



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia - FT



JULIA PERA MURASAKI

**SIMULAÇÃO DE UM EVENTO DE CONTAMINAÇÃO POR PESTICIDA EM UMA REDE
PILOTO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Limeira
2020



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Tecnologia - FT



JULIA PERA MURASAKI

**SIMULAÇÃO DE UM EVENTO DE CONTAMINAÇÃO POR PESTICIDA EM UMA REDE
PILOTO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Orientadora: Profa. Dra. Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro
Coorientadora: Eva Caroline Martins Oliveira

Limeira
2020

Resumo

Uma resposta apropriada e eficaz é necessária para minimizar os riscos que uma contaminação em redes de distribuição de água pode representar, e ao mesmo tempo para manter o mínimo de interrupções no fornecimento de água. Quando um contaminante químico entra na rede, a empresa responsável pelo fornecimento de água recebe as tarefas desafiadoras de delinear a extensão da contaminação, isolando as áreas contaminadas, remediando as zonas afetadas e trazendo o sistema de volta às operações normais no final do evento. Considerando que os eventos de contaminação podem ser acidentais ou intencionais, e que o sistema de abastecimento apresenta uma vulnerabilidade, este trabalho buscou simular uma contaminação em uma rede de escala piloto, verificando a eficiência do cloro como indicador de contaminantes. A partir do uso de um software de modelagem hidráulica e sua extensão, EPANET-MSX, foi monitorado a concentração de cloro em dois eventos de contaminação utilizando um pesticida da família organofosforado, malation. Avaliando o decaimento da concentração do cloro ao reagir com o contaminante.

Palavras-chaves: Rede de distribuição de água, cloro, contaminação química.

Abstract

An appropriate and effective response is needed to minimize the risks that contamination in water distribution networks can offer, and at the same time to keep water supply without interruptions. When a chemical contaminant enters the network, the company responsible for water supply is given the challenging task of delineating the extent of the contamination, isolating the contaminated areas, remediating the affected areas and bringing the system back to normal operations at the end of the event. Considering that the contamination events can be accidental or intentional, and that the distribution system presents a vulnerability, this work sought to simulate a contamination in a pilot scale network, checking the efficiency of chlorine as an indicator of contaminants. Using a hydraulic modeling software and its extension, EPANET-MSX, the chlorine concentration was monitored in two contamination events using a pesticide from the organophosphate family, malathion. Evaluating the decay of chlorine concentration when reacting with the contaminant.

Keywords: Water distribution network, chlorine, chemical contamination.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	8
2.1 OBJETIVO GERAL	8
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	9
3.1 VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL	9
3.2 MALATION	9
4. METODOLOGIA	11
4.1 AMPLIAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	11
4.2 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA	13
4.3 CONTAMINANTE	13
4.4 ESTUDO DAS INFLUÊNCIAS DOS ASPECTOS DE ENGENHARIA	14
5. ESTUDO DE CASO	15
5.1 INFLUÊNCIAS DOS ASPECTOS DE ENGENHARIA	15
5.2 MODELAGEM NO EPANET 2.0	17
5.3 VERIFICAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO CLORO E DO CONTAMINANTE ATRAVÉS DO EPANET-MSX	20
6. CONCLUSÃO	23
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1. INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de água potável (SDA) é responsável por fornecer aos consumidores água em quantidade e qualidade satisfatórias, e por isso, apresenta-se como grande modelo de tomada de decisão, complexo e de difícil operacionalidade. Nos últimos anos, as empresas gestoras desses sistemas passaram a reconsiderar os mecanismos de gestão, que tradicionalmente foram implantados, com a finalidade de melhorar os serviços prestados e garantir decisões estratégicas e operacionais mais confiáveis (SANDEEP, K., RAKESJ, 2011; BARIGOV *et al.*, 2013; BRENTAN e LUVIZOTOO Jr., 2014; KUREK e OSTEFELD, 2014).

A água é de extrema importância para a sobrevivência humana possuindo diversos usos, em destaque a agricultura, o uso industrial e o consumo pessoal. A água é considerada um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico, é um elemento essencial com influência direta na saúde humana. A sua integridade deve estar garantida para os devidos usos, principalmente para a água de consumo humano, uma vez que é considerada veículo de doenças causadas por organismos patogênicos. Grande parte das doenças presentes em países em desenvolvimento, são provenientes da água em qualidade insatisfatória. No Brasil, estima-se que 60% das infecções hospitalares estejam relacionadas às deficiências do saneamento básico, e que 90% dessas doenças se deve à qualidade imprópria da água (MORAES e JORDÃO, 2002).

Para assegurar a sua qualidade, normas foram estabelecidas, indicando propriedades físicas, químicas e biológicas, de acordo com a utilização da água. Atualmente, a norma responsável pelos padrões de qualidade da água potável, aquela destinada para o uso humano, é a Portaria n 2914/2011 do Ministério da Saúde, a mesma será considerada potável apenas se enquadrada aos parâmetros exigidos pela portaria (BRASIL, 2011). Para isso, os sistemas de tratamento de água utilizam de diversos métodos de tratamento, entretanto a contaminação da água pode ocorrer durante a distribuição, quando há o contato com impurezas ou contaminantes intencionalmente inseridos nas redes de distribuição de água (RDAs). Para evitar a ausência de patógenos, a legislação exige que o responsável pelo fornecimento de água deve assegurar o teor mínimo de cloro residual livre de 0,5 mg/L em todos os pontos de consumo, devido à alta capacidade de desinfecção e oxidação da matéria orgânica. Contudo é importante ressaltar que o cloro também possui um valor máximo permitido de 2 mg/L pois em altas concentrações podem ser prejudicial à saúde dos usuários devido à possibilidade de geração de subprodutos com potencial carcinogênico, além de possuir características desagradáveis como sabor e odor (MEYER, 1994).

Entretanto, há um desafio para manter o nível do cloro entre os limites estabelecidos devido ao decaimento da concentração do cloro durante o tempo e a sua distribuição na rede, provocado pelas reações químicas que ocorrem dentro das tubulações, junto às paredes dos tubos e na massa líquida. Uma solução utilizada para a manutenção da concentração do cloro nas RDAs é a introdução de estações para reforço de cloração em pontos estratégicos do sistema. (SALGADO, 2008).

No caso de situações emergenciais, como contaminações acidentais ou mesmo possíveis contaminações intencionais, tidas como ataques terroristas, que trazem transtornos irreversíveis e transgredem os padrões de saúde e bem-estar dos consumidores, as empresas gestoras dos sistemas ainda estão aprendendo a lidar com essas situações. Devido a sua importância vital para a sociedade, consequências diversas podem surgir de contaminações através da intrusão de compostos químicos ou agentes biológicos na RDA. Analisando os históricos de tentativas de ataques às RDAs, observa-se um grande número de supostas tentativas de contaminações intencionais utilizando agentes químicos e biológicos, como ataques envolvendo mercúrio, cianeto, pesticidas e a Salmonella (GLEIK, 2006). Uma vez que a rede tenha sido contaminada, um protocolo de remediação deve ser iniciado até que todo o sistema consiga ser restabelecido e voltar ao seu funcionamento normal.

Atualmente pesquisas são realizadas para simular eventos de emergência, como os de contaminação em RDA, intencional ou não, de forma a testar e avaliar as decisões de mitigação para proteger a saúde pública, (RASEKH e BRUMBELOW, 2014; SHAFIEE e BERGLUND, 2017). Estes estudos procuram criar e aprimorar protocolos de resposta otimizados mais eficientes, que incluam várias estratégias de respostas. No entanto, buscam eficácia nas operações de válvulas e hidrantes para as ações de descarga da água contaminada e não o tratamento desta água ainda dentro da rede, de modo que possa ser descartada com maior segurança tanto para os consumidores, como para o meio ambiente de forma geral. Se tratando de contaminantes altamente tóxicos, isso ainda é mais preocupante, pois a descarga da água contaminada com estes tipos de contaminantes pode acarretar em graves problemas posteriores, como a adsorção de contaminantes nas tubulações, zonas mortas, vazamentos que podem contaminar o solo e o retorno do poluente à água devido a pressão negativa.

O cenário atual é de grande uso de agrotóxicos, a acessibilidade à certos tipos de compostos como os pesticidas é facilitada pelo abundante uso. Os agrotóxicos são compostos químicos utilizados extensivamente na agricultura, para o controle químico de espécies espontâneas em ambiente urbano e de vetores, classificados como herbicidas, inseticidas, fungicidas e outros. Aproximadamente 45% da produção anual de comida é perdida devido à infestação de pestes e por essa razão os pesticidas são utilizados em grande escala. O consequente acúmulo desta molécula no organismo provoca efeitos tóxicos sobre diferentes órgãos e sistemas, como alterações no sistema nervoso, imunológicas, endócrinas e outras (ABHILASH e SINGH, 2009). O malation é um exemplo de pesticida, ele pertence ao grupo dos organofosforados e atua na inibição da colinesterase do sistema nervoso do inseto, é utilizado em várias culturas para controle de espécies não desejadas como pulgões, besouros e mosquitos (ATSDR, 2003).

Como apresentado, muitos fatores dificultam o controle da qualidade da água nas RDAs como o decaimento do cloro, as contaminações acidentais e as intencionais. Para auxiliar no monitoramento e manutenção desses sistemas de abastecimento, alguns simuladores hidráulicos atuam como ferramentas de

pesquisa de monitoramento da qualidade de água durante o processo da distribuição. Os softwares são capazes de simular redes hipotéticas ou reais reproduzindo as condições hidráulicas, desse modo permitindo previsões de parâmetros físico-químicos de maneira eficaz, como por exemplo, o teor do cloro em cada nó de um sistema simulado.

Entendendo a vulnerabilidade das RDAs e considerando o fácil acesso aos agentes químicos por conta da sua grande disponibilidade, neste trabalho ampliou-se uma rede piloto de distribuição de água do laboratório de hidráulica da Faculdade de Tecnologia da Unicamp com a finalidade de conduzir uma simulação de um evento de contaminação por pesticida. Através do método de detecção de contaminação na rede a partir do monitoramento de um parâmetro de qualidade de água, utilizando como ferramentas softwares hidráulicos e de qualidade de água.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal simular um evento de contaminação em uma rede real utilizando um pesticida e detectar a presença do contaminante através do monitoramento de um parâmetro de qualidade de água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 Realizar levantamento bibliográfico sobre estudos de ataques terroristas em RDA, contaminação acidental e qualidade da água em SDA;

2.2.2 Ampliar da rede de distribuição de água do laboratório;

2.2.3 Estudar as influências dos aspectos de engenharia e modelar a rede no software EPANET 2.0;

2.2.4 Estudar sobre o malation;

2.2.5 Simular evento de contaminação com malation;

2.2.6 Verificar o comportamento do cloro na rede piloto a partir dos softwares EPANET 2.0 e EPANET-MSX e detectar a contaminação na rede.

3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1 VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL

Devido a grande importância para a sociedade, a água que chega nas residências poder ser utilizada como um meio de ataque e atingir inúmeros alvos ao mesmo tempo. Alguns casos de ameaças terroristas aos sistemas de distribuição de água potável (SDAs) já ocorreram, reiterando a necessidade de monitoramento e segurança das redes. Além de atos intencionais, as contaminações podem ocorrer acidentalmente, como já ocorridos nos Estados Unidos em 2014, quando um acidente industrial afetou 300.000 consumidores (ZOLGHADR, 2017).

O cuidado nas tomadas de decisões quando ameaças ao SDA são identificadas é de extrema importância, uma vez que é o sistema responsável por fornecer aos consumidores água em quantidade e qualidade satisfatória. Neste estudo foram criados modelos de suporte de tomada de decisões para auxiliar operadores nestes momentos críticos, com a intenção de reduzir os impactos à saúde pública e às interrupções no sistema (SANDEEP, 2011).

Outros estudos, como o de Shafiee (2017) e Rakesh (2014), conduzem pesquisas para simular eventos de emergência e testar decisões de mitigação para proteger a saúde pública. Estes trabalhos procuram criar e aprimorar protocolos de resposta para as situações de contaminação do SDA, sendo a contaminação acidental ou não.

3.2 MALATION

O malation é um inseticida organofosforado produzido artificialmente e comumente usado para controlar mosquitos e uma variedade de insetos que atacam frutas, vegetais, plantas paisagísticas e arbustos. Também pode ser encontrado em outros produtos pesticidas usados em ambientes fechados e em animais de estimação para controlar carrapatos e insetos, como pulgas e formigas. É comumente encontrado como o ingrediente ativo em produtos de controle de mosquitos, sendo estes produtos compostos majoritariamente de malation que frequentemente são aplicados não diluídos (ATSDR, 2003; FERREIRA et al., 2019). A fórmula molecular e estrutura química são representadas na figura 1.

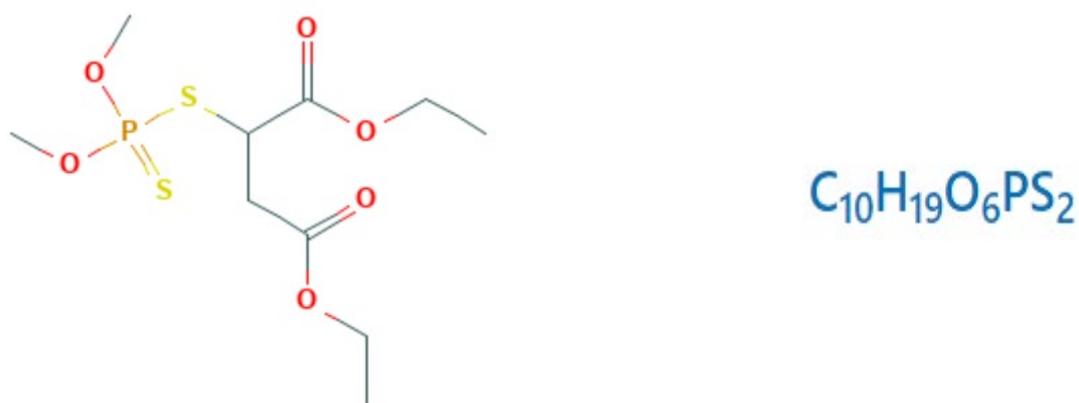


Figura 1 – Estrutura Química e Fórmula Molecular do Malation. Fonte: NCBI, 2020

Como os produtos pesticidas são inerentemente tóxicos, nenhuma exposição a pesticidas é isenta de riscos. A probabilidade de ocorrência de efeitos adversos à saúde decorrentes da exposição a qualquer pesticida, incluindo malation, depende principalmente da quantidade de pesticida que uma pessoa entra em contato e tempo de exposição. Além disso, a idade, sexo, composição genética, estilo de vida e características gerais de saúde de uma pessoa podem afetar sua probabilidade de sofrer efeitos adversos à saúde como resultado da exposição a pesticidas (LIMA et al, 2009).

Exposições de curto prazo mas a altos níveis de malation podem afetar o sistema nervoso, causando uma variedade de sintomas, incluindo dores de cabeça, náusea, tontura, fraqueza, câibras, diarreia, transpiração excessiva, visão turva e aumento da frequência cardíaca. O contato repetido da pele com o malation tem sido associado a erupção cutânea (reação alérgica) em alguns indivíduos expostos ao malation, como na isca de xarope de milho. Não há estudos examinando se o uso de malation no controle de mosquitos causou efeitos à saúde a longo prazo em humanos. O malation é aplicado em concentrações muito baixas para controlar os mosquitos. É improvável que ocorram efeitos adversos à saúde como resultado desse uso para a maioria das pessoas, mas alguns indivíduos podem apresentar efeitos à saúde. Por esses motivos, os indivíduos devem considerar tomar medidas para minimizar sua exposição ao pesticida, se for aplicado para controlar mosquitos (ATSDR, 2003; EDWARDS, F.L. e TCHOUNWOU, P.B., 2005).

Efeitos em algumas glândulas endócrinas e alterações em alguns níveis hormonais foram relatados em animais de laboratório, em doses orais repetidas do contaminante. A quantidade de malation dada aos animais nesses estudos, no entanto, excede a quantidade que os humanos provavelmente entrarão em contato com a pulverização de malation (TORIANI, 2017).

4. METODOLOGIA

4.1 AMPLIAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

O Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Tecnologia da Unicamp possui uma planta piloto de uma RDA. A fim de tornar o sistema mais próximo à realidade, fez-se uma ampliação desta rede piloto. A figura 2 mostra a rede piloto antes de sua ampliação. Antes o sistema possuía 120 m de comprimento. Para a ampliação da rede foram utilizados 161,57 m de mangueira Cristal 3/4 com 2,0 mm de espessura e duas bobinas grandes de madeira como representadas nas figuras 3. Depois da ampliação o sistema passou a ter 281,57 m de comprimento, contendo um reservatório com capacidade de 220 L, um tubo venturi, uma bomba hidráulica do tipo periférica com a potência de 0,5 CV modelo apm37 da marca Lepono, 1 hidrômetro e 9 pontos de monitoramento contendo um manômetro em cada.



Figura 2 - Rede Piloto com duas bobinas e 1 reservatório. Fonte: Autoria Própria.



Figura 3 - Bobinas 3 e 4 depois da ampliação da rede. Fonte: Autoria Própria.

Depois de ampliada a rede o esquema pode ser descrito da seguinte forma: O reservatório é ligado a uma bomba que impulsiona a água para o restante do sistema. Inicialmente a água é conduzida passando por um tubo venturi e segue para os quatro setores, em formato de bobinas, ligadas em série. As bobinas são suportes de madeira para a sustentação dos setores da rede, cada bobina possui dois pontos de coleta. O primeiro ponto de coleta, denominado S11, se inicia na entrada do setor S1, e após 9 voltas (extensão= 24,12 m) ao redor da bobina de diâmetro igual a 0,85 m há o segundo ponto de coleta S12. Após o S12 a rede percorre por mais 9 voltas ao redor da bobina e o setor finaliza em um hidrômetro seguido de um terceiro ponto de coleta S13. O setor S1, portanto, possui uma extensão de 50,91 m.

Após o setor S1 inicia-se o S3 que possui uma extensão de entrada igual a 2,8 m, seguido do ponto de coleta indicado por S31 situado após 15 voltas (extensão= 49,5 m) em uma bobina de diâmetro igual a 1,05 m, em seguida há o segundo ponto de coleta do setor, S32, localizado à 9 voltas ao redor da bobina (extensão= 29,7 m). O setor finaliza com mais 2,98 m de trecho de saída até o início do próximo setor, S4. A extensão total do setor S3 é de 84,98 m.

O próximo setor denominado S4 possui um trecho de entrada de 2,38 m até o primeiro ponto de coleta S41, o setor possui uma extensão de 49,5 m, 15 voltas ao redor da bobina de diâmetro igual a 1,05 cm. Após o S41 mais 8 voltas são dadas ao redor da bobina (extensão= 26,4 m) até o S42, finalizando com um trecho de saída de 2,73 m. O setor S4 totaliza 81,01 m de extensão.

Por fim, a rede finaliza no setor S2, que possui uma bobina com diâmetro de 0,853 m. A entrada do setor possui 2,53 m seguidos de 10 voltas ao redor da bobina com o ponto de coleta S21 (extensão= 28,8 m). Após mais 8 voltas (extensão= 21,44 m) há o segundo ponto de coleta S22. A saída do setor possui 1,6 m e a extensão total corresponde a 54,37 m.

Após o setor S2 a rede é conectada novamente ao reservatório através de um trecho de 7,35m, iniciando todo o processo novamente. A extensão total da rede piloto agora ampliada é de 281,57 m, a mesma é representada na figura 4.



Figura 4 - Rede piloto ampliada. Fonte: Autoria Própria

4.2 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA

O EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de distribuição em pressão. É uma ferramenta gratuita e foi selecionada para simular a rede deste trabalho porque permite obter os valores de vazão e pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos passos de cálculo. O EPANET pode ajudar a analisar estratégias alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água através do sistema, fornece um ambiente integrado para editar dados de entrada da rede, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos. Possibilita visualizar mapas da rede com codificação a cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e gráficos de isolinhas (ROSSMAN, 2000).

O EPANET é um software muito utilizado para a modelagem de sistemas de distribuição de água mas é limitado quanto a estudos da qualidade da água, pois é capaz de analisar apenas uma espécie química. Foi criado então uma extensão para esse software, onde seria capaz de simular múltiplas espécies químicas interagindo, o EPANET-MSX, possibilitando a modelagem de sistemas mais complexos (SHANG e UBER, 2008).

Utilizou-se esse software e sua extensão para monitorar a qualidade da água no sistema que representa a rede hidráulica presente no laboratório através da simulação da interação entre as espécies químicas presentes na água potável e o contaminante em estudo na rede real inserida no software. A extensão MSX, através de um arquivo de entrada contém as espécies envolvidas e o sistema de reações químicas que ocorrem dentro da rede, e disponibiliza um arquivo de saída que corresponde a concentração das espécies analisadas ao longo do tempo.

4.3 CONTAMINANTE

O contaminante a ser utilizado na pesquisa é o malation, um pesticida organofosforado que tem sido amplamente utilizado no controle de insetos pragas na agricultura moderna, bem como no controle de mosquitos, moscas e outros insetos domésticos em torno de casas e jardins (ATSDR, 2003). Dentre todos os contaminantes, o malation foi o escolhido por sua ampla disponibilidade e uso, portanto poderia ser facilmente utilizado para a contaminação de redes de distribuição de água. Somente nos EUA, aproximadamente 6800 toneladas de ingrediente ativo de malation são aplicadas anualmente e devido à sua estabilidade físico-química e às grandes quantidades aplicadas, o malation pode causar uma extensa contaminação em águas naturais (USEPA, 2001). O malation pode causar doenças neurológicas graves, inibindo a enzima acetilcolinesterase, pode induzir danos ao DNA e cromossômicos em seres humanos e tem efeitos citotóxicos e genotóxicos em mamíferos. Em 2015, a Agência Internacional de Pesquisa sobre Câncer (IARC) avaliou a carcinogenicidade

do contaminante e o classificou como Grupo 2A, que provavelmente é carcinogênico para seres humanos. A remoção eficiente de malation da água potável é, portanto, considerada importante para proteger a saúde pública (TCHOUNWOU *et al*, 2015).

Os processos convencionais de tratamento de água são ineficazes na remoção de malation, devido ao seu pequeno tamanho molecular e à sua solubilidade em água relativamente alta (145 mg/L a 25 ° C). Além de que muitos estudos apontaram que o composto é transformado para uma forma molecular mais tóxica, o malaaxon, via substituição do átomo de enxofre da ligação fósforo e enxofre na molécula parental por um produto de transformação de ligação dupla de oxigênio átomo de oxigênio formando um átomo de fósforo e oxigênio, quando ocorre processos de cloração. O malaaxon é mais persistente na água clorada e pelo menos 100 vezes mais tóxico que o malation, levando a um risco muito maior para a saúde humana. Portanto, é importante desenvolver um método de tratamento eficaz que possa desintoxicar completamente as soluções de água de malation (BEDUCK *et al*, 2001; ATSDR, 2003).

4.4 ESTUDO DAS INFLUÊNCIAS DOS ASPECTOS DE ENGENHARIA

Realizou-se um experimento para estudar as influências dos aspectos de engenharia no sistema. O experimento trata-se de uma simulação da rede piloto, primeiramente a bomba do sistema foi ligada, após dez minutos esperando a estabilização do sistema, iniciou-se as medições dos parâmetros de cotas, pressões, vazões e extensões da rede recém expandida.

- Para a medição das extensões da rede de abastecimento simulada e de seus setores, utilizou-se uma trena.
- Para a medição da pressão, foi observado os valores indicados nos manômetros presentes em cada ponto de coleta.
- Para a medição das cotas utilizamos a trena e as medidas foram realizadas em referência ao chão.
- Para a medição da vazão do sistema, primeiramente realizou-se a leitura do hidrômetro. Logo após, a vazão de cada ponto de coleta foi medida, a partir do volume de água retirada por minuto. O volume da água retirada foi pesada em uma balança e a unidade convertida para litros.

5. ESTUDO DE CASO

5.1. INFLUÊNCIAS DOS ASPECTOS DE ENGENHARIA

A tabela 1 apresenta os valores (em metros) separados por trecho, a extensão total do sistema e a quantidade de voltas da tubulação ao redor da bobina de cada setor.

Tabela 1 - Dados referentes a extensão do sistema.

TRECHO		EXTENSÃO (m)	VOLTAS
RESERVATORIO	BOMBA	1,30	-
BOMBA	TUBO VENTURI	1,65	-
ENTRADA S1		1,87	-
S11	S12	24,12	9
S12	SAIDA S1	24,12	9
SAIDA S1		0,80	-
ENTRADA S2		2,53	-
ENTRADA S2	S21	28,80	10
S21	S22	21,44	8
SAIDA S2		1,60	-
ENTRADA S3		2,80	-
ENTRADA S3	S31	49,50	15
S31	S32	29,70	9
SAIDA S3		2,98	-
ENTRADA S4		2,38	-
ENTRADA S4	S41	49,50	15
S41	S42	26,40	8
SAIDA S4		2,73	-
S2	RESERVATORIO	7,35	-
TOTAL		281,57	

A tabela 2 apresenta os valores medidos através dos manômetros para cada ponto de coleta da rede piloto.

Tabela 2 - Pressões referentes ao sistema.

PONTO	PRESSÃO (mca)
BOMBA	30,50
S11	8,50
S12	9,00
HIDRÔMETRO	7,50
S31	6,00
S32	4,00
S41	2,50
S42	2,10
S21	2,20
S22	1,20

A tabela 3 apresenta os valores em metros das cotas medidas tendo o chão como referencial.

Tabela 3. Medidas das cotas referentes ao sistema.

COTAS	
PONTO	COTAS (m)
RESERVATÓRIO	1,35
BOMBA	1,16
ENTRADA S1	0,96
S11	0,96
S12	0,79
SAIDA S1	0,50
HIDRÔMETRO	0,62
ENTRADA S3	0,80
S31	1,02
S32	1,40
SAIDA S3	1,40
ENTRADA S4	0,83
S41	1,20
S42	1,40
SAIDA S4	1,40
ENTRADA S2	0,53
S21	0,75
S22	0,98
SAIDA S2	0,98
RESERVATÓRIO	1,35

A vazão do sistema medida através da leitura do hidrômetro, localizado entre os setores S1 e S3, é igual a 9,13L/min. Os dados das medidas de volume, peso e tempo são expressas na tabela 4. O valor da vazão é calculado através da relação entre volume e tempo conforme a equação 01, onde “Q” representa a vazão em L/minutos, “V” o volume em Litros e “T” o tempo em minutos.

$$Q = V \div T \quad (01)$$

Tabela 4 – Medidas de vazão referentes ao sistema.

S11 ABERTA		S21 ABERTA		S31 ABERTA		S41 ABERTA	
Peso do Balde com Água	7,55	Peso do Balde com Água	8,4	Peso do Balde com Água	5,2	Peso do Balde com Água	7,2
Peso do Balde sem Água	0,5						
Volume em L	7,05	Volume em L	7,9	Volume em L	4,7	Volume em L	6,7
Tempo em s	36,44	Tempo em s	47,46	Tempo em s	23,93	Tempo em s	51,31
Tempo em minutos	0,6073333333	Tempo em minutos	0,791	Tempo em minutos	0,3988333333	Tempo em minutos	0,8551666667
Vazão	11,60812294	Vazão	9,987357775	Vazão	11,78437108	Vazão	7,834730072
Pressão Bomba	29,5	Pressão Bomba	30	Pressão Bomba	29	Pressão Bomba	29,5
S12 ABERTA		S22 ABERTA		S32 ABERTA		S42 ABERTA	
Peso do Balde com Água	7,2	Peso do Balde com Água	7,65	Peso do Balde com Água	7,15	Peso do Balde com Água	6,3
Peso do Balde sem Água	0,5						
Volume em L	6,7	Volume em L	7,15	Volume em L	6,65	Volume em L	5,8
Tempo em s	32,58	Tempo em s	45,45	Tempo em s	44,48	Tempo em s	54,73
Tempo em minutos	0,543	Tempo em minutos	0,7575	Tempo em minutos	0,7413333333	Tempo em minutos	0,9121666667
Vazão	12,3388582	Vazão	9,438943894	Vazão	8,970323741	Vazão	6,358487119
Pressão Bomba	29	Pressão Bomba	30,5	Pressão Bomba	29	Pressão Bomba	29,8

Através desses dados, observou-se que a vazão dos pontos de cada setor foi consideravelmente próxima, porém também é possível notar que a vazão apresenta uma diminuição nos últimos pontos de coleta.

5.2 MODELAGEM NO EPANET 2.0

Inseriu-se no software os dados da rede real, a cota de cada ponto, comprimento de cada setor e as especificações da bomba. A figura 5 representa o modelo da rede simulada no EPANET 2.0.

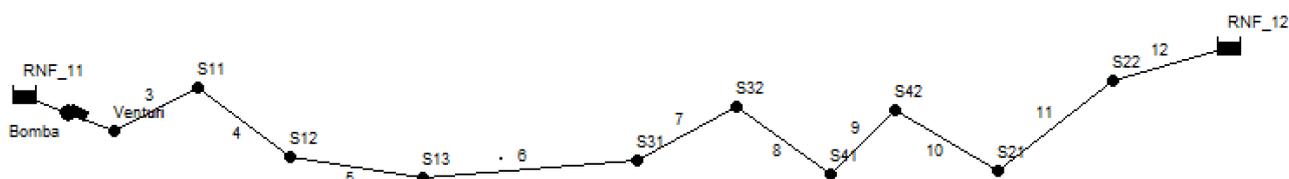


Figura 5 – Representação da rede piloto no software. Fonte: Autoria Própria.

A simbologia está representada na figura 6. Os trechos são as tubulações que apresentam comprimento e diâmetro iguais as reais medidas da rede piloto do laboratório. RNF significa reservatório de nível fixo, onde o RNF_11 e RNF_12 representam o único reservatório da rede piloto, simulando o circuito fechado. A bomba está localizada logo em seguida do RNF_11, inseriu-se as especificações da bomba e obteve-se a curva representada na figura 7. Os pontos pretos são os nós, representando os pontos de coleta, identificados pela letra S seguida do número de seu setor e posição.

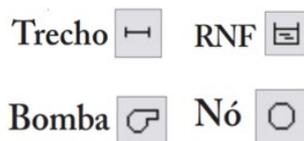


Figura 6 – Representação da rede piloto no software. Fonte: ROSSMAN, 2000.

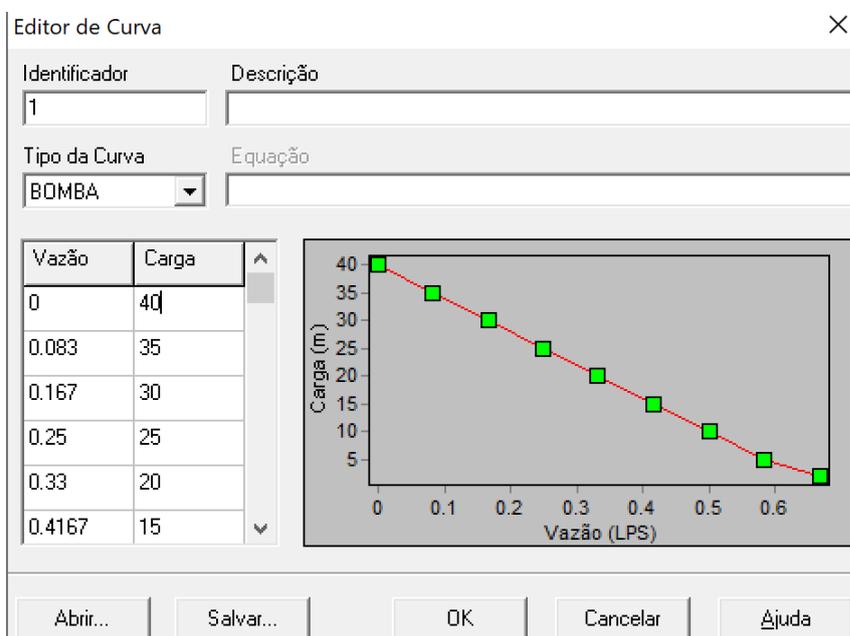


Figura 7 - Curva da Bomba. Fonte: Autoria Própria

A simulação do software é capaz de apresentar valores de vazão e de pressão para os nós. Um dos fatores que influenciam os valores de vazão e pressão obtidos é o chamado coeficiente de rugosidade, ou coeficiente de Hazen-Williams. Este coeficiente está presente na fórmula empírica de Hazen-Williams, equação 2, para o cálculo da perda de carga em tubos. Segundo a tabela 5, o coeficiente de rugosidade para o material plástico é de 150, no entanto esse valor é associado ao tipo de plástico P.V.C., já o material utilizado

no projeto é a mangueira Crystal. Considerando a diferença no tipo de plástico, o tempo de uso e as condições da tubulação, os valores utilizados para a simulação foram os descritos na tabela 6, diferentes do valor de 150 apresentado na literatura. Os valores dos coeficientes utilizados foram ajustados a partir de testes através do software, considerando a falta de experimentos para a calibração da rede piloto do laboratório devido à paralização das atividades por conta da pandemia do COVID-19 que iniciou no Brasil em março de 2020.

$$H_{pc} = 10,643 \times Q^{1,82} \times C^{-1,85} \times D^{-4,87} \times L \quad (02)$$

Onde Q representa a vazão, H_{pc} a perda de carga, D o diâmetro interno da tubulação, L o comprimento e C o coeficiente de rugosidade que varia conforme o seu material e condição, influenciando na perda de carga, alterando portanto a pressão e a velocidade do escoamento.

Tabela 5 - Valores do coeficiente C (PORTO, 1998).

Aço corrugado (chapa ondulada)	C=60	Aço com juntas lock-bar, tubos novos	130
Aço com juntas lock-bar, em serviço	90	Aço galvanizado	125
Aço rebitado, tubos novos	110	Aço rebitado, em uso	85
Aço soldado, tubos novos	130	Aço soldado, em uso	90
Aço soldado com revestimento especial	130	Cobre	130
Concreto, bom acabamento	130	Concreto, acabamento comum	120
Ferro fundido, novos	130	Ferro fundido, após 15-20 anos de uso	100
Ferro fundido, usados	90	Ferro fundido revestido de cimento	130
Madeiras em aduelas	120	Tubos extrudados, P.V.C.	150

Tabela 6 - Valores do coeficiente de rugosidade (C) ajustados para a rede piloto.

Trecho	C
S11 - S12	100,00
S12 - S13	220,00
S13 - S31	230,00
S31 - S32	250,00
S32 - S41	250,00
S41 - S42	250,00
S42 - S21	250,00
S21 - S22	250,00
S22 - RNF	100,00

5.3. VERIFICAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO CLORO E DO CONTAMINANTE ATRAVÉS DO EPANET-MSX

Duas espécies serão analisadas através do EPANET-MSX, o cloro como indicador de contaminante e o malation como o contaminante. As reações químicas utilizadas nesse projeto são baseadas nos trabalhos de Stephen et al. (2009) que descrevem as reações estequiométricas para organofosforados (Equações 3, 4, 5 e 6). Onde é descrita a reação do cloro aquoso em contato com um organofosforado genérico representado por “OP” e seu subproduto de transformação, o oxon “OPO”. Nas reações podemos observar a presença de constantes “k”, os valores dessas constantes de cloração e hidrólise foram obtidos experimentalmente através da pesquisa citada, os valores das constantes para o malation e malaoxon estão representados na tabela 8, onde os valores de $K_{N,OP}$ são os coeficientes no meio neutro e $K_{B,OP}$ no meio alcalino.

$$\frac{d[HOCl]_T}{dt} = -5k_{HOCl,OP}[HOCl][OP] - k_{OCl,OP}[OCl^-][OP] - k_{OCl,OPO}[OCl^-][OPO] \quad (03)$$

$$\frac{d[OP]_T}{dt} = -k_{HOCl,OP}[HOCl][OP] - k_{h,OP}[OP] - k_{OCl,OP}[OCl^-][OP] \quad (04)$$

$$\frac{d[OPO]_T}{dt} = k_{HOCl,OP}[HOCl][OP] - k_{h,OPO}[OPO] - k_{OCl,OPO}[OCl^-][OPO] \quad (05)$$

$$\frac{d[OPH]_T}{dt} = k_{h,OP}[HOCl][OP] + k_{OCl,OP}[OCl^-][OP] + k_{h,OPO}[OPO] + k_{OCl,OPO}[OCl^-][OPO] \quad (06)$$

Tabela 7 - Valores dos coeficientes “k” para o Malation (STEPHEN et al. 2009)

Pesticida OP	$K_{N,OP}(h^{-1})$	$K_{B,OP}(M^{-1}h^{-1})$	$K_{HOCl,OP}(M^{-1}h^{-1})$	$K_{OCl,OP}(M^{-1}h^{-1})$
MA	$7,92 \times 10^{-5}$	$1,98 \times 10^3$	$1,72(\pm 0,36) \times 10^6$	382 ± 26
MAO	$2,0 \times 10^4$	46,1	-	565 ± 99

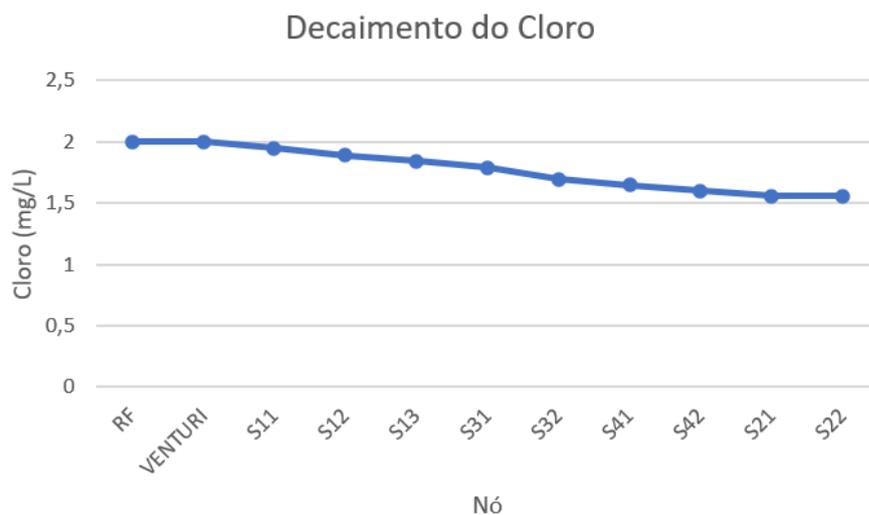
Definiu-se no EPANET-MSX a simulação com um período de 4 dias (96 horas) considerou-se esse tempo suficiente para detectar os eventos de contaminação. Definiu-se também, introdução constante do cloro no reservatório a uma concentração de 2 mg/L, a fim de atender a legislação (BRASIL,2011) correspondente a concentração mínima e máxima de cloro durante toda a distribuição da água e considerando o seu decaimento durante a trajetória.

Simulou-se dois eventos de contaminação, introduzindo malation. O primeiro evento simulado ocorre no primeiro dia, tendo início na hora 7 com duração de 3 horas. O segundo evento ocorre no terceiro dia, na hora 65 com duração de 5 horas. O malation nos dois casos é introduzido a uma concentração constante de 148 mg/L no ponto de coleta S31. A concentração utilizada do malation foi o valor da solubilidade em água a 20 °C, esse valor foi adotado por representar a maior concentração do contaminante de modo que permanecesse imperceptível na água (NCBI,2020).

Após a simulação o software disponibiliza um arquivo resposta com um relatório de monitoramento a cada 20 minutos, reportando a concentração de cloro e malation para cada ponto na rede modelada. A partir dos resultados gerou-se um gráfico que mostra o decaimento do cloro ao longo do tempo de simulação (Figura 9) e um gráfico de monitoramento do cloro, possibilitando a detecção do contaminante.

A figura 9 expressa o gráfico da concentração de cloro para cada nó. O ponto RF é o reservatório onde o cloro é introduzido, portanto a concentração nesse ponto é máxima, e a concentração mínima observada foi para o ponto S22, 1,56 mg/L. A partir desse gráfico é possível observar o decaimento do cloro ao decorrer da distribuição da água, decaimento total de 22%, mas ainda atendendo ao limite mínimo de cloro indicado pela legislação (BRASIL, 2011).

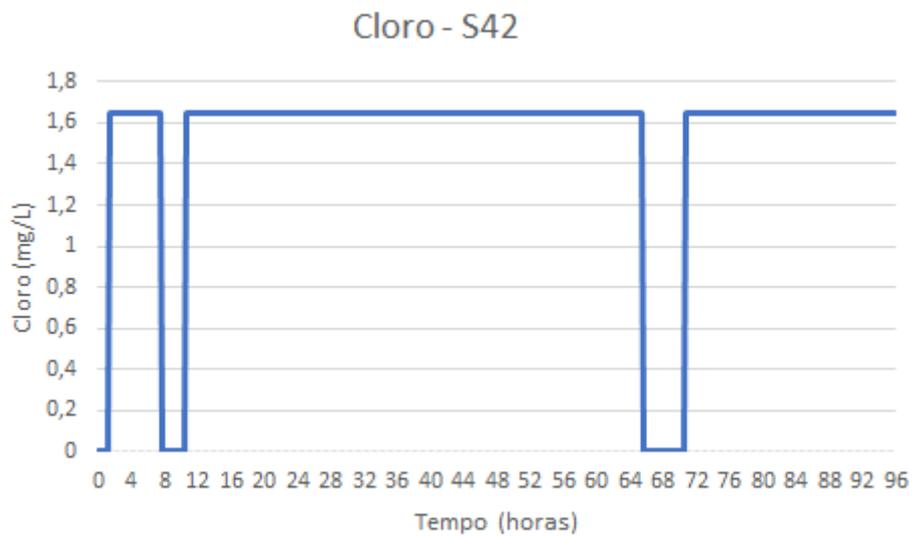
Figura 9 – Gráfico do decaimento do cloro na RDA.



A fim de observar o comportamento do cloro durante a simulação, adotou-se um ponto de monitoramento o nó S42. A partir das concentrações de cloro reportadas pelo software foi possível gerar um gráfico para detectar a presença do contaminante. O gráfico da figura 10 apresenta a concentração de cloro durante as 96 horas de simulação, é possível observar que existe um nível constante de cloro de 1,65 mg/L durante as horas que não possuem contaminação. Nota-se que quando o contaminante é introduzido a concentração do cloro cai significativamente para um valor muito próximo a zero, $9,74 \times 10^{-13}$ mg/L, esse

valor representa o consumo do cloro ao reagir com o contaminante. Este decaimento abrupto é o indício de uma contaminação.

Figura 10 – Comportamento do cloro ao longo de uma simulação de 96 horas com a ocorrência de dois eventos de contaminação.



6. CONCLUSÃO

Os SDAs apresentam uma grande vulnerabilidade e as empresas gestoras devem estar sempre buscando alternativas para a manutenção das redes, seja para a detecção de contaminantes ou para a remediação de um evento intencional. A partir dos resultados apresentados é possível concluir que o monitoramento da concentração do cloro é um indicativo da qualidade da água durante a distribuição em uma RDA. A queda drástica na sua concentração, saindo dos padrões já conhecidos de decaimento em função das reações internas nas tubulações, é um fator indicativo da presença de um contaminante. O monitoramento de cloro portanto, é uma forma de detectar possíveis contaminações acidentais ou intencionais a partir de pesticidas organofosforados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2003). Toxicological profile for Malathion. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Bagirov, A. M. *et al.* (2013) 'An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling', *Mathematical and Computer Modelling*. Elsevier Ltd, 57(3–4), pp. 873–886. doi: 10.1016/j.mcm.2012.09.015.

Brentan, B. M. and Luvizotto Jr., E. (2014) 'Refining PSO Applied to Electric Energy Cost Reduction in Water Pumping Refining PSO Applied to Electric Energy Cost Reduction in Water Pumping', *Water Resources Management*, 4(2), pp. 19–30. doi: 628.161.033.

Beduk, F. Aydim, M. Oszcan, S. (2011) 'Degradation of Malathion and Parathion by Ozonation, Photolytic Ozonation, and Heterogeneous Catalytic Ozonation Processes' *2012 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*

Brasil .Ministério da Saúde. Portaria nº 2914/MS de 2011.

Dantas, R. F., Sans, C. and Esplugas, S. (2011) 'Ozonation of Propranolol: Transformation , Biodegradability , and Toxicity Assessment', 137, pp. 754–759. doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000377.

Eliades, D. G. *et al.* (2015) 'Contamination Event Detection Using Multi-level Thresholds', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 119(1), pp. 1429–1438. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.1003.

Ferreira, Regina Cristina Batista, Papini, Solange, Luchini, Luiz Carlos, & Vieira, Eliane. (2019). Persistence of malathion used in dengue control on household surfaces. *Arquivos do Instituto Biológico*, 86, e0042018. Epub August 15.

Gleick, P. H. (2006) 'Water and terrorism', *Water Policy*, 8, pp. 481–503. doi: 10.2166/wp.2006.035.

Hussein, Salah & Shawki, Mohammad. (2017). Degradation of malathion in aqueous solutions using advanced oxidation processes and chemical oxidation. *Direct Research Journal of Agriculture and Food Science*. 5. 174-185.

Konig, M. 'Grupo simpatizante ao terrorismo cogitou usar arma química nos jogos do Rio', *Folha de São Paulo*, set. 2016.

Kurek, W. and Ostfeld, A. (2014) ‘Multiobjective Water Distribution Systems Control of Pumping Cost, Water Quality, and Storage-Reliability Constraints’, *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT*, 140(February), pp. 184–193. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000309.

Meyer, S.T. (1994). O Uso de cloro na desinfecção de águas a formação de Thihalometanos e os riscos potenciais a saúde pública. *Cad.SaudePubl.*, Rio de Janeiro, 10 (1:99-110), jan/mar, 1994.

Moraes, D. S. de L. e Jordão, B. Q. (2002) ‘Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. *Revista Saúde Pública.*’ São Paulo, vol. 36, n.3, 370-4, 2002.

National Center for Biotechnology Information. PubChem Database. Malathion, CID=4004, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Malathion>

Porto, R. de M. (1998). *Hidráulica básica*. São Carlos: EESC/USP.

Rasekh, A. and Brumbelow, K. (2014) ‘Drinking water distribution systems contamination management to reduce public health impacts and system service interruptions’, *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd, 51, pp. 12–25. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.019.

Rossman, L. A. (2000) *EPANET 2 USERS MANUAL*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-00/057, 2000.

Salgado, S.R.T. (2008) ‘Estudo dos parâmetros de decaimento do cloro residual em sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento.’ 161f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) -Escola de Engenharia de São Carlos.

Sandeep, K., Rakesh, K. (2011) ‘CLIPS based decision support system for water’, *Drinking Water Engineering and Science*, 4, pp. 37–50. doi: 10.5194/dwes-4-37-2011.

Shafiee, M. E. and Berglund, E. Z. (2017) ‘Complex Adaptive Systems Framework to Simulate the Performance of Hydrant Flushing Rules and Broadcasts during a Water Distribution System Contamination Event’, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(4), p. 04017001. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000744.

Shang, F, Uber, J. G.. *EPANET MULTI-SPECIES EXTENSION USER’S MANUAL* U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-00/057, 2008.

Yuan, X. *et al.* (2015) ‘Removal of organophosphate esters from municipal secondary effluent by ozone and UV / H₂O₂ treatments’, *Separation and Purification Technology*. Elsevier B.V., 156, pp. 1028–1034. doi: 10.1016/j.seppur.2015.09.052.

Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O. and Chu, X. (2017) 'Strategic Importance and Safety of Water Resources', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(7), p. 02517001. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001181.