

## **RECURSOS HÍDRICOS**

### **ESTUDOS SOBRE O DECAIMENTO DE CLORO RESIDUAL EM ÁGUAS DISTRIBUÍDAS EM REDES DE ABASTECIMENTO.**

**Maira Ferreira da Silva Rodrigues** – mairafsr@gmail.com  
Universidade Federal de Goiás

**Paulo Sérgio Scalize** – pscalize.ufg@gmail.com  
Universidade Federal de Goiás

**Resumo:** A desinfecção da água distribuída à população é fundamental para garantir a segurança microbiológica da mesma e evitar doenças causadas por patógenos. O cloro é o desinfetante mais usado para este tipo de processo pelo seu baixo custo e boa eficiência, porém, há um decaimento do seu residual nos sistemas de distribuição devido às características da água e do sistema, podendo causar perda da qualidade da água. A fim de otimizar a demanda e monitorar o residual de cloro ao longo do sistema, softwares e modelos matemáticos têm sido empregados em diversas partes do mundo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi realizar um levantamento bibliográfico sobre o decaimento do cloro em sistemas de distribuição de água entre os anos de 1994 e 2014 a fim de avaliar a produção de conhecimento sobre o assunto em todo o mundo, os principais modelos e softwares empregados para prever seu decaimento nas redes de distribuição, sendo para isso utilizado a metodologia *Mapping Study*. A pesquisa mostrou que os modelos de primeira ordem são os mais utilizados (32,8%) tanto em sistemas de distribuição reais quanto em estudos feitos em laboratório enquanto o software EPANET é o mais aplicado neste tipo de trabalho (19,3%).

**Palavras-chave:** Decaimento de cloro, qualidade da água, Sistemas de distribuição.

#### **1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS**

A qualidade da água potável reflete diretamente na qualidade de vida da população, por isso, o tratamento da água de abastecimento público deve ser rigorosamente monitorado. A presença de microrganismos, assim como os parâmetros físicos e químicos podem ser indicadores de segurança da qualidade da água, a qual é oferecida à população.

Para atender a segurança microbiológica, a água passa por um processo de desinfecção, a qual visa a inativação de microrganismos patogênicos na água destinada ao consumo humano a fim de prevenir doenças de veiculação hídrica (SADIQ e RODRIGUEZ, 2004). Para isso, diferentes métodos podem ser empregados, tais como a desinfecção por ozônio, luz ultravioleta, permanganato de potássio, íon ferrato e cloro (DANIEL *et al.*, 2001) sendo este último o mais usado devido ao relativo baixo custo e pela capacidade em manter um residual na água ao longo da rede de distribuição, prevenindo posteriores contaminações (SADIQ e RODRIGUES, 2004), além de ser, juntamente com o dióxido de cloro e a

cloramina, um dos desinfetantes obrigatórios segundo a legislação brasileira (BRASIL, 2011). O cloro pode ser aplicado sob a forma sólida (hipoclorito de cálcio), líquido (hipoclorito de sódio) ou gasoso (cloro gás) (DANIEL *et al.*, 2001).

Ao ser adicionado a água quimicamente pura o cloro hidrolisa rapidamente e forma ácido hipocloroso (HOCL), este se dissocia em águas com pH acima de 6 e forma íon hipoclorito (OCI<sup>-</sup>) (MAYER, 1994). Ambos os compostos (HOCL e OCI<sup>-</sup>) possuem ação oxidante e desinfetante, atuando na inativação dos microrganismos patogênicos. O cloro presente na água na forma de ácido hipocloroso e íon hipoclorito são denominados cloro residual livre (DI BERNADO, 1993).

Quando há presença de amônia na água, o cloro combina-se com esta e forma compostos clorados ativos, chamados cloraminas. A concentração de cloro na forma de cloraminas é denominada cloro residual combinado e também é usado como desinfetante, porém é menos reativo e possui poder de desinfecção relativamente baixo (DI BERNADO, 1993), sendo usado como agente secundário em sistemas de tratamento e distribuição de água.

Durante o transporte da água entre a saída do tratamento e o consumidor, devido a reações com substâncias remanescentes presentes na água após o tratamento, como matéria orgânica e substâncias inorgânicas, ferro, manganês e amônia (FISHER *et al.*, 2012) além de condições hidráulicas como vazão e pressão, há um decaimento da concentração de cloro no sistema de distribuição e conseqüente perda da qualidade microbiológica da água. Por isso é necessário conhecer os mecanismos de deterioração do cloro e suas causas (HUA *et al.*, 1999).

A fim de melhorar a eficiência da desinfecção na água para consumo humano, diversos estudos têm sido desenvolvidos para otimizar a demanda de cloro necessária para assegurar a qualidade bacteriológica da água, com isso a modelagem matemática se tornou uma ferramenta importante no monitoramento e controle de sistemas de distribuição, como mostra os estudos feitos por Fisher *et al.* (2012) e Helbling e VanBriesen (2009).

Modelos matemáticos e computacionais têm sido desenvolvidos e incorporados a sistemas de distribuição para prever o decaimento do cloro ao longo da rede e melhorar a qualidade da água, como modelos cinéticos (LIU *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2014), rede neural artificial, simuladores numéricos (GIBBS *et al.*, 2006 e BROAD; DANDY e MAIER, 2005).

Além dos modelos matemáticos, os simuladores hidráulicos e de qualidade da água são uma ferramenta fundamental para o monitoramento de estações de tratamento de água, tais como EPANET, software desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), de domínio público, e outros como AQUASIM e WaterCAD.

Dessa forma, este trabalho buscou realizar um estudo sobre o decaimento de cloro em redes de distribuição de água a fim de analisar a evolução da produção científica sobre o assunto em diversas partes do mundo e verificar os principais tipos de pesquisas realizadas, formas de publicação e suas diversas aplicações.

## **2. METODOLOGIA**

Para procurar e selecionar os artigos publicados a cerca do tema de decaimento do cloro em redes de distribuição de água, bem como para extrair e sintetizar os dados dos artigos selecionados foi utilizada a metodologia *Mapping Study*, que consiste em um mapeamento sistemático de estudos onde busca proporcionar uma visão geral de uma área de investigação e determinar a quantidade e tipo de investigação e os resultados disponíveis

(MUÑOZ *et al.*, 2011), tendo sido utilizado por diversos autores como Castro *et al.* (2015) e Cruz *et al.* (2015).

As buscas por artigos foram realizadas através das bases de dados Scopus e Portal de Periódicos da Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O recorte temporal escolhido para pesquisa compreende o período entre janeiro de 1994 a dezembro de 2014, por ser uma investigação mundial, a faixa temporal de vinte anos foi considerada razoável para a abrangência do tema, também empregado por Deus *et al.* (2015) e De Castro Pereira *et al.* (2010).

A definição dos descritores se baseou em testes de conjuntos de palavras dos quais foram escolhidos os mais adequados ao tema de decaimento de cloro em redes de distribuição de água, sendo selecionados os termos “decaimento de cloro” e “água” e suas respectivas traduções em inglês “chlorine decay” e “water” e foi usada a opção de direcionamento AND, nas duas bases pesquisadas.

Os artigos encontrados foram separados por artigo de revista e artigos de congresso ou simpósio, os que abordavam o assunto proposto foram tabulados em planilha do Excel, excluindo-se as repetições, e extraíndo as informações para análises e quantificação dos dados. Os parâmetros utilizados para classificar os artigos foram idioma e ano de publicação, área de estudo, universidades envolvidas, modelos cinéticos empregados e programas de modelagem e simulação utilizados. Foram verificada também quais pesquisas apresentavam aplicação prática ou estudos de caso. Após a classificação dos artigos estes foram quantificados e estão apresentados em gráficos e histogramas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os descritores “decaimento de cloro” e “água” e “chlorine decay” e “water” foram encontrados 305 artigos nas bases de pesquisa Scopus e CAPES, sendo que 82% dos artigos foram publicados em revista enquanto 18% em congressos e simpósios.

Os artigos escritos na língua inglesa prevaleceram sobre as publicações, atingindo 90,8%, visto que é o idioma de uso universal. O idioma chinês aparece em segundo lugar com 6,2% do total de publicações, o que indica que as pesquisas foram produzidas para conhecimento local e que o país está investindo nesse campo de pesquisa. Outros idiomas, totalizando 3%, foram registrados em menor quantidade, sendo o espanhol (1%), francês (0,66%), polonês (0,66%), romeno (0,33%) e coreano (0,33%).

Houve um aumento significativo de publicações ao longo do período estudado, porém, este aumento pode estar associado à quantidade de revistas que passaram a integrar as bases de dados ao longo do tempo. A Figura 1 apresenta a produção anual de artigos durante o recorte temporal estudado, que teve uma média em torno de 15 artigos por ano, sendo que em 2010 houve o maior número de publicações, correspondendo a 8,5% do total, seguidos pelos anos de 2008, 2009, 2011 e 2014 com 7,5% cada.

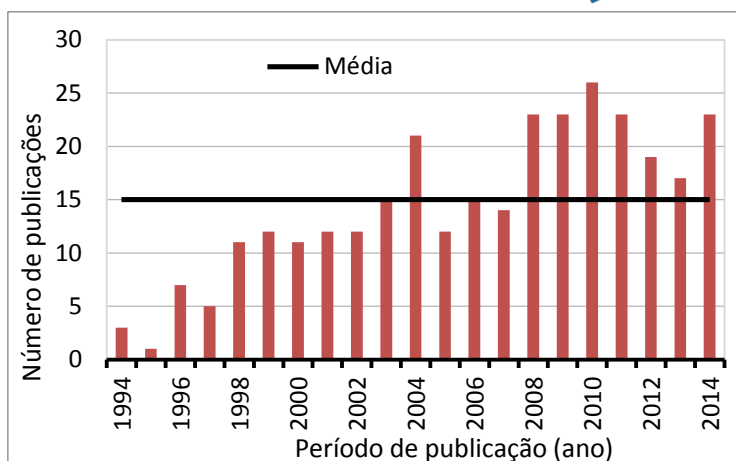


Figura 1. Quantidade de artigos publicados em cada ano do período estudado.

Com as palavras chave empregadas encontrou-se artigos que tratavam isoladamente do decaimento de cloro (cloro residual livre) em 89,2%, e de cloraminas (cloro combinado) em 4,9%, porém em 5,9% dos artigos foram estudados os dois desinfetantes simultaneamente. As cloraminas geralmente são usadas como desinfetantes secundários em sistemas de distribuição onde há problemas de formação de subprodutos da desinfecção, pois são menos reativas que o cloro e reduzem a formação de tais subprodutos (WOLFE *et al.*, 1985). Porém as cloraminas apresentam rápida autodecomposição e processos como a nitrificação aceleram o seu decaimento (SATHASIVAN *et al.*, 2005).

O levantamento bibliográfico mostrou que 82,6% dos autores dos artigos são vinculados às universidades, sendo na Figura 2 realizada a distribuição dos artigos produzidos pelas universidades segregadas por continente. As universidades do continente Asiático contribuíram com 29,8% das publicações, com destaque as universidades chinesas que tiveram maior participação, presentes em 16,4% do total dos artigos publicados. Já nas Américas, as universidades estadunidenses lideram com participação em 20,3% do total. As Universidades Brasileiras contribuíram com 0,7% dos artigos publicados. A variedade de universidades envolvidas é interessante, pois trás uma abordagem abrangente do assunto, uma vez que as instituições acadêmicas são importantes e pioneiras no campo de pesquisas científicas.

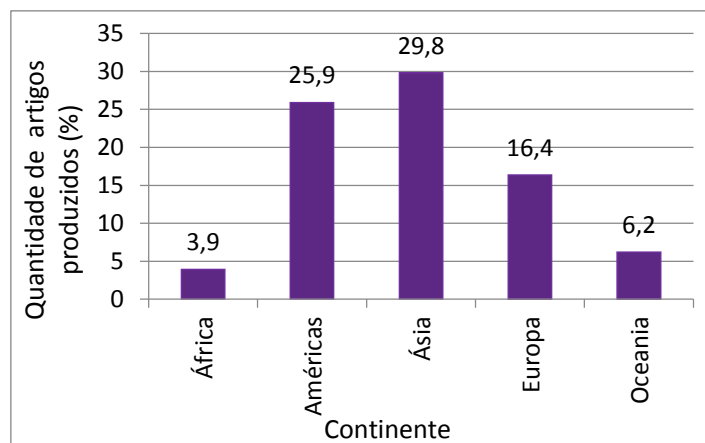


Figura 2. Artigos produzidos por universidades divididos pelo continente das instituições.

Dentre os trabalhos encontrados 39,3% apresentaram aplicação em sistemas de distribuição, 48,5% foram realizados em laboratório, 8,5% tratavam de revisão sobre o assunto e em 3,6% não foi possível identificar a aplicação. Com relação a utilização de modelos matemáticos, em 74,1% foram empregados para prever o decaimento do cloro, tanto em escala laboratorial quanto em sistemas de distribuição. A Figura 3 apresenta os principais modelos utilizados.

Os modelos cinéticos de primeira ordem sobressaíram aos demais, sendo usados em 32,8% do total de publicações ( Figura 3), seguido por aqueles que utilizaram simultaneamente modelos de primeira e segunda ordem (9,2 %) e pela utilização somente do modelo de segunda ordem (6,6 %). O uso de dois ou mais modelos para simular ou descrever o comportamento do cloro nos sistemas de distribuição de água permite comparar e avaliar a eficiência e a aplicabilidade dos mesmos para sistemas com diferentes características. Outros modelos apresentados e utilizados pelos autores foram rede neural artificial (2,0%), modelos CFD (Dinâmica de Fluidos Computacionais) (1,3%), ordem zero (1,0%), modelo de média móvel e auto regressão (0,6%), MIMO (multiple-output multiple-input), PICCOBIO e CDWQ (Comprehensive Disinfection and Water Quality) com 0,3% cada. Em 17,7 % dos artigos que utilizaram modelos matemáticos não foram obtidas informações suficientes para determinar o modelo empregado.

Os modelos cinéticos de ordem  $n$  consistem em equações diferenciais onde a concentração está relacionada geralmente a concentração inicial do desinfetante e a uma constante de decaimento (WU, 2006). Como visto, os modelos de primeira ordem foram os mais utilizados, isso devido a sua simplicidade e relativa precisão, tendo sido aplicados tanto para prever o decaimento de cloro na massa de água quanto próximo a parede da tubulação, como nos estudos de Monovallir e Kumar (2004) e Jonkergouw *et al.* (2008).

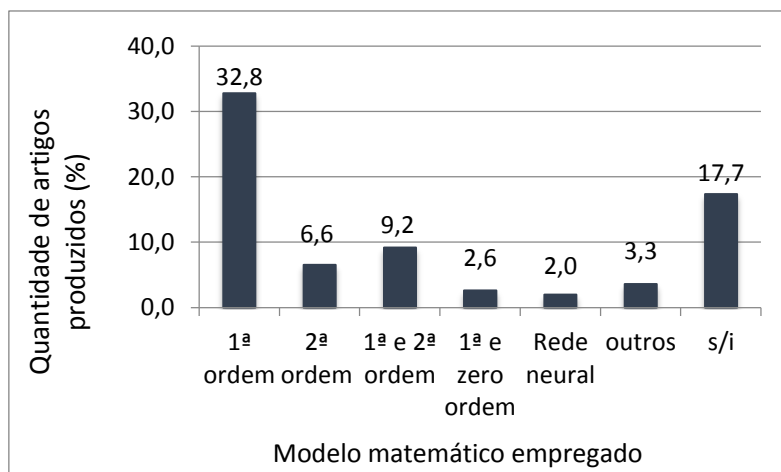


Figura 3. Principais modelos matemáticos utilizados para prever o decaimento do cloro.

Além dos modelos matemáticos, simuladores hidráulicos foram empregados em 27,9% dos artigos como ferramenta para monitorar as características hidráulicas do sistema de distribuição e a qualidade da água, como o residual de cloro na tubulação. O software EPANET, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) foi o mais usado nos trabalhos (19,3 %) seguido por AQUASIM (3,6 %). Outros softwares



utilizados em menores proporções foram WaterCAD (0,7%), FLUENT (1,0 %), Piccolo (0,3 %).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a aplicação da metodologia *Mapping study* para buscar e classificar os artigos referentes ao decaimento de cloro em redes de distribuição de água observou-se um número considerável de publicações provenientes de diversas partes do mundo. Isto mostra que a problemática do decaimento de cloro é de interesse mundial, visto que interfere na qualidade da água e reflete na saúde da população, além disso, a abrangência mundial do assunto está relacionada ao fato de o cloro ser o desinfetante mais usado no tratamento de água. A modelagem matemática se mostrou presente em grande parte dos artigos, confirmando que é uma ferramenta importante no controle da demanda de cloro, sendo que os modelos cinéticos de primeira ordem são os mais empregados na previsão da concentração de cloro ao longo da rede. O EPANET sobressaiu quanto aos demais, talvez pelo fato de ser de domínio público, não sendo necessária licença para o seu uso, tornando-o acessível aos pesquisadores interessados.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2. 914, de 12 de dezembro de 2011. Procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2011.

BROAD, D. R.; DANDY, Graeme Clyde; MAIER, Holger R. Water distribution system optimization using metamodels. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 3, p. 172-180, 2005.

CRUZ, Shirley; DA SILVA, Fabio Q. B.; CAPRETZ, Luiz Fernando. Forty years of research on personality in software engineering: A mapping study. **Computers in Human Behavior**, v. 46, p. 94-113, 2015.

DANIEL, Luiz Antônio *et al.* Métodos alternativos de desinfecção da água. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico-PROSAB. RiMa artes e textos, São Carlos, 2001. Disponível em <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/LuizDaniel.pdf>. Acesso em 18/03/2016.

DE CASTRO, Alfred Luciano Fabio Gomes; DA SILVA, Orlando Rodrigues; SCALIZE, Paulo Sergio. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. **Multi-Science Journal**, v. 1, n. 2, p. 66-73, 2015.

DE CASTRO PEREIRA, Maria Eveline; COSTA, Marco Antonio Ferreira da; BORBA, Cintia de Moraes; JURBERG, Cláudia. Construção do conhecimento em biossegurança: uma revisão da produção acadêmica nacional na área de saúde (1989-2009). **Saúde e Sociedade**, v. 19, n. 2, p. 395-404, 2010.

DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendência. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 685-698, 2015.

DI BERNADO, Luiz. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

FISHER, Ian; KASTL, George; SATHASIVAN, Arumugam. A suitable model of combined effects of temperature and initial condition on chlorine bulk decay in water distribution systems. **Water research**, v. 46, n. 10, p. 3293-3303, 2012.

GIBBS, Matthew S. et al. Investigation into the relationship between chlorine decay and water distribution parameters using data driven methods. **Mathematical and computer modelling**, v. 44, n. 5, p. 485-498, 2006.

HUA, F.; WEST, J.R.; Barker, R.A.; Forster, C.F. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. **Water Research**, v. 33, n. 12, p. 2735-2746, 1999.

HELBLING, Damian E.; VANBRIESEN, Jeanne M. Modeling residual chlorine response to a microbial contamination event in drinking water distribution systems. **Journal of Environmental Engineering**, v. 135, n. 10, p. 918-927, 2009.

JONKERGOUW, P. M. et al. Water quality model calibration under unknown demands. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 4, p. 326-336, 2008.

LIU, Bo et al. Chlorine Decay Models and Influencing Factors. In: **Applied Mechanics and Materials**. 2014. p. 746-751.

MEYER, Sheila T. O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **Caderno Saúde Pública**, v. 10, n. 1, p. 99-110, 1994.

MONTEIRO, L. et al. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 1192-1200, 2014.

MUNAVALLI, G. R.; KUMAR, MS Mohan. Dynamic simulation of multicomponent reaction transport in water distribution systems. **Water research**, v. 38, n. 8, p. 1971-1988, 2004.

MUÑOZ, L., MAZON, J. N., & TRUJILLO, J. ETL process modeling conceptual for data warehouses: a systematic mapping study. **Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)**, v. 9, n. 3, p. 358-363, 2011.

SADIQ, Rehan; RODRIGUEZ, Manuel J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. **Science of the Total Environment**, v. 321, n. 1, p. 21-46, 2004.

SATHASIVAN, Arumugam; FISHER, Ian; KASTL, George. Simple method for quantifying microbiologically assisted chloramine decay in drinking water. **Environmental science & technology**, v. 39, n. 14, p. 5407-5413, 2005.



WOLFE, R., WARD, N., & OLSON, B. (1985). Inactivation of heterotrophic bacterial populations in finished drinking water by chlorine and chloramines. **Water Research**, v. 19, n. 11, p. 1393-1403.

WU, Zheng Yi. Optimal calibration method for water distribution water quality model. **Journal of Environmental Science and Health Part A**, v. 41, n. 7, p. 1363-1378, 2006.