

## Calibração do Coeficiente de Decaimento do Cloro ( $k_w$ ) em Redes de Abastecimento de Água Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo Adaptado para Gradiente de Concentração

Rejane Felix Pereira\*, Marco Aurélio Holanda de Castro\*

rejaneff@gmail.com; marco@ufc.br

Recebido: 15/03/12 - revisado: 14/08/12 - aceito: 03/07/13

---

### RESUMO

A presença de cloro residual livre (CRL) na água das redes de abastecimento possui duas vertentes: uma, é garantir a qualidade da água em casos de possíveis contaminações na rede, e a outra, é a formação de trihalometanos (substâncias consideradas, no meio científico, cancerígenas) quando da presença de matéria orgânica natural na rede. Diante deste cenário o Ministério da Saúde estabeleceu a Portaria nº2914/2011 que institui a obrigatoriedade do monitoramento da concentração de CRL limitando em um mínimo de 0,2mg/L e em um máximo de 2,0mg/L em qualquer ponto da rede de distribuição. Esta obrigatoriedade tornou-se um problema para as companhias de abastecimento, pois o CRL é uma substância não conservativa e seu decaimento é influenciado por vários elementos, dentre eles, os que mais contribuem são o coeficiente de decaimento do cloro no seio do líquido ( $k_b$ ) e o coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação ( $k_w$ ). O objetivo deste trabalho é calibrar o coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação ( $k_w$ ) utilizando como ferramenta de calibração o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) desenvolvido por SHUSTER (2004) adaptado para gradiente de concentração e como modelo hidráulico e de qualidade da água o software EPANET.

**Palavras-chave:** Cloro residual livre. MIGHA. Decaimento do cloro. Calibração.

---

### INTRODUÇÃO

As águas destinadas ao consumo humano atravessam um processo de tratamento que além de remover as partículas em suspensão, na fase de desinfecção, promove a destruição ou inativação de microrganismos patogênicos que possam estar presentes na água. Essa desinfecção, em sua maioria, é realizada por agentes químicos dos quais o mais utilizado no Brasil, por apresentar como vantagens o baixo custo e a facilidade na manipulação, é o cloro na forma de gás.

O cloro gasoso ( $Cl_2$ ) é adicionado à água na estação de tratamento durante a etapa de desinfecção passando a atuar como desinfetante, destruindo ou inativando os microorganismos patogênicos; e como oxidante de compostos orgânicos e inorgânicos.

A presença de  $Cl_2$  na água forma o ácido hipocloroso e íon hipoclorito. Parte desses subprodutos

reage com substâncias orgânicas denominando-se cloro consumido ou demanda de cloro. A parte destes subprodutos que não encontra substâncias orgânicas para reagir permanece como residual livre na água, garantindo a qualidade da mesma em caso de possíveis contaminações.

Por ser uma substância não conservativa, sua concentração se reduz com o tempo, e por poder formar subprodutos cancerígenos (trihalometanos), o cloro residual livre (CRL) contido na água deve apresentar uma concentração obrigatória mínima de 0,2mg/L e máxima de 2,0mg/L em qualquer ponto da rede de abastecimento (BRASIL, 2011).

Um dos maiores problemas das companhias de abastecimento é a manutenção das concentrações mínima e máxima de CRL. E este problema é procedente da dificuldade em se estudar os elementos que ocasionam o decaimento do CRL nas redes.

O cálculo do CRL em uma rede de abastecimento pode ser determinado através da resolução de duas equações cinéticas de primeira ordem, em que os coeficientes que mais contribuem para a reação de decaimento do cloro são:  $k_b$  e  $k_w$ , sendo este o coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação e aquele, o coeficiente de decaimento no seio do líquido.

---

\*Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – UFC

Segundo Sekhar (2001), os coeficientes de decaimento do CRL não são globais para um mesmo sistema de distribuição fazendo-se necessário uma calibração dos mesmos para que possam tornar o modelo de simulação de qualidade da água mais eficiente.

O objetivo deste trabalho é calibrar o coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação ( $k_w$ ) utilizando como ferramenta de calibração o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) desenvolvido por Schuster (2004) adaptado para gradiente de concentração e como modelo hidráulico e de qualidade da água o *software* EPANET.

## METODOLOGIA

Para aplicação do modelo de simulação utilizou-se técnicas e métodos que, quando administrados em conjunto obtêm-se um programa que estima o parâmetro de qualidade calibrado, neste estudo, o  $k_w$ .

Para a determinação do  $k_w$  foi elaborada uma rotina computacional em linguagem DELPHI 7.0 que faz a ligação entre o simulador hidráulico (EPANET) e a ferramenta de otimização utilizada (MIGHA).

O processo de calibração realizou-se em cinco etapas, resumidamente:

1. Etapa: escolha do melhor simulador hidráulico que se aplica ao problema da calibração do parâmetro em estudo - EPANET 2.0.
2. Etapa: estudo e adaptação da técnica de otimização a ser aplicada no processo de calibração - Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) adaptado para gradiente de concentração.
3. Etapa: escolha do procedimento matemático para calibração - procedimento iterativo é o que mais se aplica nesse estudo.
4. Etapa: desenvolvimento de um programa de calibração automática do parâmetro da rede, utilizando em conjunto, o simulador hidráulico, a técnica de otimização e o procedimento matemático.
5. Etapa: análise comparativa dos valores do  $k_w$ , obtidos na simulação com os valores previamente conhecidos da concentração de cloro residual livre (CRL). Primeiramente foi realizada a simulação em uma Rede Modelo com os valores de  $k_w$  e de concentração de cloro residual conhecidos. Depois se a-

plicou a simulação em uma rede hipotética, utilizada por Salgado (2008) para fins de comparação.

## O Simulador Hidráulico

Neste trabalho, o simulador hidráulico utilizado é o EPANET 2.0, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency*, agência de proteção ambiental dos Estados Unidos.

Selecionado por ser o mais utilizado em pesquisas na engenharia hidráulica, o EPANET se destaca por apresentar uma interface amigável e de fácil manuseio, e principalmente por ser de uso público. A disponibilização de seu código fonte aos usuários torna fácil o desenvolvimento de programas, simplificando a interação entre o simulador e o método de otimização.

O módulo de simulação de qualidade da água do EPANET utiliza um modelo Lagrangeano para seguir o destino dos segmentos (parcelas discretas de água), à medida que estes se deslocam nas tubulações e se misturam nos nós, entre pequenos passos de cálculo com comprimento fixo para levar em conta os pequenos tempos de percurso que possam ocorrer no interior das tubulações (ROSSMAN, 2000).

## A Técnica de Otimização

Neste trabalho, o modelo utilizado para calibrar o coeficiente que influencia a reação de decaimento do cloro na parede da tubulação ( $k_w$ ) foi otimizado através do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) adaptado para gradientes de concentração.

O MIGHA é uma formulação alternativa do Método do Gradiente Hidráulico (MIGH) desenvolvido por Guo e Zhang em 2000. Essa formulação alternativa foi desenvolvida por SHUSTER no ano de 2002 sem que este tivesse conhecimento da publicação do MIGH.

Ambos os métodos foram desenvolvidos para finalidades diferentes.

O MIGH é composto por um processo iterativo que começa com uma estimativa inicial arbitrária do parâmetro hidrodinâmico, por exemplo, a transmissividade. Após cada iteração o modelo é ajustado de acordo com a Equação 1.

$$T_j^{i+1} = T_j^i - \lambda \left( \frac{\partial F_{obj}}{\partial T_i} \right)^i \quad (1)$$

onde:  $\lambda$  é o fator de comprimento de passo; e  $\frac{\partial F_{obj}}{\partial T_i}$

é a derivada parcial da função objetivo em relação a transmissividade da célula  $j$  (1, 2, ..., N).

Já o MIGHA foi desenvolvido com o objetivo de abandonar o método de calibração tradicional dos mínimos quadrados, pois nesse método, quando o zoneamento do campo de distribuição hidráulico não era conhecido, os resultados apresentavam-se insatisfatórios.

O MIGHA se difere do MIGH apenas por substituição da Equação 1 pela Equação 2 (SCHUSTER, 2004).

$$T_j^{i+1} = T_j^i \cdot \frac{|\nabla h_j^{i,calc}|}{|\nabla h_j^{i,obs}|} \quad (2)$$

onde:  $T_j^{i+1}$  é transmissividade da célula  $j$  na iteração  $i+1$ ;  $T_j^i$  é a transmissividade da célula  $j$  na iteração  $i$ ;  $|\nabla h_j^{i,calc}|$  é o módulo do gradiente hidráulico calculado;  $|\nabla h_j^{i,obs}|$  módulo do gradiente observado na célula  $j$  na iteração  $i$ .

Na presente pesquisa, o MIGHA é adaptado para gradiente de concentração e posteriormente aplicado como técnica de otimização na calibração do coeficiente de decaimento do cloro na parede da tubulação ( $k_w$ ) através de procedimentos iterativos em conjunto com o simulador hidráulico EPANET.

O MIGHA, adaptado para gradiente de concentração, corrige a cada iteração o coeficiente de decaimento do cloro através da Equação 3.

$$k_{w,j}^{i+1} = k_{w,j}^i \cdot \frac{|\nabla c_j^{i,obs}|}{|\nabla c_j^{i,calc}|} \quad (3)$$

Onde:  $k_{w,j}^{i+1}$  é o coeficiente de decaimento do cloro no trecho “ $j$ ” na iteração  $i+1$ ;  $k_{w,j}^i$  é o coeficiente de decaimento do cloro no trecho “ $j$ ” na iteração “ $i$ ”;  $|\nabla c_j^{i,calc}|$  é o módulo do gradiente de concentração calculado no trecho “ $j$ ” na iteração “ $i$ ”; e  $|\nabla c_j^{i,obs}|$  é o módulo do gradiente de concentração observado na célula “ $j$ ” na iteração “ $i$ ”.

Em cada ciclo da iteração “ $i$ ”, será calculado um  $\varphi$ , que é o ângulo formado pelos vetores do gradiente de concentração observado e calculado na célula “ $j$ ”, de acordo com a Equação 4.

$$\cos \varphi_j = \frac{\nabla c_j^{obs} \cdot \nabla c_j^{calc}}{|\nabla c_j^{obs}| \cdot |\nabla c_j^{calc}|} \quad (4)$$

De acordo com a Equação 4, os valores de critério de convergência só podem ser  $\varphi = 0^\circ$  ou  $\varphi = 180^\circ$ . O critério é a aceitação apenas de  $\varphi < 60^\circ$ , para valores de  $\varphi > 60^\circ$ , estes não serão considerados até que os valores dos coeficientes de decaimento do cloro nas paredes da tubulação em trechos vizinhos induzam a diminuição do  $\varphi$  nas próximas iterações. Estes procedimentos está melhor descrito na Equação 5.

$$k_{w,j}^{i+1} = \begin{cases} k_{w,j}^i \cdot \frac{|\nabla c_j^{i,obs}|}{|\nabla c_j^{i,calc}|} & \text{se } \varphi < 60^\circ \\ k_{w,j}^i & \text{se } \varphi > 60^\circ \end{cases} \quad (5)$$

O processo de modelagem, aplicado nesta pesquisa, inicia-se com a coleta e preparação dos dados de entrada no modelo que são, além dos valores das características da rede, os valores observados de concentração de CRL, as demandas em cada nó, o padrão temporal dos níveis do reservatório entre outros.

Para o desenvolvimento do modelo, definiram-se três tipos de redes que serão utilizadas:

- **Rede Modelo:** é a rede característica, cujos valores dos coeficientes de decaimento do cloro em cada tubulação são conhecidos e, após lançados no simulador EPANET, obtêm-se os valores de concentração de CRL em cada nó da rede modelo.
- **Rede Observada:** é uma rede obtida a partir da rede modelo, nesta, se apresentam a medição da concentração de CRL apenas em alguns nós. E os valores iniciais  $k_w$  em cada trecho da tubulação são atribuídos de forma aleatória para que se possam obter valores de gradiente de concentração de CRL, que nesta rede, serão considerados “gradientes de concentração observados”. Se em todos os nós da rede observada forem medidos os

valores de concentração de CRL e estes coincidirem com os valores da rede modelo, após o processo de calibração do  $k_w$  da rede observada observar-se-á que os valores finais deste parâmetro são iguais aos da rede modelo. Neste processo, notou-se também que, quanto menor o número de amostras de concentração (nós medido), mais esta rede se afasta da rede modelo em termos de  $k_w$ .

- **Rede Calculada:** é a rede em que, da mesma forma da rede observada, são atribuídos os mesmos valores iniciais do  $k_w$ , porém, a rede calculada não apresenta nenhum valor de concentração de CRL medido. Neste caso, o simulador calcula o valor das concentrações nos diferentes nós para que se possam calcular os gradientes de concentração, considerados “gradientes de concentração calculados”.

O processo de calibração deste trabalho tem o objetivo de tornar os gradientes de concentração de CRL calculados o mais próximo possível dos gradientes de concentração observados. Para alcançar este objetivo, o número de nós com concentração de CRL conhecida (medida) possui importância fundamental, pois, na ocorrência das concentrações de todos nós seja conhecida, a rede observada equivale à rede modelo.

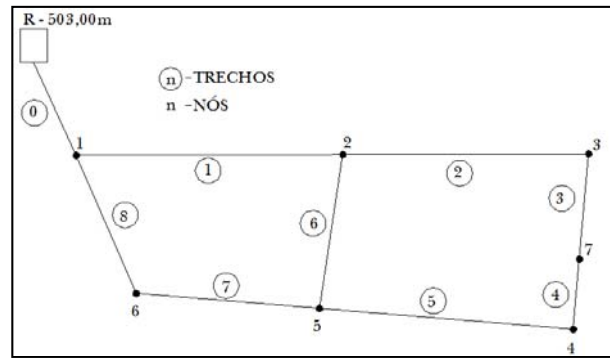
Geralmente, em uma grande rede distribuição de água, há poucos pontos medidos, ocasionando uma grande diferença, em alguns trechos, entre os resultados dos gradientes encontrados na rede observada e os resultados dos gradientes reais da rede modelo.

Portanto, para que se obtenha sucesso neste modelo de calibração, faz-se necessário a medição da concentração de cloro no maior número de nós possíveis, pois a rede calibrada, ao se aproximar da rede observada, se aproximará também da rede modelo.

### Redes de Distribuição de Água Estudadas

A figura 1 apresenta uma rede exemplo elaborada por Porto (2003) que é considerada, neste estudo, como a Rede Modelo descrita anteriormente.

As características da Rede Modelo, como cotas topográficas, diâmetro, comprimento e demanda, estão descritas nas tabelas 1, 2 e 3.



**Figura 1 - Rede Modelo**  
**Fonte: Porto, 2003.**

Na rede exemplo de Porto (2003) não consta dados de concentração, porém, para calibrar o coeficiente de decaimento do cloro, considerou-se o valor de 1,5m/dia para o coeficiente "F" que relaciona a reação na parede da tubulação com a respectiva rugosidade e o valor de 1,2dia<sup>-1</sup> para o coeficiente de decaimento do cloro no seio do líquido,  $k_b$ . O valor considerado da concentração inicial de cloro aplicada no reservatório é de 3,00mg/L.

Segundo Rossman (2000), o EPANET calcula o coeficiente da reação de decaimento do cloro  $k_w$  em função do coeficiente da rugosidade. A fórmula adotada para seu cálculo é de acordo com a equação escolhida para o cálculo da perda de carga na tubulação.

Quando a perda de carga é calculada pela fórmula de Hazen-Williams, o valor de  $k_w$  é definido pela Equação 6.

$$k_w = \frac{F}{C} \quad (6)$$

onde: F é o fator que relaciona a reação na parede da tubulação com a respectiva rugosidade, e C é o coeficiente da fórmula de Hazen-Williams.

Se a perda de carga for calculada pela fórmula de Darcy-Weisbach, calcula-se  $k_w$  por:

$$k_w = - \frac{F}{\log\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)} \quad (7)$$

onde:  $\varepsilon$  é a rugosidade absoluta, e d é o diâmetro da tubulação.

Tabela 1 – Cotas(m) Topográficas dos nós da Rede Modelo

Reservatório	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7
503,00	463,20	460,20	458,90	461,20	457,70	463,20	459,20

Fonte: Porto, 2003.

Tabela 2 – Características físicas das tubulações da Rede Modelo

Tubo	Nó inicial	Nó final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade C(m <sup>0,3676</sup> /s)
0	R1	1	520	250	110
1	1	2	1850	150	122
2	2	3	790	125	105
3	3	7	700	100	133
4	7	4	600	100	130
5	4	5	980	100	129
6	5	2	850	100	121
7	5	6	650	200	83
8	6	1	850	200	107

Fonte: Porto, 2003.

Tabela 3 – Demanda (L/s)

Reservatório	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7
40,00	0,00	10,00	8,00	5,00	10,00	5,00	2,00

Fonte: Porto, 2003.

Tabela 4 – Valores de k<sub>w</sub> estimados para cada trecho da Rede Modelo (m/dia)

Trecho	0	1	2	3	4	5	6	7	8
k <sub>w</sub>	-0,014	-0,012	-0,014	-0,011	-0,0112	-0,012	-0,0122	-0,018	-0,014

Fonte: Própria

A Equação 8 é utilizada para calcular k<sub>w</sub> quando a perda de carga for definida pela fórmula de Chezy-Manning.

$$k_w = F.n \quad (8)$$

onde: F é o fator que relaciona a reação na parede da tubulação com a respectiva rugosidade, e n é coeficiente de rugosidade de Chezy-Manning;

É importante ressaltar que o EPANET considera adimensionais os coeficientes das fórmulas de

perda de carga, exceto o coeficiente da fórmula de Darcy-Weisbach cuja unidade atribuída é em milímetros.

A partir da consideração do fator "F" e da concentração inicial de cloro e da curva horária de demanda, estimou-se através do EPANET, o valor do k<sub>w</sub> para cada trecho, e o valor da concentração do CRL em cada nó da rede.

A tabela 4 apresenta os valores de k<sub>w</sub> estimados através da Equação 6 para cada tubulação da Rede Modelo. Estes valores serão considerados valores reais de k<sub>w</sub> para esta rede.

A simulação da qualidade é uma simulação dinâmica, ou seja, o valor da concentração do cloro residual varia com o tempo (Figura 2).

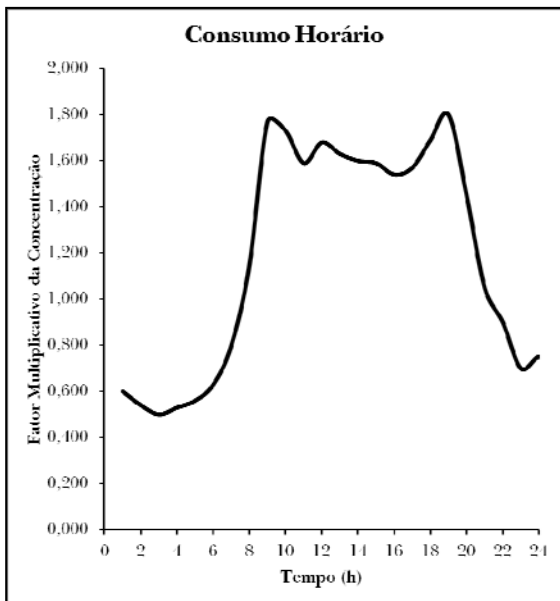


Figura 2 - Variação horária do consumo da Rede Modelo

Na Rede Modelo considera-se conhecidas as concentrações de CRL em todos os nós nos tempos 6:00h, 11:00h e 20:00h. A análise desta rede foi realizada para um período de 24 horas.

A tabela 5 contém os valores das concentrações de cloro residual em cada nó da Rede Modelo nos horários definidos.

Tabela 5 – Valores das concentrações de cloro em cada nó

Nó	Concentração Cloro (mg/L)		
	6:00h	11:00h	20:00h
Res.	3,00	3,00	3,00
1	2,99	2,99	2,99
2	2,85	2,92	2,93
3	2,50	2,78	2,80
4	2,63	2,83	2,85
5	2,75	2,88	2,89
6	2,91	2,96	2,96
7	2,48	2,78	2,79

Fonte: Própria

A figura 3 apresenta a rede Hipotética utilizada por Salgado (2008).

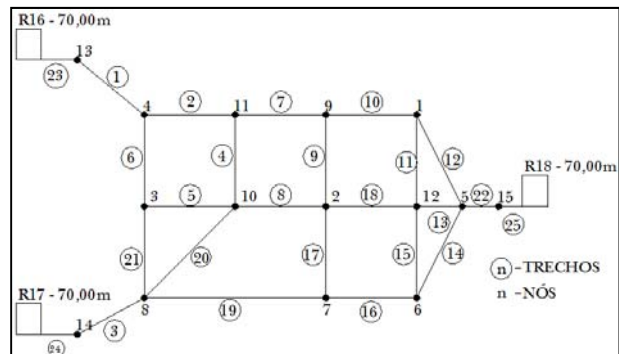


Figura 3 - Rede hipotética utilizada por Salgado (2008)

Por ser uma rede hipotética, os dados citados como de campo foram originados por simulações com EPANET. Para realizar a análise dessa rede, Salgado (2008) seguiu várias etapas que permitiram a avaliação do modelo de calibração da qualidade de água em um sistema de distribuição com três fontes de cloração.

Foram realizadas simulações com padrões de consumo e parâmetros de decaimento de cloro para a reprodução das condições semelhantes às reais de operação de um sistema de distribuição.

As informações referentes às características físicas da Rede Hipotética estão descritas nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Características físicas dos trechos da Rede Hipotética

Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
1,3	1000	500
2,6,7,10,16,19,21	500	250
4,5,8,9,11,15,17,18	500	150
12,14	560	250
13	250	250
20	700	150
22	500	500
23,24,25	1	500

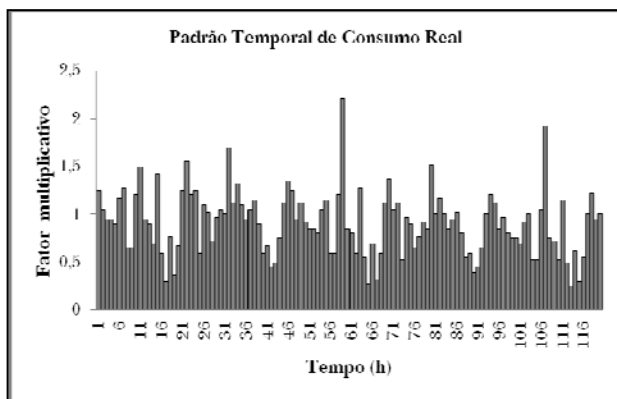
Fonte: Salgado, 2008

Para a simulação da Rede Hipotética, Salgado (2008) adotou o tempo de operação de 120 horas. As figuras 4 e 5 apresentam os valores adotados para padrão horário de consumo e para variação do nível dos reservatórios

**Tabela 7 – Características físicas dos nós da Rede Hipotética**

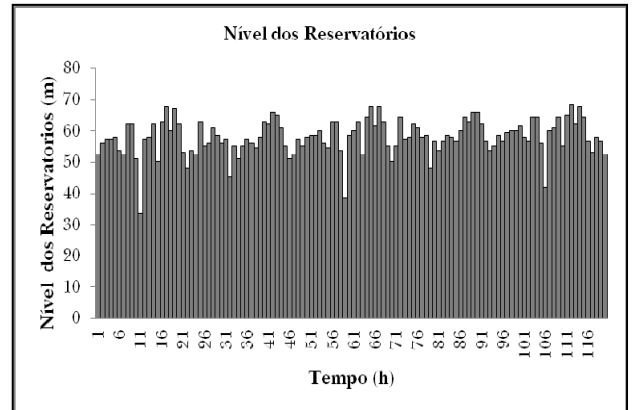
Nó	Cota (m)	Demanda (L/s)
1	25	36,00
2	20	36,00
3,11	22	36,00
4,12	27	0,00
5	3	0,00
6	27	36,00
7	22	0,00
8,9,13,14	25	0,00
10	20	0,00
15	30	0,00

Fonte: Salgado, 2008



**Figura 4 - Padrão Temporal de Consumo Real da Rede hipotética utilizada por Salgado(2008)**

Salgado (2008) distribuiu as tubulações em zonas do coeficiente de decaimento do cloro no seio do líquido ( $k_b$ ), de acordo com a quantidade de água de cada reservatório nas tubulações e para tubulações com traçador proveniente de mais de uma origem, essas ficaram na zona pertencente ao reservatório com maior influência.



**Figura 5 - Nível dos reservatórios da Rede hipotética utilizada por Salgado(2008)**

As zonas de influência de cada reservatório estão demonstradas na tabela 8.

**Tabela 8 – Zoneamento da Rede Hipotética por valores de  $k_b$**

Reservatório	$k_b$ (dia <sup>-1</sup> )	Tubulação
16	1,2	1, 2, 5, 6, 7, 23
17	1,8	3, 4, 8, 16, 17, 19, 20, 21, 24
18	0,5	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 22, 25

Fonte: Salgado, 2008

Para o efeito de decaimento do cloro próximo as paredes da tubulação, foi atribuído ao fator "F" o mesmo valor da Rede Modelo, 1,5m/dia e  $\epsilon=3,153$ . O Simulador EPANET calcula, neste caso,  $k_w$  através da Equação 7

Entretanto, de acordo com Salgado (2008), após a realização de algumas simulações verificou-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 7.

**Tabela 9 – Valores de  $k_w$  da Rede Hipotética**

Tubulação	$k_w$ (m/dia)
1,3,10,16,22,23,24,25	-0.340
2,6,7,12,13,14,19,21	-0.400
4,5,8,9,11,15,17,18,20	-0.450

Fonte: Salgado, 2008

Para esta rede, foram observados valores de concentração de cloro residual nos nós 2, 6, 3 e 11 no período de 25 a 72 horas.

A tabela 9 apresenta os valores de  $k_w$  para cada tubo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No EPANET, para que se realize a simulação da qualidade da água em uma rede de abastecimento é fundamental que antes, se execute a simulação hidráulica sobre o qual o modelo de qualidade será aplicado.

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo, nesta pesquisa, buscou aproximar os valores da concentração de CRL da rede calculada aos valores da concentração de CRL da rede observada.

Em situações reais não há como medir a concentração do CRL em todos os pontos do sistema, por isso, o simulador hidráulico EPANET estima a concentração nos pontos em que esta não é conhecida, implicando, conseqüentemente em uma rede observada sensivelmente diferente da rede Rede Modelo ou da Rede Hipotética. A consequência disto é uma calibração realizada na rede calculada que se aproxima da rede observada, mas que não se aproxima muito da rede Rede Modelo ou da Rede Hipotética apresentadas respectivamente por Porto (2003) e por Salgado (2008).

Como solução para o problema exposto no parágrafo anterior, este trabalho propõe que o processo de calibração seja realizado de forma iterativa com a rede observada, ou seja, a cada iteração, o novo conjunto de  $k_w$  e de concentração de CRL seja aplicado tanto à rede calculada quanto à rede observada e, a partir destes novos valores seja realizada uma nova iteração. Com a adoção desta medida, deverá haver uma aproximação dos valores da rede calculada aos valores das redes Modelo ou Hipotética, já que aproxima a rede calculada da rede observada e esta, por sua vez, da Rede Modelo ou Hipotética, em termos de concentração de cloro residual.

### Simulação na Rede Modelo

Foram executadas simulações na Rede Modelo às 6:00, 11:00 e 20:00 horas considerando a concentração medida em apenas 1 nó, depois em 3, 4 e 6 nós.

### Concentração medida em apenas um nó

Com o objetivo de comparar os valores simulados de  $k_w$  conhecendo-se a concentração de CRL em apenas um nó e a influência de cada nó no resultado final, a Rede Modelo foi simulada considerando conhecidas as concentrações nos nós 2, 3 e 5 individualmente.

Primeiramente, a rede foi simulada considerando conhecido apenas o nó 2, depois, considerou-se conhecido apenas o nó 3 e a mesma consideração ocorreu com o nó 5.

A tabela 10 apresenta os valores de  $k_w$  considerando conhecida a concentração de CRL em apenas um nó.

De acordo com a tabela 10, verifica-se que quanto mais distante do ponto de cloração estiver o ponto que possui concentração de CRL conhecida, os valores de  $k_w$  da Rede Calculada se diferem mais ainda dos valores de  $k_w$  da Rede Modelo.

### Concentração medida em 3, 4 e 6 nós

Para analisar a influência do número de nós com concentrações de CRL conhecidas sob o resultado do parâmetro  $k_w$ , a rede foi simulada considerando primeiramente três nós com os valores conhecidos das concentrações, depois com quatro e seis nós.

Tabela 10 – Valores de  $k_w$  considerando apenas um nó com o valor da concentração conhecido

Tubo	$k_w$ (m.dia <sup>-1</sup> ) Rede Modelo	$k_w$ (m.dia <sup>-1</sup> ) Rede Calculada		
		Nó Conhecido		
		Nó 2	Nó 3	Nó 5
0	-0,014	-0,012	-0,011	-0,012
1	-0,012	-0,008	-0,088	-0,013
2	-0,014	-0,015	-0,010	-0,046
3	-0,011	-0,025	-0,237	-0,018
4	-0,012	-0,015	-0,017	-0,016
5	-0,012	-0,013	-0,090	-0,014
6	-0,018	-0,014	-0,082	-0,011
7	-0,018	-0,011	-0,083	-0,011
8	-0,014	-0,017	-0,162	-0,011

Fonte: Própria



Tabela 11 – Valores de  $k_w$  de acordo com o número de nós conhecidos

Tubo	$k_w$ (m/dia) Rede Modelo	$k_w$ (m/dia) Rede Calculada		
		Conforme quantidade de nós com concentrações conhecidas		
		3	4	6
0	-0,014	-0,014	-0,014	-0,013
1	-0,012	-0,015	-0,015	-0,017
2	-0,014	-0,014	-0,014	-0,017
3	-0,011	-0,040	-0,027	-0,010
4	-0,012	-0,026	-0,017	-0,014
5	-0,012	-0,017	-0,078	-0,014
6	-0,018	-0,012	-0,012	-0,009
7	-0,018	-0,008	-0,012	-0,013
8	-0,014	-0,019	-0,019	-0,014

Fonte: Própria

Tabela 12 – Valores de  $k_w$  de acordo com o número de nós conhecidos

Tubo	$k_w$ (m/dia) Rede Hipotética	$k_w$ (m/dia) Rede Calculada		
		Conforme quantidade de nós com concentrações conhecidas		
		1	2	4
1	-0,340	-0,353	-0,353	-0,353
2	-0,400	-0,114	-0,215	-0,389
3	-0,340	-0,351	-0,366	-0,385
4	-0,450	-0,660	-0,620	-0,785
5	-0,450	-0,591	-0,582	-0,526
6	-0,400	-0,314	-0,819	-0,683
7	-0,400	-0,216	-0,026	-0,288
8	-0,450	-0,561	-0,601	-0,761
9	-0,450	-0,560	-0,613	-0,461
10	-0,340	-0,155	-0,391	-0,314
11	-0,450	-0,867	-0,638	-0,763
12	-0,400	-0,614	-0,450	-0,635
13	-0,400	-0,610	-0,519	-0,631
14	-0,400	-0,619	-0,406	-0,672
15	-0,450	-0,561	-0,696	-0,670
16	-0,340	-0,258	-0,485	-0,293
17	-0,450	-0,563	-0,600	-0,576
18	-0,450	-0,664	-0,666	-0,668
19	-0,400	-0,320	-0,422	-0,608
20	-0,450	-0,763	-0,664	-0,561
21	-0,400	-0,521	-0,521	-0,698
22	-0,340	-0,256	-0,359	-0,262
23	-0,340	-0,354	-0,358	-0,261
24	-0,340	-0,355	-0,419	-0,346
25	-0,340	-0,158	-0,389	-0,355

Fonte: Própria

Conforme tabela 11 o valor de  $k_w$  torna-se mais próximo do valores de  $k_w$  da Rede Modelo quando há uma maior quantidade de nós com os valores das concentrações de CRL conhecidos.

### Simulações na Rede Hipotética

Na Rede Hipotética utilizada por Salgado (2008) os pontos considerados conhecidos foram: 2, 6, 3 e 11 no período entre 25 e 72 horas. Os resultados estão dispostos na tabela 12.

De acordo com a tabela 12 nota-se que quanto maior o número de concentrações de CRL conhecidas, mais o  $k_w$  da rede calculada se aproxima da rede hipotética.

### CONCLUSÕES

Nos testes que foram realizados na Rede Modelo, que foi calibrada hidraulicamente pela fórmula de Hazen-Williams, considerando apenas um nó com a concentração conhecida, os parâmetros  $k_w$  simulados apresentaram valores razoáveis quando o nó considerado era próximo ao ponto de cloração, à medida que o nó se afasta do ponto de cloração os valores de  $k_w$  em alguns trechos tornam-se elevados em relação aos valores considerados reais da Rede Modelo, entretanto, as concentrações de CRL apresentaram valores próximos aos reais.

Ainda na Rede Modelo, foram realizados testes considerando três, quatro e seis nós com os valores das concentrações conhecidos, apenas no teste com seis nós os valores de  $k_w$  das tubulações 0, 3, 4, 5, 8 apresentou valores condizentes aos reais, porém, isto se deve ao fato destes trechos se localizarem entre pontos cuja concentração foi considerada conhecida.

O método do gradiente de concentração foi aplicado na Rede Hipotética para calibração do  $k_w$  considerando os três zoneamento para  $k_b$  e um  $k_w$  individual para cada tubulação. Após simulação considerando apenas um nó com concentração conhecida os valores de  $k_w$  ficaram muito distante dos valores reais, sendo que essa distância, em alguns trechos, diminui à medida em que se aumenta o número de nós com concentração de CRL conhecida.

Os valores das concentrações de CRL ficaram semelhantes aos valores reais a partir da consideração de quatro nós com concentração conhecidas.

Considerando valores individuais de  $k_w$  para cada trecho torna-se difícil a calibração de cada um desses parâmetros. Porém, mesmo considerando o distanciamento, em alguns trechos das redes, dos valores de  $k_w$  calculados para os  $k_w$  considerados reais, o MIGHA adaptado para gradiente de concentração respondeu bem aos objetivos propostos.

Durante as simulações com o MIGHA pode ocorrer, em certo tempo, que a concentração de cloro de um ponto a montante seja igual à concentração de um ponto a jusante, perfazendo um gradiente igual a zero, impossibilitando a aplicação do método. Neste caso, deve-se desconsiderar a iteração nesse horário.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011. *Diário Oficial da União*, n. 3, Brasília, 04 de janeiro 2012. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)>. Acesso em: 28 maio 2013.

GUO, X.; ZHANG, C-M. Hydraulic Gradient Comparison Method to Estimate Aquifer Hydraulic Parameters Under Steady-state Conditions. *Ground Water*, v. 38, n. 6, p. 815-826, 2000.

PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 2. ed. São Carlos: USP/Escola de Engenharia de São Carlos, 2003.

ROSSMAN, L. A. The Epanet programmers toolkit. In: WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT DIVISION ANNUAL SPECIALTY CONFERENCE, 2000, Tempe, Arizona. *Proceedings...* Tempe: [s.n.], 2000.

SALGADO, S. R. T. *Estudo dos parâmetros de decaimento do cloro residual em um sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento*. 2008. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SCHUSTER, H. D. M. Uma formulação alternativa do método iterativo de gradiente hidráulico alternativo no procedimento de calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, n. 2, p. 31-37, abr./jun. 2004

SEKHAR, M. *Disinfection by-product formation in the water distribution System of Morehead, Kentucky*. Dissertação (Master) - University of Cincinnati, Cincinnati, KY, 2001.

SOARES, A. K. *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

## **Calibration Of The Chlorine Coefficient Decay ( $k_w$ ) In Water Supply Networks Using The Iterative Method Of Hydraulic Alternative Gradient Adapted For Concentration Gradient**

### ABSTRACT

*The presence of free residual chlorine (FRC) in water supply networks has two lines: one is to ensure the quality of water in case of possible contamination in the network, and the other is the formation of trihalomethanes (substances considered carcinogenic in the scientific environment) when natural organic matter is present in the network. Against this background the Ministry of Health issued Ordinance No. 2914/2011 establishing the obligation of monitoring the concentration of FRC limited to a minimum of 0.2mg/L and a maximum of 2.0mg/L at any point in the distribution network. This requirement has become a problem for water supply companies, because FRC is a non-conservative substance and its decay is influenced by several factors, the main contributors among them being the chlorine decay coefficient in the liquid ( $k_b$ ) and the chlorine decay coefficient in the pipe wall ( $k_w$ ). The purpose of this work is to calibrate the chlorine decay coefficient in the pipe wall ( $k_w$ ) using as a calibration tool the Iterative Method of Hydraulic Alternative Gradient (MIGHA) developed by Schuster (2004) adapted to the concentration gradient, and as hydraulic and water quality model the EPANET software.*

**Keywords:** Free residual chlorine. MIGHA. Decay of chlorine. Calibration.