

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL FACULDADE DE  
ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

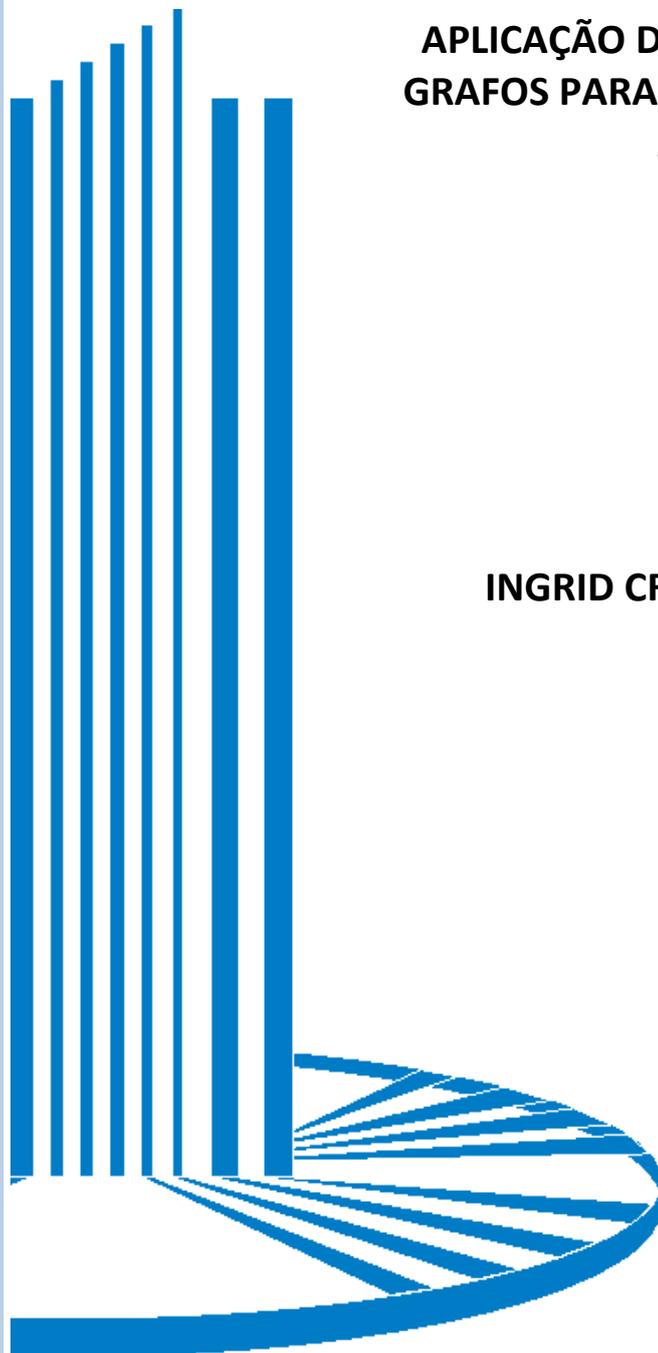
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

## APLICAÇÃO DE ALGORITMO DE TEORIA DOS GRAFOS PARA SETORIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

INGRID CRACO ANDERS DE ALMEIDA

CAMPO GRANDE  
2020

TRABALHO DE CONCLUSÃO FINAL DE CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE





Serviço Público Federal  
Ministério da Educação  
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL**  
**FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

# **APLICAÇÃO DE ALGORITMO DE TEORIA DOS GRAFOS PARA SETORIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO**

**INGRID CRACO ANDERS DE ALMEIDA**

Trabalho de Conclusão Final de Curso do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração de Energias e Sistemas de Produção.

**Orientador: Prof. Dr. Peter B. Cheung**

**CAMPO GRANDE**  
**MAIO / 2020**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Redação final do Trabalho de Conclusão Final de Curso defendida por por **INGRID CRACO ANDERS DE ALMEIDA**, aprovada pela Comissão Julgadora em 08 de maio de 2020, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

---

Prof. Dr. Peter Batista Cheung - Orientador  
FAENG/UFMS

---

Prof. Dra. Andrea Riccio Barbosa - Membro Titular  
FAENG/UFMS

---

Prof. Dr. Fábio Veríssimo Gonçalves - Professor Convidado  
FAENG/UFMS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço meu orientador, Peter Cheung, que me apresentou o e ao mundo do saneamento e me deu oportunidade de me desenvolver profissionalmente e academicamente nesta área.

Agradeço a professora Andrea Riccio que dedicou uma quantidade massiva de horas para me auxiliar na preparação desta dissertação.

Agradeço ao professor Fábio Veríssimo por ter sempre, desde a graduação, se disposto a ser uma mão amiga e suporte dentro da universidade.

Agradeço ao professor Marcelo pelo direcionamento e pelas aulas no início deste projeto.

Agradeço ao Paulo Nemo que me auxiliou em partes importantíssimas desde trabalho, e por ter me propiciado discussões técnicas de altíssimo nível.

Agradeço aos meus pais e a minha família por todo tempo e esforço investido em mim. O sacrifício de vocês me permite hoje alcançar e executar coisas que nunca imaginei possíveis.

A todos que fizeram parte, direta ou indiretamente deste trabalho,

Muito obrigada!

## RESUMO

Diversas soluções para redução de perdas em sistemas de distribuição de água foram e estão sendo desenvolvidas com base nos conceitos de setorização e implementação de Distritos de Monitoramento e Controle (DMC). A setorização de um sistema de distribuição é uma atividade complexa e requer períodos extensos de análise, e as propostas de setorização podem ser subjetivas. Para um estudo conciso de setorização, os métodos mais confiáveis levam em consideração a modelagem hidráulica, mas não necessariamente utilizam padrões de demanda, que representem o real consumo no sistema. Na literatura hoje são abordadas diversas metodologias para parametrizar os estudos de setorização, sendo uma delas a Teoria dos Grafos. Neste trabalho, foi adotada a metodologia Poisson Retangular Pulse (PRP) para análise da demanda nos modelos hidráulicos, e posteriormente, a análise de conectividade entre nós baseada em Teoria dos Grafos para identificar setores possíveis ou existentes em três sistemas de distribuição de água na América Latina. Os resultados mostram que a adoção do PRP é crucial para análise da conectividade entre os nós, e que a Teoria dos Grafos é relevante para simplificar o entendimento da rede, assim como identificar setores possíveis ou existentes, otimizando os estudos de setorização.

Palavras chave: Teoria dos Grafos, sistemas de distribuição de água, PRP, projetos de setorização

## **ABSTRACT**

Several solutions for reducing losses in water distribution systems have been and are being developed based on the concepts of sectorization and implementation of district metered areas (DMA). The sectorization of a distribution system is a complex activity and requires extensive periods of analysis, and proposals for sectorization can be subjective. For a concise sectorization study, the most reliable methods take hydraulic modeling into consideration, but do not necessarily use demand patterns that represent the actual consumption in the system. In the literature today, several methodologies are used to parameterize sectorization studies, one of which is graph theory. In this work, the Poisson Rectangular Pulse (PRP) methodology was adopted to analyze the demand in hydraulic models, and subsequently, the analysis of connectivity between nodes based on graph theory to identify possible or existing sectors in three water distribution systems in Latin America. The results show that the adoption of PRP is crucial for the analysis of connectivity between nodes, and that the methodology is relevant to simplify the understanding of the network, as well as to identify possible or existing sectors, optimizing the sectorization studies.

Key words: Graph Theory, water distribution system, PRP, sectorization projects

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Padrão de consumo - Software EPANET .....	14
Figura 2 - Representação de sistemas de distribuição de água em modelagem hidráulica .....	15
Figura 3 - Nós e consumidores únicos para representação em modelo hidráulico.....	15
Figura 4 - Possíveis áreas de influência dos nós em um modelo hidráulico .....	16
Figura 5 - Configuração típica de DMCs .....	20
Figura 6 - Representação gráfica de um grafo cujos vértices são $V = \{z, y, x, w, v, u, t\}$ e cujas arestas são $E = \{xy, yz, xu, xw, uv, vw\}$ .....	23
Figura 7 - Diferença entre direção de escoamento em um mesmo sistema de abastecimento. a) 09:00 b) 19:00.....	24
Figura 8 - Sistema de Distribuição de Água e Seus Acessórios .....	25
Figura 9 - Diferentes fases de uma partição <i>k-way</i> .....	10
Figura 10 - Componentes fortemente conexos de um grafo.....	11
Figura 11 - Passos para identificação de componentes fortemente conexos em um grafo .....	12
Figura 12 - Esquema da metodologia proposta .....	13
Figura 13 - Modelo Hidráulico (nós e redes) do Sistema 1 .....	15
Figura 14 - Modelo Hidráulico (nós e redes) do Sistema 2.....	15
Figura 15 - Modelo Hidráulico (nós e redes) do Sistema 3.....	16
Figura 16 - Exemplo de padrão de consumo regular.....	17
Figura 17 - Exemplo de padrão de consumo simulado pelo PRP .....	17
Figura 18 - Direção dos grafos para o Sistema 1 sem aplicação do PRP .....	21
Figura 19 - Direção dos grafos para o Sistema 1 com aplicação do PRP.....	21
Figura 20 - Direção dos grafos para o Sistema 2 sem aplicação do PRP .....	22
Figura 21 - Direção dos grafos para o Sistema 2 com aplicação do PRP.....	22
Figura 22 - Direção dos grafos para o Sistema 3 sem aplicação do PRP .....	23
Figura 23 - Direção dos grafos para o Sistema 3 com aplicação do PRP.....	23
Figura 24 - Sistema 1 sem identificação de dispositivos da rede de abastecimento .....	25
Figura 25 - Sistema 1 com identificação de dispositivos da rede de abastecimento .....	25
Figura 26 - Sistema 2 sem identificação de dispositivos da rede de abastecimento .....	26
Figura 27 - Sistema 2 com identificação de dispositivos da rede de abastecimento .....	26
Figura 28 - Sistema 3 sem identificação de dispositivos da rede de abastecimento .....	27
Figura 29 - Sistema 3 com identificação de dispositivos da rede de abastecimento .....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações do modelo PRP em termos qualitativos e quantitativos .....	21
Tabela 2 - Diferentes metodologias para setorização de sistemas de abastecimento utilizando a Teoria dos Grafos .....	10
Tabela 3 - Características dos sistemas de abastecimento estudados .....	13
Tabela 4 - Parâmetros do método PRP .....	17
Tabela 5 - Contagem de tubulações com fluxo unidirecional e bidirecional, antes e depois da aplicação do PRP .....	20
Tabela 6 - Número de objetos no modelo hidráulico e o número de setores identificados por cada método .....	24

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

DFS	Depth First Search
DMA	District Metered Area
DMC	Distrito de Monitoramento e Controle
ETA	Estação de Tratamento de Água
NSRP	Pulsos Retangulares de Neyman Scott
PRP	Pulsos Retangulares de Poisson
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
VRP	Válvula Redutora de Pressão

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	5
LISTA DE TABELAS.....	6
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	7
SUMÁRIO.....	8
1. INTRODUÇÃO .....	11
1.1. Objetivo Geral .....	17
1.2. Objetivos Específicos .....	17
1.3. Justificativa.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Conceito de Distrito de Monitoramento e Controle .....	19
2.2. Aplicação de Modelos de Simulação da Demanda de Água.....	20
2.2.1. Demanda por Componentes .....	21
2.2.2. Modelos Estocásticos.....	21
2.3. Teoria dos Grafos .....	22
2.4. Teoria dos Grafos Aplicada em Problemas de Abastecimento de Água.....	23
2.5. Partição de Grafos .....	25
2.5.1. Partição de Grafos pelo Método k-way .....	10
2.5.2. Partição de Grafos por Componentes Fortemente Conexos .....	11
2.5.2.1. Identificação de Componentes Fortemente Conexos – Algoritmo ForteCon .....	12
3. METODOLOGIA .....	13
3.1. Modelagem Hidráulica .....	14
3.2. PRP .....	16
3.3. Construção de Grafos Dirigidos .....	18
3.4. Identificação de <i>Clusters</i> .....	18
3.4.1. Objetos de Rede .....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
5. CONCLUSÕES.....	29
6. REFERÊNCIAS .....	30

## 1. INTRODUÇÃO

A perda de água em um sistema de abastecimento é um dos indicadores operacionais mais significativos em uma empresa de saneamento. Visando o funcionamento adequado do sistema, é fundamental a redução e controle das perdas, com competência e eficácia, no Sistema de Abastecimento de Água (SAA). Para que isso ocorra, demanda-se constante atuação associada à operação e à manutenção do sistema. Segundo Farley et al (2008), o controle de perda das águas é uma adversidade além de problema técnico, é um processo complexo relacionado a questão financeira e de satisfação do cliente.

A abordagem atual para gerenciamento dos sistemas de distribuição de água é realizada de maneira reativa: primeiro, os problemas acontecem, e depois as ações são tomadas. As tecnologias que possibilitam certa previsibilidade para a concessionária ainda não são aplicadas em larga escala pois são necessárias informações preliminares da empresa, como: dados de monitoramento em campo, cadastro técnico atualizado, georreferenciamento dos consumidores.

Essa abordagem influencia diretamente no desempenho do sistema, fazendo com que as perdas, tanto de água quanto de energia, nos sistemas sejam altas e a eficiência de distribuição seja baixa.

Existe hoje potencial para otimizar a prática tradicional e reativa para uma proativa e eficiente, que permitiria que ações fossem tomadas de maneira mais rápida, e as perdas nos sistemas de abastecimento fossem controladas em menor tempo, ocasionando menos prejuízo para as companhias. Para isso, utilizam-se novas abordagens, baseadas em tecnologia de monitoramento e controle - que viabilizam a automação da análise de dados coletados em campo, e modelos computacionais e simulações hidráulicas - que permitem que estudos de concepção sejam avaliados para que o sistema funcione em equilíbrio sobre a perspectiva técnico-econômica.

Uma maneira de melhorar a eficiência operacional dos sistemas distribuição de água é por meio do funcionamento por setores menores e mais gerenciáveis mediante a instalação de válvulas que desviam ou bloqueiam o fluxo de água. Distrito de Monitoramento e Controle (DMC), ou, como denominada pelos países de língua inglesa, District Metered Area (DMA), é um conceito trazido pelos britânicos, durante a privatização de suas empresas de saneamento.

Esta técnica permite o gerenciamento do fluxo de água para que o sistema consiga atender os clientes da concessionária de maneira satisfatória em termos de vazão e pressão, e viabiliza a interpretação do sistema de forma facilitada, apontando problemas operacionais nas

redes de distribuição. Internacionalmente, é reconhecido entre as melhores soluções para a redução de perdas de água em sistemas de abastecimento (FARLEY et al. 2008).

Tecnicamente, sabe-se que é possível fazer a transição de sistemas de abastecimento não-setorizados para setorizados por meio da inserção de válvulas de separação, ou de corte das redes entre diferentes áreas do sistema. Os DMCs possuem fronteiras delimitadas e conhecidas, sendo também medidas e controladas, e auxiliam na modernização dos sistemas de abastecimento e na adoção de novas tecnologias que são embasadas em sistemas setorizados.

O monitoramento de variáveis importantes na rede de distribuição, como volumes distribuídos, vazões mínimas noturnas, qualidade da água, pressão na rede, e outros, também é viabilizado pela setorização, assim como o isolamento de áreas menores para executar possíveis reparos e manutenção no sistema.

A SABESP (2008) afirma que dividir a rede em distritos de medição é uma metodologia utilizada nas maiores e mais resilientes companhias de saneamento no mundo, sendo essa prática hoje incorporada na filosofia moderna de gestão da distribuição de água.

Um sistema setorizado viabiliza um melhor controle das perdas do sistema por meio do cálculo do balanço hídrico (WATER AUTHORITIES ASSOCIATION AND WATER RESEARCH CENTRE, 1985), garantindo melhor gerenciamento de pressão (ALONSO et al, 2000; DI NARDO e DI NATALE, 2011; NICOLINI e ZOVATTO, 2009), visto que as áreas são delimitadas e conhecidas.

Para uma avaliação confiável de propostas de setorização utiliza-se modelagem hidráulica. A modelagem hidráulica é uma simulação matemática que considera equações da hidráulica para obter resultados de variáveis de estado: pressão, vazão, e nível de reservatórios. De acordo com Albano (2004), a modelagem matemática é uma das principais ferramentas utilizadas na gestão de recursos hídricos – seja para análise da qualidade ou da quantidade de água. Também sua utilização é imprescindível para avaliar se as possíveis setorizações de um sistema de abastecimento atendem requisitos mínimos de pressão e vazão a serem disponibilizadas para o consumidor final. Garantindo que as condições hidráulicas serão atendidas, para que haja distribuição de água em todo o sistema.

Nos projetos de setorização, a abordagem de “tentativa e erro” ainda é amplamente utilizada, como apresentam Barreto et al (2006); Water Authorities Association e Water Research Centre (1985); Water Industry Research LTDA (1999); Butler (2000); Twort et al (2000), mas os requisitos não são analisados de forma tão prática quando o sistema de abastecimento é extenso. Visto que cada modificação necessária para setorizar a rede (corte ou

instalação de válvula) pode implicar em variações significativas no atendimento das pressões e vazões para todos os consumidores.

Em sistemas existentes, é recomendável que a análise de setorização considere as características operacionais como: comportamento hidráulico, padrão de consumo, parâmetros de qualidade da água, entre outros. Do mesmo modo, condições “naturais” de divisão de sistemas também devem ser observadas, como: estações elevatórias, boosters, Válvulas Redutoras de Pressão (VRP's), registros, entre outros (GOMES et al, 2012).

Diferentes técnicas para a partição do sistema de abastecimento em setores menores estão sendo estudadas, e grande parte desses estudos de partição envolvem, de forma direta ou indireta, uma teoria computacional que analisa a conectividade entre diferentes elementos – grafos, como apresentam Di Nardo e Di Natale (2011).

A Teoria dos Grafos pode ser utilizada para representar relacionamentos entre pares de objetos. Existem hoje diversos algoritmos e metodologias desenvolvidas para a análise e estudo da partição de sistemas de abastecimento de água, quando os mesmos são representados como grafos.

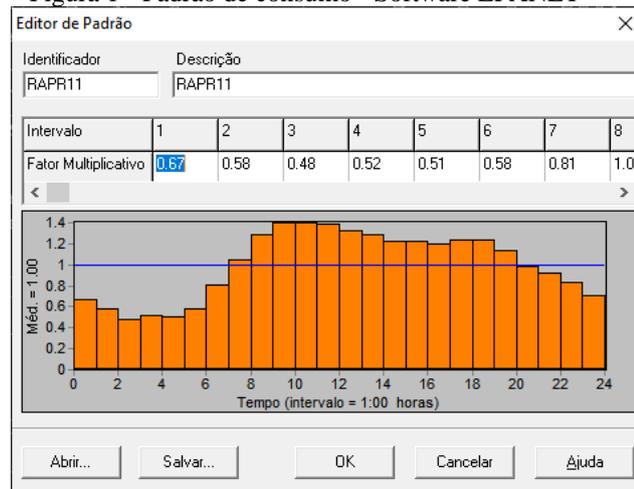
Para a realização desses estudos e aplicação dos algoritmos da Teoria dos Grafos é necessário definir com transparência os requisitos iniciais de dados que farão parte da análise para que seja possível entender os resultados e poder generalizar suas aplicações. Em sua maioria os estudos de partição utilizam a modelagem hidráulica dos sistemas como base.

Para construção de um modelo hidráulico são necessários diversos parâmetros de entrada, e, dependendo de como o mesmo é configurado, o modelo pode ter diferentes saídas. Portanto, a qualidade dessa modelagem vai influenciar diretamente na qualidade dos estudos que utilizam a Teoria dos Grafos baseados em modelagem hidráulica.

Um dos dados mais importantes e pouco citados nesses estudos é como a demanda do sistema e o perfil de consumo foram configurados. Isso diz para o modelo a ser utilizado o quanto de água é consumida, e a diferença do consumo nas diferentes horas do dia, resultando na pressão disponível para cada consumidor, e na direção final do fluxo de água dentro das redes. Ou seja, o consumo e padrão dizem o caminho que a água percorre até atingir todos os pontos da rede.

Uma curva de consumo apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Padrão de consumo - Software EPANET



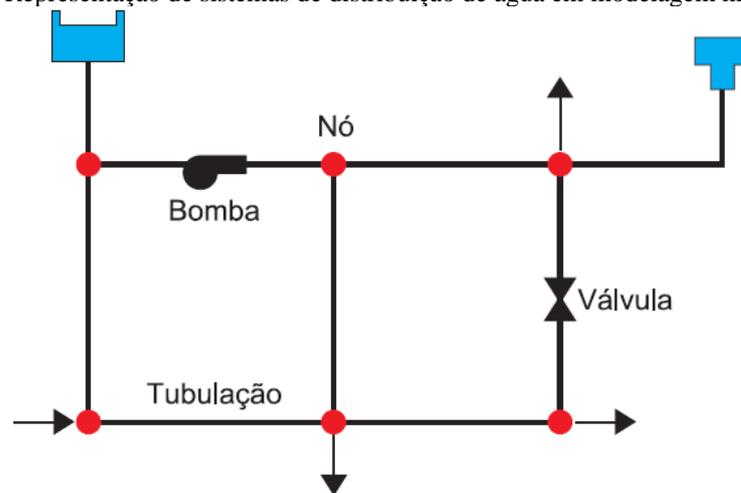
Fonte: Autor (2020)

O perfil de consumo varia de acordo com os hábitos dos consumidores de determinadas áreas. Por exemplo: em áreas comerciais, o padrão de consumo de água seguirá os horários de abertura de comércio, diferindo das áreas para abastecimento residencial. Nesse último caso, o consumo de água se inicia logo pela manhã, onde as pessoas se preparam para trabalhar, ocorrendo em alguns casos o pico próximo a hora do almoço.

O perfil de consumo tende a reproduzir o comportamento geral de uma área específica, e é construído utilizando dados de vazão de saída dos reservatórios ou medição individual com hidrômetros apropriados em uma amostragem de consumidores. Essa curva tende a suavizar a variação do consumo horário e individual de cada casa/unidade, fazendo com que a direção dos fluxos calculada pelos modelos hidráulicos possa ser divergente da real situação em campo.

Nos modelos hidráulicos, os consumos e seus respectivos perfis são configurados nos nós (representados em vermelho, na Figura 2). Os nós são pontos de união de trechos na rede, onde a água entra, e onde a água sai da rede – por meio dos consumos configurados (ROSSMAN, 2000).

Figura 2 - Representação de sistemas de distribuição de água em modelagem hidráulica

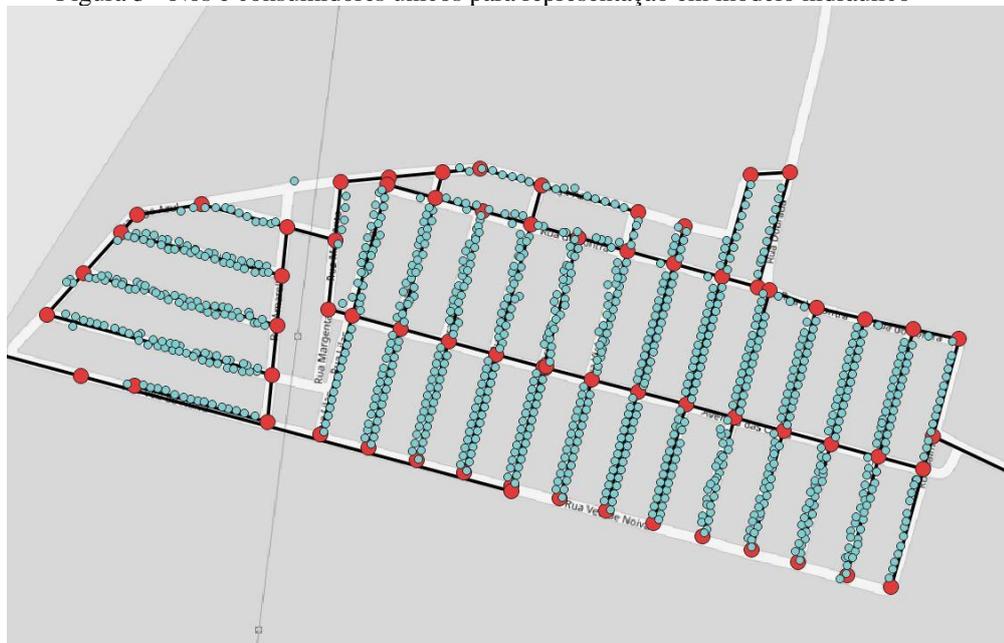


Fonte: Rossman (2000)

As demandas são carregadas nos nós de acordo com o número de consumidores que aquele nó irá representar. Na Figura 3, tem-se os nós como os círculos vermelhos, e os consumidores individuais como os círculos azuis menores. A rede é representada pelos traços pretos contínuos.

Na Figura 4, os traços alaranjados são as delimitações de influência de cada nó – ou seja, cada nó em um modelo hidráulico representa o consumo e o comportamento de vários consumidores únicos do sistema.

Figura 3 - Nós e consumidores únicos para representação em modelo hidráulico



Fonte: Autor (2020)

Figura 4 - Possíveis áreas de influência dos nós em um modelo hidráulico



Fonte: Autor (2020)

Como os nós representam o comportamento de um grupo, e a curva utilizada representa um padrão geral, os comportamentos individuais de cada consumidor (representados pelos pontos azuis nas Figura 3 e Figura 4) são suavizados no modelo hidráulico, fazendo com que a direção dos fluxos não seja exatamente aquela em que se tem na simulação.

A direção no fluxo de água na rede é um fator importante de ser considerado na setorização de sistemas, pois a conectividade entre os nós pode interferir nas pressões e vazões disponíveis, dependendo de onde os setores serão implementados.

Para reproduzir essa possível variação da curva de consumo em um sistema de abastecimento e analisar de maneira mais precisa as propostas de setorização, existe uma metodologia chamada PRP, Poisson Rectangular Pulse, que, por meio de “pulsos” aleatórios, simula possíveis comportamentos que seriam atenuados pela curva de consumo geral, permitindo que uma ida ao banheiro, ou a lavagem de um carro em horário não usual fossem consideradas na modelagem de um sistema de distribuição de água.

Com o intuito de reduzir o tempo de processamento de dados, otimizar a separação do sistema de abastecimento em distritos menores, e deixar a análise de setorização mais confiável, foram definidos os objetivos apresentados nos tópicos 1.1 e 1.2, a seguir.

### **1.1. Objetivo Geral**

- Avaliar metodologia baseada em Teoria dos Grafos para gerar automaticamente proposições de setorização ou identificar setores existentes em sistemas de distribuição de água;

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Aplicar o método PRP (*Poisson Rectangular Pulse*) para simular a variação da demanda em modelos hidráulicos;
- Descobrir a influência da aplicação do PRP nas direções dos fluxos no modelo hidráulico;
- Desenvolver e aplicar um algoritmo de análise para conectividade e identificação de setores;
- Investigar os agrupamentos dos nós para melhor entendimento da configuração do sistema de abastecimento;
- Investigar os agrupamentos dos nós para identificação de possíveis setores no sistema de distribuição;
- Investigar a interferência da inclusão de diferentes elementos do sistema no código de análise do agrupamento.

### **1.3. Justificativa**

Definir a concepção de sistema de abastecimento que irá operar por DMC's ainda é uma atividade subjetiva, e as chances de diferentes engenheiros que estudam o mesmo sistema de abastecimento proporem uma mesma concepção é improvável (FARLEY et al., 2008). Isso atesta que essa definição é de grande complexidade.

Os estudos de setorização realizados no mercado hoje falham em considerar as novas tecnologias e teorias que estão sendo estudadas pela academia, fazendo com que o ciclo de vida dos projetos seja longo e, conseqüentemente, oneroso.

Existem hoje algoritmos desenvolvidos na área da computação que podem ser aplicados em sistemas de distribuição de água para que os problemas enfrentados no setor sejam resolvidos de maneira otimizada. A Teoria dos Grafos é uma teoria que possui diversos algoritmos que podem ser aplicados para a análise de setorização de redes.

Os sistemas de distribuição de água podem ser facilmente representados como grafos e a metodologia proposta por esse trabalho aplica um algoritmo da Teoria dos Grafos para o estudo de setorização de redes de abastecimento.

A abordagem computacional traz mais agilidade e elimina em partes a subjetividade das análises inicialmente realizadas por engenheiros e técnicos da área, fazendo com que os resultados dos estudos sejam mais precisos e assertivos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para entender o problema apresentado, a abordagem escolhida e as soluções propostas, são explanados neste capítulo as informações e conceitos necessários sobre sistemas de distribuição de água, simulação de demanda e Teoria dos Grafos.

### 2.1. Conceito de Distrito de Monitoramento e Controle

Segundo a UK Water Authorities Association (1980), a metodologia de divisão do sistema de abastecimento em DMCs foi inicialmente desenvolvida e aplicada no Reino Unido, em torno de 1980, e depois adotada por diversos países. Pode-se aplicar a metodologia por meio da inserção de válvulas nos limites dos setores (ou o corte das redes que interligam os DMCs) e medidores de vazão na(s) entrada(s) para identificar perdas nessa área da distribuição. As válvulas, quando adotadas, podem permanecer sempre fechadas, ou podem ser controladas por um sistema remoto.

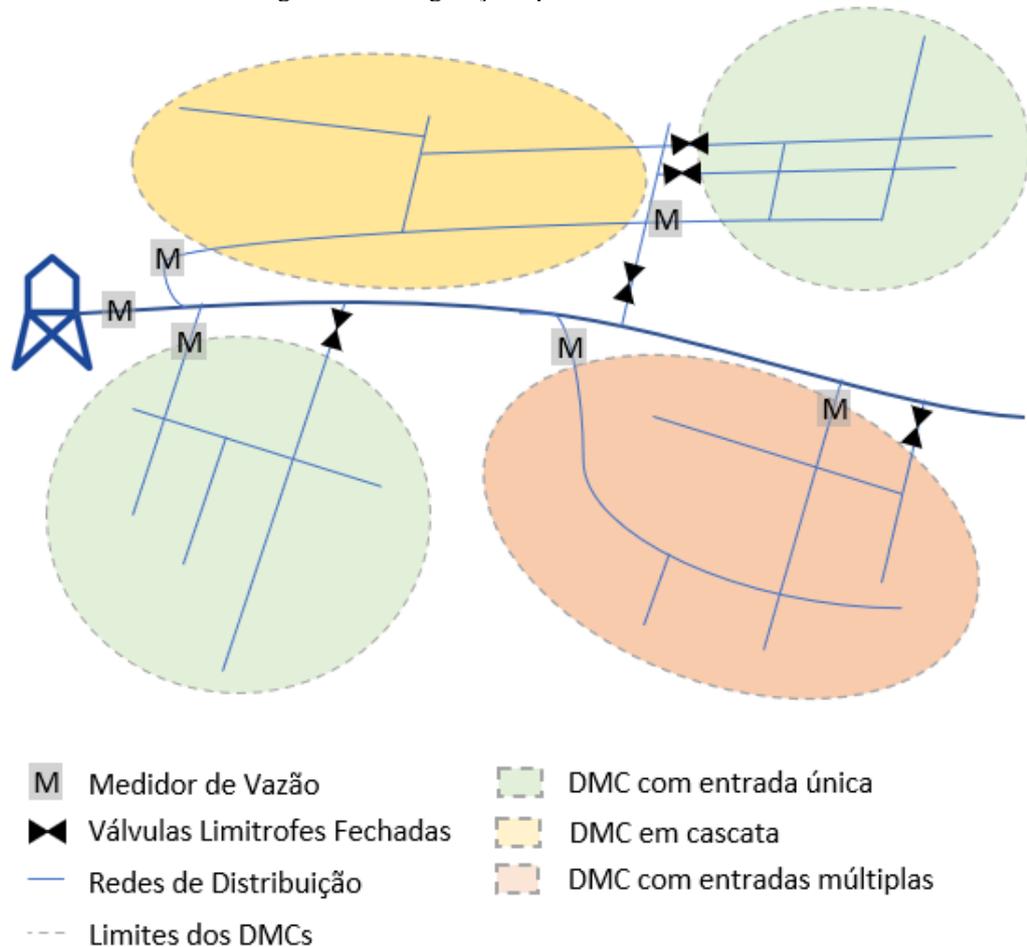
O principal objetivo dos DMCs é reduzir a complexidade do sistema como um todo, permitindo analisar individualmente cada componente dos setores, e aumentar a eficiência operacional, visto que a gestão dos mesmos será direcionada de acordo com as características dos DMCs (SOUZA JÚNIOR, 2014).

Com o devido monitoramento das vazões e volumes de entrada dos DMCs é possível identificar novos vazamentos pela observação - automática ou não - da vazão mínima noturna. Essa informação permite que a companhia responsável pelo abastecimento intervenha rapidamente e repare os vazamentos quando os limites de perda definidos são excedidos (FARLEY, 2001; MORRISON et al, 2007).

Separar um sistema em DMCs requer estudo e mudança no layout de abastecimento para que o mesmo funcione de maneira mais confiável (DI NARDO e DI NATALE, 2011). A setorização geralmente é abordada considerando dados empíricos: número de ligações, comprimento das redes, e até mesmo por “tentativa e erro”, utilizando softwares de simulação hidráulica (BUTLER, 2000; TWORT et al, 2000).

Uma configuração típica de DMCs é apresentada na Figura 5. Pode-se observar que um DMC pode possuir uma ou mais entradas, sendo que um DMC pode abastecer outro, e todas as passagens de água abertas devem ser monitoradas com medidores de vazão. As interligações existentes entre os setores que não forem medidas devem ser fechadas com válvulas limítrofes.

Figura 5 - Configuração típica de DMCs



Fonte: Adaptado de Klingel e Knobloch (2011)

Segundo Morrison et al (2007), um DMC pode ser definido de acordo com as seguintes características:

- Tamanho médio entre 500 e 3.000 ligações;
- Área estanque, sem interligação com DMCs vizinhos;
- Existência de medição de vazão na entrada do setor.

## 2.2. Aplicação de Modelos de Simulação da Demanda de Água

A literatura científica apresenta vários modelos para simular, em sistemas de distribuição de água, a demanda de água (CREACO et al, 2017). No geral, existem dois grupos diferentes que trabalham com resultados parecidos:

**Demandas por componentes:** modelos que simulam a demanda total pelos seus componentes – aparelhos acionados em cada residência.

**Modelos estocásticos:** utilizam correlações estatísticas para reproduzir o comportamento geral de casas/unidades, sem fazer distinção de qual é o aparelho que está sendo acionado.

### 2.2.1. Demanda por Componentes

Para simulação de demandas pelo método dos componentes é necessário conhecer e detalhar as formas de uso de água nos domicílios, caracterizando seus aparelhos hidrossanitários. Essa reprodução indireta é realizada a partir da combinação dos seus microconstituintes, como realizado por meio do modelo SINDEUM (CREACO et al, 2017). A mesma abordagem foi utilizada por Blokker (2006) e Giustolisi (2010).

### 2.2.2. Modelos Estocásticos

Os modelos estocásticos tentam representar a demanda residencial baseados em processos como os de Pulsos Retangulares de Poisson – PRP (BUCHBERGER e WU, 1995; GUERCIO et al, 2001 e GARCIA et al, 2004) e Pulsos Retangulares de Neyman Scott – NSRP (ALVISI et al, 2003 e ALCOCER-YAMANAKA et al, 2012).

O modelo NSRP é baseado em uma solução de problemas de otimização não lineares, envolvendo dados monitorados em campo. Esse modelo, no entanto, é mais utilizado para eventos de precipitação e outros eventos extremos (ALCOCER-YAMANAKA et al., 2012).

Com direcionamento para demandas em sistemas de distribuição de água, Buchberger e Wu (1995) propuseram a modelação da demanda baseados em modelos PRP descrevendo os eventos de demanda associados a um único pulso, com o início definido por um processo de Poisson. O processo é baseado em três variáveis: intensidade, duração e frequência de pulsos.

A metodologia PRP é efetiva para estudar aspectos qualitativos e quantitativos dos sistemas de abastecimento de água (CREACO et al, 2017). Algumas das aplicações do modelo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Aplicações do modelo PRP em termos qualitativos e quantitativos

Aspectos quantitativos	Otimização da operação da rede para minimizar os custos de energia, melhoria dos projetos de expansão de rede para acomodação da demanda futura, determinação de parâmetros para construção de reservatórios, entre outros.
Aspectos qualitativos	Previsão da concentração de componentes químicos para atender aos requisitos da regulação, estimativa da exposição dos consumidores e agentes contaminantes, entre outros.

Fonte: Adaptado Creaco et al. (2017)

A intensidade e a duração dos pulsos, na maioria dos casos, são apontadas como variáveis aleatórias independentes que acompanham distribuições probabilísticas específicas,

como distribuição normal e log-normal para as durações, e exponencial e log-normal para a intensidade (BUCHBERGER e WU, 1995; GUERCIO et al, 2001). A frequência atribui um processo de Poisson com um parâmetro vinculado ao tempo (BUCHBERGER e WU, 1995).

### 2.3. Teoria dos Grafos

A Teoria dos Grafos surgiu em 1736, quando Leonhaed Euler resolveu o problema de atravessar sete pontes que ligavam duas ilhas e um continente, sem que o caminho se repetisse. Essa descoberta foi considerada uma especulação matemática e ficou adormecida até 1847 quando Gustav Robert Kirchhoff utilizou o modelo ao estudar circuitos elétricos (OSTROSKI e MENONCINI, 2009).

Na literatura, observa-se diferentes áreas onde a Teoria dos Grafos é aplicada, como: mercado financeiro (DEL-VECCHIO et al, 2009 & MENDES-DA-SILVA, 2010), análises de fluxograma de cursos (PECLY e MELLO, 2013), conservação do meio ambiente (SALVIANO, 2011), transporte público (CARDOZO et al, 2009), agronegócio (ACOSTA e SPREAFICO, 2017), e outros.

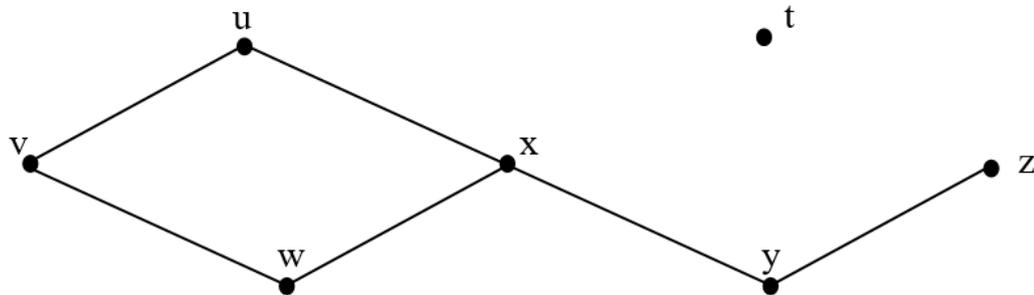
Um grafo é formalmente definido como abstração que permite codificar relacionamentos entre pares de objetos, ou seja, conjuntos de pontos chamados vértices, conectados por um conjunto de linhas, definidas como arestas. Os objetos são representados como vértices do grafo, e os relacionamentos são as arestas. Matematicamente, um Grafo  $G(V, E)$  é uma estrutura matemática constituída pelos conjuntos:

- $V$ , finito e não vazio de  $n$  vértices, e;
- $E$ , de  $m$  arestas, que são pares não ordenados de elementos de  $V$ .

Os grafos são amplamente utilizados para resolução de problemas diversos, como por exemplo estudar o comportamento de onda eletromagnética em exames de Tomografia 2D (SANTOS e NETO, 2011), analisar a interação de redes de computadores, em telecomunicações, nos transportes (HERNANDES et al, 2009).

Graficamente é representado por uma figura com Nós ou Vértices, unidos por um traço denominado Aresta configurando a relação imaginária (PEREIRA e DA CÂMARA, 2008), como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Representação gráfica de um grafo cujos vértices são  $V = \{z, y, x, w, v, u, t\}$  e cujas arestas são  $E = \{xy, yz, xu, xw, uv, vw\}$



Fonte: Autor (2020)

A representação gráfica, no entanto, não é adequada para representar dados sobre a estrutura de grafos para um computador. Para fins de análises e utilização em algoritmos, os grafos podem ser representados de diferentes maneiras, como:

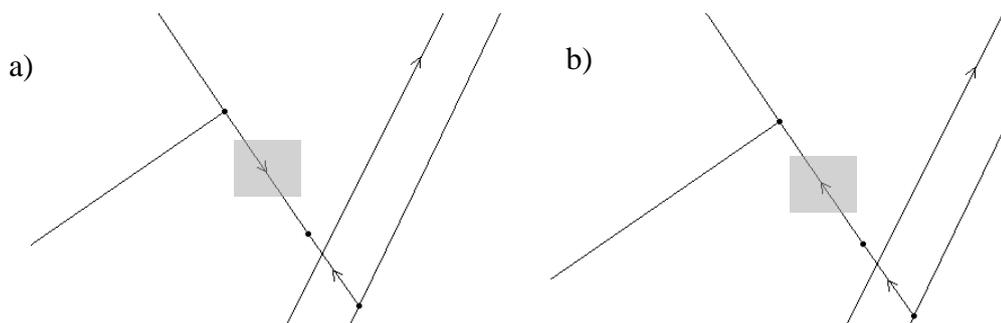
- Lista de Adjacência: uma lista de vetores para cada vértice, que contém cada vértice que tem uma aresta (ligação) para este vértice;
- Matriz de Adjacência: uma matriz  $N \times N$  (onde  $N$  é o número de vértices de um grafo). Essa matriz é inicialmente preenchida toda com 0, e quando há relação (conexão) entre um vértice e outro, esse lugar da matriz é marcado por outro número/representação, predefinida no código;
- Matriz de Incidência: uma matriz bidimensional, onde uma das dimensões são os vértices, e a outra dimensão são as arestas.

## 2.4. Teoria dos Grafos Aplicada em Problemas de Abastecimento de Água

Para representação de um sistema de distribuição de água em grafos, autores utilizam diferentes classificações, uma delas é a representação do sistema de abastecimento como grafo dirigido ou não dirigido. Grafos dirigidos significam que cada aresta “começa” em um vértice, e “termina” em outro, sendo possível encontrar também a expressão digrafo para se referir a essa propriedade.

Em sistemas de abastecimento, grafos orientados são uteis para que os algoritmos entendam o caminho que a água percorre na tubulação (Figura 7), e considerem o sentido do abastecimento nos algoritmos. Essa classificação é empregada em trabalhos de diferentes autores, como apresentam Di Nardo e Di Natale (2011) e Perelman e Ostfeld (2011).

Figura 7 - Diferença entre direção de escoamento em um mesmo sistema de abastecimento. a) 09:00 b) 19:00



Fonte: Autor (2020)

A partir da modelagem hidráulica, é possível representar matematicamente os acessórios da rede: tubos, bombas, válvulas, e outros, representados na Figura 8, simulando o comportamento hidráulico dos sistemas de distribuição em pressão. A definição de cada elemento é apresentada a seguir:

1 - Fonte: origem da água para o abastecimento. A água pode vir de duas fontes distintas: superficial (rios, córregos e lagos), ou subterrânea (lençol freático);

2 - Bombas: dispositivo que insere pressão em uma rede de abastecimento, fazendo com que a água saia de uma altura manométrica menor e vá para uma altura manométrica maior - movimento que não aconteceria sem o dispositivo. As bombas podem ser utilizadas tanto para recalcar água bruta para uma Estação de Tratamento de Água (ETA), quanto para pressurizar água tratada na rede de distribuição;

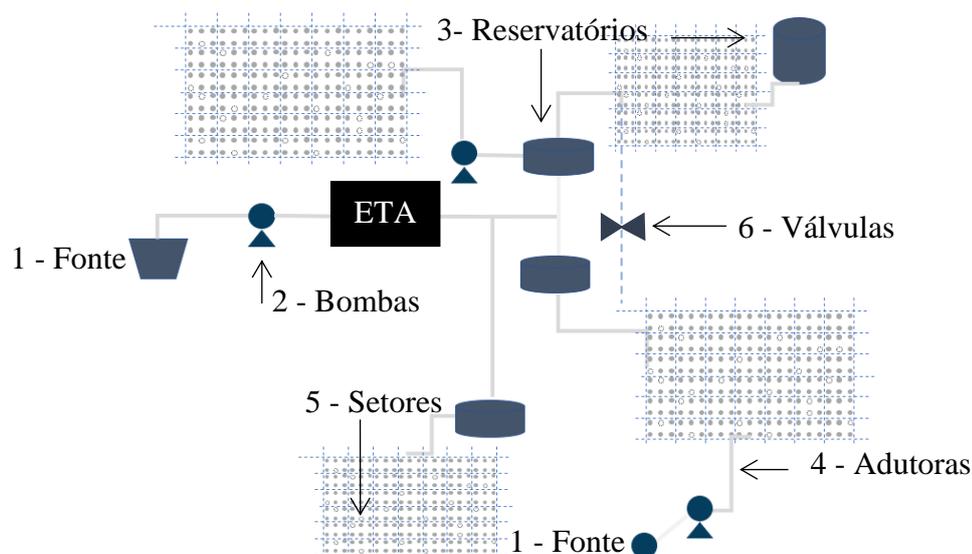
3 - Reservatórios: estrutura geométrica para reservar água em sistemas de abastecimento;

4 - Adutoras: tubulação para condução de água para ou de um reservatório;

5 - Setores: também conhecidos como DMCs. Com delimitação conhecida e sem interligação com setores vizinhos, é o conjunto de redes para distribuição de água para os consumidores finais;

6 - Válvulas: dispositivo que movimenta, para e/ou regula o fluxo de água nas tubulações. Geralmente inseridas entre setores para definir os seus limites, caso existam tubulações que os conectem.

Figura 8 - Sistema de Distribuição de Água e Seus Acessórios



Fonte: Autor (2020)

A modelagem também viabiliza os cálculos de vazão nos trechos, pressão nos nós, altura de reservatórios e outros.

## 2.5.Partição de Grafos

Partições em sistemas de abastecimento geralmente resultam em estruturas chamadas subgrafos. O subgrafo de um grafo é uma “parte” do grafo. Um grafo H é subgrafo de um grafo G se todo vértice de H é vértice de G, e toda aresta de H é aresta de G. Esse conceito é importante pois na setorização de sistemas de abastecimento, tem-se como resultado subgrafos da rede principal.

Atualmente, existem diversas maneiras de otimizar a setorização em sistemas de abastecimento, e diferentes metodologias são adotadas por diferentes autores. As principais citadas são as Partições k-way e Partições por Identificação de Componentes Conexos, por meio de algoritmos DFS (*Depth First Search* - busca em profundidade).

As principais palavras chaves utilizadas para pesquisar sobre o tema foram: *graph partitioning of water distribution networks, automatic sectorization of water distribution systems, network partitioning*.

Utilizando a plataforma *Google Scholar*, foram encontrados aproximadamente 60.300 trabalhos. Os autores e estudos selecionados para revisão foram os que possuíam maior número de citação de acordo com os diferentes métodos de partição de grafos.

Um resumo dos principais pesquisadores e as diferentes técnicas adotadas é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Diferentes metodologias para setorização de sistemas de abastecimento utilizando a Teoria dos Grafos

Ano	Autores	Metodologia	Tipo do Grafo	Possui peso?	Simulação Estática ou Dinâmica?	Modelagem Hidráulica	Análise de qualidade da setorização?	Vantagens	Limitações
2011	DI NARDO, A., DI NATALE, M., SANTONASTA SO, G. F., & VENTICINQUE, S.	Partição <i>k-way</i> com o algoritmo <i>MultiLevel, Recursive Bisection (MLRB)</i> união; b) fase inicial de partição; c) partição (com refinamento). <i>Software METIS.</i>	Orientado	Sim	Estática	Sim	- Energética (comparação entre energia perdida e energia utilizada para atingir as demandas mínimas). - Hidráulica (pressões médias, máximas e mínimas dos nós).	Obtenção dos pesos dos vértices pelas propriedades hidráulicas do modelo hidráulico.	Utilização de simulação estática. Necessidade de definição prévia do número de setores.
2011	PERELMAN, L.; OSTFELD, A.	Utilização dos algoritmos <i>depth first search (DFS)</i> (Tarjan 1972) e <i>breadth first search (BFS)</i> (Pohl 1969) para computar a conectividade e o agrupamento ( <i>clustering</i> ) dos grafos. Análise com Epanet e GIS para a representação dos <i>clusters</i> .	Orientado e não orientado	Sim	Dinâmica	Sim	N/A	Utilização de simulações dinâmicas (24 horas).	A setorização é proposta apenas considerando propriedades topológicas da rede.
2014	DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; SANTONASTA SO, G.	Partição <i>k-way</i> utilizando algoritmo ANT e algoritmos evolucionários. Utilização de algoritmos genéticos.	N/A	Sim	Estática	Sim	- Energética (comparação entre energia perdida e energia utilizada para atingir as demandas mínimas). - Hidráulica (pressões médias, máximas e mínimas dos nós). - Consumo (atendimento de todas as demandas dos nós).	Permite seleção inicial do número de válvulas e macromedidores a serem usados para proposição do número de setores.	A escolha dos pesos para vértices e arestas pode ser inefetiva. Estudo de caso com um sistema pequeno.

Ano	Autores	Metodologia	Tipo do Grafo	Possui peso?	Simulação Estática ou Dinâmica?	Modelagem Hidráulica	Análise de qualidade da setorização?	Vantagens	Limitações
2014	HAJEBI, S., TEMATE, S., BARRETT, S., CLARKE, A., & CLARKE, S.	Agrupamento ( <i>clustering</i> ) para partição do grafo. NSGA-II (algoritmo genético multiobjetivo) para diferentes cenários dos índices adotados.	N/A	N/A	N/A	Sim	- Estrutural (menor número de cortes e menor diâmetro nos limites dos setores). - Energética (menor dissipação de energia). - Hidráulico (violação de pressão mínima, menor diferença de elevação e atendimento de pressão em todo o sistema).	Utilização de simulações hidráulicas.	Aplicável apenas em setores abastecidos por gravidade, método ainda precisa de mais estudos.
2016	VEGAS NIÑO, O. T.; MARTINEZ ALZAMORA, F. & TZATCHKOV, V.	Definição de 4 tipos de subsistemas hidráulicos e posterior identificação dos mesmos em diferentes sistemas. Utilização do Visual Basic 6.0, base de dados temporal.	N/A	Não	N/A	Sim	N/A	Existe um <i>software</i> para implementação do método.	Identifica apenas subsistemas hidráulicos existentes. Não gera novos setores. Não considera todo o período de simulação dinâmica.
2016	CASTRO-GAMA, M. E. PAN, Q., JONOSKI, A., & SOLOMATINE, D.	<i>Global Gradient Algorithm</i> (GGA) utilizado para representação do sistema em grafo. Partição <i>k-way</i> .	N/A	N/A	N/A	Sim	N/A	Permite seleção inicial dos setores, e fornece diferentes soluções.	Os subsetores gerados dentro dos setores principais são aleatórios, o que faz que os setores tenham tamanhos muito diferentes.

Fonte: Autor (2020)

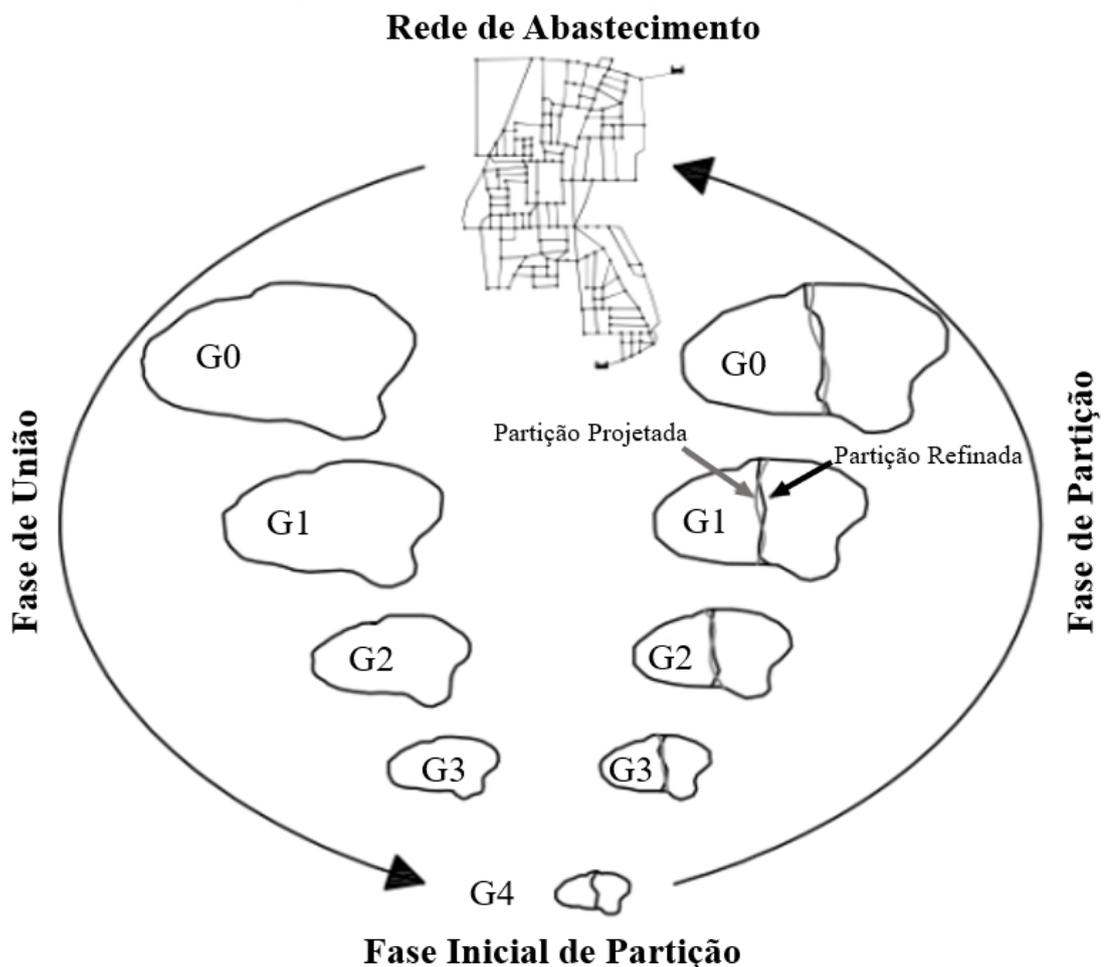
### 2.5.1. Partição de Grafos pelo Método $k$ -way

Nessa abordagem, a partição consiste em dividir  $n$  nós de um determinado grafo em um número predefinido,  $k$ , de subconjuntos com praticamente o mesmo tamanho, de maneira que o número de vértices conectando os subconjuntos seja mínimo.

A partição é resolvida pela execução de uma sequência de bipartições de um grafo. Inicialmente, uma partição 2 way é obtida, depois, cada cluster é partido novamente usando também a partição 2 way. Cluster é a associação de dados com aspecto e comportamento análogo (JAIN et al, 1999). Depois de uma série de partições, a partição  $k$ -way é atingida.

Para melhor eficiência do método, é possível realizá-lo em 3 etapas: (a) fase de união; (b) fase inicial de partição e (c) fase de partição, mostradas na Figura 9.

Figura 9 - Diferentes fases de uma partição  $k$ -way



Fonte: Modificado de Di Nardo e Di Natale (2011)

A fase de união simplifica o grafo original agregando os nós, e gerando uma sequência de grafos menores, com menos vértices. Cada grafo menor obtido pela agregação dos vértices

adjacentes, cria um novo vértice, que se chama multinode - esse grafo é chamado de grafo coarser.

Na fase inicial de partição o grafo reduzido é partido em dois clusters de tamanho igual. A partição é realizada a partir de um nó, visitando seus adjacentes, utilizando algoritmos de busca em profundidade. Essa partição é executada diversas vezes, iniciando-se em diferentes nós do sistema. A partição final será aquela que atende os requisitos predeterminados: menor número de cortes entre os subgrafos, e similaridade do valor total das somas dos pesos entre os subgrafos.

A última fase, fase de partição, é a fase de recuperação do grafo original. Essa recuperação é atingida retornando-se à fase união, e desfazendo a agregação dos nós.

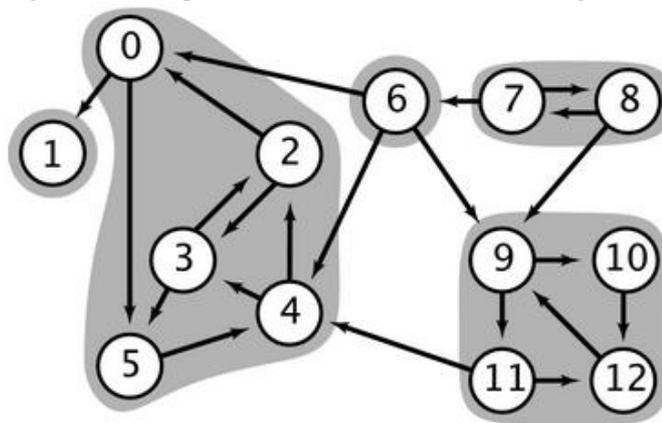
### 2.5.2. Partição de Grafos por Componentes Fortemente Conexos

Cormen et al. (2001) definem que determinados componentes de um grafo são fortemente conexos se a cada dois vértices do grafo são alcançáveis entre si, por pelo menos um caminho direto. Essa classificação se aplica apenas a grafos dirigidos.

Em outras palavras, para qualquer par de vértices  $0$  e  $2$ , se existe pelo menos um caminho (orientado) de  $0$  até  $2$ , e existe pelo menos um caminho (também orientado) de  $2$  até  $0$ , o par pode ser considerado fortemente conexo.

O exemplo é demonstrado na Figura 10, os componentes fortemente conexos estão ressaltados com a cor cinza.

Figura 10 - Componentes fortemente conexos de um grafo



Fonte: IME - USP (2018)

Para a identificação de componentes fortemente conexos, são utilizados algoritmos de busca em profundidade, ou por aprofundamento. Esses algoritmos são definidos como uma sequência de visitas (pilhas), que se inicia em qualquer vértice  $p$ , e escolhe algum vértice  $q$ ,

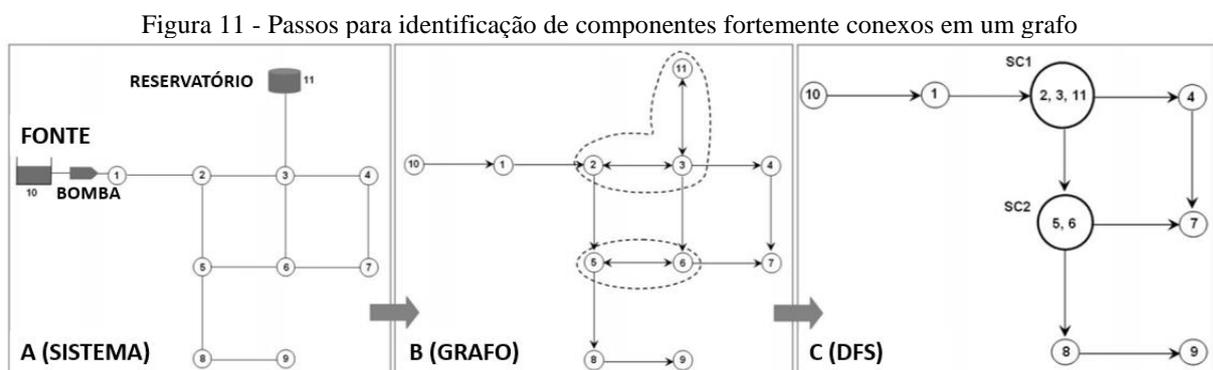
adjacente e ainda não visitado, e o coloca em uma pilha. Depois do vértice ser examinado, o topo da pilha é removido e outro vértice adjacente é examinado. Esse procedimento é realizado até que a pilha seja vazia, e o algoritmo é encerrado (LAU, 2007).

Pereman e Ostfeld (2011) realizaram estudos que consideram busca em profundidade para simplificar sistemas de abastecimento. No trabalho citado, foram utilizados algoritmos DFS (*Depth First Search* - busca em profundidade), estabelecidos por Tarjan (1972), que examina e identifica os grupos de nós que se relacionam de maneira mais forte entre eles, do que com o restante da rede.

### 2.5.2.1. Identificação de Componentes Fortemente Conexos – Algoritmo ForteCon

Terada (1991) apresentou um algoritmo que, utilizando o conceito de pilhas, identifica os componentes fortemente conexos de um grafo. Esse mesmo conceito foi utilizado pelos estudos de Pereman e Ostfeld (2011) na implementação do algoritmo de busca em profundidade.

Um esquema da aplicação é apresentado na Figura 11. O sistema de abastecimento é representado como um modelo hidráulico (A), depois, o modelo é representado em grafo, e tem cada um de seus nós visitados para identificar possíveis caminhos para todos os nós existentes, tendo como resultado as direções de fluxo de todos os nós do sistema (B). Quando identificados os caminhos, é possível classificar diferentes conjuntos que possuem caminhos de ida e volta, ou seja, é possível seguir direções diretas ou inversas para todos os nós dentro de seus grupos (C).



Fonte: Modificado de Perelman e Ostfeld (2011)

A aplicação de Perelman e Ostfeld (2011) foi utilizada como base para definição da metodologia deste trabalho, apresentada no capítulo 3, a seguir.

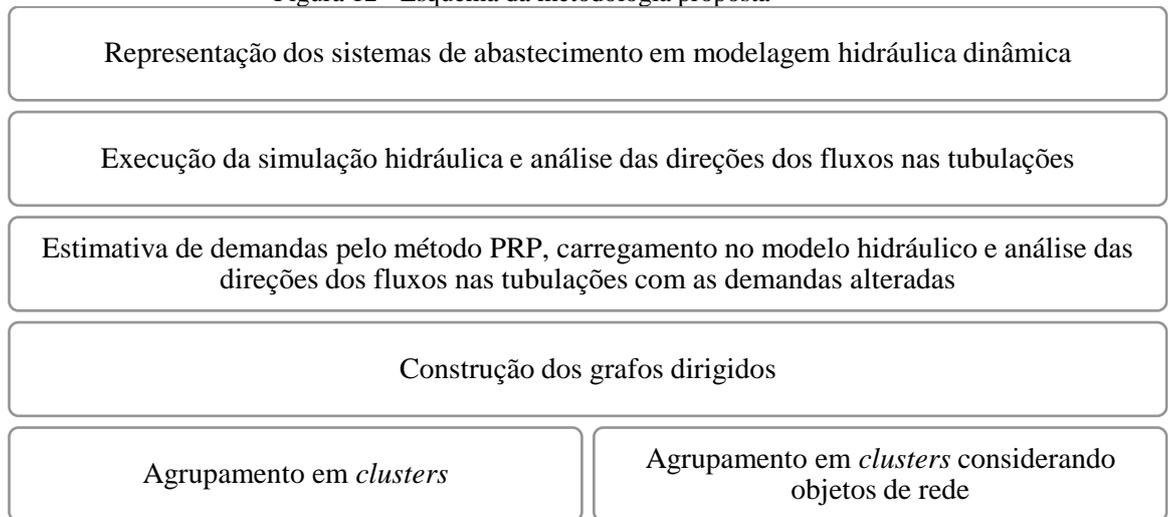
### 3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve as etapas metodológicas que foram seguidas para identificar setores possíveis ou existentes em sistemas de distribuição de água.

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma sequência análises, aplicada em três redes de abastecimento reais.

Um esquema é apresentado na Figura 12. O algoritmo inicia no passo “Execução da simulação hidráulica e análise das direções dos fluxos nas tubulações”.

Figura 12 - Esquema da metodologia proposta



Fonte: Autor (2020)

As características desses sistemas são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Características dos sistemas de abastecimento estudados

Identificação	Quantidade de Ligações	Km de Rede	Tipo do Abastecimento	Existe controle de pressão?
<b>Sistema 1</b>	2261	20.51	Gravidade + Bombeado	Sim
<b>Sistema 2</b>	1644	19.3	Gravidade	Sim
<b>Sistema 3</b>	9391	140	Gravidade + Bombeado	Sim

Fonte: Autor (2020)

As análises foram realizadas utilizando a linguagem R. O R foi selecionado por ser baseado no conceito de software livre, por ser um projeto open source e por possuir versões para o Windows, além de possuir pacotes adicionais que foram essenciais para a realização do trabalho (VERZANI, 2008) – epanet2toolkit e igraph.

A interface selecionada para execução do código foi o software RStudio, que permite programação em linguagem R. A seleção foi devido a maneira como o ambiente de trabalho foi

desenvolvido para facilitar o manuseio dos dados e visualização do código e resultados (RACINE, 2012).

A descrição detalhada das etapas executadas é apresentada a seguir.

### **3.1. Modelagem Hidráulica**

Os sistemas de distribuição de água foram representados e calibrados com dados coletados em campo (vazão, pressão e nível) por meio de modelagem hidráulica dinâmica, considerando 24h de simulação, assim como o trabalho de Pereman e Ostfeld (2011). Os dados de demanda foram calculados de acordo com o consumo mensal de cada consumidor, e distribuídos espacialmente no modelo de acordo com sua geolocalização.

A utilização da simulação dinâmica se faz importante na análise do sistema como um todo - os consumidores devem ser abastecidos 24h/dia, e a direção do fluxo entre os diferentes pontos do sistema pode variar de acordo com as demandas em diferentes horários do dia.

Quando finalizados, esses modelos são a entrada para as direções do fluxo serem identificadas.

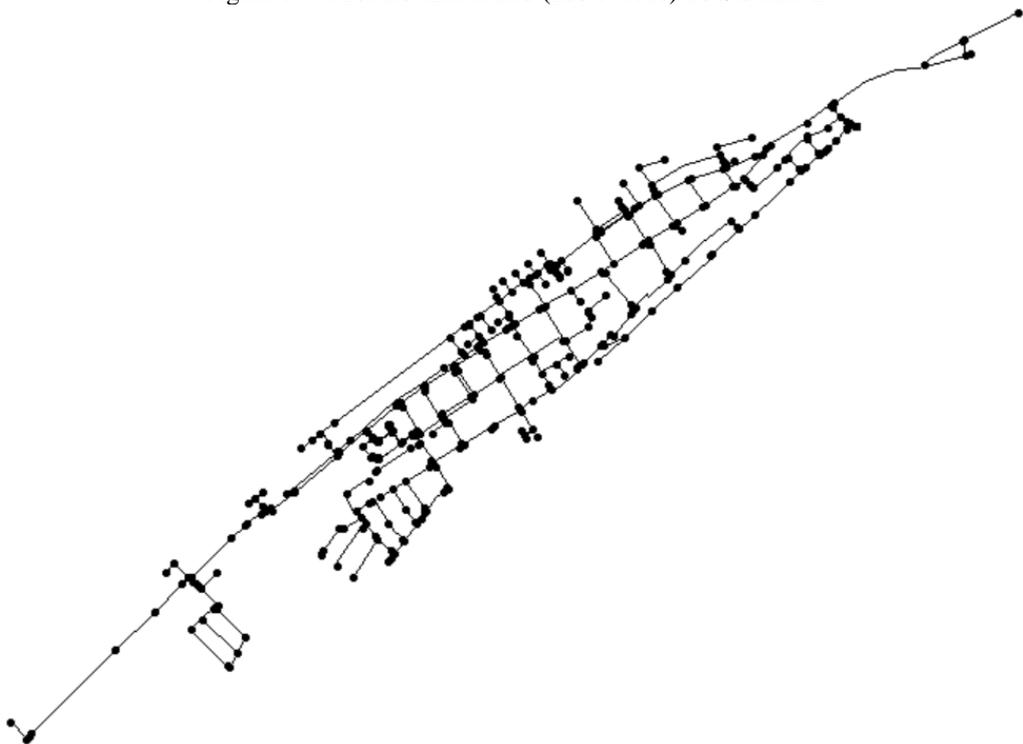
Os modelos hidráulicos dos três sistemas estudados são apresentados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15.

Figura 13 - Modelo Hidráulico (nós e redes) do Sistema 1



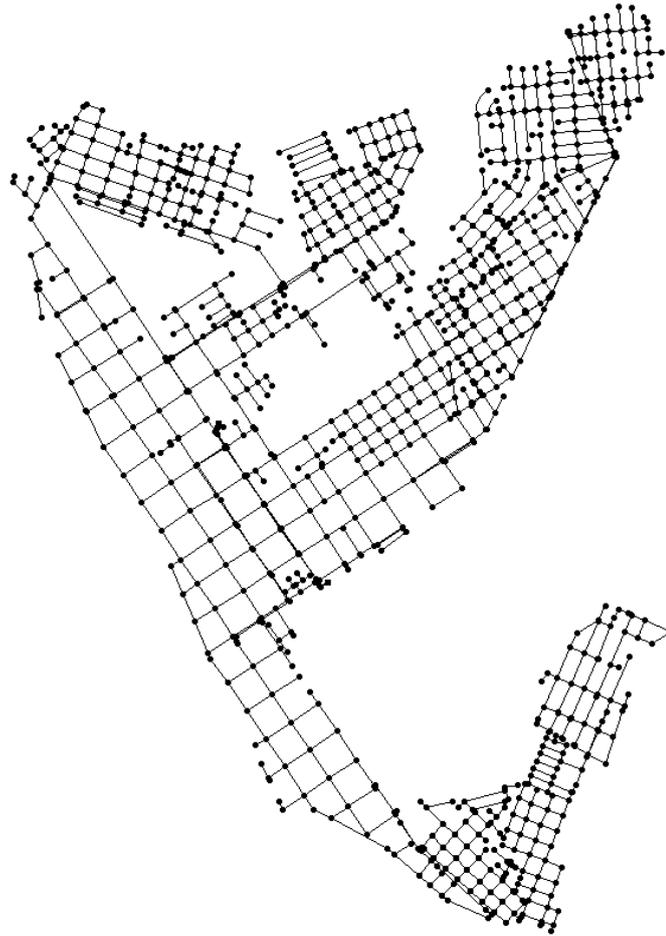
Fonte: Autor (2020)

Figura 14 - Modelo Hidráulico (nós e redes) do Sistema 2



Fonte: Autor (2020)

Figura 15 - Modelo Hidráulico (nós e redes) do Sistema 3



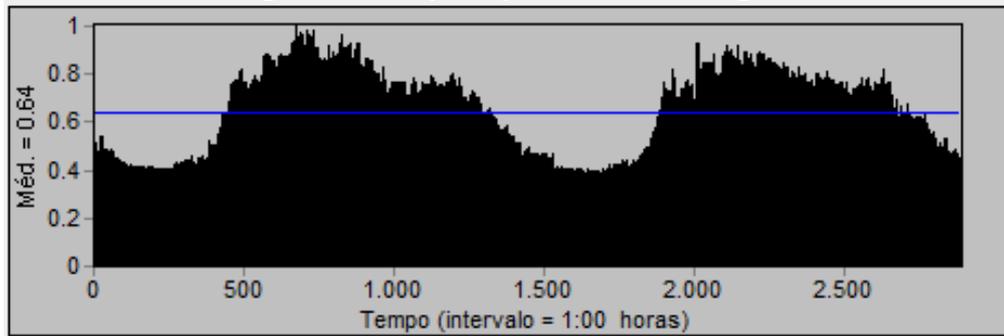
Fonte: Autor (2020)

### 3.2.PRP

Depois de obtidas as demandas reais do sistema e a direção das vazões em situação regular, o método PRP é aplicado por meio de programação em R. Os padrões de consumo são alterados para todos os consumidores, sempre respeitando a demanda total do sistema, e essas novas curvas são inseridas no modelo hidráulico para simular o comportamento das vazões.

Um sistema pode conter diferentes padrões de consumo, dependendo da população que é abastecida, como apresentado no tópico 1.3. Justificativa. Um exemplo de um padrão de consumo regular é apresentado na Figura 16.

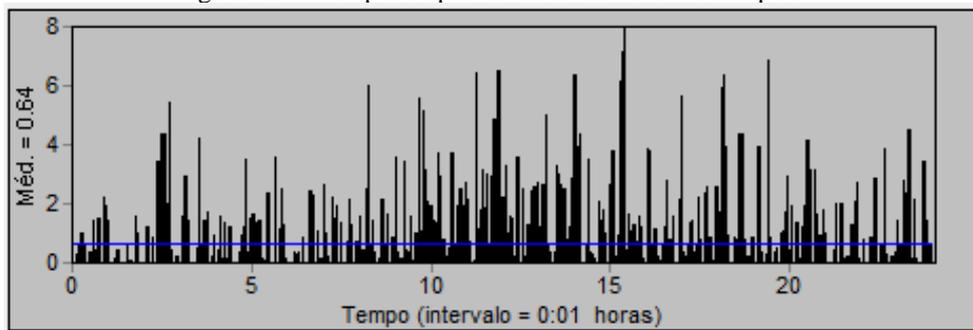
Figura 16 - Exemplo de padrão de consumo regular



Fonte: Autor (2020)

Na aplicação do PRP, são gerados inúmeros padrões diferentes de consumo, com diferentes configurações e um exemplo de padrão de consumo simulado pelo PRP é apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Exemplo de padrão de consumo simulado pelo PRP



Fonte: Autor (2020)

O processo inicia-se inserindo informações de configurações iniciais como a demanda base por habitação, e definindo parâmetros de PRP. Esses parâmetros são intensidade ( $\alpha$ ) e sua variância ( $\beta^2$ ), duração ( $\tau$ ) e sua variância ( $\omega^2$ )

Como esses dados, o volume de pulse é dado por  $\alpha \times \tau$ .

Para a simulação de demanda foram adotados os valores estabelecidos por Bucheberger e Li (2007), apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do método PRP

Parâmetros	Valores
Intensidade ( $\alpha$ )	8,52 l/min
Variância da intensidade ( $\beta^2$ )	22,1 (l/min) <sup>2</sup>
Duração ( $\tau$ )	$\tau = 0,75$ min
Variância da duração ( $\omega^2$ )	$\omega^2 = 2,25$ (min) <sup>2</sup>

Fonte: Autor (2020)

No final desse processo, o código em R realiza a simulação hidráulica dos sistemas novamente, com os novos padrões de consumo, e identifica e armazena as direções dos fluxos em cada tubulação.

### **3.3. Construção de Grafos Dirigidos**

Para aplicação do algoritmo de busca em profundidade que analisa a conectividade entre os nós do sistema, é necessário representar o modelo hidráulico por meio de grafos.

Na Teoria dos Grafos, a matriz de adjacência é a matriz  $mxm$ , onde, elemento  $ij$  é o número de arestas relacionando o vértice  $i$  ao vértice  $j$  (PEREIRA e CÂMARA, 2008). Nesta aplicação, os nós dos modelos hidráulicos são representados como os vértices de um grafo, e as tubulações são representadas como as arestas.

Esses elementos são representados por uma matriz de adjacência, considerando que não há peso atribuído a nenhum elemento. Considera-se e representa-se também o modelo hidráulico como um grafo dirigido, visto que a direção do fluxo, representado por meio de arestas, é o que vai possibilitar a identificação dos clusters fortemente conectados, como apresentado por Terada (1991).

### **3.4. Identificação de *Clusters***

O método apresentado por Perelman e Ostfeld, 2012 foi selecionado para identificação de clusters na metodologia. A escolha deu-se pelo menor nível de complexidade do trabalho e possibilidade maior de implementação dentro do prazo do programa de mestrado.

As matrizes de adjacência são lidas pelo código, e então os clusters fortemente e fracamente conectados são identificados. Grupos fortemente conectados são clusters onde todos os nós possuem caminhos de ida e volta, ou seja, fluxo reverso. Os grupos fracamente conectados são aqueles em que os nós possuem apenas uma direção de fluxo.

Estipulou-se também que clusters (fracos ou fortes) que fossem 10% menores do que o maior cluster identificado estariam classificados como clusters pequenos. Isso garante que os tamanhos dos grupos sejam relativamente parecidos. Esses clusters foram agrupados aos clusters adjacentes, visto que é inviável para uma companhia de saneamento implementar setores pequenos.

Após esse processo, os nós remanescentes são encontrados (caso existam), e associados a clusters que se encontram a menor distância.

### **3.4.1. Objetos de Rede**

Para comparação, foram identificadas também válvulas reguladoras de pressão e bombas ativas, chamadas neste trabalho de objetos da rede, para serem incluídas como variável de decisão na seleção/identificação dos setores pelo código.

O código busca esses elementos, que são descritos no arquivo de modelagem hidráulica pelo próprio epanet, e guarda essas informações para verificar se os mesmos possuem uma área de influência específica que poderia ser considerada como um subsetor da rede.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As demandas estimadas pelo PRP influenciam diretamente na direção do fluxo nas tubulações. O número de tubulações com fluxo reverso antes do PRP e depois do PRP são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Contagem de tubulações com fluxo unidirecional e bidirecional, antes e depois da aplicação do PRP

Sistema	Antes PRP		Depois PRP	
	Número de tubulações com fluxo unidirecional	Número de tubulações com fluxo bidirecional	Número de tubulações com fluxo unidirecional	Número de tubulações com fluxo bidirecional
<b>Sistema 1</b>	326	0	234	92
<b>Sistema 2</b>	419	4	334	89
<b>Sistema 3</b>	1338	9	1021	326

Fonte: Autor (2020)

A direção do fluxo é o que permite que o algoritmo consiga identificar os componentes fortemente conexos, portanto, a existência de fluxos bidirecionais é primordial para a aplicação deste método.

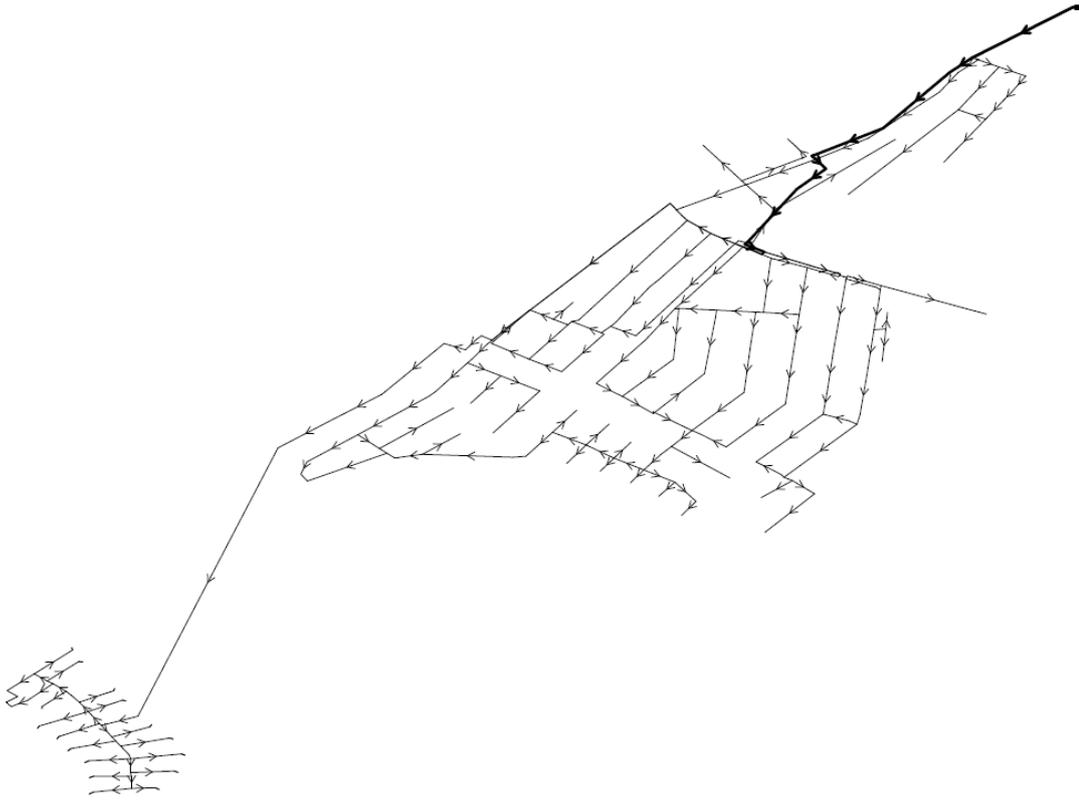
Os números mostram que antes da aplicação do PRP, as tubulações com fluxo bidirecional para os sistemas estudados representavam menos de 1% das tubulações totais. Depois da aplicação do PRP, essa porcentagem sobe para 39% no Sistema 1, 27% no Sistema 2, e 32% no Sistema 3.

As direções encontradas para os três sistemas analisados, utilizando as demandas estimadas pelo PRP, são apresentadas nas Figura 18 e Figura 19 para o Sistema 1, Figura 20 e Figura 21 para o Sistema 2, Figura 22 e Figura 23 para o Sistema 3.

As linhas vermelhas representam as tubulações onde o fluxo é reverso, e a espessura das linhas reflete a magnitude da vazão naquela tubulação específica. Os círculos vermelhos foram adicionados para facilitar a identificação das tubulações com fluxo reverso, quando as mesmas eram poucas. O Sistema 1 não possuía nenhuma tubulação com fluxo verso antes da aplicação do PRP.

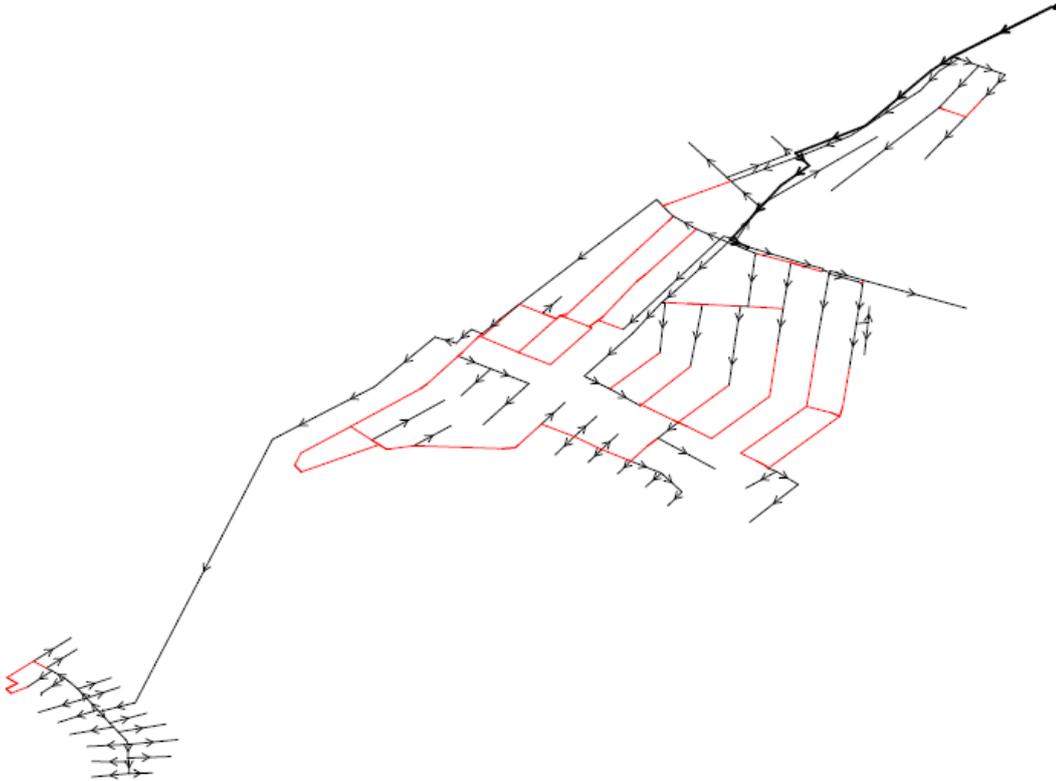
O dado de magnitude da vazão não foi considerado como peso para nenhuma análise de setorização, a espessura das tubulações foi representada nas figuras apenas para visualização das tubulações onde passam maiores vazões.

Figura 18 - Direção dos grafos para o Sistema 1 sem aplicação do PRP



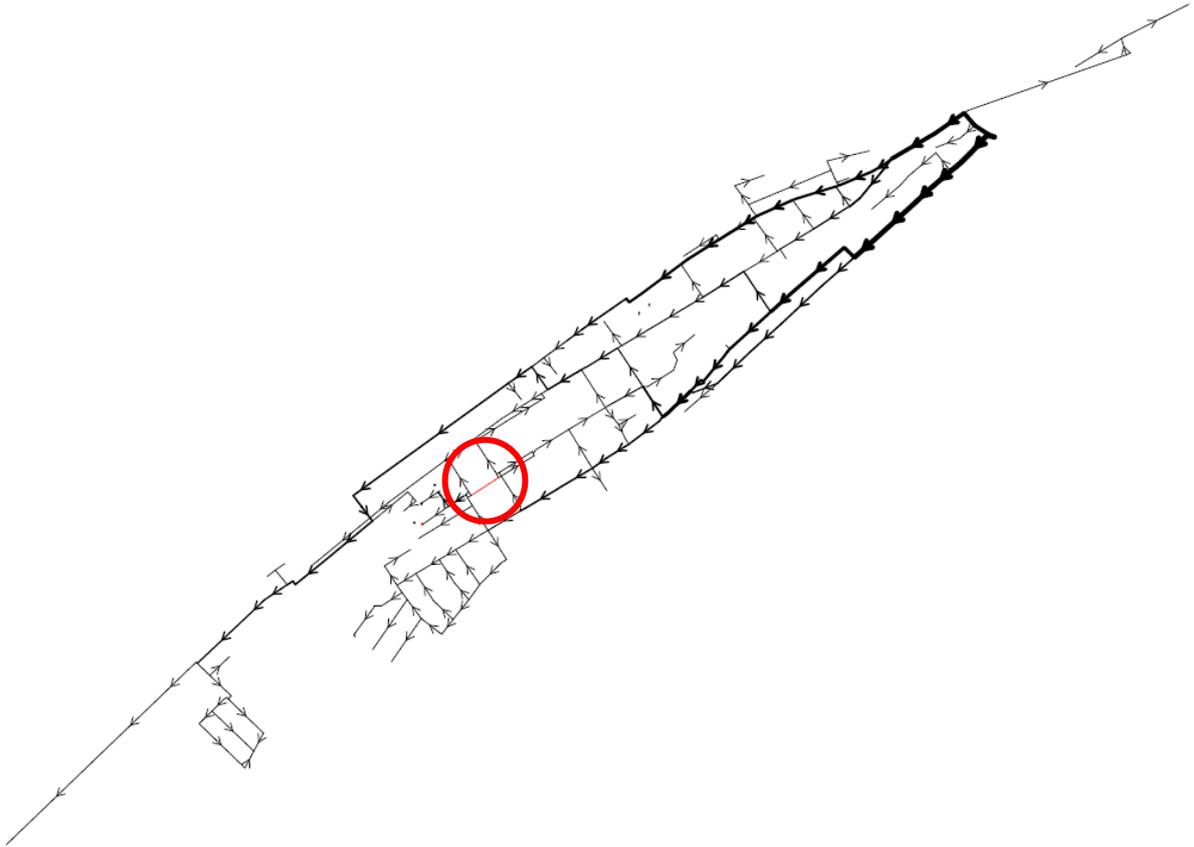
Fonte: Autor (2020)

Figura 19 - Direção dos grafos para o Sistema 1 com aplicação do PRP



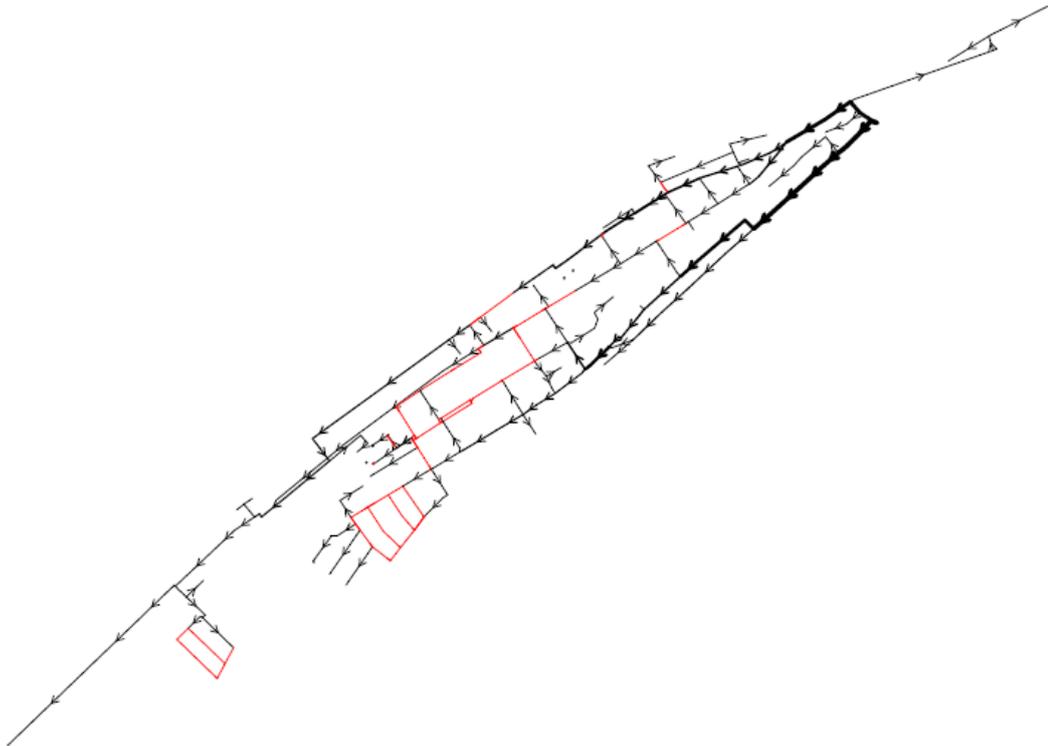
Fonte: Autor (2020)

Figura 20 - Direção dos grafos para o Sistema 2 sem aplicação do PRP



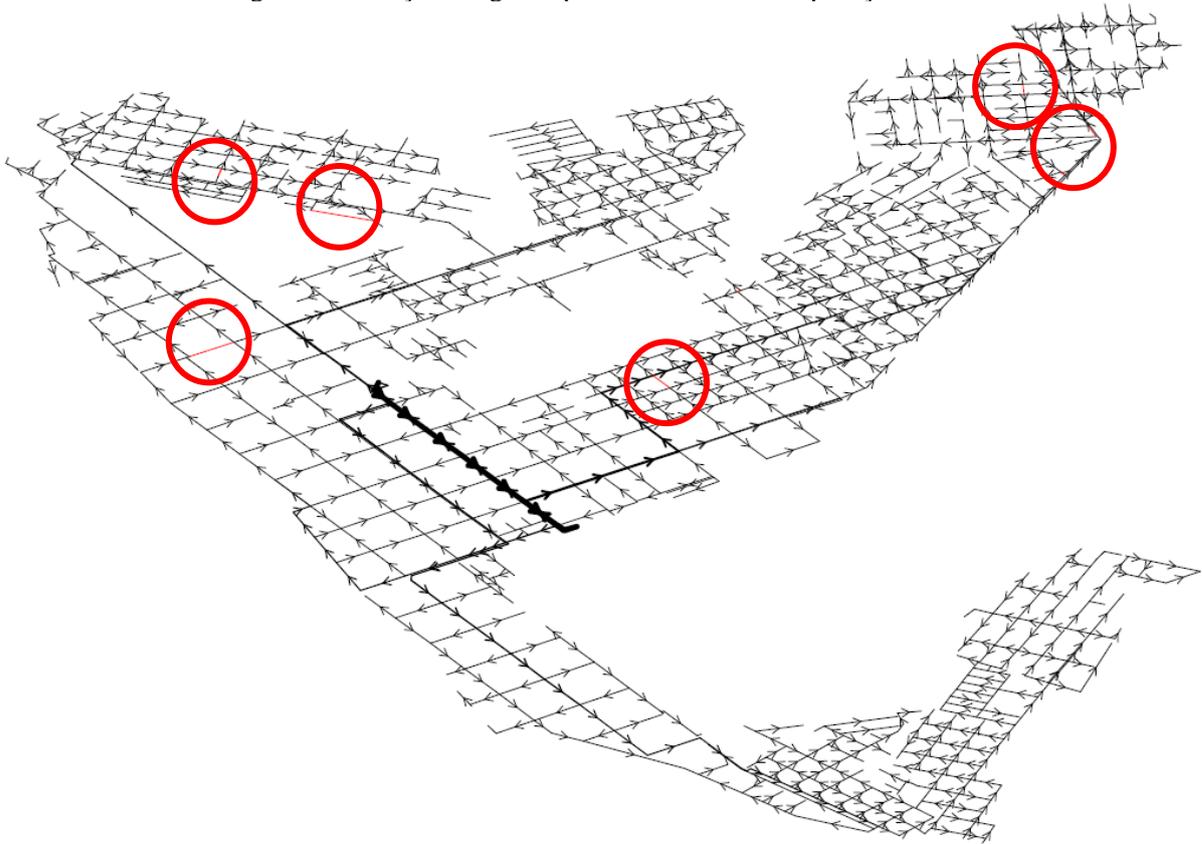
Fonte: Autor (2020)

Figura 21 - Direção dos grafos para o Sistema 2 com aplicação do PRP



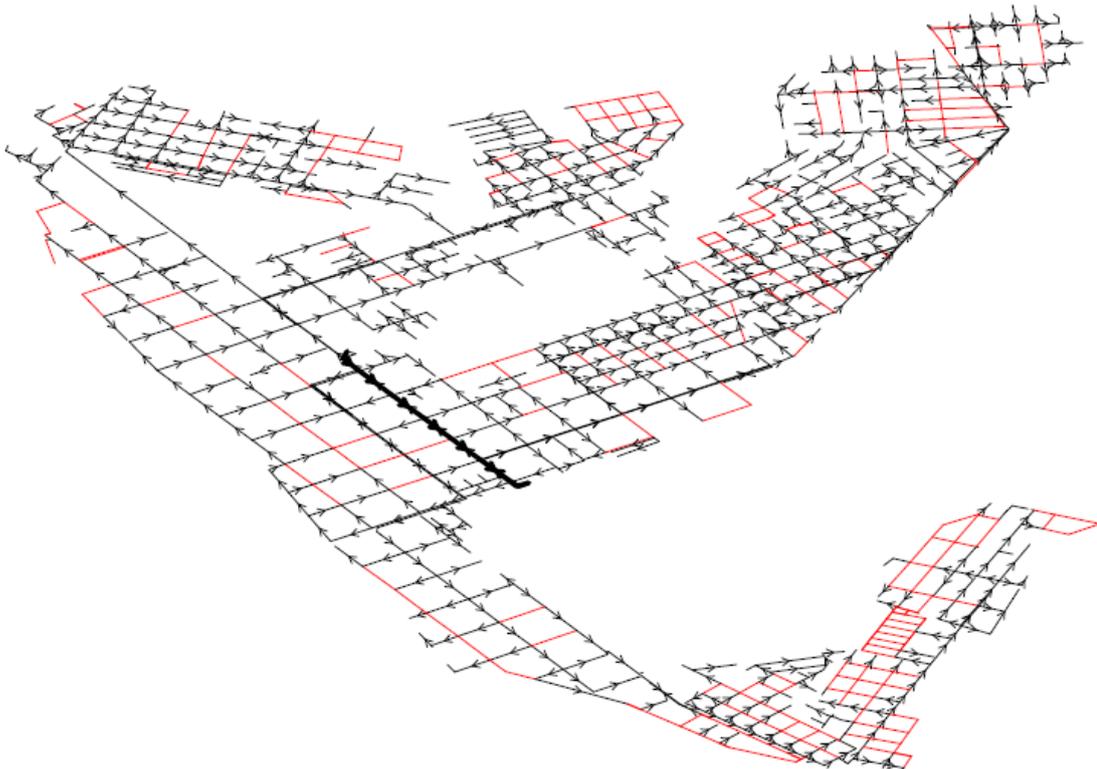
Fonte: Autor (2020)

Figura 22 - Direção dos grafos para o Sistema 3 sem aplicação do PRP



Fonte: Autor (2020)

Figura 23 - Direção dos grafos para o Sistema 3 com aplicação do PRP



Fonte: Autor (2020)

Como explicado na metodologia, foram adotados dois parâmetros diferentes para identificação dos setores, em três sistemas distintos - totalizando seis diferentes resultados. A Tabela 6 apresenta o número de objetos presentes em cada sistema e o número de setores identificados pelas diferentes metodologias, considerando os mesmos ou não.

Tabela 6 - Número de objetos no modelo hidráulico e o número de setores identificados por cada método

<b>Sistema</b>	<b>Número de objetos no modelo hidráulico</b>	<b>Número de setores identificados - Sem objetos considerados</b>	<b>Número de setores identificados - Com objetos considerados</b>
<b>Sistema 1</b>	3	2	5
<b>Sistema 2</b>	2	5	5
<b>Sistema 3</b>	22	2	5

Fonte: Autor (2020)

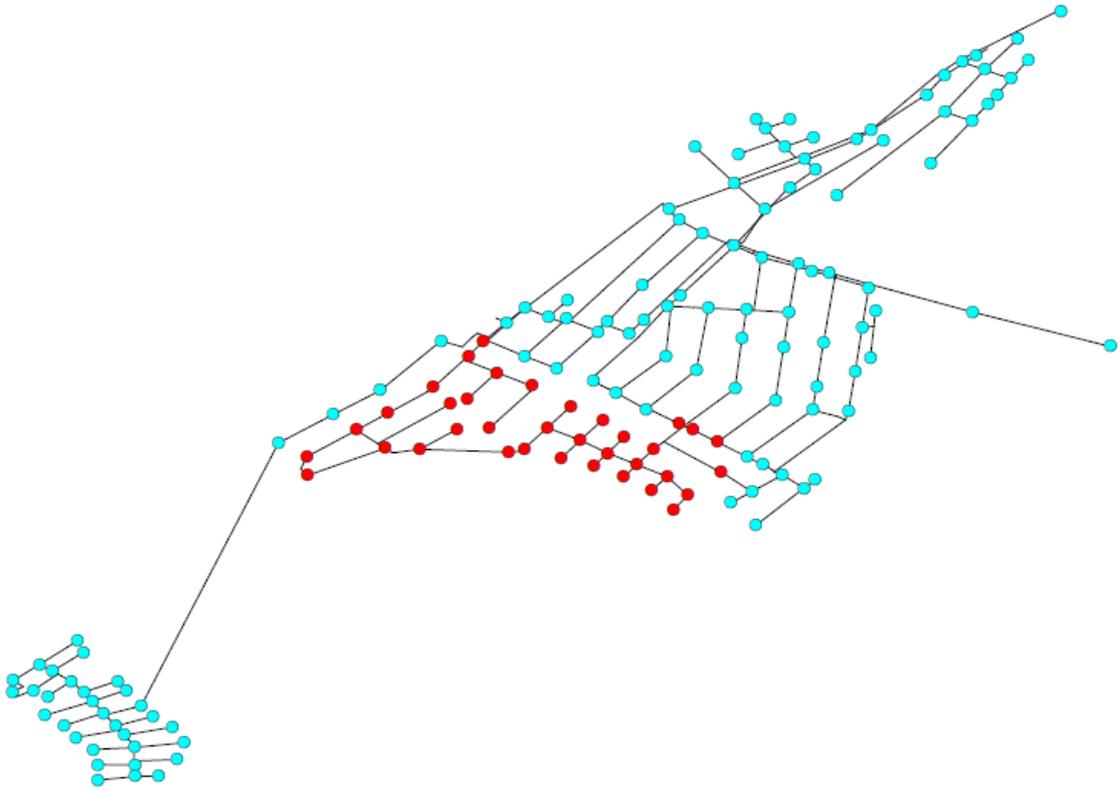
A identificação dos setores considerando objetos de rede teve resultado em dois dos três sistemas estudados (Sistema 1 e Sistema 3), possivelmente pela presença de bombas que trabalham pressurizando áreas específicas do sistema.

O Sistema 2 é o único que opera apenas por gravidade, isso pode ter influenciado o número de setores ser o mesmo em ambas as análises, pois nessa configuração o sistema não necessita obrigatoriamente de bombas e válvulas redutoras de pressão, embora as últimas possam ser empregadas em algum caso, como neste.

As Figura 24 e Figura 25 mostram os resultados das diferentes metodologias para o Sistema 1. As Figura 26 e Figura 27 para o Sistema 2, e as Figura 28 e Figura 29 para o Sistema 3.

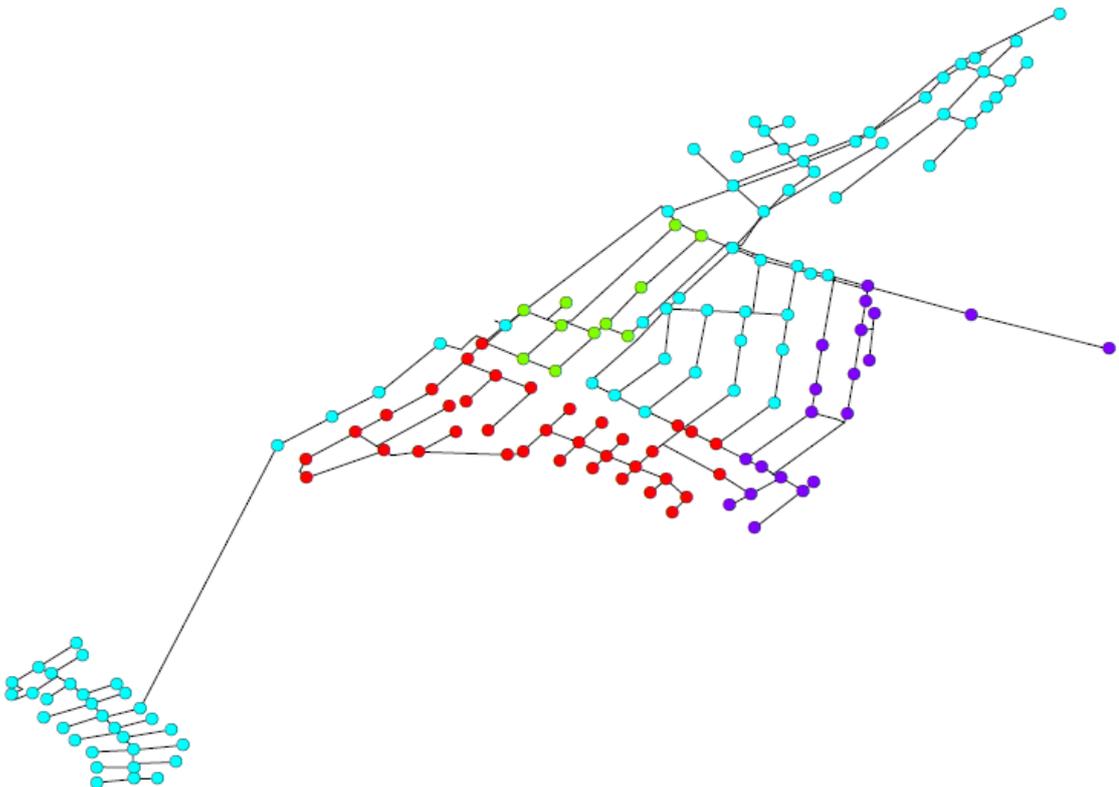
As cores dos nós nas figuras apresentadas são para identificar os diferentes setores identificados nos sistemas. Cada setor é identificado com uma cor aleatória para diferenciá-lo dos demais.

Figura 24 - Sistema 1 sem identificação de dispositivos da rede de abastecimento



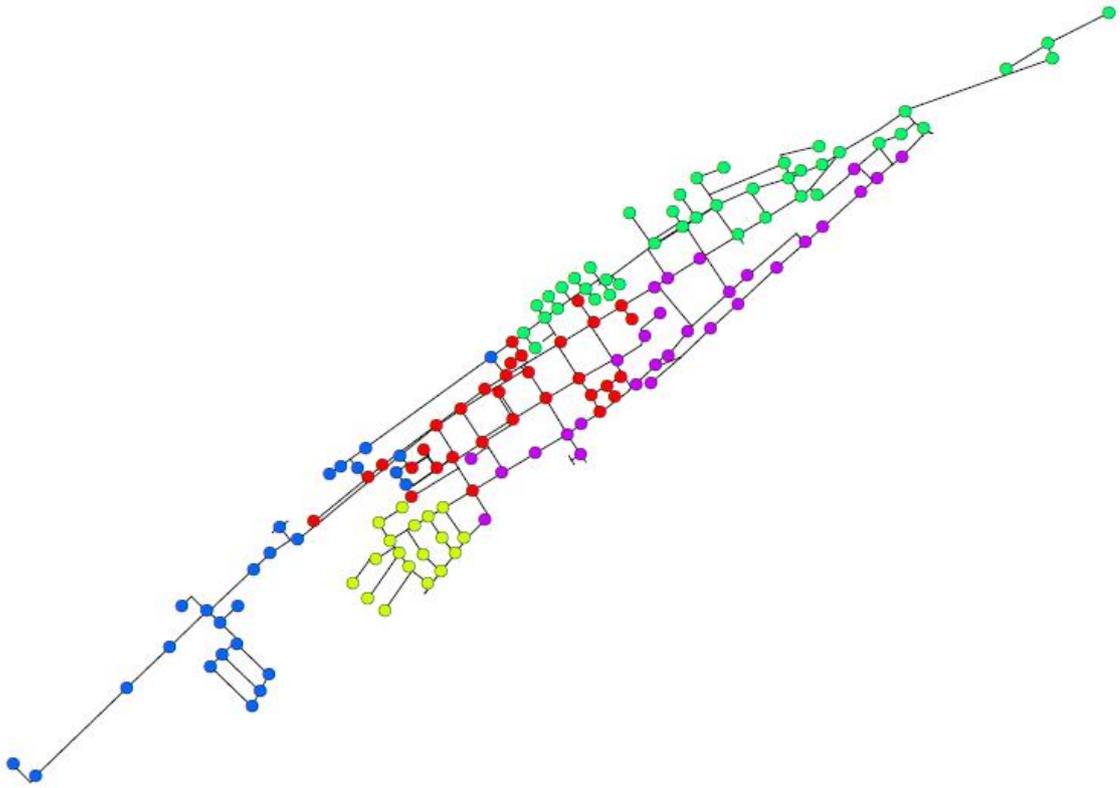
Fonte: Autor (2020)

Figura 25 - Sistema 1 com identificação de dispositivos da rede de abastecimento



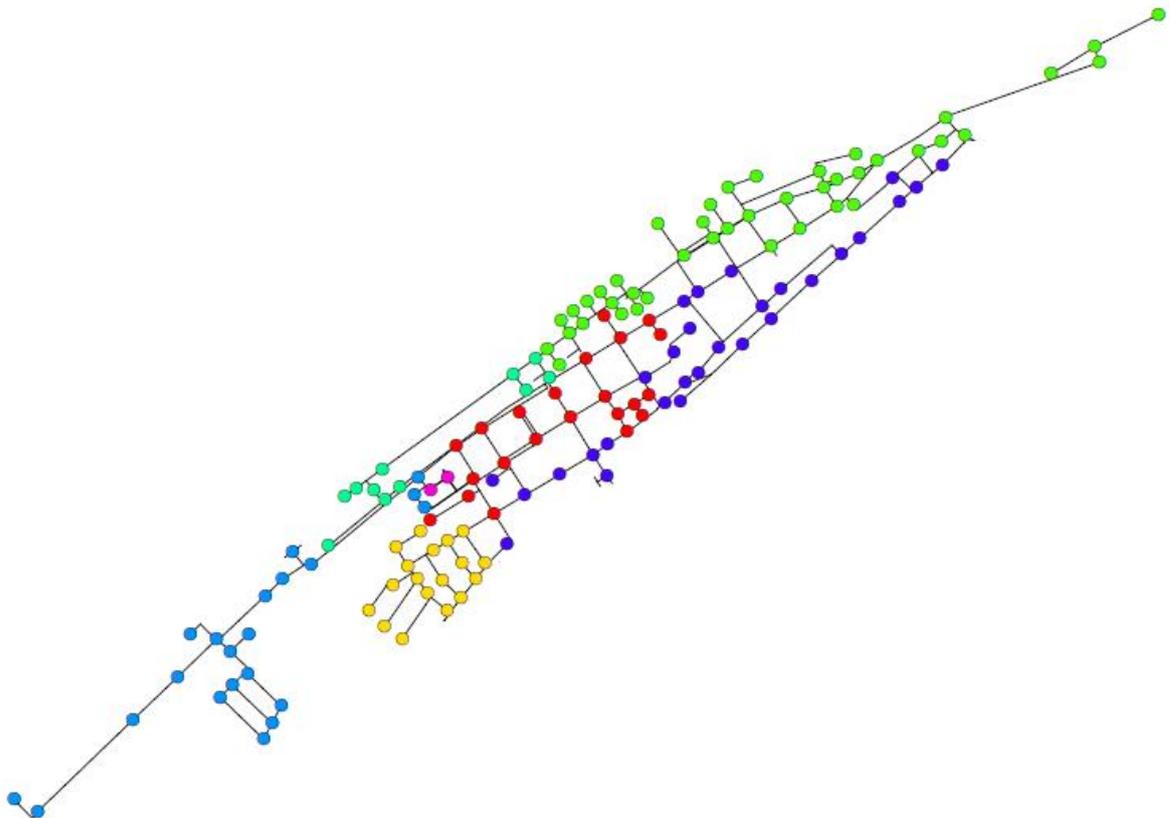
Fonte: Autor (2020)

Figura 26 - Sistema 2 sem identificação de dispositivos da rede de abastecimento



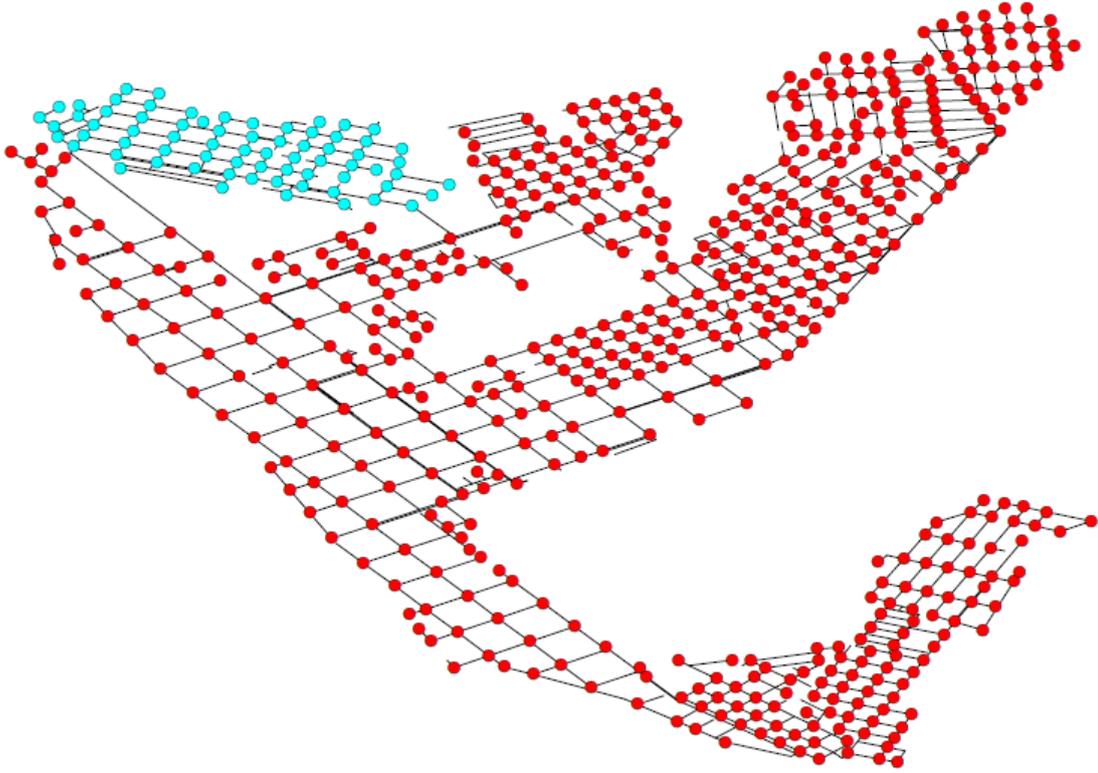
Fonte: Autor (2020)

Figura 27 - Sistema 2 com identificação de dispositivos da rede de abastecimento



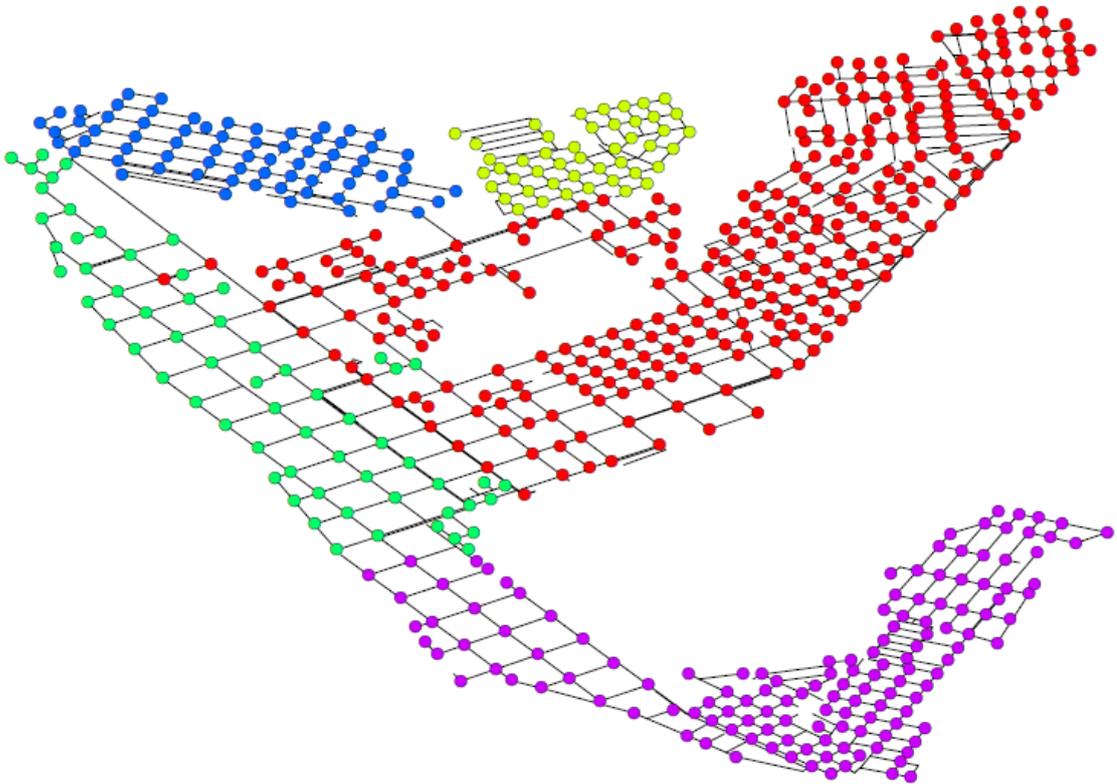
Fonte: Autor (2020)

Figura 28 - Sistema 3 sem identificação de dispositivos da rede de abastecimento



Fonte: Autor (2020)

Figura 29 - Sistema 3 com identificação de dispositivos da rede de abastecimento



Fonte: Autor (2020)

Ao interpretar os resultados, é possível observar que ao considerar os dispositivos do sistema de abastecimento (registros, válvulas, bombas), a resposta da classificação dos *clusters* é diferente – melhorando a compreensão do modelo hidráulico e do sistema como um todo, permitindo identificar setores já existentes – validados com as companhias de abastecimento responsáveis pelos sistemas estudados.

Não é possível afirmar qual é a melhor configuração para o ponto de vista operacional pois não foram consideradas informações de vazão e pressão no método apresentado.

A representação da magnitude da vazão, mesmo não sendo considerada na identificação dos setores, permite reconhecer quais são as adutoras do sistema.

A interpretação do funcionamento do sistema é otimizada com os resultados apresentados pelo trabalho, assim como apresentado no trabalho de Perelman e Ostfeld, 2012. Nota-se também que, os parâmetros do PRP interferem diretamente nos resultados desta metodologia, visto que a direção do fluxo nas tubulações não varia significativamente quando o mesmo não é considerado.

## 5. CONCLUSÕES

Setorizar uma rede de abastecimento tem-se mostrado um processo imprescindível no auxílio do controle e redução de perdas, no entanto, ainda prova-se ser um estudo de grande complexidade, tendo em vista a quantidade de variáveis passíveis de análise.

A Teoria dos Grafos, aplicada a uma sequência de regras lógica, contribui no processo de setorização e entendimento de sistemas de abastecimento, simplificando seu entendimento e propondo possíveis setores para uma rede existente.

O processo de estimativa dos parâmetros PRP utilizados no trabalho se mostraram essenciais na aplicação do método, visto que, usualmente, as demandas adotadas para cálculo da direção dos fluxos na rede são fictícias e podem não apresentar o comportamento real da água na rede de distribuição.

Neste trabalho, foram propostos 2 métodos de identificação de *clusters* e ambos apresentam resultados satisfatórios. O método de análise que leva em consideração os dispositivos da rede de abastecimento apresenta resultados mais conclusivos no quesito entendimento da rede na maior parte dos sistemas estudados.

Recomenda-se investigações mais detalhadas quando o método for utilizado para sugestão de novos setores. No estudo, são consideradas apenas as variáveis de direção do fluxo e os dispositivos na rede, e, para projetos de setorização é importante avaliar também os parâmetros hidráulicos de vazão e pressão do sistema.

Recomenda-se também a adoção de índices de avaliação da setorização proposta para melhor quantificar os benefícios e a viabilidade das soluções apresentadas pelo método.

## 6. REFERÊNCIAS

ACOSTA, M. V. A., SPREAFICO, E. V. P. **Grafos e sua contribuição para o agronegócio**. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 5, n. 1, 2017.

ALBANO, G. D. **Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático de Qualidade de Água em Represas (CE-QUALR1) Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí - Sistema Cantareira**. Dissertação: Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2004.

ALONSO, J. M., ALVARRUIZ, F., GUERRERO, D., HERNÁNDEZ, V., RUIZ, P. A., VIDAL, A. M., ..., ULANICKI, B. **Parallel computing in water network analysis and leakage minimization**. Journal of Water Resources Planning and Management- ASCE - J WATER RESOUR PLAN MAN-ASCE, 126. 10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:4(251), 2000.

ALVISI, S.; FRANCHINI, M.; MARINELLI, A. **A stochastic model for representing drinking water demand at residential level**. Water Resources Management, v. 17, n. 3, p. 197-222, 2003.

BARRETO, G. C.; GOMES, D. M.; GUTIERREZ, L. A. C. L.; PEREIRA, J. **Impacto da setorização no abastecimento de água em áreas urbanas**. VI SEREA-Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa, v. 5, 2006.

BEZERRA, P. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água: tecnologias de controle**. João Pessoa: Editora Universitária da Universidade Federal da Paraíba, UFPB, 1ª ed., 2013.

BLOKER, E. J. M. **Modeling water demand patterns; description and evaluation of simulation model SIMDEUM**. Kiwa NV, Nieuwegein, The Netherlands, 2006.

BUCHBERGER, S. G.; LI, Z. **PRPsym: A Model System for Simulation of Stochastic Water Demands**. World Environmental and Water Resources Congress. [S.l.]: ASCE. p. 1-13, 2007.

BUCHBERGER, S.; WU, L. **Model for Instantaneous Residential Water Demands**. *Journal of Hydraulic Engineering*. Cincinnati. p. 232-246, 1995.

BUTLER, D. **Leakage Detection and Management: A Comprehensive Guide to Technology and Practice in the Water Supply Industry**, 2000.

CARDOZO, O. D., GÓMEZ, E. L., & PARRAS, M. A. **Teoría de grafos y sistemas de información geográfica aplicados al transporte público de pasajeros en Resistencia (Argentina)**. *Revista Transporte y Territorio*, n. 1, p. 89-111, 2009.

CASTRO-GAMA, M. E.; PAN, Q.; JONOSKI, A.; SOLOMATINE, D. **A graph theoretical sectorization approach for energy reduction in water distribution networks**. *Procedia engineering*, v. 154, p. 19-26, 2016.

CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., RIVEST, R. L., & STEIN, C. **Introduction to algorithms**, 2nd ed. Cambridge: MIT, 2001.

CREACO, E.; BLOKKER, M.; BUCHBERGER, S. **Models for generating household water demand pulses: literature review and comparison**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 143, n. 6, p. 1-11. ISSN 0733-9496, 2017.

DEL-VECCHIO, R. R., GALVÃO, D. J. C., SILVA, L., & LIMA, R. F. V. L. **Medidas de Centralidade da Teoria dos Grafos aplicada a Fundos de Ações no Brasil**. *XLI SBPO–Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, v. 41, 2009.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M. **A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks**. *Engineering Optimization*, v. 43, n. 2, p. 193-211, 2011.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; MUSMARRA, D.; SANTONASTASO, G. F.; TUCCINARDI, F. P.; ZACCONE, G. B. **Software for partitioning and protecting a water supply network**. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 33, n. 1, p. 55-69, 2016.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; SANTONASTASO, G. **Ant algorithm for smart water network partitioning**. *Procedia Engineering*, 70. 525–534. 10.1016/j.proeng.2014.02.058, 2014.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; SANTONASTASO, G. F.; TZATCHKOV, V. G.; ALCOCER-YAMANAKA, V. H. **Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 140, n. 5, p. 620-629, 2013.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; SANTONASTASO, G.; VENTICINQUE, S. **Graph partitioning for automatic sectorization of a water distribution system**, 841-846, 2011.

FARLEY, M., WYETH, G., GHAZALI, Z. B. M., Istandar, A., SINGH, S., DIJK, N., ..., KIRKWOOD, E. **The Manager's Non-Revenue Water Handbook a Guide to Understanding Water Losses**. Ranhill Utilities Berhad and the United States Agency for International Development (USAID), p. 110. Malaysia, 2008.

FARLEY, M. **Leakage Management and Control. A Best Practice Training Manual**. World Health Organization (WHO). Geneva, 2001.

GARCIA, V. J., GARCIA BARTUAL, R., CABRERA, E., ARREGUI, F., & GARCIA SERRA, J. **Stochastic model to evaluate residential water demands**. Journal of water resources planning and management, v. 130, n. 5, p. 386-394, 2004

GIUSTOLISI, O. **Considering actual pipe connections in water distribution network analysis**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 136, n. 11, p. 889-900, 2010.

GOMES, R; SÁ MARQUES, A.; SOUSA, J. **Identification of the optimal entry points at District Metered Areas and implementation of pressure management**. Urban Water Journal, 2001, v. 9, n. 6, p. 365-384, 2012.

GUERCIO, R.; MAGINI, R.; PALLAVICINI, I. **Instantaneous residential water demand as stochastic point process**. Ecology and the Environment, v. 48, p. 129-138. ISSN ISSN 1743-3541, 2001.

HAJEBI, S., TEMATE, S., BARRETT, S., CLARKE, A., & CLARKE, S. **Water distribution network sectorisation using structural graph partitioning and multi-objective optimization**. Procedia Engineering, v. 89, p. 1144-1151, 2014.

HERNANDES, F.; BERTON, L.; CASTANHO, M. J. **O problema de caminho mínimo com incertezas e restrições de tempo**. Pesqui. Oper., Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 471-488, 2009.

IME - Instituto de Matemática e Estatística. Disponível em: <<https://www.ime.usp.br>>  
Acesso em: 12 junho de 2018.

JAIN, A. K.; MURTY, M. N.; FLYNN, P. J. **Data clustering: a review**. ACM Computing Surveys, v. 31, n. 3, p. 265-323, 1999.

KLINGEL, P; KNOBLOCH, A. **Methods and Instruments for Reducing Real Water Losses**. In: Guidelines for Water Loss Reduction. A Focus on Pressure Management. Germany. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (GIZ) and VAG Armaturen. 236p, 2011.

LAU, H. T. **A Java library of graph algorithms and optimization**. Boca Raton: Chapman & Hall/CR, 2007.

MENDES-DA-SILVA, W. **Board interlocking, desempenho financeiro e valor das empresas brasileiras listadas em bolsa: análise sob a ótica da teoria dos grafos e de redes sociais**, Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2010.

MORRISON, J; TOOMS, S; ROGERS, D; **DMA Management Guidance Notes**. IWA, 2007.

NICOLINI, M.; ZOVATTO, L. **Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 135 Issue 3, 2009.

OSTROSKI, A.; MENONCINI, L. **Aplicações práticas da teoria dos grafos**. Trabalhos anais da Unochapeco, Apresentação Oral, 2009.

PECLY, P. H. D.; MELLO, J. **A Teoria dos Grafos na Análise do Fluxograma do Curso de Engenharia de Produção da UFF**. Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção, v. 13, p. 20-33, 2013.

PEREIRA, G. M. R.; DA CÂMARA, M. A. **Algumas Aplicações da Teoria dos Grafos**. FAMAT em Revista, n. 11, 2008.

PERELMAN, L. S.; ALLEN, M.; PREIS, A.; IQBAL, M.; WHITTLE, A. J. **Flexible reconfiguration of existing urban water infrastructure systems**. Environmental science & technology, v. 49, n. 22, p. 13378-13384, 2015.

PERELMAN, L. S.; ALLEN, M.; PREIS, A.; IQBAL, M.; WHITTLE, A. J. **Automated sub-zoning of water distribution systems**. *Environmental Modelling & Software*, 65, 1–14, 2015

PERELMAN, L.; OSTFELD, A. **Topological clustering for water distribution systems analysis**. *Environmental Modelling & Software*, v. 26, n. 7, p. 969-972, 2011.

PERELMAN, L.; OSTFELD, A. **Water-Distribution Systems Simplifications through Clustering**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138. 218-229. 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000173, 2012.

POHL, I. **Bi-directional and heuristic search in path problems**. Stanford Linear Accelerator Center, Calif., 1969.

RACINE, J. S. **Rstudio: A Platform-Independent IDE for R and Sweave**. *Journal of Applied Econometrics*, v. 27, p. 167-172, 2012.

ROSSMAN, Lewis A. **EPANET User's Manual** - Drinking Water Research Division, Office of Research Development, U. S. Environmental Protection Agency, 2000.

SABESP. **Distrito de Medição e Controle – DMC, Distrito de Manobra – DM**. Subprograma Implantação de Distritos de Manobra e Distritos de Medição e Controle. Superintendência de Planejamento e Desenvolvimento da Metropolitana, p. 78, 2008.

SALVIANO, I. R. **Conectividade e a teoria dos grafos= um caminho para a conservação e manejo dos corredores ecológicos**, 2011.

SANTOS, R. B.; NETO, C. F. **Tomografia 2D baseado em dados de GPR - Modelo Direto via Princípio de Fermat**. 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, SEG Global Meeting Abstracts: 884-888, 2011.

SOUZA JÚNIOR, J. C. **Distritos de medição e controle como ferramenta de gestão de perdas em redes de distribuição de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2014.

SOUZA, E.V.; COSTA, M.A.S.; **Management system for improving the efficiency of use water systems water supply**, 2013.

TARJAN, R. **Depth-first search and linear graph algorithms**. SIAM journal on computing, v. 1, n. 2, p. 146-160, 1972.

TERADA, R. **Desenvolvimento de algoritmos e estruturas de dados**. São Paulo: Makron, 1991.

TWORT, A. C.; RATNAYAKA, D. D.; BRANDT, M. J. **Water supply**. Butterworth-Heinemann, 2000.

TZATCHKOV, V. G.; ALCOCER-YAMANAKA, V. H.; BOURGUETT ORTÍZ, V. **Graph theory-based algorithms for water distribution network sectorization projects**. In: Water Distribution Systems Analysis Symposium, p. 1-15. 2008.

UK WATER AUTHORITIES ASSOCIATION. **Report 26 Leakage Control Policy & Practice**. 1980.

VEGAS NIÑO, O. T.; MARTINEZ ALZAMORA, F. & TZATCHKOV, V. **Aplicación de la teoría de grafos a la identificación de subsistemas hidráulicos en redes de distribución de agua**. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Peru, 2016.

VERZANI, J. **Using R in Introductory Statistics Courses with the pmg Graphical User Interface**. Journal of Statistics Education, v. 16, n. 1, p. 01-17, 2008.

WATER AUTHORITIES ASSOCIATION AND WATER RESEARCH CENTRE. **Leakage Control Policy and Practice, Technical Working Group on Waste of Water**. WRc Group. London, 1985.

WATER INDUSTRY RESEARCH LTDA. **A Manual of DMA Practice**. UK Water Industry Research. London, 1999.

ALCOCER-YAMANAKA, V. H.; TZATCHKOV, V. G.; ARREGUIN-CORTES, F. I. **Modeling of drinking water distribution networks using stochastic demand**. Water Resources Management, v. 26, n. 7, p. 1779-1792, 2012.