



9591 - MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA DETERMINAÇÃO DE PONTOS IDEAIS DE RECLORAÇÃO PELO ÍNDICE DE DECAIMENTO DE CLORO

Lucas Costa Barreto⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas.

Wanderson da Silva⁽²⁾

Supervisor de Gestão de Perdas, Companhia de Saneamento de Alagoas.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Menino Marcelo, N^o 140 Bloco 06 Apt 807 – Cidade Universitária - Maceió - Alagoas - CEP: 57073-470 - Brasil - Tel: +55 (82) 99909-7378 - e-mail: lucascosta_108@hotmail.com.

RESUMO

O cloro é introduzido no processo de tratamento de água objetivando efetuar o controle microbiológico da água ao longo dos sistemas de distribuição, sendo consumido constantemente ao reagir com matérias orgânicas e inorgânicas presentes nas redes de distribuição de água, diminuindo assim os riscos patogênicos e garantindo que a mesma chegue aos consumidores dentro dos padrões de qualidade exigidos pela legislação atual, a qual determina que a concentração residual de cloro no sistema deve ser mantida entre 0,2 e 2,0 ppm (mg/L). Desta forma, o acompanhamento da concentração do cloro residual livre ao longo das redes é extremamente importante, sendo a modelagem e simulação das redes bastante utilizada para esse fim. Sendo assim, neste trabalho realizou-se a modelagem e simulação de um sistema de distribuição de água real sob gerenciamento da Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) utilizando o *software* de simulação hidráulica EPANET 2 (LENHS), objetivando o acompanhamento da concentração de cloro residual ao longo do sistema de distribuição de água, identificando áreas com baixa concentração de cloro e avaliando através da simulação de possíveis pontos de recloração na rede se a concentração pode ser corrigida a níveis aceitáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Cloro Residual Livre, Simulação, EPANET.

1. INTRODUÇÃO

O cloro em suas diversas formas é o desinfetante mais utilizado nas Estações de Tratamento (ETA's), e tem papel fundamental no controle microbiológico da água, já que esse reage com a matéria orgânica e os agentes microbiológicos patogênicos, evitando a manifestação de doenças relativas ao consumo de água contaminada (Junqueira, 2010). Para garantir a desinfecção da água ao longo das tubulações dos sistemas de distribuição, o ministério da saúde brasileiro estabelece através da Portaria de consolidação n^o 5 uma concentração de cloro residual livre, mínima e obrigatória de 0,2 ppm (mg/L) e máxima de até 2,0 ppm, em qualquer ponto da rede.

A manutenção de uma concentração residual de cloro na rede visa garantir a não existência de microrganismos patogênicos, os quais podem estar presentes nas paredes das tubulações. Sendo o cloro uma espécie química não conservativa, a sua concentração decai à medida que a água escoar ao longo da rede, fazendo com que a água que chega até o consumidor, não apresente a mesma qualidade (concentração de cloro) do que aquela a qual flui das ETA's e reservatórios (Salgado, 2008; Silva & Kish, 2003). Sendo assim, as companhias de saneamento usualmente promovem uma superdosagem de cloro na saída das ETA's (elevando a concentração) para garantir uma conservação de cloro residual livre, fazendo verificações contínuas para evitar concentrações maiores do que as permitidas pela legislação vigente (Gomes et al., 2007).

Neste contexto, a modelagem matemática aplicada a sistemas de abastecimento de água, através da utilização de ferramentas de simulação e análise de sistemas, é uma das técnicas que vem sendo adotadas no setor de saneamento, já que a verificação em campo de todos os pontos da rede se torna inviável tanto operacionalmente quanto economicamente (Leal, 2012; Salgado, 2008). Segundo Leal 2012, a utilização de técnicas computacionais de simulação hidráulica e de qualidade de água, fornece um conhecimento importante sobre a dinâmica do processo de decaimento de cloro nas redes de tubulações, possibilitando a identificação eficaz de pontos problemáticos nessas redes.

Desta forma, neste trabalho realizou-se a modelagem e simulação de um subsistema de distribuição de água da cidade de Maceió - AL, sob gerenciamento da Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL), objetivando um maior entendimento do processo de decaimento da concentração de cloro residual livre, através da



determinação do comportamento cinético (relativo à constante de decaimento no seio do líquido k_b) para alguns trechos da rede avaliada; efetuando a identificação de áreas potencialmente críticas relacionadas à baixa concentração de cloro e evidenciando a criação de possíveis pontos de recloração ao longo da rede de distribuição, visando restabelecer a concentração de cloro residual livre nos pontos críticos detectados. Para isso, utilizou-se o software de simulação hidráulica EPANET 2.

2. OBJETIVO

2.1 GERAL

Modelagem e simulação de um subsistema de distribuição de água em Maceió – AL, visando a determinação de possíveis postos de recloração ao longo da rede estudada.

2.2 ESPECÍFICOS

- Acompanhamento da concentração de cloro residual livre;
- Identificação de pontos problemáticos na rede;
- Simular possíveis pontos de recloração ao longo da rede (correção da concentração);
- Estabelecer unidades de dosagem de cloro à montante dos pontos críticos;

3. METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho foi realizado o estudo de um subsistema que faz parte do sistema de abastecimento do município de Maceió – AL, sob gerenciamento da Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL). A área de estudo analisada neste trabalho está localizada no bairro do Prado, parte baixa da cidade de Maceió – AL, caracterizado pela CASAL como Distrito de Medição e Controle (DMC) 116 (zona de pressão), a qual é alimentada pelo reservatório R-2 localizado no bairro Farol. A Figura 1 mostra área de estudo analisada neste trabalho. Vale que rede sofreu recentemente algumas alterações hidráulicas, denotadas por capeamento de alguns trechos.



Figura 1 – DMC 116 no bairro do Prado Maceió - AL



3.2 EPANET 2

O EPANET é uma ferramenta computacional desenvolvida com o objetivo de fornecer informações analíticas de sistemas de distribuição, através de simulações estáticas e dinâmicas relativas ao desempenho hidráulico e de qualidade de água nos sistemas de abastecimento de água. O objetivo principal do EPANET é aprimorar o conhecimento das características operacionais inerentes ao processo de distribuição de água, através de um ambiente virtual possibilitando estudos operacionais sob diferentes condições, sem que haja necessidade de modificação no processo real. Sendo assim, o EPANET permite ao usuário obter informações importantes do sistema como a pressão em cada junção entre tubulações, ou ainda a avaliação e acompanhamento da concentração de compostos químicos ao longo da rede como, por exemplo, o cloro residual livre (Rossman, 2000).

3.3 MODELAGEM DA REDE

Para realização da simulação, fez-se necessário efetuar uma representação do sistema através de modelos geográficos, os quais são capazes de agrupar as informações físicas inerentes ao sistema (topografia, comprimentos e diâmetros de tubulações, coeficientes de rugosidade, consumos nos nós, níveis dos reservatórios, etc). A Figura 2 ilustra a representação do sistema avaliado neste trabalho no ambiente do software EPANET, com a identificação dos respectivos nós (junções entre tubulações).

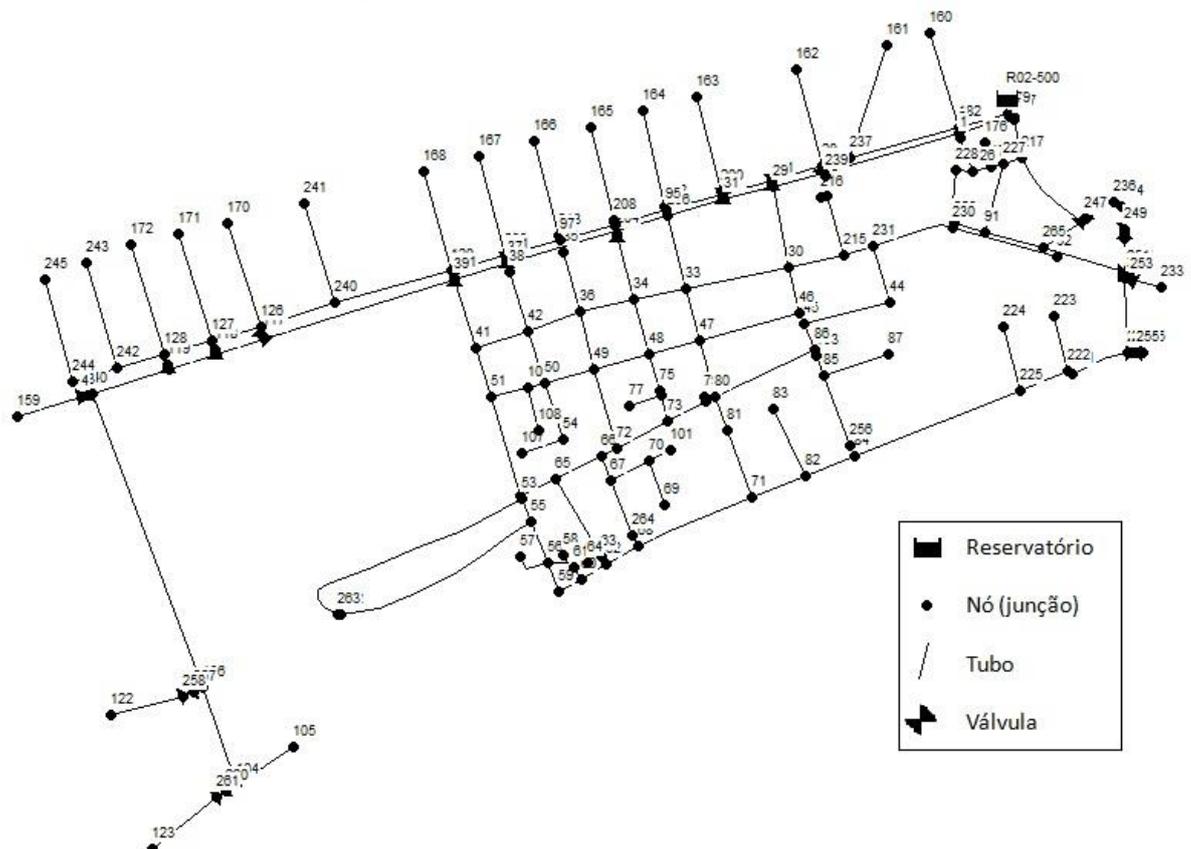


Figura 2 – Geomodelagem da rede de distribuição.

A modelagem da rede representada na Figura 2 foi realizada no ambiente do software QGIS 2.8.9, posteriormente efetuou-se exportação de todas as informações contidas na rede para o ambiente do EPANET 2, para isso, foi necessário a criação de um arquivo INP (tipo de arquivo suportado pelo EPANET 2. Desta forma todos os dados de entrada necessário para o desenvolvimento do modelo de simulação hidráulica e de qualidade de água foram exportados para o EPANET 2, os elementos contidos nessa rede e suas respectivas informações são (Gomes et al, 2007):

- nós (consumos, cotas topográficas e padrões de demanda);
- reservatórios de nível fixo (carga hidráulica total);



- tubulações (comprimento, diâmetro, coeficientes de rugosidade, estado (aberta, fechada ou contendo válvulas de retenção);
- coeficientes cinéticos de reação;
- válvulas (diâmetro, tipo de válvula e parâmetro de controle).

3.4 DETERMINAÇÃO DE (k_b) PARA ALGUNS TRECHOS DA REDE

Para que a simulação de qualidade de água possa ser bem sucedida e forneça resultados semelhantes ao comportamento real do sistema, faz-se necessária a realização de um estudo cinético do decaimento, a fim de determinar a constante cinética de decaimento no seio do líquido (k_b) e ordem de reação. Como referido anteriormente, a rede estudada passou por algumas modificações hidráulicas. Desta forma, faz-se necessária uma a determinação do comportamento cinético em alguns trechos da rede. Sendo assim, seguindo semelhantemente conforme a metodologia utilizada por Silva e Kish 2003 e Santos 2017, que utilizaram um procedimento comunmente denominado de “teste de garrafa” (*bottle test*), o qual consiste na coleta de amostras de água ao longo da rede de abastecimento analisada, armazenando-as em garrafas protegidas da luz solar e sob temperatura ambiente, realizando a determinação da concentração de cloro residual livre em intervalos de tempo pré-definidos (Santos, 2017).

A metodologia de coleta para a realização desse teste não tem um roteiro de execução bem definido, desta forma, tendo como referência os experimentos realizados por Santos 2017, Vieira 2013 e Silva & Kish 2003, o procedimento realizado neste trabalho seguiu conforme mostrado na Figura 3.

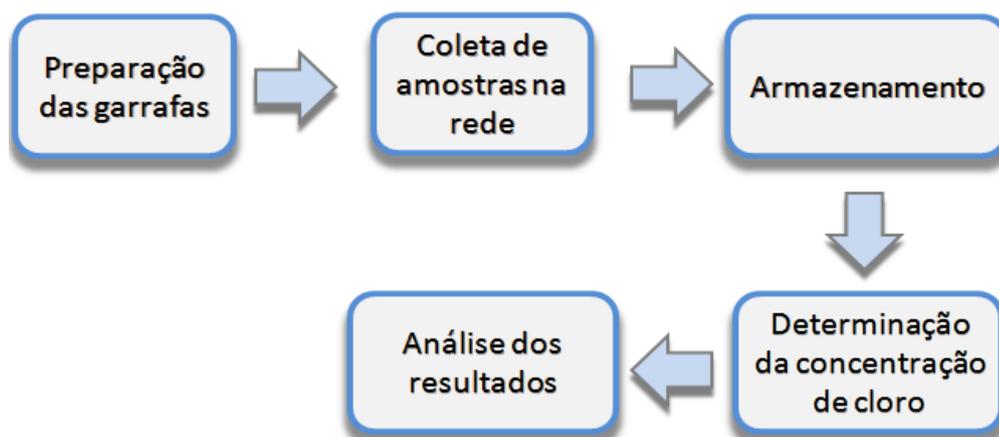


Figura 3 – Metodologia utilizada para determinar a constante k_b .

Sendo assim, foram coletadas amostras de água em 12 pontos da DMC 116, registrando o horário, bem como realizando uma medição do cloro residual livre, da temperatura e do pH no momento da coleta. Posteriormente as amostras foram conduzidas para o laboratório de análise da Estação de Tratamento Pratygy. Dentre as 12 amostras coletadas em campo, três foram selecionadas para a realização do estudo cinético. O critério utilizado para escolha das amostras foi a observação daquelas que registraram as maiores concentrações de cloro residual livre no momento da coleta em campo, pois essas possibilitam a aquisição de mais pontos relacionando tempo e concentração residual, antes que a concentração chegasse a zero.

Para efetuar o estudo da cinética de decaimento, realizou-se a leitura da concentração de cloro em intervalos de tempo de aproximadamente uma hora em cada uma das amostras selecionadas, sendo que a primeira determinação da concentração de cloro foi realizada no momento da coleta. Para a determinação da concentração de cloro residual livre nas amostras, foi utilizado o método colorimétrico DPD. Quando adicionado a uma amostra que possui cloro residual livre, o DPD reage conferindo a solução uma coloração rósea (denotando a presença de cloro), sendo assim as amostras foram colocadas em um medidor de cloro modelo Aquacolor, o qual faz a leitura e fornece diretamente a concentração de cloro na amostra em ppm(mg/L). A Figura 4 mostra uma das amostras analisadas e o aparelho utilizado.



Figura 4 – Método de coloração DPD.

Para determinação da constante de decaimento no seio do líquido (k_b), considerou-se uma cinética de primeira ordem conforme a Equação 1, desta forma a equação da taxa de reação é dada por (Neves, 2016; Vieira, 2013; Pierezan 2009):

$$\frac{dC}{dt} = k_b C \quad \text{equação (1)}$$

Na qual C representa a concentração de cloro. Integrando de C_0 (concentração inicial) a C (concentração no tempo t qualquer), obtemos a seguinte equação:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = k_b t \quad \text{equação (2)}$$

Desta forma a Equação 2 é uma reta a qual o coeficiente angular é o valor da constante de decaimento no seio do líquido k_b . Sendo assim, foi plotado o gráfico de $\ln(C/C_0)$ vs tempo (h) para as amostras 1, 2 e 3. Os resultados são mostrados nos Gráficos 1 a 3.

3.5 SIMULAÇÃO

Para a simulação foi considerado um tempo total de simulação de 240 horas e intervalo de cálculo na simulação hidráulica e de qualidade de água de 5 segundos, pois segundo Nascimento et al. 2016, a utilização de intervalos de tempo iguais para a simulação hidráulica e de qualidade de água propicia a aquisição de melhores resultados. A simulação foi realizada considerando dois cenários. Inicialmente, no primeiro cenário avaliou-se o comportamento da concentração de cloro residual livre ao longo da rede, detectando áreas as quais apresentavam concentrações baixas (pontos críticos), de acordo com o cenário atual observado em campo. Posteriormente foram determinados possíveis pontos de recloração a jusante dos pontos críticos observados, objetivando verificar se o problema da baixa concentração poderia ser mitigado com a instalação desses pontos de recloração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DO DECAIMENTO DE CLORO EM LABORATÓRIO

A Tabela 1 apresenta os resultados referente as análises de cloro residual, pH e temperatura observadas na DMC 116.



Tabela 1 – Observações realizadas em campo.

Ponto	Co (ppm)	T (°C)	pH	Observações
1	0,23	27,2	4,6 + (0,9)	Cemitério 09:35 h
2	0,66	27,6	4,1 + (0,9)	Cond. Vergas n° 57 (09:55h) – Rua Sargento Jayme Pantaleão
3	0,93	27,5	3,4 + (0,9)	Residência n° 226 (10:15h) – Rua Sargento Jayme Pantaleão
4	0,2	29,3	3,6 + (0,9)	Residência n° 787 (10:27h) – Rua João com Álvaro Marinho
5	0,78	27,8	3,6 + (0,9)	Residência n° 252 (10:35h) – Rua João Lício Marquês
6	0,32	28,7	3,6 + (0,9)	Residência n° 888 (10:50h) – Rua Edgar de Goes Monteiro
7	0,76	28,3	3,6 + (0,9)	Bar do Marechal (11:20) – Rua Sargento Jayme Pantaleão

Ao observarmos a concentração de cloro residual aferida no momento da coleta, podemos perceber que cerca todos os pontos apresentaram concentração de cloro dentro daquela especificada pela Portaria de consolidação n° 05 de 2017 (entre 0,20 e 2,0 ppm). Todavia, faz-se necessária uma análise confirmativa, a fim de investigar a pontualidade do comportamento observado, já que alguns pontos apresentaram concentração muito próxima da mínima. Além disso, a análise microbiológica também se faz necessária, a fim de investigar a ocorrência de possíveis pontos de contaminação, os quais podem ser responsáveis pela baixa concentração de cloro residual livre nesses pontos. Vale salientar também que no dia da coleta o tempo estava chuvoso, logo possivelmente há um aumento da demanda orgânica na água, dessa forma propicia a ocorrência de concentração mais baixa em alguns pontos.

Podemos observar a partir dos resultados apresentados na Tabela 1 que o pH apresentou um valor baixo na maior parte das amostras (3,6) denotando que a água que é distribuída nessa região apresenta uma característica ácida, denotando uma possível inconformidade com a legislação. Entretanto após verificação da calibração do pHmetro utilizado em campo, verificou-se que o mesmo apresenta um erro de leitura de até 0,9. Sendo assim, o pH das amostras coletadas estão em um intervalo de aproximadamente 4,1 até 5,5, faixa que ainda está abaixo da permitida pela Portaria de consolidação n° 05, a qual recomenda que o pH da água em sistemas de distribuição seja mantido entre 6,0 e 9,5. Sobretudo podemos dizer que a análise de pH foi inconclusiva, sendo assim, essa deve ser repetida já que o equipamento utilizado para aferição no momento da coleta apresentava uma má calibração. A aferição da temperatura mensurada no momento da coleta denotou que a água estava à temperatura ambiente, variando entre 26,8 °C a 29,3° a depender do local coletado e do horário da coleta.

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os resultados obtidos após as análises de cloro residual livre (CRL), realizadas no Laboratório da Estação de Tratamento Pratygy em Maceió - AL. Vale ressaltar que no momento da coleta em campo, foi efetuada a primeira análise de CRL (tempo zero) e posteriormente no laboratório as análises subsequentes foram realizadas em um intervalo de aproximadamente uma hora.

Tabela 2 – Resultados da amostra 1.

Amostra 1: Residência n° 226; Rua Sargente Jaime Pantaleão				
Horário	Tempo(h)	C (ppm)	ln(C/Co)	T (°C)
10:15	0	0,93	0	27,5
12:48	2,55	0,62	-0,40547	26,1
13:48	3,55	0,5	-0,62058	24,5
14:48	4,55	0,55	-0,52527	23,7



14:52	4,62	0,52	-0,58136	23,7
15:48	5,55	0,5	-0,62058	23,3
16:48	6,55	0,36	-0,94908	23,3
17:30	7,25	0,31	-1,09861	23,3

Tabela 3 – Resultados da amostra 2.

Amostra 2: Residência n° 252; Rua João Lício Marquês				
Horário	Tempo(h)	C (ppm)	ln(C/C₀)	T (°C)
10:35	0	0,78	0	27,8
13:00	2,42	0,62	-0,22957	25,6
13:55	3,33	0,54	-0,36772	24,4
14:55	4,33	0,49	-0,46489	23,3
16:57	6,32	0,38	-0,71912	23,1

Tabela 4 – Resultados da amostra 3.

Amostra 3: Bar Marechal; Rua Sargento Jayme Pantaleão				
Horário	Tempo(h)	C (ppm)	ln(C/C₀)	T (°C)
11:20	0	0,76	0	28,3
13:12	1,87	0,48	-0,45953	25,1
14:12	2,87	0,47	-0,48059	24,1
15:12	3,87	0,46	-0,50209	23,3
17:11	5,85	0,36	-0,74721	23,1

O valor da constante cinética é afetado pela temperatura, já que k_b é uma função de T (temperatura). Desta forma, a temperatura foi mensurada ao longo das análises de modo que não foi observada uma variação tão significativa, denotando uma variação de no máximo 5,2 °C (Amostra 3). No geral a temperatura das amostras se manteve em torno de 23° C no momento das análises em laboratório, podendo assim ser considerada aproximadamente constante para realização do estudo cinético. Vale ressaltar que a variação nos valores de temperatura são semelhantes aos obtidos por Leal 2012 em seu estudo cinético. Os Gráficos 1 a 3 mostram o comportamento cinético de primeira ordem observado a partir das análises realizadas em laboratório.

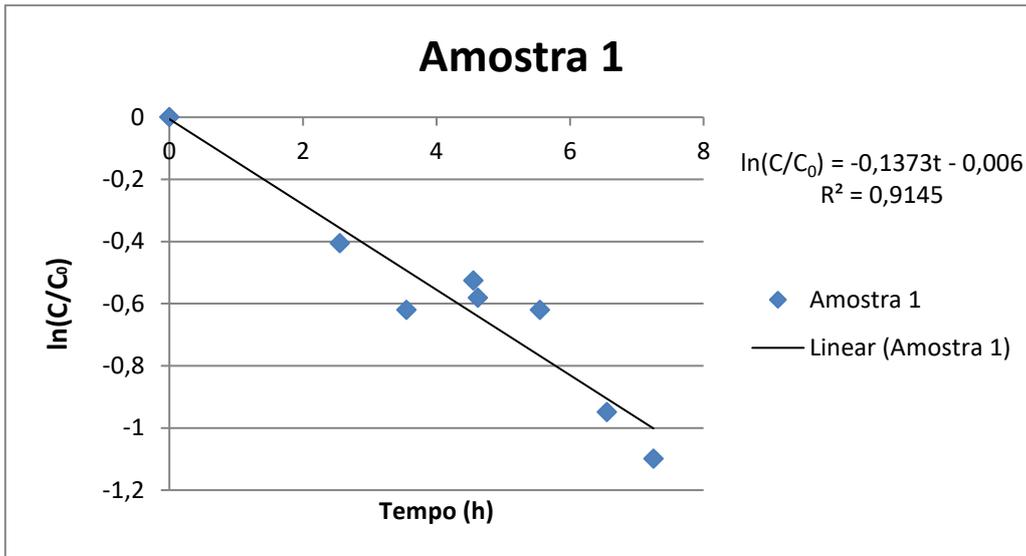


Gráfico 1 – Cinética de decaimento da amostra 1.

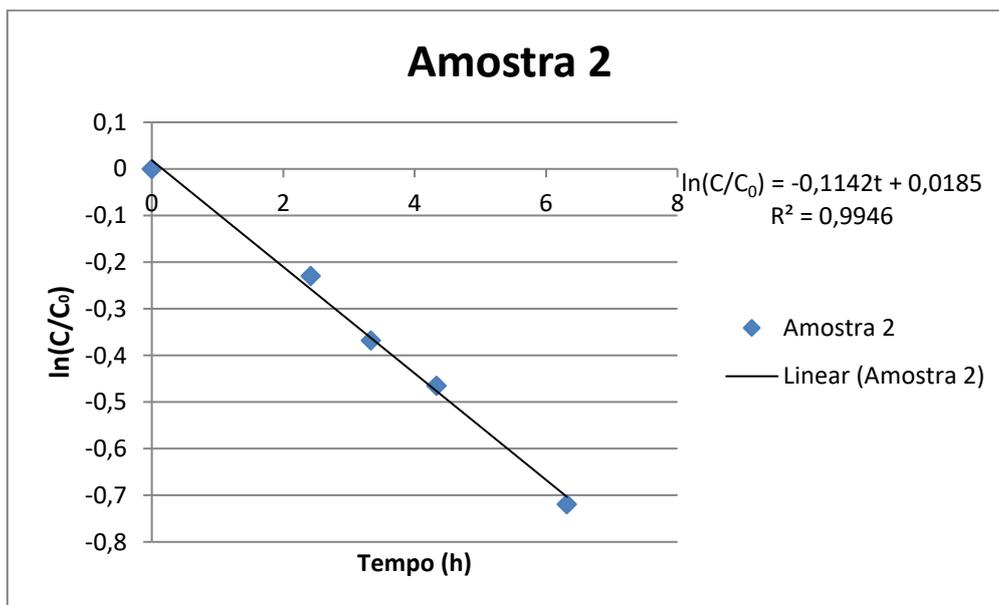


Gráfico 2 – Cinética de decaimento amostra 2.

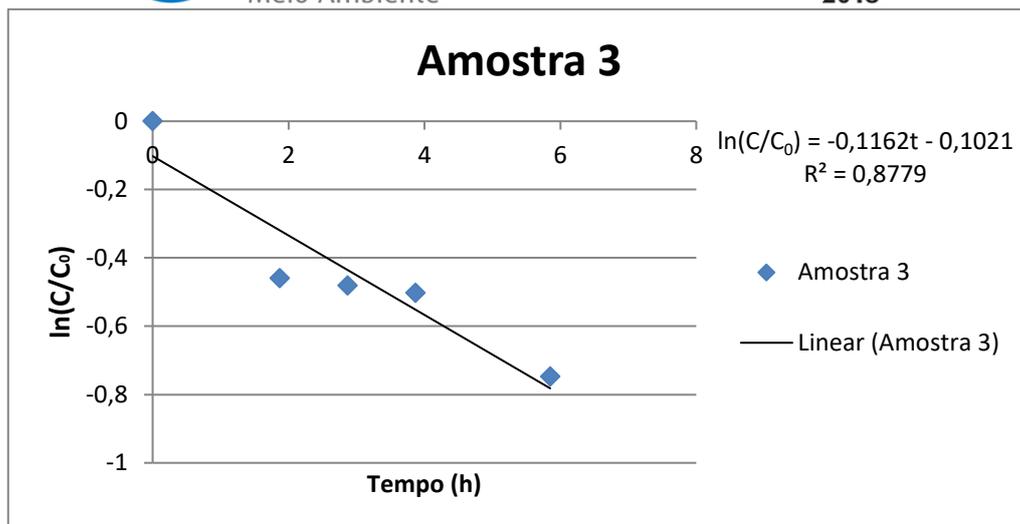


Gráfico 3 – Cinética de decaimento amostra 3.

Ao observarmos os resultados mostrados nos Gráficos 1,2 e 3, podemos perceber que os dados coletados se ajustaram bem ao modelo cinético de primeira ordem proposto, evidenciando o coeficiente de determinação (R^2) da amostra 2 o qual foi de 0,9946. Desta forma, calculou-se a média dos valores de k_b (coeficientes angulares das retas) convertidos para dia^{-1} , obtidos para as 3 amostras analisadas, bem como, efetuou-se o cálculo do desvio médio e desvio padrão. Os resultados são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise estatística básica dos resultados obtidos

Amostra	$k_b(\text{dia}^{-1})$	R^2	Média	Desvio Médio	Desvio Padrão	IC
1	-3,2952	0,9145	-2,9416	0,235733	0,307166	0,2668
2	-2,7408	0,9946				
3	-2,7888	0,8779				

Para um intervalo de confiança de 95%, o valor de k_b pode ser assumido em um intervalo que varia de $-2,6748 \text{ d}^{-1}$ e $-3,2084 \text{ d}^{-1}$. O desvio padrão calculado para esse conjunto de amostras foi consideravelmente pequeno considerando um estudo preliminar, sendo assim, para a simulação escolheu-se utilizar o valor médio de k_b obtido, já que esse valor é significativo para as amostras analisadas. Vale ressaltar que os resultados obtidos para o valor de k_b se encontram dentro do intervalo evidenciado por Santos 2017 e Leal 2012. Desta forma, para a simulação de qualidade de água considerou-se uma reação de primeira ordem no seio do líquido, com uma constante de decaimento de $-2,9416 \text{ d}^{-1}$. A reação nas paredes da tubulação foi considerada também de primeira ordem, com uma constante cinética (k_w) de $-1,5 \text{ d}^{-1}$ (Rossman, 2000), a qual se ajustou bem aos dados analisados neste trabalho.

5.2 SIMULAÇÃO DE QUALIDADE DE ÁGUA NO EPANET 2

Após a inserção dos dados referentes às reações cinéticas, foram realizadas as simulações de qualidade de água. Considerou-se dois cenários e em ambos a concentração de cloro residual livre no reservatório (R-2) que abastece a rede analisada foi fixada em $1,54 \text{ mg/L}$, a qual foi determinada em campo. No primeiro cenário simulado, observou-se os nós que apresentavam concentração de cloro residual livre (CRL) abaixo da mínima permitida pela legislação ($0,2 \text{ mg/L}$), analisando especificamente esses nós a partir de séries temporais. Posteriormente no segundo cenário, foram determinados possíveis pontos de recloração próximos aos nós que apresentavam concentração crítica, verificando se o problema era mitigado.

5.2.1 PRIMEIRO CENÁRIO



Após efetuar a simulação, observou-se que de modo geral os pontos mais próximos ao reservatório apresentaram uma concentração de cloro residual livre dentro da faixa estabelecida pela legislação (0,2 – 2,0 mg/L), sendo que a concentração diminuía gradativamente em pontos mais distantes do reservatório, chegando a computar concentrações cerca de 50% abaixo do valor permitido pela Portaria de consolidação nº 05 (antiga 2914/2011). A Figura 5 mostra uma comparação entre três nós de diferentes distâncias do reservatório, o nó 182 é o mais próximo ao reservatório e nó 40 o mais distante entre os três nós.

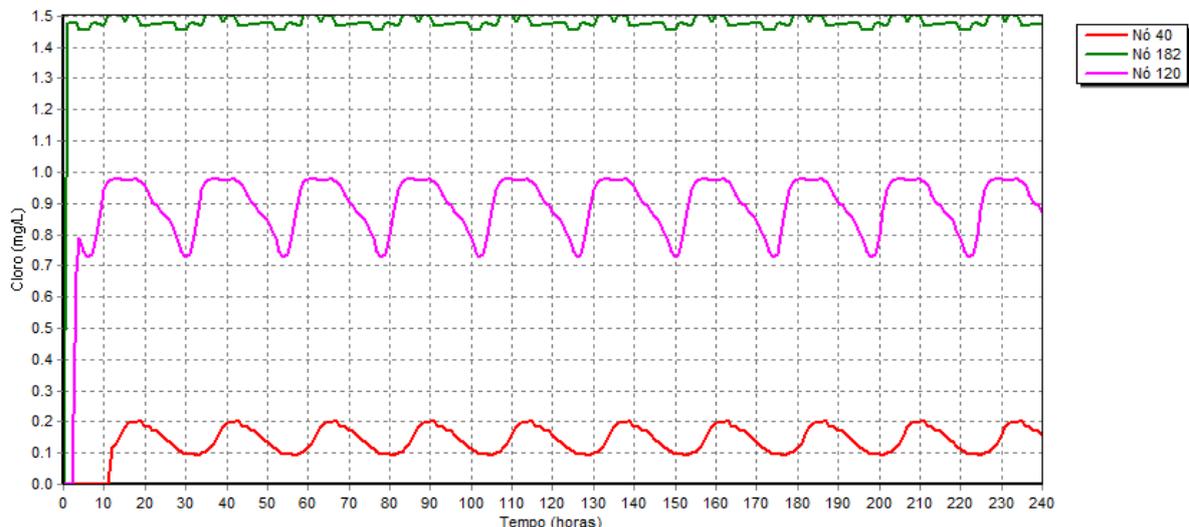


Figura 5 – Comparação da concentração de cloro residual livre em diferentes nós.

Desta forma fica evidenciado que os pontos mais distantes do reservatório sofrem um maior efeito da degradação do cloro residual livre (CRL). Sendo assim, a concentração de CRL na água que chega até os pontos mais distantes da rede é muito menor do que aquela que deixa o reservatório. Concentrações de CRL abaixo da permitida pela legislação também foram evidenciadas em outros nós do sistema em determinados horários da simulação, sendo mais críticas nos nós: 40, 104, 105, 225. A Figura 6 mostra a variação da concentração de cloro em três desses nós ao longo do tempo de simulação.

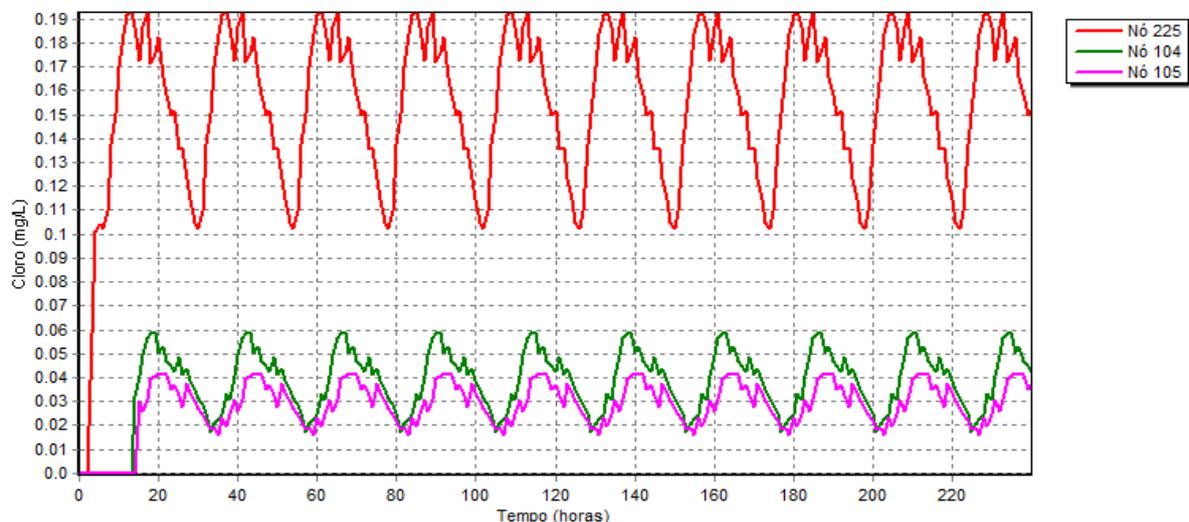


Figura 6 – Nós com concentração de CRL abaixo da permitida pela legislação.

As primeiras horas da simulação nas quais a concentração de CRL computada nos nós pode ser desconsiderada, visto que neste horário simulado é como se a água ainda não tivesse chegado a esses nós. Ainda assim, na maior parte do tempo de simulação esses, nós apresentaram concentração de CRL muito baixa, chegando a computar uma concentração cerca de dez vezes menor do que a permitida pela legislação vigente, evidenciando a necessidade da criação de pontos de recloração a montante, de modo a promover um reforço na concentração de cloro residual livre e garantindo que essa atinja valores estabelecidos pela Portaria de consolidação nº 05.



Vale ressaltar que o cenário avaliado neste trabalho é hipotético, já que faz-se necessária a coleta de dados em campo para confirmação dos resultados simulados e validação do modelo apresentado.

5.2.2 SEGUNDO CENÁRIO

A partir da verificação das zonas críticas quanto à concentração de cloro residual na rede, estabeleceu-se a criação de pontos de recloração em nós que se encontravam a montante daqueles que apresentavam o problema, de modo que o reforço na concentração de CRL pudesse contemplar uma maior quantidade de pontos a jusante do escoamento. Para a criação desses pontos, selecionou-se o nó desejado e através da opção “Origem de Qualidade”, selecionou-se a opção “Reforço de concentração”, determinando a concentração do reforço de modo que essa não ultrapassasse o limite superior estabelecido pela Portaria de consolidação nº 5 o qual é de 2,0 ppm de cloro, sendo utilizado o mesmo padrão de consumo validado na simulação hidráulica. A Figura 7 mostra a edição realizada.

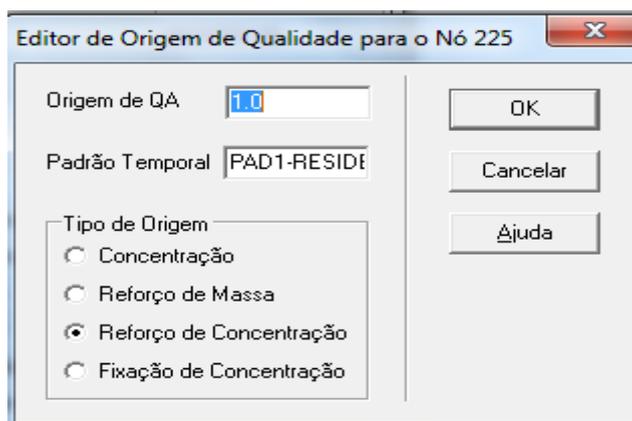


Figura 7 – Criação de ponto de recloração no nó 225.

Foram simulados 6 possíveis pontos de recloração, fazendo um reforço na concentração de CRL de modo que os nós a jusante apresentassem uma concentração dentro dos parâmetros exigidos pela Portaria de consolidação nº 05. A Tabela 6 mostra os nós que receberam reforço na concentração (ponto de recloração) bem como o valor de concentração de CRL fixado.

Tabela 6 – Pontos de recloração.

Ponto de Re-cloração	CRL (mg/L)
106	1.0
50	1.3
53	1.4
217	1.5
84	1.5
37	1.5

De modo geral a instalação dos pontos de recloração possibilitou o aumento da concentração de CRL nos nós que apresentavam concentração crítica, possibilitando a manutenção da concentração segundo os parâmetros exigidos pela legislação vigente. Silva & Kish 2003, estudaram também o efeito da recloração ao longo das redes de distribuição e relataram uma melhora na concentração de cloro ao longo da rede de distribuição analisada em seu trabalho. A Figura 8 mostra a variação da concentração de CRL ao longo do tempo de simulação nos nós 104, 105 e 225 após a adição dos pontos de recloração.

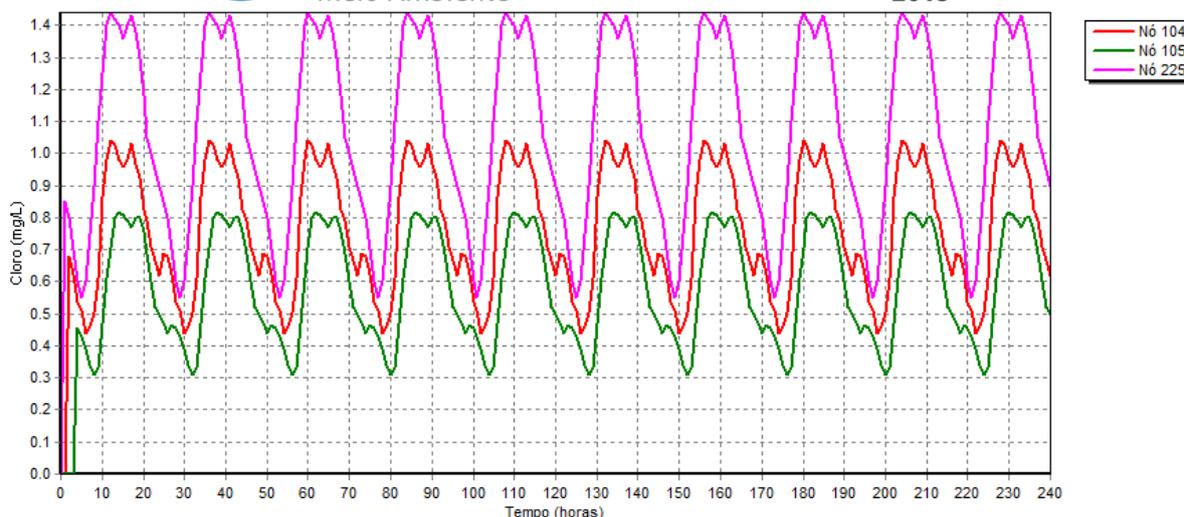


Figura 8 – Concentração de CRL após adição de pontos de recloração.

O comportamento apresentado no gráfico mostrado na Figura 8 evidencia que a instalação de pontos de recloração foi efetiva, visto que os nós que anteriormente apresentavam concentração crítica tiveram as suas concentrações corrigidas. Além disso, a concentração fixada nos pontos de recloração foi suficiente para a correção da concentração de CRL nos nós a jusante do escoamento, sem que a concentração de CRL nos nós que receberam os pontos de recloração se elevasse a níveis acima de 2,0 ppm de cloro, evidenciando uma conformidade com a Portaria de consolidação nº 05.

Entretanto, para que as casas de cloração possam ser instaladas na prática, é necessário a realização de outros estudos, buscando verificar o tipo de cloração a qual será realizada, se por gotejamento com cloro líquido, ou ainda por saturação com cloro em pastilha, por exemplo, analisando a demanda de cloro a qual será necessária para que a concentração possa ser mantida de acordo com aquelas estabelecidas nesse estudo (Tabela 6). Desta forma, analisar o custo da implementação das casas de cloração, buscando otimizar a instalação de modo a resolver o problema das áreas críticas utilizando a menor demanda possível de cloro.

6. CONCLUSÃO

Através da realização deste trabalho foi possível perceber que o processo de decaimento de cloro residual livre ao longo das redes de distribuição é bastante complexo, visto que envolve o estudo de reações químicas de comportamento cinético extremamente variável ao longo da rede, dependendo fortemente das condições físicas e químicas dos sistemas de distribuição, os quais muitas vezes podem não ser totalmente conhecidos e mensuráveis facilmente. Desta forma, a modelagem e simulação é uma estratégia promissora para auxiliar a operação e gerenciamento das redes de distribuição.

Os resultados obtidos em relação ao comportamento cinético no seio do líquido foram satisfatórios de forma preliminar, já que apresentou valores da constante cinética k_b bem próximo aos reportados na literatura, em estudos de redes de distribuição de sistemas semelhantes ao estudado neste trabalho. Entretanto, faz-se necessário a realização de estudos confirmativos, realizando campanhas de campo para a aquisição de uma quantidade maior de dados referentes à concentração de cloro residual livre ao longo da rede, propiciando uma melhor calibração do modelo. Além disso, para estudos posteriores será buscado o desenvolvimento de uma estratégia robusta de calibração da constante de decaimento na parede dos tubos k_w , pautada na implementação de algoritmos em linguagem de programação utilizados para otimizar a calibração do modelo de qualidade de água, no que se refere ao comportamento cinético das reações nas paredes das tubulações. Sendo assim, os resultados simulados se aproximarão cada vez mais dos resultados observados em campo.

No que se refere aos pontos com baixa concentração de cloro residual livre na rede, os resultados simulados apresentados demonstraram que a implantação de alguns pontos de recloração ao longo da rede pode ser vista



com uma alternativa em potencial para mitigar o problema das concentrações críticas observadas ao longo da rede, garantindo a manutenção da concentração de CRL em níveis satisfatórios. Entretanto, para que a tomada de decisão operacional quanto a forma de implementação das casas de cloração seja feita de maneira assertiva, faz-se necessário um estudo mais aprofundado quanto os métodos de cloração e a demanda de cloro necessária, buscando a minimização do custo operacional. Além de confirmar em campo a ocorrência de concentrações abaixo da estabelecida pela Portaria de consolidação nº 5. Vale ressaltar ainda que para trabalhos futuros deve-se buscar a calibração do modelo hidráulico a partir de valores de pressão e vazão mensurados em campo, de modo que os resultados da simulação de qualidade de água possam ser mais próximos do comportamento real da rede.

De forma preliminar, o modelo desenvolvido conseguiu dar respostas satisfatórias denotando a necessidade da construção de casas de cloração para resolução do problema apresentado. Desta forma, pode-se concluir que o modelo apresentado demonstrou potencial para ser utilizado como suporte nas operações do sistema de distribuição de água gerenciado pela CASAL. Entretanto, vale ressaltar que o modelo desenvolvido neste trabalho ainda é preliminar, dessa forma, trabalhos posteriores serão realizados para propiciar maior robustez e confiabilidade a esse.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) que por meio do programa SIGMETRO (SIG integrado ao Sistema de Medição e Controle de Perdas com Telemetria e Telecontrole) disponibilizou todo o suporte técnico para a realização deste trabalho, desde a aquisição dos dados até as ferramentas computacionais necessárias para o desenvolvimento da modelagem e simulação da rede de distribuição analisada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GOMES, H. P.; GARCÍA, R. P.; REY, P. I. Abastecimento de água: o estudo da arte e técnicas avançadas. João Pessoa: UFPB – Editora Universitária, 2007.
2. JUNQUEIRA, R. Modelagem matemática de cloro residual em redes de distribuição de água – estudo de caso no Jardim Higienópolis em Maringá-PR. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, 2010.
3. LEAL, E. S. Modelagem da degradação de Cloro residual livre em Sistemas de Adução de Água de abastecimento de porte médio. Dissertação de mestrado, Campina Grande, 2012.
4. NASCIMENTO, R. S.; CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, R.; SANTANA, C. F. D.; MEIRA, C. M. B. S. Simulação de alterações numa ETA convencional de porte médio para produção de água segura. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 21, p. 439-450. Porto Alegre, 2016.
5. NEVES, L. I. P. Estudo do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água – Caso de estudo Águas da Azambuja. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química e Biológica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa –ISEL, 2016
6. PIEREZAN, M. L. Monitoramento contínuo do residual do cloro em sistemas de distribuição de água para abastecimento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2009.
7. ROSSMAN, L. A. EPANET 2.0 Manual do Usuário, 2000. Tradução e Adaptação – Laboratório de Eficiência energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Brasil 2009.
8. SALGADO, S. R. T. Estudo dos Parâmetros do Decaimento do Cloro Residual em Sistemas de Distribuição de Água Tratada Considerando Vazamento. Dissertação de Mestrado, São Carlos, 2008.
9. SANTOS, W. B. Modelagem da degradação de cloro residual livre na rede de distribuição de água da cidade de Campina Grande – PB. Dissertação de Mestrado, Fortaleza, 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.
10. SILVA, K. R. G.; Kishi, R. T. Modelagem matemática do cloro em redes de distribuição de água. Sanare. Revista Técnica da Sanepar, Curitiba, v. 19, n. 19, p. 26-40. Janeiro/Junho, 2003.
11. VIERA, L. V. A. Aplicação do modelo de simulação EPANET 2.0 ao estudo das pressões e cloro residual do sistema de abastecimento de água de Angra do Heroísmo. Dissertação de Mestrado. Universidade de Açores, 2013.