

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA OPERAÇÃO DE**  
**REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: Uma Revisão Sistemática da Literatura**

**HALINE COSTA DOS SANTOS**

**ITAJUBÁ**  
**2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**HALINE COSTA DOS SANTOS**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA OPERAÇÃO DE**  
**REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: Uma Revisão Sistemática da Literatura**

Defesa de Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos – MEMARH da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Linha de Pesquisa:** Meio Ambiente e Recursos Hídricos

**Tema do Projeto de Pesquisa:** Técnicas de otimização aplicada para controle de perdas de água em sistemas de distribuição de água

**Orientador:** Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva (UNIFEI)

**Coorientador:** Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares (UnB)

**ITAJUBÁ**  
**2021**

**HALINE COSTA DOS SANTOS**

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA OPERAÇÃO DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: Uma Revisão Sistemática da Literatura**

Defesa de Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos – MEMARH da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Itajubá, 09 de março de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva (UNIFEI)

Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares (UnB)

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (UNIFEI)

Prof. Dr. José Antonio Tosta dos Reis (UFES)

Dedico este trabalho a todos aqueles que torceram por mim desde o início desta etapa.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Maria Clarete Costa e Edmilson José dos Santos, pela educação e incentivo que me possibilitaram chegar até aqui.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, por me instruir e direcionar sempre às melhores escolhas em todas as etapas da pesquisa.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares pelos ensinamentos e paciência.

Aos demais professores por todo conhecimento. Os meus sinceros agradecimentos, à todos que de alguma forma estiveram presente durante esse período.

Aos meus colegas de curso por todo apoio e suporte que contribuíram para a obtenção do título de mestre.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - com a bolsa de estudos processo n° 88882.430034/2019-01.

Agradeço ao Projeto Redecope Finep – MCT (Ref. 0983/10) - Ministério da Ciência e Tecnologia intitulado “Desenvolvimento de tecnologias eficientes para a gestão hidro energética em sistemas de abastecimento de água” e Programa Pesquisador Mineiro da Fapemig pelo PPM - 00755-16 além de ser grato ao NUMMARH- Núcleo de Modelagem em Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos da UNIFEI.

*O que não te desafia, não te transforma  
(Autor desconhecido).*

## RESUMO

Há muito tempo são encontrados na literatura pesquisas que objetivam a otimização dos sistemas de abastecimentos de água, seja relacionado ao design, operação, calibração ou testes de redes. Diante do crescente aumento populacional, tomando como base que os sistemas de distribuição de água envolvem energia, além do recurso natural finito, otimizar os processos relacionados à operação das redes surge com a necessidade de implantar técnicas que buscam, dentre outros objetivos, minimizar custos e perdas, controlar pressão dentro das tubulações, que tem a finalidade de garantir ao consumidor água em quantidade e qualidade suficientes. Com o objetivo de contribuir com as pesquisas acerca da aplicação de técnicas de otimização para operação ótima de redes de distribuição de água, a revisão sistemática da literatura foi realizada com o uso do *software* StArt, que auxilia na estruturação de uma revisão sistemática, com o intuito de reunir trabalhos relevantes no período de 1977 a 2020. A coleção de 87 artigos partiu de uma busca que originou 637 resultados, sendo 335 da base de dados Web Of Science, 152 trabalhos da base Scopus, 100 resultados da base de dados Science Direct, e 49 artigos provenientes do Google Academic, 1 artigo clássico foi adicionado manualmente ao sistema StArt. A pesquisa seguiu uma metodologia de busca. Esse resultado originou-se a partir do pré estabelecimento de palavras-chave de busca e aplicação de filtros de pesquisa. O afinamento dos resultados iniciou-se com aplicação de critérios de inclusão e exclusão de artigos, com o intuito de selecionar aqueles mais direcionados ao tema de otimização de operação de redes de abastecimento de água. Posteriormente foi realizada uma análise de qualidade, onde cada artigo foi pontuado fundamentando-se em 10 critérios de qualidade pré-estabelecidos. Foram extraídos dados referentes ao método de otimização aplicado, número de funções objetivo (mono ou multiobjetivo), quantidade de restrições utilizadas, quantidade de variáveis de decisão empregadas, aplicação ou não de função penalidade, tipo do sistema (bombeamento ou configuração de válvulas), tipo de rede estudada (real ou teórica) e simulador hidráulico. Os resultados indicam que dentre os artigos avaliados, os algoritmos genéticos (simples, híbrido e multiobjetivo) são os métodos de otimização mais empregado, e a maioria desses trabalhos utilizam 5 ou mais restrições e variáveis de decisão. A aplicação de função penalidade e não aplicação, ficaram bastante equilibradas entre os trabalhos, correspondendo a 49% e 51% respectivamente. Já o tipo de sistema dos estudos, os sistemas de bombeamento representam a grande maioria, bem como o tipo de rede teórica e o simulador hidráulico EPANET.

**Palavras-Chave:** Otimização. Operação. Redes de Distribuição de Água. Revisão Sistemática de Literatura.

## ABSTRACT

In last time research of to optimize water supply systems has long been found in the literature, whether related to the design, operation, calibration or testing of networks. In view of the growing population increase, based on the fact that water distribution systems involve energy, in addition to the finite natural resource, optimizing the processes related to the operation of the networks arises with the need to implement techniques that seek, among other objectives, to minimize costs and losses, control pressure inside the pipes, which has the purpose of guaranteeing water to the consumer in sufficient quantity and quality. The present study was carried out using the StArt software, which helps in structuring a systematic review, in order to gather relevant works from 1977 to 2020. The collection of 87 articles started from a search that originated 637 results, being 335 from the Web Of Science database, 152 works from the Scopus database, 100 results from the Science Direct database, and 49 articles from Google Academic, 1 classic article was manually added to the StArt system. The research followed a search methodology. This result originated from the pre-establishment of search keywords and the application of search filters. The funneling of the results began with the application of criteria for inclusion and exclusion of articles, in order to select the one most targeted at the theme of optimizing the operation of water supply networks. Subsequently, a quality analysis was performed, where each article was scored based on 10 pre-established quality criteria. Data related to the applied optimization method were extracted, number of objective functions (single or multi-objective), number of restrictions used, number of decision variables used, application or not of penalty function; type of system (pumping or configuration of valves), type of network studied (real or theoretical) and hydraulic simulator. The results indicate that among the evaluated articles, genetic algorithms (simple, hybrid and multiobjective) are the most employed optimization method, and most of these studies use 5 or more restrictions and decision variables. The application of penalty and non-application functions were quite balanced between the jobs, corresponding to 49% and 51% respectively. The type of system studied, the pumping systems represent the vast majority, as well as the type of theoretical network and the hydraulic simulator EPANET.

**Keywords:** Optimization. Operation. Water Distribution Networks. Systematic Literature Review.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de Rede Ramificada .....	15
Figura 2 - Esquema de Rede Malhada em Anéis.....	16
Figura 3 - Rede Teórica AnyTown.....	18
Figura 4 - Esquema de funcionamento da otimização multiobjetiva .....	26
Figura 5 - Processo Básico de Funcionamento de Algoritmo Genético.....	32
Figura 6 - Fluxograma de Funcionamento NSGA II.....	34
Figura 7 - Fluxograma de Funcionamento do Algoritmo Genético Híbrido.....	35
Figura 8 - Rede de Dois Anéis Desenvolvida por Alperovits e Shamir (1977) .....	37
Figura 9 - Fluxograma de Representação da Metodologia.....	39
Figura 10 - Fluxograma de Exclusão de Artigos.....	48
Figura 11 - Métodos de otimização mais empregados nos trabalhos avaliados.....	61
Figura 12 – Tipo de função objetivo utilizada nos trabalhos avaliados .....	62
Figura 13 – Quantidade de restrições aplicadas à função objetivo dos estudos avaliados .....	63
Figura 14 – Quantidade de variáveis de decisão aplicadas às funções objetivo dos estudos avaliados .....	64
Figura 15 – Aplicabilidade da função penalidade aos métodos de otimização dos artigos avaliados .....	65
Figura 16 – Tipo de sistema de abastecimento de água utilizados pelos autores para aplicação dos métodos otimizadores .....	66
Figura 17 – Tipo de rede utilizadas na otimização dos trabalhos avaliados.....	67
Figura 18 - Simulador hidráulico mais utilizado nas pesquisas .....	68

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de Otimização para Redes de Distribuição de Água.....	27
Quadro 2 - Componentes da Pergunta da Pesquisa .....	41
Quadro 3 - Tabela de Classificação da Avaliação de Qualidade.....	44
Quadro 4 - Artigos Seleccionados para Extração de Dados.....	50

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Objetivos .....	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos .....	13
3. Fundamentação Teórica .....	14
3.1 Sistemas de Distribuição de Água .....	14
3.1.1 Rede Ramificada.....	15
3.1.2 Rede Malhada .....	15
3.1.3 Redes Reais .....	16
3.1.4 Redes Teóricas.....	17
3.2 Tipos de Sistemas de Distribuição de Água .....	19
3.2.1 Bombeamento.....	19
3.2.2 Configuração de Válvulas .....	19
3.3 Modelos de Simulação Hidráulica .....	19
3.3.1 EPANET.....	20
3.4 Otimização de Operação dos Sistemas de Distribuição de Água .....	21
3.4.1 Função Objetivo .....	22
3.4.2 Variáveis de Decisão .....	22
3.4.4 Função Penalidade.....	22
3.4.5 Otimização Pela Minimização de Custos .....	22
3.4.6 Otimização Pela Maximização da Confiabilidade da Rede.....	24
3.4.7 Otimização Pela Minimização de Perdas de Água e Controle de Pressão	25
3.5 Modelos de Otimização Multiobjetivo .....	25
3.6 Métodos de Otimização .....	27
3.6.1 Programação Linear.....	27
3.6.2 Programação Não Linear (.....	28
3.6.3 Lógica Fuzzy .....	28

3.6.4	Adaptive Search Algorithm (ASA) .....	29
3.6.5	Particle Swarm Optimization (PSO) .....	29
3.6.6	Algoritmo de Otimização Colônia de Formigas (ACO) .....	30
3.6.7	Honey Bee Mating Optimization (HBMO).....	30
3.6.8	Algoritmo Genético .....	30
4	Revisão Sistemática da Literatura .....	38
4.1	Metodologia .....	38
4.1.1	Software StArt .....	39
4.1.2	Delimitação da Questão a Ser Estudada .....	40
4.1.3	Escolha da Base de Dados .....	41
4.1.4	Definição das Palavras-Chave de Busca .....	41
4.1.5	Busca e Armazenamento de Resultados.....	42
4.1.6	Critérios de Inclusão e Exclusão para Seleção dos Artigos.....	43
4.1.7	Avaliação da Qualidade.....	44
4.1.8	Extração de Dados .....	45
4.1.9	Síntese e Interpretação de Dados.....	45
4.2	Resultados .....	46
4.2.1	Resultado de Busca e Armazenamento .....	46
4.2.2	Aplicação de Critérios de Exclusão.....	47
4.2.3	Avaliação de Qualidade dos Artigos Selecionados .....	48
4.2.4	Resultado da Extração de Dados dos Artigos Selecionados.....	49
5	Conclusão.....	69
	REFERÊNCIAS .....	71

## 1. Introdução

Devido à escassez hídrica e seu crescente desperdício, um dos maiores desafios no atual cenário socioambiental é o oferecimento de água em quantidade e qualidade adequadas para consumo, que impacta diretamente a evolução do processo social e econômico da população. No que diz respeito às companhias de abastecimento de água são apresentados dois conceitos distintos de perdas, são as perdas físicas ou reais, aquelas propriamente ditas que não foram consumidas, além de perdas não físicas ou aparentes, que corresponde à parcela da água consumida, porém não faturada (FUNASA, 2014).

Portanto, o combate às perdas físicas em um sistema reduz o consumo de energia e produtos utilizados no tratamento para obtenção de água potável, então atuar diretamente sobre esses pontos é primordial para melhorar a eficiência de um sistema de abastecimento de água, e para tal objetivo a modelagem matemática é um instrumento muito utilizado (BARROSO; GASTALDINI, 2010).

Otimizar a operação das redes é de total importância para que o consumidor final receba água em qualidade e quantidade suficientes, atendendo os requisitos operacionais do sistema. Muitos são os métodos de otimização aplicados e apresentados na literatura, entre eles, os algoritmos genéticos simples, híbrido ou multiobjetivo são os mais aplicados e testados em redes teóricas e reais por todo o mundo.

Os métodos de otimização buscam encontrar soluções ótimas de uma determinada situação, minimizando ou maximizando funções a partir das variáveis de decisão pré estabelecidas pelo programador, que podem ser monobjetivo ou multiobjetivo, ou seja atender simultaneamente um ou mais objetivos, satisfazendo restrições do sistema, que pode ser do tipo bombeamento ou configuração de válvulas para gerenciamento de pressão.

Os simuladores hidráulicos são programas que permitem executar simulações do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição. O *software* EPANET, é amplamente utilizado para modelar comportamento de redes de distribuição de água, por ser de fácil e livre acesso tornou-se o mais utilizado em trabalhos acadêmicos (ARANDIA; ECK, 2018).

Estudos que trabalham com operação ótima de redes de distribuição de água são amplamente publicados, em sua grande maioria tem se como objetivo minimizar custos de bombeamento da rede, pois, quando se trata de redes de distribuição de água, as perdas de água são diretamente relacionadas à perda de energia, o que gera prejuízos econômicos à concessionária e aos consumidores finais.

O presente estudo tem por objetivo avaliar pesquisas relevantes no que diz respeito operação de redes de distribuição de água, apresentando os principais métodos empregados durante os últimos 44 anos de pesquisas.

A revisão sistemática da literatura reuniu trabalhos de 1977 a 2020 com o intuito de observar a aplicação das técnicas e seus resultados. Na sessão 2 são apresentados os objetivos principais desta pesquisa. A sessão 3 apresenta a fundamentação teórica abordando tópicos que serão discutidos durante a pesquisa. A sessão 4, denominada “Revisão Sistemática da Literatura” apresenta a metodologia aplicada passo a passo, ilustrada com fluxogramas para facilitar a compreensão, além de expor a síntese e interpretação dos dados de forma mais minuciosa, que foi exemplificado na etapa anterior de metodologia. Ainda na sessão 4, o item 4.2 tem por objetivo apresentar graficamente e discutir os resultados obtidos. A sessão 5 conclui a pesquisa.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma revisão sistemática da literatura com a finalidade de contribuir com as pesquisas acerca da aplicação de técnicas de otimização para operação ótima de redes de distribuição de água.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Reunir e compilar estudos relevantes ao assunto;
- Identificar as principais técnicas aplicadas no que diz respeito à operação ótima de redes de distribuição de água;
- Avaliar as variáveis envolvidas nos processos de otimização;
- Detectar a evolução temporal dos métodos aplicados nos estudos.

### **3. Fundamentação Teórica**

#### **3.1 Sistemas de Distribuição de Água**

Os sistemas de abastecimento de água são constituídos por diversos componentes, que inicia na captação de água no manancial superficial ou subterrâneo. A estação elevatória é o conjunto de obras e equipamentos com a finalidade de aumentar a pressão e vazão de água tratada ou bruta para a unidade seguinte. Já a estação de tratamento de água destina-se a adequar a água bruta às condições adequadas de consumo e, por fim, a rede de distribuição é a parte do sistema formada por tubulações e órgãos acessórios que fornecem, em quantidade e qualidade exigidas, de maneira confiável e segura, o abastecimento de água tratada aos consumidores finais (TSUTIYA, 2006; ODAN; RIBEIRO REIS; KAPELAN, 2015; SANTOS, 2017).

As redes de distribuição de água representam o maior custo do sistema de abastecimento, variando entre 50% e 75% do valor total das obras do sistema (TSUTIYA, 2006). São consideradas uma das principais obras de infraestrutura urbana. Dessa forma, otimizar desde o projeto das redes, operação e manutenção é de extrema importância para seu correto funcionamento e fornecimento de serviço adequado ao consumidor final. O design ideal da rede resulta na operação adequada da mesma, porém a operação ótima exige uma análise minuciosa e precisa dos tanques e bombas do sistema (MEHZAD et al., 2018).

Devido ao aumento das tarifas, a preocupação com o uso eficiente de energia nas redes de distribuição de água é cada vez mais frequente. As empresas de saneamento são responsáveis pela despesa de 30% a 60% de energia nas áreas urbanas. O principal objetivo das concessionárias é fornecer ao cliente água em quantidade e qualidade exigidas, de maneira confiável e segura, além da constante preocupação com o preço e meio ambiente (ODAN; RIBEIRO REIS; KAPELAN, 2015).

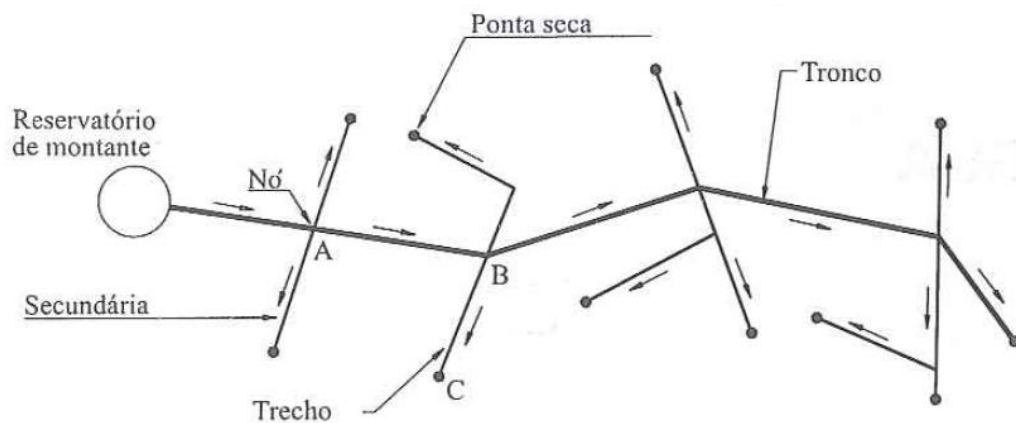
As perdas físicas de água são aquelas decorrentes de vazamentos, que ocorrem devido à más conexões nas tubulações, redes envelhecidas ou até mesmo vazamentos por alta pressão. Este último caso já resultou até mesmo em explosões, como no caso ocorrido na Ucrânia, devido à alta pressão houve o rompimento de uma rede de tubulações deixando uma cratera de 6 metros de profundidade além dos danos às estradas, casas e carros gerando alto prejuízo econômico. Outro caso semelhante aconteceu em Melbourne, na Austrália em 2012 (GUPTA; KULAT, 2018).



### 3.1.1 Rede Ramificada

O abastecimento de água nas redes ramificadas se dá por uma única tubulação, denominada primária ou tronco, que se deriva às tubulações secundárias para abastecimento dos consumidores finais. As redes ramificadas são mais simples (Figura 1), e sua principal característica é o conhecimento do sentido da vazão em qualquer trecho, além de que em caso de interrupção do fluxo de água todo abastecimento à jusante fica comprometido. É utilizada para abastecimento de pequenas comunidades ou sistemas de irrigação por exemplo (PORTO, 2006; TSUTIYA, 2006).

Figura 1 - Esquema de Rede Ramificada



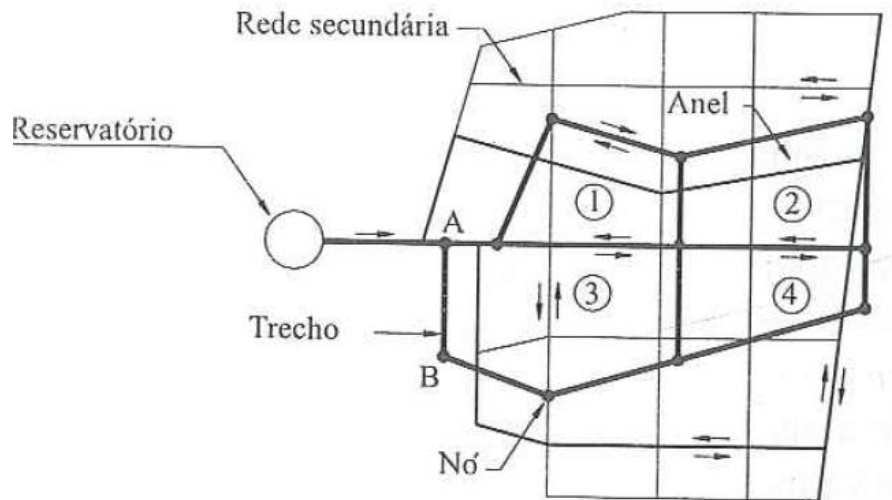
Fonte: Porto (2006)

### 3.1.2 Rede Malhada

As redes malhadas de distribuição de água recebem esse denominação por formar malhas ou anéis (Figura 2), por ser mais complexa a água pode abastecer qualquer ponto da rede por mais de um caminho facilitando a manutenção da rede sem interromper o fornecimento de água (PORTO, 2006).

Redes malhadas podem ser em anéis, que são as mais comuns nas grandes cidades e dependem de bom dimensionamento prévio para garantir o bom funcionamento, além das medições das vazões serem mais trabalhosas. A rede malhada também pode ser em blocos que tem como vantagens principais o melhor controle das pressões da rede e maior eficiência na manutenção (TSUTIYA, 2006).

Figura 2 - Esquema de Rede Malhada em Anéis



Fonte: Porto (2006)

### 3.1.3 Redes Reais

Muitos autores optam por aplicar métodos de otimização à redes reais, ou seja, redes existentes. Essa aplicação a redes reais varia das mais simples às mais complexas. Estudos que avaliam a aplicação em sistemas de abastecimento existentes são publicados há muito tempo na literatura.

Um trabalho desenvolvido por Joalland e Cohen (1980) teve como objetivo o uso de algoritmos para controle ótimo de uma das principais redes de abastecimento do sul de Paris da época, abastecendo 94 municípios, além de área industrial, totalizando uma população de 770.000 consumidores. Esse estudo obteve resultados satisfatórios, o que mostra que a aplicação de métodos otimizadores é avaliada há longo tempo.

Já em 1996, foram realizados estudos, também com aplicação de algoritmos à rede da cidade de Memphis, localizada no estado americano de Tennessee. Com objetivo de minimizar custos de bombeamento do sistema, a pesquisa também obteve resultados satisfatórios, alcançando seu objetivo principal, além de citar referências do ano de 1975, que por sua vez já avaliava a otimização de custos de bombeamento (PEZESHK; HELWEG, 1996).

Publicações recentes seguem trabalhando com operação ótima de redes reais por todo o mundo. Pesquisadores como, Martínez *et al.*, (2007) e Salomons *et al.*, (2007), que integraram um projeto denominado “POWADIMA (Potable Water Distribution Management) research Project” que tem como finalidade estabelecer a viabilidade e

eficácia da introdução de controle ótimo em tempo real para redes de distribuição de água, com o objetivo de reduzir custos operacionais e vazamentos, trabalharam com uso de algoritmos genéticos nas redes de Valencia, na Espanha e Haifa em Israel. Ambos os trabalhos objetivaram a minimização de custos de bombeamento do sistema.

Mais recentemente, Gupta e Kulat (2018) utilizaram um algoritmo genético multiobjetivo denominado Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II), trabalhando com a gestão de pressão da rede a fim de minimizar perdas de água mantendo a pressão em cada nó da rede central da maior cidade do centro da Índia Nagpur, no Estado de Maharashtra.

É possível analisar que há anos, diversos estudos são executados tomando como base grandes e pequenos sistemas, porém isso não inferioriza a grande gama de pesquisas teóricas, que servem de base para as demais aplicações.

#### **3.1.4 Redes Teóricas**

Conforme referido acima, a elaboração de pesquisas acerca de redes teóricas, servem como base para as aplicações reais. Existem redes muito conhecidas na literatura que são utilizadas por diversos autores em seus trabalhos visando as mais diversas aplicações de métodos otimizadores. Alguns deles testam inicialmente a metodologia e, em seguida, aplica-se à realidade.

Como exemplo de autores que optam por trabalhar com redes teóricas e reais na mesma pesquisa. Cita-se López-Ibáñez, Prasad e Paechter (2008), onde a abordagem proposta foi testada em uma pequena rede de teste e em uma grande rede existente. A rede de teste é bastante conhecida na literatura, denominada “Van Zyl Test Network” (VAN ZYL et al., 2004). Já a segunda testagem foi no sistema de distribuição de água de Richmond, que é um sistema real localizado no Reino Unido. A partir da aplicação do algoritmo da otimização da colônia de formigas o artigo comprovou que esse método otimizador está apto a resolver problemas relacionados à operação de bombas.

Um exemplo de rede teórica bastante empregada nos artigos é a rede de teste do *software* EPANET, justamente pela ampla utilização do simulador hidráulico. As redes disponibilizadas para tal são facilmente encontradas, como a denominada “EPANet Net3 Network” testada no artigo que objetivou a minimização de custos de energia, minimização de concentração de cloro, voltada à qualidade da água, além de minimização de custo de implantação de tanques da rede (KUREK; OSTFELD, 2013).



## **3.2 Tipos de Sistemas de Distribuição de Água**

### **3.2.1 Bombeamento**

Como refere-se a própria nomenclatura, os sistemas de distribuição de água do tipo bombeamento são aqueles onde são utilizadas bombas com a finalidade de transportar água de um ponto mais baixo a um ponto mais alto da rede, sendo as bombas responsáveis pelo fornecimento de energia para que esse movimento aconteça.

### **3.2.2 Configuração de Válvulas**

O sistema também pode funcionar por gravidade, aproveitando a topografia local que muitas vezes favorece a declividade, podendo então excluir o uso de bombas nesses casos. Porém, deve ser avaliada a pressão dentro das tubulações. De acordo com a NBR 12218 (1994, p. 2), pressão estática é definida como “pressão referida ao nível do eixo da via pública, em determinado ponto da rede, sob condição de consumo nulo.” e esta não pode ser superior a 500kPa e pressão dinâmica é definida como sendo “referida ao nível do eixo da via pública, em determinado ponto da rede, sob condição de consumo não nulo”. que não pode ser inferior a 100kPa. Portanto quando a grande diferença de nível entre os pontos gera uma grande pressão dentro da tubulação são utilizadas válvulas redutoras de pressão (VRP) com a finalidade de manter dentro dos padrões estipulados normativamente.

## **3.3 Modelos de Simulação Hidráulica**

Os primeiros modelos de simulação hidráulica surgiram na década de 80 e, com a progressão da tecnologia, diversas opções foram lançadas e testadas abordando diferentes apresentações, cálculos e funcionalidades. O gerenciamento ineficiente e funcionamento inadequado das redes de distribuição de água pode prejudicar o consumidor com a falta de abastecimento ou até mesmo contaminação da água tratada, que resulta também em prejuízos financeiros à concessionária responsável, o que deixa claro a importância de utilizar modelos de simulação hidráulica para o planejamento. (DIUANA; OGAWA, 2015).

Para operação sem falhas, é fundamental uma boa concepção de projeto, garantindo assim boa qualidade dos serviços oferecidos na distribuição de água tratada. Simular o comportamento da água nas redes a partir de um modelo que disponha de ferramentas adequadas para atingir o objetivo almejado (DIUANA; OGAWA, 2015).

Além do *software* EPANET que é muito citado nos artigos científicos, outro exemplo de simulador hidráulico é o KYPIPE, um *software* que não possui fornecimento gratuito como EPANET, mas é amplamente utilizado pelos autores. O *software* foi desenvolvido por professores de Engenharia Civil da Universidade de Kentucky que permite a modelagem não só de água, mas também de outros líquidos como petróleo e sistema de esgoto por exemplo. O KYPIPE pode ser empregado para seleção e dimensionamento de tubulações, bombas, válvulas e demais dispositivos hidráulicos (WOOD, 1995).

### 3.3.1 EPANET

Simuladores hidráulicos fazem a análise da rede de distribuição de água e são utilizados para implementar algoritmos encontrando soluções para minimizar vazamentos, controlar pressão, estabelecer cenários de projeto, calibrar modelos hidráulicos ou analisar o decaimento do cloro residual (LETTING; HAMAM; ABU-MAHFOUZ, 2017).

O EPANET é um *software* gratuito com código aberto, que foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (U.S. Environmental Protection Agency – EPA), é muito conhecido na literatura, possuindo mais de 2000 citações no Google Acadêmico, por simular o comportamento hidráulico de redes de distribuição de água executando simulações estáticas e dinâmicas (ARANDIA; ECK, 2018; ODAN, 2013)

O EPANET é escrito com código fonte em linguagem C, e posteriormente atualizado com a implementação da linguagem C++ e Python. Por seu código aberto é possível reescrevê-lo em qualquer linguagem de programação. O Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS da Universidade Federal da Paraíba UFPB traduziu, adaptou e disponibiliza o software que pode ser instalado no sistema operacional a partir do Microsoft Windows 98 (DIUANA; OGAWA, 2015; LETTING; HAMAM; ABU-MAHFOUZ, 2017; ODAN, 2013; ROSSMAN, 2009)

A interface do programa é bastante simplificada e de fácil compreensão. O software permite soluções mais rápidas de problemas de rede de distribuição de água, incluindo obter valores de vazão nas tubulações, pressão nos nós, nível dos reservatórios, no que diz respeito à qualidade da água é possível obter a concentração de componentes químicos e idade da água além de rastrear a origem da água em qualquer ponto da rede (LETTING; HAMAM; ABU-MAHFOUZ, 2017; ODAN, 2013; ROSSMAN, 2009).

### **3.4 Otimização de Operação dos Sistemas de Distribuição de Água**

Otimizar um sistema de distribuição de água consiste em maximizar ou minimizar uma ou mais funções objetivo definidas previamente, de acordo com as restrições operacionais de cada uma delas. A otimização visa aproximar-se ao máximo da solução ótima do sistema e, tratando-se de redes de distribuição de água, a complexidade se dá devido ao grande número de variáveis envolvidas além de restrições e objetivos conflitantes entre si (DE SOUSA, SOARES, ABE, 2013)

Estudar a operação ideal das redes de distribuição de água é uma questão muito importante na gestão de recursos hídricos, e diversas são as ferramentas para otimização multiobjetiva que podem ser aplicadas à computação (HOJJATI et al., 2018).

No projeto ideal de redes de distribuição de água, os componentes da rede são selecionados considerando o custo de execução do sistema e a capacidade da rede em atender o consumidor final em quantidade e qualidade suficientes, no que diz respeito à disponibilidade hídrica, pressão e qualidade da água sob as condições operacionais (LENCE; MOOSAVIAN; DALIRI, 2017).

Tratando-se de otimização multiobjetiva apresentam-se três categorias de abordagens. São elas: as compensações não dominadas entre os objetivos, os limites ótimos e a identificação da solução que melhor atenda aos parâmetros e objetivos pré-estabelecidos. Na maioria dos trabalhos apresentados na literatura, emprega-se este último citado, que é o caso do artigo proposto por Lence, Moosavian e Daliri (2017), que propõe um modelo de programação multiobjetivo para minimizar o custo da rede e maximizar sua confiabilidade (LENCE; MOOSAVIAN; DALIRI, 2017).

No artigo apresentado por Saldarriaga e Salcedo (2015), trabalha-se o gerenciamento de pressão. A problemática parte da determinação da localização ideal e configuração de um conjunto de válvulas redutoras de pressão que tem por objetivo minimizar as pressões excessivas dentro da tubulação conseqüentemente, minimizar vazamentos, que é justamente o que é trabalhado neste artigo com a utilização do NSGAII linkado ao simulador hidráulico EPANET, obtendo-se a relação entre os dois objetivos previamente proposto. Após a solução ideal ser encontrada no algoritmo, o comportamento hidráulico é avaliado para análise da viabilidade de implantação (SALDARRIAGA; SALCEDO, 2015).

### **3.4.1 Função Objetivo**

A função objetivo pode ser de minimização ou maximização de acordo com a intenção do estudo do autor. Quanto mais complexo for o sistema maior será o número de variáveis envolvidas e funções a serem avaliadas pelo algoritmo (DE PAOLA et al., 2017).

A função objetivo, muitas vezes representada na literatura por suas iniciais “FO”, é a expressão matemática que, como pode ser identificado pelo próprio termo, traduz o objetivo da otimização, quantificando a solução do problema. Ou seja, a função objetivo através da ponderação das variáveis de decisão indica se o objetivo da otimização é de maximização ou minimização (RODRIGUES et al., 2014).

### **3.4.2 Variáveis de Decisão**

As variáveis de decisão representam as condicionais do sistema e compõem tanto a função objetivo quanto as restrições. Dentro da função objetivo as variáveis de decisão são as incógnitas que serão estabelecidas na solução do problema de otimização, ou seja, são os valores que não estão fixados e deseja-se descobrir (LÓPEZ-IBÁÑEZ; PRASAD; PAECHTER, 2008; RODRIGUES et al., 2014).

### **3.4.3 Restrições**

As restrições dentro do processo são representadas em equações que limitam as variáveis de decisão e conseqüentemente restringem a otimização do problema, enquadrando-o dentro das condições reais de operação do sistema. (RODRIGUES et al., 2014).

### **3.4.4 Função Penalidade**

A função penalidade é aplicada quando deseja transformar um problema com restrições em um problema irrestrito, ou quando há violação das restrições propostas pelo programador. Alguns autores propõem o uso de uma nova função que é adicionada a função objetivo no caso das condições predeterminadas não forem satisfeitas, então elabora-se uma função penalidade para cada restrição violada (HOJJATI et al., 2018).

### **3.4.5 Otimização Pela Minimização de Custos**

Os impactos econômicos fazem com que a preocupação e desenvolvimento de procedimentos de otimização sejam cada vez mais relevantes para os sistemas de



distribuição de água, com objetivo de melhorar a gestão a custo mínimo (DE PAOLA et al., 2017).

Com o aumento populacional, mudanças climáticas e desenvolvimento das práticas agrícolas e industriais, a demanda por água e energia vem crescendo significativamente, fazendo com que os recursos hídricos e energéticos sejam cada vez mais limitados e caros. Estudos realizados mostram que são gastos por ano cerca de US\$ 4 bilhões com a energia envolvida na coleta, tratamento, bombeamento e distribuição de água potável nos Estados Unidos da América, custo esse que desconsidera manutenção e substituição das bombas. Logo, a otimização do consumo de energia gera economia significativa ao sistema (MAKAREMI; HAGHIGHI; GHAFOURI, 2017).

Os altos índices de perdas nas redes de distribuição de água representam um prejuízo econômico elevado às concessionárias tornando então a minimização dessas uma prioridade que pode ser estudado a partir de diferentes técnicas, tais como gerenciamento de pressão, melhoria dos padrões de bombeamento ou reabilitação da infraestrutura (SALDARRIAGA; SALCEDO, 2015).

As principais funções objetivo dos artigos estudados e avaliados, inclui a minimização de custos de energia de bombeamento, minimização de perdas de água do sistema e controle de pressão, mantendo o fornecimento ideal aos consumidores.

Obras analisadas entre 1995 e 2019, tratam a minimização de custos de energia de bombeamento, como objetivo principal da otimização de operação de sistemas de distribuição de água (ABDALLAH; KAPELAN, 2019; AL-ANI; HABIBI, 2014; BAGIROV et al., 2013; COSTA et al., 2015; COSTA; DE CASTRO; RAMOS, 2010; COSTA; RAMOS; DE CASTRO, 2010; DE PAOLA et al., 2017; HASHEMI; TABESH; ATAEEKIA, 2013; LÓPEZ-IBÁÑEZ; PRASAD; PAECHTER, 2008; MAKAREMI; HAGHIGHI; GHAFOURI, 2017; MALA-JETMAROVA; BARTON; BAGIROV, 2015; MARTÍNEZ et al., 2007; ORMSBEE; REDDY, 1995; PEZESHK; HELWEG, 1996; SALOMONS et al., 2007; VAN ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004; WEGLEY; EUSUFF; LANSEY, 2000).

Programar cuidadosamente a operação das bombas do sistema pode mudar os períodos de funcionamento, fazendo com que as bombas trabalhem em períodos de menor tarifa de energia e conseqüentemente ocasionar a redução do custo de energia consumida pelas bombas. De maneira geral a taxa de consumo de uma bomba depende do fluxo através da bomba, da pressão e vazão fornecida e sua eficiência (LÓPEZ-IBÁÑEZ; PRASAD; PAECHTER, 2008).

No artigo desenvolvido por Abdallah e Kapelan (2019), um novo método de otimização denominado programação de objetivos lexicográficos estendidos iterativos (iELGP) foi desenvolvido para otimizar o custo de energia e a qualidade da água (cloro residual) nas redes de água, integrando o uso de bombas de velocidade fixa e bombas de velocidade variável.

As funções objetivo dos algoritmos e métodos de minimização de custos de energia envolvem basicamente quantidade de bombas do sistema [adm], número de períodos avaliados [adm], pressão fornecida pela bomba [metros de coluna d'água], eficiência da bomba [%], tarifa de energia [R\$/kWh], e vazão [m<sup>3</sup>/s] (MEHZAD et al., 2018).

#### **3.4.6 Otimização Pela Maximização da Confiabilidade da Rede**

A confiabilidade hidráulica é uma medida que visa representar se o sistema responde positivamente, atendendo o consumidor final quanto à disponibilidade hídrica, pressão e qualidade da água, sob mudanças tais como alteração da rugosidade do tubo, variações na quantidade de água em caso de incêndio, por exemplo (LENCE; MOOSAVIAN; DALIRI, 2017).

Existem duas medidas de análise. A confiabilidade hidráulica trata-se da capacidade de resposta do sistema às alterações em suas características. Já a confiabilidade mecânica mede a capacidade do sistema de adaptar a falhas mecânicas por exemplo manter-se em operação durante falhas em válvulas ou bombas

O desempenho da rede é medido a partir da sua confiabilidade, que é a capacidade de satisfazer a demanda de água sob pressão suficiente em condições normais e anormais. O cálculo da confiabilidade é de extrema importância, porém não existe uma fórmula globalmente aceita para esse cálculo. Então a análise deve ser cuidadosamente averiguada devido à dependência de diversos parâmetros (MEHZAD et al., 2018).

Ao operar seus sistemas muitas das empresas confiam na experiência dos seus operadores que, por sua vez, preocupam-se em garantir a confiabilidade da rede, caso haja a ruptura de uma tubulação por exemplo, que geralmente é obtida mantendo os reservatórios do sistema sempre cheios. Com essa visão pode-se perceber com clareza a importância do uso da computação para otimizar a operação dos sistemas de distribuição de água (ODAN; RIBEIRO REIS; KAPELAN, 2015).

### **3.4.7 Otimização Pela Minimização de Perdas de Água e Controle de Pressão**

Trabalhar com operação de redes de abastecimento de água, está fortemente relacionado ao controle de pressão do sistema que, por sua vez, tem ligação com as perdas reais de água, que muitas vezes ocorrem por alta pressão dentro das tubulações. Portanto otimizar esses índices é uma metodologia bastante observada na literatura. Dos trabalhos avaliados, desde 1995 existem pesquisas com abordagem voltada a minimização de perdas e controle de pressão (ALVISI; FRANCHINI, 2009; BEZERRA; DA SILVA; GOMES, 2012; CREACO; PEZZINGA, 2014, 2015; DE PAOLA; GALDIERO; GIUGNI, 2017; GUPTA; KULAT, 2018; MUHAMMETOGLU et al., 2017; NAZIF et al., 2010; NICOLINI; ZOVATTO, 2009; PEZZINGA; PITITTO, 2005; SAVIĆ; WALTERS, 1995).

A principal dificuldade de aplicação dessa metodologia é manter a pressão necessária que atenda a demanda dos consumidores. De acordo com artigo de Savic e Walters (1995), foi apresentada uma metodologia para regular pressão de um sistema com uso de algoritmos genéticos. A função objetivo foi de minimização do excesso de pressão. O isolamento de bombas foi aplicado como variável de decisão e as pressões mínimas para atender a demanda foram aplicadas como restrições.

Um estudo mais recente, objetivou a redução de vazamentos através da minimização de pressão, com a utilização de um algoritmo meta-heurístico, Harmony Search (HS) e aplicação à uma rede teórica. O artigo aborda a introdução de válvulas redutoras de pressão e compara seus resultados com dois exemplos da literatura, obtendo resultados satisfatórios da aplicação da metodologia. (DE PAOLA; GALDIERO; GIUGNI, 2017).

O gerenciamento de pressão também é estudado e aplicado à redes reais, Gupta e Kulat (2018), abordaram a técnica de controle de pressão para minimização de perdas em uma rede real da Índia, com uso do NSGA II envolvendo bombas de velocidade variável. A metodologia foi comprovada com bom desempenho para rede de média complexidade, e propôs a aplicação em redes mais complexas e maiores.

### **3.5 Modelos de Otimização Multiobjetivo**

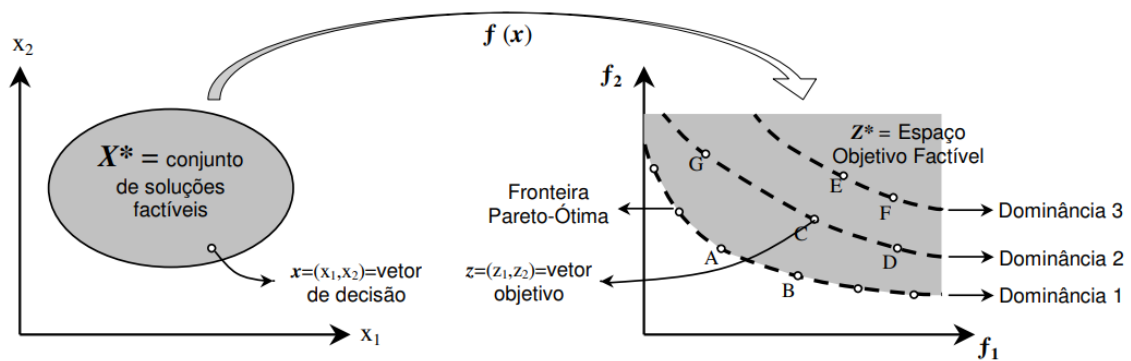
A otimização multiobjetiva tem como finalidade encontrar o melhor conjunto de soluções satisfazendo restrições dentro de um espaço de decisões, atendendo simultaneamente dois ou mais objetivos propostos. Geralmente os objetivos são

conflitantes entre si (maximização e minimização), então não existe uma única solução ótima, mas sim um conjunto de soluções eficientes que atende a função a ser otimizada, que é denominada conjunto pareto-ótimo (HASHIMOTO, 2004).

No processo de otimização é necessário além do *software* aplicado para solução do problema, um decisor com conhecimento do problema para fazer a análise da solução dentro do conjunto gerado pelo *software* (DELINSKI; COLMENERO, 2017).

Alguns exemplos de otimização multiobjetivo aplicáveis à rede de distribuição de água são apresentados no Quadro 1 e o Esquema de otimização multiobjetiva é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema de funcionamento da otimização multiobjetiva



Fonte: Hashimoto (2004)

Quadro 1 - Tipos de Otimização para Redes de Distribuição de Água

Tipo de Otimização	Objetivo	Possíveis Variáveis	Principais Restrições
Design	Minimização de custo de tubos; Localização ideal de válvulas	Layout da tubulação; Diâmetro dos tubos; Reabilitação de tubos	Mínimo nível de serviço; Diâmetros disponíveis; Opções de reabilitação; Orçamento disponível
Operação	Minimização de perdas de água; Minimização de custos de energia de bombeamento	Controle da bomba; Níveis de reservatório; Fontes; Capacidade	Mínimo nível de serviço; Número de interruptores da bomba; Capacidade de origem; Capacidade da bomba
Calibração	Minimização das diferenças entre o modelo e valores reais (Rugosidade, vazamentos, perdas, pressão)	Rugosidade do tubo; Diâmetro do tubo; Configuração da válvula; Vazamentos; Demandas	Layout do sistema; Dados disponíveis
Nível de Serviço	Maximização da pressão; Qualidade da água; Reabilitação	Todas já citadas	Configuração do sistema; Despesas
Sistema de Monitoramento	Minimização de custos de monitoramento; Determinação dos pontos ideais de monitoramento	Número e posição dos pontos de monitoramento	Configuração do sistema; Despesas
Teste de Rede	Maximização da confiabilidade da rede; Encontrar conjuntos críticos de eventos que podem causar falhas no sistema	Incêndio; Falhas nos tubos; Falhas de energia; Eventos de contaminação	Configuração do sistema; Número de eventos simultâneos

Fonte: Adaptado de Van Dijk, Van Vuuren e Van Zyl (2008)

### 3.6 Métodos de Otimização

#### 3.6.1 Programação Linear (Linear Programming)

De acordo com Rodrigues et al., (2014), na programação linear o desenvolvimento da modelagem do problema matemático se dá a partir de equações lineares, ou seja, na programação linear as variáveis de decisão não podem ser exponenciais ou multiplicadas entre si, o que caracteriza um resultado não linear. Portanto este método de otimização tende a ser mais simples que os demais listados a seguir e aplicado à problemas de otimização menos robustos.

A programação linear, foi se desenvolvendo paralelamente ao desenvolvimento das máquinas computacionais, a partir da década de quarenta. É uma técnica de otimização empregada nas mais diversas áreas tais como, rotas de transporte, agricultura, mineração (PRADO, 2016).

Na programação linear a função objetivo e as restrições são de primeiro grau e o resultado para as variáveis do modelo são valores reais ou contínuos e inteiros. A programação linear pode ser do tipo contínua, estruturada, inteira, mista ou 0/1 quando o modelo comporta variáveis que admitem 0 ou 1, como resultado (PRADO, 2016).

### **3.6.2 Programação Não Linear (Nonlinear Programming)**

A programação não linear é aquela onde a função objetivo ou as restrições do problema são funções não lineares. As restrições de problemas matemáticos podem ser de igualdade, desigualdade ou mistas. A maioria dos problemas de modelagem são do tipo não linear. (ROSAL, 2007).

Os problemas de programação não-linear podem ser vistos de diversas maneiras diferentes. Ao contrário do método simplex para programação linear, não existe um algoritmo único capaz de resolver todos esses tipos de problemas não lineares, portanto foram desenvolvidos outros métodos para resolver esse tipo de problema (SANTOS, 1998).

Podem ser citados como exemplos de métodos para resolução de problemas não lineares: Método de direções viáveis, Método de gradiente projetado, Método de gradiente reduzido, Programação quadrática sequencial, Método das penalidades, Método dos multiplicadores (SANTOS, 1998).

### **3.6.3 Lógica Fuzzy**

A lógica fuzzy foi adotada no contexto científico em 1965 por Lofti Asker Zadeh. De maneira geral é aplicada quando se trabalha com incertezas onde não é possível responder o problema com verdadeiro ou falso. A lógica fuzzy admite valores entre 0 e 1, onde é possível capturar informações vagas e convertê-las em formato numérico, tornando mais simples soluções para problemas mais complexos (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

No âmbito de otimização aplicada à redes de distribuição de água, autores trabalham também com a incerteza, visto que para aplicações mais realísticas na maioria das vezes não é possível obter todas as variáveis envolvidas no sistema (BISCOS et al., 2002; ORMSBEE; REDDY, 1995; SIVAKUMAR; PRASAD; CHANDRAMOULI, 2016).

No artigo publicado por Sivakumar, Prasad e Chandramouli (2016) foi considerada a rugosidade do tubo como parâmetro de incerteza, pois em redes reais em casos onde não é adotado parâmetros de incerteza os resultados podem não ser

satisfatórios na prática. Um algoritmo genético foi aplicado para obter os valores desconhecidos.

#### **3.6.4 Adaptive Search Algorithm (ASA)**

O algoritmo de busca adaptativa, ou Adaptive Search Algorithm (ASA), é um método de otimização utilizado para selecionar quais bombas serão ligadas ou desligadas, a partir da leitura de pressão dentro das tubulações da rede. Quando a pressão fica menor que a mínima, ou maior que a máxima permitida a bomba de maior relevância do sistema é selecionada com a intenção de corrigir essa pressão alterada, com acionamento ou desligamento da bomba. O algoritmo trabalha entre otimização e simulações hidráulicas em busca da solução ideal (BAGIROV et al., 2013; PEZESHK; HELWEG, 1996).

No artigo publicado em 1996, que usou em sua metodologia a aplicação do ASA, concluiu-se as seguintes vantagens a cerca de sua aplicação: aplicabilidade à redes complexas, fácil entendimento do programa pelo usuário, e opção de informar ao programa o ponto de partida inicial. Como desvantagem, citou-se a incapacidade de garantia de solução ótima global (PEZESHK; HELWEG, 1996).

De acordo com estudo mais recente publicado por Bagirov, et al. (2013), os resultados de aplicação do ASA também se mostraram favoráveis ao objetivo proposto de minimização de custos de bombeamento. Concluiu-se que sua abordagem permitiu uma redução das variáveis no problema de minimização, além de permitir a fácil geração de conjunto de soluções viáveis (BAGIROV et al., 2013).

#### **3.6.5 Particle Swarm Optimization (PSO)**

A otimização por enxame de partículas, ou *Particle Swarm Optimization* (PSO), é um método que se assemelha ao Ant Colony Optimization, e não utiliza operadores de seleção, recombinação e mutação. É mais um método de otimização baseado em padrões da natureza e é considerado um algoritmo meta-heurístico. Diferente dos algoritmos genéticos, o PSO analisa pontos próximos a solução ideal (WEGLEY; EUSUFF; LANSEY, 2000).

Um artigo analisado que descreve o método PSO, demonstrou que esse método de otimização converge para soluções ótimas globais, e pode ser facilmente aplicado à problemas de calibração e operação de redes, pois além de ser um método intuitivo é de fácil configuração. Por outro lado, trata-se de um método limitado quando comparado com outras técnicas de otimização, algoritmo genético por exemplo (WEGLEY; EUSUFF; LANSEY, 2000).

### **3.6.6 Algoritmo de Otimização Colônia de Formigas (ACO)**

*Ant Colony* (ACO), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Honey Bee Mating Optimization* (HBMO) são exemplos de algoritmos de otimização que reproduzem os hábitos dos insetos na modelagem e solução dos problemas.

O algoritmo *Ant Colony* se deu a partir da observação de como a sociedade das formigas se organizam para captura de alimentos. O modelo inicial foi proposto em 1983 por Deneubourg *et. at.*, que analisaram a organização das formigas que minimiza o tempo de busca e captura de alimentos. (BOECHEL, 2003).

No artigo desenvolvido por López-Ibáñez *et al.*, (2008), o método ACO, foi aplicado e comparado com outro método de Algoritmo Genético Híbrido, com objetivo de minimizar custos de bombeamento e testado em uma rede teórica e outra real conhecidas na literatura, e comprovou, nesse caso, que o ACO foi melhor que o Algoritmo Genético Híbrido além do tempo computacional ter sido consideravelmente pequeno.

O comportamento das formigas motivou a elaboração de um algoritmo no qual um conjunto de formigas artificiais colaboram para a solução de um problema através da comunicação via o feromônio deixado sobre o caminho que percorreram. O Algoritmo de Otimização Colônia de Formigas (ACO) tem sido aplicado em problemas de otimização e a comparação é feita devido ao fato das formigas conseguirem retomar percursos interrompidos por obstáculos, de modo que o novo caminho seja o menor possível (BOECHEL, 2003).

### **3.6.7 Honey Bee Mating Optimization (HBMO)**

O algoritmo *Honey Bee Mating Optimization* (HBMO) é um algoritmo evolutivo baseado no comportamento social das abelhas, onde o algoritmo de pesquisa tem como base o processo de acasalamento das abelhas. No artigo publicado em 2013 por Soltanjalili, Haddad e Mariño, que aplicou a metodologia do algoritmo HBMO, com objetivo de maximizar o fornecimento de água aos consumidores, com aplicação em duas redes sendo uma teórica e outra real (SOLTANJALILI; HADDAD; MARIÑO, 2013).

### **3.6.8 Algoritmo Genético**

Os algoritmos genéticos aplicados para busca de soluções ótimas foram criados em 1975 por John Holland e são baseados na teoria evolutiva de Charles Darwin, de tal forma que reproduzem matematicamente e computacionalmente o princípio da seleção

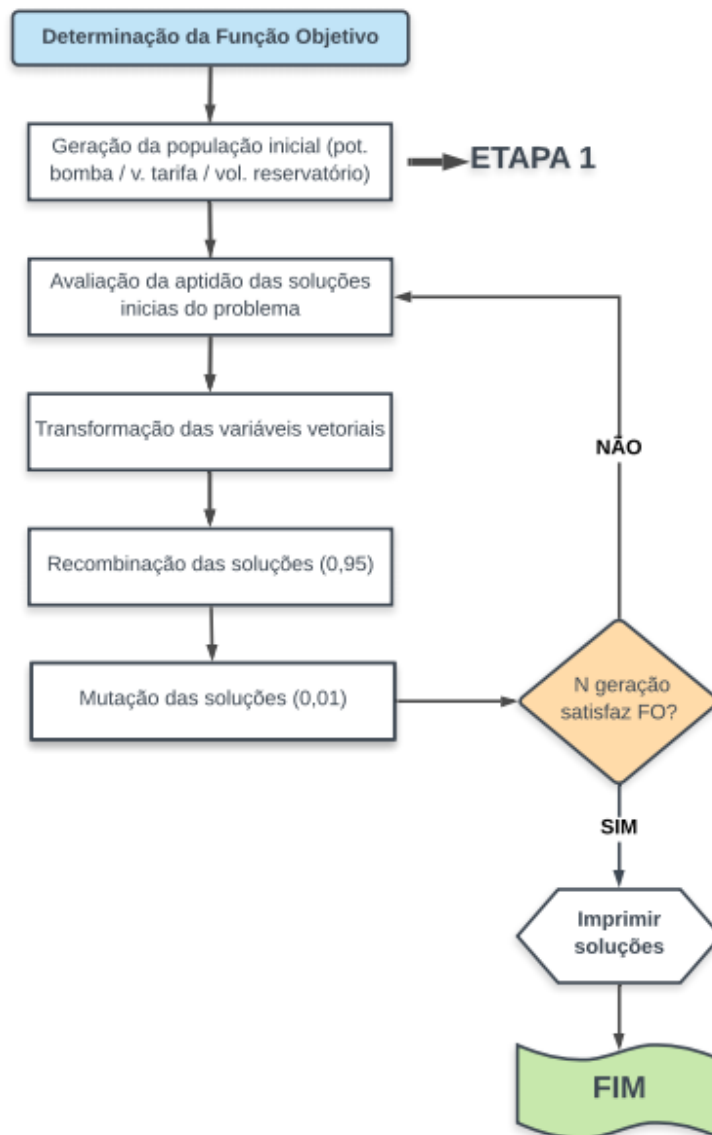


natural, onde os indivíduos que melhor se adaptam são os que sobrevivem às mais diversas situações (TEBCHARANI, 2007; ODAN, 2013).

Partindo do princípio da genética evolutiva, os algoritmos genéticos trabalham de forma que selecionam, combinam e manipulam, desenvolvendo soluções ótimas mostrando todas as possíveis soluções. Inicia-se o algoritmo com uma população inicial que é avaliada, e os que apresentarem valores mais significativos do ponto de vista da otimização são então combinadas entre si aplicando-se os operadores genéticos predefinidos de cruzamento e mutação, gerando assim a nova população, de acordo com a função objetivo previamente informada no algoritmo (Figura 5) (TEBCHARANI, 2007; VAN DIJK; VAN VUUREN; VAN ZYL, 2008).

Reduzir o espaço de pesquisa dos algoritmos genéticos é um problema que vem sendo bastante estudado na literatura. Como os algoritmos genéticos trabalham com uma variedade de combinações com a finalidade de chegar ao melhor conjunto de soluções possíveis, reduzir o espaço de busca dessas soluções é de grande eficiência pois assim as soluções encontradas aproximam-se ainda mais dos problemas reais. (CREACO; PEZZINGA, 2014).

Figura 5 - Processo Básico de Funcionamento de Algoritmo Genético



Fonte: Próprio autor (2019)

### 3.6.8.1 Algoritmo Genético Multiobjetivo

Para problemas complexos é necessário estudar múltiplos objetivos que tem como resultado um conjunto de soluções ótimas, invés de uma única solução (DEB et al., 2002). Sendo aplicada em diversas áreas como engenharia, economia e logística, a otimização multiobjetiva é importante em tomadas de decisão onde é necessária a compensação entre objetivos que se opõem entre si, com a intenção de encontrar um conjunto de soluções ótimas que satisfaça as condições das funções objetivos distintas ou até uma única solução que corresponda à todas as propriedades (HOJJATI et al., 2018).

A primeira geração de algoritmos genéticos é classificada como não elitista, já a segunda geração recebe o nome de elitista. O elitismo consiste em preservar as melhores

soluções entre uma população e outra, por conseguinte o conjunto de soluções gerado é de maior confiabilidade (DELINSKI; COLMENERO, 2017).

A primeira geração de algoritmos genéticos, surgiu entre 1989 e 1998. Os exemplos mais consideráveis são o NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm), o NPGA (Niche-Pareto Genetic Algorithm) e o MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm). Já os algoritmos da segunda geração, caracterizados pelo elitismo e maior eficiência pode se destacar por sua maior relevância o SPEA e SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), PAES (Pareto Archived Evolution Strategy), e NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II). Cada algoritmo possui suas vantagens e desvantagens cabendo ao decisor escolher o melhor a ser aplicado em cada situação que deseja avaliar (DELINSKI; COLMENERO, 2017).

#### **3.6.8.1.1 NSGA II**

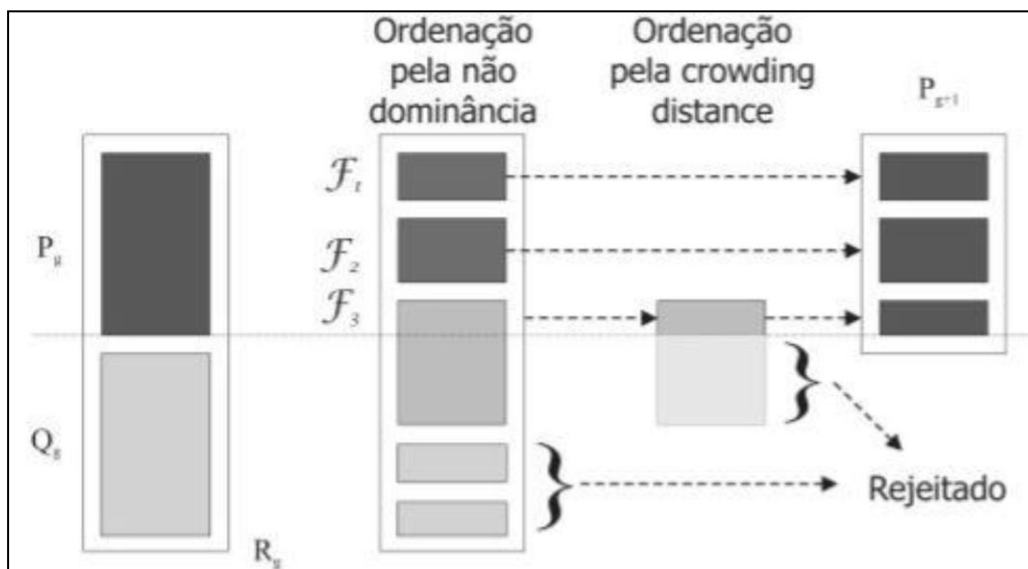
O Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA), ou Algoritmo Genético de Classificação Não Dominada, é um algoritmo evolutivo muito estudado e aplicado na literatura com a finalidade de solucionar problemas de otimização multiobjetiva, porém devido a sua complexidade e algumas limitações, Deb *et al.* (2002) propuseram uma nova versão denominada NSGA II (MAKAREMI; HAGHIGHI; GHAFOURI, 2017; VARGAS, 2018)

Em comparação com a versão anterior, o NSGAI possui melhor mecanismo de cruzamento mantendo sua simplicidade e, conseqüentemente, melhor desempenho sendo então mais útil. A sua principal característica que o diferencia é emprego do elitismo para preservar as melhores soluções (HOJJATI et al., 2018; SANTOS, 2017). No algoritmo, o operador de seleção trabalha com dois conjuntos simultâneos em cada iteração denominados população pai e população filha. Na primeira iteração gera-se um conjunto inicial, como nos AGs convencionais, e ordena-se esse conjunto considerando os níveis de não dominância por exemplo: soluções com nível 1 são as melhores soluções do conjunto, soluções com nível 2 correspondem ao segundo melhor grupo, e assim por diante. Cada solução recebe um valor de aptidão igual a seu nível de dominação (frentes). São aplicados então os operadores de seleção (torneio), recombinação e mutação, sucessivamente, para se obter a população filha. As duas populações têm a mesma dimensão. Após isso, ambas as populações são unidas em um único conjunto temporário (dimensão 2N). Realiza-se um ordenamento por não dominância desse conjunto temporário de forma a identificar os novos níveis de dominação. Dado que apenas N

soluções podem estar contidas no próximo conjunto, então as N piores soluções são descartadas, de acordo com um critério de seleção. O fluxograma de funcionamento do algoritmo NSGAI é apresentado na Figura 6 (CHEUNG, 2004; TEBCHARANI, 2007).

Um dos algoritmos genéticos multiobjetivos mais aplicados na literatura, diversos autores optam pela utilização do NSGA II (Figura 6) devido seus resultados satisfatórios, já comprovados, na busca por soluções ótimas (ALVISI; FRANCHINI, 2009; CARPITELLA et al., 2019; CREACO; PEZZINGA, 2014, 2015; GUPTA; KULAT, 2018; MAKAREMI; HAGHIGHI; GHAFOURI, 2017; MALA-JETMAROVA; BARTON; BAGIROV, 2015; NICOLINI; ZOVATTO, 2009).

Figura 6 - Fluxograma de Funcionamento NSGA II



Fonte: DEB et al., (2002) adaptado por Scola (2014)

### 3.6.8.2 Algoritmo Genético Híbrido

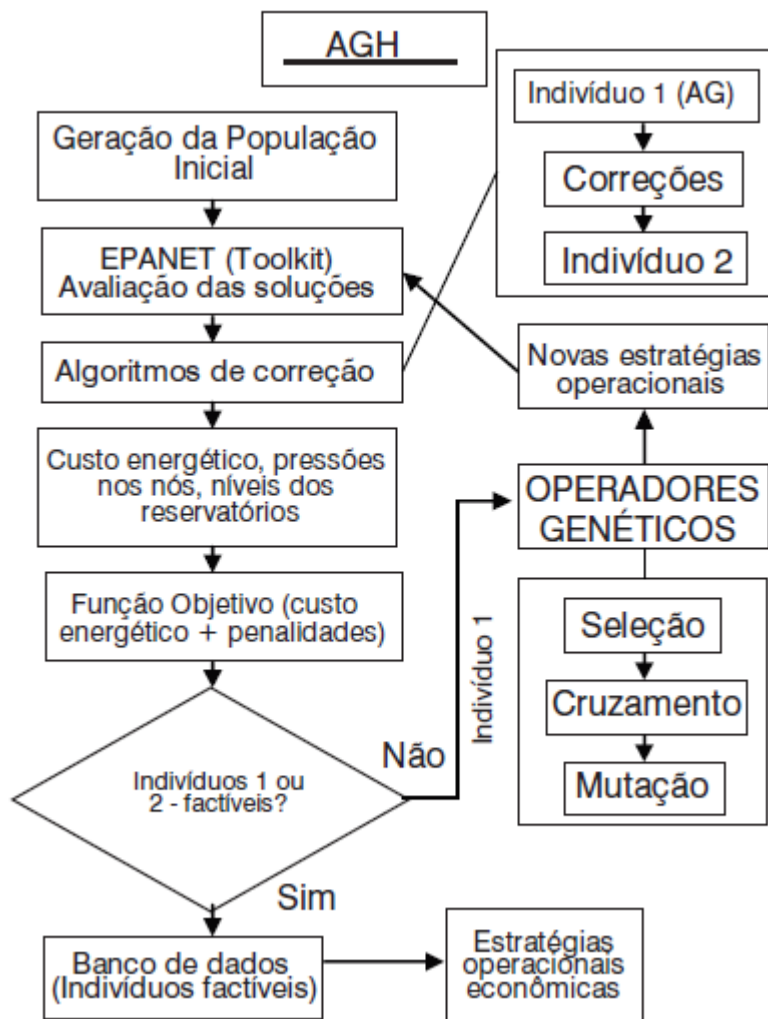
O significado da palavra híbrido, relacionado à genética diz respeito ao cruzamento entre duas espécies distintas, de vegetais ou animais. O algoritmo genético híbrido (AGH) é desenvolvido a partir da combinação entre o algoritmo genético simples e outro método de otimização, pois apesar da versatilidade e aplicabilidade, diversas vezes o algoritmo genético simples não atende totalmente a proposta do trabalho que está sendo desenvolvido (LIMA, 2008).

Autores desenvolvem algoritmos genéticos híbridos para auxiliar nos mais diversos objetivos de otimização. Costa, de Castro e Ramos (2010) apresentaram um

algoritmo genético híbrido (Figura 7) que trabalha com a finalidade de determinar as técnicas de operações com custos energéticos menores.

Já Van Zyl et. al., (2004) desenvolveram uma estratégia de otimização híbrida a partir da combinação de algoritmo genético simples e “hillclimber search method”. O método híbrido se mostrou superior ao algoritmo genético simples na busca rápida, por soluções ótimas, quando aplicado a um problema de um grande sistema de distribuição de água real.

Figura 7 - Fluxograma de Funcionamento do Algoritmo Genético Híbrido



Fonte: Costa, De Castro e Ramos (2010)

### **3.7 Primeiros Trabalhos Publicados na Área de Otimização de Redes de Abastecimento de Água**

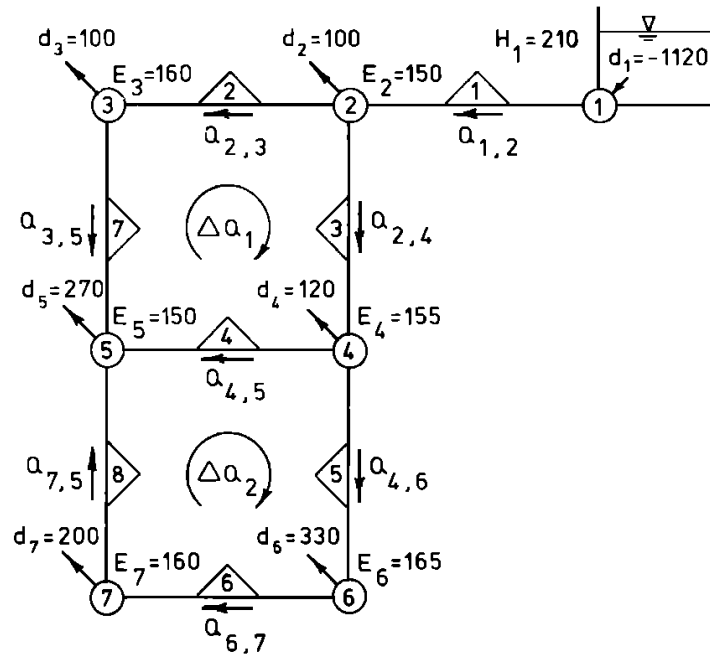
A pesquisa realizada por Shamir e Howard (1968) teve como finalidade fazer a análise de uma rede de distribuição de água, onde investigaram as combinações de incógnitas, agregando ao sistema, bombas, válvulas e outros componentes. Nos casos em que a combinação contemplava demandas nos nós e resistências nos componentes, era descartada a possibilidade de encontrar uma única solução para o problema proposto. Os autores afirmaram que a conclusão da análise se dá, quando a vazão de todos os trechos e o consumo de todos os nós são conhecidos.

De acordo com Gameiro (2003), dois após a publicação do artigo elaborado por Shamir e Howard (1968), Epp e Fowler (1970), criou um programa para cálculo de vazões e energias de redes de distribuição de água, a partir do método de ajustes simultâneos de vazões. Foi elaborada a automatização para estimativa das vazões e introdução de um algoritmo que enumerava diretamente os circuitos, objetivando a redução da memória computacional para execução do programa.

Alguns anos com evoluções nas técnicas empregadas e estudos realizados com objetivo de aprimorar os resultados obtidos a partir de análise de redes de distribuição de água, Shamir (1974) desenvolveu um estudo com objetivo otimizar design e operação de uma rede de distribuição de água aplicando o método de Newton-Raphson modificado, implementando um programa computacional e testado em uma rede teórica contendo 25 nós e 40 tubos. No artigo de Shamir (1974) são descritas as variáveis de decisão utilizadas, bem como função objetivo, restrições e uso de função penalidade.

Após mais três anos, Alperovits e Shamir (1977), trabalharam com a otimização de design de uma rede. Foi apresentada uma abordagem simplificada de projetos de otimização de rede de distribuição de água com aplicação do método denominado “Linear Programming Gradiente (LPG)”, formulando um projeto ótimo para a rede teórica de 2 anéis (Figura 8) desenvolvida, que se tornou referência para pesquisas realizadas posteriormente.

Figura 8 - Rede de Dois Anéis Desenvolvida por Alperovits e Shamir (1977)



Fonte: Alperovits e Shamir, (1977)

Ainda no ano de publicação do artigo de Alperovits e Shamir (1977), Collins (1977) publicou uma pesquisa direcionada à otimização de múltiplos reservatórios da cidade de Dallas, no Texas, citando estudos anteriores que abordaram o tema como Buras (1963), Schewig e Cole (1968), Hall, et al., (1969), Jamieson (1972), Becker and Yeh (1974) e Sigvaldason (1976). O autor aplicou o método de otimização denominado Programação Dinâmica (Dynamic programming - DP), concluindo o estudo reconhecendo a capacidade de aplicabilidade da técnica além de suas limitações que comprovavam a necessidade de evolução do modelo.

A partir de então, foram desenvolvidas diversas pesquisas objetivando a otimização dos sistemas de distribuição de água, sejam eles reais ou teóricos, com aprimoramento de técnicas para soluções cada vez mais confiáveis e coerentes.

## **4 Revisão Sistemática da Literatura**

### **4.1 Metodologia**

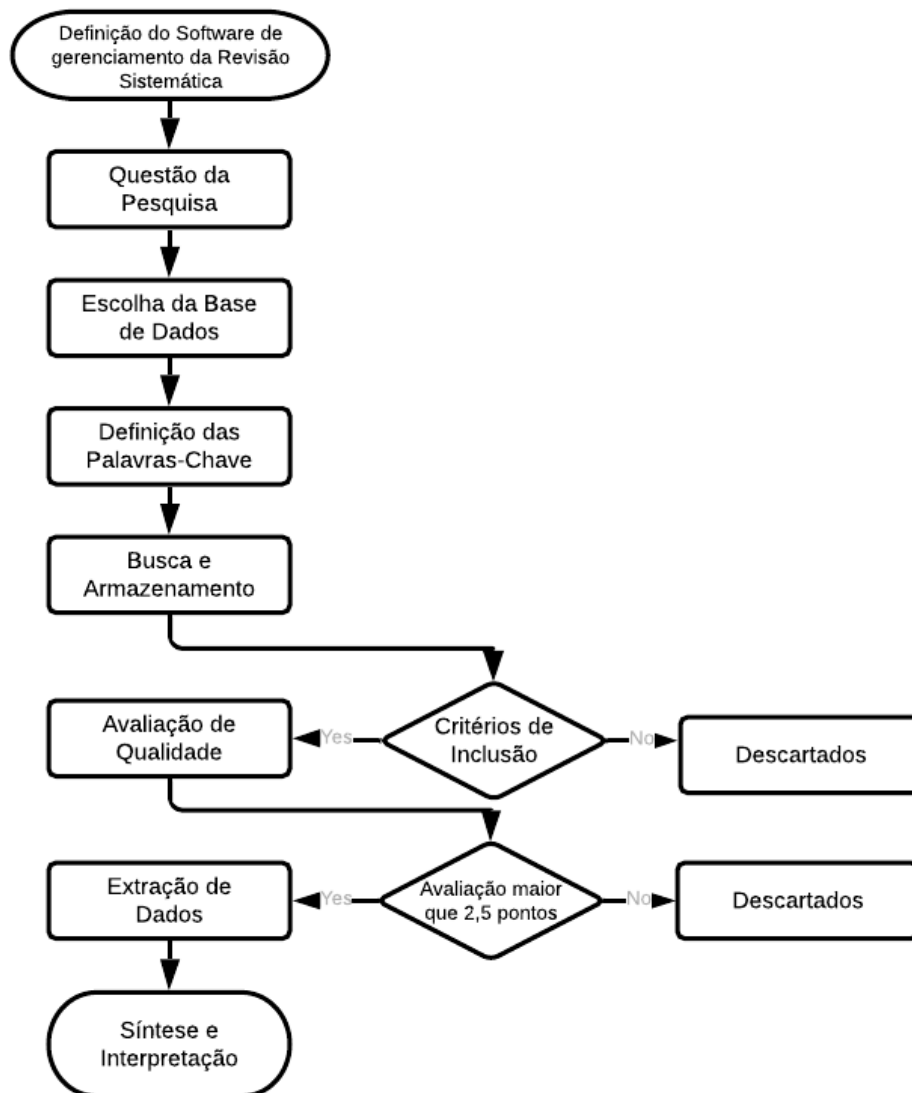
A metodologia aplicada no presente estudo foi estruturada com uso da ferramenta StArt que é empregada para organizar, agrupar e selecionar os estudos de maior relevância ao assunto. Iniciando pela delimitação da questão da pesquisa, onde foi aplicado o acrônimo PICO (População, Intervenção, Comparação e *Outcome*). Com a questão da pesquisa delineada, partiu-se para escolha das bases de dados de pesquisa e posteriormente a definição das palavras-chave de busca que conduzem aos melhores resultados da busca e armazenamento dos resultados.

O uso do *software* StArt inicia-se com download em formato Bibtex dos trabalhos obtidos a partir da busca por palavras chaves predefinidas. Tendo uma boa coleção de estudos em mãos, aplicaram-se os critérios de inclusão e exclusão com a finalidade de obter resultados mais focados à questão da pesquisa delimitada na primeira etapa.

Os trabalhos aptos aos critérios de inclusão passam por uma avaliação de qualidade objetivando obter os melhores trabalhos para extração de dados onde aplicou-se o critério de seleção daqueles artigos publicados nos periódicos bem avaliados, e com fator de impacto. Partindo para a síntese e interpretação de dados foram avaliados elementos relevantes no que diz respeito à operação ótima de redes de distribuição de água. O fluxograma que representa as etapas descritas é apresentado na Figura 9 e detalhado nos itens a seguir:



Figura 9 - Fluxograma de Representação da Metodologia



Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.1.1 Software StArt

O *software* tem a finalidade de gerenciar os artigos que serão utilizados na revisão sistemática da literatura, subdividindo as tarefas em três etapas, sendo a primeira o planejamento, a segunda é a etapa de execução e a terceira de extração.

A etapa de planejamento consiste em informar, a partir de uma revisão de escopo, o protocolo da pesquisa, que envolve o objetivo da revisão, a delimitação da questão a ser estudada a partir do acrônimo PICO, quais as palavras-chave de busca, bases de dados analisadas, além dos critérios de inclusão e exclusão aplicados.

Na segunda etapa, de execução, as bases de dados informadas na etapa anterior já estarão disponibilizadas, sendo assim, após a busca em cada uma delas e *download* dos

arquivos em formato Bibtex, cada base de dados reúne informações principais de cada artigo incluso no arquivo bibtex inserido na plataforma.

Ainda na etapa de execução é realizada a classificação de cada um dos artigos. O software faz uma análise automática, aceitando, rejeitando e, em alguns casos, não classificando os artigos, porém, para o estudo em questão, toda classificação é reavaliada baseando-se nos critérios de inclusão e exclusão previamente determinados e classificando como “rejeitado” aqueles que recebem pontuação inferior a 2,5 pontos na avaliação de qualidade.

Os artigos que foram classificados como “aceitos” partem para etapa de extração de dados. Uma das funções da ferramenta StArt é indicar em cada artigo a sua porcentagem de similaridade com todos os demais artigos importados para a plataforma, função esta que facilita a análise e seleção dos trabalhos.

#### **4.1.2 Delimitação da Questão a Ser Estudada**

A definição da questão a ser avaliada na revisão sistemática é uma etapa de total importância para o desenvolvimento da pesquisa. Caso a questão investigativa seja muito limitada o estudo fica escasso, conseqüentemente a pesquisa resultará um número insuficiente de artigos. No início da pesquisa é conveniente evitar especificações excessivas. Se a questão for muito ampla e abrangente a quantidade de estudos encontrados pode ser extremamente alto inviabilizando uma sistematização. Como a questão de investigação é a base, uma pergunta bem formulada aumenta a eficiência da revisão (PETTICREW; ROBERTS, 2006).

Portanto Petticrew e Roberts (2006) desenvolveram estratégias com a finalidade de decompor o problema e facilitar a busca dos resultados. O método consiste no acrônimo PICO: População, Intervenção, Comparação e *Outcome*. Para o presente estudo foram estruturados os seguintes componentes para elaboração da pergunta, conforme apresentado a seguir, no Quadro 2.

Quadro 2 - Componentes da Pergunta da Pesquisa

Descrição	Abreviação	Componentes da Pergunta
População	P	Redes de Distribuição de Água (Reais/Teóricas)
Intervenção	I	Técnicas de Otimização
Comparação	C	Metodologia Aplicada
Outcome	O	Operação Ótima da Rede

Fonte: Adaptado de Petticrew e Roberts (2006)

Foram apresentados por Petticrew e Roberts (2006) oito modelos de perguntas para uma revisão sistemática, que podem ser de eficácia, triagem e diagnóstico, fatores de risco ou proteção, interação entre intervenção e desfechos, prevalência, processo de intervenções ou influências, metodologias ou custo-benefício.

#### 4.1.3 Escolha da Base de Dados

As bases de dados bibliográficos agrupam uma grande variedade de revistas científicas que são consultadas com facilidade, além de existirem diversas bases convencionais e a escolha dessas que serão aplicadas deve contemplar uma gama variada de resultados. De modo geral recomenda-se o uso de no mínimo 3 bases de dados.

Para elaboração da revisão sistemática da literatura foram escolhidas as bases SCOPUS, Web of Science, Science Direct e Google Academic todos acessados a partir do acesso CAFe (Comunidade Acadêmica Federada) do Periódicos CAPES. O Acesso CAFe é patrocinado pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) e reúne instituições de ensino e pesquisa brasileiras, e a partir do acesso com login o usuário tem acesso a serviços oferecidos pelas instituições que participam da federação. Essas bases de dados foram escolhidas por apresentarem conteúdo multidisciplinar, além de ferramentas de acesso gratuito e retornarem amplo resultado de pesquisa.

#### 4.1.4 Definição das Palavras-Chave de Busca

A definição das palavras-chave direciona a busca dos artigos, limitando àqueles que de fato serão úteis para o desenvolvimento da revisão. Os termos de busca dos artigos podem ser combinados utilizando os operadores “AND”, “OR” ou “NOT”.

Com base nos componentes da pergunta de pesquisa é possível localizar os termos de busca e seus sinônimos, com a finalidade de aumentar a precisão dos resultados. Os

termos foram combinados e alternados entre si utilizando o operador “AND”. Para buscas mais eficientes o “OR” foi utilizado para encontrar produções científicas que eventualmente podem nomear como redes ou sistemas de distribuição de água. O operador “NOT” é utilizado para excluir termos de trabalhos que podem eventualmente aparecer como resultado da pesquisa. Como nas buscas realizadas o volume de artigos resultantes que trabalham com calibração, design de redes e qualidade da água era muito alto, essas palavras foram inseridas acompanhadas do operador “NOT” com a finalidade de minimizar retornos de artigos que fogem do assunto da revisão sistemática.

As palavras chaves de busca definidas foram:

- Operation;
- Optimal operation;
- Optimization;
- Water distribution network;
- Water distribution system;
- Water Supply;
- Calibration;
- Design;
- Water Quality.

#### **4.1.5 Busca e Armazenamento de Resultados**

A pesquisa de artigos para elaboração de uma revisão sistemática deve ser criteriosamente registrada, documentando quais as palavras de busca foram utilizadas para cada base de dados, que resultaram em um número específico de artigos, além do registro de artigos incluídos ou excluídos. Em cada base de dados serão encontradas diversas produções irrelevantes para o trabalho, por este motivo aplica-se o critério de inclusão e exclusão.

Todas as buscas foram realizadas filtrando os resultados por artigos, visto que as pesquisas nas bases retornam resultados de livros, dissertações, teses e outras publicações acadêmicas. As buscas foram classificadas de acordo com o número de citações do artigo, aplicando filtro de pesquisa por trabalhos publicados de 1945 a 2020, em inglês e português.

Conforme citado anteriormente, para entrada de dados no *software* StArt, é realizado o download das citações em formato Bibtex, que ao ser inserido na ferramenta

apresenta as principais informações de cada trabalho, tais como título, palavras-chave, autores, periódico onde foi publicado, ano de publicação e resumo.

Os resultados de busca ficam separados por pastas nomeadas de acordo com a base de dados. Após passar pela etapa descrita no item 4.1.6 Critérios de Inclusão e Exclusão para Seleção dos Artigos, os trabalhos são baixados para uma pasta específica no computador para que a avaliação de qualidade e extração de dados seja realizada de forma minuciosa.

#### **4.1.6 Critérios de Inclusão e Exclusão para Seleção dos Artigos**

Os critérios de inclusão e exclusão de artigos delimitam a variedade de pesquisas encontradas sobre determinado assunto através da leitura do resumo. Quando as palavras chaves são buscadas na base de dados muitas vezes são encontrados artigos com pouca relevância no tema em questão, mesmo que contenha as palavras-chave pré-estabelecidas. Os critérios de inclusão e exclusão podem ser do tipo metodológico (filtra pesquisas que utilizaram um tipo de metodologia específica), instrumento utilizado (instrumentos utilizados na aplicação da metodologia: entrevistas, testes), idioma de publicação ou contexto do estudo (KOLLER; COUTO; HOHENDORFF, 2014).

No caso de modelagem de redes de abastecimento de água foram adotados os seguintes critérios de inclusão:

- 1) Operação de rede de distribuição de água;
- 2) Otimização de redes teóricas ou reais;
- 3) Uso de algoritmos genéticos com único objetivo;
- 4) Uso de algoritmos genéticos multiobjetivo;
- 5) Artigos publicados em língua portuguesa;
- 6) Artigos publicados em língua inglesa;
- 7) Artigos clássicos;
- 8) Artigos que trabalham com controle de pressão;
- 9) Artigos que trabalham com uso de bombas;
- 10) Artigos que trabalham com energia.

E os critérios de exclusão são listados abaixo:

- 1) Artigos que trabalham com design e layout de redes;
- 2) Artigos que trabalham com calibração de redes;
- 3) Artigos que trabalham com qualidade da água;
- 4) Artigos que trabalham com testes de rede;

- 5) Artigos que trabalham com reabilitação de tubos;
- 6) Artigos que trabalham com irrigação;
- 7) Artigos que trabalham com custo de construção e/ou manutenção de redes;
- 8) Artigos repetidos de outras bases de pesquisa;
- 9) Estudos incompletos;
- 10) Artigos focados em setorização;
- 11) Artigos que não trabalham com redes de distribuição de água;
- 12) Artigos publicados em congresso;
- 13) Artigos que trabalham com reservatórios.

O próprio *software* StArt indica quais são os artigos duplicados de outras bases de dados e os exclui automaticamente, informando a ação antes da exclusão.

#### 4.1.7 Avaliação da Qualidade

A avaliação de qualidade dos artigos direciona a pesquisa aos resultados mais confiáveis a partir da aplicação de critérios de qualidade pré-estabelecidos pelo autor.

Cada um dos critérios é avaliado com notas que variam de 0 a 1. A atribuição 0 é aplicada quando o artigo não atende ao critério analisado, a avaliação 0,5 é conferida quando atende em partes o critério ou não está explícita essa condição, ou atribui-se a nota 1 quando o artigo atende totalmente o critério.

Tendo aplicado a pontuação para cada critério de qualidade, suas respectivas notas são somadas para que seja realizada a classificação do artigo de acordo com a pontuação obtida. Artigos que obtiveram pontuação entre 0 e 2,5, ou seja, são classificados como baixa qualidade, conforme Quadro 3, são excluídos e não seguem para extração de dados todos os demais artigos seguem para próxima etapa.

Quadro 3 - Tabela de Classificação da Avaliação de Qualidade

<b>Classificação</b>	<b>Baixa</b>	<b>Média</b>	<b>Alta</b>	<b>Muito Alta</b>
<b>Pontuação</b>	$0 \leq S \leq 2,5$	$3 \leq S \leq 5,5$	$6 \leq S \leq 8,5$	$9 \leq S \leq 10$

Fonte: Próprio Autor (2020)

Os critérios de qualidade aplicados foram:

- 1) O resumo do artigo é claro?
- 2) O delineamento da pesquisa é bem estruturado?
- 3) A pesquisa é bem direcionada ao tema estudado?
- 4) Os objetivos da pesquisa estão explícitos?
- 5) A metodologia é de fácil compreensão?
- 6) A metodologia é bem aplicada?
- 7) Os resultados estão explícitos?
- 8) A conclusão da pesquisa condiz com os objetivos traçados?
- 9) Os objetivos da pesquisa são alcançados?
- 10) O periódico é bem avaliado? (A1, A2, B1 ou B2 de acordo com o quadriênio 2013-2016)

#### **4.1.8 Extração de Dados**

A extração de dados do artigo é feita de forma mais minuciosa. Após a seleção dos artigos que serão de fato aplicados na revisão sistemática, em uma análise mais detalhada foram identificados os seguintes subitens:

- Método de otimização;
- Número de funções objetivo (mono ou multiobjetivo);
- Número de restrições;
- Número de variáveis de decisão;
- Aplicação ou não de função penalidade;
- Tipo do sistema (bombeamento ou configuração de válvulas);
- Tipo de rede estudada (real ou teórica);
- Simulador hidráulico utilizado.

A partir de então é possível extrair o que há de mais proficiente em cada estudo, fundamentado nos itens pré-estabelecidos como foco da extração.

#### **4.1.9 Síntese e Interpretação de Dados**

Tendo em mãos os dados extraídos de cada artigo, esses serão sintetizados e interpretados de maneira que sejam apresentados graficamente os resultados obtidos.

Petticrew e Roberts (2006), compararam o processo de revisão sistemática à montagem de um quebra-cabeça, onde os artigos representam as peças e os processos de avaliação determinam qual a localização delas portanto as peças devem ser organizadas de maneira

lógica e racional para que se alcance o resultado esperado. A síntese de resultados é simbolizada pela organização das peças do quebra-cabeça de forma coerente.(KOLLER; COUTO; HOHENDORFF, 2014)

As revisões sistemáticas podem ser do tipo quantitativa, quando não exige a apresentação de uma metanálise, ou seja, uma técnica estatística que avalia resultados de diferentes autores e estudos ou do tipo qualitativa, com aplicação da metanálise a partir da análise bibliométrica dos artigos que utiliza métodos estatísticos e matemáticos na exploração de obras literárias. No primeiro caso citado, a síntese é realizada com a comparação dos estudos. (COSTA; ZOLTOWSKI, 2014; PETTICREW; ROBERTS, 2006).

## **4.2 Resultados**

A partir do acrônimo PICO descrito na metodologia delimitou-se a questão que fundamentará a revisão sistemática da literatura: “Quais as metodologias aplicadas à otimização de operação de redes de distribuição de água?”.

### **4.2.1 Resultado de Busca e Armazenamento**

As strings de busca são basicamente as mesmas em cada base de dados, visto que essas são predeterminadas a partir das palavras-chave de busca elaboradas junto a questão que fundamenta a revisão sistemática da literatura. Em alguns casos faz-se uma breve alteração na string ou na palavra-chave de acordo com a limitação de resultados que cada base de dados resulta. É explicado a seguir, o processo de busca em cada uma delas bem como suas particularidades.

A pesquisa realizada na base de dados Web Of Science foi elaborada com o uso das seguintes strings de busca: “optimal operation” AND “water distribution network” OR “water distribution system” AND “optimization” NOT “design” NOT “water quality” NOT “calibration”. E aplicação dos filtros “Open Access” e “Article”. Isso significa que nos documentos encontrados existem as palavras “optimal operation”, “water distribution network” ou “water distribution system”, e “optimization”, simultaneamente. Exclui-se trabalhos que contenham as palavras “design”, “water quality” e “calibration”, limitando o conteúdo de busca e afinando com a finalidade de encontrar aqueles mais focados ao tema. A aplicação dos filtros retorna apenas artigos que possuem acesso liberado. Essa busca resultou em 335 trabalhos publicados entre os anos de 1980 e 2020.

A segunda busca de trabalhos foi realizada na base Scopus, utilizando basicamente a mesma estrutura de strings apresentada anteriormente, incluindo a palavra-chave “water



supply” acompanhada da string OR, visto que os resultados utilizando apenas “water distribution network” OR “water distribution system” foram limitados. Os filtros aplicados foram por publicações de artigos em inglês. Essa busca retornou 152 trabalhos publicados entre 1977 e 2020.

Partindo para base de dados Google Academic, a palavra-chave “optimization” foi aplicada junto do operador “OR” combinado com as palavras chave “optimal operation” AND “water distribution network” AND “water distribution system” NOT “design” NOT “calibration” NOT “water quality” e o único filtro aplicado foi pela busca de artigos. Essa pesquisa resultou 49 artigos publicados entre 1984 e 2020.

A última base de dados escolhida para busca de trabalhos foi a Science Direct, com aplicação das mesmas strings descritas na busca na base Web Of Science e filtro aplicado para seleção de artigos, o resultado foi de 100 trabalhos publicados entre 1966 e 2020.

Foi adicionado manualmente ao sistema um artigo clássico e de alta relevância ao estudo, publicado por Elyahu Alperovits e Uri Shamir em 1977, que apesar de trabalhar com otimização de design de rede, os autores foram uns dos pioneiros a estudar otimização de redes de distribuição de água.

Foram identificados 3 artigos duplicados na pasta Science Direct, 1 artigo da base de dados Scopus e 2 artigos da base Web Of Science, totalizando 6 artigos duplicados e transferidos automaticamente para a pasta “Duplicated” do próprio sistema StArt.

Em resumo, totalizaram-se 637 artigos, sendo que 6 artigos estavam duplicados e foram identificados automaticamente pelo *software* e mantidos em uma pasta separada dos demais.

#### **4.2.2 Aplicação de Critérios de Exclusão**

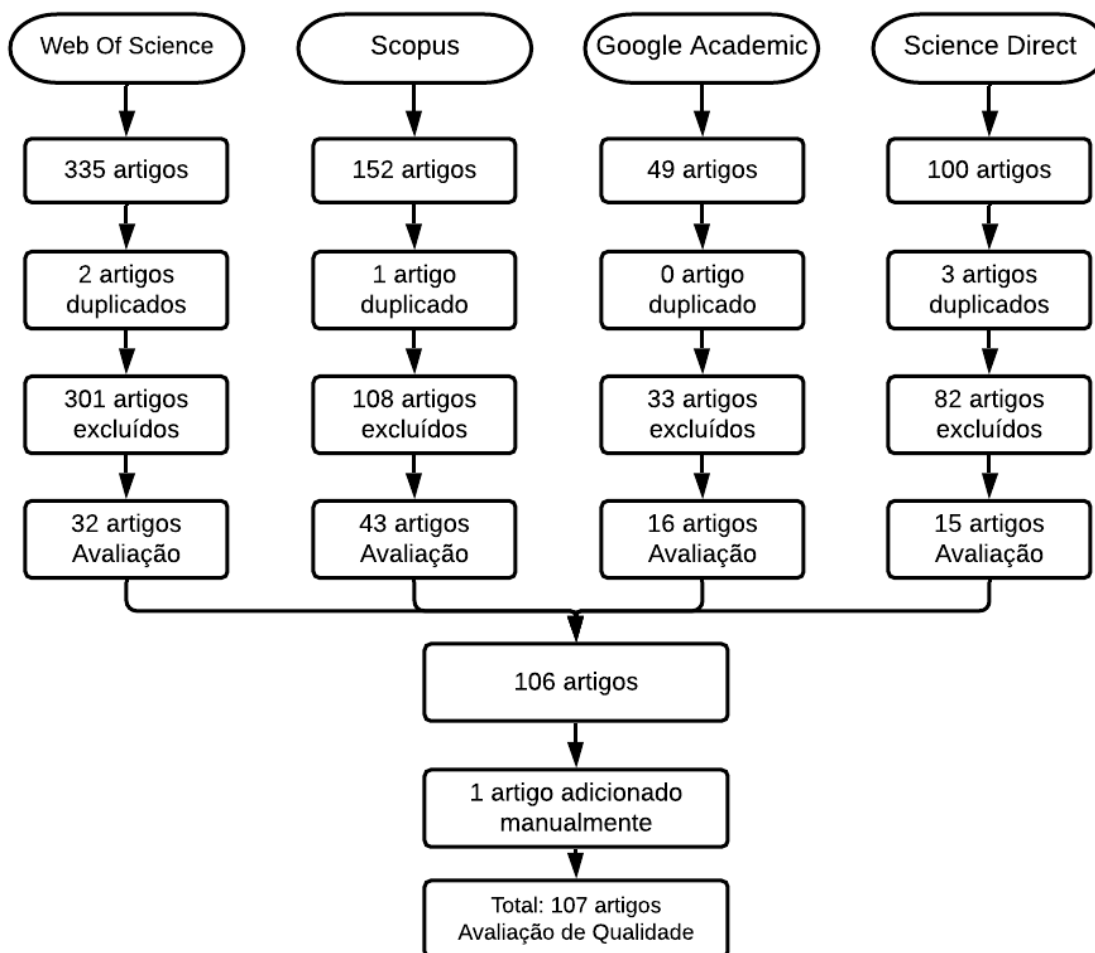
Foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão aos 631 trabalhos armazenados. Com a ferramenta StArt é possível incluir ou excluir um artigo da revisão sistemática, alterando seu status e selecionando qual critério foi aplicado.

Foram excluídos 524 artigos a partir dos critérios de exclusão, sendo:

- 301 artigos da base Web Of Science;
- 108 artigos da base Scopus;
- 33 artigos da base Google Academic.
- 82 artigos da base Science Direct;

Então, 106 artigos obtidos nas bases de dados de pesquisa, mais 1 artigo adicionado manualmente ao sistema, totalizam 107 trabalhos que foram considerados na etapa de Avaliação de qualidade. Até a presente etapa de trabalho o afinilamento de resultados segue o fluxograma apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de Exclusão de Artigos



Fonte: Próprio Autor (2020)

### 4.2.3 Avaliação de Qualidade dos Artigos Selecionados

Conforme descrito, 107 artigos tiveram sua qualidade avaliada a partir de critérios predeterminados. Nessa etapa 20 trabalhos foram descartados, ou seja, receberam avaliação inferior a 2,5 pontos. Dentre esses 20 artigos descartados, 6 deles fazia parte da base de dados Web Of Science, 6 artigos da base Scopus, 7 trabalhos descartados da base Google Academic e 1 deles da Science Direct. Portanto, 87 trabalhos foram selecionados para extração de dados.

#### **4.2.4 Resultado da Extração de Dados dos Artigos Selecionados**

A primeira etapa de extração de dados dos artigos selecionados é planilhar (Quadro 4) suas principais informações, tais como: Título, ano de publicação, autores e periódico de publicação. Essa fase facilita a organização e sistematização dos resultados.

A segunda etapa de extração de dados dos artigos consiste em avaliar o método de otimização aplicado, número de funções objetivo (Mono ou Multiobjetivo), restrições das funções objetivo, variáveis de decisão utilizadas, aplicação de penalidade, tipo do sistema (bombeamento ou configuração de válvulas), tipo de rede estudada (Real ou Teórica), simulador hidráulico utilizado. Para facilitar a compreensão e visualização, os resultados foram dispostos de forma gráfica.

Quadro 4 - Artigos Selecionados para Extração de Dados

(continua)

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	Citação
1	Implementation of an Optimization Model for Operation of a Metropolitan Reservoir System	1977	Collins, M.A.	Journal of the American Water Resources Association	(COLLINS, 1977)
2	Design of Optimal Water Distribution System	1977	Alperovits, E. e Shamir, U.	Water Resources Research	(ALPEROVITS; SHAMIR, 1977)
3	Optimal Control of a Water Distribution Network by 2 Multilevel Methods	1980	Joalland, G. e Cohen, G.	Automatica	(JOALLAND; COHEN, 1980)
4	Optimal Operations in Nonlinear Water Networks	1980	Coulbeck, B.	Optimal Control Applications and Methods	(COULBECK, 1980)
5	Optimal annual operation of a water supply and distribution system	1982	Meyers, S. e Shamir, U.	Advances in Water Resources	(MEYERS; SHAMIR, 1982)
6	Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems	1991	Brion, L. M. e Mays, L. W.	Journal of Hydraulic Engineering	(BRION; MAYS, 1991)
7	Applied Mathematics in Water Supply Network Management	1993	Carpentier, P. e Cohen, G.	Automatica	(CARPENTIER; COHEN, 1993)
8	Optimized Pump Scheduling in Water Distribution Systems	1994	Yu, G.; Powell, R.S. e M.J.H.	Journal of Optimization Theory and Applications	(YU; POWELL; STERLING, 1994),
9	Optimal Operation of Ground-Water Supply Distribution Systems	1994	Pezeshk, S.; Helweg, O.J. e Oliver, K.E.	Journal of Water Resources Planning and Management	(PEZESHK; HELWEG; OLIVER, 1994)
10	Nonlinear Heuristic for Pump Operations	1995	Ormsbee, L. e Reddy, S.	Journal of Water Resources Planning and Management	(ORMSBEE; REDDY, 1995)

Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

(continuação)

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	Citação
11	An Evolution Program for Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks	1995	Savic, D. e Walters, G.	Engineering Optimization	(SAVIĆ; WALTERS, 1995)
12	Adaptive Search Optimization in Reducing Pump Operating Costs	1996	Pezeshk, S. e Helweg, O.	Journal of Water Resources Planning and Management	(PEZESHK; HELWEG, 1996)
13	Determining Pump Operations Using Particle Swarm Optimization	2000	Wegley, C.; Eusuff, M. e Lansey, K.	Civil Engineering and Engineering Mechanics	(WEGLEY; EUSUFF; LANSEY, 2000)
14	Optimal Operation of a Potable Water Distribution Network	2002	Biscos, C.; Mulholland, M.; M.-V. Le Lann; . Brouckaert, C.; Bailey, R.; Roustan, M.	Water Science and Technology	(BISCOS et al., 2002)
15	Optimal Operation of Water Distribution Networks by Predictive Control Using MINLP	2003	Biscos, C.; Mulholland, M.; Le Lann, M.-V.; Buckley, C.A.; e Brouckaert, C.J.	Water S.A	(BISCOS et al., 2003)
16	Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm	2004	Van Zyl, J.E.; Savic, D.A. e Walters, G.A.	Journal of Water Resources Planning and Management	(VAN ZYL; SAVIC; WALTERS, 2004)
17	Combined Optimization of Pipes and Control Valves in Water Distribution Networks	2005	Pezzinga, G. e Pititto, G.	Journal of Hydraulic Research	(PEZZINGA; PITITTO, 2005)
18	Optimizing the Operation of the Haifa-A Water Distribution Network	2007	Salomons, E.; Goryashko, A.; Shamir, U.; Rao, Z. e, S.	Journal of Hydroinformatics	(SALOMONS et al., 2007)
19	Optimizing the Operation of the Valencia Water Distribution Network	2007	Salomons, E.; Goryashko, A.; Shamir, U.; Rao, Z. e Alvisi, S.	Journal of Hydroinformatics	(MARTÍNEZ et al., 2007)

Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

(continuação)

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	Citação
20	Switched Control Strategies for Optimized Operation of DWDS	2007	Wang, J.	IFAC Proceedings Volumes	(WANG, 2007)
21	Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks	2008	López-Ibáñez; M.; T. Devi Prasad e Ben Paechter	Journal of Water Resources Planning and Management	(LÓPEZ-IBÁÑEZ; PRASAD; PAECHTER, 2008)
22	Optimal Real-Time Operation of Urban Water Distribution Systems Using Reduced Models	2008	Shamir, U.; Salomons, E.	Journal of Water Resources Planning and Management	(SHAMIR; SALOMONS, 2008)
23	Consumption Management in Water Distribution Systems by Optimizing Pressure Reducing Valves' Settings Using Genetic Algorithm	2009	Tabesh, M. e Hoomehr, S.	Desalination and Water Treatment	(TABESH; HOOMEHR, 2009)
24	Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks	2009	Nicolini, M. e Zovatto, L.	Journal of Water Resources Planning and Management	(NICOLINI; ZOVATTO, 2009)
25	Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks	2010	Nazif, S.; Karamouz, M.; Tabesh, M. e Moridi, A.	Water Resources Management	(NAZIF et al., 2010)
26	Single-Objective versus Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems Accounting for Greenhouse Gas Emissions by Carbon Pricing	2010	Wu, W.; Maier, H.; Simpson, A.	Journal of Water Resources Planning and Management	(WU; MAIER; SIMPSON, 2010)
27	Hybrid Genetic Algorithm in the Optimization of Energy Costs in Water Supply Networks	2010	Costa, L.; Ramos, H.M. e De Castro, M.A.H.	Water Science and Technology: Water Supply	(COSTA; RAMOS; DE CASTRO, 2010)

Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

Nº	Título	Ano	Autores	(continuação)	
				Periódico	Citação
28	Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água	2010	Costa, L.; Ramos, H.M. e De Castro, M.A.H.	Engenharia Sanitaria e Ambiental	(COSTA; DE CASTRO; RAMOS, 2010)
29	Operational Optimisation of Water Supply Networks Using a Fuzzy System	2012	Tarso, S.; Bezerra, M.; da Silva, S.; Pimentel, H.	Water S.A	(BEZERRA; DA SILVA; GOMES, 2012)
30	Iterative LP Water System Optimal Operation Including Headloss, Leakage, Total Head and Source Cost	2013	Price, E. e Ostfeld, A.	Journal of Hydroinformatics	(PRICE; OSTFELD, 2013a)
31	Fast Hybrid Optimization Method for Effective Pump Scheduling	2013	Giacomello, C.; Kapelan, Z.; Nicolini, M.	Journal of Water Resources Planning and Management	(GIACOMELLO; KAPELAN; NICOLINI, 2013)
32	Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps	2013	Simpson, A.; Marchi, A.	Journal of Hydraulic Engineering	(SIMPSON; MARCHI, 2013)
33	Iterative Linearization Scheme for Convex Nonlinear Equations: Application to Optimal Operation of Water Distribution Systems	2013	Price, E. e Ostfeld, A.	Journal of Water Resources Planning and Management	(PRICE; OSTFELD, 2013b)
34	Operating Water Distribution Networks During Water Shortage Conditions Using Hedging and Intermittent Water Supply Concepts	2013	Soltanjalili, M.; Haddad, O. e Mariño, M.	Journal of Water Resources Planning and Management	(SOLTANJALILI; HADDAD; MARIÑO, 2013)
35	Methods and Tools for Managing Losses in Water Distribution Systems	2013	Mutikanga, H.; Sharma, S. e Vairavamoorthy, K.	Journal of Water Resources Planning and Management	(MUTIKANGA; SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2013)
36	Ant-colony Optimization of Pumping Schedule to Minimize the Energy Cost Using Variable-Speed Pumps in Water Distribution Networks	2013	Hashemi, S.; Tabesh, M. e Ataekia, B.	Urban Water Journal	(HASHEMI; TABESH; ATAEEKIA, 2013)

Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

Nº	Título	Ano	Autores	(continuação)	
				Periódico	Citação
37	An Algorithm for Minimization of Pumping Costs in Water Distribution Systems Using a Novel Approach to Pump Scheduling	2013	Bagirov, A.; Barton, A.; Mala-Jetmarova, H.; Al Nuaimat, A.; Ahmed, S.; Sultanova, N. e Yearwood, J.	Mathematical and Computer Modelling	(BAGIROV et al., 2013)
38	Multi-Objective Optimization of Water Quality, Pumps Operation, and Storage Sizing of Water Distribution Dystems	2013	Kurek, W. e Ostfeld, A.	Journal of Environmental Management	(KUREK; OSTFELD, 2013)
39	Research on Minimizing Electric Power Usage in Water Distribution System	2014	Arai, Y.; Horie, T.; Koizumi, A.; Inakazu, T.; Masuko, A.; Tamura, S.; Yamamoto, T.	Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA	(ARAI et al., 2014)
40	Pumps as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks Affected by Intermittent Service	2014	Puleo, V.; Fontanazza, C.; Notaro, V.; De Marchis, M.; Freni, G. e La Loggia, G.	Journal of Hydroinformatics	(PULEO et al., 2014)
41	Discrete Pump Scheduling and Leakage Control Using Linear Programming for Optimal Operation of Water Distribution Systems	2014	Price, E. e Ostfeld, A.	Journal of Hydraulic Engineering	(PRICE; OSTFELD, 2014)
42	Optimal Operation of Water Pumping Stations	2014	Al-Ani, D. e Habibi, S.	WIT Transactions on Ecology and the Environment	(AL-ANI; HABIBI, 2014)
43	Real-time Optimal Control of Water Distribution Systems	2014	D. Kang	Procedia Engineering	(KANG, 2014)
44	Embedding Linear Programming in Multi Objective Genetic Algorithms for Reducing the Size of the Search Space with Application to Leakage Minimization in Water Distribution Networks	2014	Creaco, E. e Pezzinga, G.	Environmental Modelling and Software	(CREACO; PEZZINGA, 2014)



Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

(continuação)

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	Citação
45	Optimum Reliable Operation of Water Distribution Networks by Minimising Energy Cost and Chlorine Dosage	2015	Babaei, N.; Tabesh, M. e Nazif, S.	Water S.A	(BABAEI; TABESH; NAZIF, 2015)
46	Sensitivity of algorithm parameters and objective function scaling in multi-objective optimisation of water distribution systems	2015	Mala-Jetmarova, H.; Barton, A. e Bagirov, A.	Journal of Hydroinformatics	(MALA-JETMAROVA; BARTON; BAGIROV, 2015)
47	Real-time Multiobjective Optimization of Operation of Water Supply Systems	2015	Odan, F.; Ribeiro Reis, L. e Kapelan, Z.	Journal of Water Resources Planning and Management	(ODAN; RIBEIRO REIS; KAPELAN, 2015)
48	Improving Water and Energy Metabolism Efficiency in Urban Water Supply System Through Pressure Stabilization by Optimal Operation on Water Tanks	2015	Xu, Q.; Chen, Q.; Qi, S. e Cai, D.	Ecological Informatics	(XU et al., 2015)
49	Multi-Objective Optimization of Water Distribution Systems Based on a Real Options Approach	2015	Marques, J.; Cunha, M.; Savic, D.	Environmental Modelling & Software	(MARQUES; CUNHA; SAVIĆ, 2015)
50	Multi-objective Optimisation of the Operation of a Water Distribution Network	2015	Mulholland, M.; Latifi, M.A.; Purdon, A.; Buckley, C.A. e Brouckaert, C.J.	Computer Aided Chemical Engineering	(MULHOLLAND et al., 2015)
51	Pumping Pattern Optimization in Order to Reduce WDS Operation Costs	2015	Bohórquez, J.; Saldarriaga, J.; Vallejo, D.	Procedia Engineering	(BOHÓRQUEZ; SALDARRIAGA; VALLEJO, 2015)
52	Optimal Control of Water Distribution Networks with Storage Facilities	2015	Sankar, G.; Kumar, S.; Narasimhan, S.; Narasimhan, S.; Bhallamudi, S	Journal of Process Control	(SANKAR et al., 2015)
53	A Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks	2015	Costa, L.H.M. and de Athayde Prata, B. and Ramos, H.M. and de Castro, M.A.H.	Water Resources Management	(COSTA et al., 2015)

Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

(continuação)

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	Citação
54	Optimization of Pump Operation Using Rule-Based Controls in EPANET2: NewETTAR Toolkit and Correction of Energy Computation	2016	Marchi, Angela and Simpson, Angus R. and Lambert, Martin F.	Journal of Water Resources Planning and Management	(MARCHI; SIMPSON; LAMBERT, 2016)
55	Incorporating the Irrigation Demand Simultaneity in the Optimal Operation of Pressurized Networks with Several Water Supply Points	2016	I. Fernández García, P. Montesinos, E. Camacho Poyato & J.A. Rodríguez Díaz	Water Resources Management	(FERNÁNDEZ GARCÍA et al., 2016)
56	Uncertainty Analysis of Looped Water Distribution Networks Using Linked EPANET-GA Method	2016	Sivakumar, P. and Prasad, R.K. and Chandramouli, S.	Water Resources Management	(SIVAKUMAR; PRASAD; CHANDRAMOULI, 2016)
57	An Application of the Harmony-Search Multi-Objective (HSMO) Optimization Algorithm for the Solution of Pump Scheduling Problem	2016	F. de Paola; Nicola Fontana; Maurizio Giugni; Gustavo Marini	Procedia Engineering	(DE PAOLA et al., 2016)
58	Combining CSP and MPC for the operational control of water networks	2016	Sun, C.; Puig, V.; Cembrano, G.	Engineering Applications of Artificial Intelligence	(CONG SUN; PUIG; CEMBRANO, 2016)
59	Optimization of water distribution networks for combined hydropower energy recovery and leakage reduction	2016	Corcoran, Lucy ; McNabola, Aonghus ; Coughlan, Paul	Journal of Water Resources Planning and Management	(CORCORAN; MCNABOLA; COUGHLAN, 2016)
60	Location and Setting of Valves in Water Distribution Networks Using a Harmony Search Approach	2017	De Paola, Francesco and Galdiero, Enzo and Giugni, Maurizio	Journal of Water Resources Planning and Management	(DE PAOLA; GALDIERO; GIUGNI, 2017)
61	Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems	2017	Samir, Nourhan and Kansoh, Rawya and Elbarki, Walid and Fleifle, Amr	Alexandria Engineering Journal	(SAMIR et al., 2017)
62	Optimal Location of Pump as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks to Recover Energy and Reduce Leakage	2017	Fecarotta, Oreste and McNabola, Aonghus	Water Resources Management	(FECAROTTA; MCNABOLA, 2017)

Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

(continuação)

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	Citação
63	Combining pressure management and energy recovery benefits in a waterdistribution system installing PATs	2017	Patelis, M. and Kanakoudis, V. and Gonelas, K.	Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA	(PATELIS; KANAKOUDIS; GONELAS, 2017)
64	Investigating trade-offs between the operating cost and green house gasemissions from water distribution systems	2017	Menke, Ruben and Kadehjian, Korkin and Abraham, Edo and Stoianov, Ivan	Sustainable Energy Technologies and Assessments	(MENKE et al., 2017)
65	Leakage Reduction in Water Distribution Systems with Efficient Placementand Control of Pressure Reducing Valves Using Soft Computing Techniques	2017	Gupta, Aditya and Bokde, Neeraj and Marathe, Dushyant and Kulat, Kishore	Engineering, Technology & Applied Science Research	(GUPTA et al., 2017)
66	Optimal solving of the pump scheduling problem by using a harmony search optimization algorithm	2017	De Paola, F. and Fontana, N. and Giugni, M. and Marini, G. and Pugliese, F.	Journal of Hydroinformatics	(DE PAOLA et al., 2017)
67	Optimization of Pump Scheduling Program in Water Supply Systems Using a Self-Adaptive NSGA-II; a Review of Theory to Real Application	2017	Makaremi, Y. and Haghghi, A. and Ghafouri, H.R.	Water Resources Management	(MAKAREMI; HAGHIGHI; GHAFOURI, 2017)
68	Pump Scheduling for a Large Water Distribution Network. Milan, Italy	2017	Mario Castro-Gama and Quan Pan and Emilio Attilio Lanfranchi and Andreja Jonoski and Dimitri P. Solomatine	Procedia Engineering	(CASTRO-GAMA et al., 2017)
69	Near Real Time Pump Optimization and Pressure Management	2017	Brentan BLuvizotto EMontalvo Iizquierdo JPérez-García R	Procedia Engineering	(BRENTAN et al., 2017)
70	Pressure management in water distribution systems in order to reduceenergy consumption and background leakage	2018	Monsef, H. and Naghashzadegan, M. and Farmani, R. and Jamali, A.	Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA	(MONSEF et al., 2018)

Quadro 4 – Artigos Selecionados para Extração de Dados

Nº	Título	Ano	Autores	(continuação)	
				Periódico	Citação
71	Development and application of the anarchic society algorithm (ASO) to the optimal operation of water distribution networks	2018	Bozorg-Haddad, Omid and Latifi, Milad and Bozorgi, Atiyeh and Rajabi, Mohamad-Mehdi and Naeeni, Seyed-Taghi and Loaiciga, Hugo A.	Water Science and Technology - Water Supply	(BOZORG-HADDAD et al., 2018)
72	Joint operation of pressure-reducing valves and pumps for improving the efficiency of water distribution systems	2018	Brentan, B. and Meirelles, G. and Luvizotto, E., Jr. and Izquierdo, J.	Journal of Water Resources Planning and Management	(BRENTAN et al., 2018)
73	Optimization of cascade pumping stations' operations based on head decomposition-dynamic programming aggregation method considering water level requirements	2018	Gong, Y. and Cheng, J.	Journal of Water Resources Planning and Management	(GONG; CHENG, 2018)
74	Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure management techniques. Case study: Nagpur, India	2018	Gupta, A.D. and Kulat, K.	Water Science and Technology: Water Supply	(GUPTA; KULAT, 2018)
75	Minimization of water pumps' electricity usage: A hybrid approach of regression models with optimization	2018	Bagloee, S.A. and Asadi, M. and Patriksson, M.	Expert Systems with Applications	(BAGLOEE; ASADI; PATRIKSSON, 2018)
76	Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems	2018	Hojjati, A. and Monadi, M. and Faridhosseini, A. and Mohammadi, M.	Journal of Hydrology and Hydromechanics	(HOJJATI et al., 2018)
77	Pressure Zoning Approach for Leak Detection in Water Distribution Systems Based on a Multi Objective Ant Colony Optimization	2018	Hajibandeh, E. and Nazif, S.	Water Resources Management	(HAJIBANDEH; NAZIF, 2018)

Quadro 4 – Artigos Seleccionados para Extração de Dados

(continuação)

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	Citação
78	Optimal operation of water distribution networks with intermediate storage facilities	2018	Varghese Kurian and Saravanan Chinnusamy and Ashok Natarajan and Sridharakumar Narasimhan and Shankar Narasimhan	Computers & Chemical Engineering	(KURIAN et al., 2018)
79	The Optimum Monitoring Location of Pressure in Water Distribution System	2019	Jun, Sanghyun and Kwon, Hyuk Jae	WATER	(JUN; KWON, 2019)
80	Multi-criteria analysis applied to multi-objective optimal pump scheduling in water systems	2019	Carpitella, S. and Brentan, B. and Montalvo, I. and Izquierdo, J. and Certa, A.	Water Science and Technology: Water Supply	(CARPITELLA et al., 2019)
81	Fast Pump Scheduling Method for Optimum Energy Cost and Water Quality in Water Distribution Networks with Fixed and Variable Speed Pumps	2019	Abdallah, M. and Kapelan, Z.	Journal of Water Resources Planning and Management	(ABDALLAH; KAPELAN, 2019)
82	Optimization-simulation model for real-time pump and valve operation of water distribution systems under critical conditions	2019	Khatavkar, P. and Mays, L.W.	Urban Water Journal	(KHATAVKAR; MAYS, 2019)
83	Optimization models to save energy and enlarge the operational life of water pumping systems	2019	Dario Torregrossa and Florin Capitanescu	Journal of Cleaner Production	(TORREGROSS A; CAPITANESCU, 2019)
84	Optimal Regulation of Pumping Station in Water Distribution Networks Using Constant and Variable Speed Pumps: A Technical and Economical Comparison	2020	Cimorelli, Luigi and Covelli, Carmine and Molino, Bruno and Pianese, Domenico	ENERGIES	(CIMORELLI et al., 2020)

Quadro 4 – Artigos Seleccionados para Extração de Dados

Nº	Título	Ano	Autores	Periódico	(conclusão) Citação
85	Developing a new algorithm G-JPSO for optimal control of pumps in waterdistribution networks	2020	Rajabpour, R. and Talebbeydokhti, N. and Rakhshandehro o, Gh R.	Scientia Iranica	(RAJABPOUR; TALEBBEYDOK HTI; RAKHSHANDE HROO, 2020)
86	Multi-objective optimal operation of coastal hydro-electrical energy system with seawater reverse osmosis desalination based on constrained NSGA-III	2020	Zhou, B. and Liu, B. and Yang, D. and Cao, J. and Littler, T.	Energy Conversion and Management	(ZHOU et al., 2020)
87	Optimal control of water distribution networks without storage	2020	Dimitrios Nerantzis and Filippo Pecci and Ivan Stoianov	European Journal of Operational Research	(NERANTZIS; PECCI; STOIANOV, 2020)

Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.2.4.1 Método de Otimização

O primeiro dado extraído dos artigos foi o método de otimização utilizado em cada estudo. Os métodos mais utilizados foram: Algoritmo Genético Simples, Algoritmo Genético Híbrido, Algoritmo Genético Multiobjetivo, Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization e Honey Bee Mating Optimization, entre outros métodos apresentados no gráfico de resultados (Figura 11).

Conforme apresentado graficamente, os algoritmos genéticos são os métodos de otimização mais empregados na metodologia estudada, representando 45% somando-se trabalhos que empregaram o algoritmo genético simples e o algoritmo genético multiobjetivo.

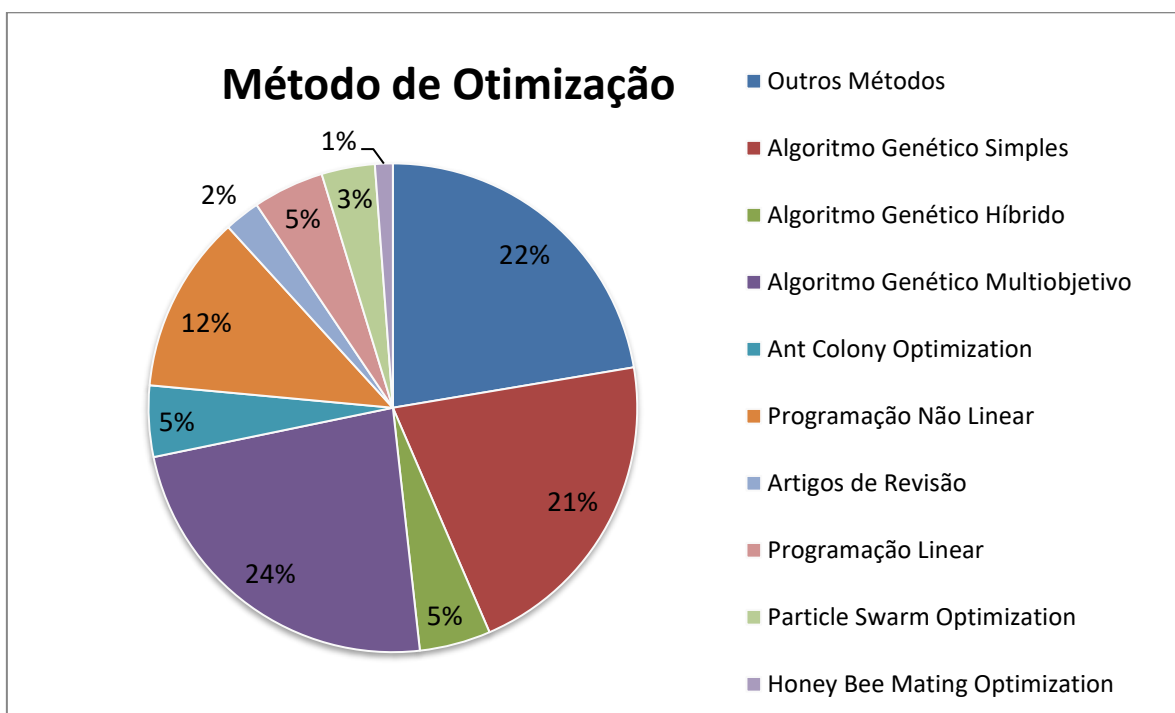
Dentre os trabalhos avaliados na revisão sistemática apresentada, no período de 1977 a 1996 que inicia com análise dos artigos publicados por Alperovits e Shamir e outro estudo publicado por Collins, e finaliza o período com estudo publicado por Pezeshk e Helweg (1996), os métodos de otimização mais utilizados foram a programação linear e programação não linear. Trata-se do início de aplicação de métodos de otimização à rede de distribuição de água.

Já no período de 2000 a 2010, mesmo ainda sendo aplicada a programação não linear os algoritmos genéticos simples e híbrido representam a maioria dos métodos de otimização aplicados, já ficando clara a evolução do uso das técnicas.

A presente revisão sistemática reuniu um vasto número de artigos publicados em 2013, onde já é possível observar uma maior variedade de aplicação de técnicas de otimização, incluindo além dos métodos já utilizados nos anos anteriores também a “Lógica Fuzzy” e o “Honey Bee Mating Optimization”.

Dentre os artigos avaliados, a partir de 2014 os métodos de otimização “Ant Colony Optimization” e “Particle Swarm Optimization” marcam presença, porém o algoritmo genético aparece com muita força, sendo nos últimos anos, o algoritmo genético multiobjetivo o mais empregado como método de otimização de redes de distribuição de água.

Figura 11 - Métodos de otimização mais empregados nos trabalhos avaliados



Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.2.4.2 Função Objetivo

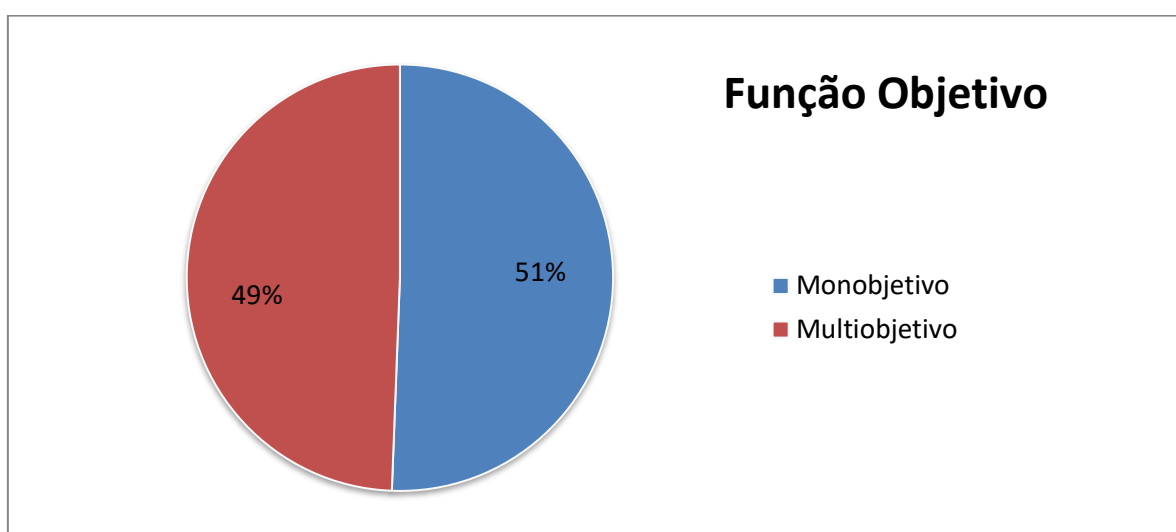
A otimização pode ser do tipo monobjetivo ou multiobjetivo, de acordo com o número de funções objetivo aplicadas. Conforme referência o próprio nome, otimização monobjetivo é aquela que apresenta uma única função objetivo, já a multiobjetivo apresenta duas ou mais funções que devem ser atendidas simultaneamente de acordo com as restrições pré-estabelecidas.

Os primeiros trabalhos avaliados na revisão de literatura apresentada trabalharam com otimização monobjetivo, devido a aplicação de técnicas primárias que ainda não permitiam a análise multiobjetivo. Com o aprimoramento dos métodos empregados, os artigos que trabalham com otimização multiobjetivo começou a ser mais frequente a partir do ano de 2008, representando a maioria dos trabalhos a partir de então.

No início da pesquisa era esperado que a função do tipo multiobjetivo representasse a grande maioria percentual, porém com a análise dos resultados fica claro que o início dos trabalhos publicados influenciou o resultado esperado devido a incapacidade das técnicas aplicadas previamente de possibilitar métodos multiobjetivos porém pode-se perceber claramente como a evolução dos métodos adotados interferiram na conclusão.

São apresentados na Figura 12 os resultados percentuais após extração desse dado. O resultado para o grupo de artigos analisados foi equilibrado, apresentando diferença mínima entre a quantidade de trabalhos que aplicaram método mono e multiobjetivo.

Figura 12 – Tipo de função objetivo utilizada nos trabalhos avaliados



Fonte: Próprio Autor (2020)



#### 4.2.4.3 Número de Restrições

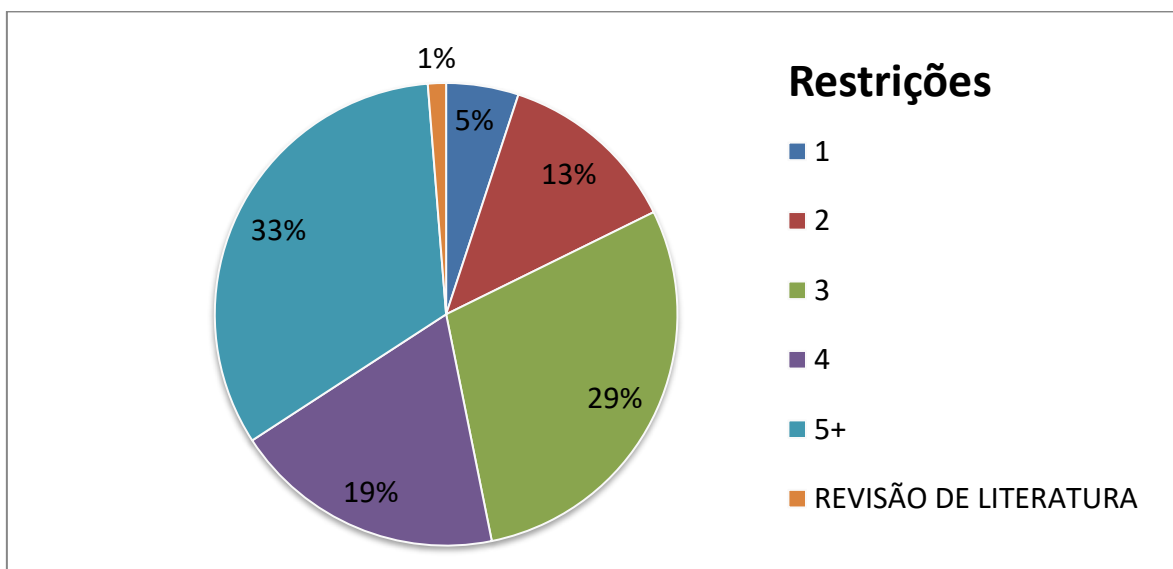
As restrições devem ser atendidas de acordo com as particularidades de cada função objetivo e a quantidade de restrições varia conforme as características de cada sistema.

Foi avaliado que pesquisas publicadas de 1977 a 1996, aplicaram menor número de restrições, variando de 1 a 3 restrições aplicadas ao modelo de otimização, sendo a maioria 2 restrições a cada problema de otimização.

Durante o período de 2000 a 2010, começam aparecer pesquisas com definição de restrições mais elaboradas, onde a maioria dos trabalhos apresenta 4 restrições ao problema proposto. A partir de 2010, a grande maioria dos artigos trabalham com número maior de restrições, o que pode ser associado à aplicação de métodos de otimização multiobjetivo, visto que problemas multiobjetivos deve atender simultaneamente mais de um objetivo, logo justifica a alteração.

Conforme apresentado na Figura 13, a maioria dos autores trabalharam com aplicação de 5 ou mais restrições impostas na função. De maneira geral foi observado que o número de restrições é proporcional ao número de função objetivo aplicado.

Figura 13 – Quantidade de restrições aplicadas à função objetivo dos estudos avaliados

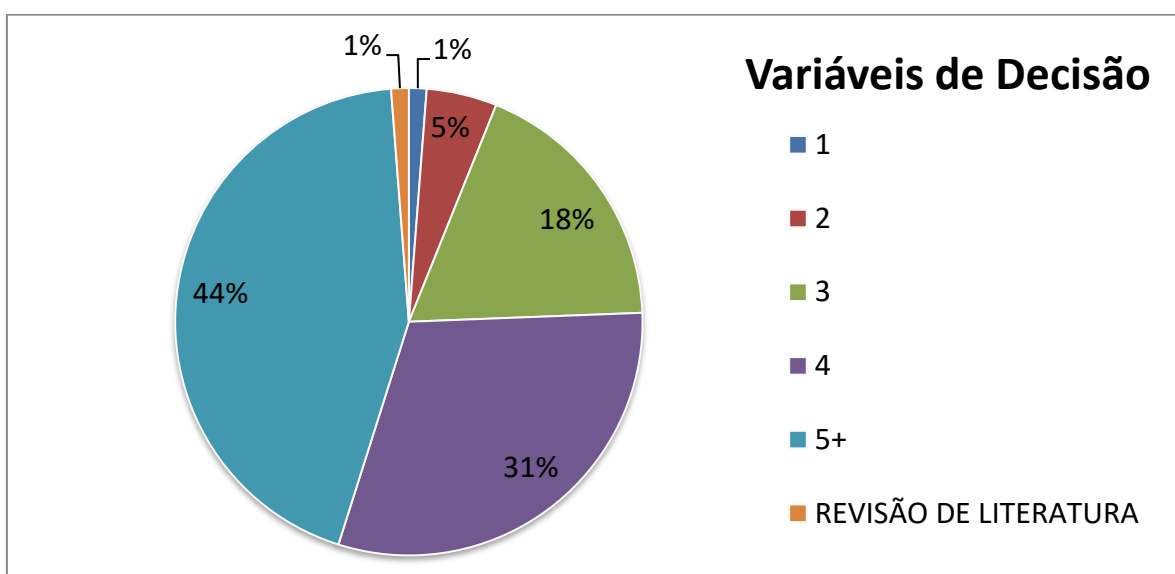


Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.2.4.4 Número de Variáveis de Decisão

Em problemas multiobjetivo o número de variáveis de decisão tende a ser maior devido a função objetivo que será aplicada. No gráfico é possível analisar pesquisas que trabalham com maiores quantidades de variáveis de decisão representam a grande maioria dos artigos avaliados. Esse resultado é perceptível durante todo o período em que foram publicados os artigos analisados (Figura 14).

Figura 14 – Quantidade de variáveis de decisão aplicadas às funções objetivo dos estudos avaliados



Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.2.4.5 Aplicação de Função Penalidade

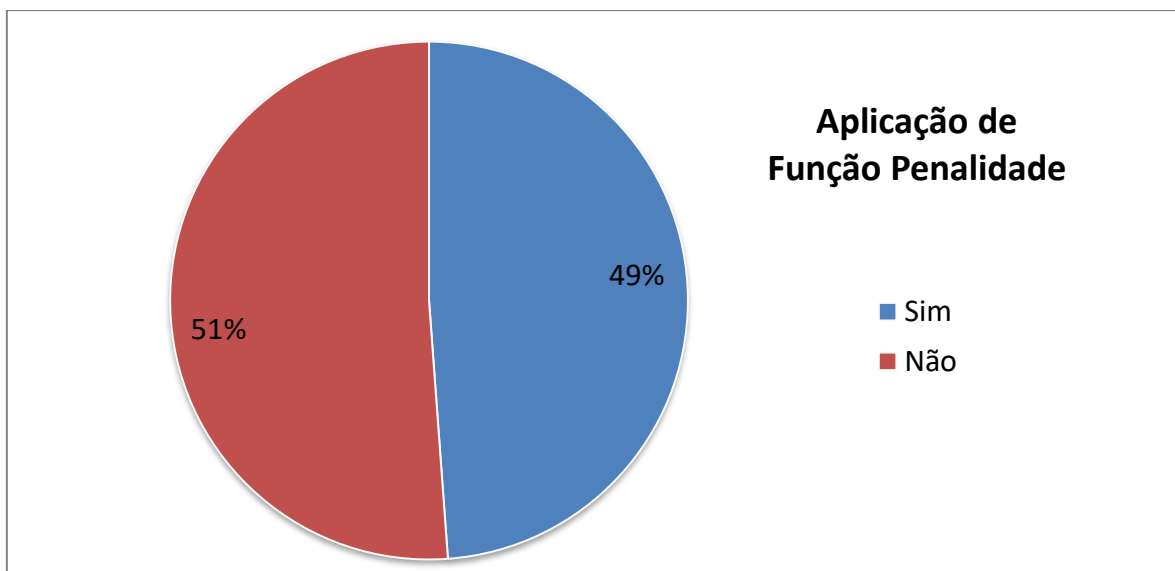
O termo “método de transformação” é usado para descrever qualquer método que resolve o problema de otimização restrito, transformando-o em um ou mais problemas irrestritos. Anteriormente era comum receber o nome de “Técnicas sequenciais de minimização irrestrita”, do inglês “Sequentia unconstrained minimization techniques”, SUMTs (ARORA, 2012).

A aplicação de função penalidade para problemas de otimização com restrições é vista na literatura desde o início da utilização de métodos otimizadores. Alperovits e Shamir, (1977), citam em sua pesquisa o uso da função penalidade utilizada visto a dificuldade encontrar uma solução para o conjunto de diâmetros no problema proposto, então para superar essa dificuldade, foi introduzida em cada uma das restrições duas novas variáveis. Essas variáveis atuaram essencialmente como válvulas, cada uma fornecendo uma perda de carga quando o fluxo no caminho está em uma das duas direções

possíveis. Essas variáveis de válvula fictícia tornaram possível satisfazer as restrições da linha de entrada.

O resultado extraído e discutido é apresentado a seguir, na Figura 15.

Figura 15 – Aplicabilidade da função penalidade aos métodos de otimização dos artigos avaliados



Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.2.4.6 Tipo do Sistema

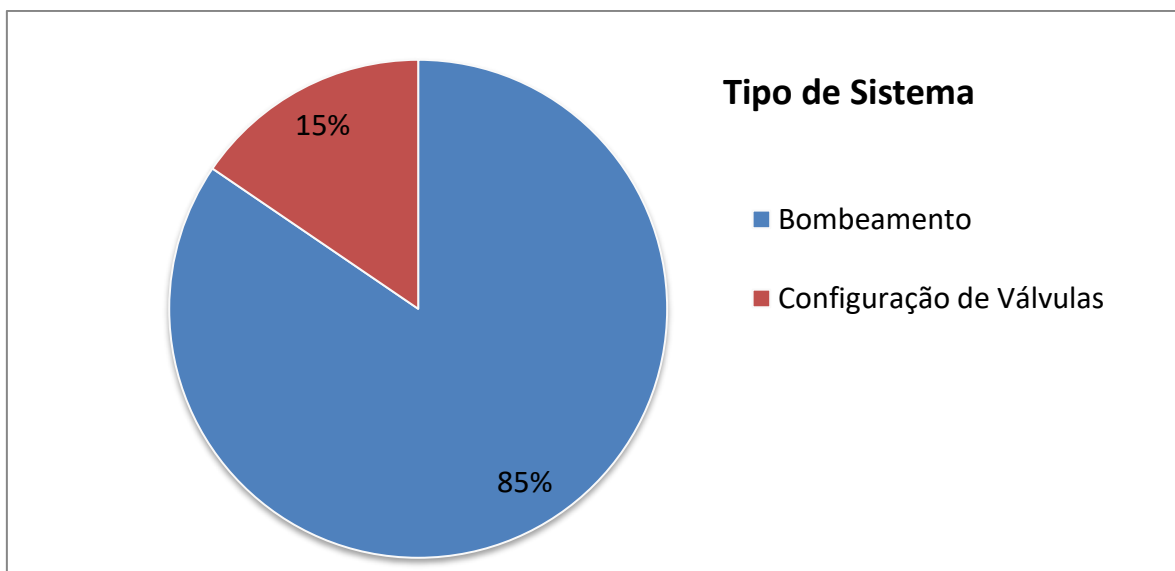
O controle de pressão nas redes de distribuição de água é um dos pontos que merecem mais atenção acerca da operação dos sistemas. Para que a pressão da água fique dentro dos limites estabelecidos são utilizados dois mecanismos bastante estudados nos artigos referentes a operação ótima de redes de distribuição de água, sendo o uso de bombas quando a pressão não é suficiente ou as válvulas redutoras de pressão quando, por exemplo, a diferença de nível entre o ponto inicial e o ponto de consumo é muito alta fazendo com que a pressão dentro da tubulação ultrapasse o limite máximo estabelecido.

Diversos trabalhos apresentados na literatura no que diz respeito a otimização de redes de distribuição de água, objetivam a minimização de custos de energia da rede. Nesses casos o custo de energia elétrica das redes decorre majoritariamente do bombeamento de água.

Dentre os trabalhos analisados na revisão sistemática apresentada, de 1977 a 2017 fica claro a predominância de pesquisas que trabalharam com bombeamento. Do ano de

2018 a 2020, foram analisados 18 trabalhos que em sua totalidade avaliaram a otimização de sistemas de bombeamento. A figura 16 apresenta os resultados obtidos.

Figura 16 – Tipo de sistema de abastecimento de água utilizados pelos autores para aplicação dos métodos otimizadores



Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.2.4.7 Tipo de Rede

Estudos voltados a otimização aplicados às redes reais ou teóricas, ou ainda testados em redes teóricas e aplicados em redes reais mais complexas na mesma publicação são encontrados na literatura há bastante tempo.

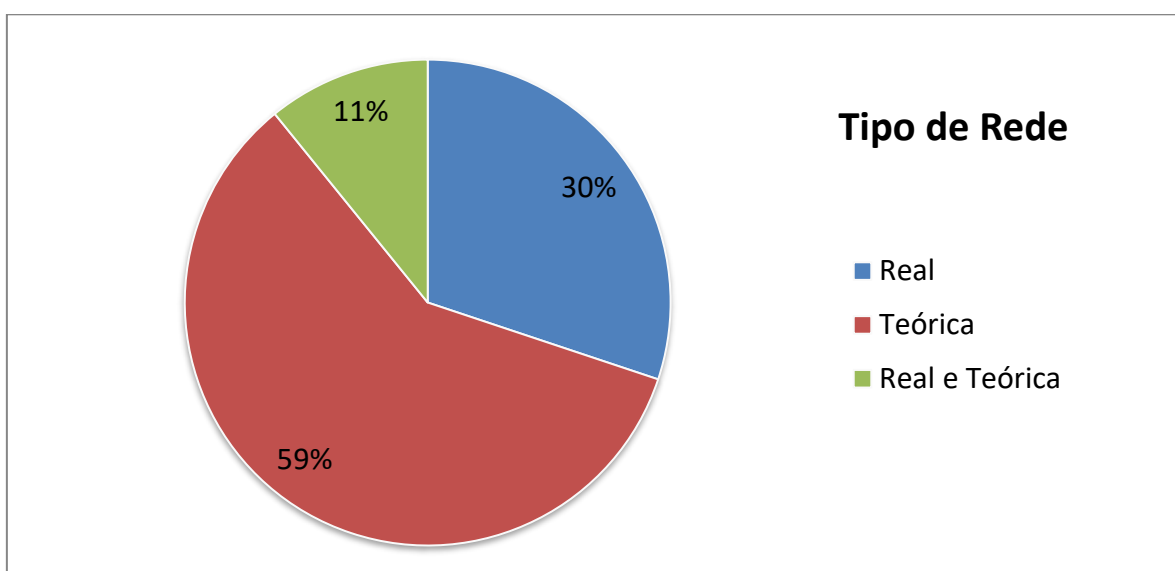
Como é o caso do estudo realizado por Collins (1977), que ainda que tenha trabalhado com reservatórios, o método de otimização foi aplicado a um caso real em Dallas, no Texas. Outro exemplo publicado há quase 40 anos é a pesquisa de Meyers e Shamir (1982), onde é descrito um modelo para determinar a operação ideal do Sistema Nacional de Água de Israel, considerado um sistema complexado para ser estudado no período em que foi publicado, o sistema de água possuía o principal transportador nacional - cerca de 250 km de comprimento do Kinneret (Mar de Galileia) no norte até a região de Negev no sul, e aproximadamente 25 sistemas regionais de água conectados a ele.

Como exemplo de pesquisa que baseou-se no teste da otimização em redes teóricas mais simples e aplicação posterior a redes reais mais complexas, pode ser citado o artigo de López-Ibañez, Prasad e Paechter (2008), onde os autores adaptaram o método de otimização de colônia de formigas (Ant Colony Optimization), com o objetivo de

minimizar os custos de energia do sistema, então inicialmente o método foi testado em uma rede conhecida na literatura que foi desenvolvida por van Zyl et al. (2004) e posteriormente testado no sistema de distribuição de água de Richmond, uma rede real localizada no Reino Unido.

Como exemplo de redes teóricas frequentes nas pesquisas apresentadas pode se citar a rede de teste van Zyl (LÓPEZ-IBÁÑEZ; PRASAD; PAECHTER, 2008), Rede de Anytown (FECAROTTA; MCNABOLA, 2017), e Rede teste do Epanet Net3 (KUREK; OSTFELD, 2013). A grande maioria das pesquisas avaliadas trabalharam com rede teórica (Figura 17).

Figura 17 – Tipo de rede utilizadas na otimização dos trabalhos avaliados



Fonte: Próprio Autor (2020)

#### 4.2.4.8 Simulador Hidráulico

Os primeiros modelos de simuladores hidráulicos surgiram na década de 80, portanto os primeiros artigos publicados avaliados na presente revisão de literatura não utilizavam a simulação hidráulica da rede em suas pesquisas.

Alguns pesquisadores, como o trabalho publicado por Yu, Powell e Sterling (1996) utilizou o KYPIPE, desenvolvido pelo Engenheiro Civil Don J. Wood em 1980, que ainda é utilizado atualmente mas por ser um *software* com custo de aquisição, não é apresentado com frequência na literatura.

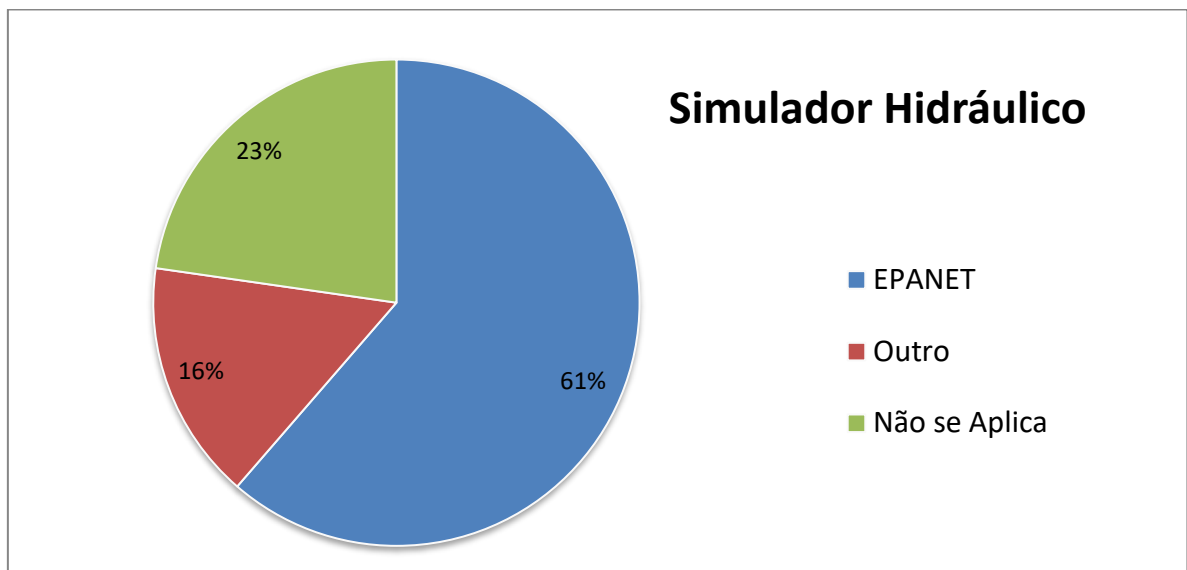
A primeira versão do EPANET foi desenvolvida em 1993, e por se tratar de um *software* de distribuição gratuita com alta confiabilidade e código aberto, ou seja, o

programador pode fazer alterações de acordo com a sua necessidade, este se tornou o programa de simulação hidráulica mais utilizado com base nas pesquisas avaliadas.

Nos trabalhos analisados a partir do ano 2000, quase sua totalidade quando aplicação de simulação hidráulica, o EPANET foi empregado para esta função.

A seguir é apresentado (Figura 18) o resultado percentual referente ao simulador hidráulico mais utilizado.

Figura 18 - Simulador hidráulico mais utilizado nas pesquisas



Fonte: Próprio Autor (2020)

## 5 Conclusão

Após a realização da presente revisão sistemática da literatura apresentada, sendo coletados dados referentes a operação ótima de redes de distribuição de água durante o período de 1977 a 2020 com o principal objetivo de avaliar a evolução das técnicas aplicadas na otimização operacional das redes, coletando dados dos métodos utilizados e suas variáveis é possível concluir que é perceptível o avanço nas pesquisas relacionadas ao tema.

A variedade de métodos de otimização utilizada é vasta, e a cada método apresentado existe a intenção de chegar a solução ótima do problema de forma mais eficiente e com resultados reais. Os métodos primários, onde eram aplicados apenas funções de um objetivo, demandando amplo espaço computacional foram substituídos por técnicas onde é possível atender simultaneamente mais de um objetivo de forma mais rápida e eficiente.

A tendência de publicação de pesquisas na área é de trabalhar com funções multiobjetivo, como pode ser percebido nos resultados dos últimos anos, onde a grande maioria descarta a aplicação de função com único objetivo, reafirmando a evolução de aplicação de métodos de otimização.

A quantidade de variáveis de decisão e restrições varia de acordo com as particularidades de cada sistema, seja real ou teórico. Entende-se que quanto maior o número de restrições, maior a chance de uma delas ser violada e conseqüentemente aplicar a função penalidade ao processo.

As redes teóricas tendem a ser mais simples que as redes reais, muitos pesquisadores optam por testar o método em uma rede fictícia e aplicá-lo à uma rede existente. Algumas redes teóricas são vistas com mais frequência na literatura, como a rede AnyTown, Van Zyl ou Epanet Net3. Já as redes reais apresentadas são estudadas em todo o mundo.

Embora o número de pesquisas com aplicação do modelo à redes teóricas seja claramente superior aos trabalhos aplicados a redes reais, subentende-se que os testes são realizados como forma de aferir a viabilidade dos métodos. Fato este, que pode ser correlacionado à ocorrência de um número superior de pesquisas com redes que operam com uso de bombas, visto que a grande maioria de sistemas reais necessitam da utilização de sistemas de bombeamento.

O simulador hidráulico mais utilizado é o EPANET, desde o início das publicações de pesquisas científicas na área. O *software* de acesso livre, interface simples e código aberto é utilizado pelos pesquisadores há muito tempo.

Foram reunidos e compilados trabalhos de um período relevante, onde foram identificadas as técnicas utilizadas em cada pesquisa e suas variáveis avaliadas. A análise temporal de evolução dos métodos aplicados aos estudos foi realizada de maneira a identificar a contribuição dos estudos na área.

Para pesquisas futuras avalia-se a possibilidade de trabalhar com número maior de artigos, abrangendo a história da otimização desde o século XIX, quando os primeiros algoritmos foram apresentados por Hamilton e Jacobi, e ainda aprofundar nos assuntos relacionados à função objetivo utilizada e suas particularidades.



## REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, M.; KAPELAN, Z. Fast Pump Scheduling Method for Optimum Energy Cost and Water Quality in Water Distribution Networks with Fixed and Variable Speed Pumps. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 12, p. 1–13, 2019.
- AL-ANI, D.; HABIBI, S. Optimal operation of water pumping stations. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 178, n. c, p. 185–198, 2014.
- ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. **Water Resources Research**, v. 13, n. 6, p. 885–900, 1977.
- ALVISI, S.; FRANCHINI, M. Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 135, n. 6, p. 426–439, 2009.
- ARAI, Y. et al. Research on minimizing electric power usage in water distribution system. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 63, n. 2, p. 170–176, 2014.
- ARANDIA, E.; ECK, B. J. An R package for EPANET simulations. **Environmental Modelling and Software**, v. 107, n. June, p. 59–63, 2018.
- ARORA, J. **Introduction to Optimum Design**. [s.l.: s.n.].
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, p. 4. 1994.
- BABAEI, N.; TABESH, M.; NAZIF, S. Optimum reliable operation of water distribution networks by minimising energy cost and chlorine dosage. **Water SA**, v. 41, n. 1, p. 149–156, 2015.
- BAGIROV, A. M. et al. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 57, n. 3–4, p. 873–886, 2013.
- BAGLOEE, S. A.; ASADI, M.; PATRIKSSON, M. Minimization of water pumps' electricity usage: A hybrid approach of regression models with optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 107, p. 222–242, 2018.
- BARROSO, L.; GASTALDINI, M. Redução de Vazamentos em um Setor de Distribuição de Água de Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 2, p. 27–36, 2010.
- BECKER, L.; YEH, W. W-G. Optimization of real time operation of a multiple-reservoir 1, system. **Water Resources Research**. v. 10, n. 6, p. 1107-1112, 1974.
- BEZERRA, S. DE T. M.; DA SILVA, S. A.; GOMES, H. P. Operational optimisation of water supply networks using a fuzzy system. **Water SA**, v. 38, n. 4, p. 565–572, 2012.
- BISCOS, C. et al. Optimal operation of a potable water distribution network. **Water Science and Technology**, v. 46, n. 9, p. 155–162, 2002.

BISCOS, C. et al. Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. v. 29, n. 4, p. 393–404, 2003.

BOECHEL, T. **Algoritmo De Otimização : Uma Abordagem Híbrida Utilizando o Algoritmo das Formigas e Genético**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

BOHÓRQUEZ, J.; SALDARRIAGA, J.; VALLEJO, D. Pumping pattern optimization in order to reduce WDS operation costs. **Procedia Engineering**, v. 119, n. 1, p. 1069–1077, 2015.

BOZORG-HADDAD, O. et al. Development and application of the anarchic society algorithm (ASO) to the optimal operation of water distribution networks. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 18, n. 1, p. 318–332, 2018.

BRENTAN, B. et al. Joint Operation of Pressure-Reducing Valves and Pumps for Improving the Efficiency of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 9, p. 04018055, 2018.

BRENTAN, B. M. et al. Near real time pump optimization and pressure management. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 666–675, 2017.

BRION, L. M.; MAYS, L. W. Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 117, n. 11, p. 1551–1569, 1991.

BURAS, N. Conjunctive operation of dams and aquifers. **Journal of Hydraulics Division**. Proceedings of ASCE, HY6, v. 89, p. 111-131, 1963.

CARPENTIER, P.; COHEN, G. Applied mathematics in water supply network management. **Automatica**, v. 29, n. 5, p. 1215–1250, 1993.

CARPITELLA, S. et al. Multi-criteria analysis applied to multi-objective optimal pump scheduling in water systems. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 19, n. 8, p. 2338–2346, 2019.

CASTRO-GAMA, M. et al. Pump Scheduling for a Large Water Distribution Network. Milan, Italy. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 436–443, 2017.

CHEUNG, P. B. Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo. p. 288, 2004.

CIMORELLI, L. et al. Optimal regulation of pumping station in water distribution networks using constant and variable speed pumps: A technical and economical comparison. **Energies**, v. 13, n. 10, 2020.

COLLINS, M. A. Implementation of an Optimization Model for Operation of a Metropolitan Reservoir System. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 13, n. 1, p. 57–70, 1977.

CONG SUN, C.; PUIG, V.; CEMBRANO, G. Combining CSP and MPC for the operational control of water networks. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 49, p. 126–140, 2016.

CORCORAN, L.; MCNABOLA, A.; COUGHLAN, P. Optimization of water distribution networks for combined hydropower energy recovery and leakage reduction. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 2, p. 1–8, 2016.

COSTA, A. B.; ZOLTOWSKI, A. P. COUTO. Como escrever um artigo de revisão de literatura. **Manual de Produção Científica**, n. May, p. 39–54, 2014.

COSTA, L. H. M. et al. A Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, v. 30, n. 3, p. 1037–1052, 2015.

COSTA, L. H. M.; DE CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. **Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água**. [s.l.: s.n.].

COSTA, L. H. M.; RAMOS, H. M.; DE CASTRO, M. A. H. Hybrid genetic algorithm in the optimization of energy costs in water supply networks. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 10, n. 3, p. 315–326, 2010.

COULBECK, B. Optimal operations in non-linear water networks. **Optimal Control Applications and Methods**, v. 1, n. 2, p. 131–141, 1980.

CREACO, E.; PEZZINGA, G. Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks. **Environmental Modelling and Software**, v. 69, p. 308–318, 2014.

CREACO, E.; PEZZINGA, G. Multiobjective optimization of pipe replacements and control valve installations for leakage attenuation in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 3, p. 1–10, 2015.

DE PAOLA, F. et al. An Application of the Harmony-Search Multi-Objective (HSMO) Optimization Algorithm for the Solution of Pump Scheduling Problem. **Procedia Engineering**, v. 162, p. 494–502, 2016.

DE PAOLA, F. et al. Optimal solving of the pump scheduling problem by using a harmony search optimization algorithm. **Journal of Hydroinformatics**, v. 19, n. 6, p. 879–889, 2017.

DE PAOLA, F.; GALDIERO, E.; GIUGNI, M. Location and setting of valves in water distribution networks using a harmony search approach. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 6, p. 1–7, 2017.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.

DELINSKI, L. M. M.; COLMENERO, J. C. Otimização multiobjetivo : uma abordagem conceitual. **VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, p. 10, 2017.

DIUANA, F. A.; OGAWA, S. C. C. P. Análise Comparativa Dos Modelos Hidráulicos Epanet , Watercad E Sistema Ufc Para Sistemas De Abastecimento De Água – Rede De Distribuição. p. 134, 2015.

EPP, R. FOWLER, A.G. – Efficient code for steady-state flows in networks. **Journal of the Hydraulic Division**, Vol. 96, n° HY1, p. 43-56. 1970,

FECAROTTA, O.; MCNABOLA, A. Optimal Location of Pump as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks to Recover Energy and Reduce Leakage. **Water Resources Management**, v. 31, n. 15, p. 5043–5059, 2017.

FERNÁNDEZ GARCÍA, I. et al. Incorporating the Irrigation Demand Simultaneity in the Optimal Operation of Pressurized Networks with Several Water Supply Points. **Water Resources Management**, v. 30, n. 3, p. 1085–1099, 2016.

GAMEIRO, L. F. DE S. Dimensionamento Otimizado De Redes De Esgotos Sanitários Com A Utilização De Algoritmos Genéticos. p. 66, 2003.

GIACOMELLO, C.; KAPELAN, Z.; NICOLINI, M. Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 2, p. 175–183, 2013.

GONG, Y.; CHENG, J. Optimization of Cascade Pumping Stations' Operations Based on Head Decomposition–Dynamic Programming Aggregation Method Considering Water Level Requirements. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 7, p. 04018034, 2018.

GUPTA, A. et al. Leakage Reduction in Water Distribution Systems with Efficient Placement and Control of Pressure Reducing Valves Using Soft Computing Techniques. **Engineering Technology & Applied Science Research**, n. April, 2017.

GUPTA, A. D.; KULAT, K. Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure management techniques. Case study: Nagpur, India. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 18, n. 6, p. 2015–2027, 2018.

HAJIBANDEH, E.; NAZIF, S. Pressure Zoning Approach for Leak Detection in Water Distribution Systems Based on a Multi Objective Ant Colony Optimization. **Water Resources Management**, v. 32, n. 7, p. 2287–2300, 2018.

HALL, W. A; et al. Optimum Firm Power Output from a Two Reservoir System by Incremental Dynamic Programming. University of California, **Water Resources Center Contribution**. n. 130, 65 p., 1969.

HASHEMI, S. S.; TABESH, M.; ATAEKIA, B. Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks. **Urban Water Journal**, v. 11, n. 5, p. 335–347, 2013.

HASHIMOTO, K. **Técnicas de Otimização Combinatória Multiobjetivo Aplicadas na Estimação do Desempenho Elétrico de Redes de Distribuição**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

HOJJATI, A. et al. Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 66, n. 3, p. 323–329, 2018.

JAMIESON, D. G. River Dee research program; 1. Operating multipurpose reservoir

systems for water supply and flood alleviation. **Water Resources Research**. v. 8, n. 4, p. 899-903, 1972.

JOALLAND, G.; COHEN, G. Optimal control of a water distribution network by two multilevel methods. **Automatica**, v. 16, n. 1, p. 83–88, 1980.

JUN, S.; KWON, H. J. The optimum monitoring location of pressure in water distribution system. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 2, 2019.

KANG, D. Real-time optimal control of water distribution systems. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 917–923, 2014.

KHATAVKAR, P.; MAYS, L. W. Optimization-simulation model for real-time pump and valve operation of water distribution systems under critical conditions. **Urban Water Journal**, v. 16, n. 1, p. 45–55, 2019.

KOLLER, S. H.; COUTO, M. C. P. DE P.; HOHENDORFF, J. VON. **Manual de Produção Científica Métodos de Pesquisa**. [s.l.: s.n.].

KUREK, W.; OSTFELD, A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. **Journal of Environmental Management**, v. 115, p. 189–197, 2013.

KURIAN, V. et al. Optimal operation of water distribution networks with intermediate storage facilities. **Computers and Chemical Engineering**, v. 119, p. 215–227, 2018.

LENCE, B. J.; MOOSAVIAN, N.; DALIRI, H. Fuzzy Programming Approach for Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 7, p. 1–9, 2017.

LETTING, L. K.; HAMAM, Y.; ABU-MAHFOUZ, A. M. An interface for coupling optimization algorithms with EPANET in discrete event simulation platforms. **Proceedings - 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2017**, p. 1235–1240, 2017.

LIMA, E. O. **Algoritmo Genético Híbrido Aplicado à Otimização de Funções**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2008.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, T. D.; PAECHTER, B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 4, p. 337–346, 2008.

MAKAREMI, Y.; HAGHIGHI, A.; GHAFOURI, H. R. Optimization of Pump Scheduling Program in Water Supply Systems Using a Self-Adaptive NSGA-II; a Review of Theory to Real Application. **Water Resources Management**, v. 31, n. 4, p. 1283–1304, 2017.

MALA-JETMAROVA, H.; BARTON, A.; BAGIROV, A. Sensitivity of algorithm parameters and objective function scaling in multi-objective optimisation of water distribution systems. **Journal of Hydroinformatics**, v. 17, n. 6, p. 891–916, 2015.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Optimization of Pump Operation Using Rule-Based Controls in EPANET2: New ETTAR Toolkit and Correction of

Energy Computation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 7, p. 04016012, 2016.

MARQUES, J.; CUNHA, M.; SAVIĆ, D. A. Multi-objective optimization of water distribution systems based on a real options approach. **Environmental Modelling and Software**, v. 63, p. 1–13, 2015.

MARTÍNEZ, F. et al. Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 1, p. 65–78, 2007.

MEHZAD, N. et al. Optimum Reliable Operation of Water Distribution Network Considering Pumping Station and Tank. **Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering**, v. 43, p. 413–427, 2018.

MENKE, R. et al. Investigating trade-offs between the operating cost and green house gas emissions from water distribution systems. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 21, p. 13–22, 2017.

MEYERS, S.; SHAMIR, U. Optimal annual operation of a water supply and distribution system. **Advances in Water Resources**, v. 5, n. 4, p. 240–247, 1982.

MONSEF, H. et al. Pressure management in water distribution systems in order to reduce energy consumption and background leakage. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 67, n. 4, p. 397–403, 2018.

MUHAMMETOGLU, A. et al. Full-scale PAT application for energy production and pressure reduction in a water distribution network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 8, p. 1–12, 2017.

MULHOLLAND, M. et al. Multi-objective optimisation of the operation of a water distribution network. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 64, n. 3, p. 235–249, 2015.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Methods and tools for managing losses in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 2, p. 166–174, 2013.

NAZIF, S. et al. Pressure management model for urban water distribution networks. **Water Resources Management**, v. 24, n. 3, p. 437–458, 2010.

NERANTZIS, D.; PECCI, F.; STOIANOV, I. Optimal control of water distribution networks without storage. **European Journal of Operational Research**, v. 284, n. 1, p. 345–354, 2020.

NICOLINI, M.; ZOVATTO, L. Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 135, n. 3, p. 178–187, 2009.

ODAN, F. K. Estudo de confiabilidade aplicado à otimização da operação em tempo real de redes de abastecimento de água. **Tese (Doutorado)**, p. 210, 2013.

ODAN, F. K.; RIBEIRO REIS, L. F.; KAPELAN, Z. Real-time multiobjective optimization of operation of water supply systems. **Journal of Water Resources**

**Planning and Management**, v. 141, n. 9, p. 1–11, 2015.

ORMSBEE, L. E.; REDDY, S. L. Nonlinear Heuristic For Pump Operations. **Journal of Water Resources Planning and Management**, n. August, p. 302–309, 1995.

PATELIS, M.; KANAKOUDIS, V.; GONELAS, K. Combining pressure management and energy recovery benefits in a water distribution system installing PATs. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 66, n. 7, p. 520–527, 2017.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic Reviews in the Social Sciences - A Practical Guide**. [s.l: s.n.]. v. 64

PEZESHK, S.; HELWEG, O. J. Adaptive search optimization in reducing pump operating costs. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 122, n. 1, p. 57–63, 1996.

PEZESHK, S.; HELWEG, O. J.; OLIVER, K. E. Optimal Operation of Ground-Water Supply Distribution Systems. v. 120, n. 5, p. 573–586, 1994.

PEZZINGA, G.; PITITTO, G. Combined optimization of pipes and control valves in water distribution networks. **Journal of Hydraulic Research**, v. 43, n. 6, p. 668–677, 2005.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica**. 4ª Edição ed. São Carlos: [s.n.].

PRADO, D. S. Programação Linear. 7 edição. Nova Lima: FALCONI Editora, 2016.

PRICE, E.; OSTFELD, A. Iterative LP water system optimal operation including headloss, leakage, total head and source cost. **Journal of Hydroinformatics**, v. 15, n. 4, p. 1203–1223, 2013a.

PRICE, E.; OSTFELD, A. Iterative Linearization Scheme for Convex Nonlinear Equations: Application to Optimal Operation of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 3, p. 299–312, 2013b.

PRICE, E.; OSTFELD, A. Discrete pump scheduling and leakage control using linear programming for optimal operation of water distribution systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 140, n. 6, p. 1–16, 2014.

PULEO, V. et al. Pumps as turbines (PATs) in water distribution networks affected by intermittent service. **Journal of Hydroinformatics**, v. 16, n. 2, p. 259–271, 2014.

RAJABPOUR, R.; TALEBBEYDOKHTI, N.; RAKHSHANDEHROO, G. R. Developing a new algorithm (G-JPSO) for optimal control of pumps in water distribution networks. **Scientia Iranica**, v. 27, n. 1, p. 68–79, 2020.

RIGNEL, D. G. DE S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma Introdução á Lógica Fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e de Gestão Tecnológica**, v. 1, n. 1, p. 17–28, 2011.

RODRIGUES, L. H. et al. **Pesquisa operacional : programação linear passo a passo : do entendimento do problema à interpretação da solução**. São Leopoldo, Rio Grande do Sul: Editora UNISINOS, 2014.

- ROSAL, M. C. F. **Programação Não-Linear Aplicada À Otimização De Redes Pressurizadas De Distribuição De Água**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2007.
- ROSSMAN, L. A. EPANET 2.0 Manual do Usuário. p. 201, 2009.
- SALDARRIAGA, J.; SALCEDO, C. A. Determination of optimal location and settings of pressure reducing valves in water distribution networks for minimizing water losses. **Procedia Engineering**, v. 119, n. 1, p. 973–983, 2015.
- SALOMONS, E. et al. Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 1, p. 51–64, 2007.
- SAMIR, N. et al. Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. **Alexandria Engineering Journal**, v. 56, n. 4, p. 601–612, 2017.
- SANKAR, G. S. et al. Optimal control of water distribution networks with storage facilities. **Journal of Process Control**, v. 32, p. 127–137, 2015.
- SANTOS, T. J. G. **Um novo algoritmo de penalização hiperbólica para resolver o problema de programação não-linear sujeito a restrições de igualdades**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998.
- SANTOS, L. DE P. S. **Otimização multiobjetivo da operação de sistemas de distribuição de água com bombas de rotação variável**. [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 2017.
- SAVIĆ, D. A.; WALTERS, G. A. An evolution program for optimal pressure regulation in water distribution networks. **Engineering Optimization**, v. 24, n. 3, p. 197–219, 1995.
- SHAMIR, U. Water Distribution System Analysis. **J. Hyd. Div. ASCE**, v. 94, n. October, 1968.
- SHAMIR, U. Optimal Design and Operation of Water Distribution Systems. **Water Resources Research**, v. 10, n. 1, p. 27–36, 1974.
- SHAMIR, U.; SALOMONS, E. Optimal real-time operation of urban water distribution systems using reduced models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 2, p. 181–185, 2008.
- SCHWEIG, Z.; COLE, J. A. Optimal control of linked reservoirs. **Water Resources Research**, v. 4, n. 3, p. 479-497, 1968.
- SIGVALDASON, O. T. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. **Water Resources Research**. v. 12, n. 2, p. 263-277, 1976.
- SIMPSON, A. R.; MARCHI, A. Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 12, p. 1314–1317, 2013.
- SIVAKUMAR, P.; PRASAD, R. K.; CHANDRAMOULI, S. Uncertainty Analysis of Looped Water Distribution Networks Using Linked EPANET-GA Method. **Water Resources Management**, v. 30, n. 1, p. 331–358, 2016.



SOLTANJALILI, M. J.; HADDAD, O. B.; MARIÑO, M. A. Operating water distribution networks during water shortage conditions using hedging and intermittent water supply concepts. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 6, p. 644–659, 2013.

STERLING, M. J. H.; COULBECK, B. A dynamic programming solution to optimization of pumping costs. **Proc., Instn. Civ. Engrs.**, p. 813–818, 1975.

TABESH, M.; HOOMEHR, S. Consumption management in water distribution systems by optimizing pressure reducing valves' settings using genetic algorithm. **Desalination and Water Treatment**, v. 2, n. 1–3, p. 96–102, 2009.

TEBCHARANI, G. J. **ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVOS Ganem Jean Tebcharani**. [s.l: s.n.].

TORREGROSSA, D.; CAPITANESCU, F. Optimization models to save energy and enlarge the operational life of water pumping systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 89–98, 2019.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3ª Ed ed. São Paulo: [s.n.].

UFSCAR (São Carlos-SP). Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software. StArt. *In: StArt: Gerenciador de revisão sistemática de bibliografia*. Versão 3.4. São Carlos: Ufscar, 2010. Disponível em: [http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start\\_tool](http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool). Acesso em: 1 jul. 2020.

VAN DIJK, M.; VAN VUUREN, S. J.; VAN ZYL, J. E. Optimising water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm. **Water SA**, v. 34, n. 5, p. 537–548, 2008.

VAN ZYL, J. E.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 160–170, 2004.

VARGAS, D. E. C. **Um Estudo dos Parâmetros do Algoritmo NSGA-II com o operador SBX em Problemas de Otimização Estrutural Multiobjetivo**. 2018

WANG, J. **SWITCHED CONTROL STRATEGIES FOR OPTIMIZED OPERATION OF DWDS**. [s.l.] IFAC, 2007. v. 40

WEGLEY, C.; EUSUFF, M.; LANSEY, K. Determining Pump Operations Using Particle Swarm Optimization. **Water Resources**, n. 1, p. 1–6, 2000.

WU, W.; MAIER, H. R.; SIMPSON, A. R. Single-Objective versus Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems Accounting for Greenhouse Gas Emissions by Carbon Pricing. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 5, p. 555–565, 2010.

XU, Q. et al. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. **Ecological Informatics**, v. 26, n. P1, p. 111–116, 2015.

YU, G.; POWELL, R. S.; STERLING, M. J. H. Optimized pump scheduling in water

distribution systems. **Journal of Optimization Theory and Applications**, v. 83, n. 3, p. 463–488, 1994.

ZHOU, B. et al. Multi-objective optimal operation of coastal hydro-electrical energy system with seawater reverse osmosis desalination based on constrained NSGA-III. **Energy Conversion and Management**, v. 207, n. November 2019, p. 112533, 2020.

WOOD, D. J.; **KYPIPE: Reference Manual**. University of Kentucky, Lexington-KY, 1995.