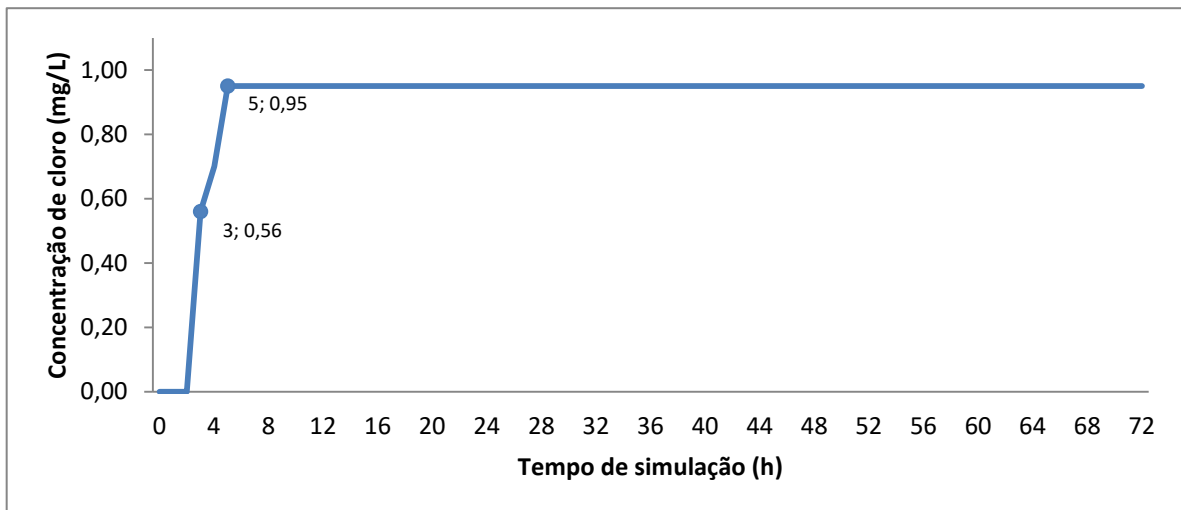


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Da Figura 12, sabe-se que os nós em vermelho são pontos cujas concentrações de cloro ainda são nulas, enquanto que os nós de coloração verde representam os pontos onde o cloro já fora distribuído. Diante disso, percebe-se que somente a partir de 9 horas de simulação é que o cloro atinge, de fato, toda a extensão da rede, sendo, portanto, seu tempo de detenção, havendo-se, assim, a necessidade de avaliar como essa distribuição se dá, escolheu-se três nós da rede, conforme explicado na metodologia.

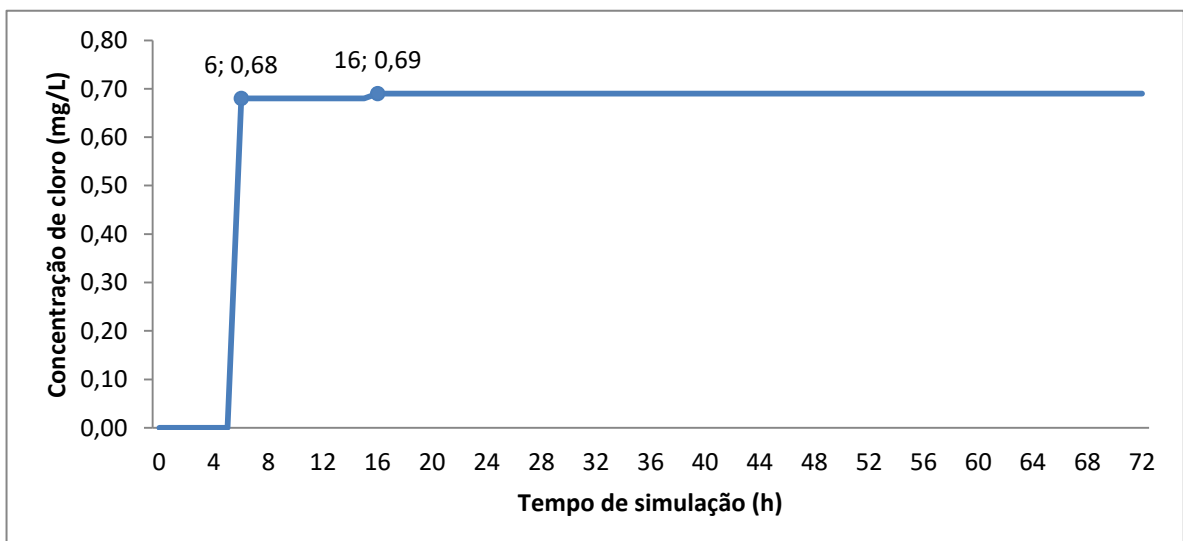
Sabendo disso, abaixo se encontram os Gráficos 3,4 e 5 que foram plotados para os nós 13, 45 e 125, respectivamente, representando a variação das concentrações de cloro ao longo de 72 horas de simulação.

Gráfico 3 – Concentração de cloro x tempo para o nó 13 (regime permanente)



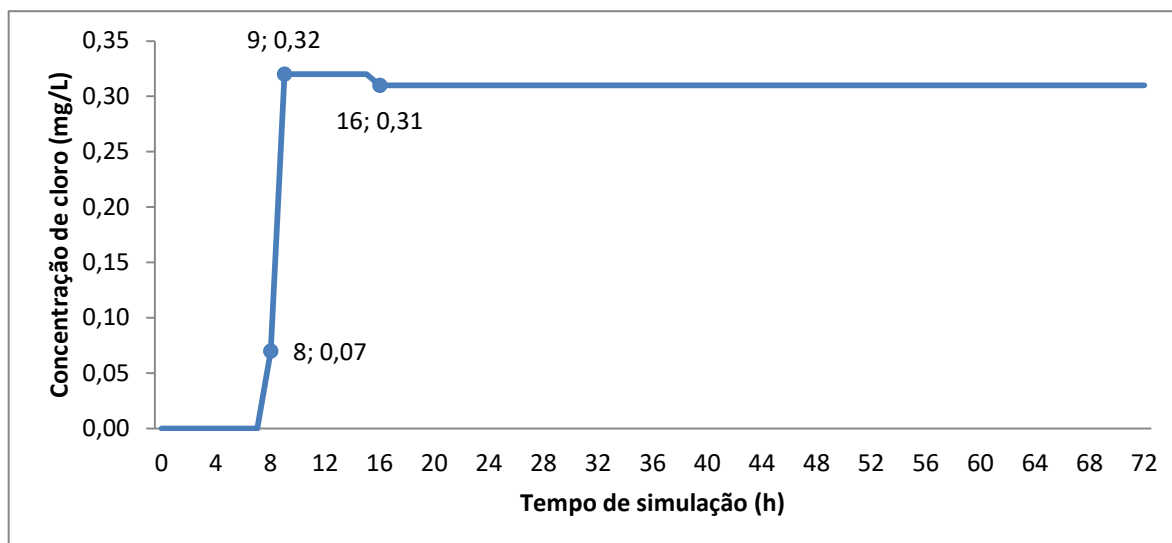
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Gráfico 4 – Concentração de cloro x tempo para o nó 45 (regime permanente)



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Gráfico 5 – Concentração de cloro x tempo para o nó 125 (regime permanente)



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Nesse contexto, a partir da análise dos gráficos, percebe-se, inicialmente, que para o nó 13, que representa o nó mais próximo ao reservatório, somente depois de decorridas três horas de simulação, o ponto começa a apresentar valores de concentração de cloro, atingindo um pico de 0,95 mg/L após 5 horas e mantendo-se constante para este valor nas horas subsequentes.

O nó 45, por sua vez, que representa um ponto intermediário de distância do reservatório, só passa a manifestar concentrações de cloro após 6 horas de simulação, atingindo com 16 horas uma concentração de 0,69 mg/L onde encontra sua estabilidade e mantém constante sua concentração para as próximas horas simuladas.

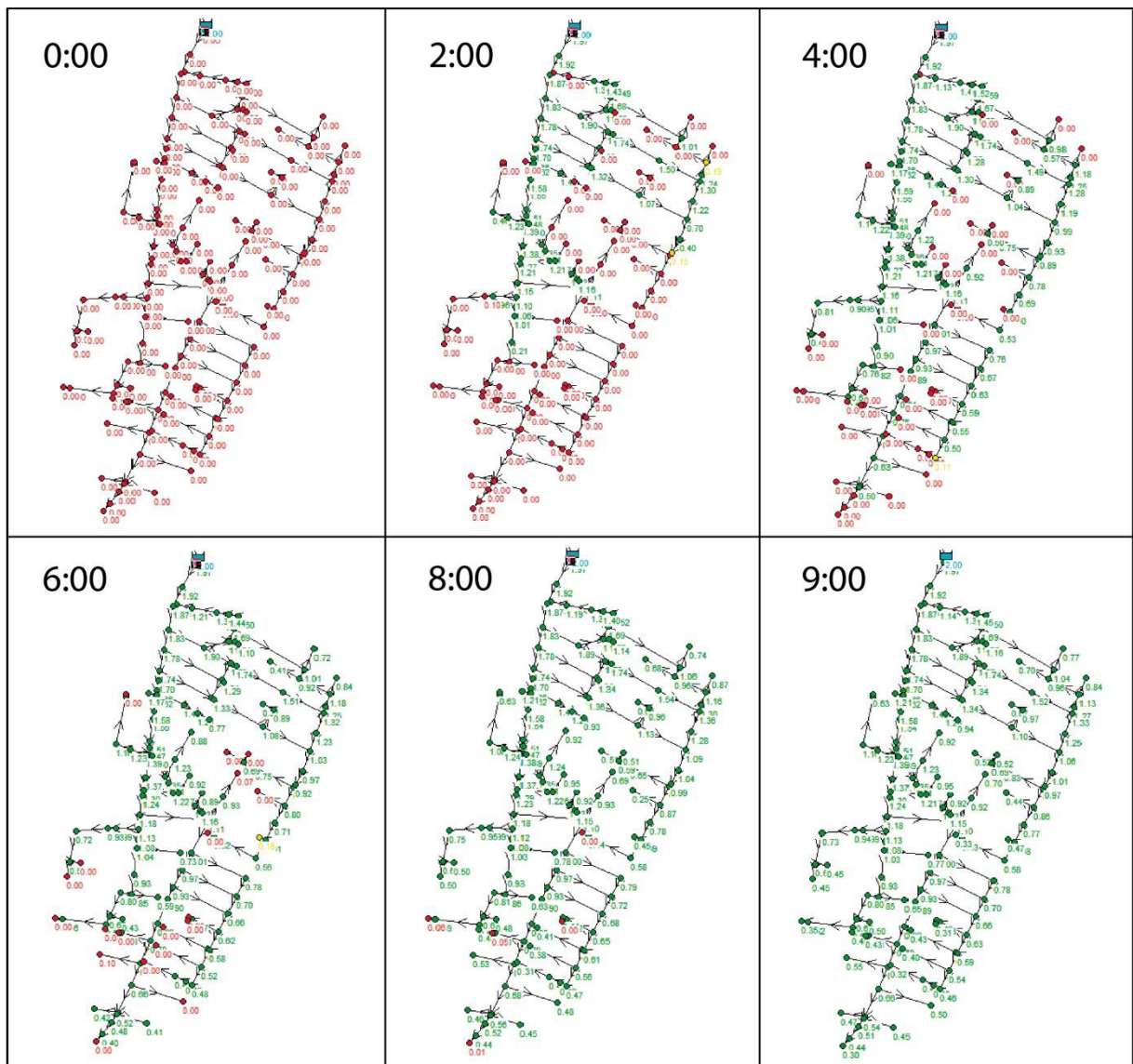
Por fim, o nó 125, que representa o nó mais distante do reservatório, passa a expressar suas medidas de cloro com 8 horas de simulação onde, na hora seguinte, o nó atinge um máximo de 0,32 mg/L e, com 16 horas simuladas, a concentração decai para 0,31 mg/L, de forma que para as horas seguintes de simulação, o nó permanece com concentrações constantes para este valor.

Feitas essas observações, realizando-se uma análise conjunta dos três nós, em um primeiro momento, nota-se que quanto mais distante do reservatório, mais tempo leva para que o nó comece a expressar concentrações de cloro, assim, para a rede do Guajiru, precisa-se de, pelo menos, 8 horas para que o cloro esteja totalmente distribuído no sistema. Além disso, percebe-se que, para o sistema operando em regime permanente, as concentrações de cloro, após certo período de tempo, encontram um equilíbrio, que se dá em um valor cada vez menor, quanto mais se afasta do reservatório, de forma a permanecer constante nas próximas horas. Para a rede do Guajiru, portanto, percebe-se que o tempo necessário para o alcance desse equilíbrio é de 16 horas.

4.2 Modelagem da rede para o regime transiente

No que se refere ao regime transiente, os valores de k_b e k_w calculados para cada trecho permanecem os mesmos, havendo-se a necessidade apenas de adicionar os padrões de consumo, conforme especificado na metodologia. Os parâmetros de simulação, como tempo e concentração inicial de cloro, mantiveram-se os mesmos do cenário do regime permanente, de forma que, assim como fora evidenciado para a simulação anterior, no regime transiente, também se percebeu que o cloro leva um intervalo de tempo para estar totalmente distribuído no sistema. Isso pode ser visualizado na Figura 11 a seguir:

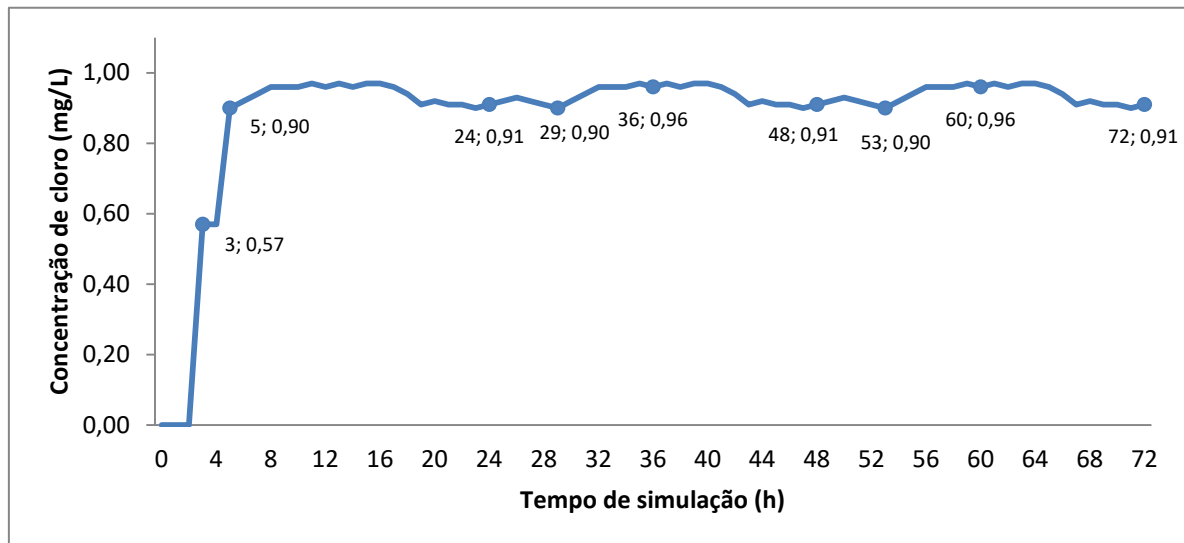
Figura 11 – Decaimento de cloro na rede do Guajiru em regime transiente nas primeiras horas de simulação



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

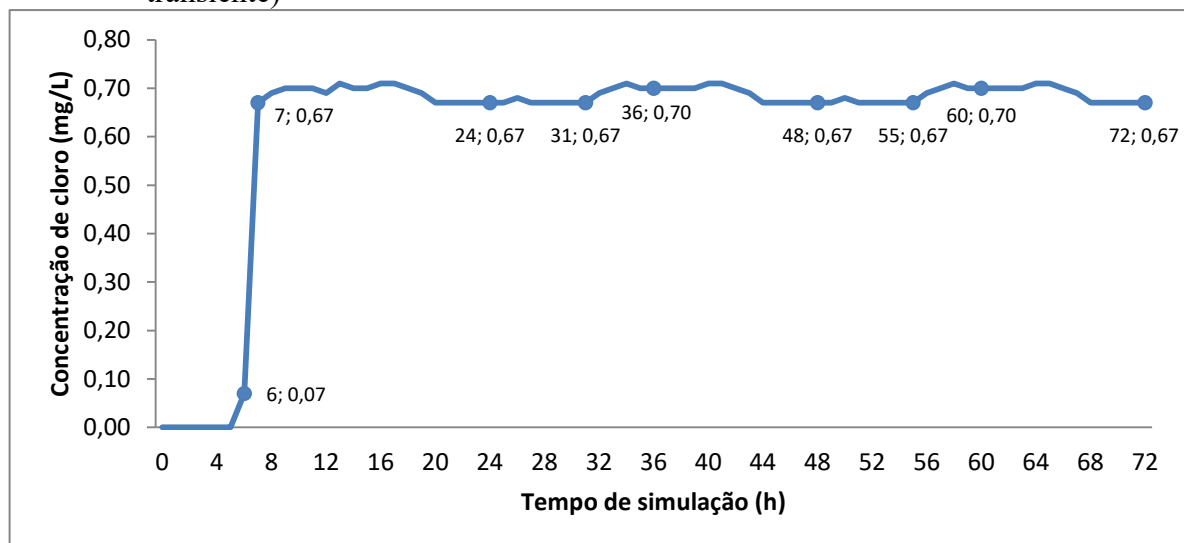
Evidencia-se, assim, da Figura 16, que novamente, 9 horas de simulação são necessárias para que o cloro chegue a todos os pontos da rede. Repetindo-se o procedimento empregado no cenário de regime permanente para os mesmos três nós escolhidos da rede do Guajiru, abaixo se observam os Gráficos 6, 7 e 8 plotados, respectivamente, para os nós 13, 45 e 125 de concentração de cloro pelo tempo de 72 horas de simulação.

Gráfico 6 – Concentração de cloro x tempo para o nó 13 (regime transiente)



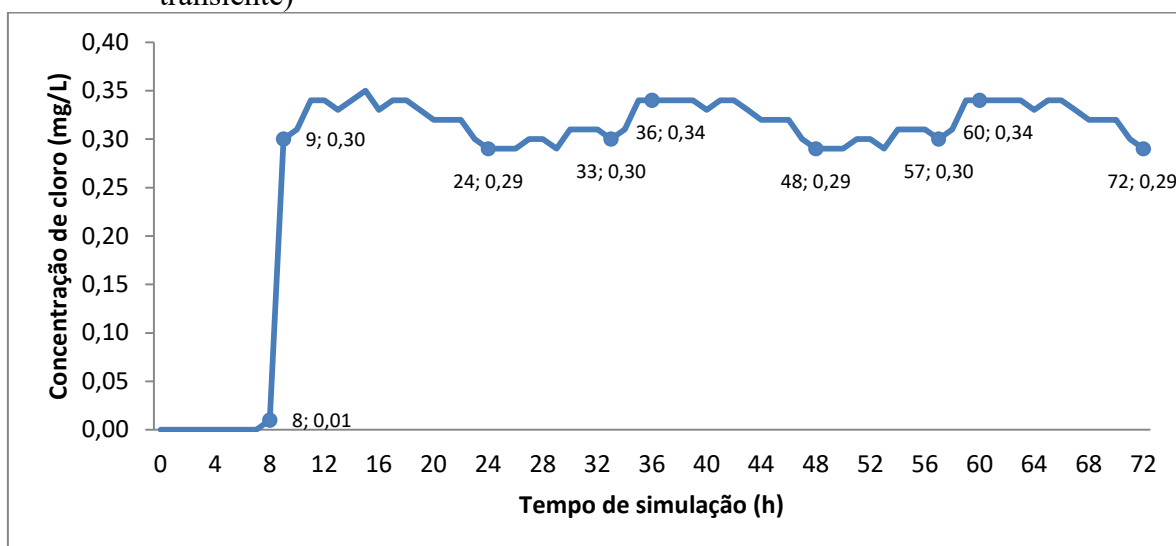
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Gráfico 7 – Concentração de cloro x tempo para o nó 45 (regime transiente)



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Gráfico 8 – Concentração de cloro x tempo para o nó 125 (regime transiente)



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Diante disso, pela visualização dos gráficos, é possível observar, em um primeiro momento, que para o nó 13, mais próximo ao reservatório, assim como no regime permanente, precisa de três horas de simulação para começar a apresentar valores de concentração de cloro (0,57 mg/L), e cujo valor sobe drasticamente para 0,90 mg/L na hora 5, a partir da qual as concentrações vão variando ao longo do tempo.

Paralelamente a isso, o nó 45, intermediário na rede, somente a partir da hora 6 demonstra medições de concentrações de cloro (0,07 mg/L), de forma que com 7 horas de simulação, esse valor cresce significativamente para 0,67 mg/L, apresentando, para as próximas horas, variações nas medições, ao longo do tempo, sem mudanças extremas.

O nó 125, por sua vez, mais distante do reservatório, manifesta valor para concentração de cloro após 8 horas de simulação (0,01 mg/L), na hora seguinte, observa-se no nó um aumento abrupto da concentração para 0,30 mg/L e, assim como nos outros nós, as medições de concentração de cloro, nas horas subsequentes, vão variando sem alterações muito radicais.

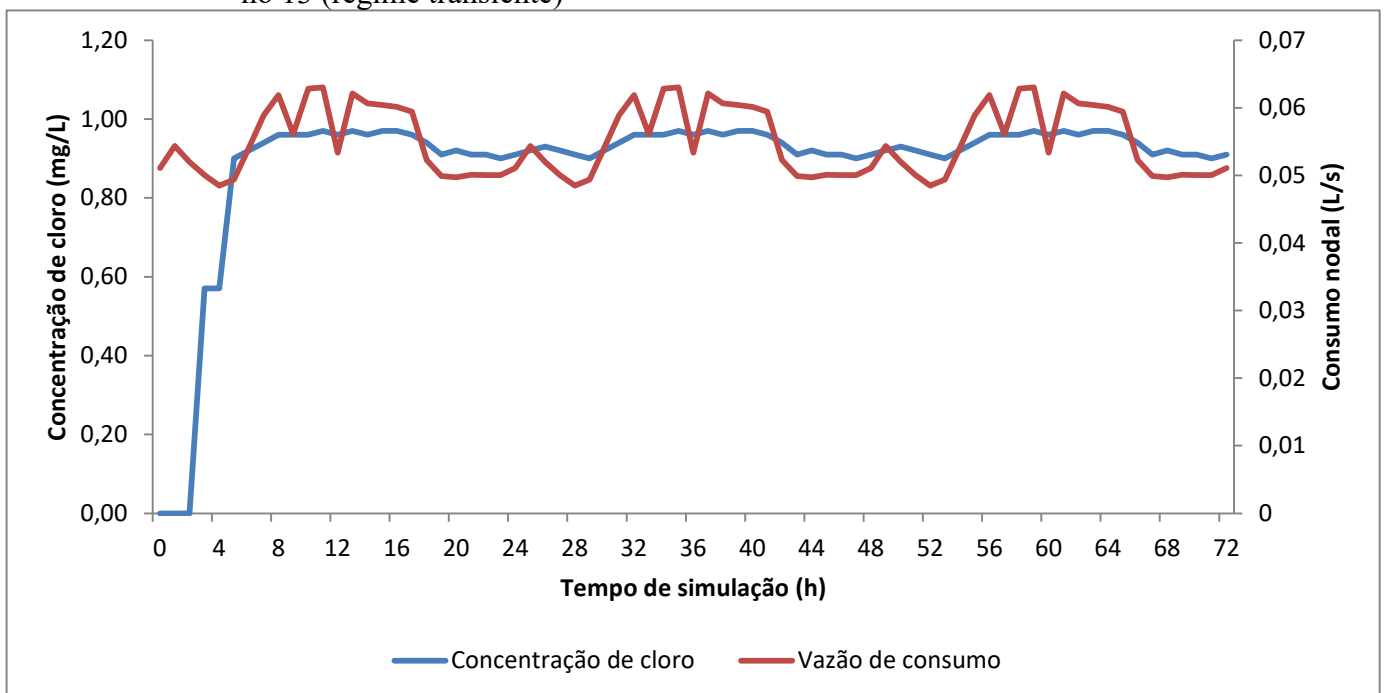
Sabendo disso, conforme constatado no regime permanente, no regime transiente também se reparou que os pontos mais distantes do reservatório demoram mais para apresentarem medições de cloro, como também os nós estudados levaram o mesmo tempo para isso acontecer. Portanto, aponta-se que tanto em regime permanente, como em regime transiente, são necessárias 8 horas para que o cloro esteja totalmente distribuído no sistema.

Ademais, percebe-se também que, para o regime transiente, após o valor de concentração de cloro aumentar de forma drástica, de acordo com o evidenciado, o sistema como um todo entra em uma espécie de equilíbrio, uma vez que os valores começam a se repetir de 24

em 24 horas, conforme pode ser visualizado pelos pontos destacados nos nós em seus respectivos gráficos. Nota-se ainda que esse equilíbrio percebido no regime transiente é obtido em um intervalo de tempo inferior ao que foi observado para o regime permanente, visto que na primeira simulação a rede atingiu um equilíbrio após 16 horas, enquanto que para o segundo cenário, foram necessárias somente 9 horas até que o ponto mais distante entrasse no padrão de variação de concentração observado.

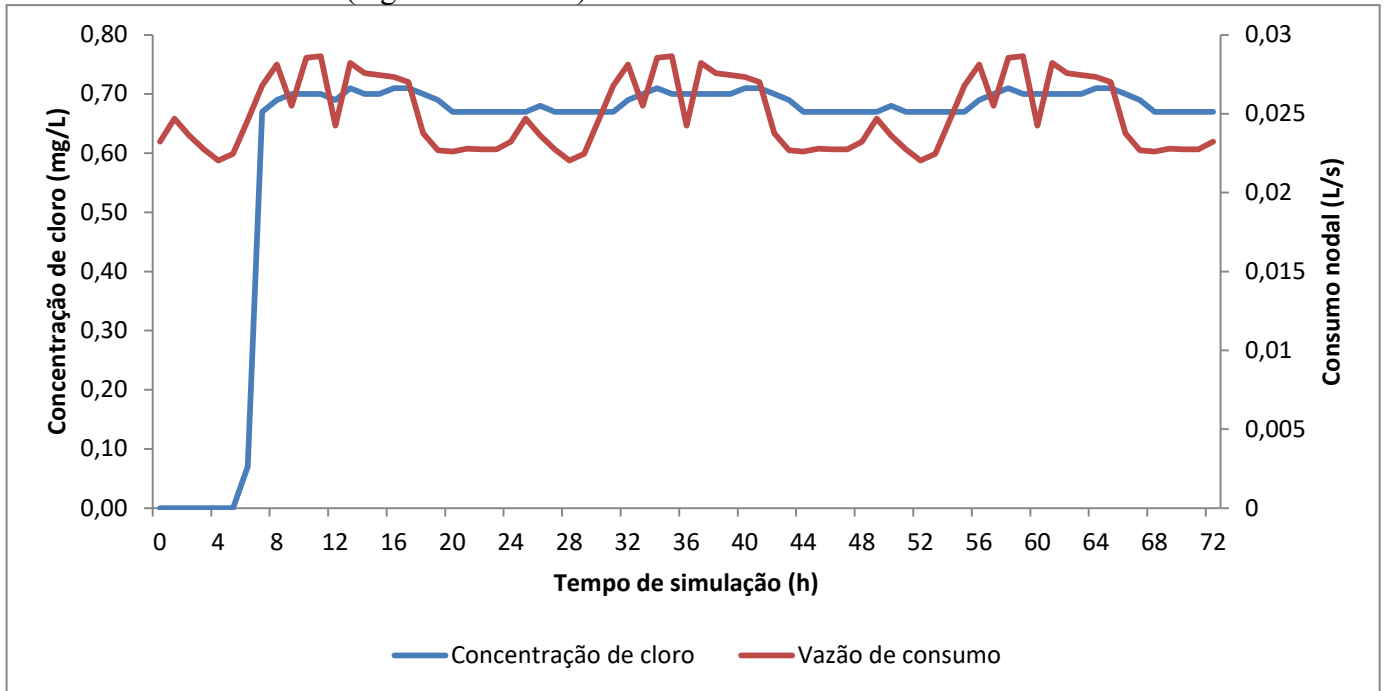
Com isso, levantou-se a hipótese de que essa variação observada nas concentrações ao longo do tempo, repetindo-se após 24 horas, deveria estar relacionada com o padrão de demanda introduzido na rede para o regime transiente, uma vez que essas variações não foram observadas no regime permanente por este apresentar vazão constante. Assim, para realizar essa investigação, plotaram-se os Gráficos 9, 10 e 11 dos nós estudados, fazendo-se concentração de cloro, por tempo, por demanda nodal. Observe abaixo:

Gráfico 9 – Concentração de cloro x tempo x demanda de consumo para o nó 13 (regime transiente)



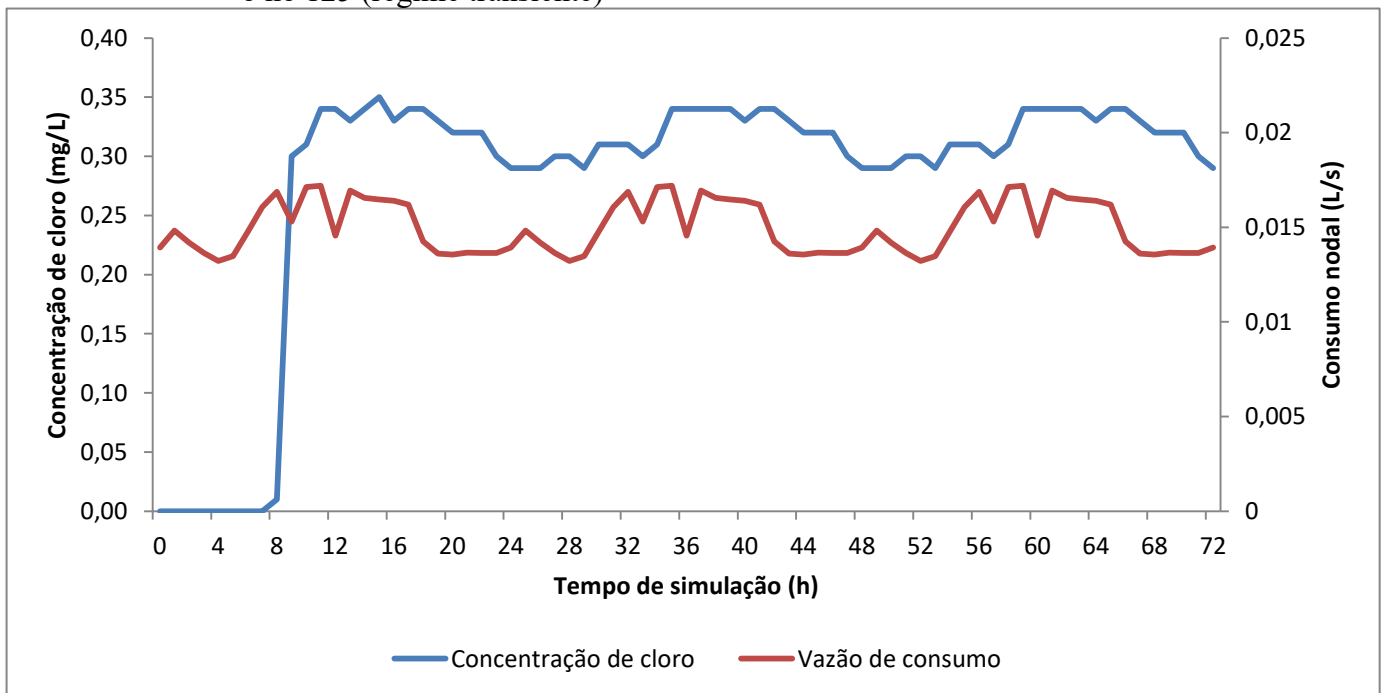
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Gráfico 10 – Concentração de cloro x tempo x demanda de consumo para o nó 45 (regime transiente)



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Gráfico 11 – Concentração de cloro x tempo x demanda de consumo para o nó 125 (regime transiente)



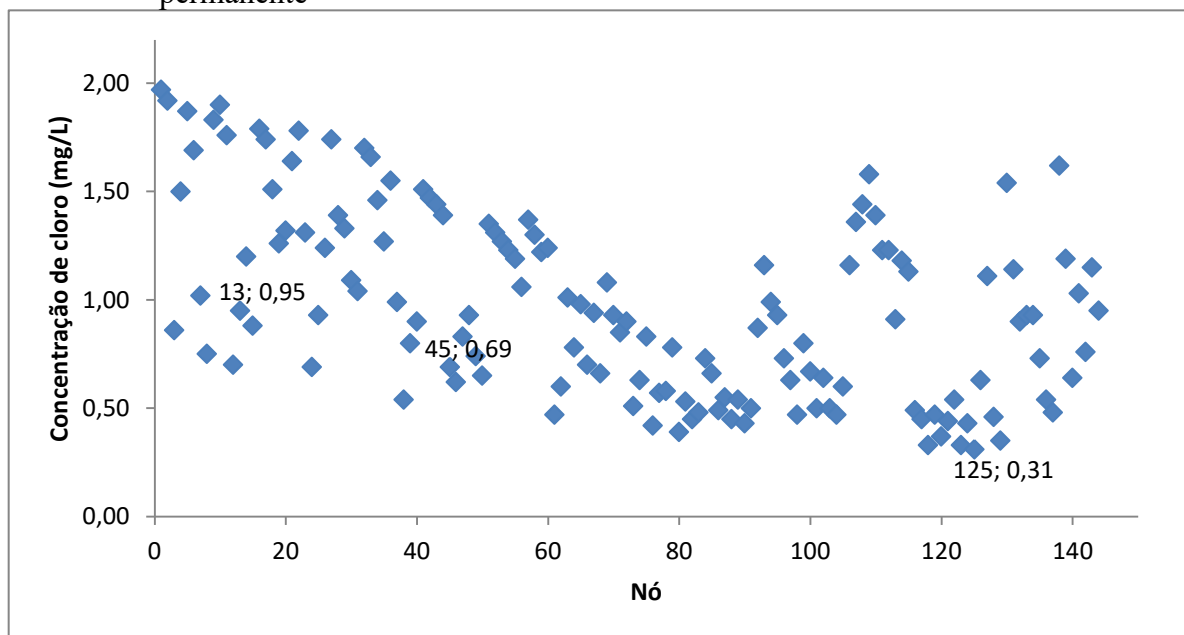
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Diante do exposto pelos gráficos, é possível perceber que a hipótese de que as concentrações de cloro variam de acordo com as demandas de consumo é válida, dado que, graficamente, nota-se que um aumento da vazão incorre no aumento da concentração nodal de cloro e uma redução dessa leva a uma redução na concentração, possivelmente, pelo fato de as reações de decaimento não se processarem da mesma forma em vazões maiores.

4.3 Análise comparativa das modelagens

A partir das observações feitas nas simulações, entendendo-se que, em regime permanente, após 16 horas de simulação, o sistema entra em equilíbrio quanto as concentrações de cloro em cada nó, portanto, realizou-se a plotagem de um gráfico que pode ser observado no Gráfico 12 a seguir:

Gráfico 12 – Concentração de cloro por nó na rede do Guajiru em regime permanente



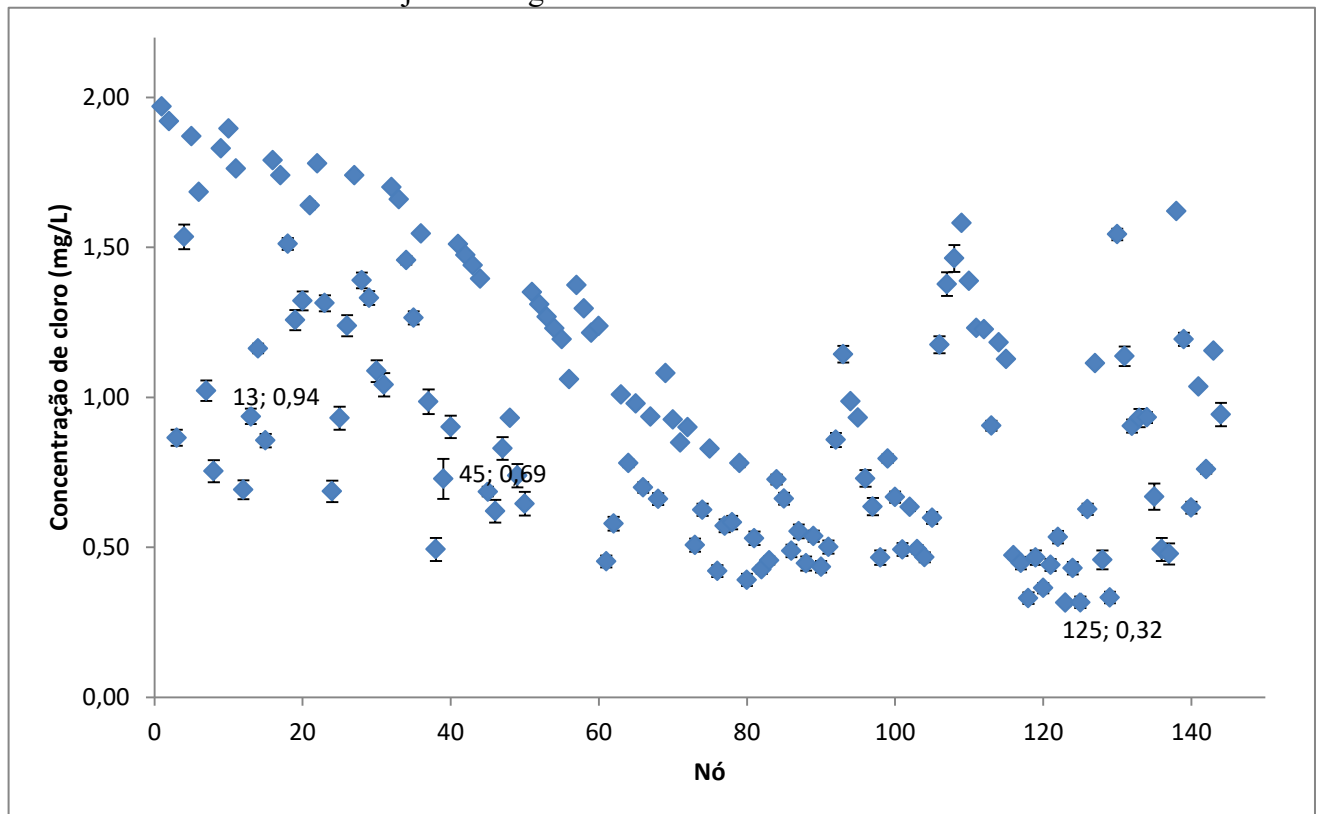
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Pela visualização do gráfico, percebe-se que, quanto mais afastado do reservatório, menor a concentração de cloro que é observada no nó em equilíbrio, conforme pode ser visualizado pelos pontos 13, 45 e 125.

Nesse contexto, sabe-se também que em regime transiente, as concentrações de cloro, após um determinado ponto, passam a variar de acordo com a vazão em uma espécie de equilíbrio estável. Assim, houve a necessidade de avaliar a magnitude dessa variação. Para isso, tomaram-se

os dados de concentração de cloro hora a hora, para o segundo dia de simulação, ou seja, de 24 para 48 horas, para todos os nós da rede. Com esses dados, calcularam-se as médias de concentração para cada nó, como também os desvios-padrões, de forma a verificar se os valores distam muito uns dos outros. Os resultados foram então plotados em um gráfico em caixa, conforme pode ser visualizado no Gráfico 13 a seguir:

Gráfico 13 – Média das concentrações de cloro por nó, com desvio padrão na rede do Guajiru em regime transiente



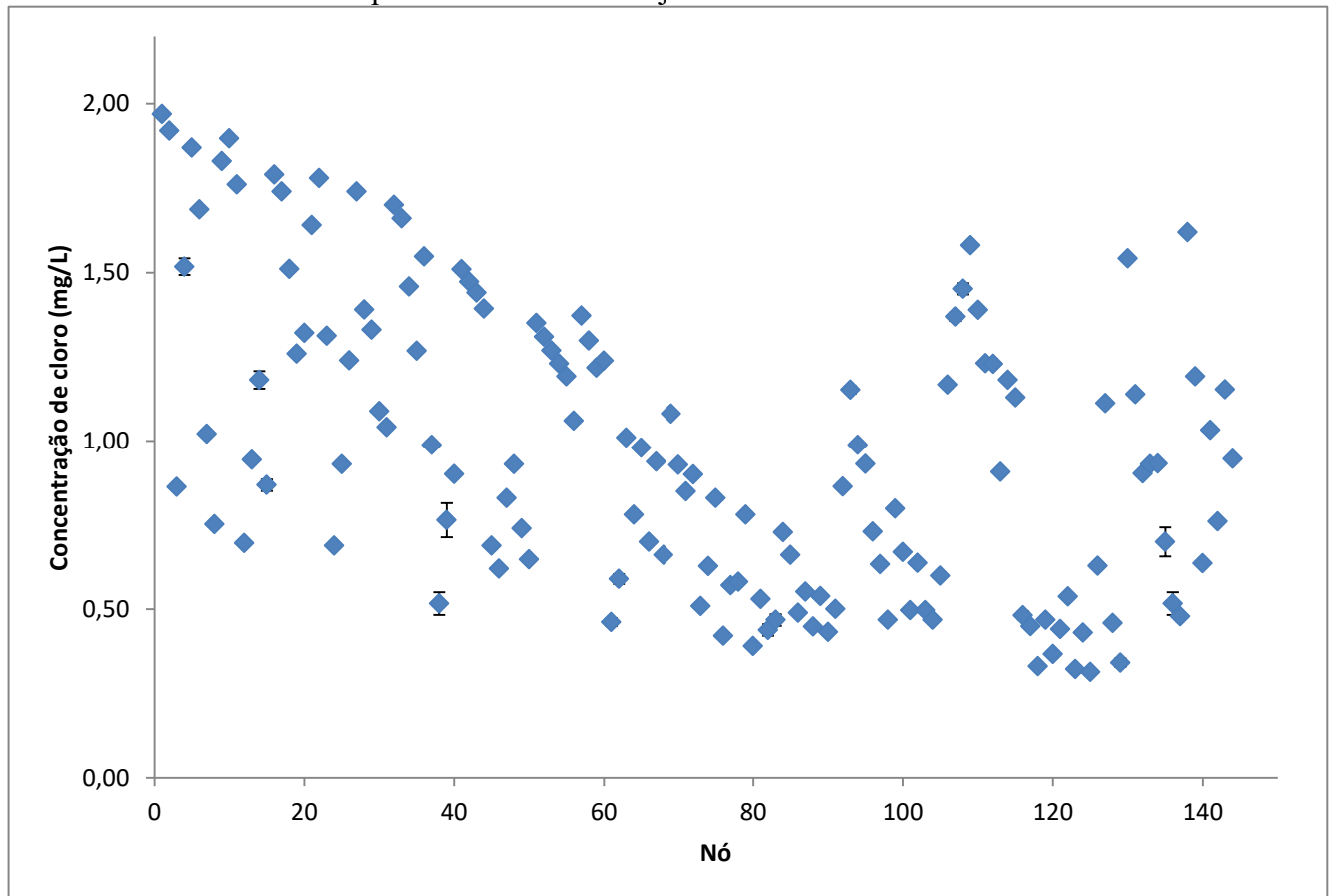
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Observando o gráfico, notou-se novamente, assim como visto para o regime permanente, que as concentrações médias de cloro se reduzem, quanto mais afastado do reservatório o nó se encontra, veja pontos 13, 45 e 125. Além disso, observa-se que os valores médios de concentração de cloro são bastante representativos para o estado de equilíbrio que a rede apresenta no regime transiente, uma vez que o desvio-padrão analisado no gráfico é muito pequeno, sendo o maior valor encontrado para o nó 39, com 0,067.

Dessa forma, com o intuito de avaliar se o regime permanente pode ser utilizado como representativo do regime transiente no que tange a análise do decaimento de cloro, utilizaram-se as médias das concentrações previamente calculadas para o regime transiente e fez-se a média com os valores das concentrações de cloro para o equilíbrio do regime permanente,

feito isso, calculou-se os desvios-padrões dos valores encontrados e, novamente, plotou-se em um gráfico de caixa, assim como visualizado no Gráfico 14.

Gráfico 14 – Comparação das médias das concentrações de cloro por nó, com desvio padrão na rede do Guajiru

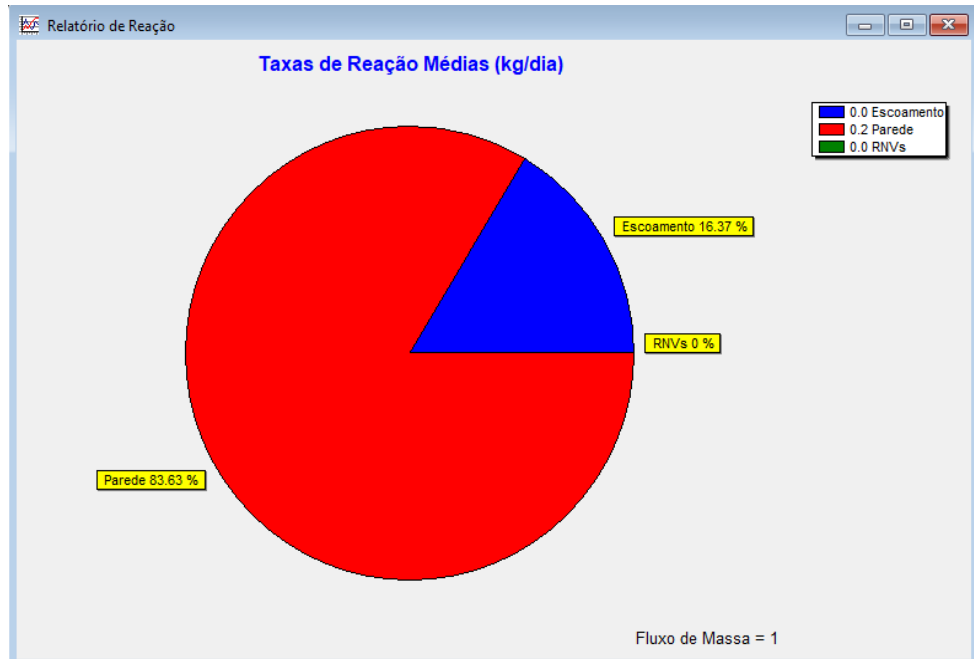


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Diante disso, a partir do gráfico percebe-se que os valores das médias encontradas para o regime transiente são muito próximos ao do regime permanente, sendo, em muitos nós, observados os mesmo valores, de forma que os desvios-padrões são muito pequenos, sendo o maior encontrado com o valor de 0,05, novamente para o nó 39. Com isso, pode ser afirmado que o regime permanente simulado é representativo do regime transiente para a rede do Guajiru.

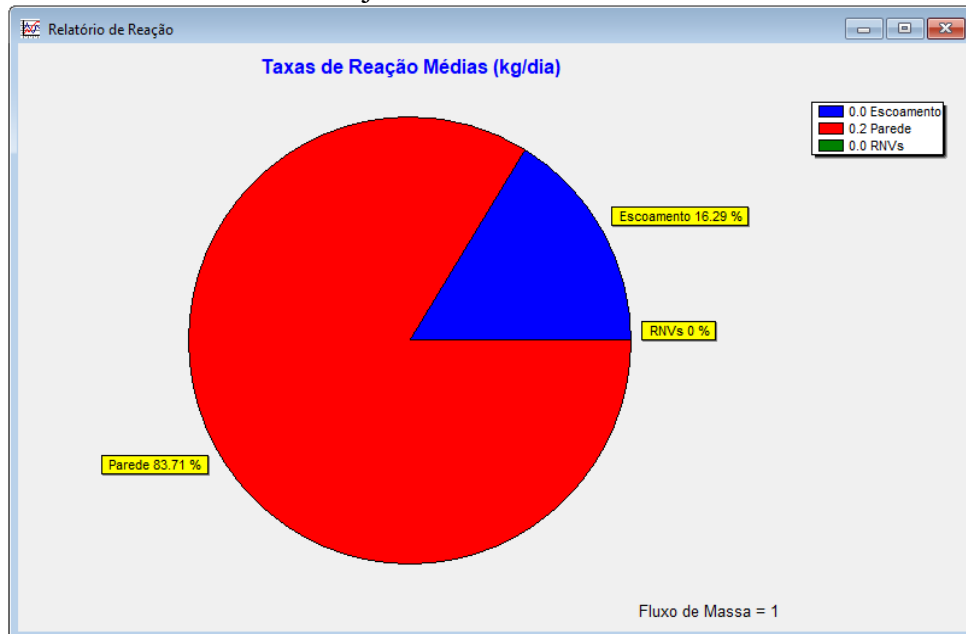
Para complementar essa análise, observou-se também como as reações de decaimento de cloro se processam na parede das tubulações, como também no seio do líquido, tanto para o regime permanente, como para o regime transiente, sendo essa observações obtidas a partir da visualização dos Gráficos 15 e 16 de reações obtidos de relatórios do EPANET a seguir:

Gráfico 15 – Relatório de reação do decaimento de cloro no regime permanente na rede do Guajiru



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Gráfico 16 – Relatório de reação do decaimento de cloro no regime transiente na rede do Guajiru



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

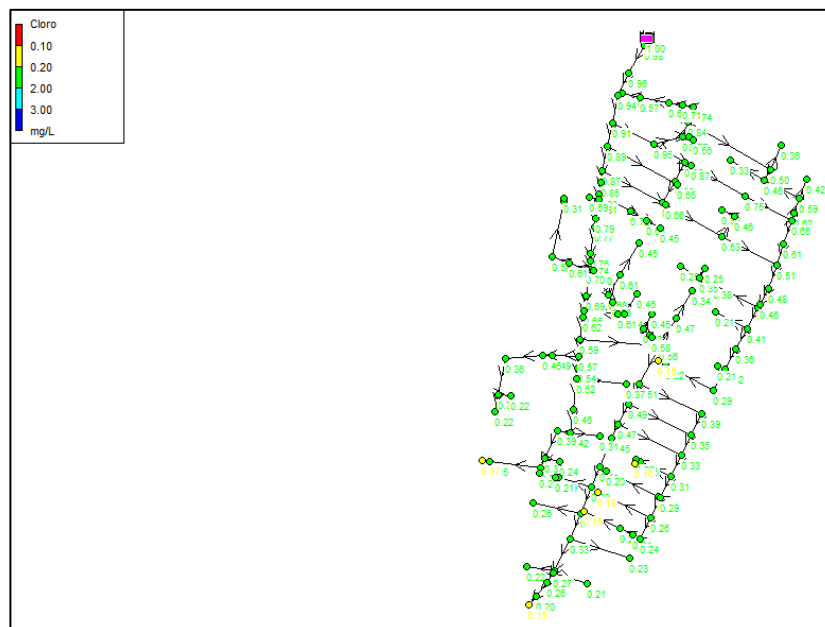
Portanto, nota-se, pelos valores obtidos que as reações de decaimento se processam de forma semelhante em ambos os cenários analisados, de forma que a maior parte do decaimento se dá por reações nas paredes das tubulações, quase 84% do decaimento.

4.4 Proposta de redução de aplicação de cloro

Por fim, com o intuito de propor a operação da rede do Guajiru de maneira mais econômica pela entidade gestora, propôs-se a realização de simulações com concentrações de cloro abaixo de 2 mg/L saindo do reservatório, avaliando-se, durante esse processo, caso o sistema permanece dentro dos padrões estipulados pelo Ministério da Saúde, viabilizando, assim, a redução de gastos por parte da CAGECE.

Conforme foi observado nas simulações das etapas anteriores, para uma aplicação de 2 mg/L de cloro, todos os nós da rede, tanto em regime permanente como em regime transiente, apresentaram concentrações seguras de cloro (0,2 mg/L - 2,0 mg/L). Assim, ainda utilizando o regime transiente, operou-se uma simulação com concentração inicial de 1,0 mg/L saindo do reservatório. Ao ser executada, a simulação apresentou após algumas horas de simulação, pontos com concentrações abaixo do desejado, um desses momentos corresponde a hora 28 que é quando a vazão é mínima e esperam-se concentrações menores de cloro nos nós do sistema, veja Figura 12 a seguir:

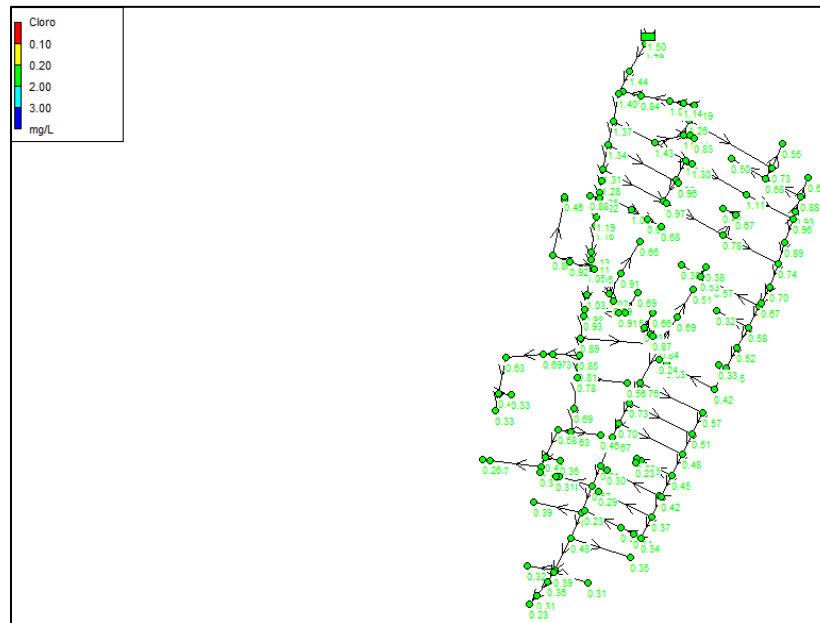
Figura 12 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,0 mg/L – hora 28



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Assim, uma nova simulação foi realizada, desta vez com concentração inicial de 1,5 mg/L, desta vez, todos os nós voltaram a operar dentro do padrão de segurança estabelecido, veja Figura 13 a seguir para a hora 28:

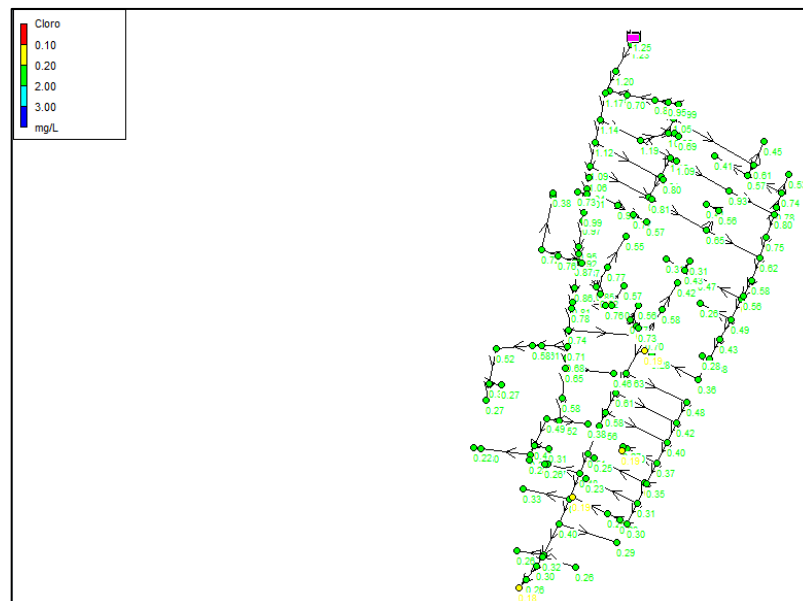
Figura 13 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,5 mg/L – hora 28



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Então, procedeu-se novamente uma simulação com concentração inicial de 1,25 mg/L de cloro. Entretanto, para algumas horas, a simulação apresentou nós com concentrações de cloro abaixo do que é estipulado pelo Ministério da Saúde, veja Figura 14:

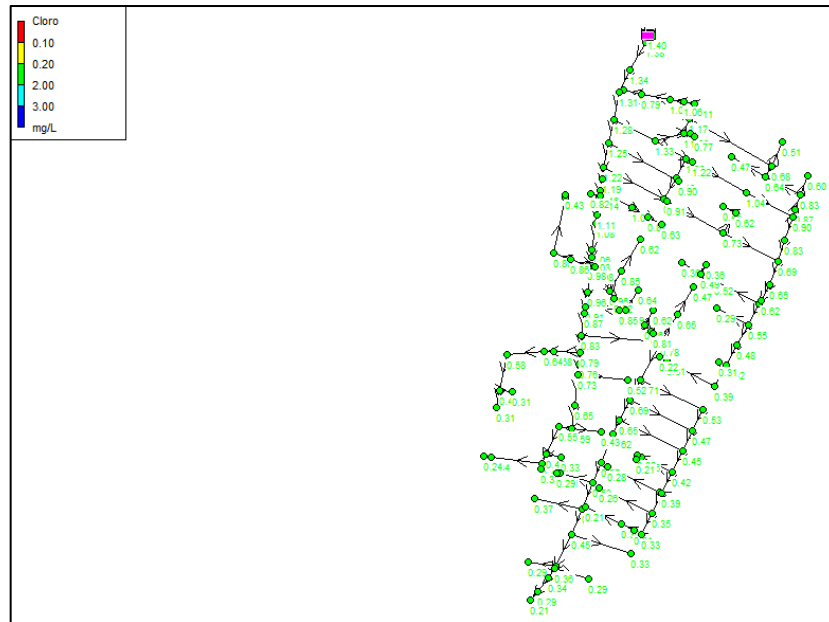
Figura 14 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,25 mg/L – hora 28



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

rocedendo-se com uma simulação com de 1,4 mg/L, notou-se que todos os nós voltaram a operar dentro do padrão de segurança, veja Figura 15 a seguir para a hora 28:

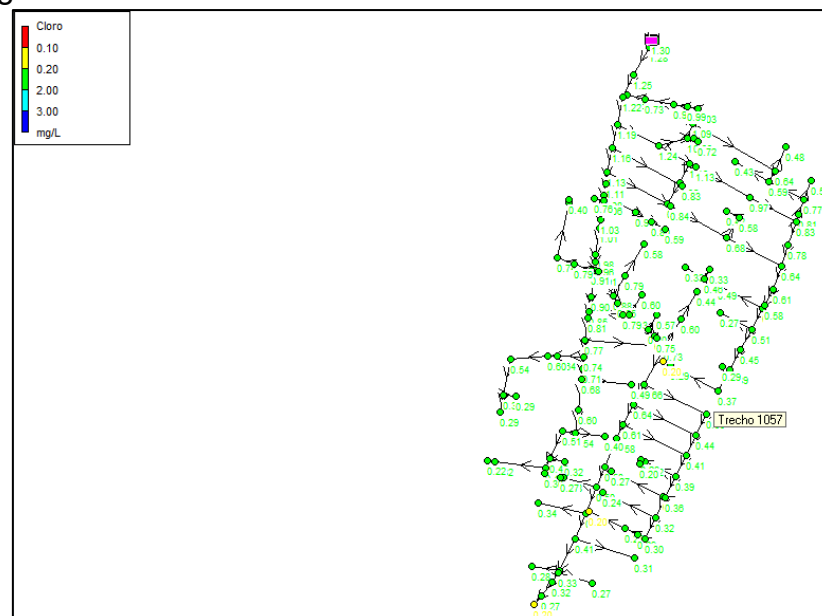
Figura 15 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,4 mg/L – hora 28



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

Para uma simulação com concentração inicial de 1,3 mg/L, a simulação apresentou condições inseguras de concentração de cloro mais uma vez, observe Figura 16:

Figura 16 – Simulação com concentração inicial de cloro de 1,3 mg/L – hora 28



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2019)

5 CONCLUSÃO

É inegável que o decaimento de cloro em redes de abastecimento mostra-se como uma área de estudo cujos resultados apresentam certa dificuldade de universalização, dado que, além de ser uma seara ainda pouco explorada, os parâmetros que regem o fenômeno de decaimento tendem a variar de sistema para sistema. Portanto, os estudos feitos para este trabalho, podem ajudar a entidade gestora da rede do Guajiru, no caso a CAGECE, quanto ao entendimento do comportamento do cloro no sistema, mas, em geral, seus resultados podem auxiliar também, ainda que parcialmente, no estudo de redes de porte semelhante, uma vez que se espera que o decaimento do cloro se comporte de maneira similar. Além disso, este trabalho fornece uma base metodológica que pode ser seguida para estudos em outros sistemas.

Nesse contexto, é importante destacar que o trabalho foi bem sucedido também na modelagem da rede para o decaimento de cloro, uma vez que possibilitou a atribuição dos parâmetros de decaimento do cloro no seio do fluido (k_b) e na parede da tubulação (k_w) para cada trecho, de forma a permitir que as simulações da vazão em regime permanente e transiente propostas pudessem ser realizadas.

A partir das simulações conduzidas, foi possível perceber que o sistema, em ambos os cenários estudados apresenta um tempo de detenção de 8 horas até que apresente em toda a sua extensão concentrações significativas de cloro. Além disso, foi possível determinar que, para a rede do Guajiru em especial, após 16 horas de operação, o sistema apresenta um estado de equilíbrio no que se refere a concentrações de cloro nos nós quando operado em regime permanente. Paralelamente a isso, também foi possível definir que, para regime transiente, o sistema encontra seu equilíbrio após 9 horas de operação, a partir da qual as concentrações de cloro em cada nó passam a se repetir de 24 em 24 horas de forma a variar governado pelas variações de demandas de consumo na rede.

Além de entender o decaimento do cloro na rede, portanto, também foi possível interpretar pelas análises empregadas que há uma relação entre o regime permanente e o regime transiente, de forma que, para análises de decaimento de cloro, o emprego do regime permanente já se faz suficiente para visualizar o comportamento do cloro no sistema pela CAGECE.

Por fim, quanto a proposta de redução da aplicação de cloro na rede, este trabalho chegou a um valor ótimo de concentração de 1,40 mg/L de cloro o que significa uma redução de 30% nos gastos da entidade gestora nesse sentido, uma vez que o sistema manteve-se, ao longo de todas as 72 horas simuladas, dentro dos parâmetros de concentração estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Rogério de. **Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água com Base em Modelos de Otimização Não-Lineares**. 2001. 347 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos, Unicamp, Campinas, 2001.
- AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- BARREIRA, Gustavo Sales. **Modelagem e Simulação Hidráulica no Diagnóstico e Resolução de Problema em Rede no Guajiru, Caucaia**. 2017. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017
- BRANCO, S. M. **As águas e os microrganismos: amebas, bactérias e vírus**. Presença nas águas naturais, nas águas poluídas e nas águas residuárias. In: AZEVEDO NETTO, J. M (COORD). Desinfecção de águas, p 210. São Paulo: CETESB, 1974.
- BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria MS nº2914 de 12 de dezembro de 2011 (anexo XX da PRC-5 de 2017, do Ministério da Saúde). Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Secretaria de Vigilância em Saúde. Brasília/DF. 2011.
- CAGECE (Ceará). **Unidade de Negócio Bacia do Banabuiú**. 2014. Disponível em: <<http://abes-dn.org.br/pnqs/arquivos/rgs/2014-n1-cagece-banabuiu.pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2019.
- CLARK, R M et al. **Managing Water Quality in Distribution Systems: Minimizing Chemical and Microbial Risk**. In: ANNUAL CONFERENCE AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1993. p. 1 - 106.
- CLARK, R., SIVAGANESAN M. **Predicting Chlorine Residuals in Drinking Water: second order model**. Journal of water resources planning and management, 2002. 128:152-160.
- DACACH, R. M. **Sistemas Urbanos de Água**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A., 1975. 389p.
- DI BERNADO L, DI BERNADO A. **Métodos e técnica de tratamento de água**. 2 ed. São Carlos.: RIMA. P 1152-1312, 2005.
- FIGUEIREDO, Manuel Duarte. **Modelação do Decaimento de Cloro em Sistemas de Abastecimento de Água**. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Técnico Lisboa, Liisboa, 2014.
- HALLAM, N. B. et al. **The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems**. Wat. Res., 2002
- HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2010.

MADZIVHANDILA, Vhutshilo; CHIRWA, Evans M.n.. Modeling chlorine decay in drinking water distribution systems using aquasim. **Chemical Engineering Transactions**, [s.l.], v. 57, p.1111-1116, maio 2017. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1757186>.

OLIVEIRA, Luciano de. **Decaimento da Concentração de Cloro Residual Livre nas Redes de Abastecimento de Água**. 2018. 347 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFG, Goiânia, 2018.

OZDEMIR, Osman N.; BUYRUK, Tarik. **Effect of Travel Time and Temperature on Chlorine Bulk Decay in Water Supply Pipes**. Journal Of Environmental Engineering, [s.l.], v. 144, n. 3, mar. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001321](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001321).

PEREIRA, Rejane Felix. **Calibração do Coeficiente de Decaimento do Cloro (kw) em Redes de Abastecimento de Água Utilizando o Método Interativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA)**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PIEREZAN, M. L.. **Monitoramento contínuo do residual do cloro em sistemas de distribuição de água para abastecimento**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Paulo: Eesc Usp, 2006.
POWELL, J.C. et al. **Factors wich control bulk chlorine decay rates**, Water Res, J.. v.34, n.1, p. 117-126. 2000.

RICHTER, Carlos A.. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

ROSSIN, A. C. **Desinfecção**. In: Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água (Tratamento de Água), Vol.2, São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1987.

ROSSMAN, L.A. **The Epanet programmers toolkit**, In: PROCEEDINGS OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT DIVISION ANNUAL SPECIALITY CONFERENCE. Tempe, Arizona, 2000.

ROSSMAN, Lewis A. et al. **Modeling Chlorine Residuals in Drinking-water Distribution Systems**. Journal Of Environmental Engineering, vol. 120, p. 803-820. ago. 1994.

SALGADO, Sérgio Ricardo Toledo. **Estudos dos Parâmetros do Decaimento do Cloro Residual em Sistema de Distribuição de Água Tratada Considerando Vazamento**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SEKHAR, M.. **Disifecion by-product formation in the water distribution system of Morehead, Kentucky**. 2001. 1 f. Dissertação (Mestrado) - University Of Cincinnati, Cincinnati, 2001.

SEROA DA MOTTA, R.: REZENDE, L. **The impact of sanitation on waterborne diseases in Brazil**. In: MAY, P.H., (Ed.). Natural resource valuation and policy in Brazil: methods and cases. Columbia University Press, 1999

SILVA, George Antonio Belmino da. **Decaimento de Cloro Residual Livre em Reservatório de Distribuição de Água da Cidade de Campina Grande - PB**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Ufmg, 2005.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – 4ª edição – São Paulo, 2006.
WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Disinfectants and disinfectant by-product**. Geneva, (Environmental health criteria 216), 2004.

ZHANG, C. et al. Effect of pipe materials on chlorine decay, trihalomethanes formation, and bacterial communities in pilot-scale water distribution systems. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.85-94, 19 nov. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-016-1104-2>

**ANEXO A – CALCULO DO FATOR k_w DE DECAIMENTO DE CLORO POR
TRECHO DA REDE DO GUAJIRU**

TUBULAÇÃO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE	F	kw	kw/2
1	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
2	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
3	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
4	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
5	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
6	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
7	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
8	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
9	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
10	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
11	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
12	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
13	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
14	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
15	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
16	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
17	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
18	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
19	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
20	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
21	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
22	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
23	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
24	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
25	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
26	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
27	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
28	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
29	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
30	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
31	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
32	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
33	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
34	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
35	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
36	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
37	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
38	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
39	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
40	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
41	100	0,0015	1,5	0,311	0,155

42	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
43	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
44	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
45	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
46	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
47	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
48	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
49	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
50	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
51	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
52	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
53	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
54	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
55	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
56	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
57	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
58	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
59	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
60	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
61	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
62	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
63	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
64	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
65	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
66	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
67	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
68	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
69	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
70	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
71	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
72	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
73	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
74	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
76	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
78	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
79	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
80	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
81	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
82	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
83	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
84	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
85	32	0,0015	1,5	0,3465	0,173
86	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
87	32	0,0015	1,5	0,3465	0,173
88	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
89	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166

90	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
91	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
92	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
93	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
94	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
95	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
96	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
97	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
98	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
99	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
100	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
101	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
102	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
103	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
104	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
105	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
106	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
107	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
108	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
109	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
110	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
111	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
112	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
113	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
114	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
115	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
116	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
117	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
118	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
119	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
120	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
121	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
122	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
123	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
124	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
125	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
126	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
127	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
128	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
129	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
130	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
131	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
132	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
133	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
134	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
135	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160

136	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
137	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
138	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
139	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
140	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
141	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
142	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
143	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
144	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
145	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
146	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
147	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
148	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
149	75	0,0015	1,5	0,3192	0,160
150	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
151	100	0,0015	1,5	0,311	0,155
152	50	0,0015	1,5	0,3316	0,166
153	100	0,000001	1,5	0,1875	0,094

Fonte: (Desenvolvido pelo autor, 2019).