



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

LÍVIA FRAGOSO DE MELO VERÇOSA

**AVALIAÇÃO DE RISCO DE RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE MÉDIO PORTE**

**CAMPINA GRANDE
2017**

LÍVIA FRAGOSO DE MELO VERÇOSA

**AVALIAÇÃO DE RISCO DE RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE MÉDIO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Sanitária e Ambiental da
Universidade Estadual da Paraíba como
requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ruth Silveira do
Nascimento

Coorientador: MEng. Cícero Fellipe Diniz
de Santana

**CAMPINA GRANDE
2017**

É expressamente proibida 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 da dissertação.

V549a Verçosa, Livia Fragoso de Melo.

Avaliação de risco de reservatórios de distribuição de água de sistema de abastecimento de médio porte [manuscrito] / Livia Fragoso de Melo Verçosa. - 2017.

53 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação: Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

"Co-Orientação: Prof. Me. Cícero Fellipe Diniz de Santana".

1. Qualidade da água. 2. Água- Gestão de qualidade. 3. Distribuição de água. 4. HAZOP. I. Título.

21. ed. CDD 628.14

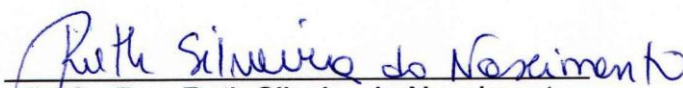
LÍVIA FRAGOSO DE MELO VERÇOSA

**AVALIAÇÃO DE RISCO DE RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE MÉDIO PORTE**

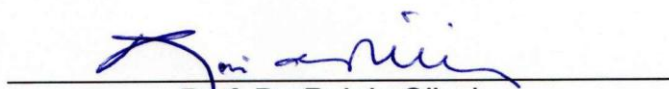
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Sanitária e Ambiental da
Universidade Estadual da Paraíba como
requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Aprovada em: 14/2/2017

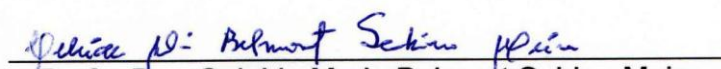
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento
(Orientadora – CCT/DESA/UEPB)



Prof. Dr. Rui de Oliveira
(Examinador – CCT/DESA/UEPB)



Profa. Dra. Celeide Maria Belmont Sabino Meira
(Examinadora – CCT/DESA/UEPB)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu concluísse essa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Tereza Fragoso e meu Pai Yvan Verçosa, meu porto seguro, sempre me apoiando e me incentivando a ir além, que sempre tiveram meus estudos como prioridade e pelo esforço para propiciar a minha educação.

À minha avó Maria Anunciada (*in memorian*), com quem eu gostaria de poder compartilhar momentos como esse, por seu exemplo de determinação, força e caráter.

Ao meu noivo, Alexandre Strapação Guedes Vianna, pelo seu companheirismo, paciência, compreensão e por estar sempre presente, compartilhando as minhas conquistas e decepções.

À professora Ruth Silveira do Nascimento e Cícero Fellipe Diniz de Santana, por me orientarem com sabedoria, pelos ensinamentos e confiança depositada.

Aos professores Rui de Oliveira e Celeide Meira que sempre me receberam e me abrigaram no Laboratório de Eficiência Energética e Conforto Ambiental, fazendo deste um lugar especial na Universidade.

À todos os professores do curso, que foram importante para minha formação e para as minhas conquistas acadêmicas e profissionais.

Às minhas amigas de longas datas, Amora, Diandra, Gabriela, Josiete, Karol, Marcella, Mariah e Priscilla, que sempre estiveram presentes em grandes momentos da minha vida, por compreenderem e aceitarem a minha ausência em muitos momentos importantes.

RESUMO

A qualidade da água efluente da estação de tratamento pode sofrer alterações em consequência das diversas reações que podem ocorrer ao longo do sistema de distribuição. Eventos de contaminação da água nos sistemas de distribuição têm efeito mais significativo sobre a saúde pública devido à ausência de barreiras entre o incidente e o consumidor. A gestão da qualidade da água visando à manutenção e promoção da saúde requer a identificação de forma preventiva dos eventos que podem levar à degradação da qualidade da água de consumo. Essa abordagem é ainda mais necessária nos reservatórios de distribuição de água, uma vez que eles constituem os pontos mais vulneráveis do sistema. Sendo assim o presente estudo tem como objetivo principal avaliar os riscos de degradação da qualidade da água associados às falhas estruturais, operacionais e de manutenção dos reservatórios R2 e R5 de distribuição de água da cidade de Campina Grande. Para a avaliação dos perigos foi utilizada a metodologia HAZOP, que possibilitou a caracterização qualitativa dos principais perigos e a identificação das suas causas. Também foi realizada uma Avaliação Preliminar de Risco para a caracterização dos riscos a partir de uma matriz de classificação de riscos semi-quantitativa, que forneceu a classificação de risco em termos de sua importância. A partir do estudo foi constatado que a situação no R2 é crítica, pois todos os eventos perigosos avaliados foram caracterizados como de alto risco. O risco total avaliado no reservatório R5 apresentou um valor inferior do que o R2, contudo, 75% dos eventos avaliados foram classificados como de alto risco. A metodologia se mostrou flexível e eficiente, permitindo uma melhor compreensão do processo de degradação da qualidade da água dentro dos reservatórios, contribuindo na proposição de medidas preventivas, na construção de protocolos de operação e planos emergenciais para situações críticas.

Palavras-chave: Gestão da qualidade da água, Avaliação de risco, HAZOP, Gestão de sistema de distribuição de água.

ABSTRACT

The quality of the water effluent from the treatment plant can change as a result of the various reactions that may occur along the distribution system. Water contamination events in distribution systems have a more significant effect on public health due to the lack of barriers between the incident and the consumer. Water quality management aiming at the maintenance and promotion of health requires the preventive identification of events that may lead to deterioration of drinking-water quality. This approach is even more necessary in finished water storage reservoir, since they are the most vulnerable points in the system. Therefore, the present study has as main goal to evaluate the risks of water quality deterioration associated to structural, operational and maintenance faults of R2 and R5 water distribution reservoirs of Campina Grande city. For the hazard assessment HAZOP methodology was used, which enabled the qualitative characterization of the main hazards and the identification of their causes. A Preliminary Risk Analysis was also carried out to characterize the risks from a semi-quantitative risk classification matrix, which provided the risk classification in terms of its importance. From the study it was verified that the situation in the R2 is critical, because all the dangerous events evaluated were characterized as high risk. The total risk assessed in reservoir R5 presented a lower value than R2, however, 75% of the evaluated events were classified as high risk. The methodology proved to be flexible and efficient, allowing a better understanding of the process of water quality degradation inside the reservoirs, contributing to the proposal of preventive measures, the construction of operating protocols and emergency plans for critical situations.

Keywords: Water quality management, Risk assessment, HAZOP, Water distribution systems management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Resumo dos objetivos do PSA.....	20
Figura 2 – Etapas do desenvolvimento do PSA	22
Figura 3 – Sistema de distribuição de água da cidade de Campina Grande	28
Figura 4- Representação das zonas de pressão da rede de distribuição de água de Campina Grande.....	29
Figura 5 – Quantificação do risco total para cada reservatório.....	37
Figura 6 - Quantificação individual dos riscos do R2.....	38
Figura 7 - Quantificação individual dos riscos do R5.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais eventos perigosos associados com a operação do SDA.....	19
Tabela 2 – Classificação da categoria severidade.	32
Tabela 3–Classificação da ocorrência de aberturas na cobertura/fissuras nas paredes.	33
Tabela 4–Classificação da ocorrência de elevado tempo de detenção hidráulica. ...	33
Tabela 5 - Classificação da ocorrência de crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos.	34
Tabela 6 - Classificação da ocorrência de residual inadequado de cloro.	34
Tabela 7-Classificação da ocorrência de subprodutos da desinfecção.	34
Tabela 8 - Classificação da ocorrência de operações inadequadas de inspeção, manutenção e limpeza.	35
Tabela 9 – Matriz de priorização de risco.	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Desvios do HAZOP de acordo com os parâmetros do processo....	27
Quadro 2 - Principais perigos levantados nos reservatórios.	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APR	Análise Preliminar de Risco
AWWA	American Water Works Association
ETA	Event Tree Analysis
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Failure Tree Analysis
HAZOP	Hazard and Operability Study
FTA	Failure Tree Analysis
NAS	National Academy of Science
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial hidrogeniônico
PSA	Plano de Segurança da Água
SAA	Sistemas de abastecimento de água
SDA	Sistemas de distribuição de água
SPD	Subprodutos da desinfecção
TDH	Tempo de detenção hidráulica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO.....	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Água segura no sistema de distribuição de água	15
3.1.1	Integridade do sistema de distribuição de água.....	17
3.2	Plano de segurança da água.....	19
3.2.1	Etapas de um PSA	22
3.2.1.1	Etapas preliminar	23
3.2.1.2	Avaliação do sistema.....	23
3.2.1.3	Monitoração operacional	24
3.2.1.4	Planos de gestão.....	24
3.3	Análise de risco	25
3.3.1	HAZOP	26
4	METODOLOGIA.....	28
4.1	Sistema de distribuição de água de Campina Grande	28
4.2	Descrição dos reservatórios R5 e R2	29
4.3	Avaliação de risco	30
4.3.1	HAZOP aplicado ao SDA de Campina Grande.....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	APÊNDICE I.....	51

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável e segura em quantidade suficiente é essencial para a manutenção da saúde e desenvolvimento social e econômico, além de ser um direito básico de todos os cidadãos.

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 2914/2011 do Ministério da Saúde define água potável como aquela que “atenda o padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde”.

Os sistemas de abastecimento de água devem ser projetados e operados de modo a garantir o fornecimento contínuo de água potável segura para o consumo humano. No entanto, durante o seu percurso até o consumidor final a água está sujeita à diversas ameaças que podem acarretar o comprometimento da sua qualidade e expor a população a riscos de surtos de diversas doenças de veiculação hídrica.

A contaminação da água pode se dar em função de falhas operacionais na estação de tratamento, transientes hidráulicos, pressão negativa e infiltração na rede de distribuição, operações inadequadas de manutenção e limpeza dos reservatórios, entre outros (VIEIRA e MORAIS, 2005).

Sendo assim, se fazem necessários o controle e vigilância da qualidade da água a fim de assegurar o atendimento aos padrões de potabilidade. A vigilância geralmente é realizada através do monitoramento e avaliação do atendimento dos valores estabelecidos para os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, em pontos estratégicos do sistema.

O controle da qualidade da água baseado apenas em análises laboratoriais de amostras é insuficiente para garantir a segurança da água, principalmente pela possibilidade das análises não conseguirem detectar alterações na qualidade da água em tempo real (BYLEVELD; DEERE; DAVISON, 2008).

Para o Ministério da Saúde, tão importante quanto atender o padrão de potabilidade é o emprego de boas práticas em todas as etapas do sistema de abastecimento de água com vistas à prevenção e minimização dos riscos à saúde humana associados ao consumo de água (BRASIL, 2006).

Já para a OMS, a forma mais eficiente de assegurar a proteção da saúde pública é através da implantação de uma gestão de risco dentro do sistema de abastecimento de água (DAVISON et al., 2005).

A avaliação de risco tem-se constituído em importante ferramenta da gestão da qualidade da água em sistemas de abastecimento de água, auxiliando os processos decisórios de prevenção e controle da exposição de populações e indivíduos aos agentes perigosos à saúde (FREITAS, 2002). Através desta ferramenta é possível avaliar e estimar o potencial de danos à saúde oriundos da degradação da qualidade da água distribuída.

Apesar da análise de risco ser bastante aplicada nos sistemas de abastecimento de água, o seu emprego especificamente nos reservatórios de distribuição de água potável ainda é muito incipiente, mesmo os reservatórios constituindo pontos fracos do sistema de distribuição de água potável.

O presente estudo, dentro da perspectiva da avaliação de risco, identificou e avaliou os principais eventos perigosos que podem levar à degradação da qualidade da água dentro dos reservatórios de distribuição de água, com a finalidade de estimar os riscos à saúde dos consumidores.

Dentro desse contexto, o estudo pretende contribuir com a gestão da qualidade da água do sistema de abastecimento de água de Campina Grande – PB, promovendo um maior entendimento dos meios pelos quais pode ocorrer o comprometimento da qualidade da água dentro dos reservatórios, servindo de subsídio para o processo decisório de operação e manutenção dos reservatórios como também para o gerenciamento de riscos.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os riscos de degradação da qualidade da água associados às falhas estruturais, operacionais e de manutenção de dois reservatórios de distribuição de água da cidade de Campina Grande.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar os principais eventos perigosos que podem levar ao comprometimento da qualidade da água nos reservatórios de distribuição;
- Avaliar qualitativamente os perigos através da metodologia HAZOP;
- Quantificar e priorizar os riscos de degradação da qualidade da água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUA SEGURA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Sistemas de distribuição de água (SDA) constituem uma das unidades do sistema de abastecimento de água e compreende os reservatórios de água tratada, tubulações, conexões, válvulas e peças especiais instalados em logradouros públicos.

O sistema de distribuição de água tem por objetivo o fornecimento contínuo de água em quantidade e qualidade adequadas para o seu consumo, e para fins de combate a incêndio, à adequada pressão, com mínimas perdas e de maneira econômica.

A qualidade da água efluente da estação de tratamento pode sofrer alterações em consequência de reações químicas e biológicas que possam ocorrer ao longo do sistema de distribuição de água.

A degradação da qualidade da água pode resultar na não conformidade com o padrão de potabilidade estabelecido pela legislação vigente, além de pôr em risco a saúde dos consumidores.

Diversos surtos de doenças, tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento, estão associados à contaminação da água nos sistemas de distribuição de água potável.

Em 2008, no Colorado, Estados Unidos, cerca de 1.300 pessoas adoeceram e uma foi levada a óbito devido à contaminação do tanque de armazenamento de água potável com *Salmonella typhimurium* (FALCO e WILLIAMS, 2009).

Amr e Yassin (2008) avaliaram a contaminação por coliformes totais e fecais da rede de distribuição de água da faixa de Gaza e constataram uma elevada correlação entre os altos índices de coliformes fecais na rede e a ocorrência de doenças diarreicas. O fornecimento intermitente de água, a cloração insuficiente, a idade das tubulações e a contaminação por passagem cruzada com esgotos foram apontadas como as principais causas da contaminação da água distribuída.

Risebro et al (2007) investigaram os fatores causais de 61 surtos de doenças de veiculação hídrica associados com sistemas de abastecimento de água e constataram que as falhas no sistema de distribuição são os fatores que, ocorrendo isoladamente, contribuem de forma efetiva para a ocorrência de surtos individuais.

Portanto, corroborando que eventos ocorridos nos sistemas de distribuição têm, geralmente, efeito mais significativo sobre a saúde pública devido à ausência de barreiras entre o incidente e o consumidor.

As consequências da ocorrência de eventos perigosos nos sistemas de distribuição podem ser severas, contudo, os riscos de contaminação da água podem ser minimizados e controlados através da gestão integrada de riscos baseada em uma abordagem de múltiplas barreiras que se estenda da captação até o consumidor final.

A abordagem de múltiplas barreiras consiste em um sistema integrado de práticas, procedimentos e processos adotados ao longo de todo o sistema de abastecimento de água com vistas à prevenção e controle da contaminação da água (CCME, 2004). Nessa abordagem, cada etapa do sistema (captação, tratamento e distribuição) atua como uma barreira física à passagem do contaminante, de modo que as consequências de uma eventual falha de uma barreira possam ser eliminadas ou reduzidas pela barreira subsequente (WHO, 2011).

De acordo com Vieira e Morais (2005), os principais eventos perigosos que podem ocorrer no sistema de distribuição são:

- Reservatórios e tubulações não cobertos;
- Curto-circuito hidráulico nos reservatórios;
- Utilização de materiais e revestimentos inadequados;
- Corrosão nos reservatórios e nas tubulações;
- Infiltração e entrada de contaminantes através de conexão cruzada;
- Formação de biofilme;
- Fissura nos reservatórios e tubulações;
- Reparação, manutenção e limpeza inadequadas dos reservatórios;
- Concentração inadequada de residual de cloro;
- Formação de subprodutos da desinfecção;
- Acesso de animais aos reservatórios;
- Deterioração da qualidade da água nos reservatórios.

Apesar da importante função do sistema de distribuição, a única medida de controle para a entrada de contaminantes é a manutenção do residual de desinfetante, o qual fornece alguma proteção contra os riscos bacterianos e virais

(WHO, 2014). Os perigos introduzidos através de falhas nos sistemas de distribuição normalmente fluem diretamente para os consumidores, por isso, é fundamental a gestão de riscos nesses sistemas com vistas a assegurar a sua integridade.

3.1.1 Integridade do sistema de distribuição de água

A manutenção da integridade do sistema de distribuição é uma das principais formas de prevenção contra a contaminação da água potável. A *National Academy of Science* (NAS) detalhou os principais fatores que acarretam a perda da integridade do sistema e como esses fatores afetam a qualidade da água (NRC, 2006).

De acordo com a NAS, a integridade do sistema de distribuição é composto por três elementos básicos: (1) integridade física, referente à manutenção de uma barreira física entre o interior do sistema e o ambiente externo; (2) integridade hidráulica, referente à manutenção da vazão, pressão e idade da água, considerando os requisitos da água para consumo humano e para combate a incêndio; (3) integridade da qualidade, referente à manutenção da qualidade da água através da adoção de ações que previnam a sua deterioração no interior das tubulações e dos reservatórios.

A integridade física impede a entrada de contaminantes, ou seja, previne que a qualidade da água seja afetada por agentes externos. A perda da integridade física é causada por uma alteração abrupta ou gradual da estrutura, resultante de uma fratura ou processo de corrosão. As falhas estruturais mais comuns estão associadas à idade da tubulação, à deterioração dos componentes do sistema e às variações bruscas e excessivas da pressão.

Os fatores importantes na manutenção da integridade física do sistema incluem a manutenção dos componentes dos sistemas, tais como a proteção de tubulações, juntas contra a corrosão e a presença de dispositivos para prevenir conexões cruzadas e retrossifonamento (MORENO, 2009).

A integridade hidráulica refere-se à capacidade do sistema em fornecer quantidade suficiente de água sob pressão apropriada. A pressão adequada é definida em termos das pressões máxima e mínima de projeto, fornecida aos consumidores sob as condições de demandas e é o componente mais importante da integridade hidráulica. Baixas pressões podem ser causadas por falhas em bombas,

válvulas e intermitência do escoamento, favorecendo a intrusão de água contaminada e sedimentos. A perda de pressão pode, também, piorar o impacto das fissuras sobre a integridade física, por exemplo, intensificando as conexões cruzadas (WHO, 2014).

Elevadas pressões aumentam o desgaste das válvulas e demais acessórios do sistema, podendo causar vazamento e rompimento na rede. Ainda, pressões excessivas geram flutuações elevadas da velocidade do fluido, resultando na ressuspensão de partículas sedimentadas e também no deslocamento do biofilme (NCR, 2006).

Assim, diversos eventos e falhas que levam à perda da integridade física podem também resultar na perda da integridade hidráulica, e vice-versa. A manutenção da integridade hidráulica depende da apropriada operação do sistema para minimizar o tempo de residência e prevenir a incrustação das tubulações, que aumentam a rugosidade hidráulica e diminuem o diâmetro efetivo (MORENO, 2009).

O comprometimento de ambas as integridades física e hidráulica contribuem para a perda da integridade da qualidade da água visto que eventos de contaminação externa podem atuar como fonte de inóculo, introduzir nutrientes e sedimentos, ou diminuir as concentrações de desinfetantes dentro do sistema de distribuição.

Contudo, mesmo na ausência de contaminação externa, existem situações de degradação da qualidade da água devido às reações que ocorrem dentro das tubulações e reservatórios (NCR, 2006).

Outro parâmetro hidráulico que tem forte influência sobre a integridade da qualidade da água é a velocidade de escoamento. Baixas velocidades propiciam o acúmulo de sedimentos e o desenvolvimento de microrganismos que podem utilizar os sedimentos como um escudo protetor contra a ação do desinfetante.

A Tabela 1 resume os principais eventos perigosos que podem ocorrer na operação do sistema de distribuição de água e resultar no comprometimento da sua integridade.

Tabela 1 - Principais eventos perigosos associados com a operação do SDA.

Categoria	Evento perigoso	Perigo
Integridade física	Corrosão levando à perda da integridade estrutural	Microbiológico, físico e químico
Integridade hidráulica	Contaminação através da infiltração de água na rede em áreas de baixa pressão ou abastecimento intermitente Contaminação através da infiltração de esgoto na rede em áreas de baixa pressão ou abastecimento intermitente Acúmulo de biofilmes, sedimentos e partículas na rede, devido a baixas velocidades e ressuspensão durante eventos de alto fluxo	Microbiológico, físico e químico
Integridade da qualidade da água	Ocorrência de patógenos e crescimento de em biofilmes Presença de subprodutos da desinfecção devido à presença de matéria orgânica na água	Microbiológico Químico

Fonte: Adaptado de WHO (2014)

A proteção da saúde pública requer que os profissionais da água adotem abordagens que incorporem a integridade física, hidráulica e a integridade da qualidade da água em um só programa abrangente.

3.2 PLANO DE SEGURANÇA DA ÁGUA

O fornecimento de água segura para o consumo humano através de sistemas de abastecimento de água (SAA) é um dos elementos fundamentais das políticas de saúde pública, visto que a água pode ser um veículo de diversas doenças.

Tradicionalmente, a avaliação da qualidade da água potável é realizada através da análise da conformidade dos indicadores físicos, químicos e biológicos com relação aos limites estabelecidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Para Vieira e Moraes (2005), essa metodologia de controle de qualidade é lenta, dispendiosa e limitada. O controle laboratorial apresenta uma série de limitações tais como a inexistência de indicadores da qualidade da água de emprego universal, as limitações inerentes ao princípio amostral e a dificuldade ou mesmo impossibilidade de monitoramento em tempo real (BASTOS; BEZERRA; BEVILACQUA, 2007).

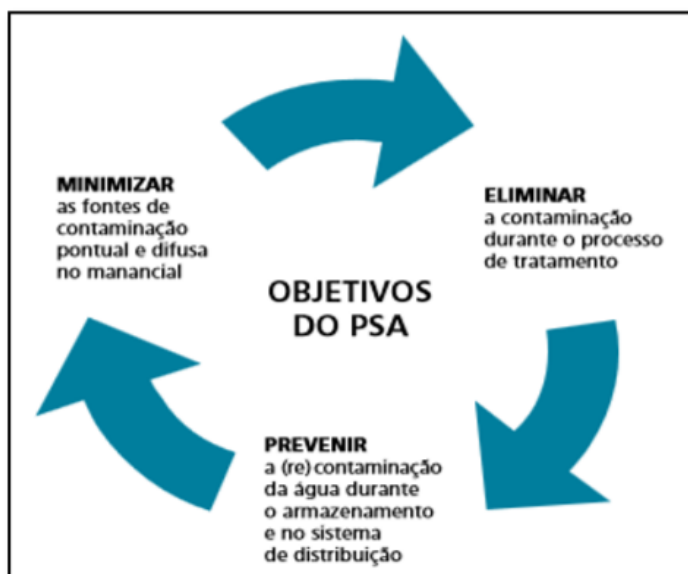
Nessa abordagem, se houver uma contaminação da água potável, os consumidores podem já estar expostos aos contaminantes ao tempo em que os resultados das análises estiverem disponíveis (BYLEVELD; DEERE; DAVISON, 2008).

Portanto, apenas o monitoramento da conformidade dos parâmetros não é o suficiente para assegurar a manutenção da qualidade da água, pois essa abordagem tem o caráter corretivo e não preventivo.

Segundo OMS, a maneira mais eficaz de garantir a segurança do fornecimento de água potável é através da aplicação de uma gestão de risco dentro do sistema de abastecimento de água, a qual foi definida como Plano de Segurança da Água (DAVISON et al., 2005).

O Plano de Segurança da Água (PSA) compreende uma gestão preventiva cujo objetivo é o fornecimento de água segura para o consumo humano através da minimização da contaminação do manancial, redução ou remoção da contaminação durante o tratamento e a prevenção de pós-contaminação no sistema de distribuição de água (DAVISON et al., 2005). A Figura 1 ilustra resumidamente os objetivos do PSA.

Figura 1- Resumo dos objetivos do PSA



Fonte: Bastos (2010) *apud* Brasil (2012)

O PSA pode ser aplicado a diferentes realidades através da adaptação da sua metodologia às características do sistema de abastecimento avaliado.

Mahmud et al. (2007) adaptaram o modelo tradicional do PSA para um sistema comunitário de produção de água localizado na região rural de Bangladesh. O PSA foi desenvolvido para as seguintes tecnologias: poços cavados protegidos, filtros de areia para lagoas, sistema de coleta de águas pluviais, poço tubular profundo, pequenos sistemas de água canalizada oriundas de poços tubulares, pequenos sistemas de água canalizada a provenientes de fonte de água superficial com subsequente filtração em vários estágios, pequenos sistemas de água canalizada provenientes de fontes minerais e poços tubulares rasos.

Já em Kampala, Uganda, um PSA seguindo a metodologia estabelecida pela OMS foi implantado a um sistema de abastecimento do tipo convencional de médio porte (HOWARD et al., 2005).

Gunnarsdottir et al. (2012) avaliaram as mudanças em sistemas de abastecimento da Islândia após a implantação do PSA. O estudo mostrou que houve uma redução significativa do descumprimento dos requisitos legais além da redução na concentração de bactérias heterotróficas (tanto no manancial quanto no sistema de distribuição) e da incidência de diarreia.

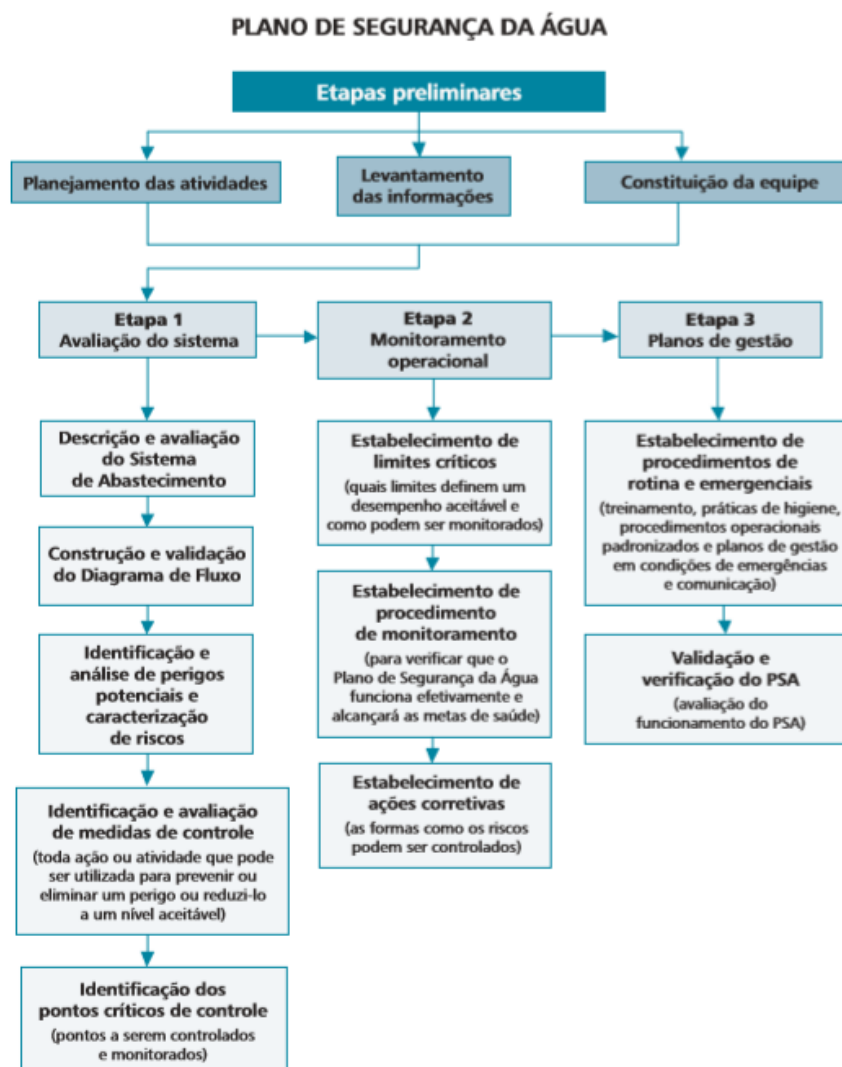
De modo geral, os principais benefícios resultantes da implantação do PSA são os seguintes (BRASIL, 2012):

- Identificação dos perigos e riscos;
- Otimização de investimentos;
- Redução de custos de tratamento;
- Otimização dos processos de trabalho, por meio da organização da documentação e dos procedimentos operacionais existentes, levando a ganhos em eficiência, melhoria de desempenho e resposta mais rápida em casos de incidentes;
- Qualificação dos profissionais;
- Garantia da qualidade da água, atendendo ao padrão de potabilidade estabelecido pela legislação vigente;
- Garantia de maior segurança e confiabilidade por parte dos consumidores, diminuindo as reclamações.

3.2.1 Etapas de um PSA

Basicamente, as etapas para o desenvolvimento do PSA compreendem avaliação minuciosa de todas as etapas do sistema de abastecimento de água, desde o manancial até o consumidor, o estabelecimento de medidas de controle e monitoramento operacional e a elaboração de planos de gestão e comunicação. A Figura 2 apresenta um esquema geral das etapas de implantação de um PSA.

Figura 2 – Etapas do desenvolvimento do PSA



Fonte: Brasil (2012).

3.2.1.1 Etapa preliminar

A primeira ação no desenvolvimento de um PSA é a formação de uma equipe multidisciplinar qualificada com experiência e profundo conhecimento técnico sobre sistemas de abastecimento de água, permitindo a compreensão dos perigos e riscos que podem comprometer a qualidade da água para consumo humano. Normalmente a equipe inclui gestores, engenheiros, especialistas em qualidade da água, profissionais do setor da saúde e do meio ambiente e técnicos operacionais (DAVISON et al., 2005). A equipe será responsável pela definição do escopo do PSA bem como o seu desenvolvimento, manutenção e execução.

Ainda nessa etapa também são levantadas as informações sobre o sistema, necessárias para a avaliação e identificação dos perigos.

3.2.1.2 Avaliação do sistema

Nessa etapa, todo o sistema, desde a captação até o consumidor final, é detalhadamente descrito com o intuito de verificar a capacidade do sistema em tratar e fornecer água segura para o consumo humano.

Para a OMS (2005), a descrição do sistema é fundamental para a identificação dos possíveis perigos e avaliação dos riscos e deve contemplar a caracterização do manancial, os processos de tratamento, o armazenamento e os mecanismos para a distribuição da água potável.

Para auxiliar a avaliação bem como permitir uma melhor visualização e compreensão do sistema é indicada a construção de diagrama de fluxo, que contém uma sequência de todas as etapas envolvidas no processo e todos os elementos da infraestrutura. Portanto, o diagrama proporciona uma descrição resumida do sistema e facilitam a identificação de perigos e pontos de controle relacionados a todo o processo de produção da água (VIEIRA e MORAIS, 2005).

É fundamental que, tanto a descrição quanto a representação do sistema sejam precisas, uma vez que a equipe utilizará essas informações como base para a identificação dos perigos. Informações incorretas, nessa etapa, podem levar à subestimação de perigos significantes. Assim, para garantir a precisão das informações, é necessária uma validação da descrição do sistema pelo corpo técnico.

Após a descrição, devem-se identificar, em cada etapa do diagrama de fluxo, os eventos perigosos e/ou os perigos químicos, físicos e biológicos que possam estar associados com o sistema de abastecimento de água. Em cada etapa do diagrama o objetivo é identificar as possíveis causas que possam levar à contaminação da água, caracterizar os eventos em função do seu grau de risco, correlacionar os perigos com seus efeitos adversos à saúde e estabelecer medidas de controle para cada perigo.

3.2.1.3 Monitoração operacional

Os perigos significantes identificados na avaliação de risco devem ser controlados a fim de garantir a integridade da qualidade da água. A monitoração operacional compreende a definição de medidas de controle para cada perigo.

Para cada medida de controle é importante, primeiramente, o estabelecimento dos limites operacionais, que são critérios que indicam se a medida de controle está funcionando adequadamente.

No entanto, muitas vezes não é possível identificar diretamente o perigo, sendo necessário recorrer a indicadores mensuráveis que estejam relacionados com o desempenho das medidas de controle.

Algumas características da água servem como indicadores operacionais (DAVISON et al, 2005). No manancial os indicadores mais comumente monitorados são turbidez, pH, oxigênio dissolvido, coliformes totais, cor e crescimento de algas. No tratamento, os recomendados para monitoração são pH, turbidez, coliformes totais, cor aparente, perda de carga, concentração do cloro residual livre e tempo de contato. No sistema de distribuição, os indicadores mais recomendados para serem monitorados são turbidez, concentrações de cloro residual, bactérias heterotróficas e pressão na rede.

3.2.1.4 Planos de gestão

Os planos de gestão descrevem ações a serem praticadas em situação normal de operação e em situações excepcionais, tais como situações em que os limites operacionais são excedidos. Os planos de gestão também compreendem a organização da documentação da avaliação do sistema, a comunicação de risco à

saúde, os programas de suporte e a validação e verificação periódica do PSA (VIEIRA e MORAIS, 2005).

A documentação deve conter as informações levantadas nas etapas anteriores (descrição do sistema, diagrama de fluxo, perigos potenciais, medidas de controle e monitoramento operacional), deve descrever as atividades que serão realizadas e como os procedimentos serão implementados. Ainda, a documentação deve contemplar a operação em situação de rotina, procedimentos de gerenciamento, operações em situações de incidentes, plano de resposta a emergências e as medidas dos programas de suporte.

3.3 ANÁLISE DE RISCO

Na abordagem do risco, faz-se necessário distinguir os conceitos de risco e perigo que, em muitos contextos, são utilizados como sinônimos. O perigo pode ser definido como a característica de uma atividade ou circunstância em causar dano à algo ou alguém. O risco, por sua vez, é a quantificação da probabilidade de ocorrência da falha e magnitude das perdas ou danos. Portanto, o risco é a contextualização de uma situação de perigo, ou seja, a materialização de um evento indesejado (SÁNCHEZ, 2013).

A análise de risco é uma ferramenta da gestão de riscos e é composta por três elementos básicos: avaliação, gerenciamento e comunicação do risco. Na avaliação de risco são descritos os fatores, agentes ou situações que podem levar à ocorrência de eventos indesejáveis. No gerenciamento são estabelecidas ações preventivas e corretivas a fim de evitar, reduzir ou controlar os efeitos dos eventos levantados na etapa de avaliação. A comunicação, por sua vez, compreende a informação à população e demais partes interessadas sobre os riscos aos quais estão expostos.

A avaliação de risco consiste em um conjunto de procedimentos que permitem a identificação de perigos bem como a estimativa e caracterização, quantitativa ou qualitativa, dos potenciais efeitos adversos relacionados a cada perigo (BRASIL, 2006).

É um procedimento que requer uma investigação minuciosa sobre o funcionamento de um processo, atividade ou ocorrência de um evento, promovendo, portanto, uma melhor compreensão do objeto de estudo.

De acordo com Freitas (2012) a função da avaliação de risco é oferecer ao tomador de decisão os elementos para a definição das abordagens e estratégias de gerenciamento de riscos.

No campo da saúde ambiental, a avaliação de risco tem sido amplamente utilizada, uma vez que permite a abordagem dos fatores, agentes ou situações, relacionados às exposições humanas e a ambientes adversos (BASTOS et al., 2009).

Com o surgimento dos planos de segurança da água, a avaliação de risco passou a ser bastante aplicada a sistemas de abastecimento de água com o intuito de identificar os principais agentes e eventos perigos que possam levar à degradação da qualidade da água bem como estimar os riscos desses eventos à saúde humana (ALVES, 2014; GRADVHOL, 2012; JANUÁRIO, 2013; MORENO, 2009; OGATA, 2011; SOARES, 2009; SOUZA, 2010; VIEIRA, 2012).

O risco pode ser avaliado através de diversas metodologias, entre elas destacam-se Análise Preliminar de Risco (APR), Análise de Árvore de Falhas (FTA), Análise de Árvore de Eventos (ETA), Análise de Modos e Efeitos de Falhas (Failure Mode and Effects Analysis - FMEA) e Estudos de Perigos e Operabilidade (HAZOP).

3.3.1 HAZOP

O HAZOP consiste em um método sistemático cujo objetivo é a identificação, de forma minuciosa, dos perigos e problemas operacionais de cada segmento de um processo através do estudo dos possíveis desvios (anomalias) tanto do projeto quanto na operação de uma instalação.

O HAZOP abrange tanto os problemas de segurança, a partir da identificação dos perigos que possam colocar em risco os operadores e os equipamentos da instalação, como também os problemas de operabilidade que possam resultar na perda de produção, redução da eficiência do processo ou que possam afetar a qualidade do produto (BARATA, 2007).

Para a aplicação da técnica HAZOP é necessário, primeiramente, definir o escopo do estudo e o sistema a ser analisado. O sistema é dividido em seções e, então, avalia-se a susceptibilidade de ocorrência de desvios em cada seção. As seções susceptíveis são denominadas de nós de estudo, correspondendo, portanto, aos pontos críticos do sistema. São nos nós de estudo que o HAZOP é aplicado.

A execução do método é realizada através de uma série de reuniões, durante as quais uma equipe multidisciplinar discute o projeto da instalação utilizando palavras-guia combinadas a parâmetros de processos com o intuito de encontrar possíveis desvios (DUNJÓ et al., 2010).

O Quadro 1 apresenta alguns exemplos da associação dos desvios com as palavras-guia e os parâmetros do processo.

Quadro 1 - Desvios do HAZOP de acordo com os parâmetros do processo.

Parâmetro	Palavra-guia	Desvio
FLUXO	Nenhum	Nenhum fluxo
	Menos	Menos fluxo
	Mais	Mais fluxo
	Reverso	Fluxo reverso
PRESSÃO	Menos	Pressão baixa
	Mais	Pressão alta
NÍVEL	Menos	Nível baixo
	Mais	Nível alto
REAÇÃO	Nenhum	Nenhuma reação
	Menos	Reação incompleta
	Mais	Reação descontrolada

Fonte: Adaptado de Sella (2014).

Após a determinação dos desvios, a próxima etapa é a identificação de suas possíveis causas e consequências seguida da definição das providências necessárias para manter o risco sob controle.

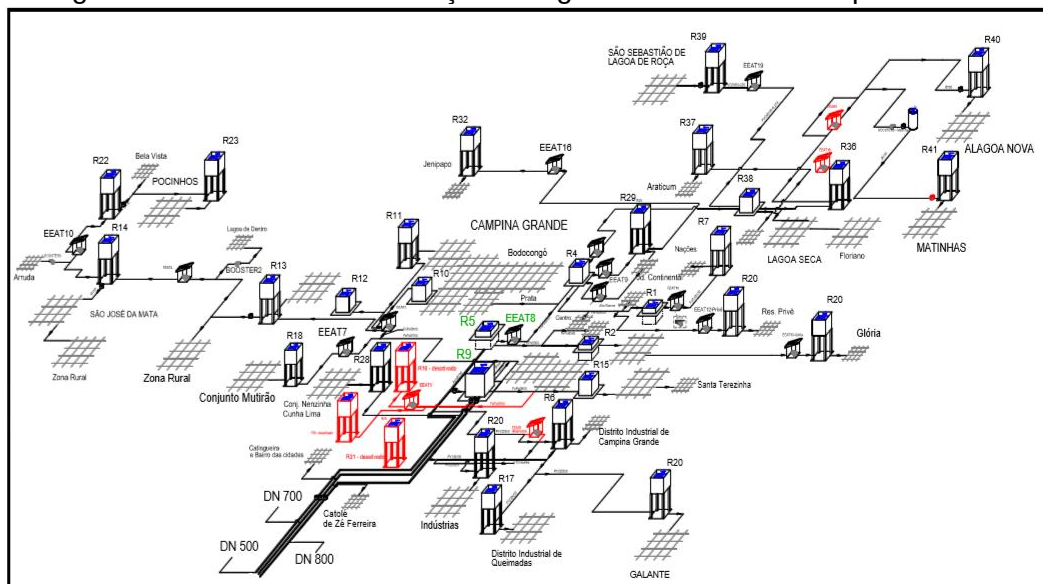
4 METODOLOGIA

4.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE CAMPINA GRANDE

O município de Campina Grande ($7^{\circ} 13' 50''$ S e $35^{\circ} 52' 52''$ O) está localizada a 120 km da capital do estado da Paraíba, João Pessoa. É um típico município de porte médio, com uma população de aproximadamente 400.000 habitantes e uma área de 594 km² (IBGE, 2010).

O sistema de distribuição de água de Campina Grande (Figura 3) possui ao todo 22 reservatórios de armazenamento de água tratada em atividade. Os reservatórios da cidade denominados R5 e R9 são os principais reservatórios por receberem a água da estação de tratamento.

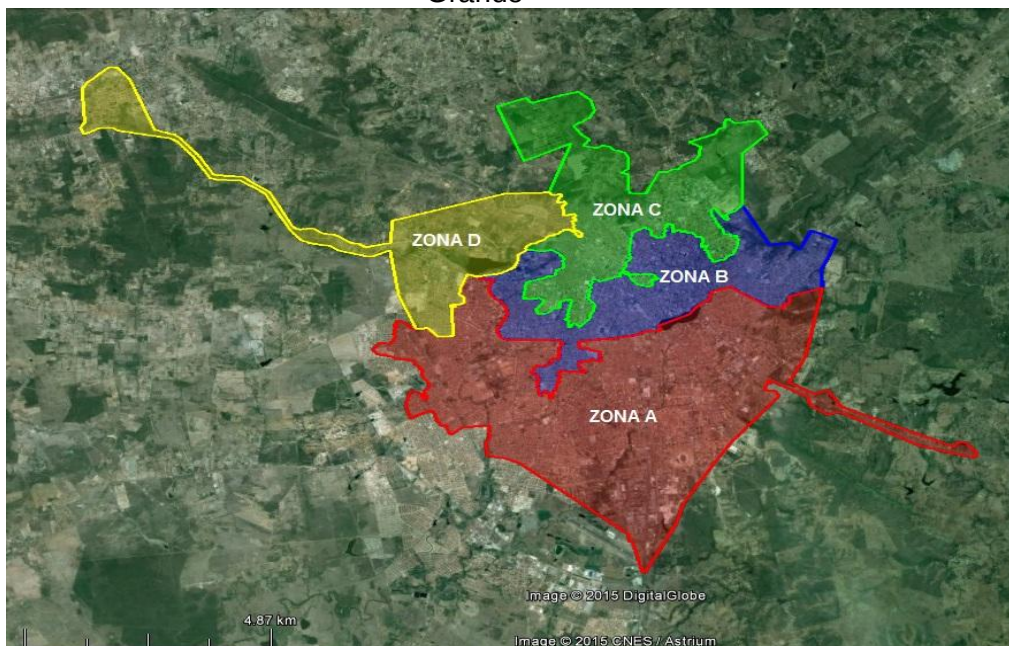
Figura 3 – Sistema de distribuição de água da cidade de Campina Grande



Fonte: Meneses (2011)

A topografia da cidade apresenta desníveis bastante acentuados, de modo que na zona norte predominam cotas acima de 550 m, sendo esta a região mais alta da cidade, e as zonas sul e sudoeste são caracterizada por cotas abaixo de 500 m. Com o intuito de amenizar os efeitos dos desníveis do relevo, a rede de distribuição foi dividida em quatro zonas de pressão A, B, C e D (Figura 4).

Figura 4- Representação das zonas de pressão da rede de distribuição de água de Campina Grande



Fonte: Nascimento (2011)

O reservatório R9, com capacidade de armazenamento de 29.000 m³, distribui água tratada para as zonas de pressão A e B. Já o reservatório R5, com capacidade para 8.000 m³, é responsável pelo abastecimento das zonas C e D.

O sistema abastece 181.453 economias (residenciais, comerciais, industriais e públicas), das quais 97.315 estão localizadas na zona A, 33.628 na zona B, 29.996 na zona C e 20.514 na zona D (CAGEPA, 2015).

A extensão total da rede é de 1.351 quilômetros, constituída, predominantemente, por tubulações de cimento amianto e ferro fundido, nas regiões mais antigas da cidade, e por PVC nos trechos mais recentes (NASCIMENTO, 2016).

4.2 DESCRIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS R5 E R2

Os reservatórios R5 e R2 foram escolhidos como objeto de estudo deste trabalho por estarem localizados na zona de pressão B, caracterizada com intensa atividade comercial e estratégica para a cidade, além de também ser uma zona residencial.

A zona de pressão B abrange os bairros mais centrais da cidade, incluindo alguns dos bairros mais antigos, como o bairro do São José e Prata. Essa zona

concentra diversos centros médicos, clínicas, escolas, restaurantes e hospitais privados, como também dois grandes hospitais públicos, a exemplo do Hospital Universitário Alcides Carneiro, o Hospital Municipal Pedro I e a Maternidade Elpídio de Almeida.

Esta zona é abastecida pelo reservatório R5 (8.000 m³), que redistribui para os reservatórios R2 (2.290m³) e R4 (10.000m³). O R5 está localizado no bairro da Prata e é um reservatório do tipo semi-enterrado, cujo controle da vazão de entrada é realizado no R9.

O R5 apresenta tanto a função de distribuição como de poço de sucção, tendo nível máximo de água na cota 567 m e mínimo na cota 563m, o que corresponde a um nível máximo e mínimo de operação de 3,6 m e 1,3 m, respectivamente. Atualmente opera com o nível mínimo de 2,70 m. Como poço de sucção é responsável pela alimentação do R4 e do R2. Como distribuição é responsável pelo abastecimento dos bairros da Prata, Bodocongó e parte do Centro, através de distribuição por gravidade numa tubulação de 500 mm, cujo controle de vazão é realizado por válvulas borboletas.

O R2 está localizado no centro da cidade e é responsável pelo abastecimento da subzona de pressão B2, que compreende uma parte do Centro e o bairro São José. O reservatório opera em regime de batelada, com início da alimentação às 19 horas, diariamente, e duração de duas horas. É do tipo semi-enterrado e tem seus níveis máximo de água na cota 554,8 m e mínimo na cota 552m, o que corresponde a um nível máximo e mínimo de operação de 2,5 m e 0,5 m, respectivamente. Atualmente opera com o nível mínimo de 2,00 m.

4.3 AVALIAÇÃO DE RISCO

A avaliação de risco teve como foco a qualidade da água do sistema de distribuição de água com a finalidade de estimar os riscos à saúde dos consumidores provenientes de falhas estruturais, operacionais e de manutenção do sistema de distribuição de água.

O método utilizado para avaliar os riscos foi o Hazard and Operability Study–HAZOP e os principais perigos foram levantados com base na literatura (BARTRAM et al., 2009; EPA, 2002;NCR, 2006; VIEIRA e MORAIS, 2005; WHO, 2014;WHO, 2011) e em resultados experimentais obtidos em pesquisas anteriores sobre o

sistema de abastecimento de água de Campina Grande (ALVES, 2014; LEAL, 2012; NASCIMENTO, 2016; VIEIRA, 2012).

4.3.1 HAZOP aplicado ao SDA de Campina Grande

Dentro do sistema de distribuição de água tratada, os reservatórios de armazenamento são os pontos mais vulneráveis em relação à possibilidade de contaminação, merecendo atenção especial não somente devido a esse aspecto, mas também pela sua função de manutenção da pressão na rede de distribuição que, por sua vez, é um dos parâmetros fundamentais para a manutenção da integridade da qualidade da água na rede. Sendo assim, os reservatórios R5 e R2 foram definidos como os nós de estudo.

Ainda, em conjunto com o HAZOP, foi realizada a quantificação e priorização dos riscos através de uma matriz de classificação de riscos dentro da abordagem da Avaliação Preliminar de Risco (APR), que avalia qualitativamente a frequência de ocorrência do evento indesejável e a severidade das suas consequências. Na APR, a frequência fornece uma indicação qualitativa da probabilidade de ocorrência de um determinado evento perigoso, enquanto que a severidade fornece uma indicação qualitativa da magnitude dos danos gerados a partir da materialização do perigo.

Ambas severidade e ocorrência foram definidas com base nas tabelas desenvolvidas por Nascimento (2016), nas quais as duas categorias foram qualificadas em três classes: alta, média e baixa.

A Tabela 2 apresenta as descrições e os pesos estabelecidos para cada classe da categoria severidade.

Tabela 2 – Classificação da categoria severidade.

Severidade	Descrição	Peso
Alta	Verificação de um ou mais dos seguintes fatores: Não conformidade com o valor mínimo de CRL e/ou presença de bactérias coliformes totais, presença de aberturas na cobertura, ausência de programas e rotinas de operação, manutenção, limpeza e inspeção.	3
Média	Verificação de um ou mais dos seguintes fatores: Não conformidade com turbidez e/ou bactérias heterotróficas facultativas mesófilas em mais de 5% das amostras, presença de fendas nas paredes, tubos de ventilação desprotegidos, corrosão da estrutura, inspeção e limpeza esporádicas.	2
Baixa	Verificação de todos os seguintes fatores: Integridade física não comprometida, conformidade com os padrões de turbidez, CRL, BHFM, ausência de coliformes totais, inspeção regular, existência de programas e rotinas de operação, manutenção e limpeza.	1

As Tabelas 3 a 8 apresentam as descrições e os pesos atribuídos para cada classe de ocorrência. As tabelas foram elaboradas considerando os principais fatores, eventos ou situações que resultam na materialização do perigo. Sendo assim, os cenários mais propícios à ocorrência do perigo são aqueles que apresentam a maior quantidade de fatores que levam diretamente à falha.

O cenário em que é provável o acontecimento do perigo é aquele que possui os elementos que indiretamente levam à falha ou que apresenta uma quantidade menor de elementos que diretamente possam culminar na ocorrência do perigo.

O cenário mais improvável para a concretização do perigo é aquele que não apresenta os elementos que direta ou indiretamente possam resultar na falha.

Tabela 3– Classificação da ocorrência de aberturas na cobertura/fissuras nas paredes.

Ocorrência	Descrição	Peso
Frequente	Verificação de um ou mais dos seguintes fatores: reservatórios com idade entre 50 e 80 anos e ausência de um programa de inspeção e manutenção.	3
Provável	Verificação de um ou mais dos seguintes fatores: reservatórios com idade entre 50 e 80 anos e com programa de inspeção e manutenção.	2
Improvável	Verificação de todos os seguintes fatores: reservatórios com idade <50 anos, perímetro do reservatório devidamente protegido e acesso limitado, práticas de inspeção e manutenção regulares.	1

Nota- Fatores estabelecidos com base na vida útil de tanques de armazenamento de água de concreto definido pelo Departamento de Meio Ambiente e Mudanças Climática de Newfoundland Labrador (ECC, 2011).

Tabela 4–Classificação da ocorrência de elevado tempo de detenção hidráulica.

Ocorrência	Descrição	Peso
Frequente	Um ciclo de enchimento/esvaziamento superior a um dia	3
Provável	Um ciclo de enchimento/esvaziamento por dia.	2
Improvável	Reservatórios com alimentação contínua ou mais de um ciclo de enchimento/esvaziamento por dia.	1

Nota – Considerando as características da água e as condições de limpeza e manutenção dos reservatórios, foi definido 1 dia como elevado tempo de detenção hidráulica, baseando-se nas recomendações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2002).

Tabela 5 - Classificação da ocorrência de crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos.

Ocorrência	Descrição	Peso
Frequente	Verificação de pelo menos dois dos seguintes fatores (BRASIL, 2006a; EPA, 2002): CRL < 0,2 mgCl ₂ /L em mais de 5% das amostras, BHFM > 500 UFC/mL em mais de 5% das amostras, nitrato > 10 mgN-NO ₃ /L em mais de 5% das amostras, nitrito > 1mgN-NO ₂ /L em mais de 5% das amostras, periodicidade de limpeza superior a 5 anos.	3
Provável	Verificação de pelo um dos seguintes fatores: CRL < 0,2 mgCl ₂ /L em mais de 5% das amostras, nitrato > 10 mgN-NO ₃ /L em mais de 5% das amostras, nitrito > 1 mgN-NO ₂ /L em mais de 5% das amostras, periodicidade de limpeza superior a 5 anos.	2
Improvável	Verificação de todos os seguintes fatores: Integridade física intacta, CRL > 0,2 mgCl ₂ /L em mais de 5% das amostras, limpeza a cada 5 anos.	1

Tabela 6 - Classificação da ocorrência de residual inadequado de cloro.

Ocorrência	Descrição	Peso
Frequente	Não conformidade com o padrão de potabilidade para CRL em mais de 5% das amostras analisadas.	3
Provável	Não conformidade com o padrão de potabilidade para CRL em até 5% das amostras analisadas	2
Improvável	Conformidade com o padrão de potabilidade para CRL em todas as amostras analisadas.	1

Tabela 7- Classificação da ocorrência de subprodutos da desinfecção.

Ocorrência	Descrição	Peso
Frequente	Verificação de pelo menos dois dos seguintes fatores (ECC, 2009): carbono orgânico total > 2mg/L, CRL > 2mg/L, pH > 8,5, TDH > 1 dia, periodicidade de limpeza superior a 5 anos.	3
Provável	Verificação de pelo menos um dos seguintes fatores: carbono orgânico total > 2mg/L, CRL > 2 mg/L.	2
Improvável	Atendimentos de todos os seguintes fatores: carbono orgânico total < 2 mg/L, CRL < 2 mg/L, TDH < 1 dia.	1

Tabela 8 - Classificação da ocorrência de operações inadequadas de inspeção, manutenção e limpeza.

Ocorrência	Descrição	Peso
Frequente	Atendimento dos seguintes fatores (EPA, 2002): ausência de programas de inspeção, manutenção e limpeza.	3
Provável	Atendimento dos seguintes fatores: Inspeção rotineira com periodicidade superior a uma semana, inspeção periódica com periodicidade superior a um mês, inspeção abrangente com periodicidade superior a 5 anos, limpeza dos reservatórios com periodicidade superior a 5 anos.	2
Improvável	Atendimento de todos os seguintes fatores: Inspeção rotineira semanal, inspeção periódica mensal, inspeção abrangente a cada 5 anos, limpeza com desinfecção dos reservatórios a cada 5 anos, existência de programa de capacitação e treinamento dos operadores.	1

Nota – Inspeção rotineira compreende o monitoramento visual da estrutura externa do reservatório; inspeção periódica destina-se a revisar áreas da estrutura externa que normalmente não são acessíveis do solo ou que normalmente não são examinadas na inspeção rotineira, também tem por finalidade avaliar a prontidão operacional; inspeção abrangente compreende a avaliação da estrutura interna, sendo recomendada a drenagem do reservatório (EPA, 2002).

Após a classificação de cada perigo procedeu-se a priorização dos riscos com o auxílio da matriz de risco, de acordo com o recomendado pelo Manual do Plano de Segurança da Água (BARTRAM et al., 2009). As pontuações dessa matriz são obtidas através do cruzamento da escala de ocorrência com a escala de severidade, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Matriz de priorização de risco.

Probabilidade de ocorrência	Severidade das consequências		
	Baixa (1)	Médio (2)	Alta (3)
Frequente (3)	3	6	9
Provável (2)	2	4	6
Improvável (1)	1	2	3
Pontuação do risco	<3	3-5	>5
Classificação do risco	Baixo	Moderado	Elevado

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da revisão de literatura foram levantados os principais eventos que podem ocorrer dentro dos reservatórios de armazenamento de água e resultar na degradação da qualidade da água. O Quadro 2 apresenta os principais eventos identificados.

Quadro 2 - Principais perigos levantados nos reservatórios.

Eventos perigosos
Aberturas na cobertura/fissuras na parede
Elevado tempo de detenção hidráulica
Crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos
Residual de cloro inadequado
Formação de subprodutos da desinfecção
Inspeção, manutenção e limpeza inadequadas

As tabelas HAZOP encontram-se no Apêndice I e foram construídas com base nos eventos perigosos listados no Quadro 2, para os quais foram identificadas suas causas, consequências e providências.

Através do HAZOP foi realizada uma caracterização qualitativa de cada evento perigoso, permitindo assim, o estabelecimento das relações de causa e efeitos entre os eventos avaliados.

Ao analisar as implicações das consequências dos desvios foi constatado que o parâmetro tempo de detenção hidráulica (TDH) é o que mais favorece a degradação da qualidade da água dentro dos reservatórios devido à sua grande contribuição para a ocorrência dos perigos de formação de subprodutos da desinfecção (SPD), baixo residual de cloro e crescimento de microrganismos em sedimentos e biofilmes, os quais possuem, diretamente, efeito deletério sobre a saúde pública.

Tradicionalmente, os reservatórios são operados considerando apenas o atendimento às pressões máximas e mínimas na rede e são mantidos cheios para garantir o fornecimento de água em situações emergenciais. As questões relativas ao impacto do regime de operação sobre a qualidade da água reservada comumente não são tratadas com a devida importância.

A partir do HAZOP também ficou evidente a importância da implantação de programas de manutenção, inspeção e limpeza, pois a ausência destes contribui

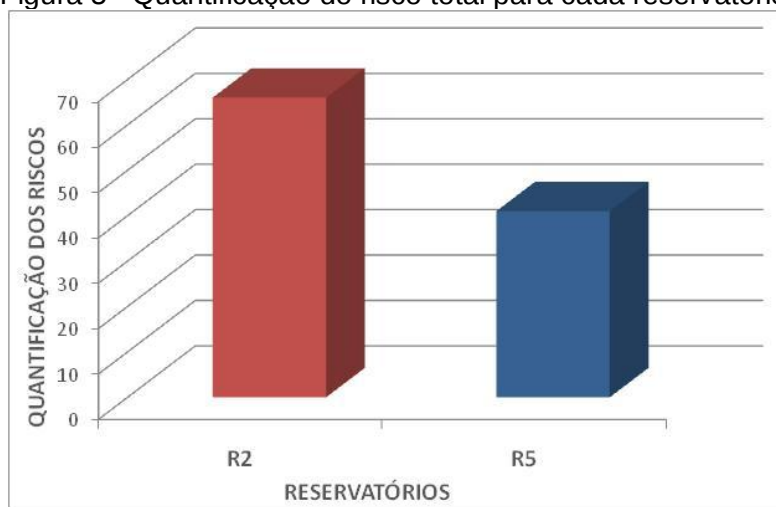
indiretamente para a depleção do residual de cloro e desenvolvimento de microrganismos.

Ao avaliar as providências para reduzir os perigos, constata-se que a manutenção da integridade da qualidade da água requer uma abordagem conjunta desses perigos, uma vez que a consequência de um perigo é, por vezes, a causa de outro.

Através da APR foi possível quantificar os riscos dos oito eventos perigosos abordados no HAZOP.

A Figura 5 ilustra a quantificação total dos riscos dos reservatórios R2 e R5.

Figura 5– Quantificação do risco total para cada reservatório.

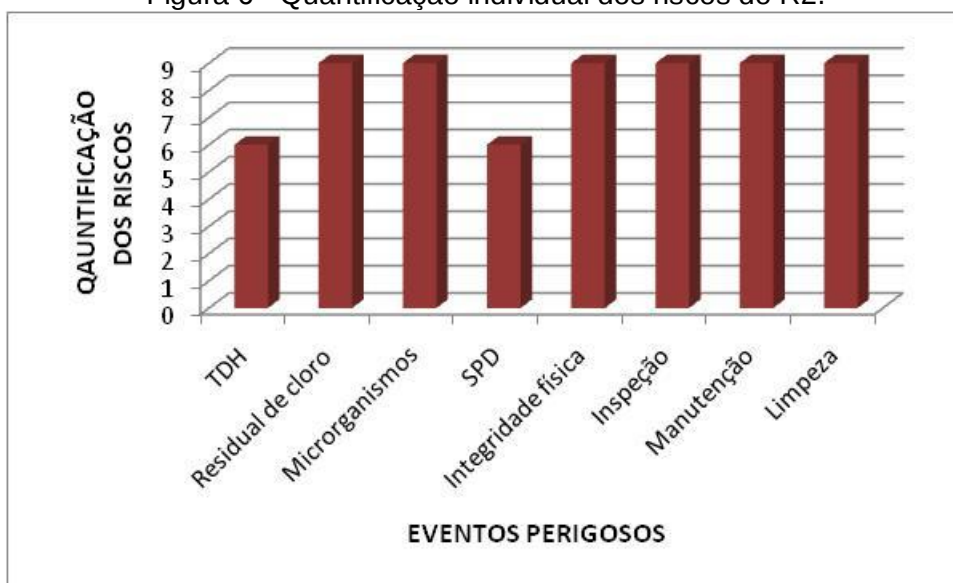


A partir da avaliação de risco constatou-se que o nível de risco à saúde da população residente nos bairros abastecido pelo R2 é maior do que o nível de risco dos consumidores do R5.

Sob condições normais de operação, o risco total no reservatório R2 foi avaliado com o valor de 66. De modo geral, a situação no R2 é crítica, pois todos os eventos perigosos avaliados foram caracterizados como de alto risco.

A Figura 6 ilustra a quantificação de cada risco avaliado para o reservatório R2.

Figura 6 - Quantificação individual dos riscos do R2.



Apesar de todos os eventos terem sido caracterizados como de alto risco, os perigos de elevado tempo de detenção hidráulica e formação de subprodutos da desinfecção apresentam um valor de risco inferior aos demais. No entanto, não deve ser menosprezado devido às suas implicações sobre a qualidade da água.

Para o perigo de residual de cloro inadequado, a ocorrência foi classificada como frequente, pois Alves (2014) ao avaliar a qualidade da água do R2 observou que 100% das amostras não estavam em conformidade com o valor mínimo de CRL estabelecido pela Portaria 2914/11 do MS, que é de 0,2 mg/L. Já a severidade foi classificada como alta devido à presença de coliformes totais. Alves (2014) também analisou a qualidade da água do R2 e em 100% das amostras foram encontrados coliformes totais.

Os coliformes totais são um indicativo da potencial presença de patógenos e, portanto, associa-se a efeitos adversos à saúde pública. A presença de coliformes totais em sistemas de distribuição de água geralmente indica a ocorrência de contaminação externa, visto que a Portaria 2914/11 do MS exige a ausência de coliformes totais em 100 mL em 95% das amostras mensais de água na saída da estação de tratamento.

No caso do R2, a presença de coliformes também pode estar associada à precária manutenção e à falta de uma rotina de limpeza, uma vez que coliformes podem se desenvolver em biofilmes e sedimentos. A baixa concentração de residual

de cloro contribui para a redução da proteção contra o desenvolvimento de microrganismos

Apesar do desenvolvimento de microrganismos nem sempre representar risco à saúde, pode-se afirmar que a população do bairro São José está sob alto risco ao consumir a água do sistema de abastecimento devido à presença de coliformes totais no R2.

Nascimento (2016) determinou que o valor do coeficiente de decaimento do cloro no sistema de distribuição de água tratada de Campina Grande é de $2,73 \text{ d}^{-1}$. Considerando esse elevado coeficiente de decaimento mais o fato do abastecimento do R2 ser realizado a partir do R5 através uma tubulação de 1980 m de comprimento, na qual a água permanece estagnada, tem-se que a água já chega ao R2 com sua qualidade comprometida.

De acordo com Nascimento (2016), a elevada demanda de cloro do sistema de distribuição deve-se à elevada concentração de materiais orgânicos ($2,2 \text{ mgCOT/L}$) e redutores inorgânicos que permanecem na água mesmo após o tratamento.

Outro possível fator contribuinte para o consumo de cloro no reservatório é a ausência de rotinas de limpeza. Contudo, Nascimento (2016) simulou a concentração de cloro no R2 admitindo um cenário de limpeza do mesmo e não foi observada alteração significativa do comportamento do cloro no reservatório. Mesmo não contribuindo diretamente para o consumo de cloro, a ausência de limpeza tem outras implicações sobre a qualidade da água.

Nascimento (2016) também concluiu que o comportamento do CRL sofre influência considerável do regime de operação do R2. O R2 opera em regime de batelada, com apenas um ciclo de enchimento/esvaziamento por dia, favorecendo a estagnação da água que, por sua vez, contribui para o aumento da idade média da água.

Nos reservatórios de distribuição de água é indesejável que a água permaneça armazenada por muito tempo, pois essa situação potencializa os problemas de qualidade tais como depleção do residual de cloro, desenvolvimento de microrganismos e também problemas estéticos como odor e sabor. Sendo assim, busca-se manter uma homogeneidade da idade e das características da água através da promoção da mistura da massa líquida.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos recomenda que o tempo máximo de residência da água nos reservatórios varie entre 1-5 dias, dependendo

da qualidade da água afluente ao reservatório, níveis operacionais do reservatório, condições ambientais, condições dos reservatórios e do projeto dos reservatórios (EPA, 2002).

O tempo de detenção hidráulica é diretamente afetado pela frequência do ciclo de enchimento/esvaziamento do reservatório e pela variação volumétrica nestes ciclos. No R2, a mistura se dá durante as duas horas em que ocorre sua alimentação, de modo que apenas um ciclo de enchimento/esvaziamento pode não ser o suficiente para garantir a homogeneidade da água. Sendo assim, uma parcela da água pode acabar permanecendo no reservatório por um período mais longo acarretando na depleção do cloro.

Para o evento de crescimento de microrganismos, a severidade foi classificada como alta, devido à não conformidade com o valor mínimo de CRL. Além disso, há relatos de que o reservatório não foi limpo há mais de 10 anos (NASCIMENTO, 2016). Esses dois fatores juntos contribuem para uma maior probabilidade de ocorrência desse perigo, portanto, sendo classificado como de ocorrência frequente.

Para os eventos de operação inadequada de inspeção, manutenção e limpeza, a severidade foi classificada como alta devido à presença de aberturas na cobertura do reservatório, deixando-o susceptível à entrada de contaminantes externos. Essa situação é ainda agravada devido à baixa concentração de cloro. A ocorrência desses eventos também foi classificada como alta, pois não há um programa de inspeção, manutenção e limpeza.

A existência de programas de inspeção é fundamental para a garantia da prontidão operacional dos reservatórios e de sua integridade física. Através da inspeção sistemática são levantadas informações sobre as condições estruturais, sanitárias e operacionais dos reservatórios, necessárias para a elaboração de rotinas de manutenção e limpeza eficientes.

Portanto, programas de inspeção asseguram que os reservatórios estejam operando sob condições que proporcionem a manutenção da integridade da qualidade da água.

A Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos recomenda a inspeção externa semanalmente, a fim de identificar defeitos estruturais e sanitários em áreas de fácil acesso. Já as áreas de difícil acesso, que não são avaliadas na inspeção de rotinas, devem ser inspecionadas entre 1 e 4 meses. Para a avaliação

da estrutura interna deve ser realizada uma inspeção abrangente, com a drenagem do reservatório, entre 3 e 5 anos (EPA, 2002).

A ausência de rotinas de limpeza, por sua vez, favorece o acúmulo de sedimentos. Diversos potenciais problemas de qualidade da água estão associados ao acúmulo de sedimentos, dentre eles destacam-se o aumento do consumo de cloro, crescimento microbiano e formação de subprodutos da desinfecção. Assim, os reservatórios se encontram vulneráveis a eventos de contaminação que podem ter um efeito deletério sobre a saúde dos consumidores.

A Associação Americana de Serviços de Água (AWWA), recomenda que a periodicidade de limpeza dos reservatórios seja estabelecida com base nas conclusões da inspeção, não devendo exceder 5 anos.

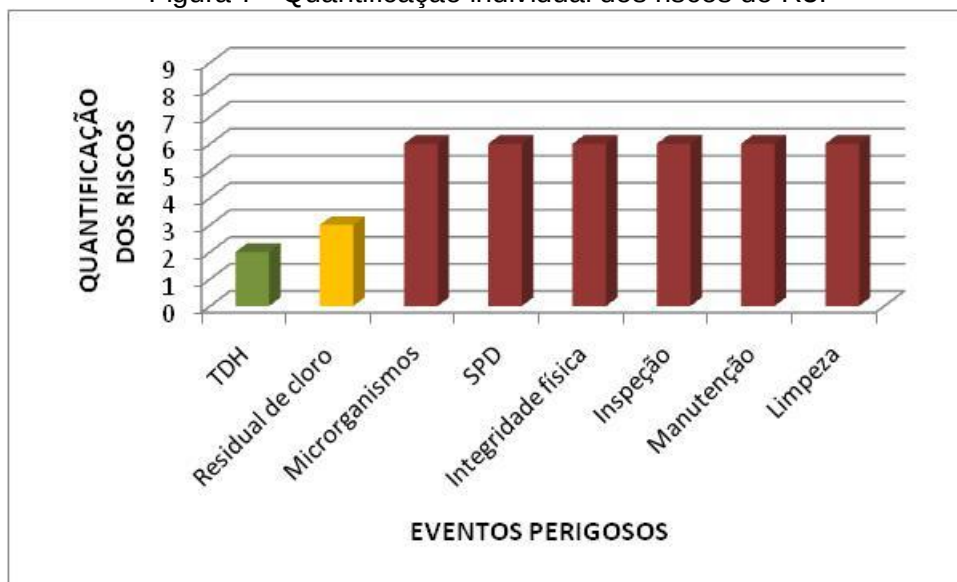
O peso da severidade para o comprometimento da integridade física foi 3 devido ao baixo residual de cloro no reservatório. A estrutura do reservatório atua como uma barreira física contra a entrada de contaminantes externos, tais como fezes de animais. Caso haja a entrada de algum contaminante, a água se encontra desprotegida. Para a ocorrência também foi atribuído um peso 3, pois o reservatório possui 79 anos de idade, sendo a vida útil de um reservatório de concreto entre 50 e 80 anos. Além disso, a ausência de programas de inspeção e manutenção também contribui para a ocorrência de aberturas e fissuras, comprometendo a integridade física do reservatório.

Apesar de Nascimento (2016) ter constatado a presença de matéria orgânica na água distribuída, apenas esse fator não é o suficiente para haver a formação de subprodutos. É necessário que haja certa quantidade de cloro na massa líquida para reagir com a matéria orgânica. Sendo assim, foi atribuído um peso 2 para a ocorrência desse perigo, devido ao baixo residual de cloro no R2. Já a severidade para esse perigo foi classificada como alta devido à ausência de rotinas de limpeza e as suas implicações na formação de subprodutos, como já discutido anteriormente.

Nesse estudo, diante das condições do R2, considerou-se que o tempo de detenção hidráulica não deve ser maior que 1 dia. Sendo assim, foi atribuído o peso 2 para a ocorrência desse perigo, pois seu modo de operação pode levar à estagnação de uma parcela da massa líquida, resultando em regiões com tempo de detenção hidráulica maior. Para a severidade foi atribuído peso 3, devido à não conformidade com o valor mínimo de CRL.

O risco total avaliado no reservatório R5 apresentou um valor de 41, refletindo, portanto, uma condição melhor que o R2. Para Vieira (2012) o risco à saúde dos consumidores no R5 é moderado. Dos oito eventos perigosos analisados, seis foram avaliados como de alto risco. A Figura 7 ilustra a quantificação de cada risco avaliado para o reservatório R5.

Figura 7 - Quantificação individual dos riscos do R5.



Analogamente ao R2, os eventos de crescimento de microrganismos, formação de subprodutos da desinfecção, comprometimento da integridade física e operações inadequadas de inspeção, manutenção e limpeza foram caracterizados como de alto risco. No entanto, o valor de risco de cada evento foi de 6, portanto, inferior ao valor obtido para os mesmos eventos no R2.

A redução do risco em relação ao R2 se dá principalmente ao fato da alta concentração de cloro que, por vezes, chega a ser maior do que o valor máximo estabelecido pela Portaria 2914/11 do MS (VIEIRA, 2012). A elevada concentração de cloro reduz a severidade da maioria dos perigos avaliados, uma vez que garante a proteção da água em casos de contaminação microbiana.

Outro fator que contribui para esse resultado é o modo de operação do R5. O R5 opera como poço de sucção, o que favorece a renovação das águas e reduz o risco de elevado tempo de detenção hidráulica. Por esse motivo, o perigo de elevado tempo de detenção hidráulica foi caracterizado como de baixo risco.

Para o perigo de residual inadequado de cloro, a severidade foi classificada como alta devido à ausência de programas e rotinas de inspeção, manutenção e limpeza, cujas implicações sobre a qualidade da água já foram discutidas. Para a ocorrência foi atribuído um peso 1, pois nenhuma das amostras avaliadas por Vieira (2012) apresentou valor abaixo do mínimo. Sendo assim, esse perigo foi classificado como de risco moderado.

O perigo de formação de subprodutos da desinfecção foi caracterizado como alto, devido à presença de matéria orgânica na água distribuída e do valor de CRL ter sido acima do máximo preconizado pela Portaria 2914/2011 do MS em mais de 5% das amostras (VIEIRA, 2012). A variável tempo é um fator decisivo para essa reação de formação dos subprodutos, uma vez que a reação não é instantânea. Como a operação do R5 favorece a renovação contínua das águas, foi atribuído um peso 2 para sua ocorrência.

Para o perigo de crescimento de microrganismos em biofilmes e sedimentos a severidade foi classificada como alta devido à ausência de programas de inspeção, manutenção e limpeza. Provavelmente, o reservatório apresenta uma manta de sedimentos que pode servir de suporte para o desenvolvimento de microrganismos patogênicos, mesmo com a manutenção do residual de cloro (KOOIJ, 2003). Para a ocorrência foi atribuído um peso 3, pois a última limpeza foi realizada há mais de 10 anos.

O peso da severidade para o comprometimento da integridade física foi 2, pois mesmo que haja aberturas ou fissuras no reservatório, a água está protegida pelo residual de cloro. Para a ocorrência foi atribuído um peso 3, pois o reservatório possui 59 anos de idade e não há programas de inspeção e manutenção, o que se constitui um empecilho para a conservação da integridade física.

Para os eventos de operação inadequada de inspeção, manutenção e limpeza, a severidade foi classificada como moderada, pois apesar de ser um dos principais perigos no reservatório, o residual de cloro consegue manter a integridade da qualidade da água. A ocorrência desses eventos foi classificada como alta, devido à ausência de programas de inspeção, manutenção e limpeza.

6 CONCLUSÕES

Ambas as metodologias se mostraram flexível e eficiente, permitindo uma melhor compreensão do processo de degradação da qualidade da água dentro dos reservatórios e auxiliando na construção de planos emergenciais a partir da priorização de ações em situações emergenciais.

A avaliação de risco também permitiu comparar o nível de risco à saúde entre os dois reservatórios. Assim, constatou-se que o nível de risco à saúde da população residente nos bairros abastecido pelo R2 é maior do que o nível de risco dos consumidores do R5.

O R2 apresentou um alto nível de risco para todos os eventos analisados, dos quais, o que mais merece atenção é o residual de cloro abaixo do estabelecido pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde. Na verdade, todos os eventos estão intrinsecamente relacionados, de modo que, a melhoria da qualidade da água do R2 requer adoção conjunta de várias medidas. O aumento da quantidade de ciclos de enchimento/esvaziamento por dia, a fim de promover a mistura e renovação das águas, a recloração periódica e adoção de um programa de manutenção e limpeza, se adotadas simultaneamente, resultarão na melhoria da qualidade da água e, conseqüentemente, redução do nível de risco.

O R5, por sua vez, apresentou um nível de risco menor do que o R2, podendo ser classificado, de maneira geral, como risco moderado. Tal resultado está relacionado principalmente com o modo de operação, que favorece a renovação das águas, e a sua localização no início do sistema de distribuição de água. De todos os eventos perigosos analisados, o crescimento de microrganismos em biofilme ou sedimentos é o que requer mais atenção. Através da pesquisa também se conclui que esse risco se relaciona principalmente com a ausência de programas de limpeza no R5, que leva ao acúmulo de sedimentos, servindo de suporte para o desenvolvimento de microrganismos. Portanto, a implantação de programas de inspeção, manutenção e limpeza são o suficiente para reduzir o risco a um nível baixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

AMR, S.S. A.; YASSIN, M.M. Microbial contamination of the drinking water distribution system and its impact on human health in Khan Yunis Governorate, Gaza Strip: Seven years of monitoring (2000–2006). **Public Health**, v. 122, n. 11, p.1275-1283, nov. 2008.

BARATA, E. S. **Ganhos na redução de impactos ambientais como resultado da aplicação da técnica de confiabilidade HAZOP**. 2007. 80f. Monografia (Especialização em Tecnologias limpas) - Universidade Federal da Bahia, 2007.

BARTRAM, Jamie et al. **Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers**. Geneva: World Health Organization, 2009.

BASTOS, R.K.X.; BEZERRA, N.R.; BEVILACQUA, P.D. Planos de segurança da água: novos paradigmas em controle de qualidade da água para consumo humano em nítida consonância com a legislação brasileira. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2007, Belo Horizonte. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2007.

BASTOS, R.K.X.; BEVILACQUA, P.D.; MIERZWA, J. C. Análise de risco aplicada ao abastecimento de água para consumo humano. In: Pádua, V. L. (Org.). Remoção de micro-organismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 327-360.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Inspeção sanitária em abastecimento de água**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Manual de procedimentos de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006a.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Plano de segurança da água: garantindo a qualidade e promovendo a saúde: um olhar do SUS**. Brasília: Ministério da Saúde, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF. 14 dez. 2011.

BYLEVELD, P. M.; DEERE, D.; DAVISON, A. Water safety plans: planning for adverse events and communicating with consumers. **Journal Of Water And Health**, v. 6, n. 1, p.1-9, mar. 2008.

CCME. Canadian Council of Ministers of the Environment. **From source to tap: guidance on the multi-barrier approach to safe drinking water**, 2004. Disponível em <http://www.ccme.ca/files/Resources/water/source_tap/mba_guidance_doc_e.pdf>. Acesso em: 03 fev 2017.

DAVISON, Annette et al. **Water safety plans: managing drinking-water quality from catchment to consumer**. Geneva: World Health Organization, 2005.

DUNJÓ, Jordi et al. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 173, p. 19–32, 2010.

ECC. Department of Environment and Climate Changes. **Best Management Practices for the Control of Disinfection by-Products in Drinking Water Systems in Newfoundland and Labrador**, 2009. Disponível em <http://www.ecc.gov.nl.ca/waterres/reports/cwws/Combined_Strategy_for_Managing_DBPs_April_13_2009.pdf>. Acesso em: 02 fev 2017.

ECC. Department of Environment and Climate Changes **Evaluation of Potable Water Storage Tanks in Newfoundland and Labrador and their Effect on Drinking Water Quality**, 2011. Disponível em <http://www.ecc.gov.nl.ca/waterres/reports/drinking_water/Tank_Report_July_12_2011.pdf>. Acesso em: 08 jan 2017.

FALCON, R.; WILLIAMS, S. I. **Waterborne Salmonella Outbreak in Alamosa, Colorado March and April 2008: Outbreak Identification, Response, and Investigation**, 2009. Disponível em <<https://www.colorado.gov/pacific/sites/default/files/WQ-DW-Publications-Alamosa-Outbreak-Investigation-Report.pdf>> Acesso em: 15 dez 2017.

FREITAS, C. M. Avaliação de Riscos como Ferramenta para Vigilância Ambiental em Saúde. **Informe Epidemiológico do SUS**, v. 11, n. a, p. 227-239, 2002.

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. 213 p. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

GUNNARSDOTTIR, Maria J. et al. Benefits of Water Safety Plans: Microbiology, Compliance, and Public Health. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 14, p.7782-7789, 2012.

HOWARD, Guy et al. Water safety plans for piped urban supplies in developing countries: a case study from Kampala, **Uganda. Urban Water Journal**, v. 2, n. 3, p.161-170, 2005.

JANUÁRIO, P. B. **Análise de conformidade de indicadores sentinelas da qualidade da água de abastecimento de Campina Grande-PB.** 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

KOOIJ, D. van der. Managing regrowth in drinking water distribution systems. In: Heterotrophic plate counts and drinking-water supply. London: IWA, 2003. p. 199-232.

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.

MAHMUD, S. G. et al. Development and implementation of water safety plans for small water supplies in Bangladesh: benefits and lessons learned. **Journal Of Water And Health**, v. 5, n. 4, p.585-596, 2007.

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

MORENO, J. **Avaliação e gestão de riscos no controle da qualidade da água em redes de distribuição: estudo de caso.** 2009. 579 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

NASCIMENTO, R. S. **Modelo conceitual para a gestão da qualidade da água em sistemas de abastecimento de porte médio**. 2016. 191 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

NRC. **Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks**. Washington: The National Academic Press, 2006.

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.

RAZZOLINI, M. T. P.; NARDOCCI, A. C. AVALIAÇÃO DE RISCO MICROBIOLÓGICO: ETAPAS E SUA APLICAÇÃO NA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v.1, n. 2, 2006.

RIMKEVIČIUS, Sigitas et al. HAZOP application for the nuclear power plants decommissioning projects. **Annals Of Nuclear Energy**, v. 94, p.461-471, 2016.

RISEBRO, Helen L. et al. Fault tree analysis of the causes of waterborne outbreaks. **Journal Of Water And Health**, v. 5, n. 1, p.1-18, set. 2007.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 583 p.

SELLA, B. C. **Comparativo entre as técnicas de análise de riscos HAZOP e APR**. 2014. 50 p. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SOUZA, L. C. A. **Análise de risco aplicada a sistemas urbanos de abastecimento de água com suporte na teoria das opções reais**. 2010. 152 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Finished Water Storage Facilities**, 2002. Disponível em < https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2007_05_18_disinfection_tcr_whitepaper_tcr_storage.pdf>. Acesso em : 10 jan 2017.

VIEIRA, J. M. P.; MORAIS, C. **Planos de Segurança em Sistemas Públicos de Abastecimento de Água para Consumo Humano**. Portugal: Universidade do Minho, 2005.

VIEIRA, B. G. A. **Análise de risco aplicada à qualidade da água do sistema de abastecimento de Campina Grande (PB)**. 2012. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

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

WHO. World Health Organization. **Water safety in distribution systems**. Genebra, Suíça: WHO, 2014.

ZUFFO, M. S. R. **Análise de risco em barragens: índice de priorização**. 2010. 265 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

APÊNDICE

APÊNDICE I

TABELAS DE AVALIAÇÃO DE RISCO HAZOP

Sistema: Sistema de distribuição de água da zona de pressão B					Nó-de-estudo: reservatório de distribuição de água tratada R2			
Parâmetros	Palavras-guia	Desvios	Causas	Consequências	Providências	Severidade	Ocorrência	Risco
Tempo de detenção hidráulica	Mais	Aumento do tempo de detenção hidráulica	- Subutilização das águas - Operação inadequada dos reservatórios	- Nitrificação - Acúmulo de sedimentos - Formação de biofilme - Crescimento de microrganismos - Aumento da demanda de cloro - Formação de subprodutos da desinfecção - Aumento do pH	-Aumentar os ciclos de enchimento/esvaziamento - Aumentar o volume de água deslocado durante os ciclos -Reduzir os níveis operacionais de água	3	2	6
Residual de cloro	Menos	Redução da concentração do residual de cloro	- Elevado tempo de detenção hidráulica - Presença de sedimentos - Presença de matéria orgânica - Presença de substâncias redutoras	- Favorecimento da formação de biofilme e crescimento microbiano	- Realizar recloração - Reduzir o tempo de detenção hidráulica - Remover a camada de sedimentos	3	3	9
Microrganismos	Mais	Aumento da população de microrganismos	- Baixa concentração de CRL -Elevado tempo de detenção hidráulica - Presença de matéria orgânica -Presença de sedimentos	-Aumento da demanda de cloro - Crescimento de microrganismos patogênicos	- Realizar recloração - Reduzir o tempo de detenção hidráulica - Realizar a limpeza dos reservatórios	3	3	9
Integridade física	Menos	Comprometimento da estrutura	-Ausência de rotinas de inspeção -Ausência de rotinas de manutenção - pH baixo	-Favorecimento da entrada sedimentos, microrganismos, fezes de animais e outros contaminantes externos	- Implantar programa de inspeção contínuas - Realizar reparo da estrutura física -Ajustar o pH da água	3	3	9
Subprodutos da desinfecção	Mais	Aumento da concentração de subprodutos da desinfecção	- Elevado tempo de detenção hidráulica -Presença de matéria orgânica -Presença de sedimentos -pH elevado - Elevada concentração de cloro	-Efeitos crônicos adversos na saúde humana	- Reduzir o tempo de detenção hidráulica -Realizar a limpeza do reservatório -Implantação de um tratamento adicional para remoção da matéria orgânica dissolvida	3	2	6
Manutenção	Menos/ Nenhum	Manutenção inadequada/ausência de manutenção	-Ausência de rotinas de manutenção	-Favorecimento da entrada sedimentos, microrganismos, fezes de animais e outros contaminantes externos -Comprometimento da estrutura	- Implantação de um programa de manutenção -Implantação de um programa de treinamento e capacitação dos operadores	3	3	9
Limpeza	Menos/ Nenhum	Limpeza insatisfatória/ ausência de limpeza	-Ausência de rotinasde limpeza	- Acúmulo de sedimentos e matéria orgânica - Desenvolvimento de biofilmes e vegetação -Redução do pH	- Implantação de um programa de limpeza	3	3	9
Inspeção	Menos/ Nenhum	Inspeção insatisfatória/ ausência de inspeção	- Ausência de rotinas de inspeção	-Falha na manutenção	- Implantação de um programa de inspeção -Implantação de um programa de treinamento e capacitação dos operadores	3	3	9

Sistema: Sistema de distribuição de água da zona de pressão B				Nó-de-estudo: reservatório de distribuição de água tratada R5				
Parâmetros	Palavras-guia	Desvios	Causas	Consequências	Providências	Severidade	Ocorrência	Risco
Tempo de detenção hidráulica	Mais	Aumento do tempo de detenção hidráulica	- Subutilização das águas - Operação inadequada dos reservatórios	- Nitrificação - Acúmulo de sedimentos - Formação de biofilme - Crescimento de microrganismos - Aumento da demanda de cloro - Formação de subprodutos da desinfecção - Aumento do pH	-Aumentar os ciclos de enchimento/esvaziamento - Aumentar o volume de água deslocado durante os ciclos -Reduzir os níveis operacionais de água	2	1	2
Residual de cloro	Menos	Redução da concentração do residual de cloro	- Elevado tempo de detenção hidráulica - Presença de sedimentos - Presença de matéria orgânica - Presença de substâncias redutoras	- Favorecimento da formação de biofilme e crescimento microbiano	- Realizar recloração - Reduzir o tempo de detenção hidráulica - Remover a camada de sedimentos	3	1	3
Microrganismos	Mais	Aumento da população de microrganismos	- Baixa concentração de CRL -Elevado tempo de detenção hidráulica - Presença de matéria orgânica -Presença de sedimentos	-Aumento da demanda de cloro - Crescimento de microrganismos patogênicos	- Realizar recloração - Reduzir o tempo de detenção hidráulica - Realizar a limpeza dos reservatórios	3	2	6
Integridade física	Menos	Comprometimento da estrutura	-Ausência de rotinas de inspeção -Ausência de rotinas de manutenção - pH baixo	-Favorecimento da entrada sedimentos, microrganismos, fezes de animais e outros contaminantes externos	- Implantar programa de inspeção contínuas - Realizar reparo da estrutura física -Ajustar o pH da água	2	3	6
Subprodutos da desinfecção	Mais	Aumento da concentração de subprodutos da desinfecção	- Elevado tempo de detenção hidráulica -Presença de matéria orgânica -Presença de sedimentos -pH elevado - Elevada concentração de cloro	-Efeitos crônicos adversos na saúde humana	- Reduzir o tempo de detenção hidráulica -Realizar a limpeza do reservatório -Implantação de um tratamento adicional para remoção da matéria orgânica dissolvida	3	2	6
Manutenção	Menos/ Nenhum	Manutenção inadequada/ausência de manutenção	-Ausência de rotinas de manutenção	-Favorecimento da entrada sedimentos, microrganismos, fezes de animais e outros contaminantes externos -Comprometimento da estrutura	- Implantação de um programa de manutenção -Implantação de um programa de treinamento e capacitação dos operadores	2	3	6
Limpeza	Menos/ Nenhum	Limpeza insatisfatória/ ausência de limpeza	-Ausência de rotinasde limpeza	- Acúmulo de sedimentos e matéria orgânica - Desenvolvimento de biofilmes e vegetação -Redução do pH	- Implantação de um programa de limpeza	2	3	6
Inspeção	Menos/ Nenhum	Inspeção insatisfatória/ ausência de inspeção	- Ausência de rotinas de inspeção	-Falha na manutenção	- Implantação de um programa de inspeção -Implantação de um programa de treinamento e capacitação dos operadores	2	3	6

