



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

AMANDA RAQUEL BEZERRA DE LIMA

**AVALIAÇÃO DE RISCO DA QUALIDADE DA ÁGUA ATRAVÉS DA
MODELAGEM HIDRÁULICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA
CIDADE DE CAMPINA GRANDE-PB**

**CAMPINA GRANDE
2021**

AMANDA RAQUEL BEZERRA DE LIMA

AVALIAÇÃO DE RISCO DA QUALIDADE DA ÁGUA ATRAVÉS DA MODELAGEM
HIDRÁULICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE
CAMPINA GRANDE-PB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito obrigatório à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador (a): Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento

CAMPINA GRANDE
2021

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

L732a Lima, Amanda Raquel Bezerra de.
Avaliação de risco da qualidade da água através da modelagem hidráulica no Sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande-PB [manuscrito] / Amanda Raquel Bezerra de Lima. - 2021.
47 p. : il. colorido.
Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2021.
"Orientação : Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento , Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."
1. Cloro residual livre. 2. Epanet 2.0. 3. Qualidade da água. 4. Análise de Modos e Efeitos de Falhas - FMEA. I.
Título

21. ed. CDD 628.162

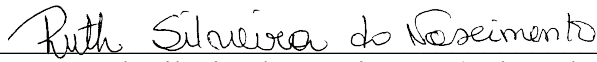
AMANDA RAQUEL BEZERRA DE LIMA

AVALIAÇÃO DE RISCO DA QUALIDADE DA ÁGUA ATRAVÉS DA MODELAGEM
HIDRÁULICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE
CAMPINA GRANDE-PB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Sanitária e
Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia
da Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito obrigatório à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Aprovada em: 26/02/2021.

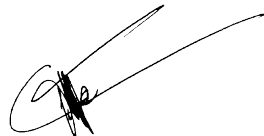
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. D. Rui de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Mestre Cícero Fellipe Diniz de Santana
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Aos meus pais e irmãos, pelo amor e
importância em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Marcia Raquel, e ao meu pai, Carlos Henrique, por sempre me apoiarem em tudo, e dedicarem suas vidas para que a minha e a de meus irmãos seja tão cheias de amor e cuidado.

Aos meus irmãos, Clarissa e Victor, pelo incentivo, confiança e cumplicidade em todos os momentos da minha vida.

À minha família, em especial às minhas tias Gilmara e Danielle, e a minha avó Margarida, por todo amor e cuidado comigo, sempre vibrando e acreditando nas minhas conquistas.

Ao meu namorado, Bertrand Moraes, pelo amor, paciência e companheirismo, por não ter medido esforços para me ver bem durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora Ruth Silveira do Nascimento, por quem tenho tanta admiração, agradeço pelo suporte e por compartilhar seu conhecimento comigo durante os anos de Iniciação Científica e no decorrer da realização deste trabalho. Ao professor Rui de Oliveira, pelos ensinamentos durante todo o curso de graduação, que tanto acrescentaram à minha formação profissional.

Aos amigos da graduação, em especial, Petra, Julianna, Jefferson, Ariel, Sabrina, Adolf, Emília e Luiza, pela amizade e momentos de descontração ao longo dos anos de curso, compartilhando momentos de alegria e colaboração na realização de trabalhos e projetos.

Aos professores e colegas do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da UEPB, por todo o conhecimento e experiências compartilhadas ao longo desses anos.

À Universidade Estadual da Paraíba, que contribuiu para o meu desenvolvimento acadêmico e permitiu que eu conhecesse pessoas que sempre farão parte da minha vida. À todos que contribuíram para a realização deste trabalho, minha gratidão.

“O homem não teceu a teia da vida, ele é dela apenas um fio, o que fizer à teia estará fazendo a si mesmo.”

(Cacique Seattle, 1855)

RESUMO

Tendo em vista que a segurança da qualidade da água de abastecimento público é fator essencial para o desenvolvimento e a saúde dos consumidores, além de ser um direito de todos os cidadãos, pesquisou-se sobre as características do sistema de abastecimento de água de modo a identificar os possíveis impactos que os usuários estão expostos ao consumirem água da rede de distribuição. Para tanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os riscos de degradação da qualidade da água associados às falhas estruturais, operacionais e de manutenção da rede de distribuição de água de bairros localizados na zona de pressão B da cidade de Campina Grande-PB, visando contribuir para a adoção de uma abordagem de gestão mais científica da qualidade da água, tanto do ponto de vista do controle como do ponto de vista da vigilância. A identificação dos riscos foi feita através de ferramentas de simulação do comportamento do indicador cloro residual livre (CRL) na rede, por meio do *software* Epanet 2.0 e da metodologia de análise de risco Análise de Modos e Efeitos de Falhas – FMEA. Os resultados da pesquisa constataram que os maiores riscos são decorrentes da falta de uma rotina de manutenção nos reservatórios, o que os leva a uma maior vulnerabilidade às contaminações, e o não cumprimento do padrão de potabilidade para o CRL em grande parte da rede de distribuição, sendo o mesmo o grande responsável por garantir água segura da estação de tratamento até os pontos de consumo. Conclui-se que, para uma gestão mais qualificada do abastecimento público, as metodologias de análise de risco, juntamente à simulação da rede, aplicadas de forma abrangente e integrada, mostraram-se eficientes para prever o comportamento futuro de um sistema, auxiliando na tomada de decisões por parte dos gestores, visando uma segurança efetiva na qualidade da água distribuída para consumo humano.

Palavras-chave: Análise de risco. Cloro residual livre. Epanet 2.0. Qualidade da água.

ABSTRACT

Given that the safety of the quality of public water supply is an essential factor for the development and health of consumers, in addition to being a right of all citizens, research was carried out on the characteristics of the water supply system in order to identify the possible impacts that users are exposed to when consuming water from the distribution network. In this viewpoint, the objective of this academic work was to evaluate the risks of water quality degradation associated with failures, operational and maintenance of the water distribution network of located neighborhoods in B pressure zone of the municipality of Campina Grande-PB, for contribute to the adoption of a scientific management approach to water quality, both from the point of view of control and from the point of view of surveillance. The identification of risks was carried out using simulation tools for the behavior of the free residual chlorine indicator (CRL) in the network, using the Epanet 2.0 software and risk analysis tools, Failure Modes and Effects Analysis - FMEA. The results of the research found that the greatest risks are due to the lack of a maintenance routine in the reservoirs, which leads to a greater vulnerability to contamination, and the failure to meet the potability standard for the CRL in most of the distribution network, the same being largely responsible for ensuring safe water from the treatment plant to the consumption points. It is concluded that, for a more qualified management of the public supply, as risk analysis tools along with the network simulation, application in a complete and integrated way, perfect to predict the future behavior of a system, helping in decision making by part of the managers, search an effective security in the quality of the water distributed for human consumption.

Keywords: Risk analysis. Free residual chlorine. Epanet 2.0. Water quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do sistema de abastecimento de água de Campina Grande.....	21
Figura 2 - Zonas de pressão.....	22
Figura 3 - Planta baixa do SAACG	23
Figura 4 – Delimitação dos bairros	24
Figura 5 - Fachada do reservatório R5	25
Figura 6 - Fachada do reservatório R4	26
Figura 7 - Boletim diário do sistema de abastecimento de Campina Grande	27
Figura 8 - Traçado da área de estudo no Epanet 2.0	28
Figura 9 - Medições in loco do CRL.....	36
Figura 10 - Esquema da rede de distribuição simulada no Epanet 2.0.....	37
Figura 11 – Comportamento do CRL em nós do bairro Prata.....	38
Figura 12 - Comportamento do CRL em nós do bairro São José.....	38
Figura 13 - Comportamento do CRL em nós do bairro Centro.....	39
Figura 14 - Comportamento do CRL em nós dos bairros Lauritzen e Conceição.	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Bairros constituintes das zonas de pressão do SAACG.....	23
Quadro 2 - Descrição das causas e efeitos associados aos perigos identificados.	29
Quadro 3 - Escores para o aspecto severidade.	31
Quadro 4 - Escores para ocorrência de fendas na cobertura de reservatórios de distribuição.	31
Quadro 5 - Escores para ocorrência de canalizações com materiais e revestimentos inadequados.	31
Quadro 6 - Escores para ocorrência de crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos.	32
Quadro 7 - Escores para ocorrência de rupturas de condutos/fissuras.....	32
Quadro 8 - Escores para ocorrência de operações inadequadas em reparação, manutenção e limpeza de reservatórios.	32
Quadro 9 - Escores para ocorrência de variações inadequadas de vazões/pressões.	33
Quadro 10 - Escores para ocorrência de residual de cloro inadequado.	33
Quadro 11 - Escores para ocorrência de formação de subprodutos da desinfecção.	33
Quadro 12 - Escores para ocorrência de deterioração da qualidade da água nos reservatórios.	33
Quadro 13 - Escores para o aspecto detecção.	34
Quadro 14 - Escores para o aspecto abrangência.	34
Quadro 15 - Planilha da avaliação de risco do cenário atual da rede pelo método FMEA.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CCO – Centro de Controle e Operações
COT – Carbono Orgânico Total
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRL – Cloro Residual Livre
DN – Diâmetro Nominal
ETA – Estação de Tratamento de Água
FMEA – Failure Mode and Effects Analysis
HOCL – Ácido Hipocloroso
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Kb – Coeficiente de Reação no Escoamento
Km – Quilômetro
Kw – Coeficiente de Reação na Parede
L/s – Litro por Segundo
m/dia – Metro por Dia
m³ - Metro cúbico
mg/L – Miligrama por Litro
OCL⁻ – Íon Hipoclorito
OMS – Organização Mundial da Saúde
PVC – Policloreto de Polivinila
SAACG – Sistema de Abastecimento de Água de Campina Grande
THMs – Trihalometanos
USEPA – United States Environmental Protection Agency
VMP – Valor Máximo Permitido
WHO – World Health Organization

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	12
2.0 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 Acesso à água segura	15
3.2 Padrão de potabilidade	15
3.3 Cloro residual livre	16
<i>3.3.1 Degradação do Cloro Residual Livre</i>	18
3.4 Epanet 2.0	19
3.5 Análise de Risco	19
4.0 METODOLOGIA	21
4.1 Caracterização da rede de distribuição de água	21
4.2 Delimitação da área de estudo	23
<i>4.2.1 Caracterização dos bairros em estudo</i>	24
<i>4.2.2 Reservatórios que abastecem a área em estudo</i>	25
4.3 Traçado da rede no Epanet 2.0	26
<i>4.3.1 Coeficiente de decaimento do cloro residual livre - Teste da garrafa</i>	28
4.4 Análise de risco – Método FMEA	29
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Coleta de dados e calibração do modelo	35
<i>5.1.2 Coeficiente de decaimento do Cloro Residual Livre (Kb)</i>	35
5.2 Simulação no Epanet 2.0	36
5.3 Análise de Risco	40
6.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	45

1.0 INTRODUÇÃO

É indispensável garantir que o acesso à água potável seja suficiente para satisfazer as necessidades humanas, manter a saúde e o desenvolvimento econômico e social, pois a mesma, em qualidade e quantidade satisfatórias, é um direito básico de todos os cidadãos. Com o aumento das ações antrópicas, as águas se tornam cada vez mais vulneráveis a contaminações devido, principalmente, à sua exposição aos processos de urbanização e à má qualidade da operação de sistemas de distribuição de água. Estas contaminações, embora lentas e silenciosas, podem tomar proporções maiores, tornando-se um problema à saúde dos consumidores.

Uma das etapas mais relevantes do tratamento da água é a desinfecção, que é responsável pela qualidade microbiológica da água. O cloro é o agente desinfetante mais utilizado nas estações de tratamento de água, pois apresenta eficiência na destruição dos organismos patogênicos, possui baixo custo e garante um residual que protege a água de possíveis contaminações na rede. Porém, esse residual pode ser consumido no decorrer do percurso da água, acarretando em riscos de surtos de diversas doenças de veiculação hídrica (LIBÂNIO, 2010).

Apenas o tratamento da água não garante a manutenção da condição de potabilidade, visto que o percurso da água, desde o tratamento até o consumidor final, está sujeito a diversas ameaças que podem ocasionar a alteração das suas características, comprometendo sua qualidade (RITCHER e AZEVEDO NETTO, 1991).

Perante isso, um fator que permanece em evidência é a importância do controle e da vigilância da qualidade da água nos sistemas de distribuição. Segundo Ritcher e Azevedo Netto (1991) os bons resultados do tratamento somente podem ser assegurados com uma operação hábil.

Desta maneira, é essencial assegurar que a água não apresente riscos à saúde da população, uma vez que até chegar nos pontos de consumo, a vulnerabilidade da qualidade da água tratada se constitui em um problema sanitário que tem levado muitos países a investirem no desenvolvimento de técnicas avançadas de análises e controle de sistemas de abastecimento de água (GOMES, 2019).

A operação de sistemas de abastecimento de água no Brasil ainda é abordada de forma predominantemente empírica, havendo também deficiências nas unidades do sistema, entre as quais capacidade, constituição e idade das instalações. Desta forma, as avaliações e tomadas de decisão do administrador contêm grau significativo de incerteza e propiciam a convivência permanente com inúmeros riscos (OLIVEIRA, 2013 apud NASCIMENTO, 2016).

A fim de evitar que estes inconvenientes ocorram, é importante recorrer a ferramentas capazes de prever o comportamento futuro de um sistema, para a realização de um planejamento mais eficiente. Assim, as empresas responsáveis pela distribuição terão ciência de onde estão os possíveis riscos na rede e quando sua manutenção será viável, ou em alguns casos, necessária.

Nesse contexto, a proposta deste trabalho visa apresentar os principais pontos críticos do sistema de abastecimento de água da região central da cidade de Campina Grande, utilizando-se da ferramenta de análise de risco e da simulação do comportamento do indicador cloro residual livre (CRL) através do *software* Epanet 2.0.

A análise de risco é uma metodologia eficiente para estabelecer critérios de aceitabilidade, tolerância e quantificação dos perigos existentes e, juntamente à simulação da rede de distribuição, trará um conjunto de métodos necessários às tomadas de decisão por parte dos gestores responsáveis, auxiliando os processos de prevenção e controle dos possíveis riscos oriundos da degradação da qualidade da água, garantindo assim que os usuários não estejam expostos aos agentes perigosos.

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar a metodologia de análise de risco e a modelagem hidráulica para avaliar a qualidade da água do sistema de abastecimento de água em bairros localizados na região central da cidade de Campina Grande-PB.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento da qualidade da água distribuída, com base no indicador sentinela cloro residual livre, através da simulação da rede no *software* Epanet 2.0.
- Identificar os pontos críticos no sistema de abastecimento de água através dos resultados da simulação.
- Aplicar a metodologia de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) para identificar e quantificar os perigos associados à qualidade da água distribuída aos usuários.

3.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Acesso à água segura

A Organização Mundial da Saúde (OMS) define água segura como “aquela livre de microrganismos e substâncias que possam causar algum efeito deletério sobre a saúde humana” (WHO, 2011). Já a Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde define água potável como aquela que “atende ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde” (BRASIL, 2017).

Para que haja essa proteção, os fornecedores de água potável devem exercer ações de operação e vigilância eficazes no controle da qualidade da água. De acordo com Tsutiya (2006), as maiores deficiências que podem ser observadas nos sistemas de abastecimento se devem principalmente à deterioração dos sistemas mais antigos, que não passam por adequada manutenção e, frequentemente, podem apresentar problemas de rompimento e de vazamentos de água. Ainda de acordo com o autor, “dentre as melhorias no saneamento ambiental os sistemas de abastecimento de água são os que provocam maior impacto na redução de doenças infecciosas” (TSUTIYA, 2006, pg. 5).

Além dos problemas operacionais, a presença de microrganismos na água tratada também é um dos fatores responsáveis pela disseminação de doenças de veiculação hídrica, pois o tratamento por si só não garante a ausência total dos patógenos, visto que ao longo do sistema a qualidade da água está sujeita à deterioração, necessitando da implantação de monitoramento contínuo (HELLER e PÁDUA, 2006).

A degradação da qualidade da água pode resultar na não conformidade com o padrão de potabilidade, pondo em risco a saúde dos usuários. Nesse sentido, o controle da qualidade da água e a gestão de riscos é fundamental para garantir a proteção da saúde e a integridade dos sistemas de distribuição.

3.2 Padrão de potabilidade

De acordo com Libânio (2010), para preservar a saúde da população abastecida, há a necessidade de uma conjunção de padrões de potabilidade restritivos e a eficácia das ações de vigilância da qualidade da água. Tal eficácia “constitui-se um rol de atividades que visam a identificar e avaliar os potenciais riscos à saúde advindos da água de consumo.” (LIBÂNIO, 2010, pg. 102).

No Brasil, a caracterização da água destinada ao consumo humano deve ter as características de potabilidade segundo os critérios da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde, de 28 de setembro de 2017, que revogou a Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011.

Conforme a Lei Complementar nº 95/1998, Art. 13, Inciso 1º:

A consolidação consistirá na integração de todas as leis pertinentes a determinada matéria num único diploma legal, revogando-se formalmente as leis incorporadas à consolidação, sem modificação do alcance nem interrupção da força normativa dos dispositivos consolidados (BRASIL, 1998).

Tal Portaria cita os parâmetros que devem ser quantificados, seja por oferecerem riscos à saúde humana ou por influenciarem na aceitação do consumo da água por parte da população. Outros parâmetros também podem ser incluídos, além daqueles citados na legislação, para assegurar a qualidade da água distribuída (HELLER e PÁDUA, 2010). Para todas as substâncias contempladas pela norma são especificados os valores máximos permissíveis (VMP) na água destinada ao consumo humano.

Com relação ao parâmetro estudado (cloro residual livre), o teor máximo recomendado pela portaria é a concentração máxima de 2,0 mg/L, sendo obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L em qualquer ponto da rede de abastecimento e do reservatório (BRASIL, 2017).

Esta faixa de uso do cloro residual livre deve ser seguida pelas empresas prestadoras do serviço de abastecimento, visto que a utilização de concentrações baixas ou elevadas do cloro pode acarretar em contaminação das águas no sistema de distribuição ou a formação de subprodutos prejudiciais à saúde, causados pela reação do cloro com outras substâncias presentes nas tubulações.

3.3 Cloro residual livre

Para estabelecer uma segurança na qualidade da água, a etapa de desinfecção nas estações de tratamento de água constitui-se de uma operação indispensável. Com a adição de um agente desinfetante, como o cloro, ocorre a destruição ou inibição de possíveis microrganismos patogênicos remanescentes que ainda possam existir na água.

Quando o cloro, na forma de Cl_2 , é adicionado à água isenta de impurezas, é hidrolisado e ocorre a formação de ácido hipocloroso (HOCl) e íon cloreto (Cl^-), conforme a reação

apresentada na equação (1). Por sua vez, em solução, o ácido hipocloroso libera os íons H^+ (hidrogênio) e OCl^- (hipoclorito), como representado pela equação (2):



O cloro residual livre corresponde à soma das concentrações do ácido hipocloroso com o íon hipoclorito, na qual a prevalência dessas espécies é dependente do pH e da temperatura. Essa capacidade de manter um residual após reações com a água é um dos mais importantes atributos de um desinfetante (HELLER e PÁDUA, 2010).

O cloro é um dos agentes químicos mais utilizados na etapa de desinfecção do tratamento de águas pois, além do seu caráter oxidante, mantém um residual na rede de distribuição que favorece o monitoramento e garante a qualidade sanitária do sistema, bem como não apresenta sabor e odor na água.

De acordo com Libânio (2010, pg. 428):

Além de um amplo espectro de ação germicida, o cloro tem a característica ímpar de formar compostos que permanecem na água, proporcionando residual desinfetante ativo e, com isso, permitindo que haja inativação de microrganismos, após o ponto de sua aplicação, seja ao longo das tubulações da rede de distribuição ou mesmo nos reservatórios domiciliares dos pontos de consumo.

Entretanto, apesar da sua eficácia na destruição dos patógenos, o cloro apresenta alguns inconvenientes por ser uma substância com elevado potencial reativo que provoca seu rápido consumo na presença de matéria orgânica, formando possíveis substâncias organocloradas prejudiciais à saúde (RITCHER, 2009).

Tanto na saída do tanque de contato da estação de tratamento de água, como no sistema de distribuição, a medida do cloro residual cumpre o papel de indicador da eficiência da desinfecção, uma vez que a redução acentuada do cloro residual em relação à medida na saída do tanque de contato, pode indicar uma possível contaminação ao longo do sistema de distribuição (HELLER e PÁDUA, 2010). Sendo assim, o cloro residual livre constitui o indicador mais importante de controle de qualidade na prática da cloração de águas de abastecimento (SILVA e OLIVEIRA, 2001).

3.3.1 Degradação do Cloro Residual Livre

O principal objetivo da manutenção do residual de cloro na rede de distribuição é impedir o crescimento de microrganismos já presentes na água e que escaparam ao tratamento, bem como prevenir contaminações de origem externa devido a fraturas, trabalhos de manutenção, intrusões causadas por pressões negativas, dentre outros (VIEIRA *et al.*, 2001 apud FORMIGA e MELO, 2007). Porém, a utilização de concentrações baixas ou elevadas do cloro podem acarretar em contaminação das águas no sistema de distribuição ou a formação de subprodutos, prejudiciais à saúde, causados pela reação do cloro com outras substâncias presente nas tubulações.

Um dos principais motivos que pode estar relacionado ao decaimento do cloro residual nos sistemas de distribuição é a presença de substâncias orgânicas e inorgânicas (ex: amônia, sulfetos, íons de ferro, íons de manganês e matéria orgânica), ao consumo pelo processo de corrosão, principalmente nas tubulações de ferro e às reações com o biofilme formado nas tubulações (MUNAVALLI *et al.*, 2004). Este decaimento pode resultar no desaparecimento total do desinfetante e assim permitir a recontaminação microbiana da água transportada e os consequentes problemas de saúde pública.

O decaimento do cloro residual é resultado da combinação de dois coeficientes, sendo uma devido às reações do escoamento na massa líquida, entre espécies químicas presentes na água e a outra na interface da parede da tubulação, que podem ser representadas pelas respectivas constantes cinéticas K_b e K_w (CLARK *et al.*, 1993). É importante frisar que reações no volume escoado também podem ocorrer no interior de reservatórios de nível variável.

Leal (2012) determinou o valor da constante cinética K_b , para o sistema de abastecimento de Campina Grande, através do teste da garrafa, que se constitui em colocar uma amostra de água numa série de garrafas de vidro não reativas e analisar o conteúdo de cada garrafa em diferentes intervalos de tempo pré-determinados. Este ensaio permite a representação gráfica dos valores de $\log(C_t/C_0)$ em função do tempo, obtendo-se uma linha reta formada por C_t , que é a concentração no instante t , e C_0 , a concentração no instante inicial. De acordo com Rossman (2000), o coeficiente K_b para uma reação de primeira ordem, é estimado a partir da declividade dessa reta.

Conforme Nascimento (2016), o decaimento do cloro ocorre na interface com a parede de tubulações quando as substâncias dissolvidas são transportadas para a parede da tubulação e reagem com os biofilmes desenvolvidos na parede interna e com o próprio material da canalização.

3.4 Epanet 2.0

Dentre os modelos hidráulicos de simulação e análises já desenvolvidos, um se destaca pela sua qualidade e por permitir o uso livre por qualquer usuário. Trata-se do Epanet 2.0 (ROSSMAN, 2000) desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S Environmental Protection Agency – EPA*), que se constitui de um programa computacional que permite representar e simular o comportamento hidráulico de um sistema de distribuição de água ao longo do tempo. A presente versão em português do Brasil foi traduzida pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, da Universidade Federal da Paraíba – LENHS UFPB.

O Epanet 2.0 é um *software* que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição composta por tubulações, bombas, válvulas e reservatórios de nível fixo e/ou variável (GOMES e SALVINO, 2009). O programa permite, também, simular o comportamento hidráulico de parâmetros da qualidade da água, sendo possível analisar o decaimento do cloro residual da água tratada, a partir da entrada de dados da rede de abastecimento.

A operação de sistemas de abastecimento de água potável constitui-se na principal ação de gestão das empresas de saneamento, a qual influencia diretamente na qualidade do sistema em termos sanitários, ambientais, econômicos e sociais (GOMES, 2019). Neste contexto, ferramentas computacionais são usadas para traçar cenários futuros do comportamento da qualidade da água no sistema de abastecimento, servindo de base para a elaboração de modelos de gerenciamento (MENESES, 2011).

Segundo Gomes (2019), o conhecimento e o domínio dessa importante ferramenta ainda é uma novidade para grande maioria dos profissionais que trabalham com sistemas de distribuição de água. Porém, a importância do emprego de um modelo de simulação possibilita a melhoria da qualidade da água no sistema, uma vez que essas ferramentas trazem informações valiosas sobre o comportamento de um sistema, auxiliando nas tomadas de decisão de medidas preventivas para as áreas problemáticas (LEAL, 2012).

3.5 Análise de Risco

No Brasil, os modos de operação e manutenção dos sistemas de abastecimento de água baseiam-se apenas na análise de conformidade com os padrões de potabilidade impostos pela legislação, mas esta metodologia tem suas limitações, sendo necessária a introdução de outras

técnicas de controle e vigilância, a exemplo de aplicação de metodologias de análise de risco em pontos críticos do sistema de abastecimento (NASCIMENTO, 2016).

Os métodos de análise de risco, aplicados de modo abrangente e integrado, são uma forma efetiva de garantir a segurança da qualidade da água para consumo humano. Existem várias técnicas utilizadas para análise de risco e, dentre elas, a Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), que é uma metodologia muito interessante devido à sua simplicidade e flexibilidade. Esta técnica consiste em identificar as prováveis falhas potenciais em um projeto ou processo, estabelecer as prioridades para o tratamento das falhas e implementar as ações recomendadas para melhorias (ZAMBRANO, 2007).

A análise de risco é estruturada em três etapas sequenciais, englobando as ações de avaliação de risco, gerenciamento de risco e comunicação do risco. A avaliação de risco é o processo de estimativa de probabilidade de ocorrência de um determinado acontecimento. O gerenciamento é a etapa onde é feita a discussão de propostas baseadas na implantação de ações para evitar, minimizar e controlar os riscos. Por fim, a comunicação de risco é o processo de troca de informações entre os indivíduos, para conhecimento das pessoas sobre os riscos em potencial.

No estudo da análise de risco, torna-se importante salientar a diferença entre risco e perigo. Segundo Ogata (2011), o perigo seria um efeito adverso inerente a uma determinada situação, enquanto que o risco seria a quantificação desse perigo. Para Zambrano (2007) o risco pode ser definido como a probabilidade de o perigo ocorrer. Nesse sentido, a análise de risco é uma metodologia com vistas a avaliar e determinar a probabilidade de um efeito adverso ocorrer, provocado por um agente, seja físico, químico ou outro qualquer (GRADVOHL, 2012).

A quantificação do risco pelo método FMEA é feita através da multiplicação de quatro escores, atribuídos por um grupo de especialistas, que correspondem à severidade (indica o quão problemático pode ser aquele risco caso ele ocorra), a ocorrência (frequência de acontecimento desse risco no cenário atual), a detecção (a dificuldade em detectar o risco preventivamente) e a abrangência (o quanto esse risco se difunde em função da área). O produto desses escores representa o risco total.

4.0 METODOLOGIA

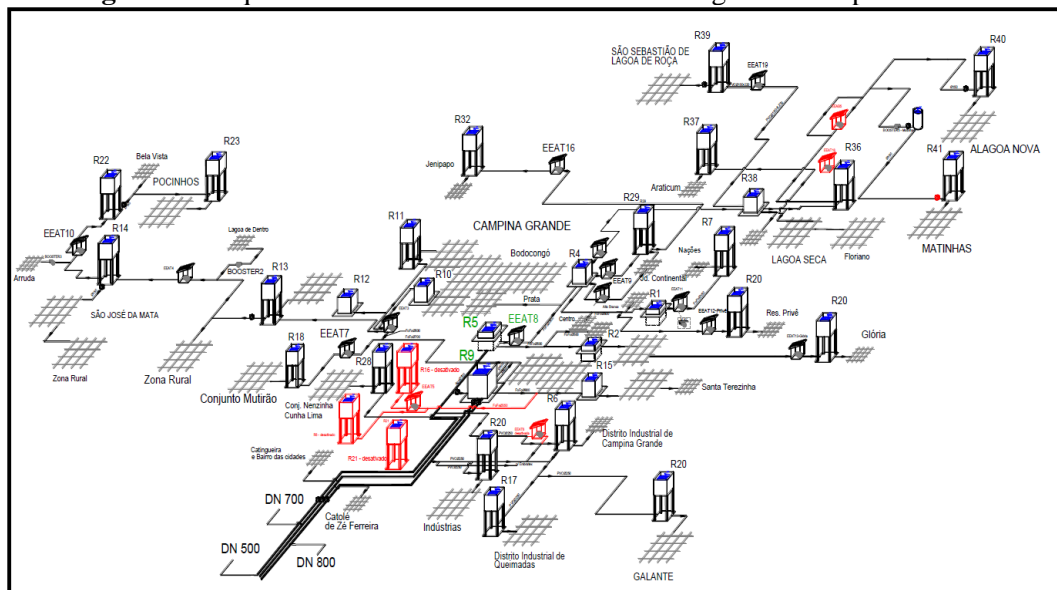
4.1 Caracterização da rede de distribuição de água

Este estudo foi realizado no sistema de abastecimento de água da região central da cidade de Campina Grande ($7^{\circ}13'50''$ Sul e $35^{\circ}52'52''$ Oeste), situada no estado da Paraíba, estando a uma altitude aproximada de 551 m acima do nível do mar (CPRM, 2005). Segundo o último Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) o município possuía uma população de 385.213 habitantes com estimativa de 411.807 habitantes para o ano de 2020, ocupando uma área de aproximadamente 592 km².

O serviço de distribuição de água é administrado pela empresa concessionária Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, sendo constituído por captação, adução da água bruta, tratamento convencional, adução de água tratada, reservação e distribuição. O sistema distribui mensalmente uma média de 3,1 milhões de metros cúbicos de água (NASCIMENTO, 2016).

Uma breve descrição do sistema de abastecimento de água de Campina Grande – SAACG (Figura 1) será feita no decorrer desta seção, baseando-se na ampla pesquisa já feita em trabalhos anteriores (LEAL, 2012; MENESES, 2011 e NASCIMENTO, 2016).

Figura 1 - Esquema do sistema de abastecimento de água de Campina Grande



Fonte: MENESES (2011)

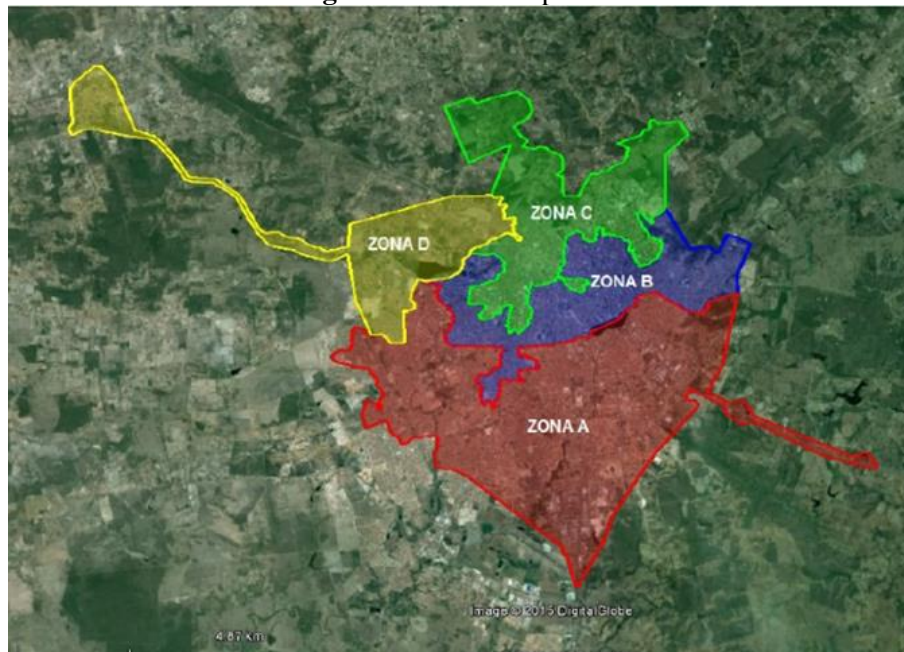
O açude Epitácio Pessoa, localizado na cidade de Boqueirão ($7^{\circ} 28' 56.91''$ Sul e $36^{\circ} 7' 52.99''$ Oeste) é o manancial que abastece o sistema, o qual encontra-se situado a

aproximadamente 42 km de Campina Grande. A estação responsável por alimentar os reservatórios da cidade é a Estação de Tratamento de Água de Gravatá de Queimadas-PB, situada a cerca de 20 km de distância da cidade de Campina Grande, com capacidade para tratar 1500 L/s de água.

Da estação de tratamento de água (ETA), a água tratada é distribuída para os principais reservatórios de distribuição do sistema, que são denominados R9 e R5, com capacidades úteis de 26.000 m³ e 8.000 m³, respectivamente.

Devido à topografia acentuada da área a ser abastecida observa-se a ocorrência de desníveis no relevo. Por esse motivo, a empresa responsável pelo projeto da rede dividiu-a em quatro zonas de pressão denominadas A, B, C e D, conforme mostradas na Figura 2, a fim de propiciar uma melhor gestão na distribuição da água.

Figura 2 - Zonas de pressão



Fonte: Nascimento (2016)

Dessa forma, diante da complexidade e abrangência do sistema, foram selecionados cinco bairros do SAACG para este estudo, que se encontram na zona de pressão B. Esta zona abrange os bairros mais centrais da cidade, dispendo de infraestrutura instalada e dinâmica de crescimento urbano, possuindo uma população de aproximadamente 80.000 habitantes, constituída por 14 bairros. O Quadro 1 apresenta as zonas de pressão do sistema e os respectivos bairros que as compõem.

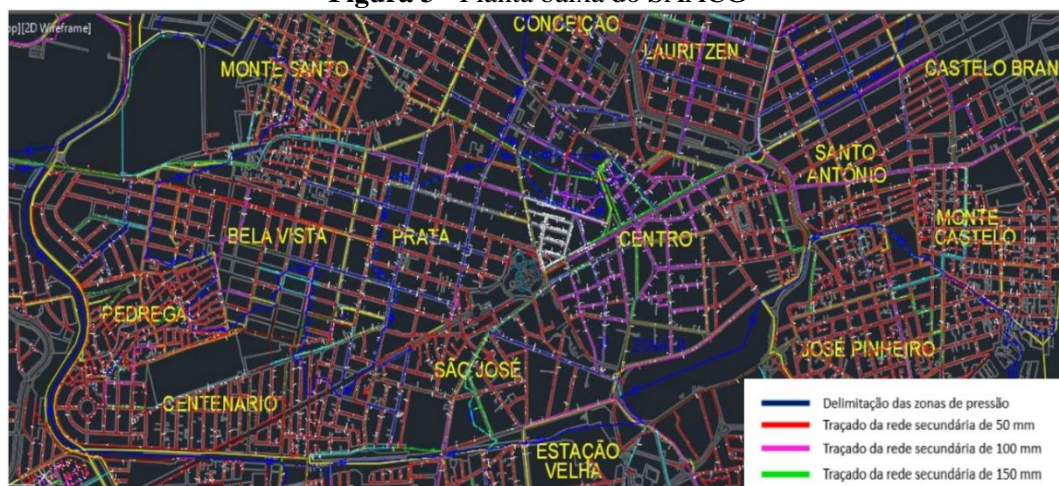
Quadro 1 - Bairros constituintes das zonas de pressão do SAACG

ZONA	BAIRROS
A	Quarenta, Liberdade, Cruzeiro, Santa Rosa, Jardim Paulistano, Catolé, Mirante, José Pinheiro, Malvinas, Presidente Médici e Distrito Industrial.
B	Centro, Santo Antônio, São José, Prata, Centenário, Lauritzen, Monte Castelo, Monte Santo, Castelo Branco, Nova Brasília, Jardim Tavares, Conceição, Pedregal, Conjunto dos Professores.
C	Alto Branco, Juracy Palhano, Nações, Cuités, Palmeira, o distrito de Jenipapo e cidades de Lagoa Seca, Alagoa Nova, São Sebastião de lagoa de Roça e Matinhas.
D	Jeremias, Bodocongó, São Januário, Severino Cabral, Lagoa de Dentro, São José da Mata, zona rural de São José da Mata e a cidade de Pocinhos.

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

4.2 Delimitação da área de estudo

No âmbito da zona de pressão B, foram selecionados para estudo os bairros Centro, São José, Prata, Lauritzen e Conceição. Esses bairros podem ser considerados críticos devido às frequentes irregularidades e o maior envelhecimento da rede, tendo em vista que são bairros antigos do sistema de abastecimento de Campina Grande possuindo, em sua maioria, tubulações com aproximadamente 50 anos de uso. A partir do estudo da planta baixa da rede de distribuição, em extensão dwg (Figura 3), foi observado que os principais materiais que constituem as tubulações da rede de distribuição são o cimento amianto e o ferro fundido, havendo também trechos constituídos por canalizações em PVC.

Figura 3 - Planta baixa do SAACG

Fonte: Araujo (2019)

Além das semelhanças nos referidos bairros, outros fatores para a escolha destes foram as diferenças entre os comportamentos com relação à qualidade da água, observados em estudos anteriores (SANTOS, 2011; ALVES, 2014; VERÇOSA, 2017).

4.2.1 Caracterização dos bairros em estudo

Como citado anteriormente, os bairros em estudo ficam localizados na região mais central de Campina Grande, na zona de pressão B, sendo sua rede de distribuição de água totalmente interligada (Figura 4).

Figura 4 – Delimitação dos bairros



Fonte: Próprio Autor (2021)

O bairro da Prata é um dos bairros mais antigos da cidade, com uma área de 76,2 ha e população de aproximadamente 8.507 habitantes. Localizado na zona oeste de Campina Grande, a Prata caracteriza-se por concentrar grande parte dos centros médicos da cidade, colégios e igrejas, além da tradicional Feira da Prata.

O bairro São José fica situado na zona sul da cidade, com área de aproximadamente 71,5 ha e população de aproximadamente 8.016 habitantes. No bairro, estão localizados dois grandes hospitais públicos, escolas e igrejas.

O Centro, como o próprio nome já diz, é o bairro mais central da cidade de Campina Grande e um dos primeiros bairros a serem desenvolvidos na cidade, possuindo uma população de 22.266 habitantes e área de 178 ha. No Centro é onde a maior parte do comércio da cidade atua.

Os bairros Lauritzen e Conceição estão localizados na zona norte da cidade, com áreas de aproximadamente 41,5 ha e 47,6 ha, respectivamente, e populações de aproximadamente

2.713 e 3.439 habitantes, respectivamente. Estes dois bairros caracterizam-se por possuírem grandes áreas residenciais, possuindo também igrejas, academias, colégios e supermercados.

4.2.2 Reservatórios que abastecem a área em estudo

As funções dos reservatórios de distribuição são regularizar as diferenças entre o abastecimento e o consumo máximo diário, promover condições de abastecimento contínuo durante períodos curtos de paralisação do abastecimento (reserva de emergência), armazenar água para combater incêndio e condicionar as pressões disponíveis nas redes de distribuição (GOMES, 2019).

O principal reservatório da região estudada é o R5, localizado no bairro da Prata e com capacidade de 8.000 m³, recebe água da ETA por uma adutora de diâmetro nominal (DN) 700 mm e redistribui água para os reservatórios R2, com capacidade de 2.290 m³ e R4, com capacidade de 10.000 m³.

O R5 é um reservatório importante porque além de abastecer o bairro da Prata, redistribui a água para outros reservatórios e abastece, também, parte da zona de pressão C, apesar de seu volume não ser o de maiores dimensões. O mesmo é do tipo semi-enterrado, servindo também como poço de sucção (Figura 5). A concentração média de CRL da água que parte do reservatório para a rede de distribuição é de 2,38 mgCl₂/L.

Figura 5 - Fachada do reservatório R5



Fonte: Santos (2017)

O reservatório R2 está localizado no Centro da cidade e é alimentado por gravidade por uma adutora de DN 600 mm diretamente do R5. Este reservatório é responsável por abastecer o bairro São José e parte do Centro. O reservatório opera em regime de batelada, com início da

alimentação no período da noite. Assim como o R5, é do tipo semi-enterrado. Porém, não há rotinas de recloração no mesmo, tendo sido constatada concentração de CRL inicial da água igual a $0,0 \text{ mgCl}_2/\text{L}$.

O R4, por sua vez, está localizado no bairro da Palmeira e abastece o bairro da Conceição, parte do Centro da cidade e parte da zona de pressão C. É alimentado pelo R5 por uma adutora de diâmetro 600 mm e é do tipo apoiado (Figura 6). Conforme análises feitas na torneira de saída de água do reservatório, a concentração de CRL inicial é de $0,74 \text{ mgCl}_2/\text{L}$.

Figura 6 - Fachada do reservatório R4



Fonte: Silva (2017)

O bairro Lauritzen e outra parte do Centro são abastecidos por vazões aduzidas do reservatório R1, que é do tipo semi-enterrado e possui capacidade de armazenamento de 3.080 m^3 , localizado no bairro Alto Branco. Segundo o operador responsável que se encontrava presente na unidade do reservatório R1, o mesmo também era abastecido por vazões aduzidas do R5, cujas águas, ao chegarem no reservatório R1, passam por processo de recloração, o que promove uma concentração de CRL inicial de $1,43 \text{ mgCl}_2/\text{L}$. Tal constatação pôde ser confirmada a partir da simulação, tratada em sessões posteriores, e da calibração feita por meio de análises em campo.

4.3 Traçado da rede no Epanet 2.0

Com o auxílio do software Epanet 2.0, foi construído, ponto a ponto, o traçado da rede de distribuição de água dos bairros São José, Prata, Centro, Lauritzen e Conceição. A simulação da rede dos bairros São José e Prata foi estudada, anteriormente, por Nascimento (2016), tendo

sido acrescentados, na presente pesquisa, os outros bairros citados. A ampliação da rede foi feita tendo como base a malha real disponível na planta de distribuição, em extensão dwg do AutoCad.

Os dados operacionais dos reservatórios foram fornecidos pelo Centro de Controle e Operação (CCO) da CAGEPA (Figura 7), os quais continham boletim diário de operação com informações acerca do tipo de controle, dificuldades de operação, principais problemas no abastecimento de água, dentre outros. Para o desenvolvimento da simulação, o Epanet exige a entrada de dados referentes à operação dos reservatórios e do sistema de distribuição. Para isso, foram utilizados dados do CCO e do banco de dados pertencente ao grupo de pesquisa do Laboratório de Eficiência Energética da UEPB. As curvas de padrão temporal para descrever o comportamento do consumo-base e dos níveis e volumes atribuídos aos reservatórios e nós foram os mesmos utilizados nas pesquisas de Nascimento (2016) e Araujo (2019). Além disso, foram realizadas análises em campo acerca da qualidade da água nos bairros estudados para subsidiar a calibração do modelo no Epanet 2.0.

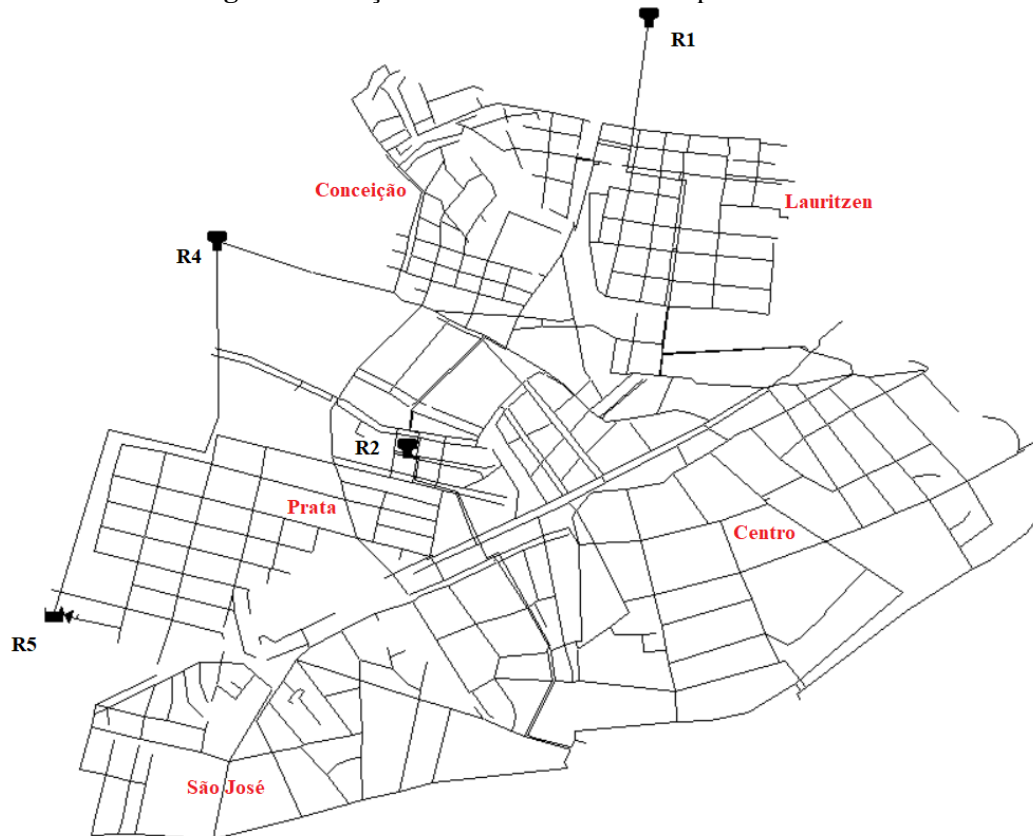
Figura 7 - Boletim diário do sistema de abastecimento de Campina Grande

Nº Horas	SISTEMA DE RESERVAÇÃO E ELEVÇÃO DO R-05										SISTEMA DE RESERVAÇÃO E ELEVÇÃO DO R-06									
	EEAT-01 (EE-RAP-05)					EEAT-08 (RAP-01)					RAP-04					EEAT-09 (REL-29 CUITES)				
	02	03	04	05	Vol (m³)	01	02	03	04	05	01	02	03	04	P. Rec.	01	02	03	04	05
01	P	F	F	M	1.607,65	2,50	E	P	-	2,65	4,30	4,30	4,30	4,30	0,0	E	E	-	E	
02	P	F	F	M	1.607,65	2,50	E	P	-	2,65	4,60	4,60	4,60	4,60	0,0	E	E	-	E	
03	P	F	F	M	1.607,65	2,50	E	P	-	2,65	4,90	4,90	4,90	4,90	0,0	E	E	-	E	
04	P	F	P	M	1.226,33	2,50	E	P	-	2,65	5,10	5,10	5,10	5,10	0,0	E	E	-	E	
05	P	F	P	M	1.099,22	2,50	F	P	-	2,65	5,00	5,00	5,00	5,00	1,0	E	E	-	E	

Fonte: Araujo (2019)

O traçado da rede (Figura 8) contém os reservatórios em estudo, 594 nós, que correspondem aos pontos de consumo e 818 trechos que representam as tubulações, a partir da situação atual da rede. O tempo de duração total da simulação escolhido foi de 168 horas, com início à zero hora.

Figura 8 - Traçado da área de estudo no Epanet 2.0



Fonte: Próprio Autor (2021)

As cotas do terreno correspondentes a cada nó foram obtidas a partir da base cartográfica de Campina Grande contendo curvas de nível e altitude.

4.3.1 Coeficiente de decaimento do cloro residual livre - Teste da garrafa

Para calibração do modelo de qualidade no Epanet, de forma a se obter um modelo representativo acerca do decaimento do cloro na rede de distribuição, foi determinado por meio do teste da garrafa (*bottle test*) o coeficiente K_b .

Inicialmente, foi adotado por Nascimento (2016) o valor de K_b de $2,73 \text{ dia}^{-1}$. Entretanto, devido a mudanças no tratamento da água e, conseqüentemente, a alteração de sua qualidade, tornaram-se necessárias novas análises e medições para verificar o real valor do coeficiente no cenário atual da rede.

O teste da garrafa consiste em coletar amostras de água da rede, acondicioná-las em frascos âmbar, mantendo-as sob condições controladas de temperatura e luminosidade, para posterior determinação do cloro residual livre em intervalos de tempo pré-determinados. O coeficiente de reação no escoamento (K_b) utilizado para a simulação foi adotado de acordo com

os resultados das análises do teste da garrafa, realizado próximo à adutora de 400 mm a jusante do R1, reservatório responsável pelo abastecimento do bairro Lauritzen e parte do Centro.

O coeficiente de reação na parede (K_w), foi determinado de acordo com Nascimento (2016), o qual foi ajustado pelo método da tentativa, sendo adotado $K_w = 0,4$ m/dia, valor que resultou em melhor aproximação entre as análises feitas em campo e os dados simulados.

4.4 Análise de risco – Método FMEA

A avaliação de risco foi realizada com aplicação do método Análise de Modos e Efeitos de Falhas – FMEA. A estimativa foi realizada com base em eventos perigosos, que envolvem problemas estruturais, operacionais e de manutenção que podem comprometer a qualidade da água e, conseqüentemente, aspectos de saúde do usuário, a partir do cenário atual da rede.

No decorrer desta seção, serão apresentadas as principais falhas potenciais avaliadas para a região estudada, com base nos quadros elaborados por Nascimento (2016), que levou em consideração as recomendações do Manual do Plano de Segurança da Água da OMS (WHO, 2011). Além disso, foram considerados os levantamentos realizados em visitas aos reservatórios da rede e em pontos estratégicos do SAACG, bem como resultados experimentais obtidos em trabalhos anteriores, contidos no banco de dados do Grupo de Pesquisa Saúde Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UEPB. O Quadro 2 apresenta os efeitos e as causas associados aos perigos identificados.

Quadro 2 - Descrição das causas e efeitos associados aos perigos identificados.

PERIGO	FALHA	CAUSA	EFEITO
F1	Reservatórios com furos na cobertura	Falha de manutenção	Degradação da qualidade da água.
F2	Utilização de canalizações com materiais e revestimentos inadequados	Falha na manutenção e falta de um programa de reabilitação da rede.	Favorece a formação de biofilmes, degradação da qualidade da água, aumento do número de rupturas, infiltração.
F3	Crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos	Falhas de operação e manutenção na ETA e nos reservatórios.	Degradação da qualidade da água.
F4	Rupturas de condutos/fissuras	Canalizações antigas, falha no controle das pressões, falha na instalação das canalizações.	Desabastecimento, perda de água, degradação da qualidade da água.

Continua.

Quadro 2 – Continuação. Descrição das causas e efeitos associados aos perigos identificados.

PERIGO	FALHA	CAUSA	EFEITO
F5	Operações inadequadas de reparação, manutenção e limpeza de reservatórios	Falha na operação e manutenção	Degradação da qualidade da água, desabastecimento, perda de água.
F6	Variações de vazões/pressões inadequadas	Falta de equipamentos de controle de pressão e de vazão, expansão da rede de distribuição de forma desordenada.	Ruptura das canalizações, desabastecimento, perda de água, infiltração de contaminantes.
F7	Residual de cloro inadequado	Falha na operação e manutenção da ETA e da rede de distribuição	Degradação da qualidade da água.
F8	Formação de subprodutos da desinfecção	Presença de precursores de trihalometano na água, principalmente matéria orgânica, associados a altas concentrações de cloro	Formação de substâncias halogenadas que podem causar efeitos danosos a saúde do usuário.
F9	Deterioração da qualidade da água nos reservatórios	Falha na manutenção	Degradação da qualidade da água com consumo exagerado do CRL nos reservatórios.

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Os Quadros de 3 a 14 apresentam as descrições e escores estabelecidos, para cada falha identificada, para os aspectos severidade (S), ocorrência (O), detecção (D) e abrangência (A), com base em critérios estabelecidos e validados no Manual do PSA e no conhecimento de um painel de 6 especialistas em qualidade da água e em atividades de operação e manutenção do SAACG, que formaram a equipe responsável por avaliar cada falha. A quantificação do risco é feita através da multiplicação dos escores atribuídos a estes quatro aspectos.

O aspecto severidade foi estimado com base na magnitude dos efeitos sobre a saúde do usuário, quanto mais grave e crítico é o efeito, maior é o escore de severidade. Conforme Nascimento (2016), atribuiu-se severidade alta a situações que possam causar doenças e/ou impactos potenciais na saúde, severidade moderada para condições que comprometam o padrão estético da água, e baixa severidade quando o impacto negativo na qualidade da água é insignificante ou não há comprometimento à saúde.

Quadro 3 - Escores para o aspecto severidade.

SEVERIDADE	DESCRIÇÃO	ESCORE
Alta	Verificação de um ou mais dos seguintes fatores: Não conformidade com o valor mínimo do CRL, integridade do sistema fortemente comprometida, falta de protocolos de rotinas de operação e manutenção em todas as etapas do sistema, estruturas antigas (canalizações, reservatórios).	3
Média	Verificação de um ou mais dos seguintes fatores: Integridade do sistema parcialmente comprometida, protocolos de rotinas de operação e manutenção somente parcialmente implementados, programa de reabilitação das estruturas (reservatórios, tubulações e acessórios) parcialmente desenvolvido.	2
Baixa	Verificação de todos os seguintes fatores: Integridade do sistema não comprometida, protocolos de rotinas de operação e manutenção aplicados em todas as etapas do sistema, programa consolidado de reabilitação das estruturas, conformidade com os padrões de CRL.	1

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Para o aspecto ocorrência, foram estabelecidos os escores 3, 2 e 1, para as frequências alta, média e baixa, respectivamente, para todas as 9 falhas avaliadas. Pela falta de dados históricos sobre a monitoração do SAA, torna-se importante destacar que o percentual de 5% adotado para a ocorrência de algumas falhas foi fundamentado com base na estatística adotada diante dos padrões de coliformes, que é um indicador de deterioração, na qual é admitido em apenas 5% das amostras analisadas. Por esse motivo, utilizou-se esta porcentagem como referência para avaliar a ocorrência desses outros fatores de deterioração dos sistemas.

Quadro 4 - Escores para ocorrência de fendas na cobertura de reservatórios de distribuição.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Fendas na cobertura em mais de 50% dos reservatórios	3
Média	Fendas na cobertura em até 50% dos reservatórios	2
Nula	Reservatórios íntegros	1

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Quadro 5 - Escores para ocorrência de canalizações com materiais e revestimentos inadequados.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Presença de canalizações de cimento amianto e de f ^o f ^o sem revestimento em mais de 5% da rede.	3
Média	Presença de canalizações de cimento amianto e de f ^o f ^o sem revestimento em até 5% da rede.	2
Baixa	Ausência de canalizações de cimento amianto e de f ^o f ^o sem revestimento.	1

Fonte: Nascimento (2016)

Quadro 6 - Escores para ocorrência de crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Ocorrência dos seguintes fatores: redes com idade ≥ 16 anos; temperatura elevada, acima de 28 °C; concentrações de matéria orgânica e de sedimentos no manancial e nos reservatórios; CRL abaixo de 0,2 mg Cl ₂ /L em mais de 5% das amostras; canalizações de ferro fundido; presença de corrosão nas canalizações.	3
Média	Ocorrência parcial dos fatores referidos anteriormente: Ocorrência cumulativa de até 4 dos fatores.	2
Baixa	Ausência de todos os fatores referidos anteriormente.	1

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Os escores atribuídos à ocorrência de rupturas de condutos teve como base a idade das canalizações e o seu diâmetro, visto que tubulações mais envelhecidas ou com diâmetros menores tornam-se mais frágeis e mais suscetíveis à rompimentos.

Quadro 7 - Escores para ocorrência de rupturas de condutos/fissuras

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Predominância de canalizações com idade > 50 anos (vida útil presumida) e $D < 100$ mm;	3
Média	Predominância de canalizações com idade entre 16 e 50 anos e $100 \leq D \leq 300$ mm;	2
Baixa	Predominância de canalizações com idade ≤ 15 anos e $D > 300$ mm.	1

Fonte: Nascimento (2016)

Quadro 8 - Escores para ocorrência de operações inadequadas em reparação, manutenção e limpeza de reservatórios.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Não atendimento de 3 ou mais dos critérios: serviço de inspeções externas e internas de reservatórios; serviço eficaz de limpeza dos reservatórios e treinamento de operadores para as práticas padrão de limpeza; desinfecção dos reservatórios; protocolos de manutenção rotineira dos reservatórios.	3
Média	Atendimento parcial/ não atendimento de até 2 dos critérios referidos anteriormente.	2
Baixa	Atendimento de todos os critérios de reparação, manutenção e limpeza de reservatórios, referidos anteriormente.	1

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Quadro 9 - Escores para ocorrência de variações inadequadas de vazões/pressões.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Pressão abaixo de 10 mca ou acima de 50 mca em mais de 5% da rede.	3
Média	Pressão abaixo de 10 mca ou acima de 50 mca em até 5% da rede.	2
Baixa	Não há variação inadequada de vazões/pressões.	1

Fonte: Nascimento (2016)

Quadro 10 - Escores para ocorrência de residual de cloro inadequado.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Não conformidade com os padrões de potabilidade para CRL em mais de 5% da rede.	3
Média	Não conformidade com os padrões de potabilidade para CRL em até 5% da rede.	2
Baixa	Em conformidade com os padrões de potabilidade de CRL em todos os pontos da rede.	1

Fonte: Nascimento (2016)

Quadro 11 - Escores para ocorrência de formação de subprodutos da desinfecção.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Atendimento dos fatores: carga orgânica total alta na saída da ETA, acima de 2mg/L; alta concentração de CRL na saída da ETA, acima de 2mg/L.	3
Média	Carga orgânica total baixa na saída da ETA, abaixo de 2mg/L; alta concentração de CRL na saída da ETA, acima de 2mg/L.	2
Baixa	Controle da carga orgânica no manancial, nas unidades de tratamento e na saída ETA; concentração de CRL na saída da ETA atende aos padrões de potabilidade.	1

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Quadro 12 - Escores para ocorrência de deterioração da qualidade da água nos reservatórios.

OCORRÊNCIA	FATORES	ESCORE
Alta	Predominância dos fatores, em mais de 50% dos reservatórios: tempo de detenção hidráulica acima de 3 dias; CRL abaixo de 0,2mg/l; periodicidade de limpezas dos reservatórios acima de 5 anos.	3
Média	Predominância dos fatores, referidos anteriormente, em até 50% dos reservatórios.	2
Baixa	Não ocorrência dos fatores referidos anteriormente.	1

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016)

Quadro 13 - Escores para o aspecto detecção.

DETECÇÃO	DESCRIÇÃO	ESCORE
Alta	Utilização de tecnologias sofisticadas	3
Média	Medição simples	2
Baixa	Percebido a olho nu	1

Fonte: Nascimento (2016)

Para a determinação do escore da abrangência, foi analisada a fonte de onde o risco surge, em termos de área. Se o risco ocorre desde o manancial ou desde a estação de tratamento de água, a abrangência foi avaliada como alta. Para um risco que se origina a partir dos reservatórios, a mesma é avaliada como média e, por conseguinte, é baixa se o risco se aplicar somente às canalizações.

Quadro 14 - Escores para o aspecto abrangência.

ABRANGÊNCIA	DESCRIÇÃO	ESCORE
Alta	Fonte: Manancial, ETA	3
Média	Fonte: Reservatórios	2
Baixa	Fonte: Canalizações	1

Fonte: Nascimento (2016)

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Coleta de dados e calibração do modelo

Para validar a simulação, fez-se necessária a escolha de pontos estratégicos na rede de cada bairro estudado para caracterizar o comportamento do CRL na mesma. Os pontos escolhidos foram selecionados de acordo com sua distribuição no mapa, bem como por representarem áreas com grande circulação de pessoas, residências e áreas comerciais.

Foi analisada, *in loco*, a qualidade da água nos bairros Prata, São José, Centro, Conceição e Lauritzen através de torneiras de estabelecimentos comerciais e residências da região. Também foi analisada a qualidade da água na saída dos reservatórios R1 e R4, por alimentarem parte da rede do Centro e, no caso do R1, os bairros Lauritzen e Conceição.

A calibração do modelo foi necessária, visto que, para se ter um modelo de qualidade da água torna-se essencial que o mesmo apresente resultados bem próximos dos valores reais. Dessa forma, a partir das análises feitas e da entrada de valores de qualidade inicial dos reservatórios no *software*, tornou-se possível constatar os valores de CRL ao longo da rede dos cinco bairros.

Os valores das concentrações de CRL foram obtidos através do método DPD colorimétrico, com medidas obtidas através do colorímetro de bancada AquaColor Cloro.

5.1.2 Coeficiente de decaimento do Cloro Residual Livre (K_b)

Para realização do teste da garrafa, foi escolhido um ponto de coleta de água próximo ao reservatório R1, na Rua Reverendo Augusto Santiago no bairro Alto Branco. Primeiramente foi feita a higienização do ponto de coleta e a abertura da torneira para eliminação da água estagnada na tubulação. Depois disso, foi feita a coleta de água em frascos âmbar cobertos com papel alumínio, mantendo-os em caixa de isopor para o controle da temperatura. Em seguida, foi feita a medição em triplicata da quantidade de cloro residual livre a cada 15 minutos durante duas horas (Figura 9).

A partir da coleta dos dados, do traçado da linha e determinação de sua declividade, conforme o modelo de qualidade da água proposto por Rossman (2000) e Leal (2012), foi possível estimar o valor de K_b . Desta maneira, foi adotado o coeficiente K_b médio de $1,35 \text{ dia}^{-1}$, cujo valor representa o comportamento do cloro na massa da água fornecida pelo SAACG, que reproduz o decaimento do cloro nas condições atuais de operação e manutenção da rede.

Figura 9 - Medições in loco do CRL

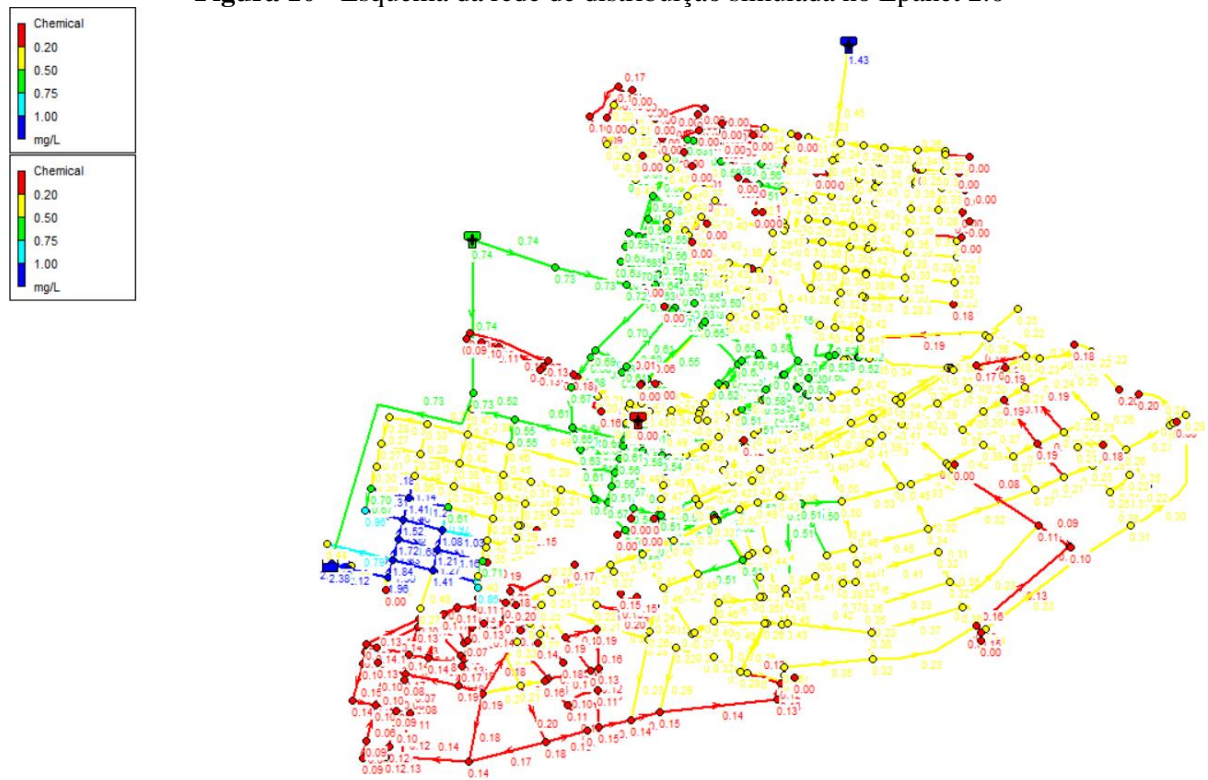
Fonte: Araujo (2019)

Esse valor, menor que o adotado por Nascimento (2016), foi influenciado pelas alterações realizadas na ETA de Gravatá, com a introdução de etapas de pré-oxidação na entrada da adutora de água bruta, contribuindo para a redução de espécies redutoras. Assim, o novo coeficiente estimado permitiu que os valores de CRL simulados na rede fossem bem próximos dos valores analisados *in loco* no sistema de distribuição de água.

5.2 Simulação no Epanet 2.0

Após simulação bem sucedida, observou-se o comportamento da qualidade da água em relação à disponibilidade do indicador sentinela cloro residual livre nos pontos de consumo da rede. A Figura 10 representa a rede simulada no Epanet 2.0. As cores dos nós e trechos representam os intervalos de valores das concentrações de cloro residual livre, onde os trechos em vermelho representam o residual de cloro abaixo de $0,2 \text{ mgCl}_2/\text{L}$, os trechos em amarelo correspondem ao residual entre $0,2$ e $0,5 \text{ mgCl}_2/\text{L}$, em verde entre $0,5$ e $0,75 \text{ mgCl}_2/\text{L}$, azul claro se refere a concentrações entre $0,75$ e $1 \text{ mgCl}_2/\text{L}$ e em azul escuro, maior que $1 \text{ mgCl}_2/\text{L}$.

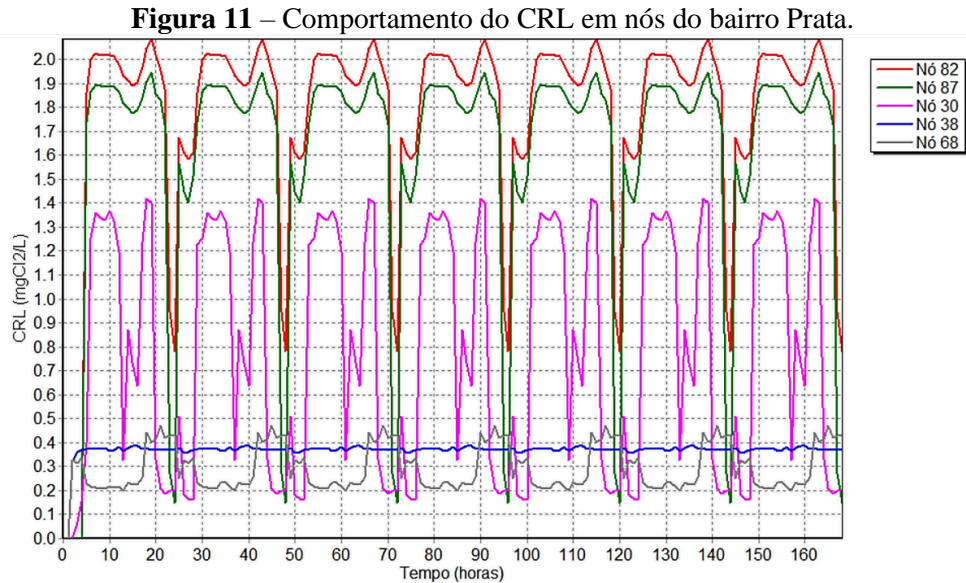
Figura 10 - Esquema da rede de distribuição simulada no Epanet 2.0



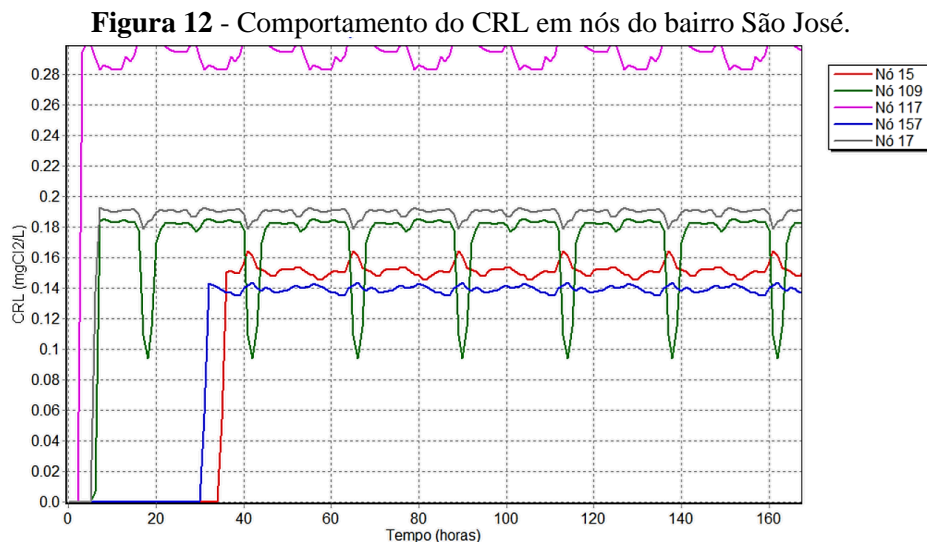
Fonte: Próprio Autor (2021)

Para alguns pontos no bairro da Prata foi observado que há uma variação no comportamento do CRL ao longo do dia. Conforme Nascimento (2016), quando a água sai do reservatório e atinge o nó mais próximo na rede de distribuição o mesmo apresenta alta concentração de CRL, ao passo que nos nós subsequentes, ocorre um decaimento coincidente com o ciclo do consumo diário devido, possivelmente, ao intervalo reduzido de detenção da água na rede que proporciona uma regeneração contínua de grande quantidade de água.

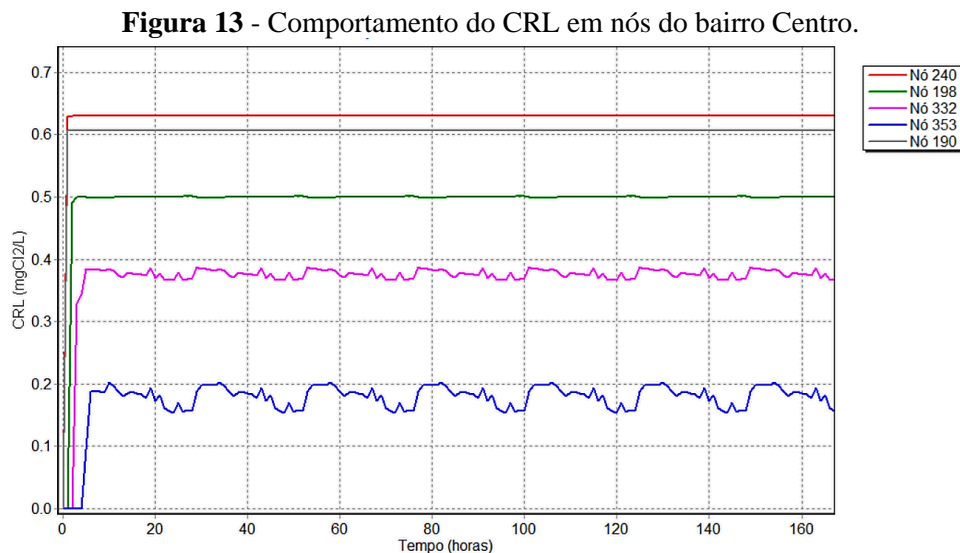
No caso do bairro da Prata, uma das constatações obtidas é de que, devido à demanda de água exigida do R5 para outros reservatórios, em alguns horários do dia a vazão torna-se menor e o consumo do reservatório maior. Dessa forma, o R5, sendo um reservatório relativamente pequeno, é demandado de forma que fica sobrecarregado, visto que o mesmo abastece bairros de populações consideráveis, fazendo com que sua lâmina de água desça rapidamente e a qualidade da água, próximo a ele, não permaneça em conformidade com o padrão de potabilidade exigido pela Portaria de Consolidação nº 5/2017. Por conta dessa grande demanda, provoca-se uma turbulência na água e, conseqüentemente, uma maior mistura de água com os sedimentos presente no reservatório, podendo consumir o cloro mais rapidamente em determinado momento do dia. A Figura 11 demonstra o comportamento do CRL nos nós distribuídos neste bairro.



Diferentemente do bairro anterior, a maioria dos nós do bairro São José apresentaram, durante todo o período da simulação, concentração de CRL abaixo do padrão mínimo de potabilidade de 0,2 mgCl₂/L (Figura 12). De acordo com Nascimento (2016) alguns fatores justificam essa degradação, visto que o reservatório que abastece o bairro opera em batelada, favorecendo a estagnação da água, e a manutenção do mesmo é precária. Além disso, não há rotina de limpeza e reparos no R2 e, conseqüentemente, o armazenamento de sedimentos no fundo intensifica a redução do CRL. Destaca-se também o confinamento da água ao longo da canalização, pois na rede do São José não há saída e toda água que entra torna-se estagnada, proporcionando uma maior formação de biofilmes principalmente nas canalizações mais antigas.



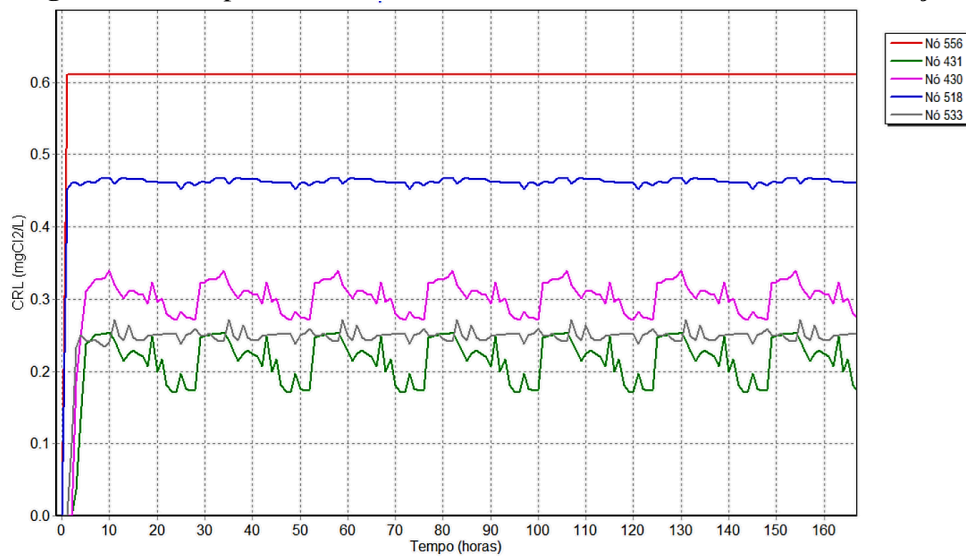
No bairro Centro, durante todo o período de simulação, alguns nós apresentaram concentração de CRL abaixo do padrão mínimo exigido, enquanto que em outros nós os valores de concentração do CRL estavam dentro da faixa recomendada. Essas variações do CRL ao longo do dia neste bairro explicam-se devido ao seu abastecimento ser feito por mais de um reservatório, os quais possuem operações particulares. Diante disso, a qualidade da água nas regiões do Centro vai depender do reservatório que o abastece, constatando-se uma baixa qualidade em regiões abastecidas por R2 e R1, provavelmente devido à influência dos fatores citados anteriormente para o R2 e o coeficiente de reação no escoamento (K_b), além do longo percurso da água da fonte de alimentação até chegar nos pontos de consumo. A Figura 13 ilustra esse comportamento nos nós do referido bairro.



Fonte: Próprio Autor (2021)

Para os bairros Lauritzen e Conceição, observa-se uma boa qualidade de água durante todo o período de simulação nas suas regiões mais centrais. Nas regiões mais periféricas da rede nota-se que o CRL não esteve em conformidade com os padrões de potabilidade, provavelmente devido às maiores distâncias dos reservatórios e às diferenças de nível na topografia, o que se torna um fator chave para gerar pressões negativas na rede, causando, presumivelmente, a falta de abastecimento contínuo. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 - Comportamento do CRL em nós dos bairros Lauritzen e Conceição.



Fonte: Próprio Autor (2021)

Mesmo com as recentes alterações na estação de tratamento, como a inclusão de etapas de pré-tratamento, o K_b utilizado para a simulação ainda foi considerado alto, sendo de $1,35 \text{ dia}^{-1}$, obtido através da análise do teste da garrafa.

Este alto valor de K_b está associado à predominância de compostos inorgânicos, sendo o responsável pela redução da maior parte do cloro. Sendo assim, o cloro é tido como um indicador de operação, pois quando o mesmo cai indica que há uma falha no processo de operação e manutenção dos reservatórios e no tratamento da água. Para que esse valor de K_b diminua recomenda-se um processo de tratamento mais avançado, adequado às características da água bruta, para que as características da água fornecida sejam melhoradas.

5.3 Análise de Risco

Com base na avaliação de risco pelo método FMEA foram quantificados os riscos das 9 falhas consideradas neste estudo, gerando valores de risco associados a cada uma, resultantes do produto dos escores atribuídos pelos especialistas, aos aspectos de severidade (S), ocorrência (O), detecção (D) e abrangência (A). O Quadro de escores foi baseado em Nascimento (2016), tendo sido feitas mudanças com o intuito de adequá-los ao presente trabalho.

Quadro 15 - Planilha da avaliação de risco do cenário atual da rede pelo método FMEA

PERIGO	FALHA	CENÁRIO ATUAL				RISCO
		S	O	D	A	
Rupturas na cobertura dos reservatórios	F1	2	3	1	2	12
Utilização de materiais e revestimentos inadequados na rede	F2	3	3	1	1	9
Crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos	F3	2	3	3	1	18
Rupturas ou fissuras nas tubulações	F4	3	3	2	1	18
Limpeza, operação e manutenção inadequada nos reservatórios	F5	3	3	2	2	36
Variações inadequadas de vazões/pressões	F6	3	3	2	2	36
Residual de cloro inadequado	F7	3	3	2	2	36
Formação de subprodutos da desinfecção	F8	2	2	3	3	36
Deterioração da qualidade da água nos reservatórios	F9	3	3	2	2	36

Depois da construção do quadro de escores, foi feita a análise dos riscos em potencial, sendo observado que os principais foram os associados às falhas relacionadas com a operação e manutenção da rede de abastecimento.

Na sequência, a falha F1 está relacionada com a integridade da cobertura dos reservatórios, a qual tem a função de proteger a massa líquida de possíveis contaminações externas e entrada de animais. Em visitas realizadas aos reservatórios, pôde-se observar alguns furos, de pequenas dimensões, nos reservatórios R5 e R2. Tal fato foi julgado como de severidade moderada, pois os furos não impactarão de forma significativa a grande massa de água armazenada.

A utilização de canalizações com materiais e revestimentos inadequados (falha F2), foi considerada com severidade alta, pois o material que compõe as canalizações e a idade das mesmas influencia a taxa de decaimento do cloro nas paredes (MELO e FORMIGA, 2007). A ocorrência também foi considerada alta pois a maior parte da rede da região estudada é constituída de cimento amianto e ferro fundido, que são revestimentos já em desuso. A Falha

F2 foi a de menor risco, pois, apesar de ter uma severidade e ocorrência altas, a abrangência é pequena, pois limita-se a apenas partes da rede.

Visto que a utilização de materiais inadequados, idades avançadas da rede e operação e manutenção inadequadas são fortes influências para o crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos, a Falha F3 foi avaliada como de risco mais significativo, levando em consideração, também, que a ocorrência deste está associada ao alto valor de Kb encontrado nas análises, proporcionando um maior decaimento do residual de cloro e, conseqüentemente, um maior crescimento de microrganismos. A severidade desta falha foi avaliada como moderada, pois, mesmo com a presença de bactérias no biofilme, estas não são a causa da não conformidade com o mínimo de cloro recomendado.

Assim como a Falha F2, a falha F4 está associada à idade avançada da rede, o que ocasiona um comprometimento da integridade das canalizações gerando rupturas. Considerando que uma parte da rede foi construída há mais de 50 anos, ocorre nessas vias maior diversidade de materiais, pois quando os reparos são feitos muitas vezes é preciso fazer a união de tubulações com materiais diferentes diante da impossibilidade de trocar toda a sua extensão, tornando-as mais suscetíveis a quebras. Esta falha foi avaliada com um risco maior que a falha F2 devido ao seu grau de percepção, ou seja, a detecção julgada como moderada.

Com base nas informações levantadas, o caso da falha F5 foi considerado expressivo porque a operação de limpeza e a reparação das estruturas dos reservatórios, de fato, não são realizadas de maneira programada, alguns deles estando há anos sem nenhum tipo de limpeza. Portanto, isto foi avaliado como muito severo, pois pode comprometer fortemente a qualidade da água. De acordo com Nascimento (2016), a falha F6 possui o mesmo nível de importância, diante da falta de um controle sistemático das variações de vazões e pressões, podendo assim comprometer a integridade da rede e, conseqüentemente, a qualidade da água distribuída.

Neste seguimento, o risco da falha F7 é bastante expressivo e real, visto que as análises das concentrações de cloro residual livre realizadas, bem como a simulação da rede dos bairros estudados, permitiram verificar a existência de regiões em que a degradação da qualidade da água é bastante crítica. Como pôde-se observar na simulação, a grande maioria dos pontos no bairro São José apresentou completo descumprimento do padrão mínimo de potabilidade. Os pontos mais periféricos dos bairros Lauritzen e Conceição também apresentaram precariedade no residual de cloro. Deste modo, pode-se afirmar que os residentes destas áreas constituem uma população mais vulnerável aos perigos, sempre que consumirem água do sistema de abastecimento.

Os riscos associados à Falha F8 são bastante relevantes, pois a presença natural de matéria orgânica na água acarreta na reação do cloro com a mesma, produzindo subprodutos que contaminam as águas e podem ser prejudiciais à saúde, tais como os trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (RITCHER, 2009). O valor de risco para esta falha foi considerado alto diante da detecção que exige o uso de equipamentos sofisticados e, por esse motivo, da falta de medidas de THMs no SAACG e na ETA. Além disso, de acordo com Nascimento (2016) a estação de tratamento não tem a capacidade de remover os precursores de THMs e nem a redução da concentração de carbono orgânico total (COT) da água bruta, sendo as concentrações destes, de entrada e saída, na faixa de 2 mg/L. A alta concentração de CRL na saída da ETA, entre 4 e 5 mgCl₂/L (NASCIMENTO, 2016), também pode ser um fator para a formação dos THMs.

Por fim, a falha F9 foi considerada diretamente relacionada com F5 e F7, uma vez que a degradação da qualidade da água nos reservatórios de distribuição é decorrente da falta de rotinas e protocolos de limpeza e reparação, bem como da falta de recloração na água para manter um residual de cloro adequado na rede.

Mediante o exposto, o cenário atual da rede foi avaliado com o valor de risco de 237. O valor de risco é necessário para apontar, dentre as falhas identificadas, as que possuem maior urgência de intervenção. Este número também torna viável a comparação com outros cenários da rede, onde pode-se observar a redução desse valor de risco para cenários reabilitados. As falhas com maior número de risco devem ser priorizadas por parte dos gestores, de forma que sejam estabelecidas ações de prevenção ou correção das mesmas, visando reduzir ou mitigar suas magnitudes.

6.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade da água distribuída aos consumidores é um fator essencial à sua saúde, higiene e desenvolvimento. Os riscos inerentes à falta de planejamento do controle e vigilância da qualidade da água devem ser assuntos recorrentes no âmbito das concessionárias responsáveis pelo abastecimento público, principalmente no que diz respeito ao cloro residual livre, que se reveste de importância fundamental, em princípio, por garantir a segurança da água até o ponto de consumo, devido à sua capacidade desinfetante residual.

Com base na simulação, foi possível cumprir o objetivo de caracterizar a qualidade da água na rede de distribuição, a qual forneceu informações acerca dos principais pontos críticos do sistema, mais especificamente, onde não havia pontos de residual de cloro disponível. Constatou-se que as regiões com maior deficiência de CRL foram o bairro São José, as regiões periféricas do bairro Lauritzen e Conceição, bem como algumas regiões do Centro. Essas verificações foram bastante reveladoras acerca das condições de operação e manutenção do SAACG e dos riscos que isso pode implicar para a população abastecida.

As principais falhas identificadas por meio da avaliação de risco foram: a falta de rotinas de manutenção dos reservatórios e da rede de distribuição, condições precárias de infraestrutura como a utilização de canalizações antigas e a deficiência na manutenção de um residual de cloro na rede.

Dessa forma, cumpriu-se o objetivo deste trabalho, que foi avaliar, através da análise de risco e da simulação da rede, a deterioração da qualidade da água e os riscos que a população da região em estudo estava exposta, em decorrência disso. Por meio dessa avaliação, foi possível constatar que o gerenciamento do sistema de abastecimento de água necessita de melhorias na operação e manutenção, para garantir o acesso do consumidor à água segura.

A análise de risco, juntamente com a simulação da qualidade da água do sistema pode contribuir significativamente para a melhoria do serviço de abastecimento de água, uma vez que, com base na situação atual do sistema, é possível minimizar incertezas inerentes ao gerenciamento e identificar suas principais deficiências para, a partir delas, priorizar ações e melhorias mais eficientes.

Por fim, espera-se que os resultados da pesquisa sejam capazes de motivar os gestores a uma reflexão sobre os riscos à população consumidora associados à degradação da qualidade da água e que a análise do conjunto de dados torne-se instrumento útil nas intervenções necessárias nos esquemas de operação e manutenção do sistema de abastecimento, assim como para apoiar novas análises e estudos acerca da qualidade da água do SAACG.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. S. **Análise da degradação da qualidade da água de abastecimento distribuída por rede antiga de cimento amianto.** 2014. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.
- ARAUJO, A. A. Q. de. **Aplicação de simulação no planejamento de reabilitação de redes de distribuição de água.** 2019. 83p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.
- BRASIL. Lei complementar nº 95, Art. 13, inciso 1o, de 26 de fevereiro de 1998. **Dispõe sobre a elaboração, a redação, a alteração e a consolidação das leis, conforme determina o parágrafo único do art. 59 da Constituição Federal, e estabelece normas para a consolidação dos atos normativos que menciona.** Brasília, DF, 1998.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de consolidação Nº5, de 28 de setembro de 2017.** Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário Oficial da União: Brasília, 2017.
- CLARK, R.; GRAYMAN, W.; MALES, R. M.; HESS, A. **Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems.** Journal of Environmental Engineering, v. 119, n. 2, p.349-364, 1993.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Diagnóstico do município de Campina Grande, estado da Paraíba.** Recife, 2005. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15949/Rel_Campina_Grande.pdf?sequence=1. Acesso em: 3 de fev 2021.
- GOMES, H. P. **Abastecimento de Água.** 464p. João Pessoa: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS UFPB, 2019.
- GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. **EPANET 2.0 Brasil – Manual do Usuário.** João Pessoa: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS UFPB, 2008.
- GRADVOHL, S. T. S. **Análise de risco em sistemas de abastecimento de água sob a perspectiva do plano de segurança da água – Estudo de caso: região metropolitana de Fortaleza no estado do Ceará.** 2012. 214 f. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano.** 871 p. vol 1. Belo Horizonte: UFMG, 2006.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano.** 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010 – Cidades e Estados**. IBGE, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/campina-grande/panorama>. Acesso em: 3 de fev. 2021.

LEAL, E. S. **Modelagem da degradação de cloro residual livre em sistemas de adução de água de abastecimento de porte médio**. 2012. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3 ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

MELO, M. S.; FORMIGA, K.; MARTINS, T. **Modelagem de cloro residual em sistemas de distribuição de água: exemplo de aplicação em rede da Região Metropolitana de Goiânia**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVII, 2007. São Paulo. Anais... São Paulo: ABRH, 2007. p. 217-237.

MENESES, R. A. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande**. 2011. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MUNAVALLI, G. R.; KUMAR M. M. S. **Dynamic simulation of multicomponent reaction transport in water distribution systems**. Water Research, v. 38, p. 1971-1988, 2004.

NASCIMENTO, R. S. **Modelo conceitual para a gestão da qualidade da água em sistemas de abastecimento de médio porte**. 2016. 192 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

OGATA, I. S. **Avaliação de risco da qualidade da água potável do sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande (PB)**. 2011. 68 f. TCC (Graduação em Engenharia sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991.

RITCHER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 user's manual**. U.S. Environmental Protection Agency – EPA. Cincinnati, Ohio, 2000.

SANTOS, S. G. **Distribuição espacial de bactérias heterotróficas na rede de distribuição de água de Campina Grande – PB**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SANTOS, W. B. **Modelagem da degradação de cloro residual livre na rede de distribuição de água da cidade de Campina Grande – PB**. 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SILVA, G. A. B. **Decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água da cidade de Campina Grande-PB.** 2017. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. de. **Manual de análise físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias.** 266 p. Campina Grande: O Autor, 2001.

TSUTYIA, M. T. **Abastecimento de Água.** 3 ed. 643p. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

VERÇOSA, L. F. M. **Avaliação de risco de reservatórios de distribuição de água de sistema de abastecimento de médio porte.** 2017. 53 f. TCC (Graduação em Engenharia sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2017.

WHO. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality.** 4 ed. 564 pg. Genebra, Suíça: WHO, 2011.

ZAMBRANO, T. F.; MARTINS, M. F. **Utilização do método FMEA para avaliação do risco ambiental.** Gestão & Produção, São Carlos, v. 14, n. 2, 2007.