



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB  
PRÓ - REITORIA DE PÓS - GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**ANA ALICE QUINTANS DE ARAUJO**

**APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE REABILITAÇÃO DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2019**

**ANA ALICE QUINTANS DE ARAUJO**

**APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE REABILITAÇÃO DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como requisito para a obtenção do título de Mestre.

**Área de concentração:** Qualidade de Sistemas Ambientais

**Orientador:** Prof. Dr. RUI DE OLIVEIRA

**Coorientadora:** Profa. Dra. RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2019**

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.

A659a Araújo, Ana Alice Quintans de.  
Aplicação de simulação no planejamento de reabilitação de redes de distribuição de água [manuscrito] / Ana Alice Quintans de Araújo. - 2019.  
82 p. : il. colorido.  
Digitado.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.  
"Orientação : Prof. Dr. Rui de Oliveira, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."  
"Coorientação: Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."  
1. Sistema de abastecimento de água. 2. Modelagem hidráulica. 3. Gestão hídrica. 4. EPANET. I. Título  
21. ed. CDD 628.1

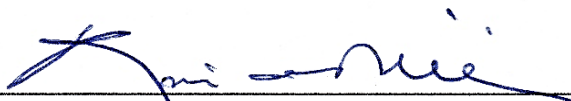
**ANA ALICE QUINTANS DE ARAUJO**

**APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE REABILITAÇÃO  
DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

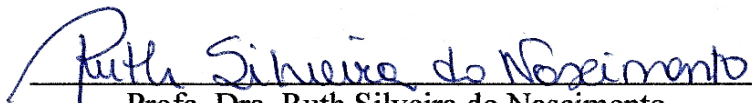
Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia Ambiental da  
Universidade Estadual da Paraíba  
como requisito para a obtenção do  
título de Mestre.

Aprovada em 22/02/2019.

**BANCA EXAMINADORA**



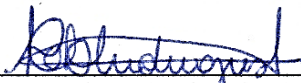
Prof. Dr. Rui de Oliveira  
(Orientador – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)



Prof. Dra. Ruth Silveira do Nascimento  
(Co orientadora – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira  
(Examinador Interno – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)



Prof. Dra. Andréa Carla Lima Rodrigues  
(Examinadora Externa – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG)

## **Dedicatória**

À Deus, Nossa Senhora das Graças e todos os anjos e santos que me cercam sempre de proteção e cuidado.

## AGRADECIMENTOS

**À Deus e Nossa Senhora das Graças**, por me conceder todas as condições necessárias para a conclusão deste trabalho e pela constante interseção.

**Aos meus pais**, Maria Rosinete Pereira Quintans de Araujo e Edivaldo Procópio de Araujo, por tanto amor, compreensão, por abdicarem dos seus próprios sonhos para que eu possa realizar os meus e sempre acreditarem em minha capacidade.

**Ao meu namorado**, Alisson José de Lima Silva, pelo cuidado, compreensão e incentivo em todos os momentos ao longo destes dois anos.

**Aos meus orientadores**, Rui de Oliveira e Ruth Silveira do Nascimento, pela disposição, paciência e ensinamentos transmitidos.

**Aos professores**, Fernando Fernandes Vieira, Celeide Maria Belmont Sabino Meira, William de Paiva e Andréa Carla Lima Rodrigues, que fizeram parte das bancas em cada etapa ao longo deste mestrado e através de suas correções contribuíram significativamente para a construção deste trabalho.

**Aos colegas de laboratório**, Cícero, Amanda, Sabrina, Ariel e Ogata, por toda ajuda na realização deste trabalho.

**À minha querida amiga**, Virgínia e toda sua família, aos quais nunca conseguirei retribuir todo carinho e ajuda a mim dedicados. Além de me apresentar ao programa, me incentivou durante todo o processo sempre com muita paciência e acreditou em mim mais que eu mesma.

**Aos meus amigos do mestrado**, pelos momentos divididos juntos e que fizeram o fardo se tornar mais leve.

**Aos meus amigos**, Aluska, Sanderson, Carlos, Danielly e Kathyana, por me alegrarem nos momentos mais difíceis e sempre me incentivarem.

**À família do coração**, Sueli, Kegenaldo, Rebecca, Matheus, Herika, Renan, Clodoveu, Gisele, Giovani e Rafael, por todo apoio espiritual e emocional que me foi dado.

**À minha prima**, Catharine, por sua paciência e apoio na reta final desta dissertação.

**À CAGEPA**, pelo fornecimento de todos os dados necessários para a realização desta pesquisa.

**À CAPES**, pelo apoio financeiro.

**À UEPB e ao PPGCTA**, através de todo o corpo docente e seu secretariado, por abrirem as portas para que eu conseguisse alcançar mais este degrau em minha vida profissional e estarem sempre disponíveis para esclarecer as dúvidas.

**À todos,** que direta ou indiretamente me ajudaram a obter o título de mestre, pois ninguém vence sozinho.

“Os grandes propósitos são sempre  
atravessados por diversos obstáculos  
e dificuldades”

(São Vicente de Paulo)



## RESUMO

Fatores como pressão de serviço, qualidade do material das canalizações, qualidade da água e aqueles decorrentes do envelhecimento das tubulações, bem como práticas inadequadas de operação e manutenção do sistema podem contribuir para o seu maior desgaste, reduzindo sua vida útil. Além disso, parece faltar a aplicação de um processo de gestão mais técnico-científico, envolvendo ações contínuas de planejamento e gerenciamento eficientes visando o bom funcionamento e a garantia do fornecimento de água de qualidade adequada e acessível à população. Este trabalho tem como objetivo propor um modelo conceitual para o planejamento de reabilitação da rede de distribuição de água de Campina Grande (SAACG), como ferramenta auxiliar de gestão. No processo de modelagem foi utilizado o programa EPANET 2.0 para simular o comportamento das pressões e do cloro residual livre na rede de distribuição de água da cidade, propondo cenários com melhorias para a operação do sistema de abastecimento. Os setores da rede de distribuição estudados foram os bairros Prata, São José e Centro, na zona de pressão B. Mediante análise dos cenários observou-se que, quanto a pressão, o bairro Centro encontrava-se com 19% dos nós com pressões acima de 50 mca durante todo o período simulado, enquanto que para o CRL o bairro mais crítico, São José, apresentou 95% dos nós em não conformidade com as exigências da Portaria nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde. Por conseguinte, o bairro Prata, com todos os parâmetros em conformidade, mostrando-se um bom exemplo de desempenho do SAACG. Os cenários de reabilitação propostos obtiveram melhorias em 24% do bairro Centro e 67% no bairro São José, comprovando que as medidas sugeridas são bastante eficientes para o aperfeiçoamento da rede de abastecimento. Portanto, foi concluído que a simulação, com o uso do EPANET 2.0, é uma importante ferramenta auxiliadora no processo de gestão dos sistemas de abastecimento juntamente com o uso de modelos conceituais, podendo contribuir significativamente para a melhoria da qualidade do serviço de abastecimento de água, incluindo o planejamento de sua reabilitação.

**Palavras-chave:** EPANET, Modelagem hidráulica, Sistema de abastecimento de água.

## ABSTRACT

Factors such as service pressure, quality of plumbing material, water quality, and those resulting from aging pipes, as well as improper system operation and maintenance practices, can contribute to their increased wear, reducing their service life. In addition, it seems to be lacking the application of a more technical-scientific management process, involving continuous actions of efficient planning and management aiming at the proper functioning and the guarantee of the supply of water of adequate quality and accessible to the population. This work aims to propose a conceptual model for the rehabilitation planning of the Campina Grande water distribution network (SAACG), as an auxiliary management tool. In the modeling process, the EPANET 2.0 program was used to simulate the behavior of pressures and free residual chlorine in the city's water distribution network, proposing scenarios with improvements to the operation of the supply system. The sectors of the distribution network studied were the districts of Prata, São José, and Centro, in the zone of pressure B. Through the analysis of the scenarios, it was observed that, in terms of pressure, the central district was with 19% of nodes with pressures above 50 mca during the whole simulated period, while for the CRL the most critical neighborhood, São José, presented 95% of the nodes in non compliance with the requirements of Portaria n° 5 of 2017 of the Ministry of Health. Thus, the Prata district, with all parameters compliant, proving to be a good example of SAACG performance. The proposed rehabilitation scenarios obtained improvements in 24% of the Central district and 67% in the São José neighborhood, proving that the suggested measures are quite efficient for the improvement of the supply network. Therefore, it was concluded that the simulation, through EPANET 2.0, is an important auxiliary tool in the management of the supply systems along with the use of conceptual models, and can contribute significantly to the improvement of the quality of the water supply service, including planning your rehabilitation.

**Keywords:** EPANET, Hydraulic modeling, Water supply system.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Comportamento dos segmentos pelo Método Lagrangeano.....	23
<b>Figura 2</b> - Fluxograma da sequência metodológica.....	34
<b>Figura 3</b> - Representação das zonas de pressão da rede de distribuição de água de Campina Grande-PB .....	35
<b>Figura 4</b> - Representação dos materiais das tubulações da rede de distribuição de água de Campina Grande-PB nos bairros Centro, São José e Prata .....	37
<b>Figura 5</b> - Representação esquemática de ligação predial de água .....	38
<b>Figura 6</b> - Planta baixa da rede de abastecimento de Campina Grande-PB .....	40
<b>Figura 7</b> - Boletim diário do sistema de abastecimento de Campina Grande – PB.....	41
<b>Figura 8</b> - Macros criadas no Excel.....	42
<b>Figura 9</b> - Valores das modas horárias de volume e nível.....	42
<b>Figura 10</b> - Curva de volume R-01 .....	43
<b>Figura 11</b> - Coleta das amostras e medição de CRL .....	44
<b>Figura 12</b> - Reparos ao longo de um ano nos bairros .....	47
<b>Figura 13</b> - Médias pluviométricas ao longo do ano em Campina Grande-PB.....	48
<b>Figura 14</b> - Tipificação dos reparos nos bairros da Prata, São José e Centro.....	49
<b>Figura 15</b> - Esquema da rede de distribuição simulada no EPANET.....	51
<b>Figura 16</b> - Curva de volume dos reservatórios.....	52
<b>Figura 17</b> - Perfil de consumo dos reservatórios .....	53
<b>Figura 18</b> - Gráfico de decaimento do cloro residual livre.....	54
<b>Figura 19</b> - Ilustração dos pontos estratégicos escolhidos na simulação nos bairros do São José e Prata .....	56
<b>Figura 20</b> - Ilustração dos pontos estratégicos escolhidos na simulação da área do Centro ...	56
<b>Figura 21</b> - Simulação do comportamento para pressão na rede no cenário atual .....	57
<b>Figura 22</b> - Pressão nos nós (bairro Centro).....	58
<b>Figura 23</b> - Pressão nos nós (bairro São José).....	59
<b>Figura 24</b> - Pressão nos nós (bairro Prata).....	60
<b>Figura 25</b> - Simulação do comportamento do CRL na rede no cenário atual .....	61
<b>Figura 26</b> - Comportamento do CRL dos nós no bairro do São José.....	62
<b>Figura 27</b> - Comportamento do CRL nos nós do bairro do Centro .....	63
<b>Figura 28</b> - Comportamento do CRL nos nós do bairro Prata.....	64
<b>Figura 29</b> - Simulação do comportamento da pressão na rede reabilitada.....	65
<b>Figura 30</b> - Comportamento das pressões nos nós do bairro do Centro após reabilitação (C3) .....	66
<b>Figura 31</b> - Simulação do comportamento do CRL na rede reabilitada (Cenário C4).....	71
<b>Figura 32</b> - Simulação do comportamento do CRL na rede com reabilitação de 30% das ruas (C5-1).....	72
<b>Figura 33</b> - Simulação do comportamento do CRL na rede com reabilitação em longo prazo (C5-2).....	73
<b>Figura 34</b> - Esquema do modelo conceitual .....	74

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Índice de perdas na distribuição de água nas regiões brasileiras .....	17
<b>Quadro 2</b> - Modelos Conceituais e Operacionais .....	29
<b>Quadro 3</b> - Consumo por tipo de edificação .....	39
<b>Quadro 4</b> - Ruas com maior número de reparos.....	50
<b>Quadro 5</b> - Porcentagem dos nós com falhas quanto à pressão .....	68
<b>Quadro 6</b> - Porcentagem dos nós com falhas quanto ao CRL.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CAGEPA</b>	Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba
<b>CRL</b>	Cloro Residual Livre
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>OMS</b>	Organização Mundial de Saúde
<b>PVC</b>	Policloreto de Polivinila
<b>RNF</b>	Reservatório de Nível Fixo
<b>RNV</b>	Reservatório de Nível Variado
<b>SAA</b>	Sistema de Abastecimento de Água
<b>SAACG</b>	Sistema de Abastecimento de Água de Campina Grande
<b>SNIS</b>	Sistema de Informações do Setor de Saneamento
<b>UEPB</b>	Universidade Estadual da Paraíba

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
2.	OBJETIVOS .....	15
2.1	Geral .....	15
2.2	Específicos .....	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
3.1	Gestão de sistemas de abastecimento de água.....	16
3.2	Perdas de água ao longo de um sistema de abastecimento .....	17
3.3	Modelagem .....	18
3.4	Principais características das tubulações .....	30
3.5	Reabilitação de um sistema de abastecimento .....	31
4.	MATERIAL E MÉTODO .....	34
4.1	Fluxograma de atividades.....	34
4.2	Área de estudo .....	34
4.3	Levantamento do número de solicitações de reparos .....	37
4.4	Tipos de reparos.....	37
4.5	Levantamento de população.....	38
4.6	Traçado e simulação EPANET .....	39
4.7	Cálculo do coeficiente de decaimento do cloro residual livre no escoamento ( $k_b$ ).....	43
4.8	Descrição dos cenários de simulação e análise de vulnerabilidade da rede .....	45
4.9	Estudo das variáveis.....	45
4.10	Concepção do modelo conceitual .....	46
5.	ResultadoS e discussÃO .....	47
5.1	Levantamento do número de solicitações de reparos .....	47
5.2	Tipificação e espacialização dos reparos .....	49
5.3	Levantamento de população.....	50
5.4	Simulação no EPANET.....	51
5.5	Cloro residual livre (CRL) .....	53
5.6	Descrição dos cenários de simulação e análise de vulnerabilidade da rede .....	55
5.7	Modelo conceitual .....	70
6.	CONCLUSÕES .....	75
7.	RECOMENDAÇÕES.....	77
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## 1. INTRODUÇÃO

Acesso à água com qualidade e em quantidade é um dos direitos humanos fundamentais para a vida saudável. Por este motivo o estudo e a efetuação de cada processo pertinente ao sistema de abastecimento de água, desde sua captação até a chegada aos domicílios, são realizados com cuidado e comprometimento. A rede de distribuição de água é constituída por um conjunto de tubulações, acessórios, reservatórios, bombas, cuja finalidade é atender, dentro de condições sanitárias, de vazão e pressão convenientes, a cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade (PORTO, 2006).

Na cidade de Campina Grande-PB, o serviço de distribuição de água é administrado pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), sendo constituído por captação, adução de água bruta, tratamento convencional, adução de água tratada, reservação e distribuição. O que implica em uma malha de abastecimento bastante densa e que necessita de ferramentas que auxiliem na administração da sua rede.

O sistema de distribuição de água é dimensionado levando em consideração a previsão de uma determinada vida útil, ou seja, um determinado horizonte de tempo, capaz de continuar atendendo à demanda dos consumidores por um período limitado, tendo em vista que as canalizações, acessórios e instalações enfrentam o processo de envelhecimento e desgaste, contribuindo efetivamente para a perda de água tratada. Proporcionalmente ao tempo de utilização, surgem problemas de operação, manutenção e deterioração do sistema. Fatores como rugosidade do material utilizado, diâmetro das tubulações, pressão nos nós e perda de carga, contribuem para a necessidade contínua de reparos e manutenção, dificultando o andamento do processo de abastecimento e criando pontos frágeis ao longo do percurso da água. Hoogsteen (1993) reitera que a incidência maior dos problemas do sistema de distribuição de água é frequentemente decorrente de altas pressões, transientes hidráulicos, influências externas como tráfego, acidez do solo, envelhecimento natural do material da tubulação, sedimentação de materiais particulados nas tubulações, devido à ineficiência da estação de tratamento, e da qualidade do material das canalizações.

Venturine e Barbosa (2002) reforçam que os sistemas, com o passar do tempo, se deterioram de maneira natural ou acelerada, dando origem a problemas operacionais, que provocam a diminuição da qualidade dos serviços prestados e o aumento dos custos operacionais, os quais recairão sobre seus consumidores na forma de aumento de tarifas.

Para lidar com esses inconvenientes e para a realização de um planejamento mais eficiente, pode-se recorrer à modelagem, haja vista que, a partir do manuseio de dados e simulação de cenários, pode-se prever comportamentos futuros, representar situações reais e/ou cenários desejados para otimização de todo o sistema.

A intervenção para solucionar essas questões, baseada no monitoramento de indicadores que representem as condições da operação, é necessária e deve orientar a escolha entre reabilitar o sistema ou implementar um novo, com vistas a uma solução mais eficiente do processo. O planejamento é o elemento essencial para a implementação da solução definida, em especial porque, ordinariamente, os sistemas de abastecimento não podem ser retirados de operação, interrompendo o fornecimento de água à população. Diante do exposto esta pesquisa propõe um modelo conceitual para o planejamento de reabilitação de sistemas de distribuição de água da cidade de Campina Grande-PB, com uso do software EPANET 2.0.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Propor um modelo conceitual para o planejamento de reabilitação de sistemas de distribuição de água da cidade de Campina Grande-PB.

### **2.2 Específicos**

- Tipificar e espacializar os reparos da rede de distribuição de água;
- Elaborar diagnóstico da vulnerabilidade da rede de distribuição de água;
- Simular cenários de alterações na operação e manutenção da rede de distribuição de água;
- Propor estrutura de modelo de planejamento de reabilitação de redes de distribuição de água.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Gestão de sistemas de abastecimento de água**

As organizações públicas brasileiras são, conforme Nascimento (2016), cada vez mais, exigidas pela sociedade, para que atendam satisfatoriamente as suas necessidades, prestando serviços com qualidade, pois há um consenso de que os serviços públicos são ineficientes e que os governos têm um grande desafio a enfrentar nas diversas áreas da gestão pública. Ainda segundo a autora, a sociedade moderna é dependente do pleno funcionamento dos sistemas de infraestrutura de mobilidade, de entrega de energia, de água potável, comunicação, entre outros, no entanto, constata-se que, em países desenvolvidos e em desenvolvimento, a deterioração destas infraestruturas impacta negativamente os serviços prestados e, conseqüentemente, a qualidade de vida das comunidades.

As ações de gestão do uso dos recursos hídricos são fundamentais para limitar a utilização dos mananciais que apresentam demanda crescente. Para que o cenário futuro dos usos dos recursos hídricos seja sustentável, são necessários intervenções e investimentos de vários níveis pelos diversos agentes envolvidos para que se possibilite um equilíbrio entre a disponibilidade e a demanda da água (RIBEIRO et al., 2017).

Para este fim, tendo em vista que o sistema de abastecimento de água é uma estrutura bastante complexa e muitas vezes caótica, surge a gestão dos sistemas de abastecimento de água como importante processo, mas que tem, ordinariamente, maior foco na eficiência econômico-financeira e na universalização, ou seja, na garantia que toda a população consiga receber água em quantidade suficiente. No entanto, essa gestão também deveria focar na racionalização deste recurso tão escasso bem como na qualidade da água.

A gestão baseada em princípios técnico-científicos deve considerar o uso de indicadores resolutivos de análise e acompanhamento de fenômenos relacionados à operação, manutenção e de expansão e desenvolvimento do sistema.

No entanto, tradicionalmente, no Brasil, as concessionárias de serviços de abastecimento de água adotam o modelo da gestão de crise (FADEL e MARQUES, 2017), com caráter predominantemente corretivo, ao invés da adoção de ações de natureza preventiva que, em longo prazo, proporcionariam a redução de perdas e reparos ao longo do sistema, gerando ganho econômico maior, e garantiriam que todos os usuários seriam abastecidos com água em quantidade e qualidade suficientes, evitando riscos à saúde pública.

### 3.2 Perdas de água ao longo de um sistema de abastecimento

Conforme o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2015), as empresas de abastecimento geralmente operam com índices de perdas que variam, em média, entre 30 e 50%, como observado no Quadro 1 sendo constatado que na região Nordeste as perdas são superiores a 40%.

**Quadro 1** - Índice de perdas na distribuição de água nas regiões brasileiras

<b>Região</b>	<b>Total (%)</b>
Norte	46,3
Nordeste	45,7
Sudeste	32,9
Sul	33,7
Centro-Oeste	35,5
<b>Brasil</b>	<b>36,7</b>

Fonte: SNIS (2015)

Garcia et al. (2013) afirmam que perda é a diferença entre a quantidade de água produzida e a quantidade efetivamente entregue aos consumidores podendo ser física ou não física. Moraes e Almeida (2002) explicam que as perdas físicas são as causadas por vazamentos visíveis ou não visíveis, aparelhos mal aferidos ou fora de sua vida útil, baixa qualidade dos materiais hidráulicos, extravasamento nos reservatórios, falta de setorização por zonas de pressão, falta de um sistema de controle operacional, dentre outros, que ocorrem nas tubulações, conexões, válvulas e equipamentos de medição que compõem o sistema. Ainda segundo os autores, as perdas não físicas são aquelas em que a água é produzida e chega ao seu destino final por meios ilícitos e/ou sem medição legal.

Tendo em vista as numerosas variáveis responsáveis pelas perdas físicas ao longo do sistema, é necessário o efetivo controle da rede para extinguir ou, ao menos, minimizar os desperdícios causados. Lambert e Himer (2000) indicam que a gestão das perdas físicas pode ocorrer com a execução de quatro atividades complementares:

- **Gerenciamento de pressão:** procura minimizar os excessos das pressões do sistema e a faixa de duração de pressões máximas, enquanto assegura os padrões mínimos de serviço para os consumidores;

- **Controle ativo de vazamentos:** é a atividade de reparar os vazamentos apenas quando se tornam visíveis;
- **Velocidade e qualidade dos reparos:** desde o conhecimento da existência de um vazamento, o tempo gasto para sua efetiva localização e seu estancamento é um ponto chave no gerenciamento das perdas físicas. Entretanto, é importante assegurar que o reparo seja bem realizado. Uma qualidade ruim do serviço irá fazer com que haja uma reincidência do vazamento horas ou dias após a repressurização da rede de distribuição;
- **Gerenciamento da infraestrutura:** a prática das três atividades mencionadas anteriormente já traz melhorias à infraestrutura. Portanto, a substituição de trechos de rede só deve ser feita quando, após a realização das outras atividades, ainda que forem detectados índices elevados de perdas na área, pois o custo da substituição é muito oneroso.

Além disso o processo de desgaste devido ao envelhecimento das redes é o fator potencializador para a perda de água tratada, a qual é um elemento de grande importância para a saúde e bem-estar da população abastecida. Tsutiya (2006) explica que as maiores deficiências observadas em sistemas de abastecimento de água se devem principalmente à deterioração dos sistemas mais antigos, especialmente na parte de distribuição de água, com tubulações antigas apresentando frequentes problemas de rompimentos e de vazamentos de água, ou mesmo a falta de abastecimento de áreas urbanas que apresentam rápido e desordenado crescimento.

### 3.3 Modelagem

Segundo Cunha (2015), para suprir a demanda de água de abastecimento da população, é necessário reduzir o índice de perdas por meio de um gerenciamento eficaz dos sistemas de abastecimento de água. Viegas et al. (2002) afirmam que um dos instrumentos disponíveis para este gerenciamento é a modelagem hidráulica das redes de distribuição de água, que proporciona o aumento da eficiência, seja na fase de projeto ou de controle operacional.

A aplicação de modelos matemáticos, mediante simulações, é bastante utilizada pela comunidade acadêmica devido sua praticidade, rapidez na execução dos modelos, análise de

cenários com alto nível de detalhe e ótimo custo-benefício. Existem aplicativos para a simulação hidráulica como, por exemplo, WaterCAD desenvolvido pela Haestad Methods, e o EPANET desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

Um dos simuladores mais atrativos, o EPANET 2.0, trata-se de um simulador amplamente testado e credível, de distribuição gratuita tanto do programa como do seu código computacional (Loureiro e Coelho, 2004). Mas, para que os modelos simulados consigam gerar dados confiáveis, faz-se necessária uma calibração do modelo do sistema que, conforme Soares et al. (2004), visa o ajuste dos parâmetros (cloro residual livre e  $K_b$ , por exemplo) do sistema de tal forma que os desvios entre os dados simulados e observados em campo sejam minimizados.

### **3.3.1. EPANET 2.0**

Existem várias ferramentas que podem ser utilizadas na modelagem hidráulica, no entanto, alguns softwares têm se destacado para auxiliar e agilizar o desenvolvimento da pesquisa, a exemplo do EPANET 2.0.

Desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (EPA) e licenciado como de domínio público, seu Manual do Usuário explica que este é um programa de computador que permite executar simulações estatísticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição constituídas por tubulações, bombas, válvulas e reservatórios de nível fixo (RNF) e/ou variável (RNV).

Como as redes de distribuição de água, em geral, podem se localizar sob vias com tráfego intenso, sua inspeção física é limitada e de difícil acesso. Logo, uma solução para o problema é a análise do comportamento deste sistema de forma indireta com auxílio de software.

Com a entrada de valores de variáveis, coeficientes, informações estruturais e hidráulicas do sistema, e do traçado da rede de distribuição de água composto por trechos e nós que representam, respectivamente, tubulações e conexões existentes, é possível extrair do software dados como pressão nos nós e de qualidade da água, bem como simular todo o transporte e destino de água e estabelecimento de cenários de projeto, o que possibilita uma visão sistêmica do processo de abastecimento e acompanhamento contínuo dos parâmetros hidráulicos e de qualidade desejados.

Devido sua capacidade de representar os aspectos de operação e qualidade da água, este software tem grande utilização no meio acadêmico (LUCENA, 2018; SILVA, 2017; SANTOS, 2017; NASCIMENTO, 2016; RICCALDONE, 2016; SOUSA, 2014; LEAL, 2012; MENEZES, 2011). Neste trabalho, a análise destas informações basea-se nos indicadores Cloro Residual Livre (CRL) e pressão.

### **3.3.2. Modelagem hidráulica no EPANET 2.0**

Conforme Vieira (2013), o EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam como principais características:

- Dimensão de rede ilimitada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamento, etc.;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo de energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e caudal;
- Modelagem de reservatórios de armazenamento e de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema através controles simples, dependentes de uma só condição (ex.: altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

As equações da continuidade e da conservação da energia e a relação entre a vazão e a perda de carga, que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante, podem ser resolvidas através do Método Híbrido Nó-Malha que, por ser o mais simples, foi escolhido para obter os valores de vazão e cota piezométrica na rede utilizando o EPANET (ROSSMAN, 2000).

Ainda segundo ROSSMAN (2000), a relação vazão-perda de carga numa tubulação entre os nós “i” e “j” pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (1)$$

onde:

H = cota piezométrica no nó

h = perda de carga total

r = termo de perda de carga

Q = vazão

n = expoente da vazão

m = coeficiente de perda de carga localizada.

O Método do Gradiente arbitra uma primeira distribuição de vazões nas tubulações que não tem necessariamente que satisfazer as equações de continuidade nos nós. Em cada iteração do método, novas cotas piezométricas são obtidas resolvendo a seguinte matriz:

$$A * H = F \quad (2)$$

onde:

A = matriz Jacobiana de (N x N)

H = vetor de incógnitas em termos de cota piezométrica (N x 1)

F = vetor dos termos do lado direito da equação (N x 1).

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (3)$$

Enquanto que os elementos não nulos fora da diagonal são:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (4)$$

Onde:

$p_{ij}$  = inverso da derivada da perda de carga total no trecho entre os nós “ $i$ ” e “ $j$ ” em relação a vazão.

Para tubulações:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr |Q_{ij}|^{n-1} + 2m |Q_{ij}|} \quad (5)$$

Cada termo do lado direito da matriz é composto por uma parcela referente ao balanço de vazão no nó a qual é adicionado um fator de correção de vazão:

$$F_i = ( \sum_j Q_{ij} - D_i ) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (6)$$

Sendo o último termo aplicável a qualquer trecho que ligue um nó “ $i$ ” a um nó “ $f$ ” de cota piezométrica fixa e o fator de correção de vazão,  $y_{ij}$ , é dado pela seguinte expressão para tubulações:

$$y_{ij} = p_{ij} ( r |Q_{ij}|^n + m |Q_{ij}|^2 ) \operatorname{sgn}(Q_{ij}) \quad (7)$$

Após terem sido calculadas as cotas piezométricas, resolvendo a Eq. 1, as novas vazões podem ser obtidas de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)) \quad (8)$$

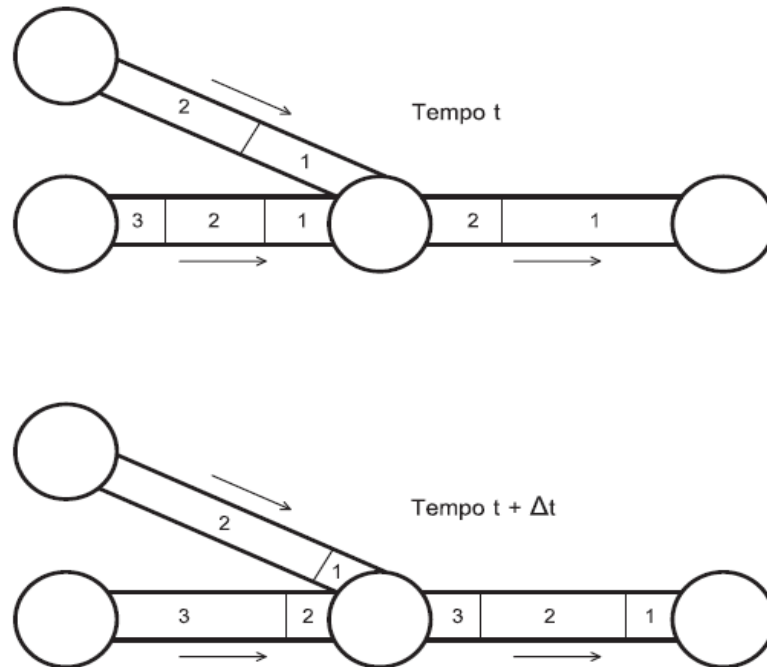
Se, conforme Rossman (2000), a soma de todas as variações de vazão (em valor absoluto) relativamente à vazão total em todos os trechos for superior à tolerância especificada (p.ex., 0,001), as equações (7) e (8) serão resolvidas novamente. A nova vazão obtida a partir da equação (8) satisfaz o princípio da continuidade da vazão nos nós, após a 1ª iteração.



### 3.3.2.1. Modelagem da qualidade de água no EPANET 2.0

O módulo de qualidade do EPANET utiliza o Modelo Lagrangeano que modela a água em segmentos que se deslocam nas tubulações e se misturam nos nós, em intervalos fixos de cálculo (ROSSMAN, 2000). Os tamanhos desses segmentos são alterados à medida que o tempo avança, como pode ser visualizado na Figura 1.

**Figura 1** - Comportamento dos segmentos pelo Método Lagrangeano



Fonte: Rossman (2000)

À medida que o tempo passa e com a entrada de água no sistema, o tamanho dos segmentos a montante aumenta ao passo que na saída da água a magnitude dos segmentos a jusante diminui, enquanto os trechos intermediários permanecem inalterados.

O modelo de qualidade da água é constituído de dois módulos computacionais, conforme Nascimento (2016), um que determina as condições hidráulicas e outro que tem relação com a qualidade da água, que depende do modelo hidráulico, pois é necessário ter conhecimento das misturas nos diferentes pontos, do fluxo nas canalizações e da diluição de contaminantes/desinfetante.

Seguem-se as seguintes possibilidades fornecidas pelo EPANET, conforme Vieira (2013), relativamente à modelação da qualidade da água:

- Modelação do transporte de um constituinte não reativo através da rede ao longo do tempo;
- Modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reativo, à medida que este sofre decaimento (ex.: cloro residual livre) ou crescimento (ex.: um subproduto da desinfecção) com o tempo;
- Modelação do tempo de percurso da água através da rede;
- Cálculo da percentagem de pontas de rede que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo (ex.: cálculo da importância relativa de duas origens de água diferentes);
- Modelação de reações de decaimento de cloro no seio do escoamento e na parede da tubagem;
- Definição de limites para a transferência de massa na modelação de reações na parede;
- Permitir que as reações de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração limite;
- Aplicação à rede de coeficientes de reação globais, que podem ser modificados individualmente para cada tubulação;
- Possibilidade de relacionar o coeficiente de reação na parede com a rugosidade da tubulação;
- Definição de variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede;
- Mistura de água a partir de diversas origens;
- Determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- Determinação da perda de cloro residual livre;
- Determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção.

Uma substância dissolvida e transportada ao longo de uma tubulação com a mesma velocidade média do escoamento, está, ordinariamente, sujeita a uma determinada taxa de reação (crescimento ou decaimento). Na concepção do EPANET a dispersão longitudinal foi considerada um mecanismo de transporte pouco importante para a maioria das condições operacionais admitindo, portanto, a não existência de mistura de massas entre segmentos

adjacentes que se deslocam ao longo da tubulação. Assim, desprezando a dispersão longitudinal, obtém-se a seguinte equação de advecção com reação (ROSSMAN, 2000):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (9)$$

onde:

$C_i$  = concentração (massa/volume) na tubulação  $i$  em função da distância  $x$  e do tempo  $t$

$u_i$  = velocidade média do escoamento (comprimento/tempo) na tubulação  $i$

$r$  = taxa de reação (massa/volume/tempo) que depende da concentração.

Admite-se que nos nós que recebem vazão de duas ou mais tubulações ocorre mistura completa e instantânea. Deste modo, a concentração de uma substância contida no volume do escoamento que sai do nó pode ser obtida simplesmente através de um balanço de massas podendo-se escrever a seguinte equação para um nó específico (ROSSMAN, 2000):

$$C_{i|x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j|x=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + C_{k,ext}} \quad (10)$$

onde:

$i$  = trecho com vazão que sai do nó  $k$

$I_k$  = conjunto de trechos com vazão que convergem em  $k$

$L_j$  = comprimento do trecho  $j$

$Q_j$  = vazão (volume/tempo) no trecho  $j$

$Q_{k, ext}$  = origem externa de vazão que entra na rede através no nó  $k$

$C_{k, ext}$  = concentração externa de vazão que entra no nó  $k$

É conveniente assumir que ocorre mistura completa nas estruturas de armazenamento (RNVs e RNFs). Esta é uma hipótese razoável para muitos RNFs que operam em condições de enchimento-esvaziamento, desde que seja fornecido um fluxo suficiente ao reservatório. Ainda segundo Rossman (2000), em condições de mistura completa, a concentração num RNV resulta da mistura do conteúdo do RNV com a vazão que entra. Ao mesmo tempo, a

concentração interna pode ser alterada devido a reações de decaimento ou crescimento. A seguinte equação descreve este fenômeno:

$$\frac{\partial(V_s C_s)}{\partial t} = \sum_{i \in I_s} Q_i C_i|_{x=L_i} - \sum_{j \in O_s} Q_j C_s + r(C_s) \quad (11)$$

onde:

$V_s$  = volume armazenado no instante  $t$

$C_s$  = concentração na estrutura de armazenamento

$I_s$  = conjunto de trechos que fornecem vazão a estrutura de armazenamento

$O_s$  = conjunto de trechos que recebem vazão da estrutura de armazenamento.

Conforme Nascimento (2016), a qualidade da água em sistemas de abastecimento pode se degradar por diferentes razões, podendo o decaimento do cloro residual nos sistemas de distribuição, por exemplo, estar relacionado à presença de substâncias orgânicas e inorgânicas (p. ex. amônia, sulfeto, íons ferrosos e matéria orgânica), ao consumo pelo processo de corrosão, principalmente nas tubulações de ferro e a reações com o biofilme formado nas tubulações.

De fato, o decaimento do cloro residual é resultante da combinação de dois coeficientes, (Equação 12), sendo um associado às reações ao longo do escoamento na massa líquida com materiais redutores ( $k_b$ ) e o outro ( $k_w$ ) associado a reações ao nível da parede da tubulação (CLARK et al., 1993).

$$K = k_b + k_w \quad (12)$$

A reação no fluxo central de escoamento ocorre quando uma substância, no caso o cloro, é transportada ao longo de uma canalização ou permanece em um reservatório, reagindo com outros constituintes presentes no fluxo (NASCIMENTO, 2016). A taxa de reação pode ser descrita através equação:

$$r = k_b C^n \quad (13)$$

Onde:

$k_b$  = coeficiente de reação no volume do escoamento - (dia-1)

$C$  = concentração do reagente (massa/volume)

$n$  = ordem da reação.

Quando existe uma concentração limitante para o crescimento ou decaimento de uma substância, a taxa de reação é descrita pelas Equações 14 e 15, em que  $C_L$  é a concentração-limite (NASCIMENTO, 2016).

$$R = k_b(C_L - C) C^{n-1} \text{ para } n > 0, k_b > 0 \quad (14)$$

$$R = k_b(C - C_L) C^{n-1} \text{ para } n > 0, k_b < 0 \quad (15)$$

onde:

$C_L$  = concentração limite.

Leal (2012) determinou o valor da constante  $k_b$  para o sistema de abastecimento de Campina Grande, através do teste da garrafa, sendo os resultados representados graficamente pelos valores de  $\log(C_t/C_0)$  em função do tempo ( $C_t$  é a concentração no instante  $t$  e  $C_0$  a concentração no instante inicial). Desse modo, com base num modelo cinético de primeira ordem, obtém-se uma linha reta, sendo o valor de  $k_b$  estimado a partir de sua declividade (ROSSMAN, 2000). As equações 16 e 17 representam a dinâmica temporal da concentração de cloro.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (16)$$

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (17)$$

Onde:

$C$  = concentração de cloro no tempo  $t$ ;

$C_0$  = concentração de cloro inicial;

$k$  = constante de decaimento de primeira ordem.

Parte do 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 existentes na parede interna e com o próprio material da canalização (NASCIMENTO, 2016), bem como devido a corrosão e em relação as substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água. Segundo Rossman (2000), a taxa de reação na tubulação resulta do comportamento de dois coeficientes, o de reação na parede e o de transferência de massa, que depende da difusão molecular das espécies reativas e do número de Reynolds do escoamento. Considerando cinética de 1ª ordem, a taxa de reação na tubulação pode ser traduzida pela seguinte Equação:

$$r = \frac{2 k_w k_f C}{R(k_w + k_f)} \quad (18)$$

Onde:

C = concentração de cloro

$k_w$  = coeficiente de reação na parede (comprimento/tempo)

$k_f$  = coeficiente de transferência de massa (comprimento/tempo)

R = raio da tubulação.

Os coeficientes de transferência de massa são expressos em termos do número adimensional de Sherwood (Sh), segundo a Equação 19:

$$k_f = Sh \frac{D}{d} \quad (19)$$

Onde:

D = difusão molecular da espécie a ser transportada (comprimento<sup>2</sup>/tempo)

d = diâmetro da tubulação

Em regime laminar, o número de Sherwood médio ao longo do comprimento de uma tubulação pode ser expresso conforme a Equação 20:

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668 \frac{d}{L} Re Sc}{1 + 0,04 \left(\frac{d}{L} Re Sc\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (20)$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

d = diâmetro da tubulação

Sc = número de Schmidt

Para escoamento turbulento, a correlação empírica de Notter e Sleicher (1971) pode ser utilizada, conforme a expressão a seguir:

$$Sh = 0,0149 R_e^{0,88} S_c^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

### 3.3.3. Modelos conceituais

Orellana (2011) relata que vários modelos conceituais e operacionais foram desenvolvidos em universidades e centros de investigação, a exemplo dos modelos de avaliação da condição estrutural de tubulações, baseados em análises estatísticas e de previsão (MACET) e os modelos para verificação e exploração de estratégias de reabilitação baseados em princípios técnicos e econômicos (MVEER). Ainda segundo o autor, os primeiros visam correlacionar o histórico de reparos de vazamentos e rompimentos com características da rede, tipo e idade da tubulação, características químicas da água transportada, tipo de solo e condições de operação, enquanto que os segundos requerem uma descrição detalhada da rede e a integração de dados econômicos.

Alguns exemplos dos modelos citados anteriormente encontram-se no Quadro 2.

**Quadro 2 - Modelos Conceituais e Operacionais**

MACET		MVEER	
Modelo	Autor	Modelo	Fontes
AssetMaP	Malandain et al., 1998	EPAREL	Rostum e Schilling, 1999
Failnet	Eisenbeis et al., 1999	KANEW	Herz, 1998
GIS and cluster method	Water Research Centre, RU	GAasset	Miller et al., 2001
Utilnets		WARP	Kleiner et al., 2001; Rajani e Kleiner, 2001; Rajani e Kleiner, 2002
SDSS	Makropoulos e Butler, 2006	CARE-W	Desenvolvido por um programa europeu de investigação

**Fonte:** Adaptado de Orellana (2011)

Sarzedas (2009) afirma que existem três abordagens para modelos de estado técnico de redes de água relativas às falhas de tubulação: análise descritiva, análise física e análise preditiva. A primeira tem a capacidade de indicar tendências em falhas e fatores que afetam as tubulações a partir da organização e compilação dos dados. A segunda modela o estado estrutural do material da tubulação a partir da quantidade de corrosão e estresse da tubulação, por exemplo. A terceira análise prevê falhas futuras do sistema com base em técnicas estatísticas.

### 3.4 Principais características das tubulações

Historicamente, existe uma grande variedade de materiais e tecnologias utilizados na produção de tubos para o abastecimento de água. Por volta de 1700-1450 A.C., segundo Sarzedas (2009), a cidade de Knossos, na ilha de Creta, estava em seu apogeu e desenvolveu um sistema de transporte de água que utilizava condutos circulares e distribuíam água para a cidade e para o palácio em tubulações pressurizadas, sendo estes, possivelmente, os primeiros tubos utilizados, já que outras civilizações apenas se utilizavam de canais superficiais.

O domínio da produção de tubos de ferro fundido foi um fato importante para o desenvolvimento dos sistemas de abastecimento de água, embora, em 1455, tenha sido empregada a primeira tubulação de ferro fundido no Castelo de Dillenburgh na Alemanha, o seu uso em grande escala parece ter demorado a acontecer. Em 1664 uma adutora de ferro fundido de mais de 22 km foi construída na França para abastecer o Palácio de Versailles, tornando-se a maior linha de tubos da época e ainda hoje parte dessa tubulação permanece em serviço (ALEM SOBRINHO; MARTINS, 2004).

Os principais materiais utilizados nos sistemas de distribuição de água são: ferro fundido, PVC (policloreto de vinila), polietileno (PE) e fibrocimento, no entanto, os materiais que mais são aplicados em redes, atualmente, são o ferro fundido e o PVC. Os tubos de fibrocimento e ferro fundido, foram substituídos por tubos em PVC, que passaram a ter aceitação mais generalizada na Europa, no final da década de 40 (CHAMA NETO, 2004).

Diante do exposto, segundo Sarzedas (2009), as tubulações atualmente instaladas nas redes de distribuição são de 65 a 90% de ferro fundido e de 10 a 30% de tubulações constituídas por cimento amianto e plásticos. No entanto, no âmbito da zona de estudo do presente trabalho, o material presente na tubulação da rede ainda é composto por 71% de cimento amianto.



### 3.5 Reabilitação de um sistema de abastecimento

Com o objetivo de promover uma melhoria das redes já existentes, reabilitação é a restauração da rede de distribuição de água, que pode variar de acordo com as necessidades de operação de cada zona, haja vista que os pontos são distribuídos em percursos com cotas topográficas distintas e que, portanto, necessitam atingir diferentes pressões de modo a permitir a condução da água ao seu destino final.

Muitos sistemas de abastecimento existentes atingiram sua vida útil e os investimentos de capital necessários para reabilitá-los são elevados. O desenvolvimento de modelos para o planejamento da reabilitação é necessário, a fim de definir quando e como reabilitar as tubulações de um sistema de distribuição (ORELLANA, 2011). Entretanto, o envelhecimento da rede não é o único motivo que desencadeia a necessidade de reabilitação, como já discutido, mas uma associação de fatores. A partir da identificação dessas causas deve ser tomada a decisão sobre a solução mais adequada ao sistema analisado.

Venturini e Barbosa (2002) explicam algumas técnicas de reabilitação, conforme resumido a seguir:

- **Limpeza das tubulações:** uma higienização periódica é feita nas tubulações com o objetivo de preservar o fluxo e a qualidade da água no sistema. Esta pode se dar por três formas:

Limpeza hidráulica - um limpador provido de lâminas de aço é hidraulicamente impulsionado através da tubulação, pelo bombeamento de água ou do uso de um sistema de pressão. Um reservatório deve estar ao final da tubulação para separar e coletar os detritos de limpeza suspensos.

Método Drag (método de arrastar) - limpador provido de uma série de lâminas raspadoras de aço e rodo de borracha, puxado por um guincho posicionado ao nível da terra, através de um poço de acesso. O limpador é arrastado pelo guincho, primeiro em uma direção e depois em outra, até que a tubulação esteja suficientemente limpa.

Método Scraper (método de raspagem) - o raspador é autopropulsor, tem uma cabeça raspadora rotativa equipada por fileiras de lâminas de aço capazes de limpar os arrebitos e ao redor deles, permitindo a limpeza de todas as deformações presentes na tubulação. A passagem dessa máquina e a pressão aplicada pela cabeça raspadora à superfície da parede permitem que uma limpeza completa seja obtida em uma única passagem.

- **Substituição das tubulações:** consiste na troca das canalizações quando estas já foram rompidas repetidas vezes, estando sua estrutura comprometida. A execução deste serviço pode ser feita pela abertura de valas através de máquina escavadeira ou manualmente.
- **Revestimento não estrutural:** são revestimentos aplicados nas canalizações sem função estrutural, que podem ser:

Revestimento de argamassa de cimento - pode ser aplicado em tubulações de 100 a 200 mm de diâmetro, sendo a cobertura bombeada diretamente de uma máquina com uma cabeça rotatória da qual é lançada, sob ação da força centrífuga, na parede da tubulação e, por fim, pás rotativas alisam a argamassa aplicada até que o acabamento fique hidraulicamente eficiente.

Revestimento de resina epóxi - com limite de aplicação de 200 metros de uma só vez, seu objetivo é melhorar as características hidráulicas das redes e, ao mesmo tempo, prevenir a formação de tubérculos nas paredes das tubulações. Este método não corrige nenhuma deterioração do encanamento, no entanto reduz as futuras deteriorações em seu interior.

Processo AS - inicialmente é removida a rugosidade proveniente da oxidação e das incrustações existentes nas paredes internas das tubulações através da introdução de abrasivos especificamente dimensionados os quais se movimentam helicoidalmente sendo, posteriormente, realizado o revestimento com resina epóxi, prolongando a sobrevida útil.

- **Método Brusting** (Método de ruptura): primeiramente, um cabo é conectado à cabeça de um fragmentador que, por sua vez, é conectado à nova tubulação. Quando o cabo é puxado para a abertura de tração, a tubulação existente é fragmentada e a nova instalada.
- **Método da perfuratriz direcional:** é um método não-destrutivo que utiliza um equipamento montado sobre uma esteira para o posicionamento da perfuratriz permitindo, desse modo, a perfuração a partir da superfície. Toda a perfuração é monitorada através de rastreadores eletrônicos sendo possível direcionar a perfuração e desviar de obstáculos e interferências existentes ou, ainda, atender às curvas e declividades especificadas em projeto.

- **Método cured-in-place - Slipling** (Método de cura in loco - Deslizamento): o tubo é inserido achatado e enrolado em um grande carretel e puxado para o interior da tubulação, sendo, posteriormente, inflado através de ar ou vapor para formar o revestimento aderente à parede da tubulação.
- **Dosagem química** – Introduzido por Evins et al. (1989) e Selvakumar et al. (2002), esse método é voltado aos problemas de qualidade da água. Substâncias são adicionadas ao fluxo de água destinando-se a reduzir a taxa de corrosão das tubulações de ferro, ou para manter o produto da corrosão invisível aos consumidores.

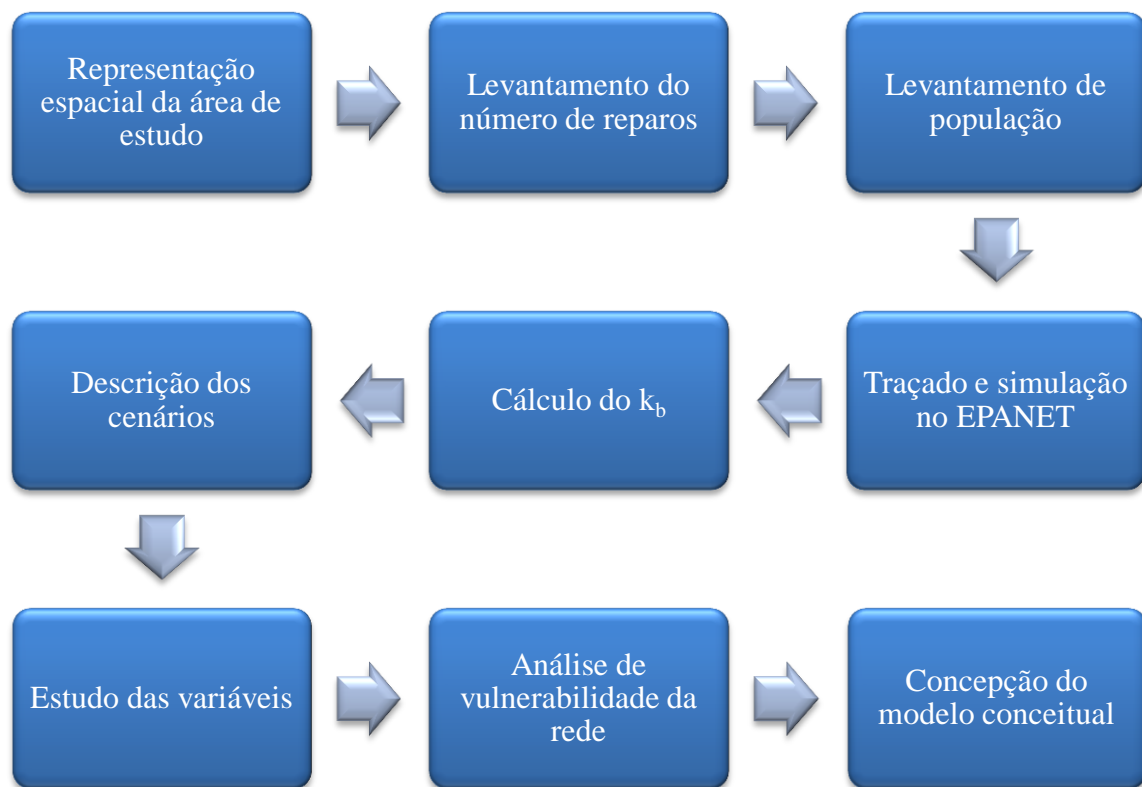
Neste sentido, de posse dos dados fornecidos, após análise dos vários fatores, conforme já discutido, a exemplo da pressão, idade da tubulação e rugosidade, que interferem na qualidade do abastecimento, bem como o estudo das condições disponíveis para revitalização dos trechos, é possível escolher a técnica que apresenta melhor custo-benefício para atender às exigências da região.

## 4. MATERIAL E MÉTODO

### 4.1 Fluxograma de atividades

O fluxograma da sequência metodológica que foi desenvolvida durante as etapas da pesquisa é apresentado na Figura 2.

**Figura 2** - Fluxograma da sequência metodológica



### 4.2 Área de estudo

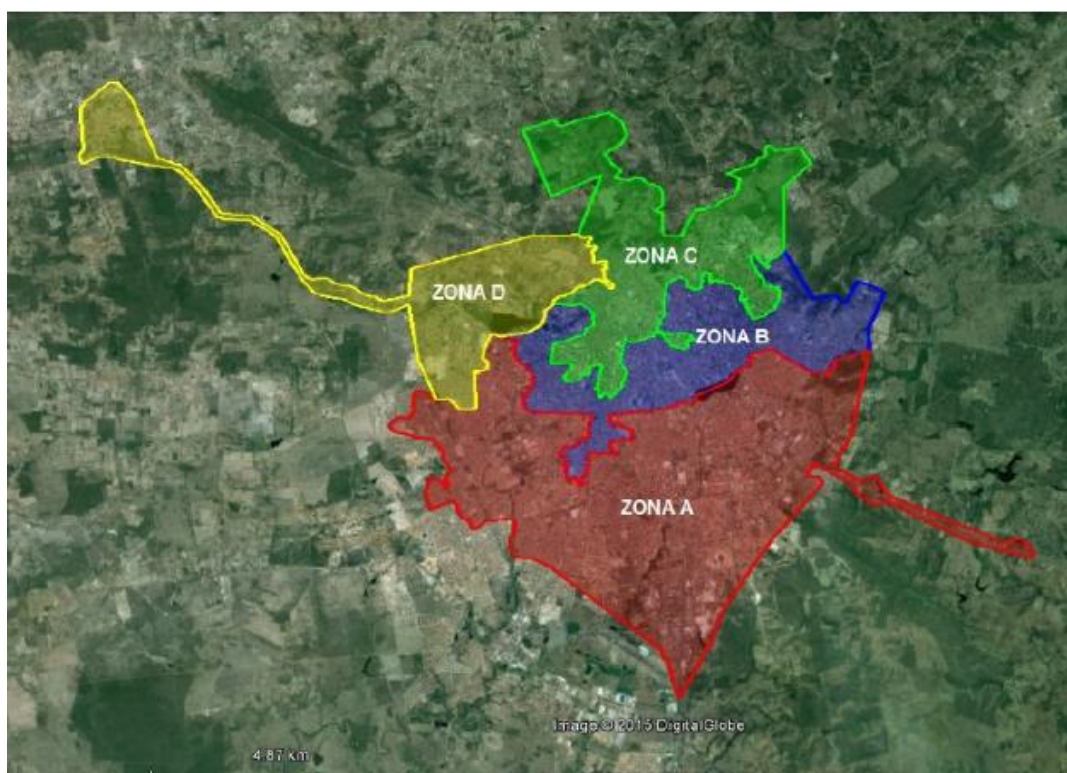
O município de Campina Grande, localizado no interior do estado da Paraíba, região semiárida do Nordeste Brasileiro, apresenta clima tropical, com médias anuais de 23°C, 78% e 791,5mm, para temperatura do ar, umidade relativa e precipitação, respectivamente. A evaporação potencial anual média, consoante Henrique (2006), é de 3,5 mm/dia em todo o verão, contribuindo para significativo déficit de umidade.

A cidade de Campina Grande, sede do município e da Região Metropolitana homônima, é de médio porte, com população de aproximadamente 400 mil habitantes,

conforme IBGE (2010), localizada em sítio de relevo com altitude média acima do nível médio do mar igual a 520 metros, segundo a Weather Spark (2018). A cidade é um importante polo universitário e de comércio e conta com infraestrutura típica de cidades de seu porte. Os serviços de saneamento básico compreendem os sistemas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem e manejo de águas pluviais urbanas e limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, sendo os dois primeiros operados por uma empresa de economia mista concessionária.

Devido aos elevados desníveis do relevo, o planejamento da operação da rede de distribuição de água da cidade foi baseado na estratégia de sua divisão em quatro zonas de pressão (A, B, C e D), conforme ilustrado na Figura 3, com a finalidade de promover o bom gerenciamento da operação de distribuição de água. O estudo descrito neste trabalho foi levado a efeito em malhas de distribuição de água de três bairros (Prata, São José e Centro), situados na zona de pressão B, por serem considerados críticos por causa do envelhecimento das canalizações e elevada frequência de reparos, fatores relacionados à deterioração da qualidade da água.

**Figura 3** - Representação das zonas de pressão da rede de distribuição de água de Campina Grande-PB



Fonte: Adaptado de Menezes (2011)

De acordo com Nascimento (2016) a concepção da rede de distribuição de água, pela empresa ACQUAPLAN, em 1980, foi orientada pelas bacias hidrográficas de dois riachos, o da Depuradora e o de Bodocongó, e pela topografia acidentada da área a ser abastecida e, a fim de amenizar os efeitos dos desníveis acentuados, a rede foi dividida em zonas de pressão.

A zona de pressão A é alimentada pelo reservatório R-09 e abastece os bairros Quarenta, Liberdade, Cruzeiro, Santa Rosa, Jardim Paulistano, Catolé, Mirante, José Pinheiro, Malvinas, Presidente Médici e Distrito Industrial.

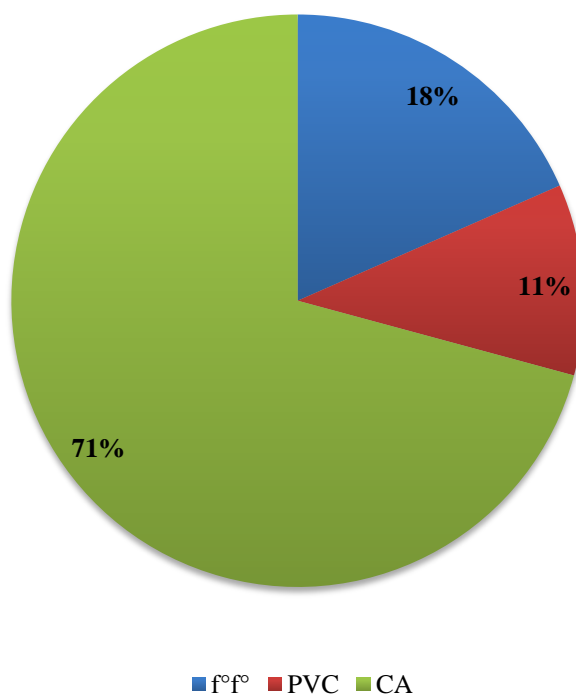
Compõem a zona B, área de estudo desta pesquisa, os bairros Centro, Santo Antônio, São José, Prata, Centenário, Lauritzen, Monte Castelo, Monte Santo, Castelo Branco, Nova Brasília, Jardim Tavares, Conceição, Pedregal e Conjunto dos Professores, abastecidos com água dos reservatórios R-01, R-02, R-04 e R-05. Os bairros Prata e São José têm seu sistema alimentado pelos reservatórios R-05 e R-02, respectivamente, enquanto que o bairro Centro, devido sua grande extensão, é abastecido, conforme constatado através da simulação, pelos reservatórios R-01 e R-04.

A zona de pressão C, também abastecida pelo reservatório R-05, abrange os bairros Alto Branco, Juracy Palhano, Nações, Cuités, Palmeira, o distrito de Jenipapo e as cidades de Lagoa Seca, Alagoa Nova, São Sebastião de Lagoa de Roça e Matinhas.

Por fim, inseridas na zona de pressão D, as localidades 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 são abastecidas por água do reservatório R-09.

Os materiais constituintes da rede, extraídos da planta baixa da rede de abastecimento da cidade de Campina Grande cedida pela CAGEPA, se alternam entre ferro fundido (f<sup>o</sup>f<sup>o</sup>), cimento amianto (CA) e PVC, sendo este último o mais utilizado nos trechos executados mais recentemente. Entretanto, nos bairros Centro, São José e Prata, que serão objetos deste estudo, o material predominante é o cimento amianto, conforme ilustrado na Figura 4, tendo em vista que são os bairros mais antigos do sistema de abastecimento de Campina Grande (SACG), apresentando, em sua maioria, tubulações bastante envelhecidas.

**Figura 4** - Representação dos materiais das tubulações da rede de distribuição de água de Campina Grande-PB nos bairros Centro, São José e Prata



Fonte: Autor (2019)

#### 4.3 Levantamento do número de solicitações de reparos

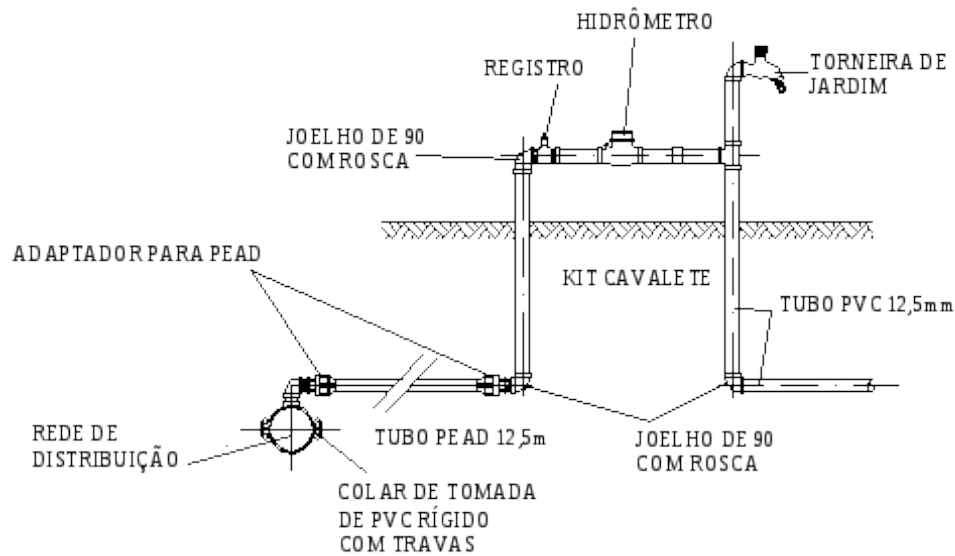
De posse das informações cedidas pela Divisão Administrativa e Financeira da CAGEPA, contendo o número de reparos na rede de distribuição de água, foi feita a separação de dados pertinentes à realização da pesquisa, extraindo as informações sobre os bairros da Prata, São José e Centro. Após a seleção dos dados realizou-se a organização dos mesmos em planilhas Excel para avaliação da frequência e tipificação dos consertos para cada bairro e, posteriormente, foi realizada a identificação dos pontos mais vulneráveis da rede, após a seleção dos cenários de simulação.

#### 4.4 Tipos de reparos

Os tipos de reparos identificados, realizados pela empresa terceirizada contratada pela concessionária, foram divididos entre vazamentos nos ramais prediais e na rede de abastecimento de água. O primeiro refere-se ao escape de água localizado entre a rede de

distribuição e o hidrômetro, enquanto que o segundo diz respeito àqueles que se localizam na rede propriamente dita, conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5** - Representação esquemática de ligação predial de água



Fonte: Holanda (2011)

#### 4.5 Levantamento de população

Com auxílio da plataforma de geolocalização Street View do Google Maps foram feitas estimativas do número de lotes para cada bairro e, em seguida, admitindo 3,3 habitantes para cada lote, conforme exigido pelo plano de saneamento básico da cidade de Campina Grande (PMSB, 2015), foi possível chegar à quantidade de habitantes através da multiplicação entre o número de lotes e total de habitantes.

A partir dos dados de população foi possível realizar o cálculo do consumo de água de cada bairro estudado, levando em consideração a Norma Técnica NTS 181/2012 da Sabesp, que estabelece os consumos estimados para cada categoria de consumidor, conforme o Quadro 3. Portanto, para cada lote, foram multiplicados os dados de população pelo consumo típico de cada edificação, possibilitando obter o valor consumido por cada nó ao longo dos três bairros estudados.



**Quadro 3** - Consumo por tipo de edificação

<b>Prédio</b>	<b>Consumo (L/dia)</b>
Apartamentos	200 per capita
Casas populares ou rurais	120 per capita
Residências	150 per capita
Residências de luxo	300 per capita
Cinemas e teatros	2 por lugar
Edifícios públicos ou comerciais	50 per capita
Escolas - por período	50 per capita
Escritórios	50 per capita
Garagens	50 por automóvel
Hotéis c/ cozinha e lavanderias	300 por hóspede
Hotéis s/ cozinha e lavanderias	120 por hóspede
Jardins	1,5 por m <sup>2</sup>
Lava-rápidos automáticos de veículos	250 por veículo
Mercados	5 por m <sup>2</sup> de área
Oficinas de reparo de automóveis	300 per capita
Postos de abastecimento e serviço automotivos	150 por veículo
Templos	2 por lugar

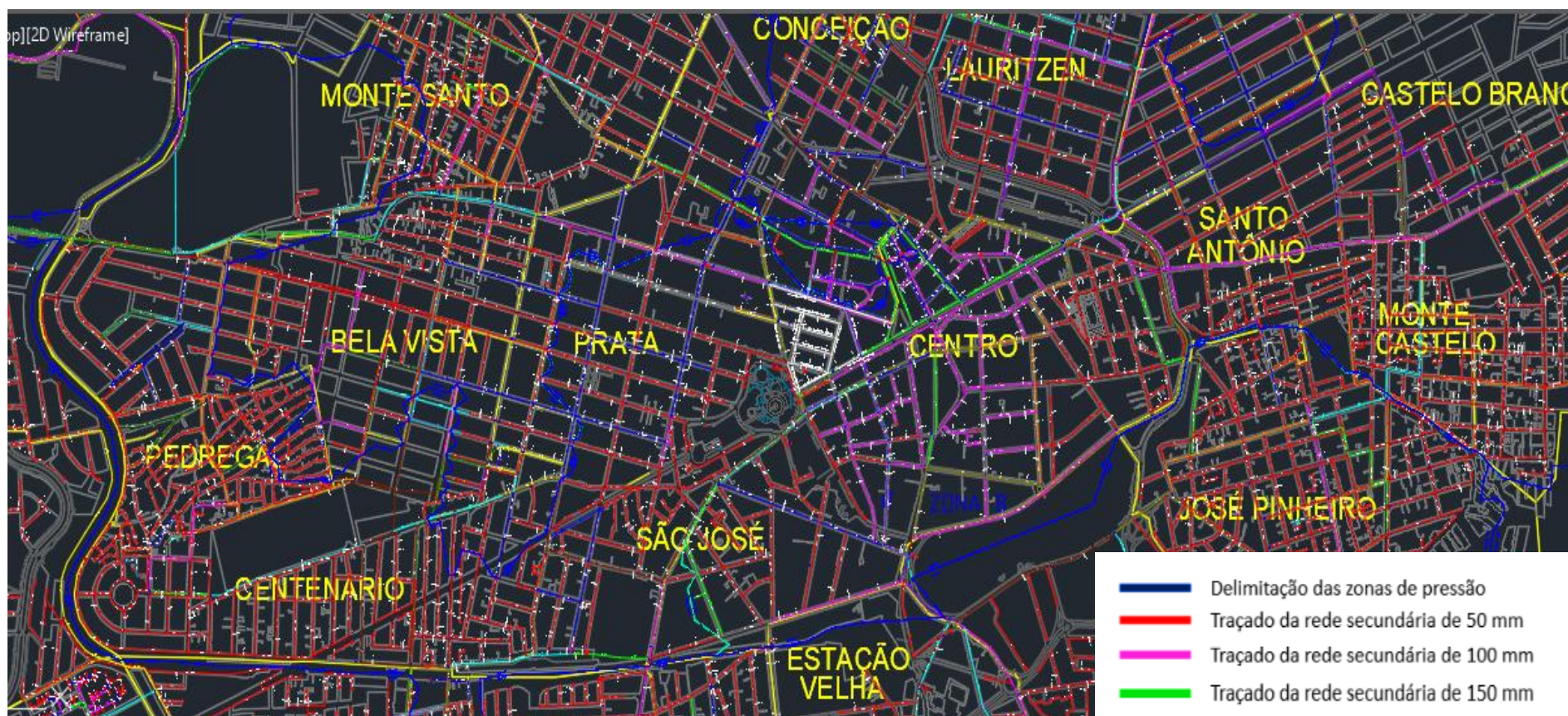
Fonte: Sabesp (2012)

É importante ressaltar que para os casos não abordados pela Norma, como por exemplo, lojas e consultórios, ou, ainda, quando se tornou inviável sua utilização, estimou-se a vazão consumida de 140 l.dia<sup>-1</sup> para cada habitante. Este valor foi obtido a partir da divisão entre os valores de vazão de entrada no sistema estudado e a soma das populações presentes na área de estudo.

#### 4.6 Traçado e simulação EPANET

A partir da planta baixa da rede de abastecimento de Campina Grande (Figura 6), fornecida pela CAGEPA, realizou-se o traçado para representar os trechos distribuidores de água dos bairros analisados.

**Figura 6** - Planta baixa da rede de abastecimento de Campina Grande-PB



Fonte: CAGEPA (2014)

As cotas do terreno foram obtidas através da carta de curvas de nível da cidade de Campina Grande, em AutoCAD, e o nível de água no reservatório utilizado foi o máximo mais frequente num período de 12 meses, entre 2013 e 2014, obtidos dos relatórios diários do Centro de Controle Operacional da CAGEPA, conforme ilustração da Figura 7 (NASCIMENTO, 2016).

**Figura 7** - Boletim diário do sistema de abastecimento de Campina Grande – PB

Nº horas	SISTEMA DE RESERVAÇÃO E ELEVAÇÃO DO R-05										SISTEMA DE RESERVAÇÃO E ELEVAÇÃO DO R-06														
	EEAT-01 (EE-RAP-05)					EEAT-08 RAP-01					REL 07 RAP 02					RAP-04 Vol. (m³)					EEAT-09 REL-29 CUITES				
	02	03	04	05	Vol (m³)	01	02	Vol (m³)	01	02	Vol (m³)	C01	C02	C03	C04	P. Rec.	01	02	Vol (m³)	01					
01	P	F	F	M	1.607,65	2,50	E	P	-	2,65	1.922,10	1.922,10	1.922,10	1.922,10	0,0	E	E	-	E						
02	P	F	F	M	1.607,65	2,50	E	P	-	2,65	2.056,20	2.056,20	2.056,20	2.056,20	0,0	E	E	-	E						
03	P	F	F	M	1.607,65	2,50	E	P	-	2,65	2.190,30	2.190,30	2.190,30	2.190,30	0,0	E	E	-	E						
04	P	F	P	M	1.226,33	2,50	E	P	-	2,65	2.279,70	2.279,70	2.279,70	2.279,70	0,0	E	E	-	E						
05	P	F	P	M	1.099,22	2,50	F	P	-	2,65	2.235,00	2.235,00	2.235,00	2.235,00	1,0	E	E	-	E						

Fonte: CAGEPA (2014)

Após a definição e caracterização da área de estudo, foram realizadas simulações dos aspectos de operação e qualidade da água, com auxílio do software EPANET 2.0. Foi construído um traçado contendo reservatórios, válvulas, 425 nós e 572 trechos, para o desenvolvimento dos cenários de reabilitação a partir da situação atual da rede, tendo como base a malha real disponível na planta da rede de distribuição, em extensão dwg do AutoCad, disponibilizada pelo Laboratório de Eficiência Energética e Conforto Ambiental da UEPB.

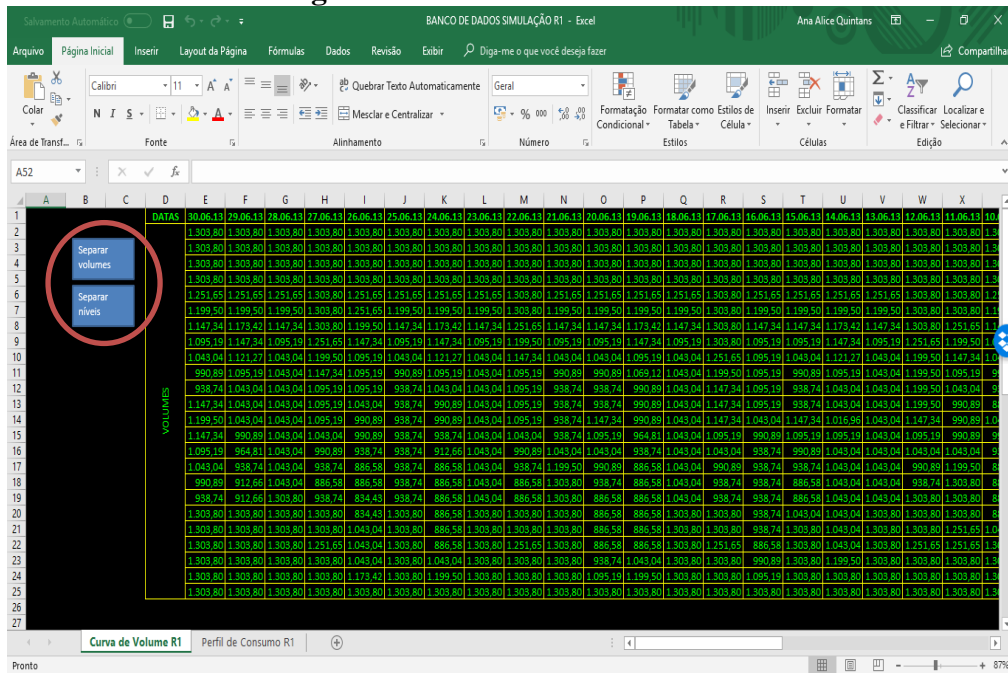
Posteriormente, para entrada dos dados no software, o simulador exigiu algumas etapas preliminares:

**Etapa I:** Construção das curvas de volume para cada reservatório de alimentação da rede, a partir da execução das seguintes fases:

- A definição do mês de Junho como referência para a coleta dos dados diários de volume e nível. Pois dentre os meses estudados ao longo de um ano observou-se ser o que possui maior população flutuante;
- A criação de macros no Excel para automatização da separação dos dados de nível e volume, conforme ilustrado na Figura 8;



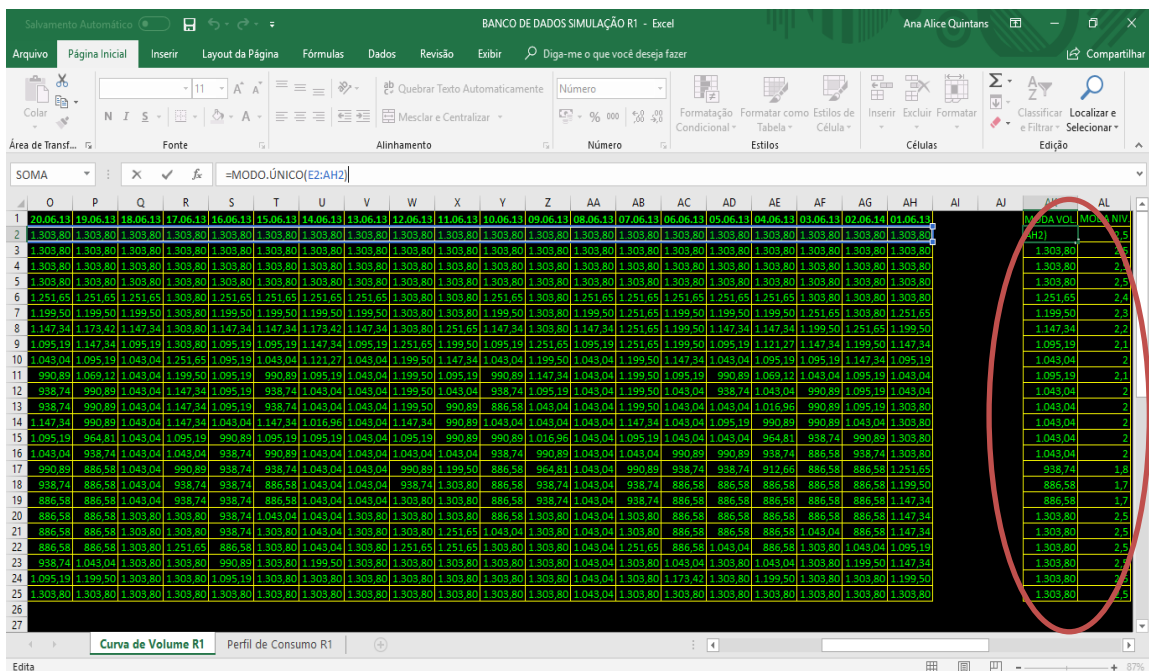
**Figura 8 - Macros criadas no Excel**



Fonte: Autor (2019)

- c) O cálculo das modas horárias dos volumes e níveis obtidos a partir de todos os dados separados durante todo o ano de 2013, a cada hora (Figura 9);

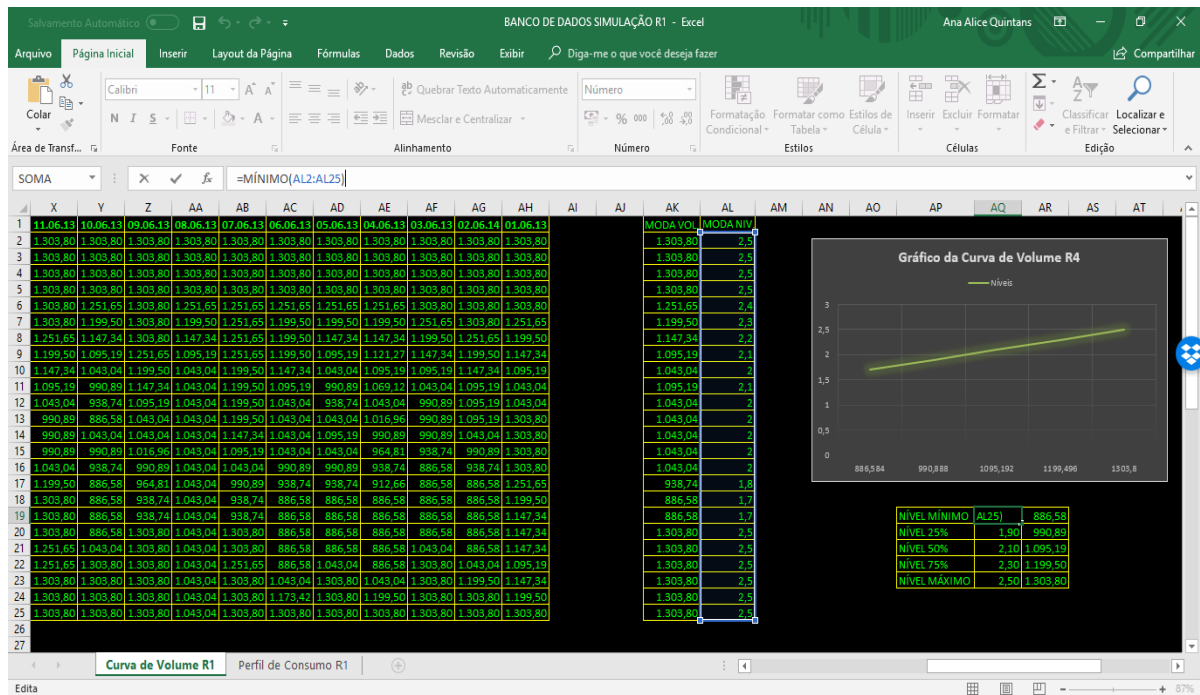
**Figura 9 - Valores das modas horárias de volume e nível**



Fonte: Autor (2019)

- d) O gráfico foi elaborado a partir das modas dos dados de nível e volume mínimos e máximos e os níveis intermediários de 25%, 50% e 75% (Figura 10). Estes níveis foram escolhidos intuitivamente por se tratarem de reservatórios prismáticos, fato que explica as curvas serem representadas por linhas retas.

**Figura 10 - Curva de volume R-01**



Fonte: Autor (2019)

**Etapa II:** Construção da curva do perfil de consumo de cada reservatório contribuinte, seguindo os passos:

- Definição do intervalo de dados e seleção do ano de 2013 como referência, já que dentre as informações coletadas este foi o mais completo;
- Criação de novos macros para automatização da separação dos dados de volume;
- Cálculo da vazão média de saída;
- Cálculo dos perfis de demanda mensais;
- Construção do gráfico de perfil de consumo.

#### 4.7 Cálculo do coeficiente de decaimento do cloro residual livre no escoamento ( $k_b$ )

A reação do cloro com substâncias químicas, orgânicas e inorgânicas dissolvidas, presentes na água, mesmo após os devidos tratamentos realizados, determina o decaimento do mesmo, no volume de escoamento. Logo, para se obter um modelo representativo quanto ao

decaimento do cloro na rede de distribuição de água, se faz necessária a determinação deste coeficiente, tendo em vista que pode variar de acordo com as características verificadas na rede.

Inicialmente, o coeficiente de decaimento do cloro residual livre ( $k_b$ ) adotado foi de  $2,73 \text{ dia}^{-1}$ , tendo como referência Nascimento (2016). No entanto, devido à mudança na qualidade da água, verificou-se, após a realização da simulação e medição *in loco* das concentrações de cloro residual livre (CRL), que os valores simulados não correspondiam aos atuais observados. Logo, fez-se necessária a utilização do teste da garrafa (*bottle test*) com procedimentos adaptados por diversos autores (POWELL et al., 2000; VIEIRA et al., 2004; TRIMBOLI, 2005; CHEUNG, 2006), para identificação do novo  $k_b$ .

O método consiste, primeiramente, na coleta de amostras de águas na rede e acondicionamento em frasco âmbar (Figura 11), mantendo-as sob condições controladas de temperatura e luminosidade, para diminuição da interferência desses fatores sobre o decaimento do cloro na água, e posteriormente na determinação das concentrações de cloro residual livre em intervalos regulares de tempo. Rossman (2000) sugere a adoção da cinética de primeira ordem com a determinação da constante realizada por meio da declividade da linha reta do gráfico dos valores de  $\log(C_t/C_0)$  em função do tempo.

**Figura 11** - Coleta das amostras e medição de CRL



Fonte: Autor (2019)

#### 4.8 Descrição dos cenários de simulação e análise de vulnerabilidade da rede

A partir do traçado realizado no EPANET 2.0 foram escolhidos os cenários mais representativos da vulnerabilidade da rede de distribuição de água para a realização do estudo e, conseqüentemente, propostas para otimização do funcionamento da rede. Desta maneira:

- CENÁRIO 1: representa a atual situação da rede de abastecimento referente à distribuição da Pressão;
- CENÁRIO 2: mostra a atual situação referente ao Cloro Residual Livre (CRL) ao longo da rede de distribuição;
- CENÁRIO 3: reflete a situação pós reabilitação da rede quanto à pressão, com a instalação de válvulas redutoras de pressão em pontos estratégicos;
- CENÁRIO 4: retrata a reabilitação da rede quanto ao indicador CRL, através da limpeza dos reservatórios e recloração da água antes da liberação para a rede de distribuição;
- CENÁRIO 5: apresenta a situação pós reabilitação quanto aos indicadores cloro residual livre e pressão, tanto em curto quanto em longo prazos, com a substituição das canalizações de cimento amianto para PVC, em princípio em 30% da rede, que seria uma medida imediata e posteriormente em 100%, associada à instalação das válvulas redutoras de pressão.

#### 4.9 Estudo das variáveis

Tendo analisado os cenários da área de estudo, foram identificadas as variáveis de maior relevância para a degradação da qualidade e operação do sistema: cloro residual livre (CRL), que pode sinalizar, precocemente, anormalidade na qualidade da água, e a pressão.

O cloro residual livre constitui o indicador mais importante de controle de qualidade na prática da cloração de águas de abastecimento, considerado um indicador sentinela porque sua concentração vai sendo diminuída, devido à reação com várias substâncias orgânicas e inorgânicas nas tubulações. Conseqüentemente, se houver uma queda na concentração para abaixo do mínimo recomendado,  $0,2 \text{ mgCl}_2/\text{L}$ , a água pode ficar desprotegida e, com isso, sofrer uma nova contaminação, colocando em risco a saúde da população (NASCIMENTO, 2016).

A pressão é um indicador auxiliar importante por estar diretamente relacionado ao bom funcionamento da rede de distribuição de água, constituindo-se em um fator que garante o fornecimento de água para a população e a integridade da rede. Para este parâmetro, a Norma vigente é a NBR 12218/1994 que estabelece as condições exigíveis na elaboração de projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, garantindo o bom desempenho da instalação e da potabilidade da água, sugerindo a faixa de 10 a 50 mca para uma boa execução da rede.

Tanto a pressão estática da água quanto as oscilações de pressão num sistema de distribuição, podem levar às falhas na tubulação, estas oscilações, segundo Sarzedas (2009), podem ser um dos fatores no agrupamento de falhas, assim como as válvulas que são fechadas e abertas durante atividades de reparo. Andreou, Marks e Clark (1987) consideraram que o estresse imposto na parede da tubulação devido à alta pressão contribui para a ocorrência de uma quebra, se a parede já está erodida devido à corrosão.

#### 4.10 **Concepção do modelo conceitual**

O modelo foi concebido com o objetivo de otimizar a ferramenta de simulação, e para sua construção foram utilizadas como base nas etapas propostas com a finalidade de planejar estrategicamente uma manutenção eficiente da rede, considerando as dimensões espacial e temporal. Este conjunto de estratégias, tem a finalidade de reduzir o índice de perdas, garantir que os critérios ambientais e sociais sejam atendidos e facilitar o gerenciamento do sistema tornando-o mais eficaz.

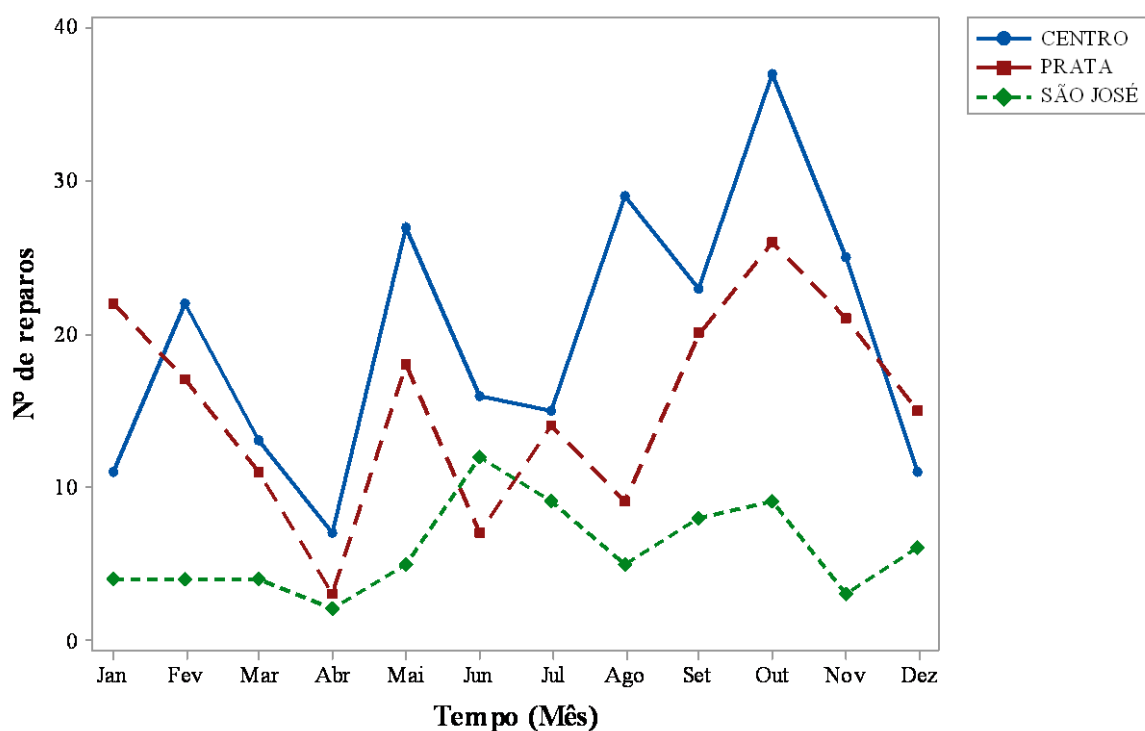


## 5. ResultadoS e discussÃO

### 5.1 Levantamento do número de solicitações de reparos

A organização dos dados cedidos pela CAGEPA contendo os nomes das ruas, seus respectivos bairros, observações de reparo e data de cada acontecimento, possibilitou a verificação do comportamento conforme ilustrado na Figura 12, entre os bairros ao longo do período de um ano.

**Figura 12** - Reparos ao longo de um ano nos bairros



Fonte: Autor (2019)

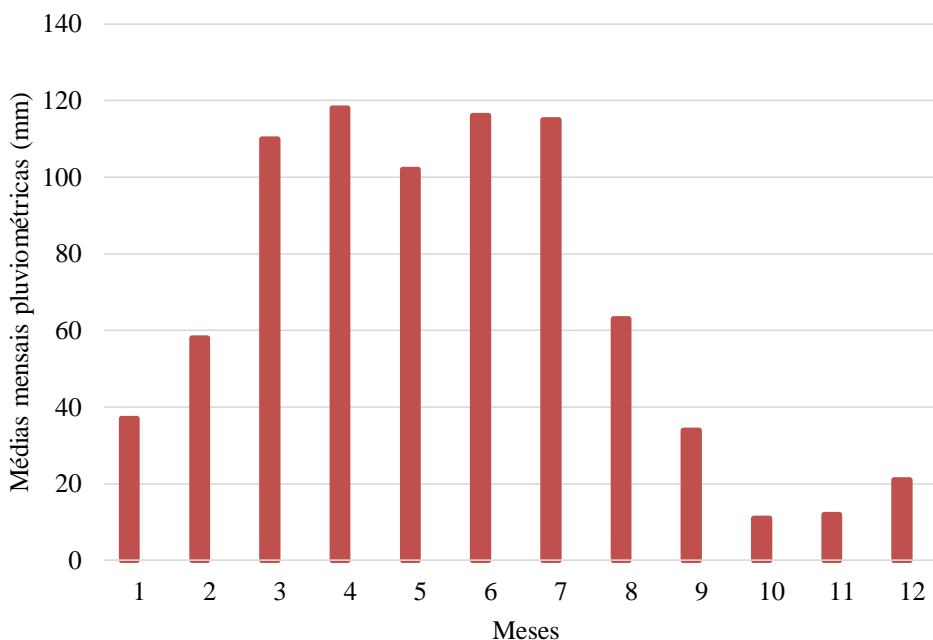
A política de reparos com caráter corretivo é o fator de maior relevância na construção do comportamento do gráfico, haja vista que os problemas pontuais são solucionados e posteriormente voltam a ocorrer no mesmo local ou em sua vizinhança, conforme constatado no levantamento realizado junto à CAGEPA. No entanto, acredita-se que a sazonalidade também é um dos fatores que contribui para a semelhança dos números entre os meses estudados, assim como a variação anual desta quantidade, aumentando em alguns meses e diminuindo em outros.

No período entre junho e julho houve um aumento de ocorrências no bairro São José, provavelmente em razão do aumento da população flutuante decorrente do período festivo no São João. Em contrapartida, no Centro há uma diminuição nessa contagem, haja vista que uma parte deste bairro fica interditada para a realização das festas e o restante fica com tráfego bastante intenso devido à movimentação dos turistas na cidade, o que inviabiliza a obstrução de vias para a realização de reparos.

O intervalo de férias, situado em dezembro e janeiro, apresenta uma queda significativa do número de reparos quando comparado ao restante do ano, pois grande parte da população sai da cidade, fato que implica num menor gasto de água e conseqüentemente menor fluxo de água percorrendo o sistema.

O aumento de reparos no mês de outubro pode ser correlacionado com o clima seco e temperaturas mais elevadas neste período, conforme ilustrado na Figura 13. Conseqüentemente o consumo de água aumenta, exigindo mais do sistema de distribuição, elevando assim o número de intercorrências ao longo dos bairros.

**Figura 13** - Médias pluviométricas ao longo do ano em Campina Grande-PB

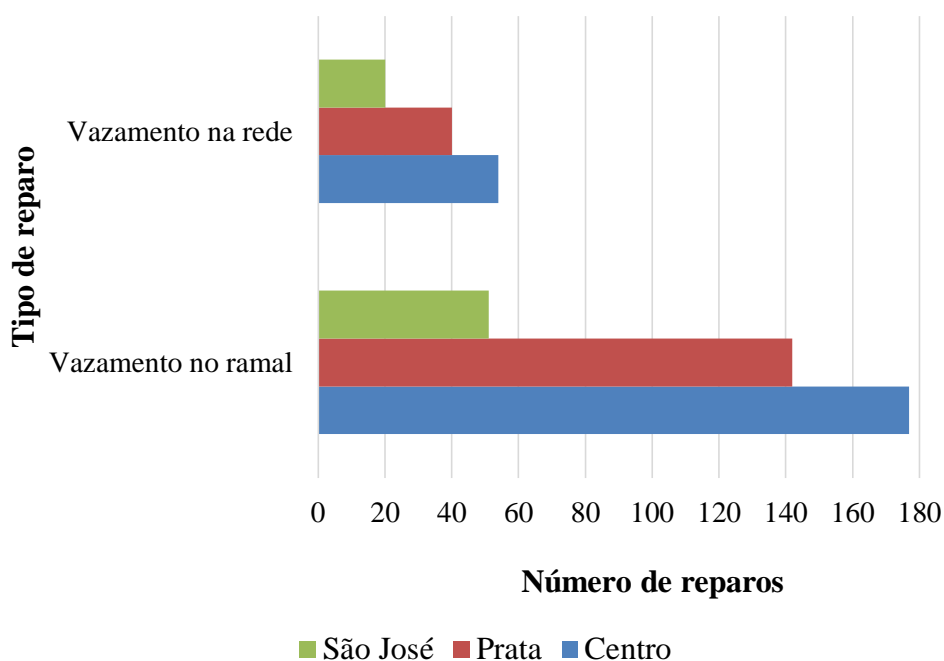


**Fonte:** Macedo (2011)

## 5.2 Tipificação e espacialização dos reparos

Os tipos de reparos dividem-se predominantemente entre vazamentos nos ramais e nas redes. No entanto, em todos os bairros analisados, o mais frequente deles foi o vazamento no ramal predial conforme a Figura 14.

**Figura 14** - Tipificação dos reparos nos bairros da Prata, São José e Centro



Fonte: Autor (2019)

Morais et al. (2010) explica que todas as unidades de um sistema de abastecimento de água (captação, elevação, adução, tratamento, reservação e distribuição) são passíveis de perdas, contudo, Hunaidi et al. (2000) afirma que é na distribuição que acontecem os mais altos índices, seja pela falta de manutenção adequada da infraestrutura, seja pela proximidade do usuário final, que pode beneficiar-se do abastecimento por meios ilícitos.

Os maiores índices de reparos concentram-se em ruas do Centro da cidade, conforme o Quadro 4, as quais apresentam, ordinariamente, tráfego de veículos mais intenso, sendo servidas por canalizações de idade mais avançada, em torno de 50 anos, e maior número de nós com pressões acima do máximo permitido.

**Quadro 4** - Ruas com maior número de reparos

<b>RUA</b>	<b>BAIRRO</b>	<b>Nº REPAROS</b>
Rua Pres. João Pessoa	Centro	13
Rua Afonso Campos	Centro	10
Rua Quebra Quilos	Centro	8
Rua Des Trindade	Centro	7
Rua Manoel Pereira De Araujo	Centro	7
Rua Miguel Couto,	Centro	7
Rua Pedro Alvares Cabral	Centro	7
Rua Maj. Manoel Jovino Do O	Centro	6
Rua Joao Da Mata	Centro	6
Rua Cel. Joao Lourenço Porto	Centro	6
Av Pres. Geúlio Vargas	Centro	6
Rua Rui Barbosa	Centro	5
Rua Joao Da Silva Pimentel	Centro	5
Rua Joao Suassuna	Centro	5
Rua Dr. Joao Moura	Centro	5
Rua Pres. Epitácio Pessoa	Centro	5
Rua Nilo Peçanha	São José	22
Rua Dom Pedro II	São José	15
Rua Professor Capiba	Prata	8
Rua Teixeira De Freitas	Prata	5

Fonte: Autor (2019)

Além disso, 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. Nos bairros Centro e São José, as ruas apresentadas no quadro também coincidem com os trechos que possuem, durante quase todo o período de simulação, valores de pressão acima de 50 mca. Logo, é preciso reabilitar este sistema para que ele opere de maneira mais eficiente, requerendo, além da troca das tubulações, a introdução de válvulas de redução de pressão.

### 5.3 Levantamento de população

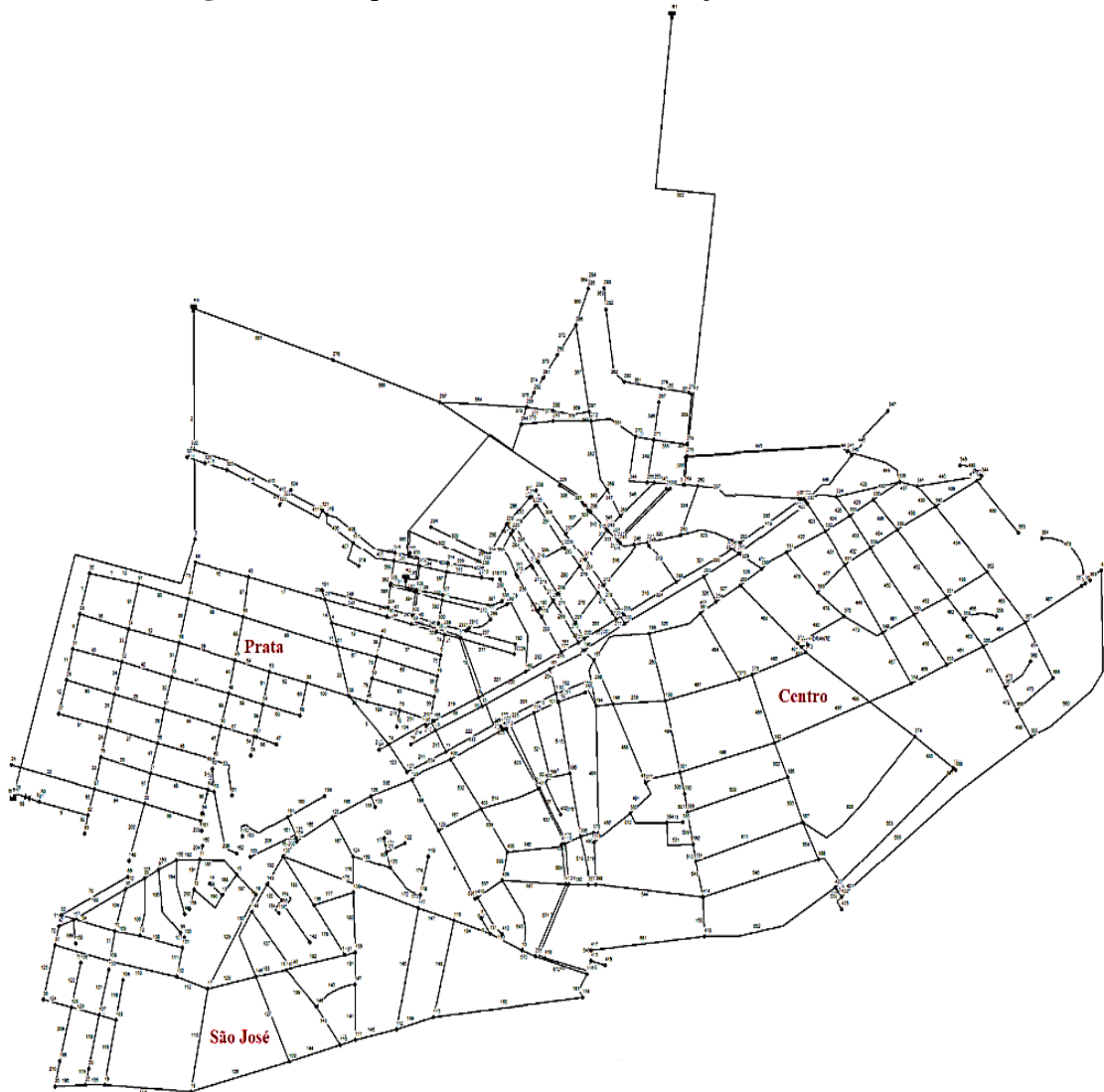
Obedecendo às recomendações da Norma Técnica da Sabesp NTS 181/2012 foram realizados o levantamento do número de habitantes e o cálculo do consumo de água. Foram estimados os números de habitantes nos bairros São José, Prata e Centro de, respectivamente, 8.016, 8.507 e 22.266 habitantes.

#### 5.4 Simulação no EPANET

Com o auxílio do software EPANET foram construídos (Figura 15) 563 trechos que representam as tubulações da rede de abastecimento e 410 nós que equivalem às ligações entre os trechos e auxiliaram na condução do percurso da água, por 50 km, sendo 10 km no bairro Prata, 12 km no São José e 28 km no Centro.

No entanto, para a execução da simulação, foi necessária a introdução de dados nos nós e também nos trechos. Para os nós, foram inseridos dados como cotas, adquiridas através da planta cedida pela CAGEPA, consumo, conforme cálculo apresentado anteriormente e padrão de consumo, que se trata do reservatório que abastece o nó. Quanto aos trechos, os dados exigidos pelo software tratam-se do comprimento para cada trecho (tubulação), diâmetro e rugosidade, obtidos a partir dos dados presentes na planta baixa.

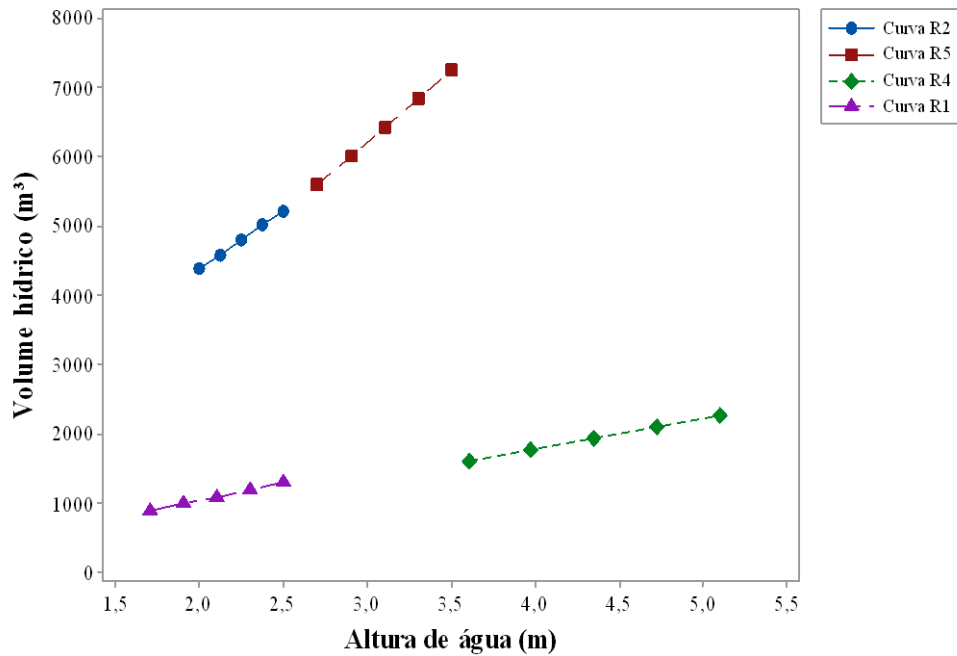
**Figura 15** - Esquema da rede de distribuição simulada no EPANET



Fonte: Autor (2019)

A curva de volume dos reservatórios foi construída a partir dos dados de nível e volume mínimos e máximos (das modas) e dos níveis intermediários a 25%, 50% e 75%, relacionando-os com seus respectivos volumes, obtendo-se o comportamento do volume de água em cada reservatório, conforme ilustrado na Figura 16.

**Figura 16** - Curva de volume dos reservatórios

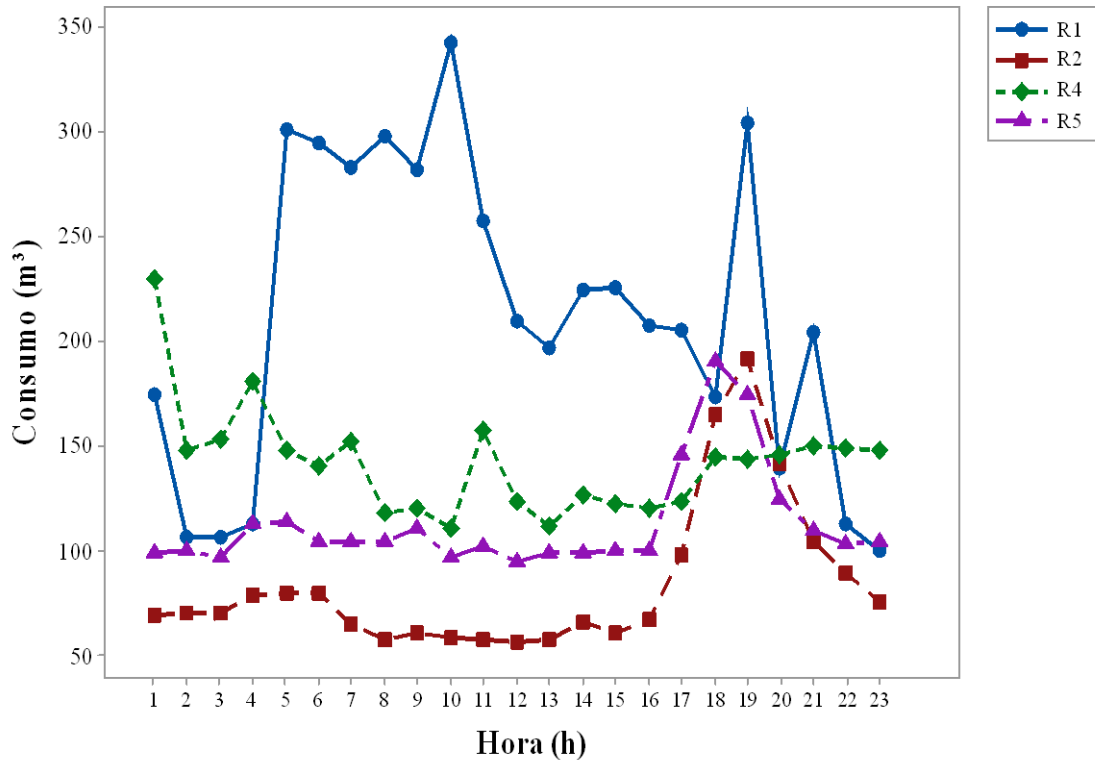


Fonte: Autor (2019)

Os padrões de consumo dos bairros simulados foram estimados com base nos dados de variação de volume dos reservatórios nos relatórios do Centro de Controle e Operações (CCO) da CAGEPA, sendo calculadas todas as vazões para cada hora (NASCIMENTO, 2016). Desta forma, foi estimada a média horária para cada mês e, portanto, alcançado um padrão de consumo de água para cada mês e, posteriormente, para o intervalo de um ano. Os perfis de consumo dos reservatórios analisados encontram-se na Figura 17.

Os gráficos dos perfis de consumo dos reservatórios R-02 e R-05 apresentaram picos em horários específicos pois, o primeiro é operado em regime de batelada e o período entre 18 e 19 horas coincide com o horário de enchimento do reservatório enquanto que a maior demanda do segundo ocorre no mesmo período, mas porque o mesmo funciona como poço de sucção para outros reservatórios e, nessa faixa de horário, envia uma quantidade maior de água para os demais.

**Figura 17** - Perfil de consumo dos reservatórios



Fonte: Autor (2019)

O comportamento singular dos reservatórios R-01 e R-04 se deve, provavelmente, às especificidades das funções dos mesmos. O R-01, localizado no bairro do Alto Branco, de acordo com Meneses (2011), serve de poço de sucção da estação elevatória EEAT-11 que atende o R-07 e parte do dia abastece alternativamente bairros como Nações e Lauritzen, já o R-04 atende parte da região central e serve de poço de sucção para a EEAT-09 que abastece o sistema do Brejo, no entanto esta não funciona no horário de maior demanda.

### 5.5 Cloro residual livre (CRL)

Algumas características da água de abastecimento da cidade de Campina Grande, mudaram ao longo dos dois últimos anos, pois atualmente, as águas oriundas do Açude Epitácio Pessoa se encontram associadas às águas da transposição do Rio São Francisco, fato que interfere diretamente na concentração de cloro ao longo da rede de distribuição de água, o que motivou a realização de nova estimativa do coeficiente de decaimento do cloro ( $k_b$ ).

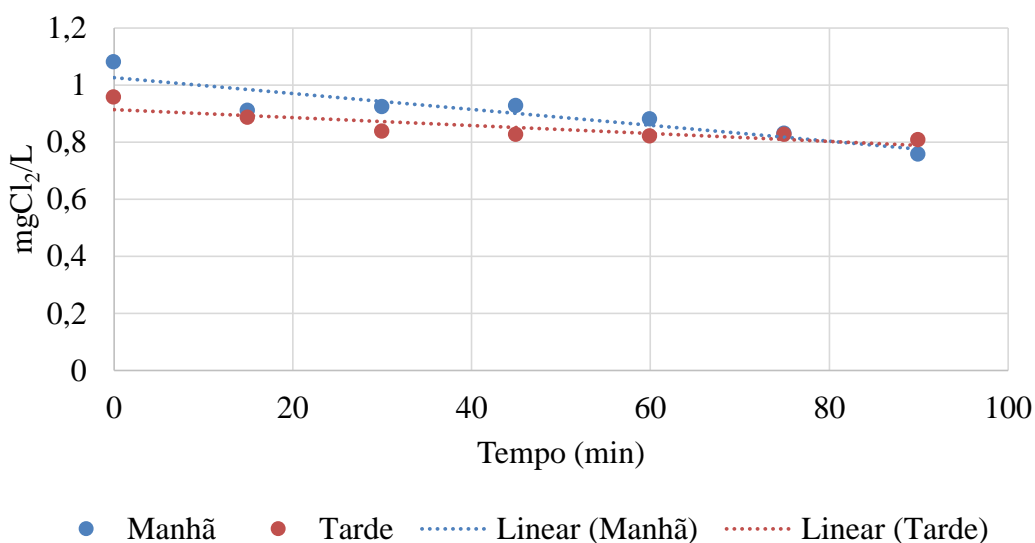
Para a caracterização do comportamento do cloro na nova água que alimenta o sistema de abastecimento de água (SAA) de Campina Grande foi escolhido um ponto a jusante do reservatório R-01, por alimentar uma parte da rede do Centro, que apresentou na simulação pontos que não estavam em conformidade com o valor observado, sendo necessário calibrar o modelo simulado.

Portanto, para realização do teste da garrafa, o ponto escolhido próximo ao R-01, foi na Rua Reverendo Augusto Santiago nº50, bairro Alto Branco, seguido da realização das seguintes etapas, em duplicata:

- 1) Higienização do ponto de coleta;
- 2) Abertura para eliminação da água estagnada na tubulação;
- 3) Coleta da água em triplicada em frascos âmbar;
- 4) Medição da quantidade de cloro residual livre a cada 15min durante duas horas.

A partir dos dados coletados, gerou-se a Figura 18 que ilustra o comportamento do decaimento no cloro em função do tempo. É importante destacar que o valor obtido através do teste é menor que o da rede devido à interferência de vários fatores, como, por exemplo, a temperatura, que pode acelerar o decaimento real.

**Figura 18** - Gráfico de decaimento do cloro residual livre



Fonte: Autor (2019)



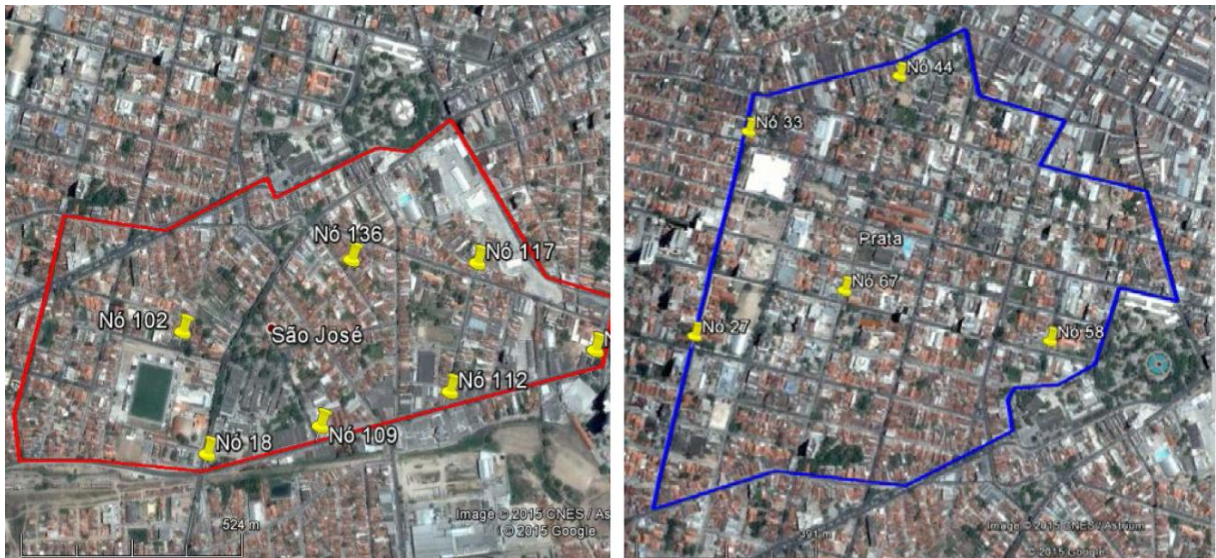
Após a coleta dos dados in loco, é possível, conforme o modelo de qualidade da água mostrado anteriormente por Leal (2012) e Rossman (2000), obter as equações das retas e os valores de  $\log(C_t/C_0)$  em função do tempo (onde,  $C_t$  é a concentração no instante  $t$  e  $C_0$  a concentração no instante inicial). Logo, a partir da reta e sua declividade, é possível estimar o valor de  $k_b$ .

Portanto, para calibração do modelo no EPANET, adotou-se o coeficiente  $k_b$  de  $1,35 \text{ dia}^{-1}$ , o qual permitiu que os valores simulados de cloro residual livre, ao longo da rede, fossem bem próximos aos valores medidos na rede de distribuição de água. Esse valor, menor do que adotado por Nascimento (2016), foi influenciado pelas alterações realizadas na ETA de Gravatá, com a introdução da etapa pré-oxidação na entrada da adutora de água bruta, contribuindo para a redução de espécies redutoras.

## 5.6 Descrição dos cenários de simulação e análise de vulnerabilidade da rede

Fez-se necessária a escolha de pontos estratégicos, representados nas Figura 19 e Figura 20, de acordo com sua distribuição no mapa bem como por representarem áreas com grande circulação de pessoas para caracterizar o comportamento do sistema com relação aos indicadores CRL e pressão. No bairro da Prata foram selecionados os nós 27, 33, 44, 67 e 58, que representam a Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Elpídio de Almeida, Feira da Prata, Hospital Joao XXIII, Igreja do Rosário e Mosteiro das Clarissas, respectivamente. No São José os nós escolhidos foram 109, 102, 18, 117 e 136, que representam o Hospital Universitário Alcides Carneiro, o Estádio Presidente Vargas, o Hospital Municipal Pedro I, a Casa da Criança Dr João Moura e a Escola Estadual de Ensino Fundamental Clementino Procópio, respectivamente. No Centro, os nós 73, 398, 383, 199, 386, 348, 346, 270, 315, 175 e 251, nas imediações dos estabelecimentos Teatro Municipal Severino Cabral, Loja Hiper Cartucho, Bar do Cuscuz, Shopping Cirne Center, Igreja Nossa Senhora do Carmo, Feira Central, Sesc Centro, Ministério do Trabalho, Posto Presidente, Banco Itaú e Museu Histórico de Campina Grande, nessa ordem.

**Figura 19** - Ilustração dos pontos estratégicos escolhidos na simulação nos bairros do São José e Prata



Fonte: Nascimento (2016)

**Figura 20** - Ilustração dos pontos estratégicos escolhidos na simulação da área do Centro



Fonte: Autor (2019)

Os cenários foram construídos com base na observação dos indicadores pressão e cloro residual livre nos nós simulados que não atendiam ao estabelecido pelas normas, sendo preciso propor alterações de melhorias para aumentar a eficiência do SAACG.



### 5.6.1. Cenário atual quanto à pressão (C1)

A Figura 21 representa a distribuição de pressões, permitindo a verificação do indicador nos nós e sua relação com a faixa 10 a 50 mca estabelecida pela NBR 12218/1994.

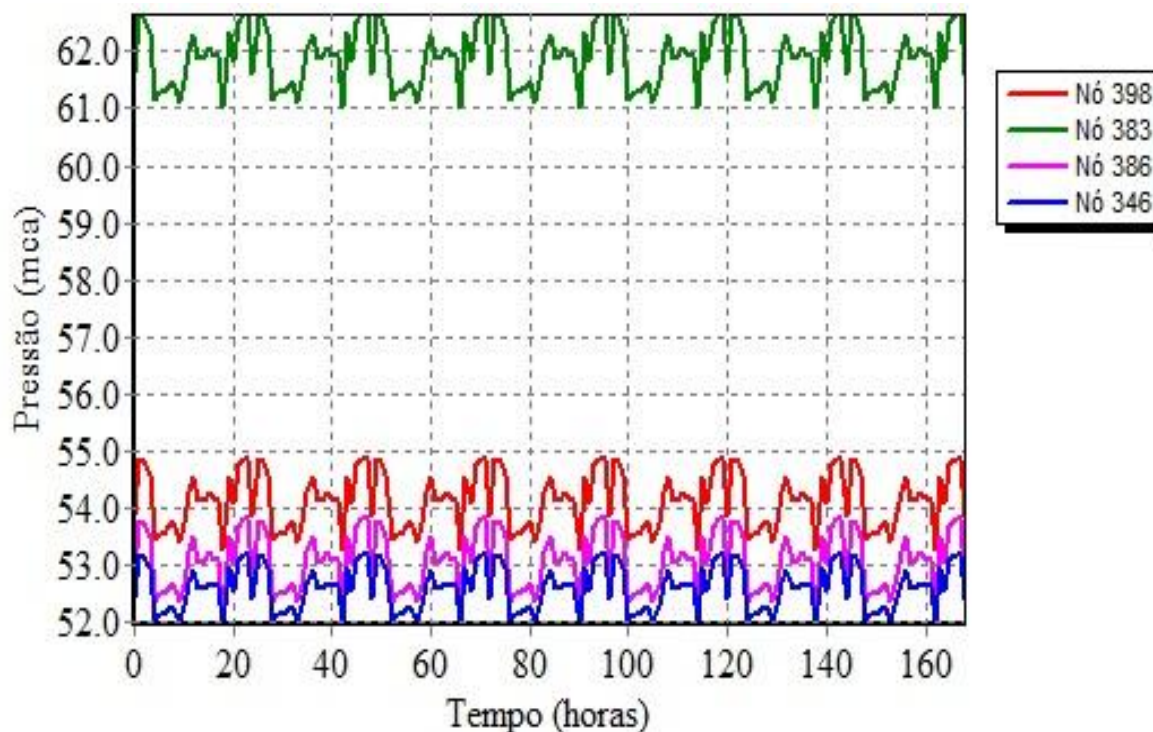
**Figura 21** - Simulação do comportamento para pressão na rede no cenário atual



Fonte: Autor (2019)

O bairro Centro foi o único que apresentou pontos com valores fora do intervalo exigido, totalizando 29% do bairro com pressão acima de 50 mca (Figura 22). Fato relacionado à topografia irregular, com pontos com elevações bem diferentes, não possuindo válvulas para controle das pressões.

**Figura 22** - Pressão nos nós (bairro Centro)



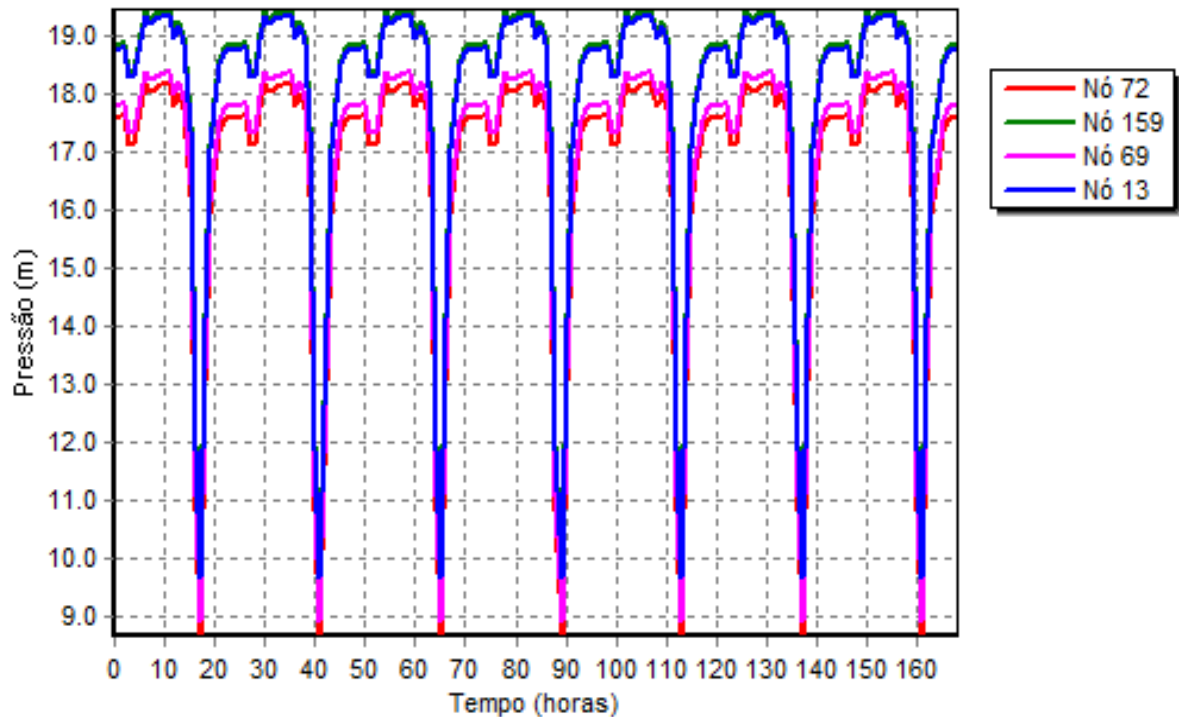
**Fonte:** Autor (2019)

Os pontos 383 e 398, estão localizados nas ruas Afonso Campos e Miguel Couto, que possuem altitudes por volta de 520 m e coincidem com as ruas de maior número de reparos. Os referidos pontos apresentam, durante todo o dia, pressões acima do permitido, o que justifica os vazamentos nos ramais, levando o próprio usuário a frequentemente adotar medidas como a instalação de válvulas redutoras de pressão para minimizar os custos com os danos causados pela elevada pressão nos ramais.

No bairro São José, no final da tarde, no período de 16 a 17 horas, observa-se uma queda das pressões com valores abaixo de 10 mca, conforme ilustrado na Figura 23. Isto decorre do regime de operação do reservatório R-02, que funciona em regime de batelada, o que implica em um fornecimento hídrico descontínuo do sistema. Logo, em caso de falha, a

descontinuidade de alimentação da rede contribui para uma maior dificuldade de reestabelecimento do fornecimento de água e, conseqüentemente, da pressão, haja vista que a variação de volume na tubulação implica diretamente na alteração das pressões.

**Figura 23** - Pressão nos nós (bairro São José)

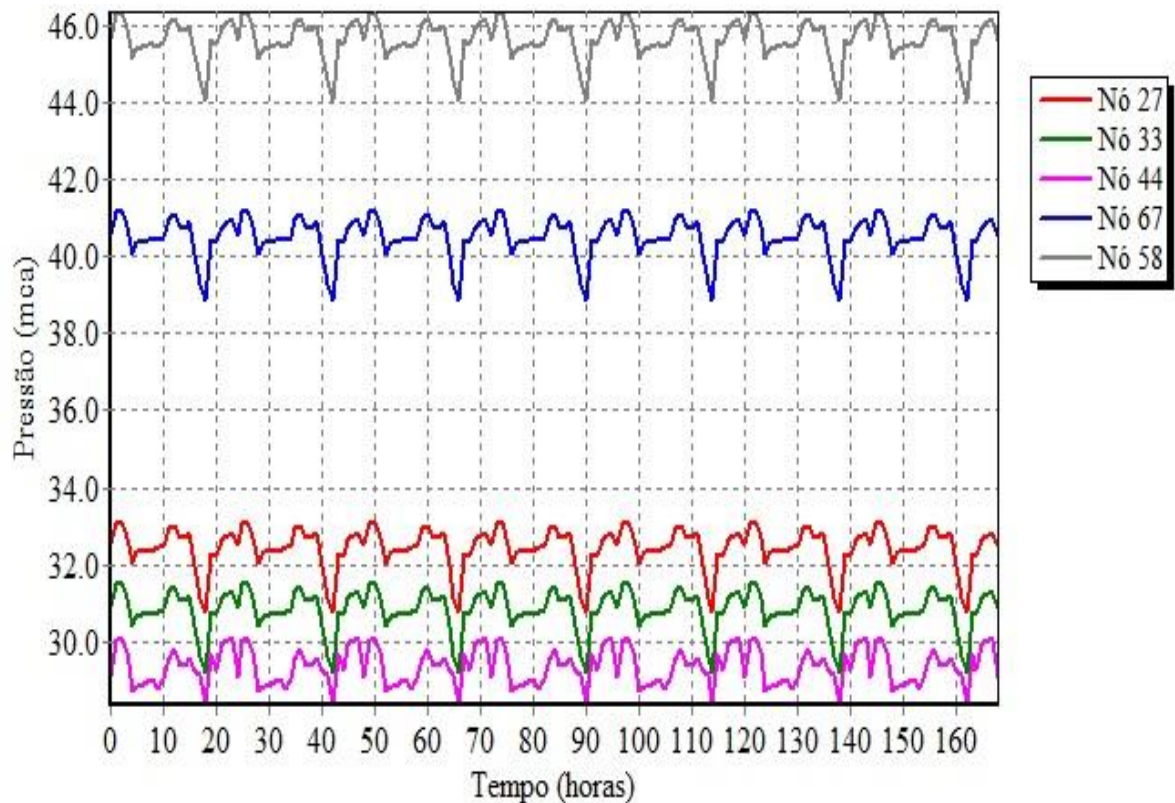


**Fonte:** Autor (2019)

Esta situação encontrada no bairro São José, poderia ser diferente caso ele não fosse servido por um trecho confinado de rede, o que favorece a estagnação e o consumo de água nos longos percursos entre o reservatório e os nós. Caso houvesse interligação com o bairro Prata, por exemplo, a qualidade da água e a operação da rede seriam melhores, pois, os pontos estariam mais próximos dos reservatórios e percorreriam trechos com menor extensão.

No bairro Prata, observa-se conformidade das pressões em todos os pontos, conforme Figura 24, pois se encontra próximo do reservatório R-05, onde a pressão é controlada. O bairro Prata é um modelo de como o SAACG pode funcionar bem, pois os nós se encontram próximos ao reservatório de alimentação e a rede é bem distribuída (tipo malhada), contribuindo para a conformidade dos dados encontrados na simulação.

**Figura 24 - Pressão nos nós (bairro Prata)**



Fonte: Autor (2019)

### 5.6.2. Cenário atual quanto ao Cloro (C2)

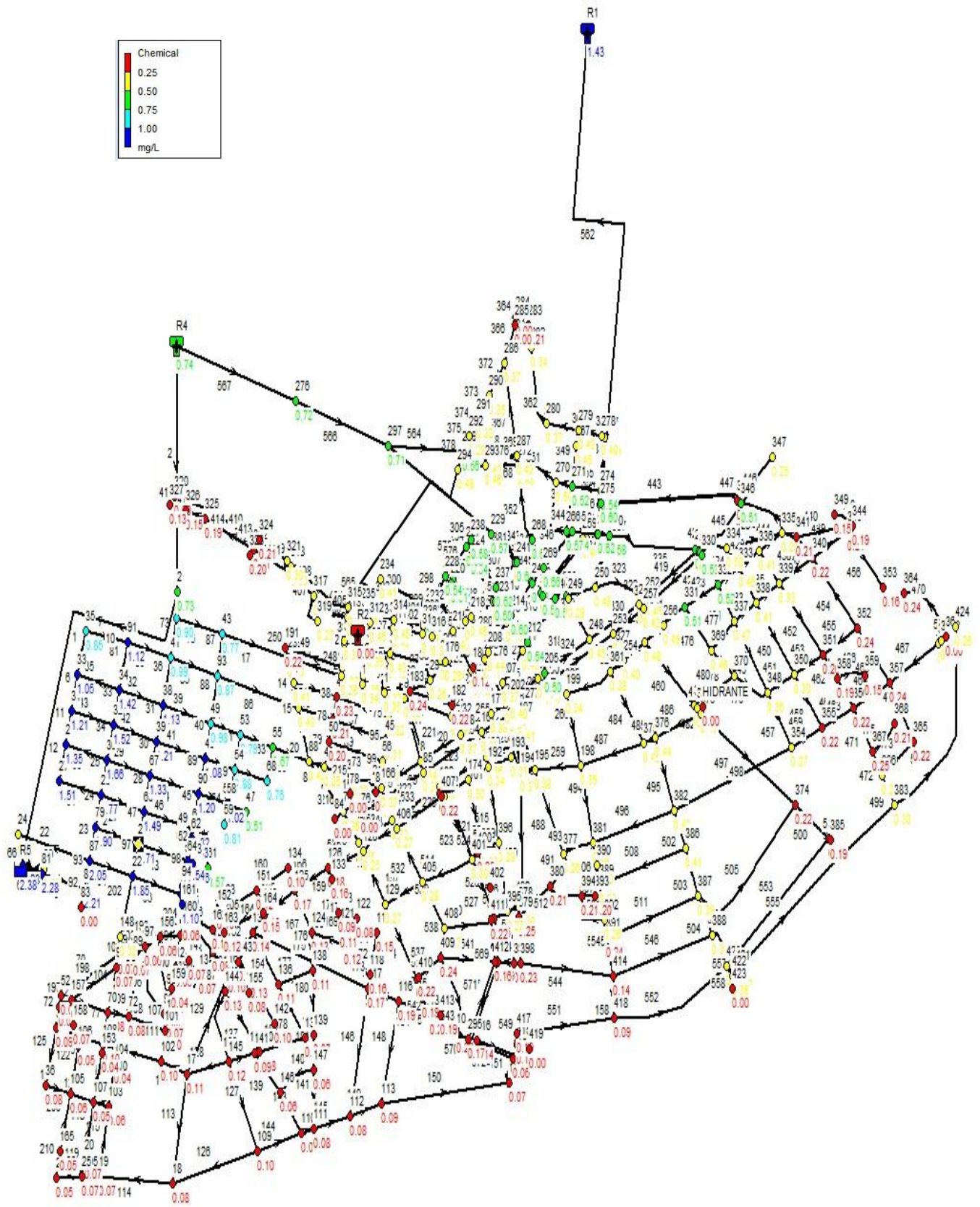
Para a análise do cloro ao longo da rede de distribuição, seguiu-se a faixa de valores recomendados pela Portaria MS nº 5/2017, estabelecendo os valores de 0,2 mgCl<sub>2</sub>/L a 2 mgCl<sub>2</sub>/L como valores mínimo e máximo, respectivamente, obtendo-se a Figura 25.

Para os valores simulados de cloro nos nós, apresentam não conformidade 13% do bairro Prata, 59% do Centro e 95% do bairro São José.

O bairro mais crítico, São José, apresentou baixos índices (Figura 26) devido à operação do reservatório que o abastece, bem como pelo fato da rede distribuição ser confinada, apresentando um traçado desordenado e com constituição de diferentes materiais e idades. Além disto, o reservatório R-02 apresenta uma precária manutenção e não tem rotina de limpeza e reparos, os pontos encontram-se distantes do reservatório de alimentação e a estagnação da água ao longo da rede propicia a redução do CRL.

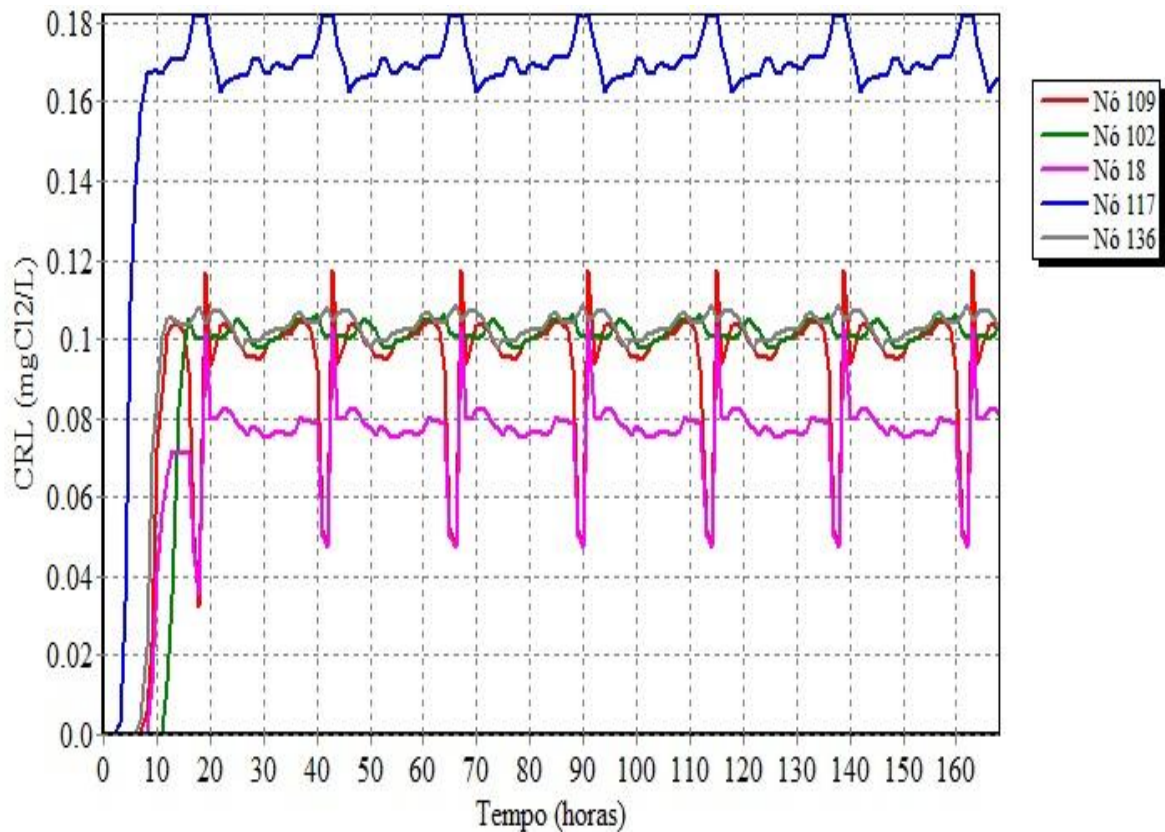


**Figura 25 - Simulação do comportamento do CRL na rede no cenário atual**



Fonte: Autor (2019)

**Figura 26** - Comportamento do CRL dos nós no bairro do São José



**Fonte:** Autor (2019)

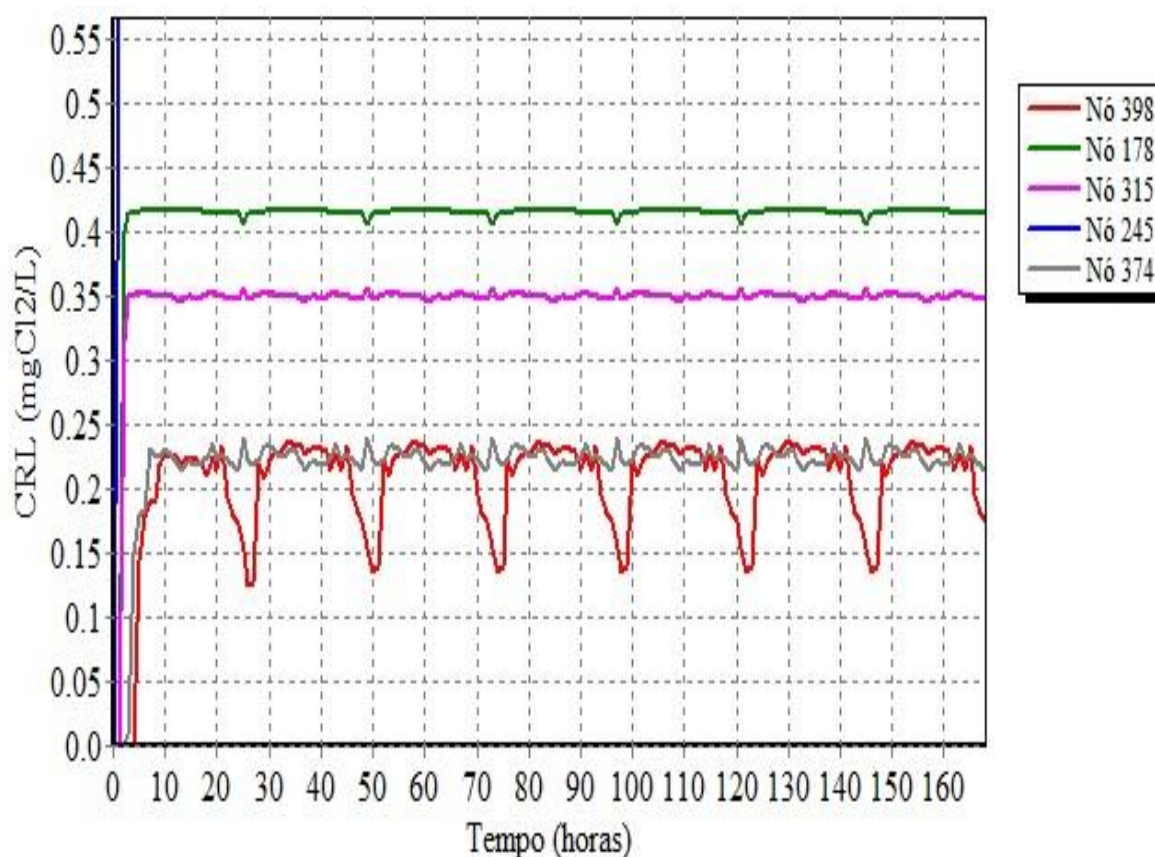
A Figura 26 ilustra o comportamento dos piores pontos simulados, quanto à concentração de cloro, o que representa risco à saúde da população, haja vista que os nós 109 e 18 representam hospitais, que fazem tratamento de câncer e hemodialise, e os nós 117 e 136 representam respectivamente, uma creche e escola municipal de ensino fundamental, conforme já apresentado anteriormente. Portanto, é preocupante a oferta de água de má qualidade impondo risco à saúde da população que, muitas vezes, faz o consumo sem ter conhecimento desses problemas.

A Figura 27 mostra a ocorrência de concentrações diversas de CRL no bairro do Centro, o qual, devido à sua grande extensão, é alimentado por diferentes reservatórios. O maior responsável pela situação encontrada neste bairro é a precária higienização do R-01, pois, grande parte do cloro aplicado à água é consumido no próprio reservatório. Além disso, o regime de funcionamento em batelada, contribui para uma recuperação muito lenta do sistema. A idade da rede e a distância dos reservatórios também contribuem para a degradação



da qualidade da água, uma vez que 71% das canalizações são constituídas por cimento amianto, material que não é mais adotado pelas companhias de água, por serem mais frágeis, susceptíveis a rompimento e infiltração.

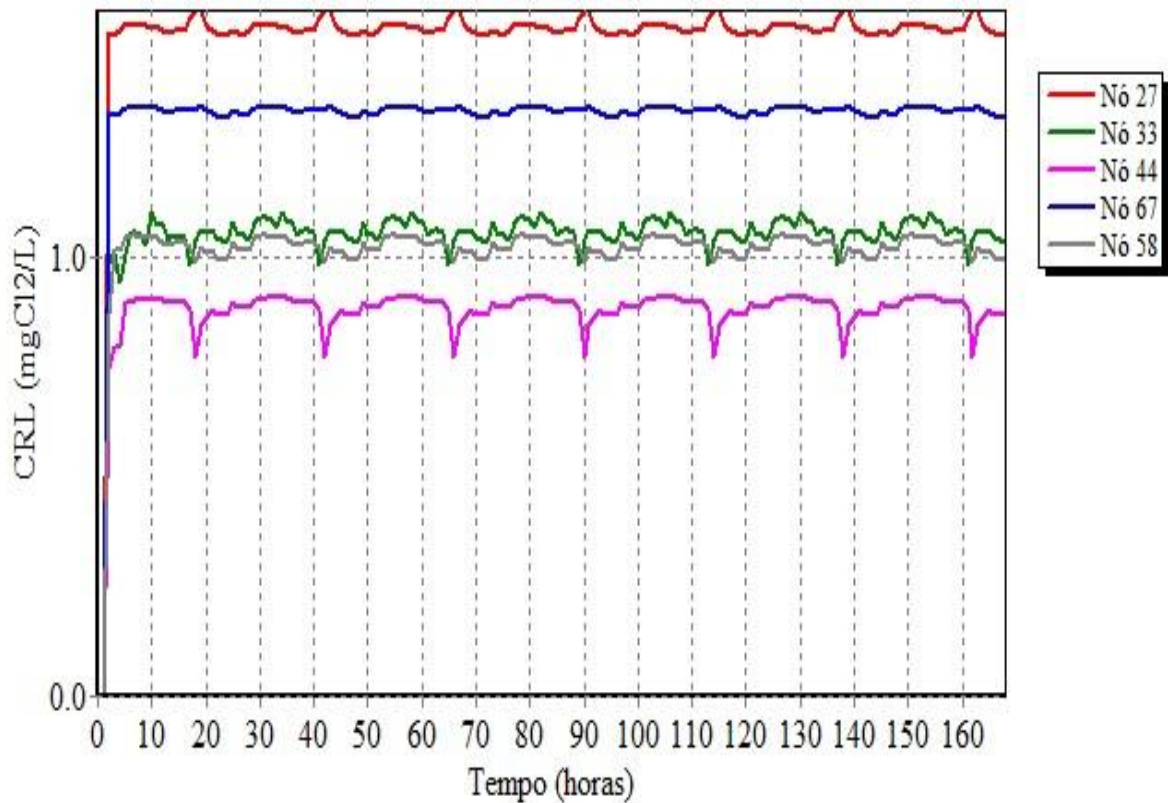
**Figura 27** - Comportamento do CRL nos nós do bairro do Centro



**Fonte:** Autor (2019)

A Figura 28 apresenta o comportamento do cloro no Bairro da Prata, cujos valores de CRL, no geral, atendem ao recomendado pela Portaria de Consolidação nº 5/2017, do Ministério da Saúde, devido principalmente à proximidade do reservatório que o alimenta, R-05. No entanto, alguns pontos apresentaram valores de cloro abaixo do permitido apenas entre os horários de meia noite e uma hora da manhã, turno com pouca utilização de água, favorecendo sua estagnação e, conseqüentemente, um consumo maior do CRL na rede.

**Figura 28** - Comportamento do CRL nos nós do bairro Prata



Fonte: Autor (2019)

### 5.6.3. Cenário pós reabilitação (C3)

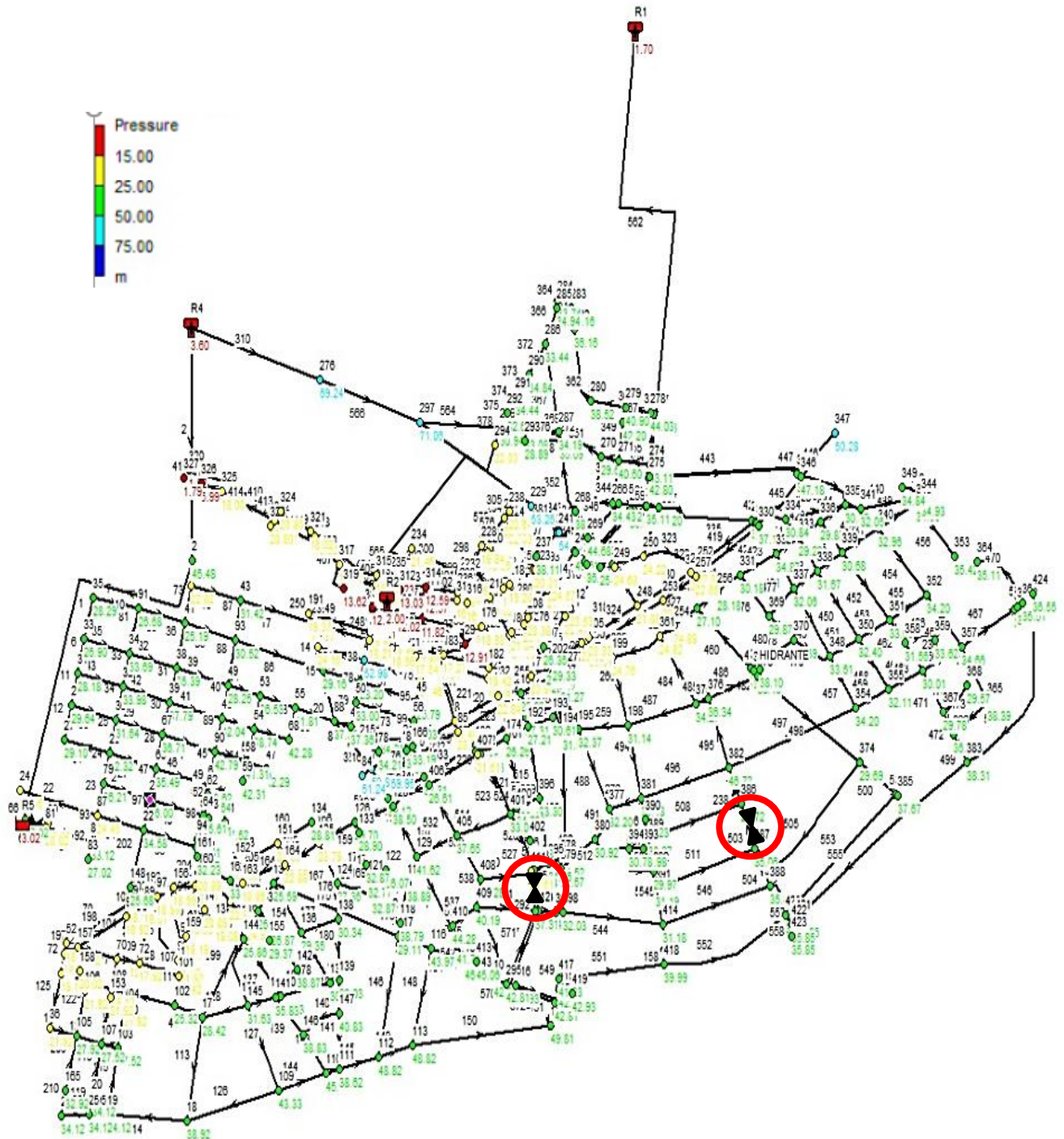
O cenário C3, trata de uma proposta de melhoria para o cenário C1, o qual se mostrou insatisfatório com relação aos valores de pressão nos bairros Centro e São José, mesmo que o sistema tenha funcionado ininterruptamente, durante todo o período de simulação. O cenário C3 prevê a introdução de válvulas redutoras de pressão (VRP), nos trechos 502 e 529, localizados nas ruas Deputado Álvaro Gaudêncio e Otacílio de Albuquerque, respectivamente (Figura 29).

Após essas alterações, a porcentagem de falha do bairro Centro, que era de 29%, passou para 5%, coincidindo com as pontas de rede que, conforme Vieira (2013), isto acontece, pois, o modelo utilizado pelo software não é tão confiável para as extremidades da rede. Ainda segundo o autor, a instalação das VRP trazem, além da redução das pressões nos nós, inúmeros benefícios tais como a redução do volume de água perdido através das perdas, redução da ocorrência de rompimentos ocasionado pelas altas pressões, diminuição da

possibilidade de fadiga dos condutos, inclusive nas redes domésticas de abastecimento, e contribui também para um abastecimento constante à população.

A Figura 30 ilustra o comportamento das pressões nos nós, dentro do exigido pela Norma, tendo sido observada redução de cerca de 30% em seus valores, com relação às pressões atuais.

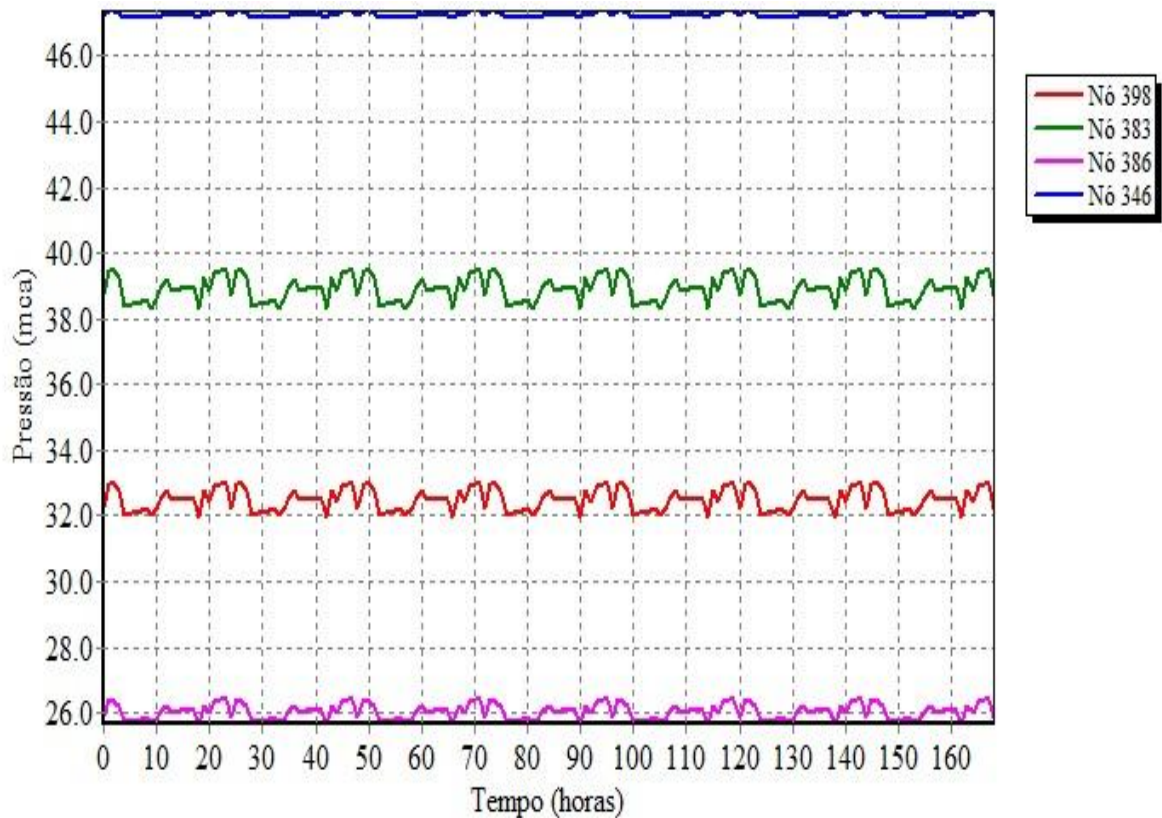
**Figura 29** - Simulação do comportamento da pressão na rede reabilitada



Fonte: Autor (2019)



**Figura 30** - Comportamento das pressões nos nós do bairro do Centro após reabilitação (C3)



Fonte: Autor (2019)

#### 5.6.4. Cenário pós reabilitação (C4)

O cenário C4 refere-se às concentrações de cloro residual livre abaixo do exigido nos bairros São José e Centro e contempla a higienização periódica dos reservatórios e recloração nos reservatórios R-01, R-02 e R-04, adicionando 2 mgCl<sub>2</sub>/L para a higienização interna e mais 2 mgCl<sub>2</sub>/L para a saída da água para a rede. A Figura 31 ilustra os efeitos dessas medidas sobre a distribuição das concentrações de cloro residual livre sendo verificado que a Prata apresentou ampla conformidade com o padrão de potabilidade.

No entanto, os bairros Centro e São José ainda se encontram com 24 e 77%, respectivamente, da rede em não conformidade, necessitando da adição de outras medidas para sua solução, pois, a limpeza confere uma melhoria momentânea e apenas nos nós mais próximos aos reservatórios.

Apesar das características da água terem melhorado, a limpeza representa uma segurança para o sistema, já que se não houvesse, o risco da formação de subprodutos, como trihalometanos, seria elevado, conforme analisado por Nascimento (2016). Quanto a recloração dos reservatórios, esta alternativa não contribuiu para a melhoria dos nós mais extremos da rede, pois a rede no bairro São José é estagnada e em ambos os bairros o regime de operação dos reservatórios que os alimentam funciona em batelada. Para tanto, seria necessário adicionar uma quantidade de cloro bem maior, o que é menos viável economicamente e poderia chegar a uma concentração de cloro muito alta para os usuários mais próximos dos reservatórios.

#### **5.6.5. Cenário para reabilitação a curto e longo prazos (C5)**

Para uma melhoria do sistema, foi decidido que associado às instalações das válvulas redutoras de pressão, deve-se fazer a substituição das tubulações antigas por tubulações novas em PVC e, conseqüentemente, melhorar o coeficiente de reação nas paredes ( $k_w$ ), já que se tratam de tubulações novas nas quais há uma redução da ação das paredes na degradação do CRL.

A troca foi realizada de duas maneiras, uma para atender uma demanda em curto prazo, 2 anos, (C5-1), substituindo 30% da rede para obter de forma imediata redução no número de reparos e outra em longo prazo, 6 anos, (C5-2), visando a troca de todas as tubulações e representando a situação ideal de funcionamento da rede de distribuição de água estudada.

Em curto prazo, foram selecionadas as tubulações das ruas com maiores índices de perdas. No bairro Centro as tubulações alteradas correspondem às ruas Pres. João Pessoa, Afonso Campos, Quebra Quilos, Des. Trindade, Manoel Pereira de Araújo, Miguel Couto, Pedro Alvares Cabral, Maj. Manoel Jovino do O, João da Mata, Cel. João Lourenço Porto, Rui Barbosa, João da Silva Pimentel, João Suassuna, Dr. João Moura e Pres. Eptácio Pessoa, além da Av. Pres. Getúlio Vargas. Para o bairro Prata, as novas tubulações foram inseridas nas ruas Nilo Peçanha e Dom Pedro II. Por fim, no bairro São José as alterações se concentraram nas ruas Prof. Capiba e Teixeira de Freitas.

No entanto, para o cenário inicial, conforme a Figura 32, como apenas duas ruas estavam na primeira programação para cada um dos bairros Prata e São José, não foi possível ver quanto a ação de substituição das tubulações impactaria na qualidade da água, tanto que

67% da rede (com relação à recloração e limpeza dos reservatórios) ainda se encontram com valores de CRL abaixo do padrão de potabilidade. No total, o cenário C5-1 conseguiu, apenas, uma melhoria de 10% quando comparado com o cenário anterior C4.

Em longo prazo, todas os trechos tiverem suas rugosidades atualizadas para 150, em consequência da troca de todas as tubulações antigas por novas em PVC. Na Figura 33, pode-se observar uma melhoria significativa na rede de distribuição de água em todos os bairros, representando a situação ideal de reabilitação para a rede de distribuição de água de Campina Grande-PB. Observe-se que neste cenário também foram introduzidas as válvulas redutoras de pressão, conforme o cenário C3. Então além da melhoria na qualidade da água, houve também progresso no aspecto de operação do sistema associado ao aumento da vida útil da rede e à diminuição na quantidade de reparos.

Em síntese, pôde-se observar, a partir da análise dos nós em conformidade e não conformidade, que a situação atual da rede e as melhorias dos cenários estudados, se encontram com falhas conforme apresentadas nos Quadro 5 e Quadro 6.

**Quadro 5** - Porcentagem dos nós com falhas quanto à pressão

<b>PRESSÃO (CENÁRIO C1)</b>				<b>PRESSÃO</b>
<b>BAIRRO</b>	<b>TOTAL DE NÓS</b>	<b>CONFORMIDADE</b>	<b>NÃO CONFORIMDADE</b>	<b>% Falha</b>
<b>Centro</b>	259	185	74	29%
<b>Prata</b>	61	60	1	2%
<b>São José</b>	87	87	0	0%
<b>PRESSÃO (CENÁRIOS C3 E C5)</b>				<b>PRESSÃO</b>
<b>BAIRRO</b>	<b>TOTAL DE NÓS</b>	<b>CONFORMIDADE</b>	<b>NÃO CONFORIMDADE</b>	<b>% Falha</b>
<b>Centro</b>	259	246	13	5%
<b>Prata</b>	61	60	1	2%
<b>São José</b>	87	87	0	0%

Fonte: Autor (2019)

Para a pressão, a introdução de apenas duas válvulas redutoras de pressão se mostrou satisfatória. Entretanto, para o parâmetro CRL, o melhor cenário encontrado foi o C5-2

(substituição de 100 % das tubulações antigas por novas em PVC) com melhoria de 55% para o bairro Centro, 11% para o bairro Prata e 95% para o bairro São José. Portanto, como este último cenário consiste na introdução das VRP aliada a renovação das tubulações, trata-se do cenário ideal de reabilitação para o SAACG.

**Quadro 6 - Porcentagem dos nós com falhas quanto ao CRL**

<b>CLORO (CENÁRIO C2)</b>				<b>CLORO</b>
<b>BAIRRO</b>	<b>TOTAL DE NÓS</b>	<b>CONFORMIDADE</b>	<b>NÃO CONFORIMDADE</b>	<b>% Falha</b>
<b>Centro</b>	259	105	154	59%
<b>Prata</b>	61	53	8	13%
<b>São José</b>	87	4	83	95%
<b>CLORO (CENÁRIO C4)</b>				<b>CLORO</b>
<b>BAIRRO</b>	<b>TOTAL DE NÓS</b>	<b>CONFORMIDADE</b>	<b>NÃO CONFORIMDADE</b>	<b>% Falha</b>
<b>Centro</b>	259	196	63	24%
<b>Prata</b>	61	58	3	5%
<b>São José</b>	87	20	67	77%
<b>CLORO (CENÁRIO C5-1)</b>				<b>CLORO</b>
<b>BAIRRO</b>	<b>TOTAL DE NÓS</b>	<b>CONFORMIDADE</b>	<b>NÃO CONFORIMDADE</b>	<b>% Falha</b>
<b>Centro</b>	259	248	11	4%
<b>Prata</b>	61	60	1	2%
<b>São José</b>	87	29	58	67%
<b>CLORO (CENÁRIO C5-2)</b>				<b>CLORO</b>
<b>BAIRRO</b>	<b>TOTAL DE NÓS</b>	<b>CONFORMIDADE</b>	<b>NÃO CONFORIMDADE</b>	<b>% Falha</b>
<b>Centro</b>	259	248	11	4%
<b>Prata</b>	61	60	1	2%
<b>São José</b>	87	87	0	0%

Fonte: Autor (2019)

## 5.7 Modelo conceitual

A simulação se mostrou uma importante ferramenta no auxílio à gestão de redes de abastecimento de água, pois, a partir dela pode-se visualizar a rede real e simular melhorias para a resolução dos problemas. No entanto, para melhor aproveitamento dessa ferramenta surge a necessidade da utilização de modelos conceituais como instrumentos de apoio às decisões, a exemplo do ilustrado na Figura 34.

Com o apoio do órgão gestor para a coleta das informações necessárias, como a planta da rede de distribuição de água e relatórios de operação do sistema, é possível inserir os dados exigidos pelo EPANET 2.0 para a execução da simulação.

Após a simulação é possível analisar os fatores que mais interferem no desempenho do sistema. Neste trabalho, o estudo de cloro residual livre e pressão foi essencial para a análise da qualidade da água e da operação do sistema, de forma a garantir que as questões ambientais sejam cumpridas e que toda a população possa receber água em quantidade suficiente, mas também que não haja risco de prejuízos à saúde dos usuários.

Para verificação dos dados faz-se necessária a medição *in loco* dos valores relacionados aos indicadores escolhidos. Para tanto, é necessária a seleção de pontos que mais representem a rede de distribuição, haja vista que seria inviável a medição em todos os pontos de uma malha tão grande como a dos três bairros estudados.

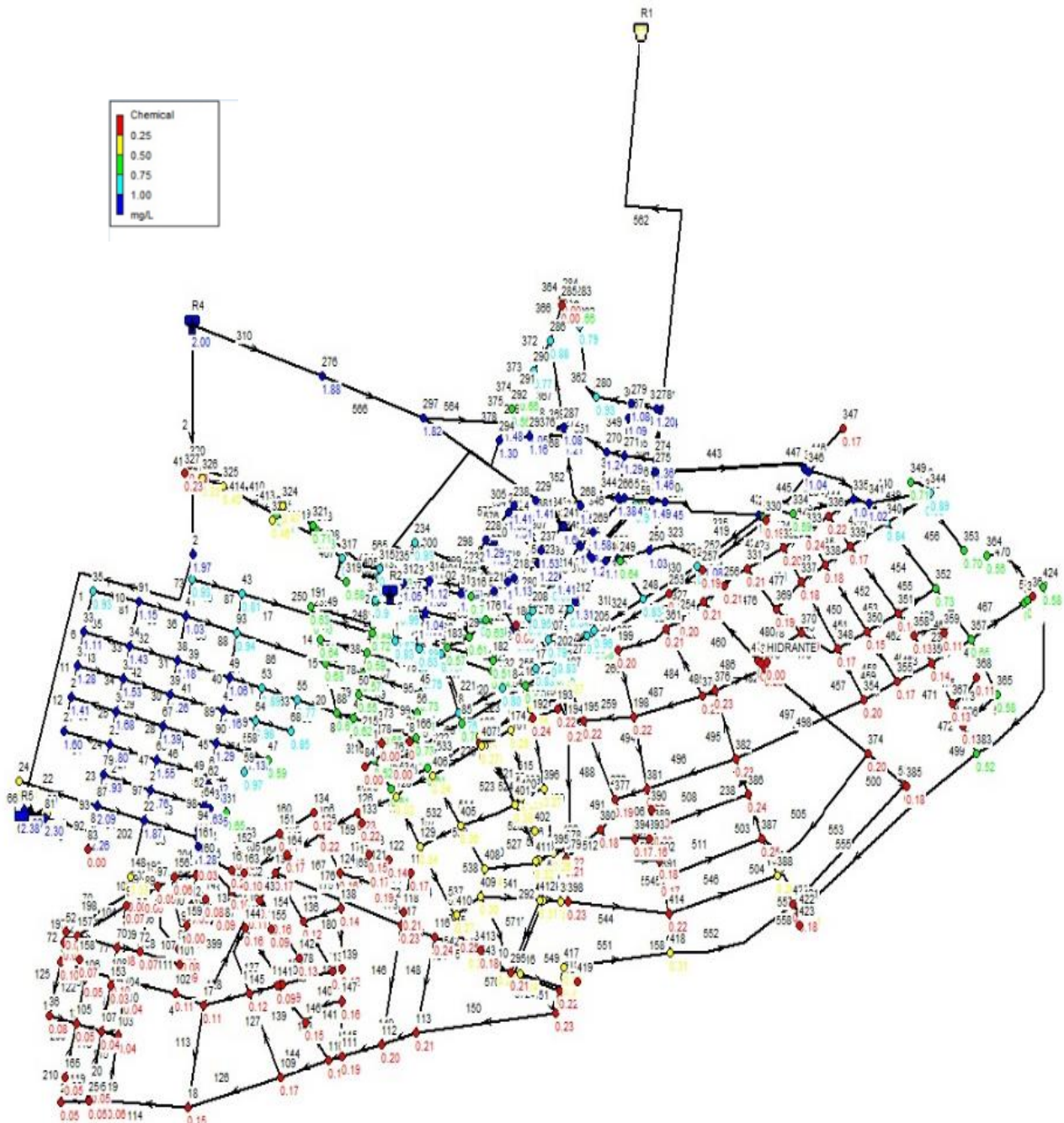
Logo, com a extração dos dados horários, obtidos pelo software, ao longo de sete dias de simulação tem-se o panorama da atual situação da rede e é possível sugerir alterações de melhoria, bem como verificar eletronicamente se elas podem ser executadas. Em caso negativo, aconselha-se a retomada de algumas etapas para que as mudanças sugeridas permitam que a população tenha acesso à água em qualidade e quantidade suficientes. Portanto, de acordo com a realidade de cada rede de abastecimento de água, vários são os cenários que podem ser estudados e desenvolvidos pelos gestores, sempre com vistas ao aperfeiçoamento do serviço de abastecimento de água.

Diante do exposto, observa-se que a interação das ferramentas de simulação com as medidas de operação e manutenção se mostrou importante no apoio a gestão dos sistemas de abastecimento de água, pois apenas os ensaios laboratoriais executados ao longo da rede não são suficientes para a gestão eficiente das diversas etapas do sistema. O modelo conceitual proposto busca orientar tomadas de decisão com base em ações de operação e manutenção planejadas, que juntas, conseguem atingir melhor qualidade da água e um menor custo.



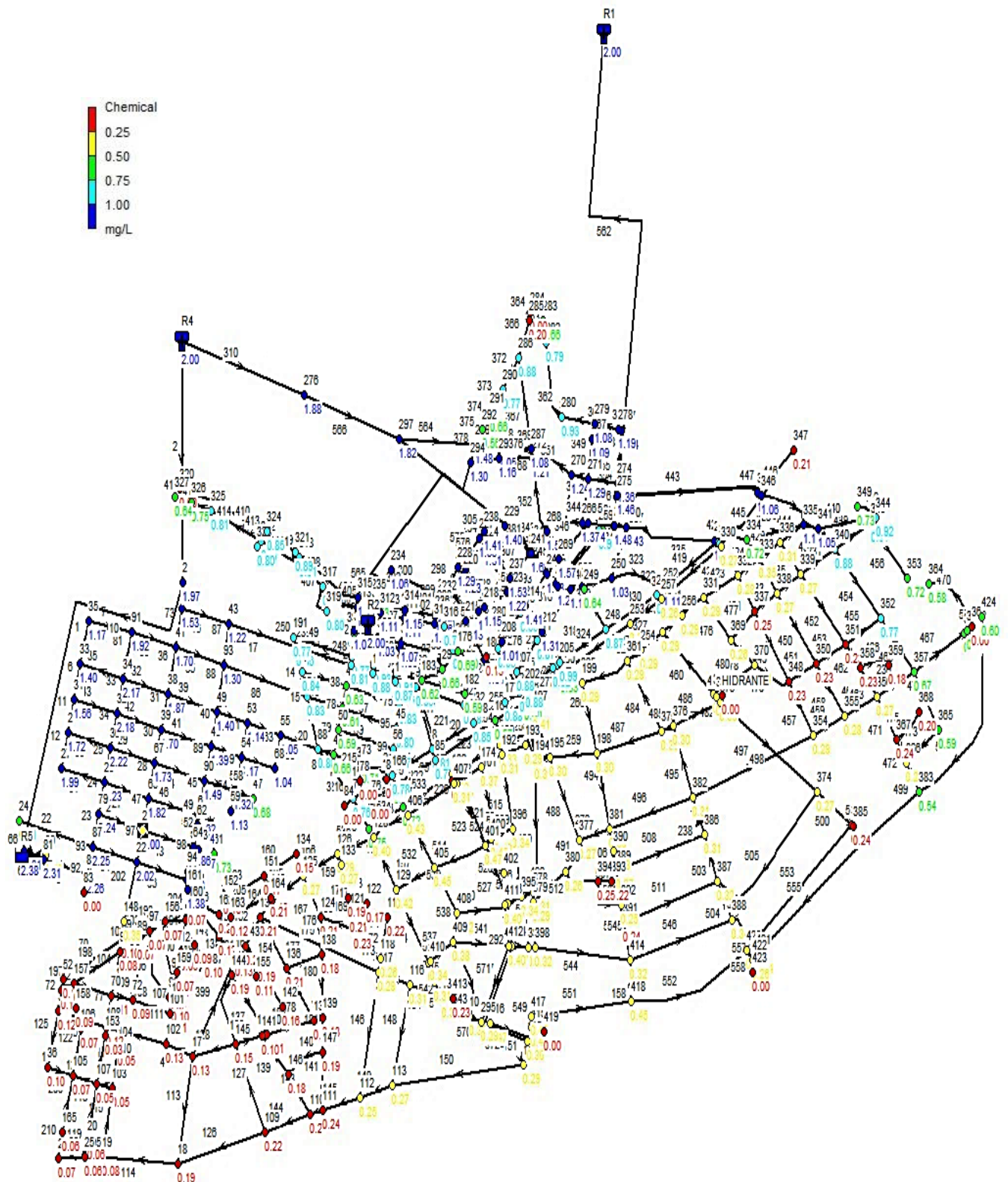
Portanto, a partir dos resultados encontrados, o modelo concebido se torna uma ferramenta de grande importância para o planejamento de reabilitação de redes, seja a curto, médio ou longo prazo, além de se tratar de uma ferramenta barata, de fácil manuseio e possibilidade de implementação e, segundo Nascimento (2016), de cunho técnico consistente, levando à tomada de decisão mais razoável e com menor subjetividade.

**Figura 31 - Simulação do comportamento do CRL na rede reabilitada (Cenário C4)**



Fonte: Autor (2019)

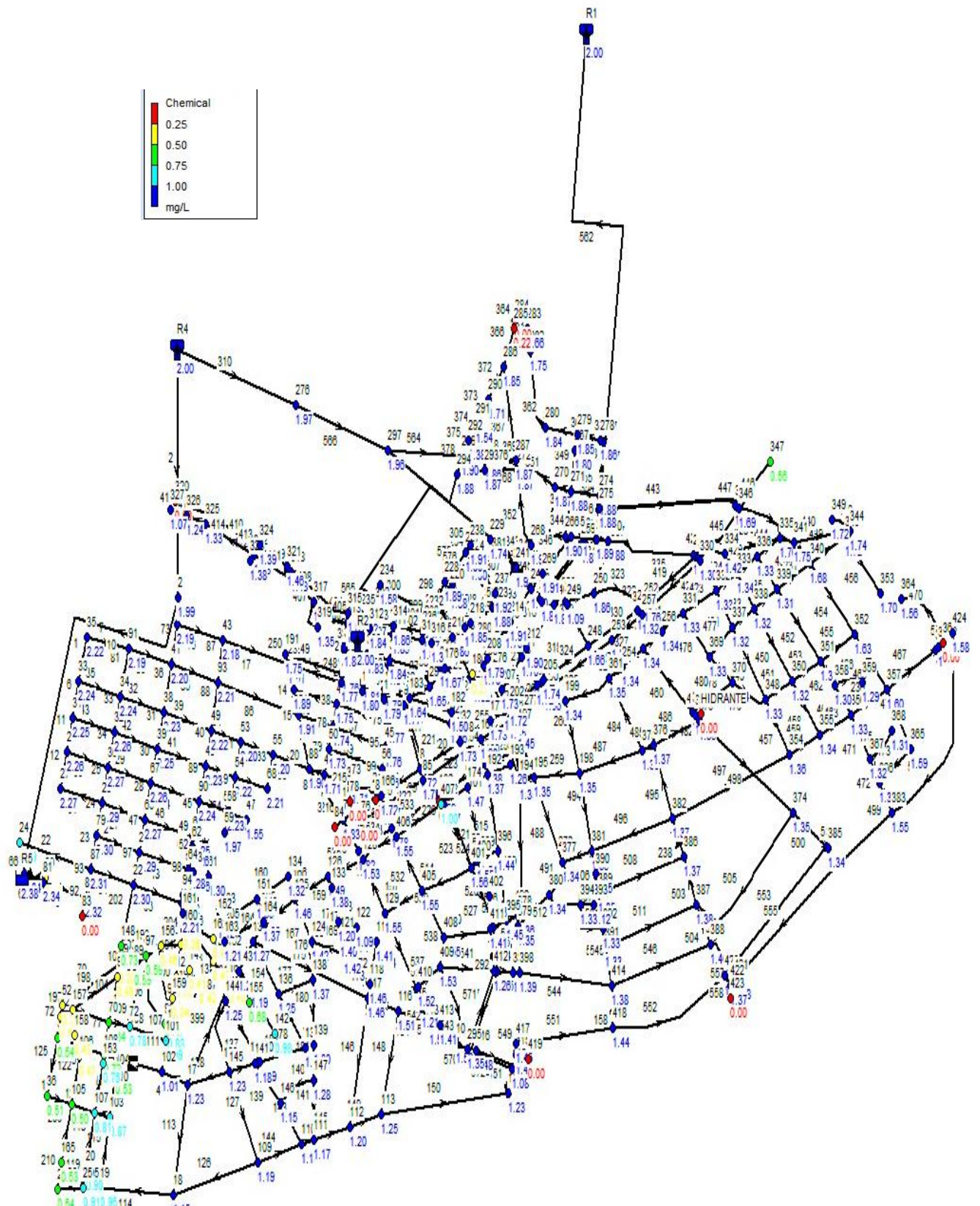
**Figura 32 - Simulação do comportamento do CRL na rede com reabilitação de 30% das ruas (C5-1)**



Fonte: Autor (2019)

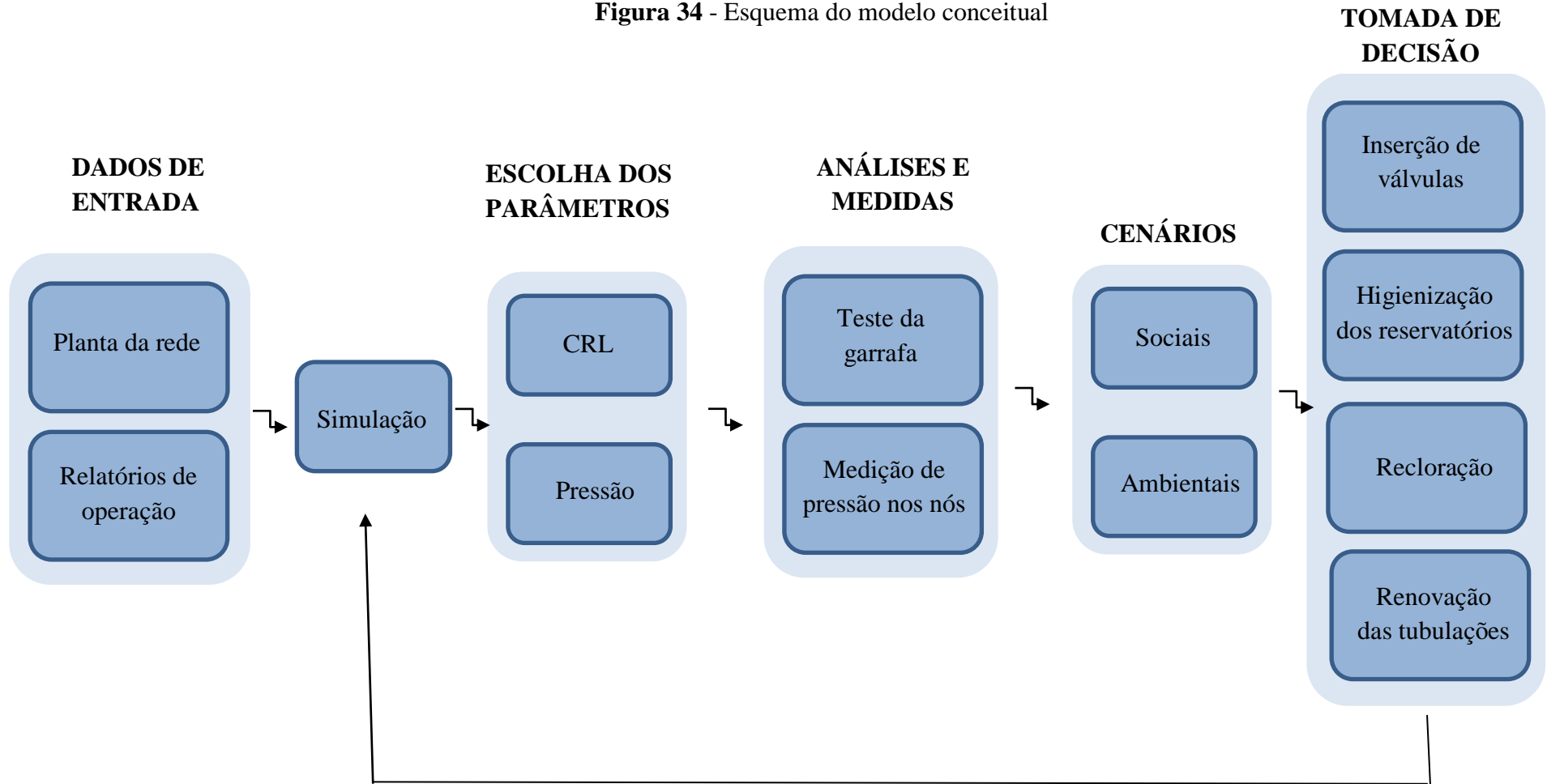


**Figura 33** - Simulação do comportamento do CRL na rede com reabilitação em longo prazo (C5-2)



Fonte: Autor (2019)

Figura 34 - Esquema do modelo conceitual



## 6. CONCLUSÕES

Pela observação dos aspectos analisados, conclui-se que:

- O tipo de reparo mais frequente nos três bairros estudados foi o vazamento no ramal predial, seguido de vazamento na rede de distribuição de água. Isto provavelmente ocorreu devido à inadequação da manutenção preventiva da infraestrutura e também porque quanto mais perto do consumidor final, mais frágeis ficam as tubulações e conexões.
- Foi observado que o Centro da cidade, com a sua maior população, representa maior consumo de água e, portanto, apresenta o maior número de reparos.
- Na análise dos cenários C1 e C2, foi verificado que, no bairro Prata, as concentrações de CRL, bem como os valores de pressão nos pontos selecionados foram satisfatórios com relação ao padrão de potabilidade, considerando que é um bairro bem planejado e o reservatório que o alimenta fica próximo aos nós.
- No bairro São José a quantidade de CRL ao longo de toda a simulação se encontrou fora dos parâmetros exigidos. Provavelmente, isto ocorreu devido ao traçado mais desordenado, aos materiais das tubulações, em sua maioria ferro fundido e cimento amianto, a estagnação da água, por ser a rede confinada, bem como a maior distância do reservatório de alimentação até os pontos, levando a um maior consumo de CRL.
- Quanto ao bairro Centro, devido à sua maior extensão territorial e à singularidade de funcionamento dos reservatórios de alimentação, este, apresentou dentre os bairros estudados, maior número de pontos com pressão acima de 50mca e dificuldade de reestabelecimento do sistema podendo sofrer algumas interrupções ao longo dos dias.
- São muitos os métodos de reabilitação, no entanto, as propostas oferecidas foram escolhidas visando sua viabilidade de implementação pela concessionária.
- Os cenários C3 e C4 sugerem alternativas de melhorias na qualidade e operação do sistema de abastecimento de água, visando, através das alterações, oferecer um serviço de melhor qualidade através do SAACG. Foi verificado que a reabilitação sugerida no cenário C3, com a introdução de duas válvulas, foi satisfatória para toda a rede. Entretanto, quanto ao cenário C4, apenas a limpeza dos reservatórios e recloração da água foram insuficientes para a solução dos problemas de todos os nós do bairro São José.
- O cenário C5 representa a situação ideal do sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande-PB. Nele, foram realizadas as trocas das tubulações antigas por novas em PVC, em princípio em 30% da rede (cenário C5-1) e posteriormente em 100% dela

(cenário C5-2). Este último se mostrou o mais eficiente dentre os cenários simulados apresentando melhoria na qualidade de água de 67% quando comparado aos cenários anteriores.

- O uso de modelos conceituais para simulação da qualidade da água e operação do sistema de distribuição pode contribuir significativamente para a melhoria da qualidade do serviço de abastecimento de água, por apoiar as atividades de planejamento, operação e manutenção do sistema. Logo, concluiu-se que essas ferramentas são importantes auxiliadoras para uma boa gestão do processo.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

A partir da pesquisa realizada, percebe-se a importância da modelagem dos aspectos de operação e qualidade da água através da simulação utilizando o EPANET 2.0.

Para estudos futuros recomenda-se fazer a verificação das pressões nos nós, para calibração da simulação, e realização do estudo da viabilidade econômica, para auxiliar na escolha do cenário de maior custo-benefício.

## 8. REFERÊNCIAS

- ALEM SOBRINHO, P.; MARTINS, G. (2004). Abastecimento de Água. In: TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. 643p.
- ANDREOU, S.; MARKS, D.H.; CLARK, R.M. (1987a). **A new methodology for modeling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: theory**. Advances in Water Resources, v. 10, n. 1, p. 2-10, mar. 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1994.
- ATLAS nacional do Brasil. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- CHAMA NETO, P.J. (2004). Materiais para redes. In: TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. 643p.
- CHEUNG, PETER B. – **Computational tools for water quality modeling in hydraulic networks – calibration model**. Hydraulic and Civil Engineering Research Unit, Cemagref Bordeaux. France, 2006.
- 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.
- COÊLHO, A. C. **Manual de Economia de Água (Conservação de Água)**. Comuigraf, Recife, 2001.
- CUNHA, A. P.; LEMES, C. de S.; PINTO, W. T.; SOARES, A. K. **Modelagem hidráulica de rede de abastecimento de água de pequeno porte**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília -DF, 2015.
- EVINS, C.; STEPHENSON, G.; WAREEN, I.C.; WILLIAMS, S. M. **Planning the rehabilitation of water distribution systems**. Eater Research Center, p. 3-7, 17, 19, 153, 154, Marlow – England, 1989.



FADEL, A; MARQUES, G. Sistema de alocação de água baseado no custo da escassez: uma realidade necessária de ser incorporada por usuários urbanos. XXII SBRH, Florianópolis – SC, 2017.

GARCIA, E. S. H.; SANTOS, G.; GHISLENI, G.; OTTONELLI, R.; DARONCO, G. C. **Sistema de abastecimento de água estudo de caso: Redentora – RS.** In: XXI Seminário de Iniciação Científica de Unijuí, Ijuí – RS, 2013.

HOLANDA, E. **Apostila de Construções Rurais – Informações Técnicas.** Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Acre – UFAC, 2011.

HOOGSTEEEN, K. J. **Basic Distribution System Maintenance.** AWWA (American Water Works Association), Annual Conference and Exposition; Chicago, 1993.

HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. **Detecting Leaks in Plastic Pipes.** Journal of the American Water World Association, 92(2), 82-94, 2000.

LAMBERT, A.; HIRNER, W. International Water Data Comparisons Ltd. Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. IWA (International Water Association), **The blue pages - The IWA information source on drinking water issues**, 2000.

LUCENA, D. P. M, Simulações da implantação de ações de gestão no açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande-PB e região. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. DE. S.; SOUSA, F. de. A. S. Monitoramento e intensidade das secas e chuvas na cidade de Campina Grande/PB. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 7 – Vol. 8, 2011.

MENESES, R. A. Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2011.

MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. de. **Avaliação multicritério para adequação de sistemas de redução de perdas de água.** In: XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba – PR, 2002.

MORAIS, D.C; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. **Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água.** Pesquisa Operacional, v.30, n.1, p.15-32, 2010.

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

NOTTER, R.H.; SLEICHER, C.A. 1971. **The eddy diffusivity in the turbulent boundary layer near a wall**, Chem.Eng. Sci., Vol. 26, p. 161-171.

OLIVEIRA, Marlian Leão de. Desenvolvimento de método para avaliação de desempenho de sistemas de abastecimento de água: aplicação ao caso da RIDE DF e Entorno. 2016. xiii, 242 f., il. **Dissertação** (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

ORELLANA, A. Contribuição ao estudo do planejamento de reabilitação de redes de distribuição de água. **Dissertação** (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2011.

PORTO, R. D. **Hidráulica Básica.** EESC-USP, São Carlos-SP, 2006.

POWELL, J. C.; WEST, J. R.; HALLAM, N.B., FORSTER. C. F., SIMMS, J.. **Performance of various kinetics models for chlorine decay.** Journal of water resources planning and management. Vol. 126 (1):13-20, 2000

RIBEIRO, L. C. L. J.; ANDRADE, J. G. P de; ZAMBON, A. G. Gestão de sistema de abastecimento de água através de ações para redução de perdas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais.** V.8, n.2, 2017.

RICCALDONE, D. Comparação de dimensionamento de redes de distribuição de água por modelos computacionais. **Monografia** – Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

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

SANTOS, W. B dos. Modelagem da degradação de cloro residual livre na rede de distribuição de água da cidade de Campina Grande-PB. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SARZEDAS, G. L. Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água. Aplicação na rede de distribuição de água da Região Metropolitana de São Paulo. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade de São Paulo, 2009.

SELVAKUMAR, A. CLARK, R. M.; SIVAGANESAN, M. Costs for water supply distribution system rehabilitation. **Journal of water resources planning and management**, p. 303, 2002.

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

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SINIS. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos**. Site institucional, 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>.

SOARES, A. K.; REIS, L. F. R. Calibração de modelos de redes de distribuição de água utilizando modelo de simulação hidráulica dirigido pela pressão (MSHDP) e Método Híbrido AG-Simplex. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 9, n. 2, p. 85-96, 2004.

SOUSA, J R de; MORAES, M. E. B. de; SONODA, S. L.; SANTOS, H. C. R. G. A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. **Revista eletrônica do Prodema**, v.8, n.1, p. 26-45, 2014.

TRIMBOLI, M. J. Aplicação e análise de um modelo de qualidade de água para a determinação da concentração de cloro residual livre em um setor de abastecimento de água. **Dissertação (Mestrado)**. Faculdade de Eng. Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2006.153p.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3ª ed, São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

VENTURINI, M. A.; BARBOSA, P. F. **Subsídios à escolha de técnicas de reabilitação de redes de distribuição de água**. Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas-SP, 2002.

VIEGAS, J.V.; PAZ, M.F.; GASTALDINI, M.C.C.; DANIELLE, R.D.; BARROSO, L.B. **Simulação do comportamento hidráulico de redes de abastecimento de água utilizando o**

**modelo EPANET** In: Anais do XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 2002.

VIEIRA P.; COELHO S.T., LOUREIRO D. Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modeling chlorine decay in water supply. **Journal of Water Supply Research and Technology**, v.53, n.7,p.453-467, Nov, 2004.

WEATHER SPARK. Condições meteorológicas médias de Campina Grande. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/31387/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Campina-Grande-Brasil-durante-o-ano/>> Acesso em: 23 de outubro de 2018.