

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

Proposição de estratégia operacional ótima em rede de distribuição de água

Alex Takeo Yasumura Lima Silva

Itajubá (MG)

2019

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

Alex Takeo Yasumura Lima Silva

Proposição de estratégia operacional ótima em rede de distribuição de água

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

Itajubá (MG)

2019

*Dedico este trabalho ao meu tio, Joaquim Tavares de Lima
(In memoriam).*

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Edna, e a minha avó Cida pela garra e coragem para enfrentar as dificuldades da vida sempre com otimismo e bom humor, sendo um exemplo e incentivo para que eu me dedicasse a pesquisa.

Ao meu Pai Danilo (in memoriam) por ter sempre me incentivado aos estudos e a pesquisa científica, através de sua inteligência, bom humor e desejo de aprender.

A toda minha família pelo apoio e incentivo, em especial aos meus “primãos” William, Aline, Talyta e Paula, bem como as minhas tias Dalva e Aurora por terem dado apoio irrestrito nos momentos mais difíceis. Agradecimento esse que estendo a República Vó Gina, minha segunda família que muito me ajudou nessa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, pela paciência, amizade, apoio, ensinamentos, pela confiança depositada em mim ao longo deste trabalho e acima de tudo pelo exemplo de professor que é, não medindo esforços em prol de seus alunos e orientados e sempre os tratando com muito respeito e educação, bem como pela intensa dedicação à docência e pesquisa.

Ao Prof. Dr. Victor Eduardo de Mello Valério pela inestimável ajuda com a parte de planejamento de experimentos deste trabalho, bem como pela educação, respeito, competência e paciência demonstradas.

Ao aluno de graduação em Engenharia Hídrica André Carlos da Silva, pelo suporte dado ao desenvolvimento deste trabalho, sendo um aluno de extrema competência e profissionalismo, bem como pelo respeito e a amizade criadas.

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 Hidricos da UNIFEI.

Aos colegas e demais professores do MEMARH, pelos conhecimentos transmitidos e pela boa convivência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 com a bolsa de processo n° 1764063.

“O que torna um sonho impossível é a inércia de seu sonhador. Os covardes sonham, mas não tentam, os fracos sonham, mas ficam no meio do caminho, só os fortes sonham e conseguem transformar seu sonho em realidade”.

Epígrafe da tese de doutorado de Joaquim Tavares de Lima

RESUMO

A pressão sobre os recursos naturais aliada a ineficiência de equipamentos e procedimentos operacionais das companhias de saneamento ameaçam o abastecimento futuro da população. Assim, o aumento da eficiência hidroenergética mostra-se essencial para atender a demanda. Deste modo no trabalho propõe-se o desenvolvimento de uma rotina computacional para otimização, assim como estratégia de análise, para otimizar a operação de sistema de abastecimento de água. Portanto, baseou-se nas principais falhas das redes reais e através da sua otimização criou-se uma estratégia operacional. Foram então avaliadas as principais causas da ineficiência hidroenergética nas companhias de saneamento brasileiras e então desenvolveu-se um modelo computacional no EPANET para uma rede teórica que simulasse, em pequena escala, as falhas de uma rede real e então fez-se a implementação do mesmo no programa de otimização em ambiente FORTRAN. O algoritmo de otimização foi desenvolvido utilizando algoritmos genéticos e os níveis dos fatores envolvidos (nível de reservatório, diâmetro de tubulação, pressão de bombeamento e carga a jusante de válvulas) foram estabelecidos utilizando a técnica estatística de Planejamento de Experimentos de modo a se obter a interação entre os fatores de forma individual e conjunta, bem como uma superfície de resposta passível de otimização. As simulações foram bem sucedidas, resultando na equação da superfície de resposta que, otimizada, resultou nos níveis dos fatores que resultam na menor perda possível. Assim, aplicou-se os níveis ótimos dos fatores no algoritmo de otimização computacional, resultando em perdas de 26,61%, melhoria de 16,19% em relação a rede sem otimização, estabelecendo uma estratégia operacional envolvendo três bombas e uma válvula redutora de pressão.

Palavras-chave: Eficiência hidroenergética. Recursos hídricos. Modelagem computacional. Superfície de Resposta. Planejamento de Experimentos.

ABSTRACT

The human pressure over natural resources coupled with the inefficiency of equipment and operating procedures of sanitation companies threaten the future water supply of the population. Thus, increasing the water and energy efficiency is essential to meet demand. This work proposes the development of a computational program for optimization, as well as analysis strategy to optimize the operation of water distribution system. Therefore, it was based on the main faults of the real networks and through this, an optimal operational strategy was created. The main causes of hydroenergetic inefficiency in the Brazilian sanitation companies were then evaluated and then a computational model was developed in EPANET for a theoretical network that simulates, in a small scale, the failures of a real network and then the implementation of the same in the FORTRAN environment optimization program. The optimization algorithm was developed using genetic algorithms and the levels of the factors involved (reservoir level, pipe diameter, pumping pressure and downstream loading of valves) were established using the statistical technique called Design of Experiments in order to obtain interactions between individual and joint factors, as well as an optimized response surface. The simulations were successful, resulting in the response surface equation which optimized resulted in factor levels that resulted in the lowest possible loss. Thus, the optimal levels of the factors were applied in the computational optimization algorithm, resulting in losses of 26.61%, improvement of 16.19% in relation to the network without optimization, establishing an operational strategy involving three pumps and a pressure reduction valve.

Keywords: Water and Energy Efficiency. Water Resources. Computational Modelling. Response Surface. Design of Experiments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rede de distribuição de água	16
Figura 2 – Estratégias para redução das perdas físicas.....	18
Figura 3 – Esquema da rede otimizada.....	22
Figura 4 – Fluxograma de um algoritmo genético	24
Figura 5 – DMC obtido pela otimização	26
Figura 6 – Tipos de redes de distribuição de água	27
Figura 7 – Rede de distribuição de água em Antália, Turquia, dividida em DMCs	30
Figura 8 – Fluxograma das etapas de trabalho	33
Figura 9 – Rede teórica elaborada para o estudo.....	35
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo de calibração.....	38
Figura 11 – Arranjo experimental CCD para 4 fatores	40
Figura 12 – Tipos de arranjos composto central	41
Figura 13 – Fluxograma geral do algoritmo de otimização.....	47
Figura 14 – Curva de calibração do modelo.....	51
Figura 15 – Resultados obtidos para as perdas.....	52
Figura 16 – Resultados do cenário 13	52
Figura 17 – Resultados do cenário 16	53
Figura 18 – Resultados do cenário 22	54
Figura 19 – Resultados do cenário 24	55
Figura 20 – Resultados do cenário 1	56
Figura 21 – Resultados do cenário 3	57
Figura 22 – Resultados do cenário 9	58
Figura 23 – Interferência individual de cada fator na resposta.....	60
Figura 24 – Interação entre as variáveis atuando na resposta.....	61
Figura 25 – Cubo de resposta para a interação das variáveis	62
Figura 26 – Curvas de nível para a interação Nível x Diâmetro	64
Figura 27 – Curvas de nível para a interação Bomba x Diâmetro.....	65
Figura 28 – Curvas de nível para a interação Válvula x Diâmetro.....	65
Figura 29 – Curvas de nível para a interação Bomba x Nível de reservatório	66
Figura 30 – Curvas de nível para a interação Válvula x Nível de reservatório.....	66
Figura 31 – Curvas de nível para a interação Válvula x Bomba	67
Figura 32 – Superfície de resposta para a interação Bomba x Válvula.....	68

Figura 33 – Superfície de resposta para a interação Nível x Válvula.....	68
Figura 34 – Superfície de resposta para a interação Nível x Bomba.....	69
Figura 35 – Superfície de resposta para a interação Válvula x Diâmetro	69
Figura 36 – Superfície de resposta para a interação Bomba x Diâmetro	70
Figura 37 – Resposta para o cenário ótimo	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da rede	35
Tabela 2 – Dados de cotas e consumo dos nós.....	35
Tabela 3 – Níveis de trabalho do experimento fatorial completo.....	41
Tabela 4 – Cenários simulados	42
Tabela 5 – Resultados da calibração do modelo.....	50
Tabela 6 – Resultados dos 16 primeiros cenários no experimento fatorial completo	59
Tabela 7 – Modelagem matemática da resposta como uma função de segunda ordem em função das variáveis independentes.....	63
Tabela 8 – Fatores codificados para o ponto ótimo.....	71
Tabela 9 – Fatores decodificados para o ponto ótimo	71
Tabela 10 – Valores aplicados no algoritmo de otimização de redes.....	72

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos	15
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Redes de distribuição de água	16
3.2	Perdas nas redes de distribuição	16
3.2.1	Métodos para avaliação das perdas físicas	18
3.3	Eficiência hidroenergética nas redes de distribuição de água	19
3.4	A otimização de redes de distribuição de água	21
3.4.1	Algoritmos genéticos	23
3.4.2	Calibração em modelos de redes de distribuição de água	25
3.5	Operação ótima em redes de distribuição de água	26
3.5.1	Controle de pressões	29
3.5.2	Distritos de Medição e Controle (DMC)	30
3.5.3	Planejamento de experimentos - Superfície de resposta.....	31
4.	METODOLOGIA.....	33
4.1	Aspectos gerais	33
4.2	Rede de estudo.....	34
4.3	Modelagem e calibração da rede no programa de otimização	36
4.4	Cálculo das perdas na rede	39
4.5	Planejamento de experimentos e superfície de resposta	39
4.5.1	Planejamento dos cenários a serem simulados	39
4.5.2	Superfície de resposta	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1	Algoritmo de otimização da rede.....	46
5.2	Calibração da rede teórica	50
5.3	Resultados dos cenários simulados.....	51
5.3.1	Cenário 13.....	52
5.3.2	Cenário 16.....	53
5.3.3	Cenário 22.....	54
5.3.4	Cenário 24.....	55

5.3.5	Cenário 1.....	56
5.3.6	Cenário 3.....	57
5.3.7	Cenário 9.....	58
5.4	Análise estatística e superfície de resposta	59
5.4.1	Análise estatística – Influência dos fatores de resposta.....	59
5.4.2	Superfície de resposta e otimização.....	63
5.4.3	Otimização da equação da superfície de resposta.....	70
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

Os recursos naturais estão tornando-se cada vez mais escassos uma vez que o consumo vem aumentando cada vez mais aliado ao aumento populacional, tornando seu uso racional extremamente importante, em especial, a água é sem dúvida um dos mais importantes, uma vez que dela depende a vida humana.

Para uso humano em centros urbanos, a água é tratada e então distribuída em redes de distribuição de água, que garantem que a água chegue em condições sanitárias, volume e pressão adequados, exigindo, portanto, uma estrutura capaz de atender tais exigências. As redes estão sujeitas a perdas, que não implicam apenas em desperdício de água, mas também em desperdício de insumos químicos para seu tratamento e na energia gasta em seu bombeamento.

As perdas podem ser divididas em aparentes ou comerciais, isto é, aquelas oriundas de erros ou ausência de cobrança, medidores descalibrados, consumo clandestino, dentre outros, sendo a grosso modo consideradas como a água consumida, porém não faturada, enquanto que as perdas reais podem ser consideradas aquelas onde a água não chegou ao seu destino, causadas por vazamentos, ruptura de tubulações e extravasamento de reservatórios. No Brasil, as perdas podem chegar até a 60% em alguns estados e chegam a causar problemas de ordem financeira nas companhias de saneamento, uma vez que deixam de obter o faturamento, tornando-se incapazes de investir em melhorias e capacitação de pessoal (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2013).

Para o controle das perdas reais podem ser utilizadas estratégias operacionais que envolvam controle das pressões, como a adoção de bombas e válvulas na rede, modificação da altura do reservatório de distribuição de água e alteração de diâmetros da tubulação. Contudo, faz-se necessária a simulação computacional da rede de forma a estudar os resultados obtidos pelas estratégias, uma vez que seria inviável fazê-lo na rede real em funcionamento, bem como de um algoritmo que permita a otimização do seu funcionamento.

O desenvolvimento do algoritmo lançou mão dos algoritmos genéticos, baseados na teoria de Darwin e que realizam buscas globais a partir da evolução das melhores respostas da geração (iteração) anterior, sendo capazes de solucionar problemas complexos e se adequando a problemas em simulação hidráulica como calibração de redes, dentre outros.

Para que a elaboração de uma estratégia ótima de operação tenha sucesso, é necessário elaborar os cenários de simulação para o algoritmo de otimização, atribuindo valores para as variáveis envolvidas, que no caso foram altura do reservatório, diâmetro da tubulação, pressão

de bombeamento e carga a jusante da válvula. Assim, empregou-se o Planejamento de Experimentos, técnica estatística baseada nos menores e maiores níveis de cada fator (variável) de modo a se analisar a influência dos mesmos na resposta de forma individual e conjunta, bem como analisar também pontos fora do espaço amostral (pontos axiais) e pontos centrais, de forma a obter uma equação que forneça uma superfície de resposta.

A equação da superfície de resposta é passível de otimização empregando métodos matemáticos, fornecendo então os níveis dos fatores envolvidos que fornecerão a solução ótima para a estratégia operacional, estes por sua vez foram aplicados no algoritmo de otimização que estabeleceu a quantidade de bombas e válvulas implementadas e o resultado das perdas, resultando em melhoria significativa das perdas na rede.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho propõe um algoritmo para otimização de operação em uma rede de distribuição de água utilizando os algoritmos, sendo sua aplicação para uma rede teórica e em seguida são feitas análises técnicas e estatísticas de resultados do algoritmo proposto.

2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, este trabalho realizou:

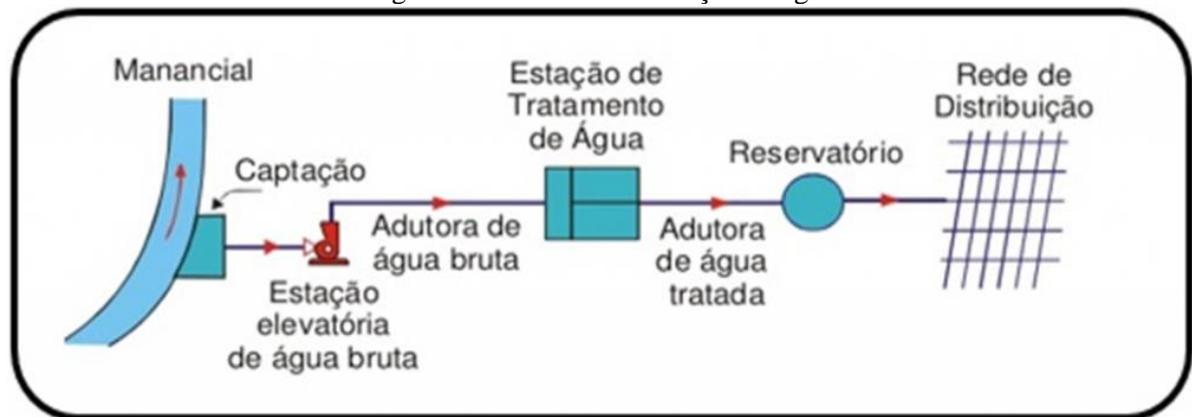
- a) Desenvolvimento de uma rede teórica no software EPANET para aplicação do algoritmo;
- b) Adequação do modelo matemático de redes desenvolvido por Silva (2003) em linguagem FORTRAN para a rede teórica desenvolvida;
- c) Análises estatísticas com os resultados da otimização em FORTRAN, bem como as superfícies de resposta para os cenários analisados para a obtenção dos níveis ótimos de operação dos fatores.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Redes de distribuição de água

Um sistema de distribuição de água tem por objetivo captar, tratar e distribuir água em condições adequadas aos consumidores, sejam eles residenciais, industriais ou comerciais, conforme exemplificado na Figura 1. De uma forma geral, é composto por tubulações, bombas, acessórios, reservatórios e demais equipamentos que lhe permitam atender, dentro de condições sanitárias e de vazão e pressão, aos pontos de consumo de uma cidade (PORTO, 2006).

Figura 1 – Rede de distribuição de água



Fonte: EOS Organização e Sistemas¹

O seu dimensionamento deve levar em conta fatores como a topografia, tipo de manancial disponível no local, população a ser atendida e a sua estimativa de crescimento, de modo que o sistema seja capaz de atender adequadamente a população durante muitos anos conforme Tsutiya (2006a), sendo que os mananciais para abastecimento podem ser poços profundos e/ou rasos, lagos, rios e reservatórios formados por barragens.

3.2 Perdas nas redes de distribuição

O aumento da demanda, dado o crescimento populacional, aliada a redução da disponibilidade hídrica devido à pressão antrópica no meio ambiente vem fazendo com que as companhias de distribuição de água busquem reduzir suas perdas de modo a continuarem atendendo suas demandas sem que se aumente ainda mais a pressão sobre os recursos hídricos

¹ Disponível em: <https://www.eosconsultores.com.br/sistema-de-distribuicao-de-agua/>. Acesso em: 22 set. 2018.

(CHINI; STILLWELL, 2018). Kanakoudis e Muhammetoglu (2014) mencionam perdas na ordem de 45 bilhões de m³ em todo o mundo, sendo que a redução pela metade dessas perdas seria capaz de abastecer cerca de 200 milhões de pessoas sem a necessidade de maiores investimentos, enquanto que Fontana, Giugni e Portolano (2012) mencionam perdas na casa de 30 a 40% nas redes, na maioria das vezes devido a deterioração de seus componentes ao longo do tempo (tubulações, conexões, etc...) devido à falta de manutenção, uma vez que segundo Mutikanga, Sharma e Vairavamoorthy (2013), o fato das tubulações estarem enterradas faz com que as mesmas sejam negligenciadas até que apresentem vazamentos ou falhas.

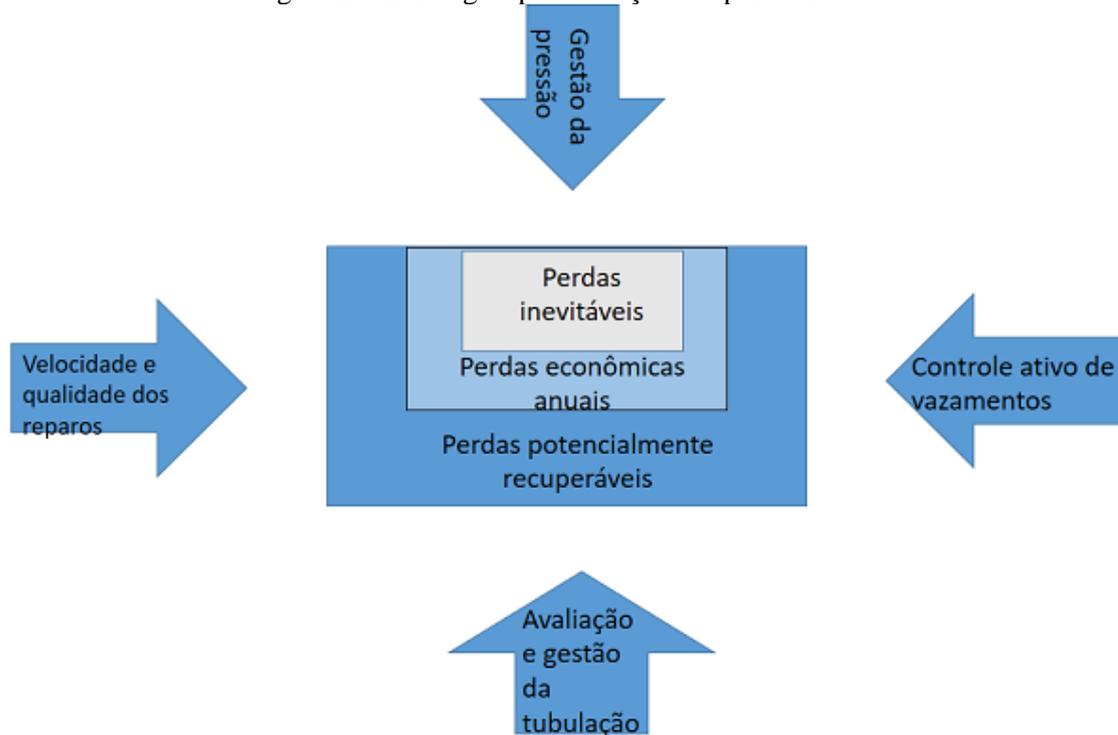
Além disso há também o fato de as perdas representarem significativo prejuízo financeiro as companhias, na ordem de US\$ 14 bilhões de dólares ao ano em todo o mundo sendo particularmente mais crítico em países em desenvolvimento, pois tolhem a capacidade das companhias de investir em melhorias e expansão do sistema (MUTIKANGA; SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2013). Pinnto et al. (2017) mencionam que um projeto de rede de distribuição de água deveria balancear o custo de implantação, geralmente baixo, se comparado com o custo de manutenção que acaba por ser elevado devido à alta frequência de intervenções.

As perdas podem ser divididas, segundo Kanakoudis e Muhammetoglu (2014) em aparentes ou comerciais, isto é, a água não faturada devido a ligações clandestinas, falhas em hidrômetros, contabilizações erradas do consumo de água e demais usos não autorizados de água. Os autores citam como soluções para as perdas aparentes o uso de medidores mais exatos, maior fiscalização e legalização de ligações clandestinas e a automatização da contabilização do consumo de água.

Já as perdas reais, oriundas de vazamentos nas redes, são um dos maiores problemas em uma rede de abastecimento de água é a pressão nas tubulações, haja vista que em muitos casos não há um controle e acaba-se por gerar danos nas tubulações devido as sobrepressões. Assim, Fontana, Giugni e Portolano (2012) mencionam a gestão de pressões na rede como estratégia de redução das perdas por vazamentos, reduzindo as mesmas para valores que não causem danos nas redes e permitam o adequado fornecimento de água para o horário de pico e para serviços de hidrante.

Assim, como forma de redução das perdas físicas, pode-se utilizar a manutenção baseada em controle ativo de vazamentos, avaliação das tubulações e a gestão das pressões na rede através da modelagem da mesma, conforme exposto na Figura 2 (KANAKOUDIS; MUHAMMETOGLU, 2014; MUTIKANGA; SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2013; SANZ et al., 2016).

Figura 2 – Estratégias para redução das perdas físicas



Fonte: adaptado de Kanakoudis e Muhammetoglu (2014)

O enfoque deste trabalho está na redução das perdas físicas, uma vez que seu objetivo é a otimização da operação de uma rede teórica de distribuição de água através de modelagem e simulação.

3.2.1 Métodos para avaliação das perdas físicas

Para avaliar as perdas reais, Tsutiya (2006a) mostra duas possibilidades: O método do balanço hídrico e o método das vazões mínimas noturnas. Segundo o autor, o primeiro consiste de utilizar a matriz do balanço hídrico anual conforme padrões estabelecidos pela IWA. O conceito de balanço hídrico pode ser representado pela seguinte expressão:

$$Perdas\ reais = Vol.\ disponibilizado - Vol.\ autorizado - Perdas\ aparentes$$

A aplicação do método, conforme Tsutiya (2006a), se dá pelos seguintes passos:

- a) Entrar com os valores do volume atual disponibilizado relativos a macromedição, fazendo-se os devidos ajustes caso preciso;
- b) Entrar com os volumes totalizados relativos aos hidrômetros (micromedição);

- c) Estimar os volumes faturados não medidos, como as ligações por taxa fixa sem hidrômetro;
- d) Estimar os volumes não faturados medidos, como por exemplo o uso próprio da companhia de saneamento;
- e) Estimar os consumos não faturados e não medidos, como as ligações clandestinas, uso para combates a incêndios, dentre outros;
- f) Somar as perdas aparentes, e assim, obter as perdas reais por diferença.

As suas vantagens são as hipóteses e estimativas serem baseadas em estudos anteriores, bem como os dados de macro e micromedição já estarem disponíveis na companhia possuindo baixo custo de implantação, embora trate-se de um método pouco preciso para a estimativa de perdas reais.

Já o método das vazões mínimas, conforme Tsutiya (2006a) baseia-se na variação do consumo na rede ao longo do dia, uma vez que normalmente o pico de consumo se dá entre as 11:00 e as 14:00 horas e o consumo mínimo se dá entre as 3:00 e 4:00 horas da madrugada, sendo a vazão neste horário a vazão mínima noturna, cujos parâmetros (vazão e pressão) podem ser medidos desde que os procedimentos de fechamento dos registros limítrofes do subsetor em análise sejam adequados. Este método tem por vantagem o fato que no horário de ocorrência da vazão mínima noturna a mesma ser muito estável devido ao consumo muito baixo, assim, grande parte de seu valor se refere aos vazamentos, causados pela alta pressão nesse período. No entanto, multiplicar os vazamentos por 24 horas acabaria por produzir uma superestimação exagerada das perdas reais diárias, sendo necessário adotar o Fator Noite/Dia, um fator de correção dado em horas por dia que multiplicado pelas perdas, as ajusta, resultando no volume médio diário das perdas. Trata-se de um método que permite uma maior representatividade das perdas obtidas no subsetor em análise, assim como também permite uma atualização do conhecimento das condições operacionais no local, no entanto, pesam contra este método o alto custo de pessoal e equipamentos que precisam ser enviados ao local de medição e por se tratar de uma análise em uma área relativamente pequena do setor, podendo levar a erros caso a extrapolação do setor não seja feita de forma adequada.

3.3 Eficiência hidroenergética nas redes de distribuição de água

A distribuição e o tratamento da água respondem por cerca de 7% do consumo mundial de energia, com previsão de aumento nos próximos anos segundo Coelho e Andrade-Campos

(2014), portanto há a necessidade de uma estratégia que garanta o abastecimento adequado de modo a se evitar uma operação ineficiente, com aumento do consumo de energia no processo.

Em relação a realidade brasileira, no âmbito hídrico, o relatório da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (2013) aponta uma média de 40% de perdas reais e aparentes, com algumas empresas de saneamento atingindo até 60% de perdas, o que faz com que as mesmas percam faturamento e capacidade de investimento em melhorias. A realidade brasileira, portanto, mostra-se muito aquém dos países desenvolvidos, tomando por exemplo Japão e Alemanha com cerca de 11% de perdas, mostrando uma grande margem para a redução que pode vir a se reverter em até R\$ 20 bilhões até 2025 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2013). No âmbito energético, Zocoler et al. (2011) mencionam que cerca de 40% do consumo das companhias de saneamento são perdidos pela ineficiência de equipamentos tais como bombas, motores, dentre outros.

Diante deste cenário, são propostas soluções visando corrigir a ineficiência do sistema. Tsutiya (2006b) menciona em seu livro a necessidade da adequação do projeto de bombeamento no que diz respeito ao dimensionamento dos motores, devendo ser feito de modo a evitar um baixo fator de carga, que, conforme a resolução normativa nº414 de 9 de setembro de 2010 da ANEEL, é definida como a razão entre a demanda média e máxima da unidade consumidora ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado, sendo utilizada como um indicador de racionalidade de uso da rede elétrica onde quanto mais próximo de 1, mais racional o uso. Os pesquisadores russos Makisha e Kazimirova (2018) elencam em seu trabalho um leque de medidas, divididas em três categorias: Custo zero (ou baixo custo), custo médio e custo elevado. As medidas de custo zero ou baixo compreendem a operação adequada da rede de distribuição de água e seus equipamentos uma vez que muitas vezes carecem de instruções e/ou treinamentos adequados, e a substituição dos selos das bombas por selos de Teflon, com durabilidade até seis vezes maior.

As medidas de custo médio compreendem melhorias na rede de distribuição de água como readequação do projeto dos condutos em termos de diâmetro, cujo aumento em até 50% pode ser capaz de reduzir 75% das perdas de carga bem como a adoção de condutos com revestimentos menos rugosos, controle do consumo de água e prevenção de vazamentos, campanhas de uso consciente com a população, análise do consumo de água e operação econômica das bombas, onde Makisha e Kazimirova (2018) fazem as seguintes recomendações:

- a) Substituição de bombas ineficientes ou antiquadas;

- b) Adequação das bombas as características de vazão e pressão, evitando superdimensionamentos desnecessários;
- c) Melhoria do desempenho das bombas através de balanceamento do rotor e/ou troca de juntas e gaxetas;
- d) Uso de inversores de frequência no lugar de válvulas para o controle de vazão;
- e) Caso não haja a possibilidade de uso de inversores, utiliza-se o bombeamento em paralelo, com desligamento da capacidade ociosa.

3.4 A otimização de redes de distribuição de água

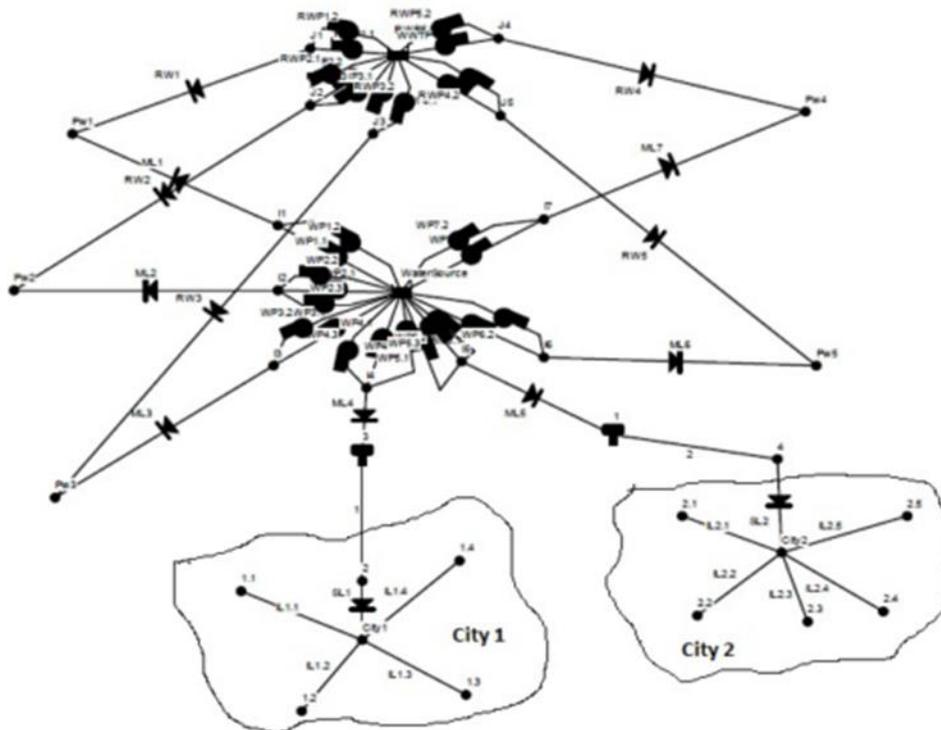
A modelagem, dentro do contexto deste trabalho, pode ser entendida como a tentativa de se reproduzir com ferramentas matemáticas e computacionais o funcionamento de uma rede de distribuição de água o mais fielmente possível através de calibrações, sendo então utilizadas para simulações visando a otimização da rede. Assim, ao longo deste tópico serão discutidas questões acerca de sua importância e desenvolvimento.

Toda otimização, independente da área, tem por objetivos maximizar os benefícios e minimizar eventuais adversidades e/ou prejuízos. Partindo dessa premissa, Khatavkar e Mays (2017a) desenvolveram um trabalho cujo objetivo era testar um modelo de otimização e simulação em tempo real para as operações de uma rede de distribuição de água sob limitações na disponibilidade de eletricidade, podendo estas ser causadas por desastres naturais, falhas na rede elétrica, secas, entre outros, de modo que a mesma atenda as demandas exigidas pelos usuários e as pressões requeridas pelo sistema.

A otimização foi desenvolvida através do uso de algoritmos genéticos e do simulador de redes EPANET através do software MATLAB, sendo utilizada uma interface MATLAB-EPANET para se traduzir a linguagem utilizada na programação do simulador (C++) para o software. Basicamente, seu funcionamento se dá através da recepção inicial dos dados de eletricidade, incluindo dados observados e previstos, e dados recebidos pelo sistema supervisor de controle e aquisição de dados (SCADA) da rede, que incluem as pressões, vazões e níveis dos reservatórios, bem como o status das bombas do sistema. Então, a otimização é iniciada com os dados atualizados de modo a se obter os valores para o bombeamento e demanda para o próximo período, várias vezes, até que se atenda as condições de parada do algoritmo genético. Então, a solução obtida realimenta o sistema e o processo se repete até o período desejado (KHATAVKAR; MAYS, 2017b).

Aplicou-se a otimização em uma rede fictícia composta por duas cidades (1 e 2) e um sistema de distribuição de eletricidade composto por cinco usinas de geração de energia, que demandam água para sua refrigeração. A cidade 1 é composta de quatro zonas de pressão com uma demanda base de 113562,40 litros por minuto (l/m) enquanto que a cidade 2 consiste de cinco zonas de pressão e demanda de 94635,29 l/m. São utilizadas ao todo 28 bombas, sendo 17 para captação de água doce e 11 de água dessalinizada como pode se observar na Figura 3.

Figura 3 – Esquema da rede otimizada



Fonte: Khatavkar e Mays (2017b)

O modelo mostrou-se capaz de otimizar a operação, atendendo a demanda sempre que possível dentro da disponibilidade energética sem comprometer os limites de pressão. Acima de tudo, porém, mostrou uma nova abordagem de otimização, podendo ser utilizado com modelos de otimização de distribuição de eletricidade de modo a se evitar um efeito cascata em caso de falhas tanto na distribuição de água como na de eletricidade (KHATAVKAR; MAYS, 2017b). No campo da eficiência energética, há a possibilidade de aprimoramento das otimizações já existentes.

3.4.1 Algoritmos genéticos

Desenvolvido por John Holland em 1975, o método de otimização e busca dos Algoritmos Genéticos (AGs) se baseiam no princípio do naturalista inglês Charles Darwin da seleção natural e da sobrevivência dos mais aptos, que preconiza que o indivíduo melhor adaptado ao seu ambiente terá maior chance de sobreviver e gerar descendentes. Durante a reprodução, fenômenos como a mutação onde partes do material genético armazenado nos cromossomos pode ocorrer, levando a variabilidade nas espécies.

A terminologia empregada nos AGs, de acordo com Lacerda e Carvalho (1999) é uma metáfora da seleção natural, portanto a lista a seguir descreve os termos utilizados:

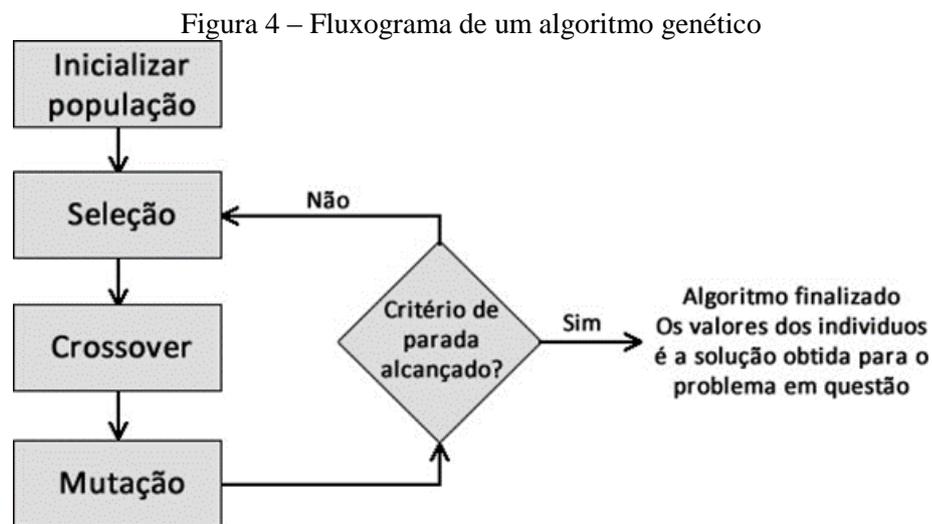
- a) Cromossomo ou genoma: Genoma é o conjunto completo de genes de um organismo, podendo possuir vários cromossomos. Nos AGs, representam a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, logo, um cromossomo ou genoma representa um simples ponto no espaço de busca;
- b) Gene: A unidade de hereditariedade transmitida pelo cromossomo, nos AGs é um parâmetro codificado no cromossomo;
- c) Indivíduo: Um membro da população, nos AGs é formado pelo cromossomo e sua aptidão;
- d) Genótipo: A composição genética contida no Genoma, nos AGs é a informação contida no cromossomo;
- e) Fenótipo: Nos AGs, representa o objeto constituído pelas informações do genótipo;
- f) Alelo: Uma das formas alternativas de um gene, sendo que nos AGs representa os valores que o gene pode assumir;
- g) Epistasia: Interação entre os genes do cromossomo, ou seja, quando um valor de gene influencia o valor de outro gene. Problemas com altas epistasias são difíceis de serem resolvidos por AGs.

Vem sendo utilizados em problemas de otimização onde outros métodos falham, possuindo, dentre outras, as seguintes vantagens, conforme Lacerda e Carvalho (1999):

- a) Funcionam com parâmetros contínuos, discretos, ou uma combinação de ambos;
- b) Realizam buscas simultâneas em várias regiões de busca pois trabalham com uma população e não um ponto;
- c) Não necessita de conhecimento aprofundado do problema abordado;
- d) Otimizam grande número de variáveis;

- e) Fácil implementação em computadores;
- f) Modularidade e portabilidade: O mecanismo de evolução é separado do problema, podendo ser transferido e adaptado de um problema para outro;
- g) Flexibilidade com restrições arbitrárias e capacidade de otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- h) Podem ser hibridizados com outras técnicas e heurísticas.

O fluxograma da Figura 4 ilustra o funcionamento de um algoritmo genético:



Fonte: Computação Inteligente – O algoritmo genético²

O algoritmo genético se enquadra na categoria de otimização conhecida por “Gerar-e-testar”, ou método da busca exaustiva, onde se emprega dois módulos: o de geração, que enumera possíveis soluções de forma sistemática ou aleatória e o modulo de teste, que avalia a aceitação ou rejeição das possíveis soluções, podendo o critério de parada ser o número de soluções (gerações) obtidas ou a obtenção de uma solução que atenda aos requisitos (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Embora tenham se tornado populares para se obter soluções ótimas ou quase-ótimas em otimizações em redes de distribuição de água, possuem também o inconveniente de consumir grande tempo computacional chegando a ponto de consumir dias de processamento ou exigir computadores muito poderosos em simulações de redes reais conforme Tanymboh e Seyoum (2017), que apontam como solução o uso de computação paralela, ou seja, a utilização em paralelo de dois processadores sendo um responsável pela geração da população inicial e outro

² Disponível em: <http://computacaointeligente.com.br/algoritmos/o-algoritmo-genetico/>. Acesso em: 23 nov. 2017.

responsável pela seleção, cruzamento e mutação da população. Assim, consegue-se uma redução de tempo computacional para apenas 6,7% do tempo de um algoritmo em série.

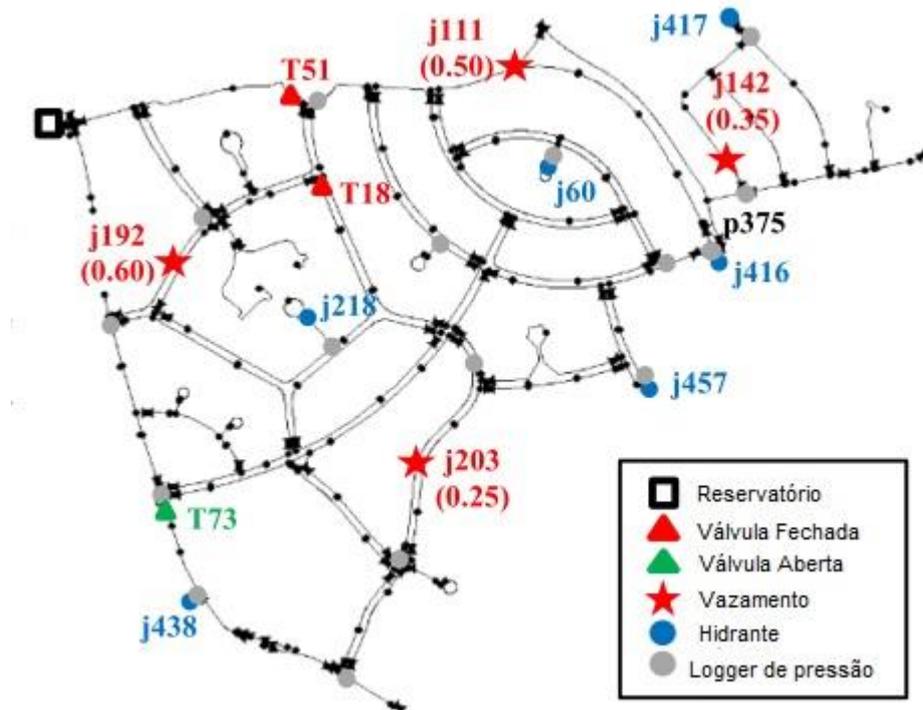
3.4.2 Calibração em modelos de redes de distribuição de água

A diferença entre a calibração numérica de uma rede de distribuição de água para a calibração de um instrumento de medição consiste do fato que enquanto a calibração de um sistema de medição é um conjunto de operações, sob condições específicas e controladas, que relaciona os valores indicados por um instrumento com os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por um padrão, enquanto que a calibração de modelos numéricos consiste da aproximação dos valores calculados pelo mesmo tomando por referência as medições realizadas em diversos pontos da rede real (SANTOS, 2016). Ademais, a calibração numérica de redes utiliza de duas variáveis (pressão e vazão) simultaneamente, sendo um processo mais complexo que a calibração de um instrumento de medição. Um modelo é considerado bem calibrado quando o mesmo não produz um erro superior ao admissível, sendo o erro neste caso a diferença dos valores estimados pelo modelo gerado com os valores obtidos pela medição em campo (SANTOS, 2016). Salvino, Carvalho e Gomes (2015) realizaram a calibração de um modelo hidráulico do Sistema Piloto de Distribuição de Água (SPDA) do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS-UFPB) utilizando um algoritmo genético multiobjetivo. O modelo proposto permitiu utilizar até sete variáveis de forma simultânea ou qualquer combinação delas, sendo: rugosidade, demanda, perda de carga singular, cota topográfica, vazamentos, diâmetros e as válvulas. Os resultados mostraram-se satisfatórios, com todas as tentativas apresentando convergência e um tempo de processamento da rede em questão inferior a 5 minutos.

Utilizando também os algoritmos genéticos, Do et al. (2016) realizaram três estudos de caso para a calibração de multiplicadores de demanda de água em redes de distribuição de água. O primeiro estudo de caso foi para a demonstração do modelo enquanto o segundo caso foi uma comparação entre a solução com algoritmos genéticos e um modelo de decomposição em valores singulares, ao passo que o terceiro caso foi uma rede de distribuição grande de modo a se levar em conta as questões práticas da aplicação em um contexto real. Os resultados mostraram que os algoritmos genéticos não apenas foram capazes de calibrar os valores medidos como também permitiu a estimativa de vazões e pressões em locais onde não haviam valores medidos.

Em seu trabalho, Sophocleous et al. (2015) realizaram a calibração em dois estágios de um modelo de uma rede real para a detecção de pontos de vazamento, através do uso de algoritmos genéticos para resolver problemas de otimização com a calibração dos parâmetros utilizados, minimizando as diferenças entre os valores medidos e obtidos pela otimização. Foi utilizada a interface MATLAB para a escrita do código de otimização e o programa EPANET2 para a simulação da rede, sendo mostrada na Figura 5 o DMC obtido.

Figura 5 – DMC obtido pela otimização



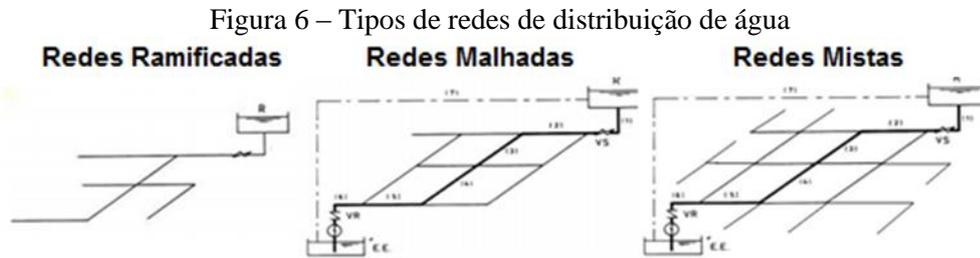
Fonte: adaptado de Sophocleous et al. (2015)

Os resultados obtidos, face as calibrações monoestágio mostraram uma melhoria na detecção de pontos de vazamento, sendo uma abordagem promissora que pode ser útil para as operações das redes, deixando como sugestão o uso de dados reais coletados em campo (SOPHOCLEOUS et al., 2015). Observa-se, nos casos anteriormente mencionados, o uso dos algoritmos genéticos, demonstrando a validade e a confiabilidade desta ferramenta na calibração de modelos e também na otimização de redes.

3.5 Operação ótima em redes de distribuição de água

A análise da operação de uma rede de abastecimento de água é bastante complexa quanto a sua operação e manutenção conforme Porto (2006), pois a concepção de uma rede é

determinada através do porte da cidade a ser abastecida, condições topográficas e viárias. Tais redes podem ser malhadas, ramificadas ou mistas, como pode se observar na Figura 6.



As redes ramificadas são aquelas cujo abastecimento se faz através de uma tubulação tronco, alimentada por um reservatório de montante ou bombeamento e a distribuição da água é feita por condutos secundários e o sentido da vazão em qualquer trecho da rede é conhecido. Já as redes malhadas são aquelas que permitem a vazão percorrer em ambos os sentidos, sendo mais interessantes para abastecimento público pois permitem a realização de reparos sem que se comprometa a maior parte da rede (PORTO, 2006).

A operação de uma rede de distribuição de água envolve uma série de fatores, entre eles o custo, relativo ao funcionamento de bombas cujo objetivo é suprir as demandas, que por sua vez possuem por característica a incerteza conforme Ougui (2003) que também menciona que a questão do bombeamento tem grande importância pois há a necessidade de se adequar a distribuição de água a atual realidade dos custos da energia elétrica. Assim, serão comentados alguns trabalhos relativos a modelagem e otimização da operação de redes de distribuição de água.

Em seu trabalho, Kepa e Stanczyk-Mazanek (2014) desenvolveram um modelo para a rede de distribuição de água que pertence a PWiK, companhia de águas de Czestochowa, Polônia, tendo sido o mesmo desenvolvido no programa Epanet com dados numéricos e operacionais. O trabalho ressalta a importância da utilidade de um modelo na operação de redes, e as autoras enfatizam que a adequada operação de uma rede é fator-chave no preço para o consumidor final e também o fato de atualmente a computação oferecer possibilidades virtualmente infinitas de soluções para os problemas de distribuição na rede facilitando a tomada de decisões pela companhia, inclusive em casos de expansão ou redesenvolvimento (KEPA; STANCZYK-MAZANEK, 2014). O modelo desenvolvido pelas autoras demonstrou

³ Disponível em: <http://www.eosconsultores.com.br>. Acesso em 24 out. 2017.

que, adequadamente desenvolvido e calibrado, é capaz de oferecer economias significativas as empresas de distribuição de água através da eliminação de investimentos errôneos, pela capacidade de simulação de várias soluções.

Soler et al. (2016) abordam em seu trabalho a otimização dos custos de energia elétrica na captação, armazenamento e distribuição de água, cujo problema consiste em decidir o acionamento das bombas e a duração do bombeamento, bem como a transferência de água entre os reservatórios de modo a se atender a demanda enquanto se minimiza o consumo de energia elétrica. O problema foi modelado pelos autores como um problema de programação linear inteira e a solução proposta foi através do método heurístico, onde os períodos são classificados em críticos (horários de ponta), pré-críticos (antecedem o horário de ponta) e não críticos (demais períodos), onde a heurística consiste em verificar para cada período a sua classificação (SOLER et al., 2016). A validação do método se deu através de um gerador de exemplares para um horizonte de 2 dias, divididos em períodos de uma hora implementados em linguagem C, de modo a englobar dois horários de ponta (18 h e 21 h) e então foram geradas seis classes de exemplares, sendo que as três últimas correspondiam juntas a quase todo o sistema de abastecimento da cidade de São Carlos – SP. A avaliação do impacto da heurística na redução dos custos com energia elétrica, conforme Soler et al. (2016), mostrou reduções na ordem de 19,05% para a quarta classe de exemplares a 22,80% para a quinta classe de exemplares, mostrando ser capaz de produzir boas soluções em frações de segundo, o que torna viável seu uso uma vez que a incerteza da demanda exige a otimização do problema.

A questão da otimização de operação de bombas com padrões incertos de demanda é levantada no trabalho de Khatavkar e Mays (2017a), que chamam a atenção pelo fato de que limitações como os acionamentos e desligamentos frequentes de bombas (“liga e desliga”) são consideradas também na otimização, uma vez que podem aumentar significativamente os custos de manutenção pois tal procedimento causa considerável desgaste nas bombas, além de aumentar o custo com eletricidade uma vez que a partida das mesmas ocasiona picos de corrente no sistema. Tal limitação tem tamanha importância que os autores mencionam também que a frequência de manutenções não-programadas é diretamente proporcional ao número de acionamentos das bombas durante sua vida útil. A modelagem, segundo Khatavkar e Mays (2017a) se deu utilizando Programação Não-Linear Mista (MINLP) e de início foi aplicada a título de exemplo em uma rede de distribuição de água urbana, onde observou-se uma redução de custos na manutenção das estações de bombeamento com a otimização dos acionamentos

das bombas O modelo pode, segundo os autores, ser estendido para outros sistemas de bombeamento, de pequena ou grande escala.

A importância donexo água-energia é evidenciada por Vakilifard et al. (2018), uma vez que segundo os autores tal nexo não apenas garante a sustentabilidade da operação do fornecimento de água para uma demanda crescente, mas reduz também as preocupações energéticas e ambientais relacionadas, destacando a ausência de planejamento da distribuição de água considerando energias renováveis em um contexto urbano. A coordenação ótima da distribuição de água e energia com a operação do sistema elétrico é abordada por Oikonomou e Parvania (2019) que propõem um modelo que otimiza a flexibilidade das redes de distribuição de água para a previsão de funcionamento de redes de distribuição de energia, enquanto Rahmani et al. (2018) utilizam de teoria dos grafos para configurar as DMCs de modo a se obter uma operação ótima da rede.

3.5.1 Controle de pressões

A norma técnica ABNT NBR nº 12.218/1994, substituída em 2017 pela norma ABNT NBR nº 12.218/2017, preconiza como limites de pressão nas redes de distribuição de água os valores de 100 kPa (10 m.c.a.) para a pressão dinâmica mínima e 500 kPa (50 m.c.a.) de pressão estática máxima, sendo que valores fora da faixa podem ser admitidos desde que adequadamente justificados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, 2017). Assim, uma vez que as pressões estão diretamente ligadas as perdas reais nas redes, o seu controle torna-se fundamental. Tsutiya (2006a) alerta para o pensamento errôneo de que pressões elevadas nas redes é sinônimo de um bom padrão de abastecimento de água, uma vez que tal situação não resulta em melhoria operacional e propicia perdas não apenas nas redes, mas também dentro das residências dos clientes. A operação, portanto, tem como importante referência os níveis de pressão que atendam aos mínimos especificados nas horas de pico.

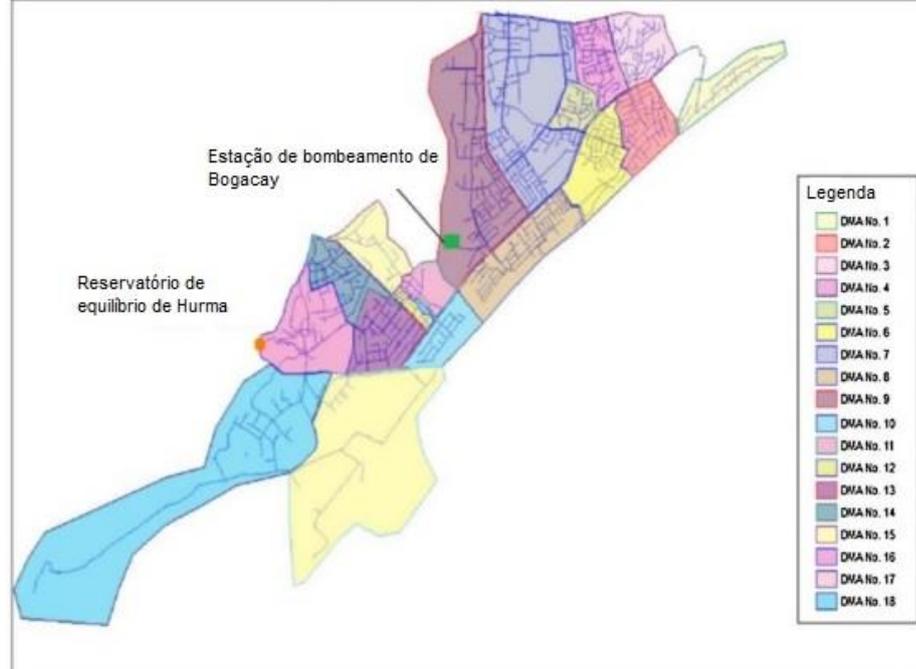
Uma maneira bastante consagrada de se resolver a inadequação das pressões é utilizar conjuntos motobomba (*boosters*) para o caso de pressões abaixo do adequado e válvulas redutoras de pressão (VRP) para sobrepressões (COVELLI et al., 2016). Contudo, Fecarotta et al. (2015) sugerem o uso de bombas funcionando como turbinas (BFT) para o controle de pressão em redes de distribuição de água, tendo como vantagem principal um potencial hidrelétrico capaz de recuperar parte da energia consumida no processo de distribuição, sendo que existem estudos no Brasil desenvolvidos pelo Laboratório Hidromecânico para Pequenas

Centrais Hidrelétricas da Universidade Federal de Itajubá (LHPCH-UNIFEI), conforme Viana e Nogueira (2002) que demonstram a viabilidade de uso da BFT no ramo da microgeração.

3.5.2 Distritos de Medição e Controle (DMC)

Uma rede de distribuição de água, pela sua natureza, é uma rede interligada e de grande porte – mesmo em cidades menores, sendo necessário adotar o paradigma de “dividir para conquistar” conforme NARDO et al. (2017), pois a complexidade das redes é tamanha que mesmo com a tecnologia atual seria praticamente inviável gerenciar toda uma rede de uma só vez, assim como seria necessária uma potência computacional imensa para se realizar as simulações de toda a rede, sendo então necessário dividir a rede em setores, chamados Distritos de Medição e Controle (DMC). Essa técnica começou a ser utilizada no Reino Unido na década de 80 e então passou a ser recomendada pela Associação Internacional de Águas (*International Water Association*) como um meio efetivo de gestão das redes de distribuição de águas (NARDO et al., 2017). Uma divisão de uma rede em DMCs para a cidade de Antalya, Turquia, é exemplificada na Figura 7.

Figura 7 – Rede de distribuição de água em Antália, Turquia, dividida em DMCs



Fonte: adaptado de Kanakoudis e Muhammetoglu, 2014

A criação de DMCs, após anos de desenvolvimento, seguia um guia empírico que orientava a sua criação levando em conta critérios como tamanho, pressões, nível de perdas,

custo, confiabilidade, dentre outros, assim, dada a complexidade de tal tarefa, por muito tempo a metodologia usada foi a de tentativa-e-erro (HAN; LIU, 2017). Atualmente, utilizam-se técnicas de otimização tais como algoritmos genéticos e critérios econômicos e de eficiência energética para a sua criação, permitindo maximizar os benefícios do maior controle enquanto se minimizam eventuais impactos adversos de sua criação (HAN; LIU, 2017; NARDO et al., 2017).

3.5.3 Planejamento de experimentos - Superfície de resposta

Quando se fala em abastecimento e distribuição de água, uma das principais otimizações buscada passa a ser então a redução da perda de água, sendo assim pode ser feito uma modelagem matemática para o problema e através de uma equação conhecida, que envolva a variável a ser otimizada, buscar a minimização ou maximização desta equação. Porém em situações reais é muito difícil se conhecer uma função que represente bem todas as principais variáveis de entrada e as respostas do sistema, logo formular tal função com um alto grau de confiabilidade e representatividade não é uma tarefa tão simples, demonstrando a importância de recorrer a ferramentas estatísticas (GOMES, 2013).

A importância do Planejamento de Experimentos (*Design Of Experiments* – DOE) é demonstrada no trabalho de S. Sanchez, P. Sanchez e Wan (2018), onde comparam um experimento com 100 variáveis, cada uma com dois níveis de operação a serem simulados em um supercomputador, onde pela abordagem da força bruta levariam 178 milênios para serem simulados enquanto que o experimento, sob a ótica do Planejamento de experimentos levaria apenas 9,5 horas, mostrando a capacidade de racionalização dos experimentos. Dentre as vantagens desta técnica, pode-se enumerar também a maior confiabilidade dos resultados e a possibilidade de obtenção de modelos matemáticos capazes de prever resultados em condições não testadas (PEREIRA; PEREIRA-FILHO, 2018).

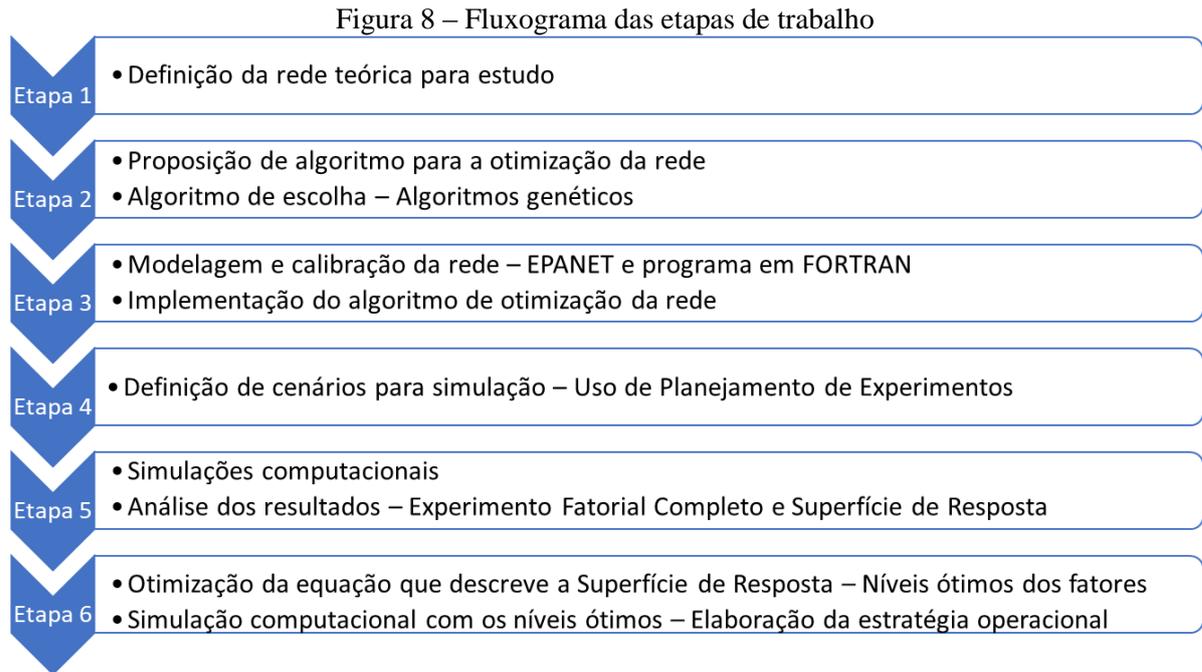
Já a metodologia da superfície de resposta (MSR), conforme Cecon e Silva (2011), trata-se de técnicas matemáticas e estatísticas para modelar e analisar as respostas que possam ser influenciadas por várias variáveis (fatores), bem como permitir também a otimização da resposta. O trabalho de Najafi et al. (2018) mostra o uso da metodologia para otimizar a produção de biodiesel de forma a otimizar a quantidade de mistura com o diesel derivado de petróleo para se obter o melhor aproveitamento energético no motor.

Já os pesquisadores Yongfan, Shuai e Jing (2017) utilizaram as técnicas de DOE e MSR de modo a se obter parâmetros ótimos para o funcionamento de um motor para motocicletas, uma abordagem mecânica similar à de Salvador et al. (2018) que utilizaram para estabelecer parâmetros críticos e geométricos para bicos injetores em motores diesel. Abordagens na área de alimentos como as de Yu, Low e Zhou (2018) onde as metodologias foram utilizadas para a avaliação de fatores sensoriais relativos ao sabor e aceitação de alimentos, mostrando a versatilidade das metodologias estatísticas no campo da ciência. Assim, a análise estatística contida nesta dissertação se baseia no método da superfície de resposta para modelar o problema relacionado as perdas de água de modo a se obter os níveis ótimos de operação para os fatores envolvidos.

4. METODOLOGIA

4.1 Aspectos gerais

O trabalho é dividido em etapas, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 8.



Fonte: autor (2019)

A etapa 1 consiste em idealizar propostas de redes teóricas para o estudo, de forma que a mesma possua componentes mínimos para se permitir uma análise adequada de sua operação sem que sua implementação computacional seja custosa. Foi então desenvolvida uma rede ramificada de modo que fosse de implementação simples e capaz de atender os requisitos de análise do trabalho.

Assim, implementou-se a rede no software EPANET e então realizou-se uma simulação de modo a garantir que os resultados estivessem de acordo com os obtidos na iteração inicial deste trabalho, ficando então este modelo em EPANET pronto para ser usado como uma referência para os resultados a serem obtidos no modelo a ser desenvolvido em linguagem FORTRAN.

Uma vez definida a rede, passou-se então a etapa 2, de proposição de algoritmo para a sua otimização, foi realizada uma atividade de otimização visando a minimização do custo de operação das bombas de um sistema de distribuição de água simplificado através do uso de um algoritmo genético em linguagem FORTRAN, com o objetivo de se otimizar a implantação de

bombas e válvulas de forma a atender as demandas e minimizar as pressões médias, e por consequência, as perdas, sendo o algoritmo baseado no desenvolvido partindo do trabalho de Silva (2003) em sua tese.

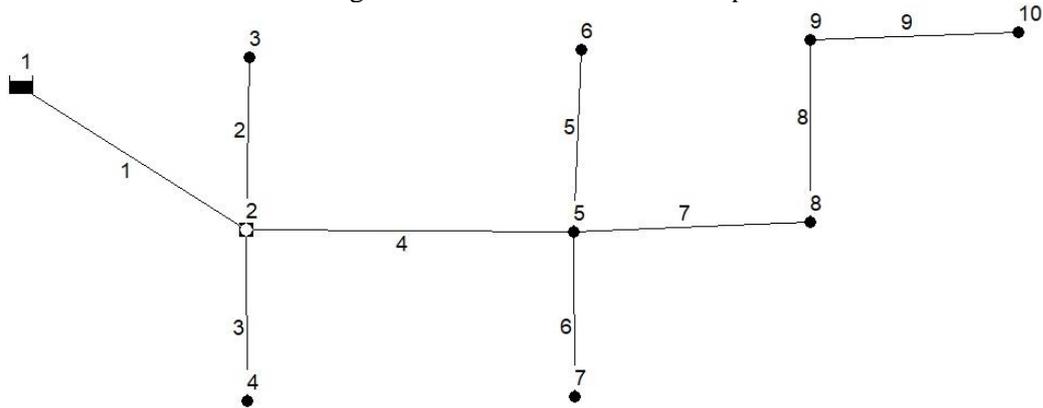
A etapa 3 consiste em desenvolver o modelo da rede proposta em linguagem FORTRAN baseando-se no modelo desenvolvido na etapa 1, através da elaboração de uma rotina de cálculos hidráulicos relativos as tubulações, bombas e válvulas de redução de pressão. Uma vez que os resultados obtidos pelo modelo em FORTRAN estejam de acordo com aqueles desenvolvidos no EPANET, inicia-se então o desenvolvimento do código que fará a otimização da rede, implementando o algoritmo genético ao modelo desenvolvido. O código é desenvolvido em blocos, através de sub-rotinas, o que permite o desenvolvimento em separado do modelo e do algoritmo genético, facilitando eventuais correções ou alterações necessárias.

Inicia-se então a etapa 4, definindo-se os cenários para a simulação da rede através da técnica de Planejamento de Experimentos que define os níveis mínimo e máximo de operação dos fatores envolvidos (Pressão de bombeamento, Pressão a jusante da válvula, nível de reservatório e diâmetro da tubulação). Assim, na etapa 5 são feitas as simulações dos cenários e a análise estatística através do experimento fatorial completo, gerando a superfície de resposta e a sua equação. Após, é feita a otimização da equação da superfície de resposta através dos mínimos quadrados ordinários e, com os níveis ótimos dos fatores, é feita então a simulação computacional de modo a se obter a estratégia operacional ótima.

4.2 Rede de estudo

Escolheu-se uma rede ramificada simples teórica, elaborada pelo próprio autor, uma vez que se trata de rede de implementação simples, ao mesmo tempo que é capaz de atender os requisitos de análise deste trabalho, sendo mostrada na Figura 9. Os dados de rugosidade utilizados foram os mesmos utilizados pela rede hipotética do trabalho de Silva (2003), mas adotados para todos os trechos enquanto seus comprimentos foram arbitrados conforme dados mostrados na Tabela 1. Os diâmetros foram baseados naqueles encontrados nas tabelas A1 e A2 de Porto (2006), enquanto que as demandas e cotas foram estabelecidas de modo a se reproduzir a situação de uma rede em região com trechos de relevo acidentado, de forma a gerar pontos extremos de pressão e assim exigir a otimização da operação da rede, conforme Tabela 2.

Figura 9 – Rede teórica elaborada para o estudo



Fonte: autor (2019)

Tabela 1 – Dados da rede

Trechos	Nós	Rugosidade (mm)	D (m)	L (m)
1	1-2	0,25	0,400	1500
2	2-3	0,25	0,300	950
3	2-4	0,25	0,300	900
4	2-5	0,25	0,400	1750
5	5-6	0,25	0,350	1100
6	5-7	0,25	0,250	800
7	5-8	0,25	0,400	1000
8	8-9	0,25	0,250	750
9	9-10	0,25	0,150	500

Fonte: autor (2019)

Tabela 2 – Dados de cotas e consumo dos nós

Nós	Cotas (m)	Demandas (l/s)
1 (R)	825,0	-
2	800,0	8,5
3	795,0	9,0
4	792,0	9,5
5	780,0	14,0
6	810,5	15,0
7	778,5	15,0
8	750,0	7,0
9	765,5	8,0
10	812,5	9,0

Fonte: autor (2019)

Uma vez desenvolvida a rede teórica, foi necessária sua implementação no programa EPANET de modo a gerar os resultados de pressão necessários para a calibração da rede, sendo considerada então o padrão de comparação, como se fosse uma rede real, com o modelo hidráulico desenvolvido em FORTRAN, assim, sendo possível a verificação do critério de desempenho dos modelos de calibração estabelecidos pelo Water Research Centre (1989), que preconiza 0,5 m.c.a. de diferença para 85% dos pontos monitorados, sendo no caso deste trabalho aplicado para 100% dos pontos monitorados.

4.3 Modelagem e calibração da rede no programa de otimização

O modelo hidráulico utilizado para simular a rede teórica foi desenvolvido por Silva (2003) e escrito em linguagem FORTRAN 77, sendo então portado para FORTRAN 90 e devidamente adaptado para a rede desenvolvida neste trabalho. O cálculo da perda de carga se dá pela fórmula universal, da equação 1:

$$h = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1)$$

onde:

- h – Perda de carga (m.c.a.);
- f – Fator de atrito;
- L – Comprimento do tubo (m);
- D – Diâmetro interno do tubo (m);
- V – Velocidade média do escoamento (m/s).

O fator de atrito é calculado pela fórmula de swamee, mostrada na equação 2:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Rey} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Rey} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2)$$

onde:

- f – fator de atrito (adimensional);
- Rey – N° de Reynolds (adimensional);
- D – Diâmetro da tubulação (mm);

- ε - Rugosidade da tubulação (mm).

O modelo fornece valores de pressão e vazão para cada nó e trecho, respectivamente, da rede, a partir de dados de entrada, sendo que sua formulação também envolve a equação da continuidade para cada nó da rede e a equação da energia para cada trecho, sendo a solução obtida por linearizações sucessivas conforme Germanopoulos e Jowitt (1989), assim, fixadas as demandas nos nós e o nível do reservatório, o modelo produz valores de vazão nos trechos e pressões nos nós da rede. A equação da continuidade para cada nó é fornecida pela equação 3:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} + C_i = 0; \text{ para todos os nós } i \quad (3)$$

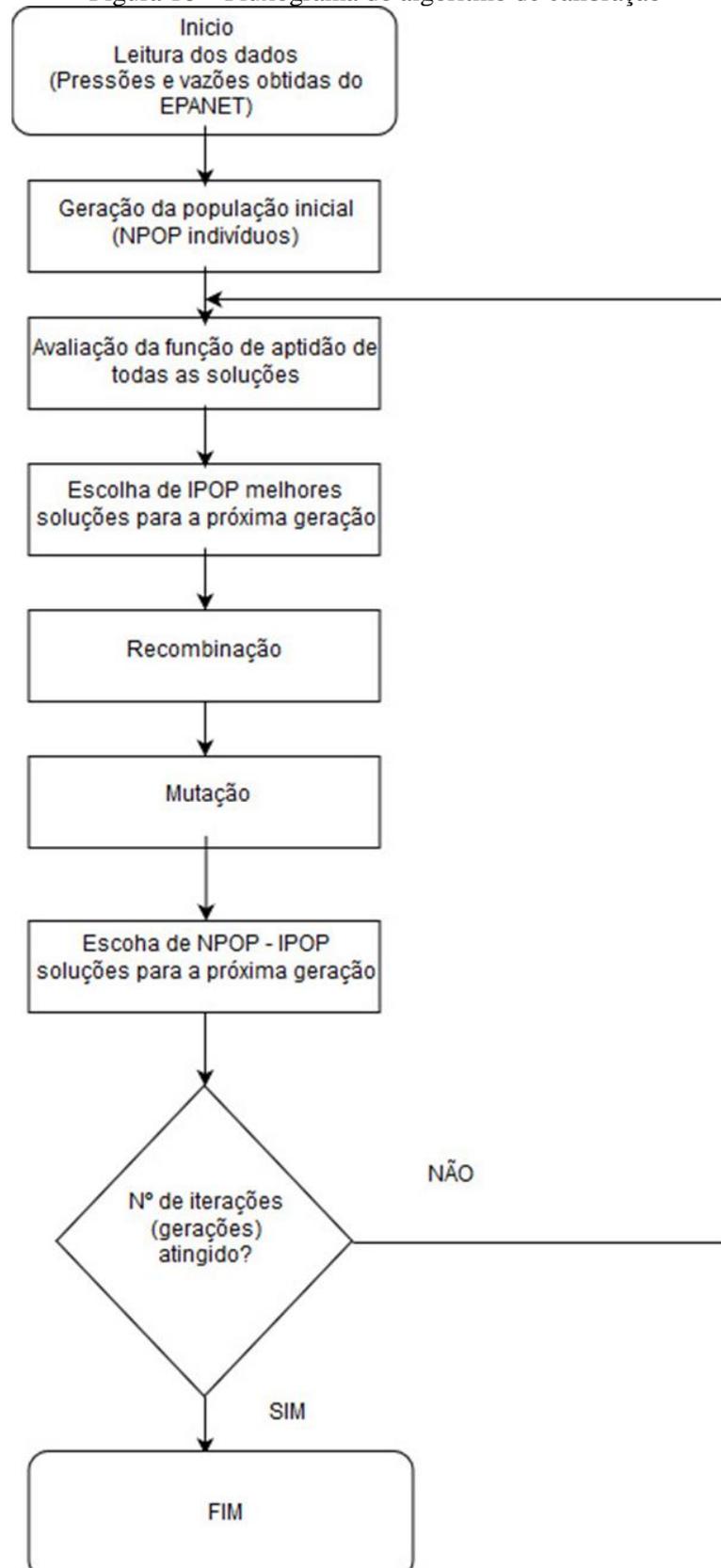
onde:

- Q_{ij} – Vazão no trecho que conecta os nós i e j ;
- C_i – Consumo no nó i ;
- J_i – Todos os nós conectados ao nó i .

A calibração da rede implementada no FORTRAN é feita através de um algoritmo genético adaptado de Silva (2003), onde o tamanho da população (NPOP) é 30 e seu funcionamento assegura que um determinado número de melhores soluções para cada geração (IPOP) sejam submetidos aos processos de recombinação e mutação, que possuem 95% de chance de ocorrência cada um.

Após, considerando o número total de soluções, as melhores são selecionadas (NPOP – IPOP) e adicionadas das soluções da geração anterior preservadas, e o processo se repete até a quantidade de gerações desejadas para o programa, no caso, 10000. O fluxograma do algoritmo de calibração é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma do algoritmo de calibração



Fonte: adaptado de Silva (2003)

4.4 Cálculo das perdas na rede

O cálculo das perdas nas redes exige o estudo de modelos de vazamentos de modo a se prever a sua ocorrência e quantidade. Nesse sentido, trabalhos recentes como o de Sanz et al. (2016) tratam da localização e detecção de vazamentos relacionando-os com a demanda – ainda que indiretamente relacionada com a pressão – enquanto Soldevila et al. (2017) utilizam cálculos Bayesianos para fazer a correlação das perdas com as pressões na rede e Abdulshaeed, Mustapha e Ghavamian (2017) desenvolveram um método baseado em pressões para monitorar perdas em uma rede, enquanto abordagens mais clássicas como a de Tucciarelli Criminisi e Termini (1999), Germanopoulos e Jowitt (1989) e Jowitt e Xu (1990) apontam uma correlação das perdas de água numa rede com as pressões.

Assim, este trabalho optou por uma abordagem clássica baseada em Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), que consideram que as perdas de água por pequenos vazamentos em cada nó são dadas pela sua pressão elevadas a um expoente a , com valor mínimo de 0,5, relativo a área circundante do nó onde ocorrem as perdas bem como a encontrada em Silva (2003). O cálculo das perdas, então, é dado pela equação 4:

$$\sum_{i=1}^{n\acute{o}s} Perdas = P_{media}^{0,5} \times 7,27 \quad (4)$$

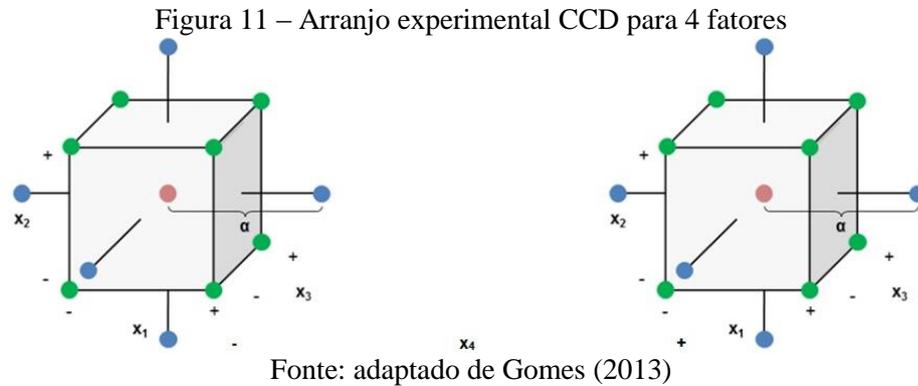
onde as perdas são representadas em percentual (%) e a pressão média (P_{media}), a média aritmética das pressões nos nós da rede.

4.5 Planejamento de experimentos e superfície de resposta

4.5.1 Planejamento dos cenários a serem simulados

Uma vez que se trata de um experimento computacional onde uma rede teórica é simulada e otimizada, houve a necessidade de se desenvolver cenários nos quais os resultados pudessem ser comparados e analisados. Para este trabalho utilizou-se o arranjo experimental conhecido como arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*), que se baseia em definir os extremos das variáveis, sendo um extremo como o máximo valor que a variável pode atingir (identificado como um sinal +), outro como o mínimo (identificado como um sinal -) e os pontos intermediários que as variáveis possam atingir, representados em vermelho, além

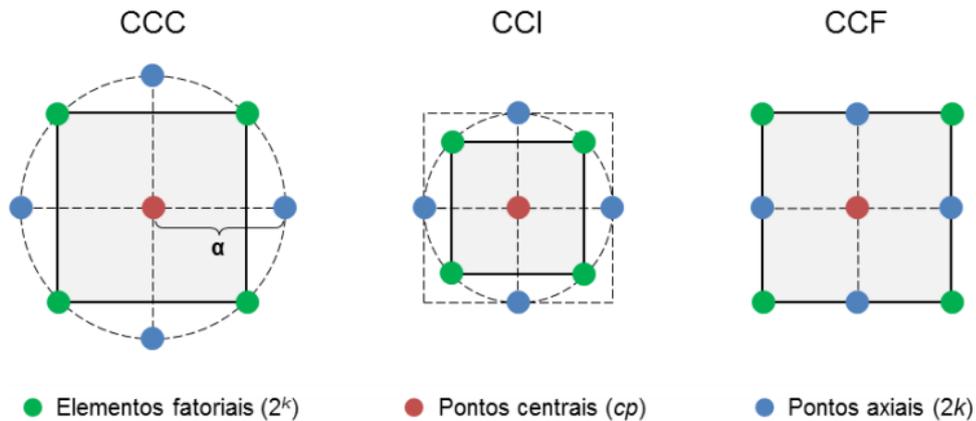
dos pontos axiais representados em azul, sendo exemplificado pela Figura 11, que mostra este tipo de arranjo (GOMES, 2013).



Para melhor se interpretar a Figura 11, deve-se entender que as arestas do cubo representam o valor da resposta a partir da combinação entre as variáveis independentes naquele ponto. Por exemplo, a aresta inferior esquerda da face frontal do cubo esquerdo representa a resposta $y(x)$, ou seja, as perdas de água na rede, para o menor valor de x_1 , menor valor de x_2 , menor valor de x_3 para o menor valor de x_4 , ou seja $y(x_1, x_2, x_3, x_4)$ para $-x_1, -x_2, -x_3$ e $-x_4$. O CCD, é uma matriz, formada por 3 grupos, onde a matriz depende de k fatores, o fatorial completo (2^k), ou fracionado (2^{k-p}), onde p significa a fração desejada do experimento), um grupo de níveis extremos, chamados de axiais (2^k) e um conjunto de pontos centrais (cp), logo a quantidade de experimentos necessários é dada por $2^k + cp + 2k$ (GOMES, 2013).

Também se faz necessário conhecer a localização dos pontos axiais através de uma função, esta pode ser do tipo circunscrito, de face centrada ou inscrito. Assim o arranjo composto circunscrito (CCC) é o próprio arranjo CCD, neste os pontos axiais estão a uma distância α dos cp, requerendo 5 níveis para cada fator. Já o arranjo de face centrada (CCF) possui os cp no centro de cada face do espaço fatorial, com $\alpha = +1$ ou -1 , requerendo assim 3 níveis para cada fator. O último, arranjo inscrito (CCI) se adequa nos casos em que os limites determinados as variáveis de entrada não podem ser alterados, podendo o α ser determinado como $\alpha = (2^k)^{1/4}$. Os arranjos são apresentados na Figura 12, onde pode-se verificar que o arranjo CCC é o que engloba maior espaço amostral e que o CCF engloba o menor (GOMES, 2013).

Figura 12 – Tipos de arranjos composto central



Fonte: adaptado de Gomes (2013)

Assim, através do uso de planejamento de experimentos realizou-se então um experimento fatorial completo, cujos níveis de trabalho, tanto para os pontos estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Níveis de trabalho do experimento fatorial completo

Parâmetros	Fator	Unidade	Níveis de trabalho				
			-2	-1	0	1	2
Diâmetro	A	m	0,1375	0,25	0,3625	0,475	0,5875
Nível	B	m	797,50	815,00	832,50	850,00	867,50
Pressão da bomba	C	m.c.a.	7,50	15,00	22,50	30,00	37,50
Pressão da válvula	D	m.c.a.	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00

Fonte: autor (2019)

Onde os níveis de 1 a -1 representam os valores máximos e mínimos dos fatores envolvidos, 0 representa o ponto central e 2 e -2 representam os pontos axiais, valores contidos fora da abrangência dos máximos e mínimos envolvidos no experimento de forma a se permitir a busca por eventuais ótimos que não estejam contidos no espaço amostral analisado. Assim, foram simulados os cenários apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Cenários simulados

	Fator A	Fator B	Fator C	Fator D
Cenário	Diâmetro (m)	Nível (m)	P. Bomba (m)	P. Válvula (m)
1	0,25	815	15	30
2	0,475	815	15	30
3	0,25	850	15	30
4	0,475	850	15	30
5	0,25	815	30	30
6	0,475	815	30	30
7	0,25	850	30	30
8	0,475	850	30	30
9	0,25	815	15	50
10	0,475	815	15	50
11	0,25	850	15	50
12	0,475	850	15	50
13	0,25	815	30	50
14	0,475	815	30	50
15	0,25	850	30	50
16	0,475	850	30	50
17*	0,1375	832,5	22,5	40
18*	0,5875	832,5	22,5	40
19*	0,3625	797,5	22,5	40
20*	0,3625	867,5	22,5	40
21*	0,3625	832,5	7,5	40
22*	0,3625	832,5	37,5	40
23*	0,3625	832,5	22,5	20
24*	0,3625	832,5	22,5	60
25**	0,3625	832,5	22,5	40
26**	0,3625	832,5	22,5	40
27**	0,3625	832,5	22,5	40
28**	0,3625	832,5	22,5	40
29**	0,3625	832,5	22,5	40
30**	0,3625	832,5	22,5	40
31**	0,3625	832,5	22,5	40

Os cenários sem asteriscos correspondem aos 16 pontos do experimento fatorial completo, os cenários com um asterisco (*) correspondem aos pontos axiais e os cenários com dois asteriscos (**) correspondem aos pontos centrais.

Fonte: autor (2019)

4.5.2 Superfície de resposta

Neste experimento, foi necessário adotar um modelo de segunda ordem, onde a resposta é dada pela equação 5 demonstrada por Cecon e Silva (2011):

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i X_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2, i < j}^k \hat{\beta}_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (5)$$

onde:

- Y – é a resposta a ser obtida;
- X_1, X_2, \dots, X_k – são as variáveis independentes com influência na resposta;
- $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_i (i = 1, 2, \dots, k), \hat{\beta}_{ij} (j = 1, 2, \dots, k)$ – são parâmetros estimados;
- ε – é um erro aleatório do experimento.

A codificação das variáveis, isto é, a transformação das mesmas de valores numéricos para níveis (-2, -1, 0, 1 e 2) é dada pela equação 6:

$$x_{iu} = \frac{X_{iu} - \bar{X}_i}{s_{x_i}}, \text{ para } u = 1, 2, \dots, N \text{ e } i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

onde:

- X_{iu} – é o u -ésimo nível da i -ésima variável independente;
- \bar{X}_i – é igual a $\sum_{u=1}^N \frac{X_{iu}}{N}$, ou seja, a média dos valores de X_{iu} ;
- s_{x_i} – é igual a $\left[\sum_{u=1}^N \frac{(X_{iu} - \bar{X}_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$, ou seja, o desvio padrão;
- N – é o número de observações.

Assim, a equação da resposta codificada é expressa por meio da equação 7:

$$\hat{Y}_u = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_{iu} + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_{iu}^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2, i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_{iu} x_{ju} + \varepsilon_u \quad (7)$$

Para o estudo da natureza da superfície de resposta, isto é, para saber se o ponto de resposta será um ponto de mínimo, máximo ou de sela, deve-se multiplicar a matriz hessiana com a sua matriz identidade, de modo a se obter seus autovalores, conforme Cecon e Silva (2011), por meio da equação 8:

$$|B - \lambda I| = 0 \quad (8)$$

onde B é a matriz hessiana, sendo esta expressa por meio da equação 9:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \hat{Y}}{\partial X_1^2} & \cdots & \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \hat{Y}}{\partial X_1 \partial X_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \hat{Y}}{\partial X_k \partial X_1} & \cdots & \frac{\partial^2 \hat{Y}}{\partial X_k^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Nesse caso, se todos os autovalores λ forem positivos, X_s será um ponto de resposta mínima, enquanto que se todos os autovalores forem negativos, X_s será um ponto de máximo. Caso haja autovalores positivos e negativos, X_s será um ponto de sela.

Para a obtenção dos parâmetros estimados, lançou-se mão do método dos mínimos quadrados ordinários, conforme Rossi e Neves (2014), pela equação 10 a seguir:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (10)$$

onde X , $\hat{\beta}$ e \hat{Y} são, respectivamente, a matriz experimental codificada, a matriz dos coeficientes a serem estimados e a matriz com as respostas (resultados) obtidos, que podem ser calculados por meio das equações 11, 12 e 13 a seguir:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \widehat{\beta}_1 \\ \widehat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \widehat{\beta}_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} \widehat{Y}_1 \\ \widehat{Y}_2 \\ \vdots \\ \widehat{Y}_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

No trabalho, para a obtenção do ponto ótimo utilizou-se planilha eletrônica com o algoritmo de otimização Gradientes Reduzidos Generalizados de modo a, através da equação da superfície de resposta, se obter a resposta ótima do problema através da minimização da equação, sujeita a restrição do espaço experimental codificado (-2 a 2). Uma vez obtido o ponto ótimo, fez-se a decodificação das variáveis de decisão (fatores A, B, C e D) através da fórmula de codificação, de modo a se obter os níveis obtidos no ponto ótimo e, se necessário, realiza-se o ajuste do nível decodificado para o valor comercial mais próximo, no caso do diâmetro, ou valores que atendam a norma, para o caso das pressões de bombeamento ou a jusante da válvula.

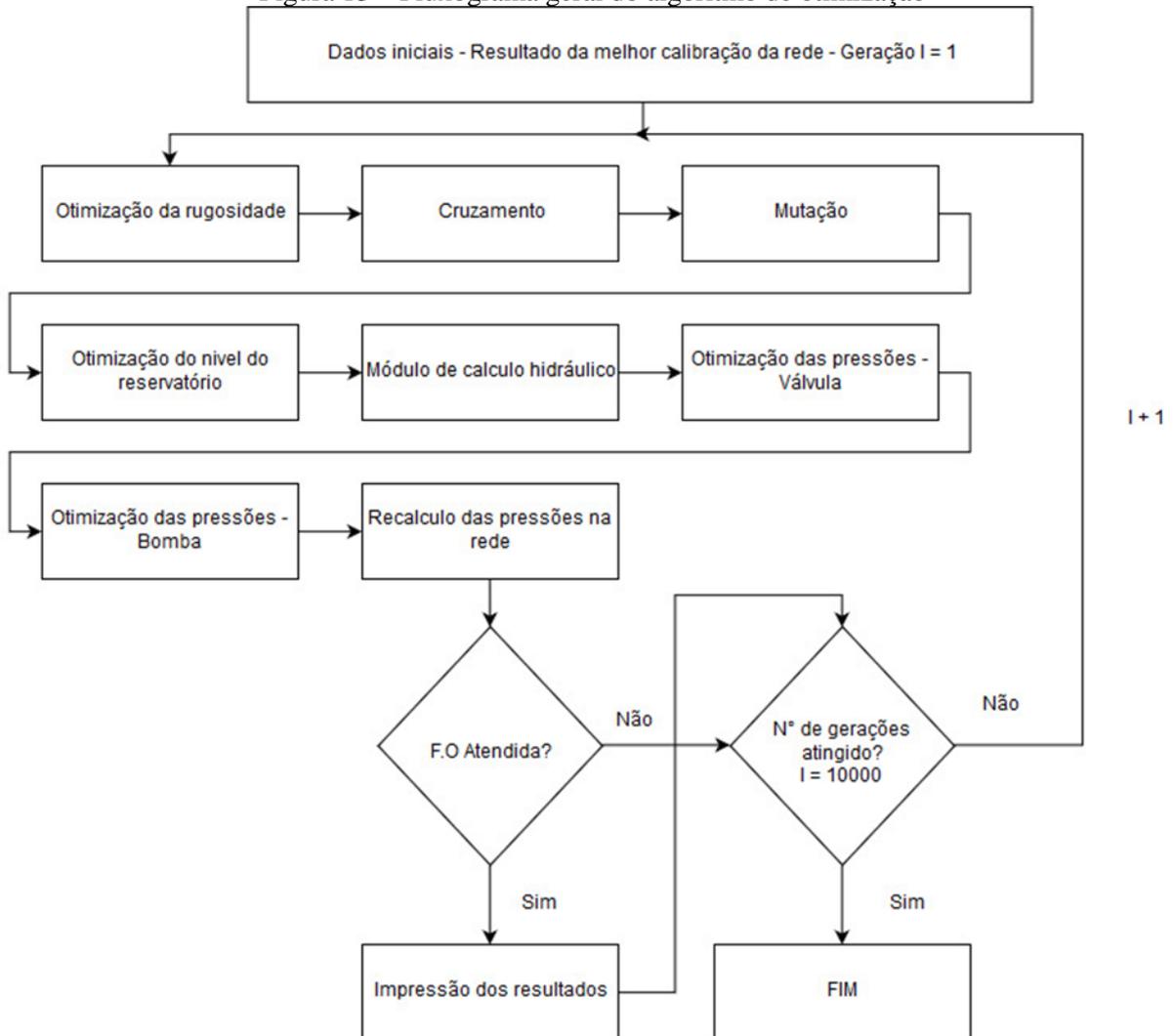
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Algoritmo de otimização da rede

Este trabalho gerou um algoritmo de otimização para a rede, que foi desenvolvido em linguagem FORTRAN 90, sendo também um algoritmo genético baseado no de Silva (2003) utilizado para a calibração da rede, sem, contudo, haver geração de dados uma vez que os dados iniciais são na realidade o resultado da calibração do modelo hidráulico.

Para este algoritmo, também utilizou-se um tamanho de população (NPOP) de 30 e os resultados da otimização passam, na geração subsequente, pelo cruzamento e possuem 95% de chance de sofrerem mutação pelo algoritmo. Como o algoritmo visa otimizar o resultado final, no caso, a minimização da perda de água na rede através da otimização das pressões de modo a garantir o adequado atendimento, o mesmo é dividido em cinco sub-rotinas, uma para cada variável a ser otimizada: Rugosidade, nível de reservatório, diâmetro da tubulação (e a quantidade de tubos a serem substituídos), inserção de válvulas e inserção de bombas, bem como o módulo de avaliação dos resultados de acordo com a função objetivo. O fluxograma geral do algoritmo de otimização é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma geral do algoritmo de otimização



Fonte: autor (2019)

A seguir, ser o descritas as subrotinas de otimiza o desenvolvidas no programa:

- subrotina de otimiza o da rugosidade da rede: Nesta subrotina, o algoritmo de otimiza o faz altera es na rugosidade de modo a se obter sutis varia es, geralmente incrementos de press o, de modo a se obter pequenas altera es na perda de carga nos trechos e por consequ ncia, alterar as perdas de carga nos n s, estando atrelada ao algoritmo gen tico. Este processo visa simular a varia o da rugosidade decorrente do envelhecimento da rede, bem como simular pequenas varia es de press o na rede devido a oscila es de consumo, presen a de eventuais transit rios, dentre outras causas as quais n o podem ser simuladas pelas demais sub-rotinas ou por sub-rotinas adicionais sem que houvesse aumento de complexidade da programaa o ou redu o da velocidade de execu o do programa;

- b) subrotina de otimização do nível do Reservatório de Nível Fixo: Esta subrotina sorteia um valor aleatório entre 815 mca e 850 mca para substituir o valor inicial do nível de reservatório, de 825 mca, podendo também permitir a entrada de um valor estabelecido pelo usuário, como foi utilizado neste trabalho devido ao planejamento de experimentos;
- c) subrotina de otimização dos diâmetros da tubulação: Esta subrotina visa sortear um trecho aleatório, de 1 a 9 e então, obtém um diâmetro aleatório, de 0,250 m a 0,475 m, com passos de 0,025 m, e substitui o diâmetro do trecho sorteado pelo diâmetro obtido. Conta também com a possibilidade de escolher a quantidade de diâmetros a serem otimizados. (Ex: Se escolhidos 6 diâmetros, podem vir a ser otimizados até 6 diâmetros). Há também a possibilidade do usuário solicitar a mudança de todos os trechos, podendo escolher o diâmetro desejado, alteração necessária para atender o planejamento de experimentos;
- d) subrotina de cálculo hidráulico: Esta subrotina é uma adaptação da rotina de cálculo hidráulico do programa de calibração de redes desenvolvido por Silva (2003), sendo acionada no programa para fazer o recálculo das pressões na rede com os novos valores de rugosidade, nível de reservatório e diâmetro;
- e) subrotina de otimização da rede visando a inserção de válvulas redutoras de pressão (VRP): Esta subrotina avalia todos os nós da rede, sendo que se a pressão do mesmo estiver acima de um valor estabelecido pelo usuário no início do programa, é feita a implantação de uma VRP no trecho a jusante de modo a se ajustar a pressão de acordo com o limite estipulado pelo usuário no programa conforme o cenário a ser simulado, sendo acionada pelo módulo de recálculo hidráulico;
- f) subrotina de otimização da rede visando a implantação de bombas: Esta subrotina, da mesma forma que a de inserção de válvulas, analisa a pressão em todos os nós e caso a mesma esteja abaixo de um valor estipulado pelo usuário no início do programa, implanta uma bomba no trecho a jusante do nó de modo a se aumentar a pressão para o valor desejado pelo usuário conforme o cenário a ser simulado, também sendo acionada no módulo de recálculo hidráulico;
- g) módulo de recálculo das pressões na rede: O módulo de cálculo hidráulico está contido no código do programa, não sendo uma sub-rotina, sendo que nele estão as chamadas das sub-rotinas de otimização do bombeamento e a de inserção de válvulas. Isto foi feito de modo a permitir o recálculo das pressões na rede após a inserção das mesmas,

evitando distorções nos resultados devido ao acionamento redundante das subrotinas de otimização de pressão de bombeamento e de válvula.

- h) seleção dos resultados: O algoritmo é capaz de selecionar as pressões após a otimização com bombas e válvulas baseado na função objetivo Rank (i), expressa por meio da equação 14.

$$Rank(i) = |(P_i - P_v)| + |(P_i - P_b)| = (P_v - P_b), \text{ para } i = 2 \text{ a } 10 \quad (14)$$

onde:

- i: Nó a ser avaliado (de 2 a 10);
- P_i : Pressão no nó avaliado (m.c.a.);
- P_b : Pressão de bombeamento escolhida pelo usuário (m.c.a.);
- P_v : Pressão a jusante da válvula, escolhida pelo usuário (m.c.a.).

A obediência a esta condição é garantia de que os resultados de pressão estejam dentro dos limites de pressão estabelecidos pelo usuário, sendo que no caso garante as pressões dentro dos limites estabelecidos pelo Planejamento de Experimentos, sendo que se Rank (i) for acima de $(P_v - P_b)$ o resultado não é aceito pelo programa, sendo esse um requisito necessário para garantir os resultados dentro do proposto pelo Planejamento de Experimentos. A função objetivo do algoritmo de otimização é expressa por meio da equação 15:

$$Min F. O. = \sum_{i=2}^{10} Rank(i) + Perdas(i) \quad (15)$$

O programa visa minimizar tanto o somatório da função Rank(i), uma vez que se os valores de pressão estiverem fora da faixa estabelecida pelo usuário serão superiores a $(P_v - P_b)$ por nó analisado, como também visa minimizar o somatório das perdas de água por nó, buscando sempre a solução que atenda às necessidades da rede e também minimize as perdas.

Como o objetivo deste trabalho é encontrar e propor uma estratégia operacional ótima para uma rede de distribuição de água teórica fazendo uso tanto do algoritmo de otimização como da metodologia de superfície de resposta, tornou-se necessário então estabelecer cenários nos quais os fatores sofressem variações conforme estabelecido pelo planejamento de

experimentos de forma a não causar viés nas análises da influência da resposta, bem como a inclusão de pontos axiais fora dos limites estabelecidos por norma ocasionaram situações em determinados cenários como a grande amplitude de variação de nível de reservatório ou um grande número de bombas ou válvulas para mitigar eventuais condições onde as pressões na rede não foram atendidas. Portanto, não houve a preocupação em se estabelecer limites práticos para a quantidade de bombas ou válvulas através de penalidades na rotina, bem como para a variação do nível de reservatório.

5.2 Calibração da rede teórica

O modelo desenvolvido no EPANET e o modelo calibrado pela rotina em FORTRAN obtiveram os resultados contidos na Tabela 5, sendo o modelo em FORTRAN obtido na 9304ª geração, na 27ª alternativa do algoritmo genético de calibração.

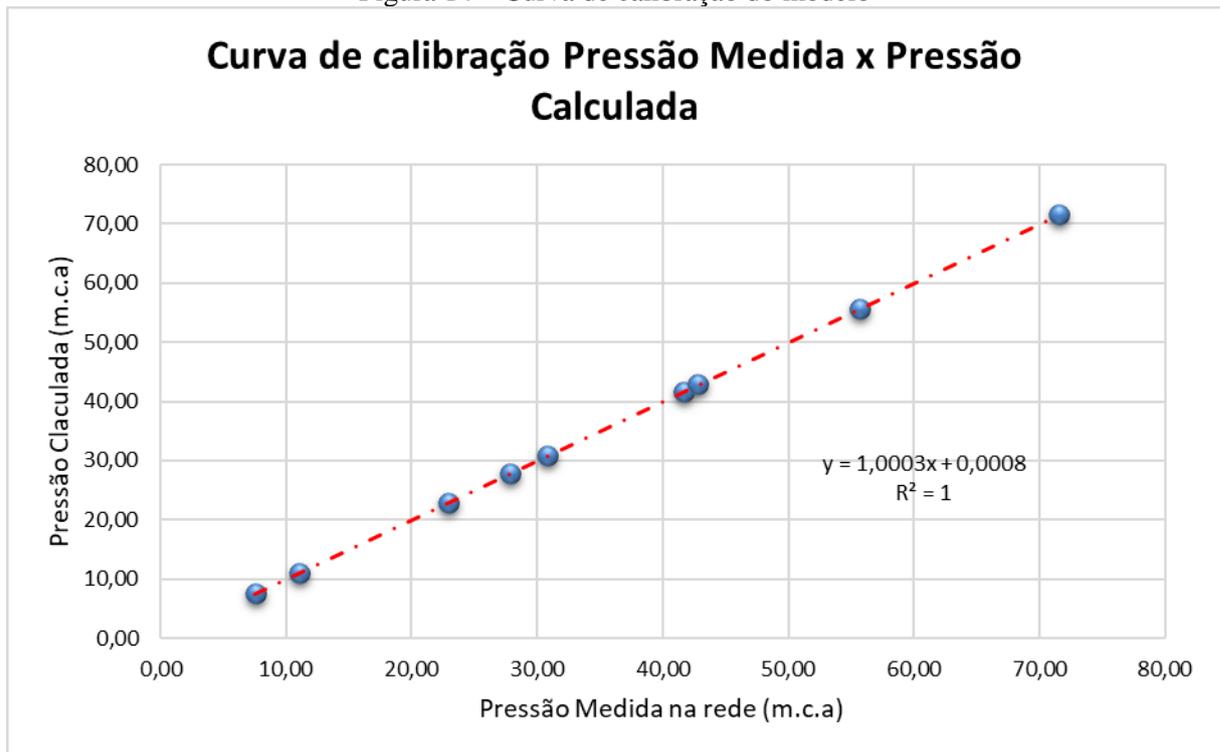
Tabela 5 – Resultados da calibração do modelo

Nó	Pres. Medida (m.c.a.)	Pres. Calculada (m.c.a.)	Diferença (m.c.a.)	Atende WRc?
2	22,92	22,92	0,00	SIM
3	27,86	27,86	0,00	SIM
4	30,85	30,86	0,01	SIM
5	41,65	41,65	0,00	SIM
6	11,06	11,06	0,00	SIM
7	42,80	42,87	0,07	SIM
8	71,55	71,56	0,01	SIM
9	55,63	55,63	0,00	SIM
10	7,53	7,53	0,00	SIM

Fonte: autor (2019)

Observa-se que as diferenças são tão pequenas que não é possível mostrá-las graficamente, conforme se observa no gráfico da Figura 14, atendendo integralmente o critério da Water Research Centre (1989). A perda calculada para a rede sem otimização é de 42,80%. A curva de calibração é dada pela Figura 14 onde se vê também a sua equação.

Figura 14 – Curva de calibração do modelo



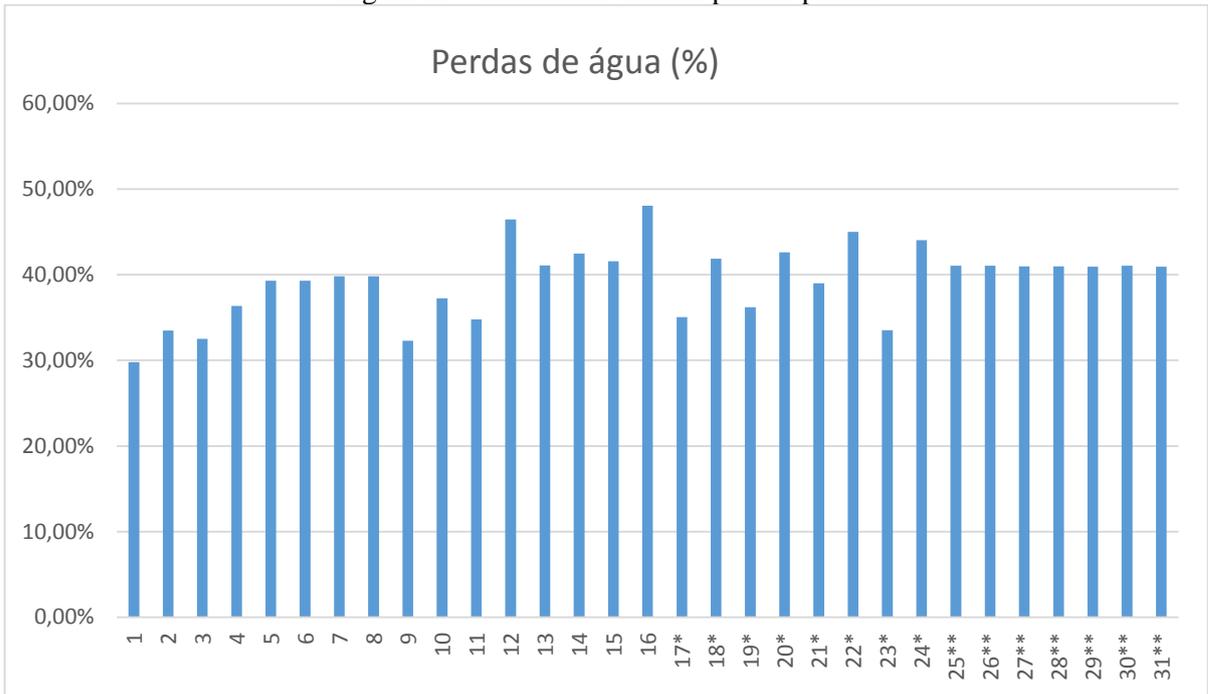
O modelo desenvolvido em FORTRAN atende os critérios da Water Research Centre (1989) que preconizam uma diferença máxima de 0,5 m.c.a. para 85% dos pontos medidos, sendo no caso o critério atendido para todos os pontos, com ampla margem de segurança, indicando a adequação do modelo para a proposta do trabalho.

Observa-se que nos nós 8, 9 e 10, as pressões estão fora da faixa de operação compreendida entre 10 a 50 m.c.a., necessitando, portanto, da intervenção da rotina de otimização.

5.3 Resultados dos cenários simulados

O resultado obtido pela simulação dos 31 cenários é apresentado na Figura 15. Observa-se que nos cenários 13, 16, 22 e 24 houve uma degradação da condição da rede, com piora nas perdas de água. Em contrapartida, tem-se que os melhores cenários foram os de números 1, 3 e 9. Todos esses cenários são detalhados, na ordem em que foram citados, nas subseções que se seguem.

Figura 15 – Resultados obtidos para as perdas

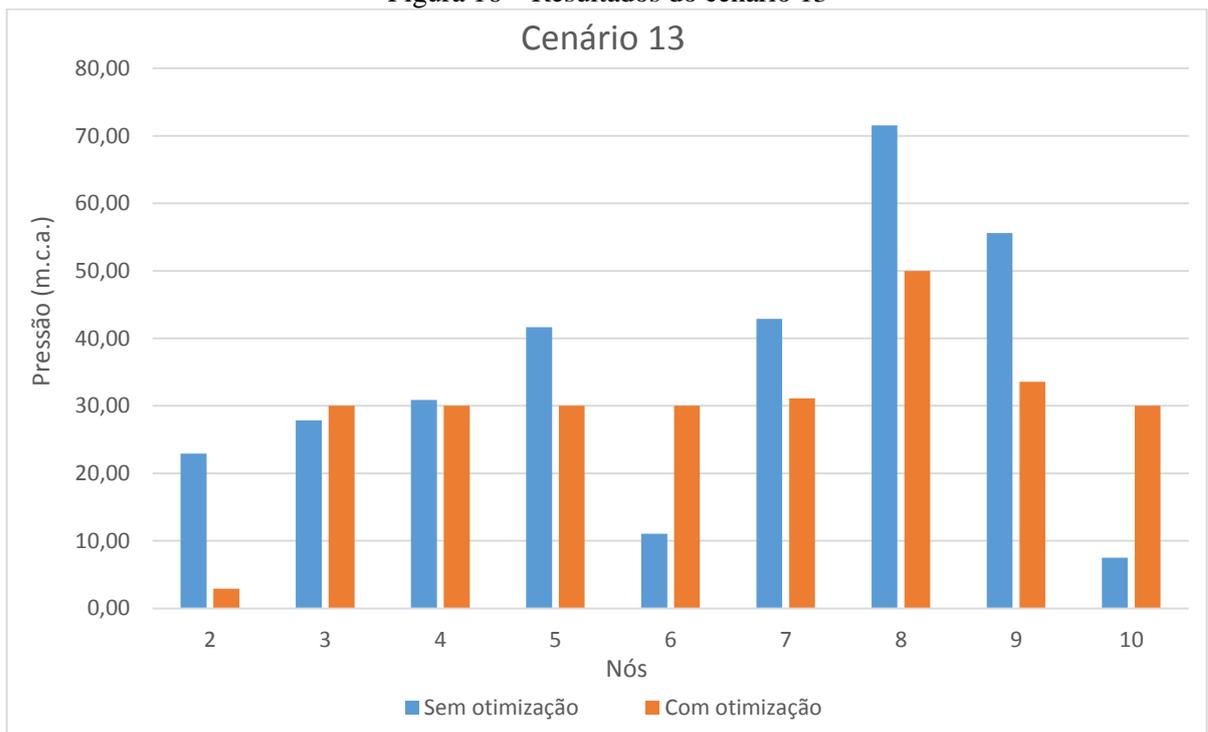


Fonte: autor (2019)

5.3.1 Cenário 13

Neste cenário, o melhor resultado foi obtido na 4069ª geração, conforme Figura 16.

Figura 16 – Resultados do cenário 13



Fonte: autor (2019)

Foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

- a) Trecho 2: pressão de 28,89 m.c.a.;
- b) Trecho 3: pressão de 25,89 m.c.a.;
- c) Trecho 4: pressão de 45,63 m.c.a.;
- d) Trecho 5: pressão de 31,00 m.c.a.;
- e) Trecho 9: pressão de 43,52 m.c.a.

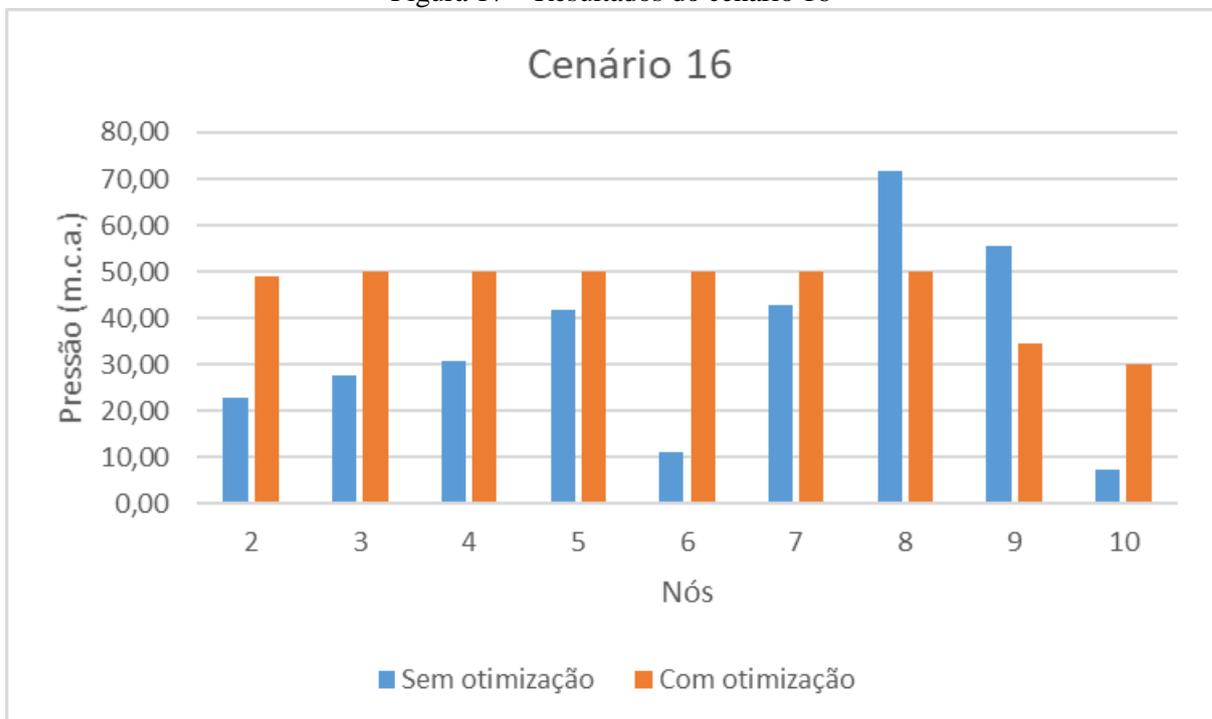
Foi inserida uma válvula no trecho 7, gerando perda de carga de 8,98 m.c.a.

Neste cenário as perdas foram de 41,10%, uma redução de 1,70 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização, sendo um cenário pouco eficiente em redução de perdas devido à baixa redução e a necessidade de instalação de um número relativamente alto de bombas.

5.3.2 Cenário 16

Neste cenário, o melhor resultado foi obtido na 4372ª geração, conforme Figura 17.

Figura 17 – Resultados do cenário 16



Fonte: autor (2019)

Foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

- a) Trecho 5: pressão de 10,52 m.c.a.;

b) Trecho 9: pressão de 42,54 m.c.a.

Foram inseridas válvulas nos seguintes trechos:

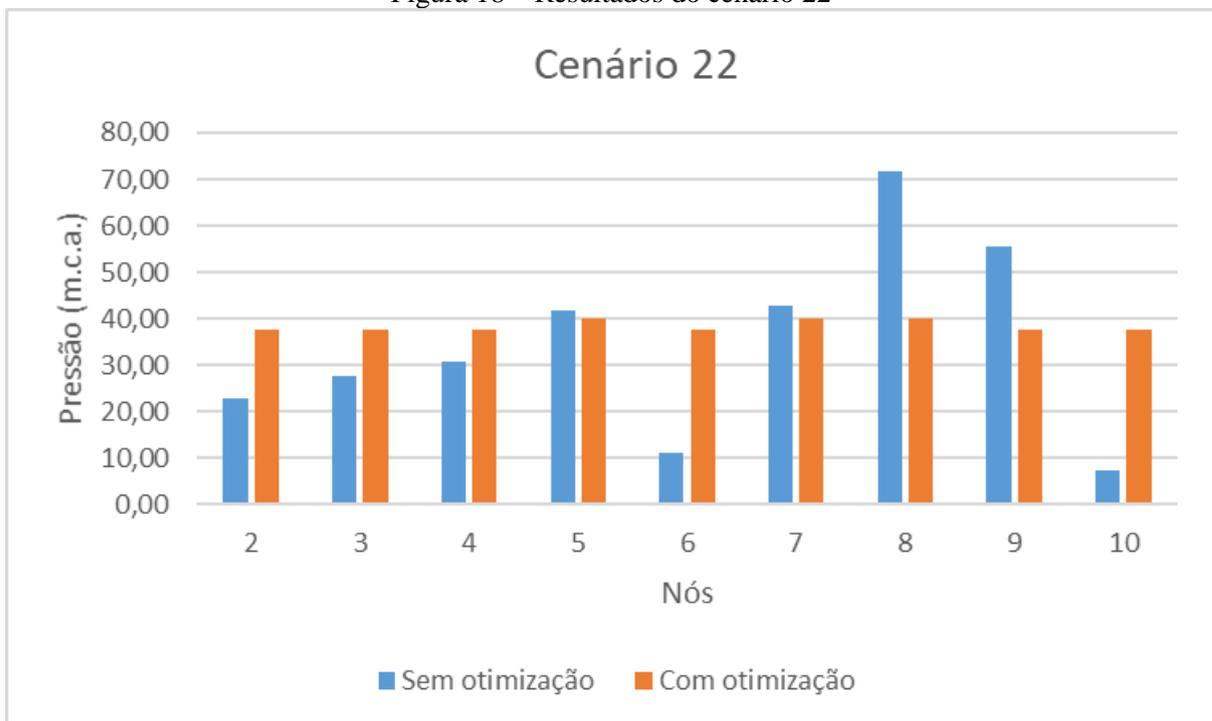
- a) Trecho 2: perda de carga de 3,89 m.c.a.;
- b) Trecho 3: perda de carga de 6,89 m.c.a.;
- c) Trecho 4: perda de carga de 17,44 m.c.a.;
- d) Trecho 6: perda de carga de 1,49 m.c.a.;
- e) Trecho 7: perda de carga de 29,96 m.c.a.

Neste cenário as perdas foram de 48,06%, uma piora de 5,26 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização, sendo extremamente desfavorável devido aos maiores níveis de bombeamento e a menor redução de pressão.

5.3.3 Cenário 22

Neste cenário, o melhor resultado foi obtido na 2ª geração, conforme Figura 18.

Figura 18 – Resultados do cenário 22



Fonte: autor (2019)

Foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

- a) Trecho 1: pressão de 8,66 m.c.a.;
- b) Trecho 2: pressão de 3,68 m.c.a.;

- c) Trecho 3: pressão de 0,68 m.c.a.;
- d) Trecho 5: pressão de 28,07 m.c.a.;
- e) Trecho 8: pressão de 13,10 m.c.a.;
- f) Trecho 9: pressão de 47,01 m.c.a.

Foram inseridas válvulas nos seguintes trechos:

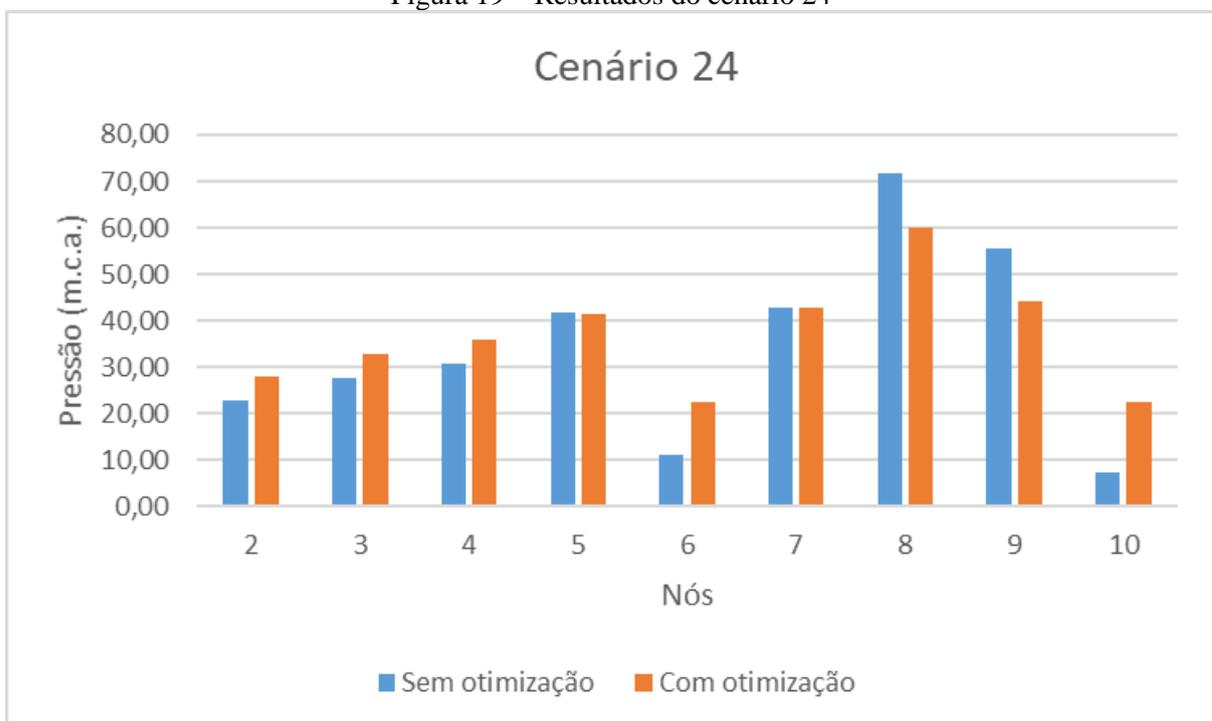
- a) Trecho 4: perda de carga de 4,36 m.c.a.;
- b) Trecho 6: perda de carga de 1,45 m.c.a.;
- c) Trecho 7: perda de carga de 29,85 m.c.a.

Neste cenário as perdas foram de 45,01%, uma piora de 2,21 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização, contraindicando o cenário.

5.3.4 Cenário 24

Neste cenário, o melhor resultado foi obtido na 3128ª geração, conforme Figura 19.

Figura 19 – Resultados do cenário 24



Fonte: autor (2019)

Foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

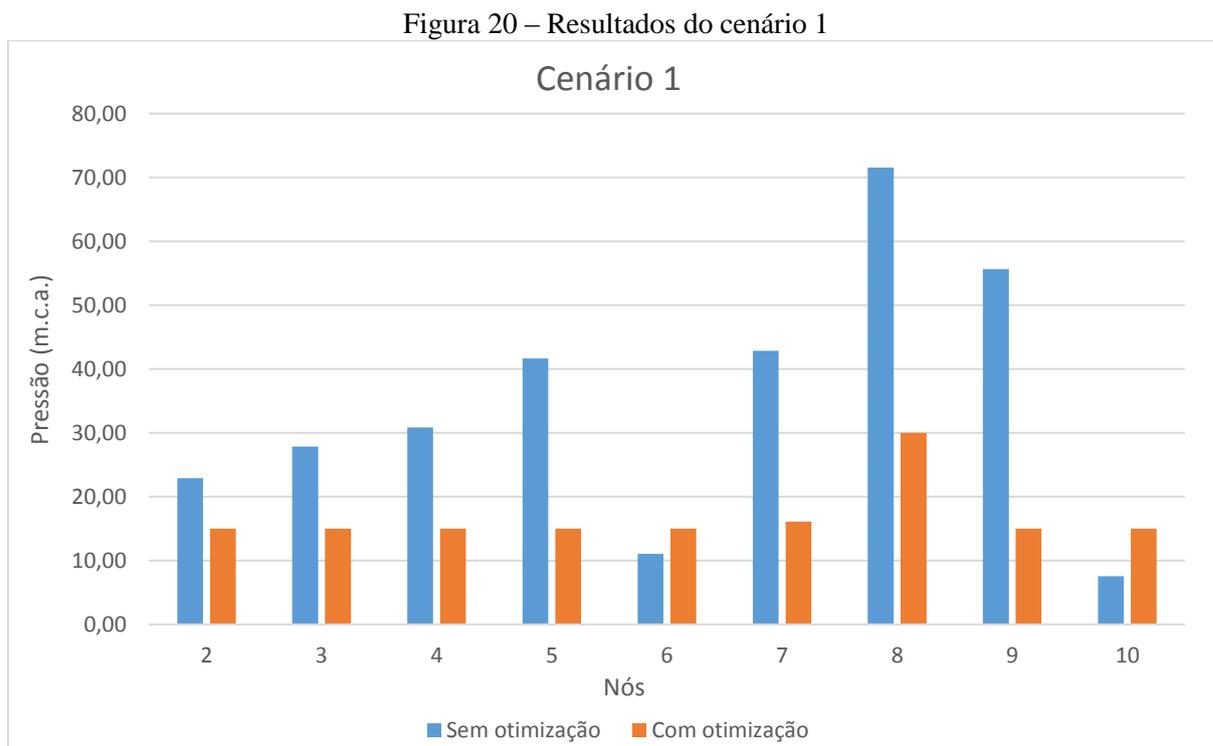
- a) Trecho 5: pressão de 11,71 m.c.a.;
- b) Trecho 9: pressão de 25,15 m.c.a.

Foi inserida uma válvula no trecho 7, gerando 11,22 m.c.a. de perda de carga.

Neste cenário as perdas foram de 44,06%, uma piora de 1,26 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização, contraindicando o cenário.

5.3.5 Cenário 1

Neste cenário, o melhor resultado foi obtido na 1822ª geração, conforme Figura 20.



Fonte: autor (2019)

Foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

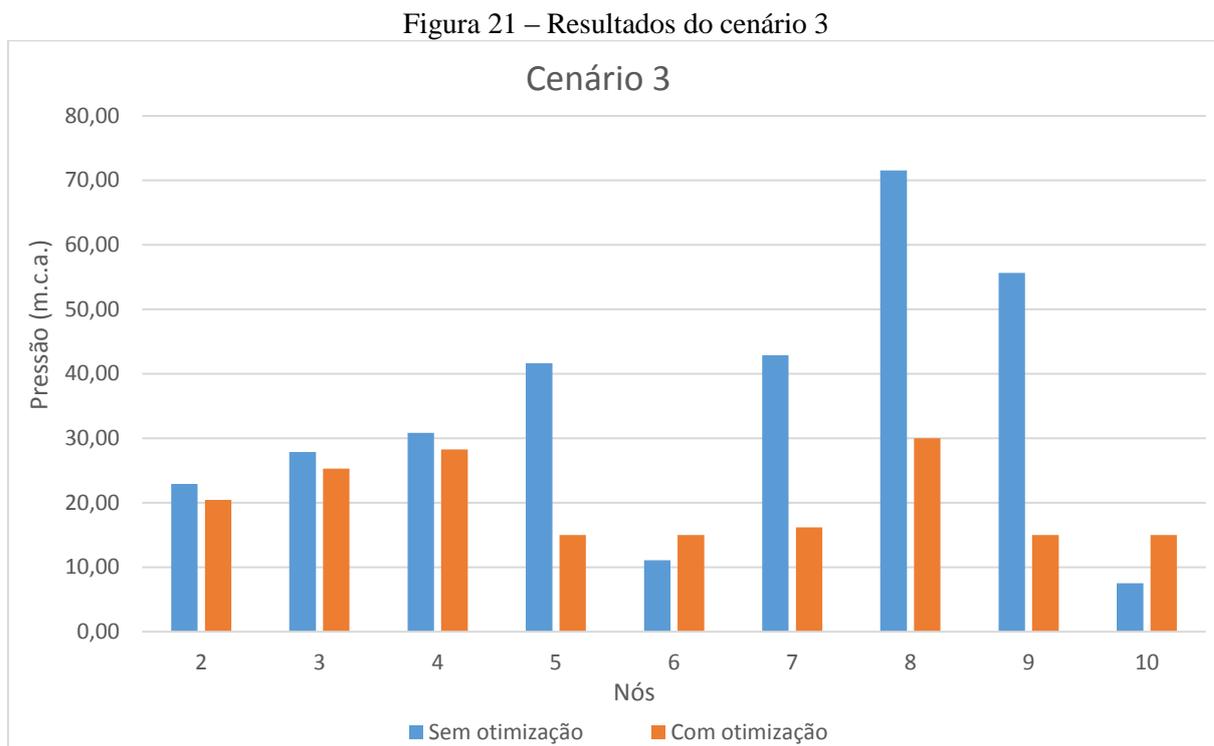
- a) Trecho 1: pressão de 25,26 m.c.a.;
- b) Trecho 2: pressão de 20,40 m.c.a.;
- c) Trecho 3: pressão de 17,42 m.c.a.;
- d) Trecho 4: pressão de 42,42 m.c.a.;
- e) Trecho 5: pressão de 30,96 m.c.a.;
- f) Trecho 9: pressão de 1,33 m.c.a.;
- g) Trecho 10: pressão de 47,08 m.c.a.

Foi inserida uma válvula no trecho 7, causando uma perda de carga de 14,01 m.c.a.

Neste cenário, as perdas foram de 29,79%, uma redução de 13,01 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização. Contudo, o esforço para redução das perdas acaba por se tornar contraproducente devido ao elevado número de bombas implantadas.

5.3.6 Cenário 3

Neste cenário, o melhor resultado foi obtido na 4372ª geração, conforme Figura 21.



Fonte: autor (2019)

Foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

- Trecho 4: pressão de 11,03 m.c.a.;
- Trecho 5: pressão de 30,98 m.c.a.;
- Trecho 8: pressão de 1,34 m.c.a.;
- Trecho 10: pressão de 47,07 m.c.a.

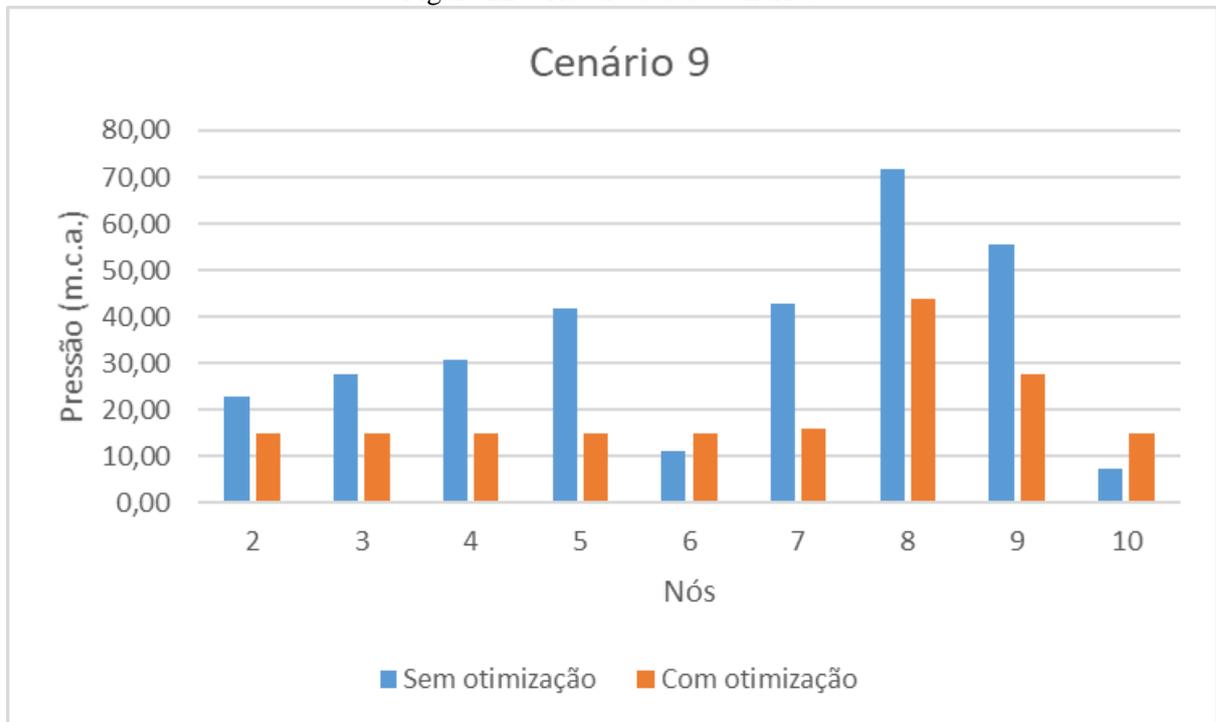
Foi inserida uma válvula redutora de pressão no trecho 7, causando uma perda de carga de 14,03 m.c.a.

Neste cenário as perdas forma de 32,53%, melhoria de 10,27 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização, sendo também um resultado mais razoável que os cenários anteriores pela menor quantidade de bombas que no cenário 1 e válvulas no cenário 3.

5.3.7 Cenário 9

Neste cenário, o melhor resultado foi obtido na 4146ª geração, conforme Figura 22.

Figura 22 – Resultados do cenário 9



Fonte: autor (2019)

Foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

- Trecho 1: pressão de 23,56 m.c.a.;
- Trecho 2: pressão de 19,98 m.c.a.;
- Trecho 3: pressão de 16,99 m.c.a.;
- Trecho 4: pressão de 42,49 m.c.a.;
- Trecho 5: pressão de 30,98 m.c.a.;
- Trecho 9: pressão de 34,56 m.c.a.

Neste cenário as perdas foram de 32,29%, uma redução de 10,51 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização, destacando-se as 6 bombas implantadas.

5.4 Análise estatística e superfície de resposta

5.4.1 Análise estatística – Influência dos fatores de resposta

Para a análise da influência dos fatores na resposta, utilizaram-se os resultados do experimento fatorial completo, isto é, os 16 primeiros cenários simulados, obtendo-se então os resultados apresentados na Tabela 6 através do software minitab.

Tabela 6 – Resultados dos 16 primeiros cenários no experimento fatorial completo

Termo	Coeficiente	P
Constante	0,384	0
A	0,02001	0
B	0,0153	0
C	0,03032	0
D	0,02105	0
A*B	0,00746	0
A*C	-0,01019	0
A*D	0,01064	0
B*C	-0,00637	0
B*D	0,00695	0
C*D	-0,00228	0
A*B*C	-0,00114	0,003
A*B*D	0,00729	0
A*C*D	-0,00081	0,007
B*C*D	-0,00067	0,012
A*B*C*D	-0,00096	0,005
Center Point	0,02582	0
R ² (adj.)	99,99%	

Fonte: autor (2019)

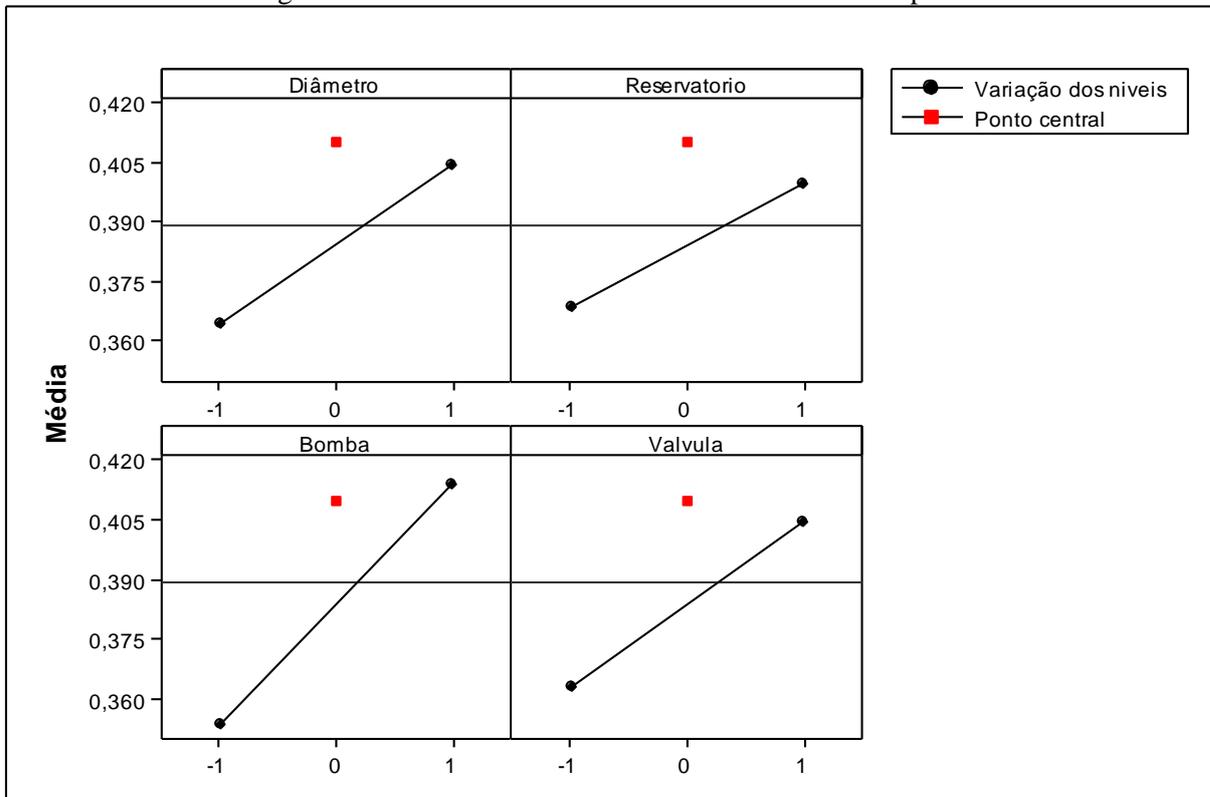
A média de perdas nos 16 cenários desenvolvidos foi de 38,4% (constante de 0,384), e a equação 16 a seguir descreve as perdas em função dos fatores:

$$\begin{aligned}
 \text{Perdas (\%)} = & (0,384 + 0,02001A + 0,0153B + 0,03032C + 0,02105D + 0,00746AB - \\
 & 0,01019AC + 0,01064AD - 0,00637BC + 0,00695BD - 0,00228CD - \\
 & 0,00114ABC + 0,00729ABD - 0,00081ACD - 0,00067BCD - \\
 & 0,00096ABCD) \times 100
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Primeiramente deve-se atentar a significância de cada fator, através da coluna da coluna de p-valor, no caso apenas p. Todos os fatores são significantes, ou seja, todos interferem de forma significativa na resposta pois apresentam um intervalo de confiança acima de 95%, bastando observar que nenhum p-valor é maior que 0,05.

O gráfico da Figura 23 mostra uma análise gráfica da interferência individual de cada fator na resposta, onde pode-se observar que o aumento dos níveis de trabalho dos mesmos leva ao aumento das perdas de água para todos os fatores. A análise da inclinação da reta dos gráficos pode dizer qual fator, isoladamente, tem maior ou menor influência na resposta, podendo-se observar que o fator nível de reservatório é o que menos influi nas perdas de água enquanto que a pressão de bombeamento exerce a maior influência sobre as perdas.

Figura 23 – Interferência individual de cada fator na resposta

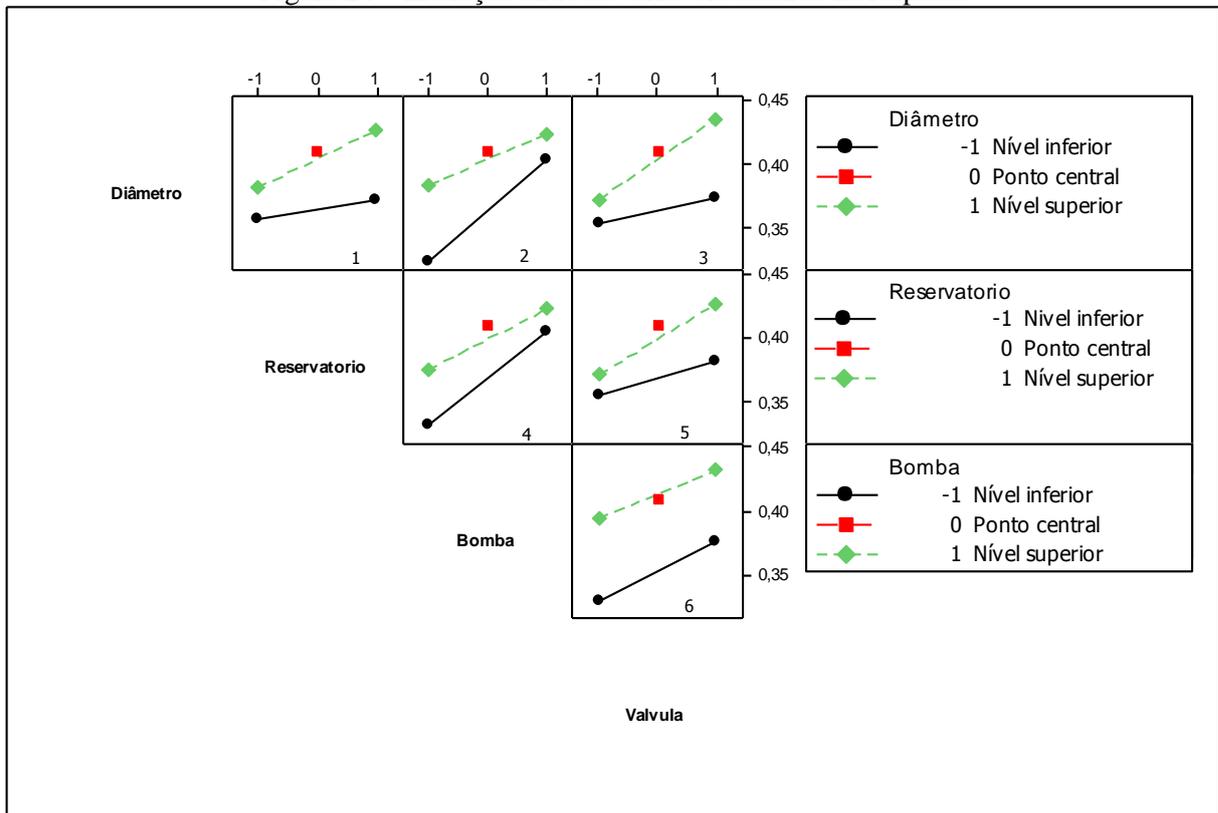


Fonte: autor (2019)

Desta forma para se verificar as variáveis que mais aumentam o valor da resposta basta se observar as que possuem maior valor positivo do coeficiente, onde os valores negativos mostram que as variáveis fazem o valor da resposta de interesse diminuir. Aqui estatisticamente verifica-se que a variável que gera mais perdas de água é a pressão da bomba, fator B, pois possui o maior coeficiente, seguida da pressão de válvula, fator D, e diâmetro fator A.

Um resultado a se ressaltar é que os fatores A e C separadamente aumentam as perdas de água, podendo levar à conclusão que a combinação de ambos pudesse vir a aumentar ainda mais as perdas. Mas através do experimento fatorial completo, verificou-se que a interação entre os fatores A e C geram a maior diminuição das perdas de água na rede, o que se explica pela atuação do algoritmo de otimização, como pode-se observar na Figura 24.

Figura 24 – Interação entre as variáveis atuando na resposta



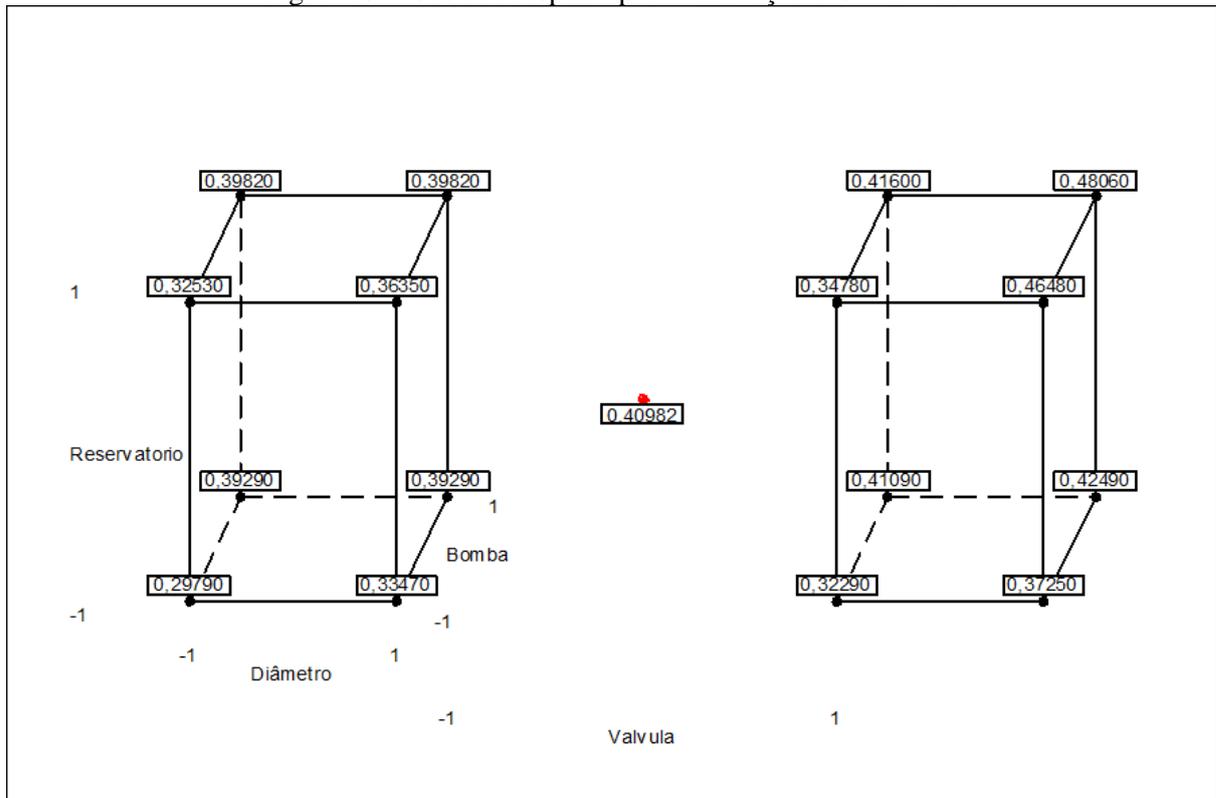
Este gráfico deve ser interpretado da seguinte forma: Divide-se o mesmo em linhas, onde os quadrados 1, 2 e 3 são da linha do diâmetro (fator A), 4 e 5 são da linha do reservatório (fator B), e o quadrado 6 é da linha da bomba, sendo que as legendas a direita da terceira coluna indicam os níveis inferiores e superiores do fator representado, sendo a reta tracejada verde é o nível superior (+1) da variável da linha enquanto a ret cheia preta é o nível inferior (-1).

Dividindo-o em colunas, tem-se que o quadrado 1 é a coluna do reservatório, enquanto os quadrados 2 e 4 são a coluna da bomba e os quadrados 3, 5 e 6 representam a coluna da válvula, com a legenda superior do gráfico indicando a variação do nível dos fatores representados nas colunas, enquanto a legenda nos quadrados a direita representa a variação das perdas conforme a interação. Quando a reta verde tem inclinação maior que a reta preta, há uma interação que aumenta as perdas, enquanto que o contrário diminui as perdas. Quando as retas estão paralelas ou muito próximo disso, a interação entre os fatores é pouco expressiva.

Observa-se então que as interações diâmetro x reservatório (1), reservatório x válvula (5) e diâmetro x válvula (3) aumentam as perdas na rede, com destaque para esta última. Já as interações diâmetro x bomba (2) e reservatório x bomba (4) reduzem as perdas na rede, enquanto a interação bomba x válvula (6) é pouco significativa.

Pode-se observar também a variação das perdas através do cubo de resposta, conforme Figura 25.

Figura 25 – Cubo de resposta para a interação das variáveis



Fonte: autor (2019)

Através desta visualização mostrada na Figura 48 pode-se verificar que a menor perda de água acontece quando o fator Válvula está em seu menor nível de trabalho (-1), junto aos menores níveis de trabalho dos fatores Diâmetro (-1), Reservatório (-1) e Bomba (-1). Contudo,

esta trata-se de uma análise restrita uma vez que os valores abrangidos são os limites mínimos e máximos dentro do espaço amostral, assim, para uma análise que permita encontrar eventual ponto ótimo além dos limites, torna-se necessária a análise de pontos axiais adicionais aos 16 pontos analisados, bem como a de pontos centrais, de forma a obter superfícies de resposta que gerem uma equação quadrática passível de ser otimizada. Desta forma, incluindo os pontos axiais e centrais contidos na tabela 4, obteve-se os coeficientes β .

5.4.2 Superfície de resposta e otimização

Os valores dos coeficientes β para o experimento fatorial completo, inclusos os pontos axiais e centrais, são dados na Tabela 7.

Tabela 7 – Modelagem matemática da resposta como uma função de segunda ordem em função das variáveis independentes

Termo	Coeficiente β	P
Constante	0,4101	0
A	0,01942	0
B	0,015542	0
C	0,025208	0
D	0,022808	0
A*A	-0,008494	0,006
B*B	-0,006106	0,035
C*C	0,00394	0,884
D*D	-0,007656	0,011
A*B	0,007463	0,052
A*C	-0,010187	0,011
A*D	0,010637	0,008
B*C	-0,006375	0,091
B*D	0,00695	0,068
C*D	-0,002275	0,53
R ² (adj.)	0,8912	

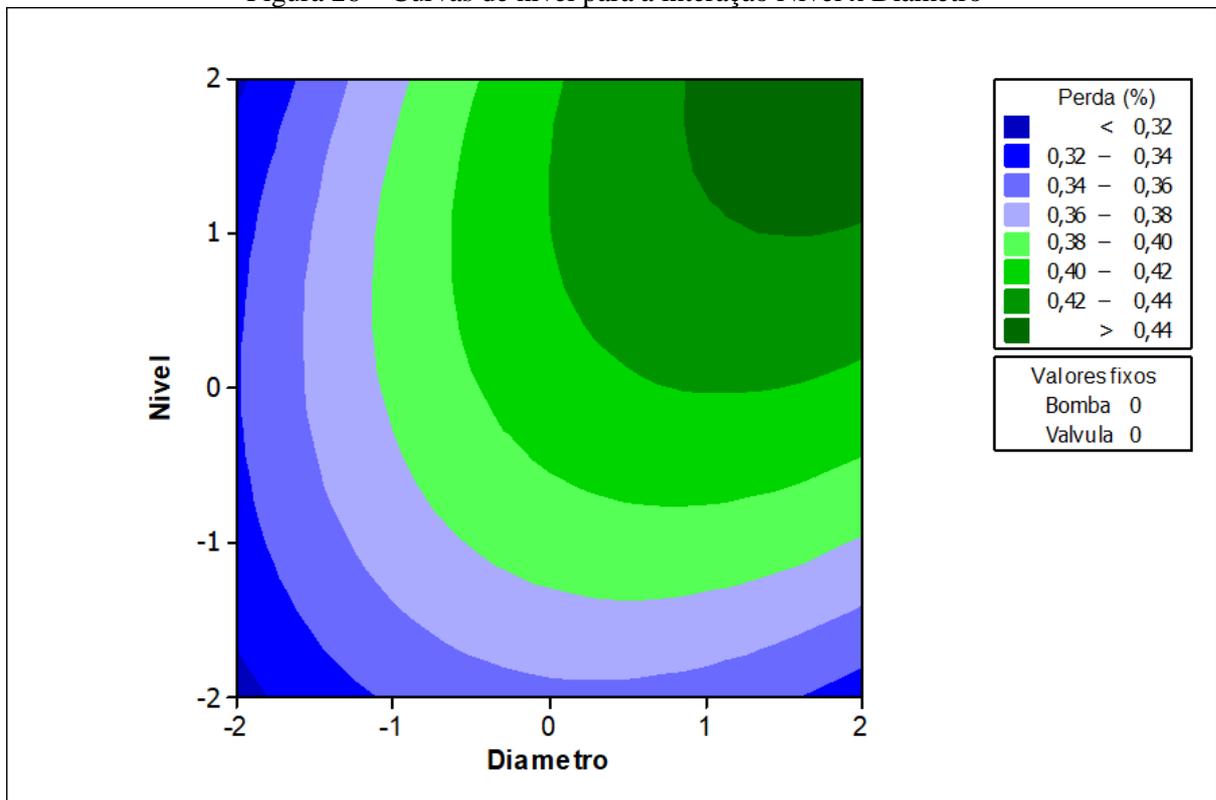
Fonte: autor (2019)

Verifica-se então a existência de uma curvatura na função que modela a resposta, sendo dada pela equação 17 a seguir:

$$\hat{Y}(\%) = (0,4101 + (A \times 0,1942) + (B \times 0,015542) + (C \times 0,025208) + (D \times 0,022808) - (A^2 \times 0,008494) - (B^2 \times 0,006106) + (C^2 \times 0,00394) - (D^2 \times 0,007656) + (A \times B \times 0,007463) - (A \times C \times 0,010187) + (A \times D \times 0,010637) - (B \times C \times 0,006375) + (B \times D \times 0,00695) - (C \times D \times 0,002275)) \times 100 \quad (17)$$

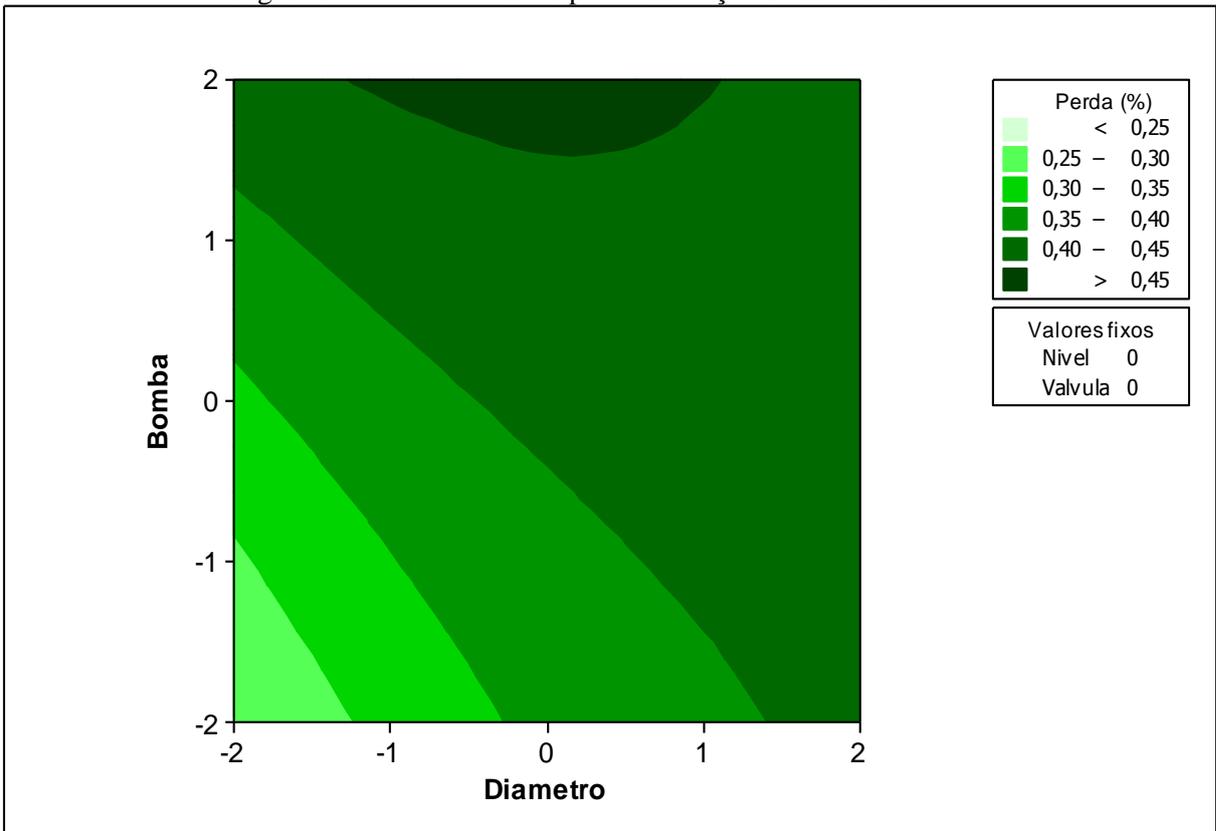
Dessa forma se conclui que a curvatura existe e está dentro dos parâmetros selecionados pelo método de planejamento dos experimentos. O ajuste possui um valor que indica que a modelagem se adequa ao experimento realizado. Sendo assim, as curvas de nível apresentadas a seguir nas Figuras 26, 27, 28, 29, 30 e 31 mostram as variações da resposta conforme os fatores utilizados.

Figura 26 – Curvas de nível para a interação Nível x Diâmetro



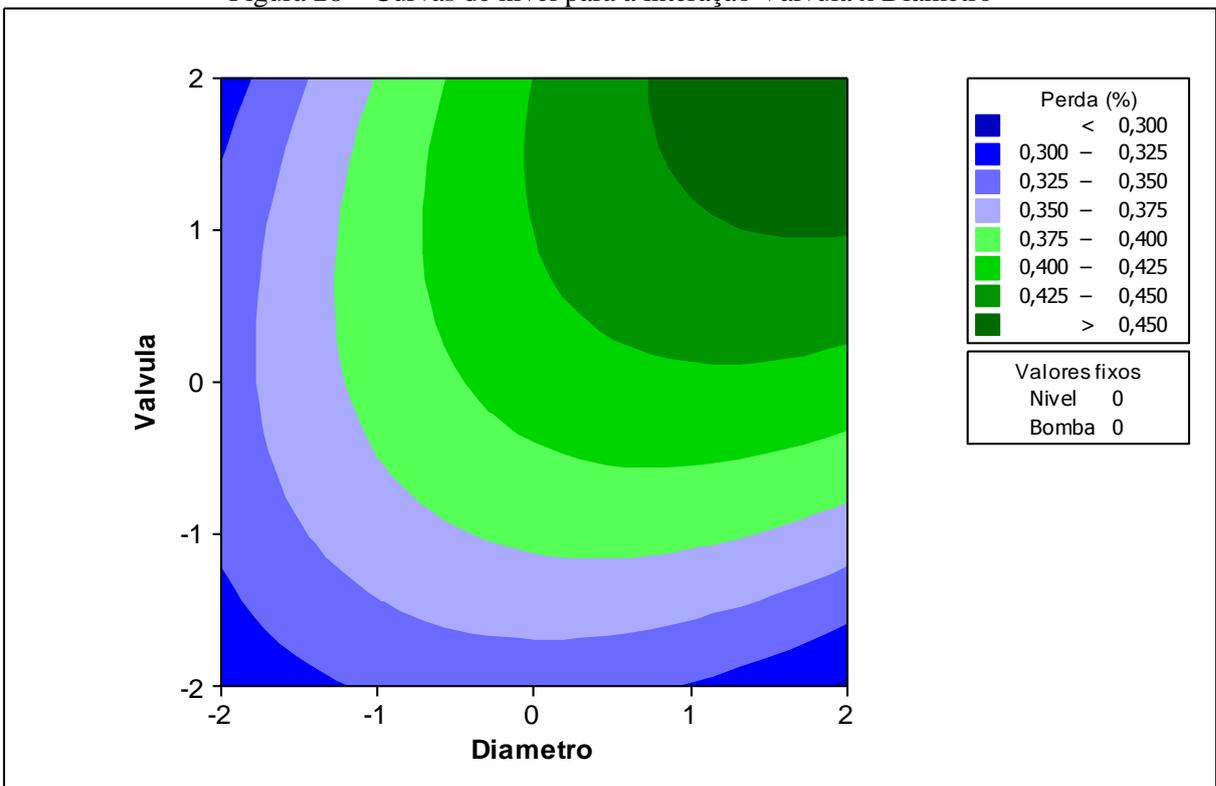
Fonte: autor (2019)

Figura 27 – Curvas de nível para a interação Bomba x Diâmetro



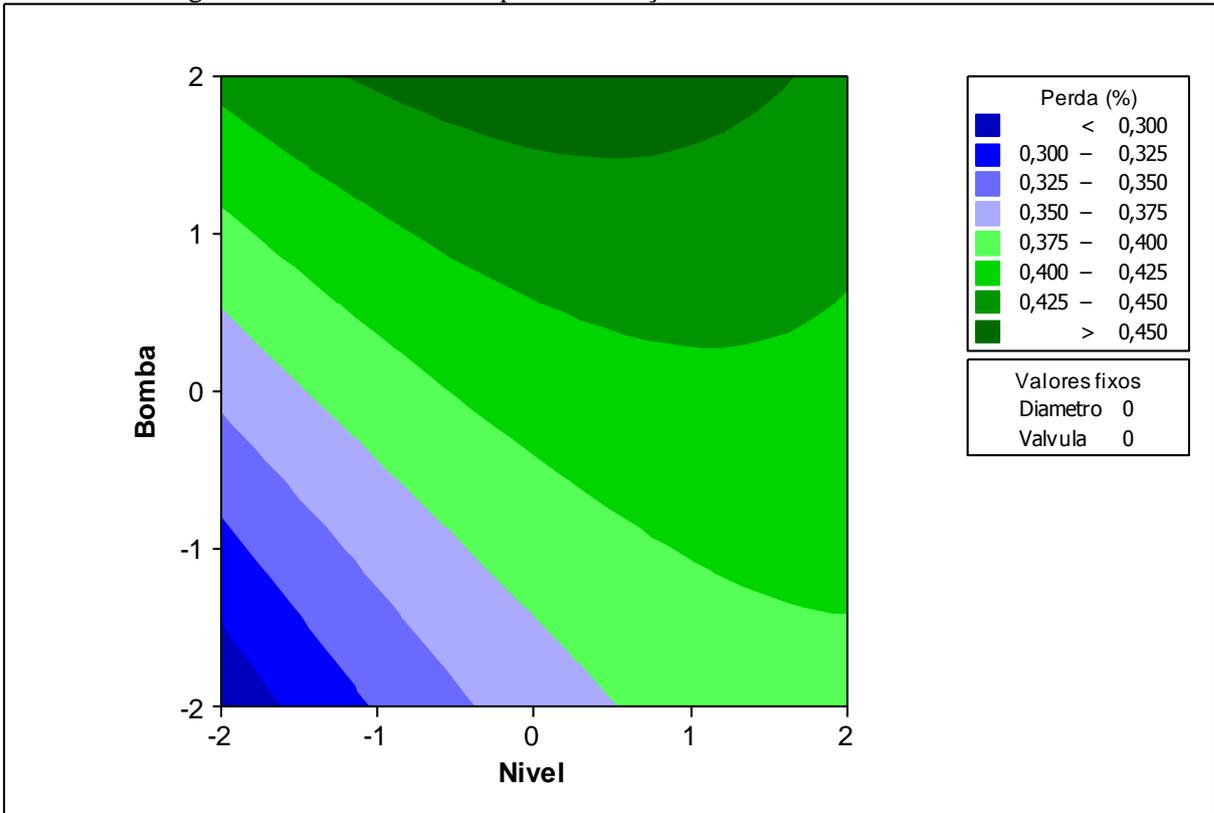
Fonte: autor (2019)

Figura 28 – Curvas de nível para a interação Válvula x Diâmetro



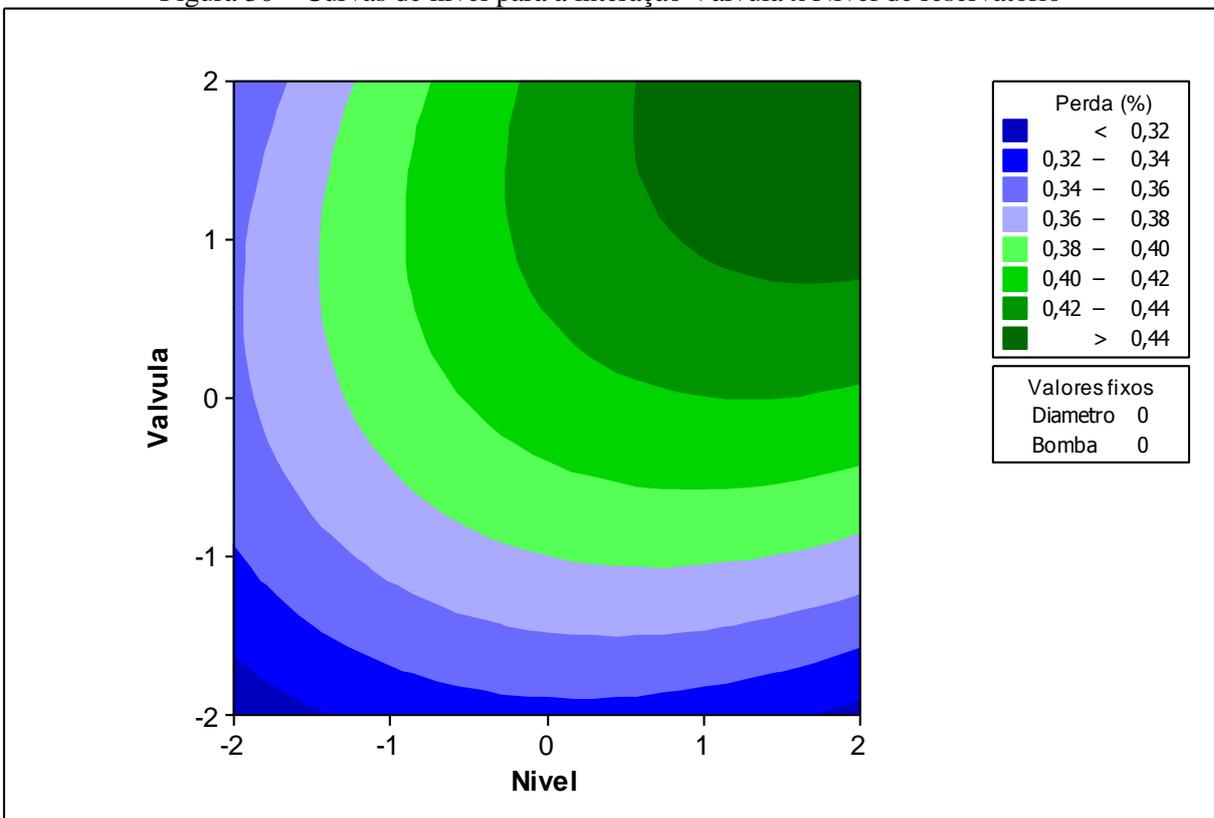
Fonte: autor (2019)

Figura 29 – Curvas de nível para a interação Bomba x Nível de reservatório



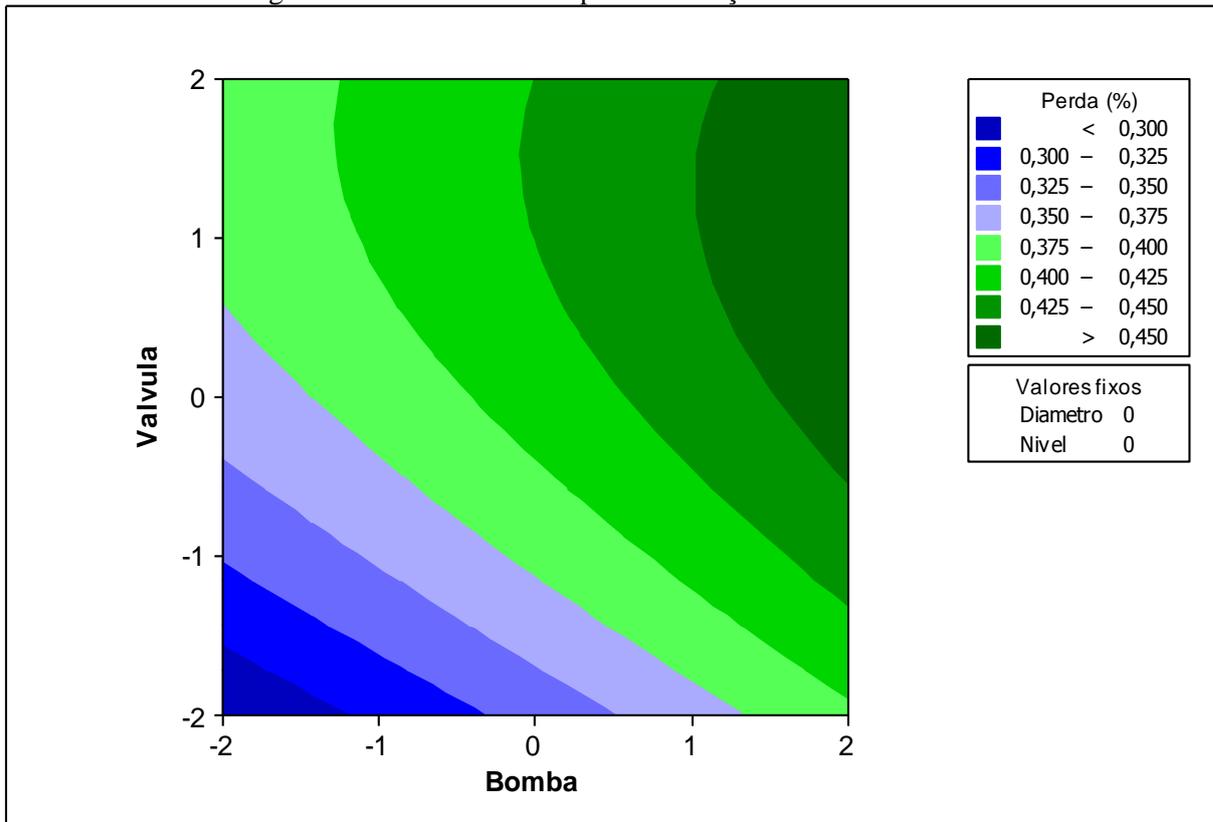
Fonte: autor (2019)

Figura 30 – Curvas de nível para a interação Válvula x Nível de reservatório



Fonte: autor (2019)

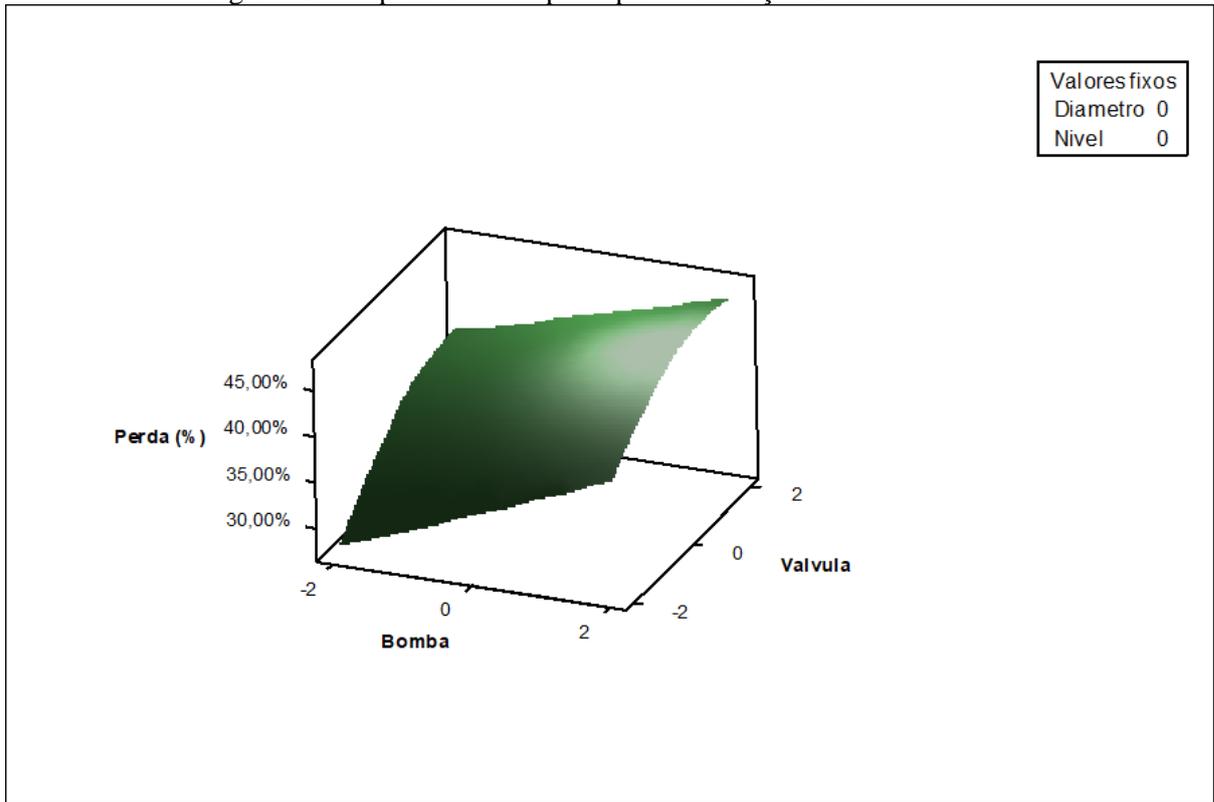
Figura 31 – Curvas de nível para a interação Válvula x Bomba



Fonte: autor (2019)

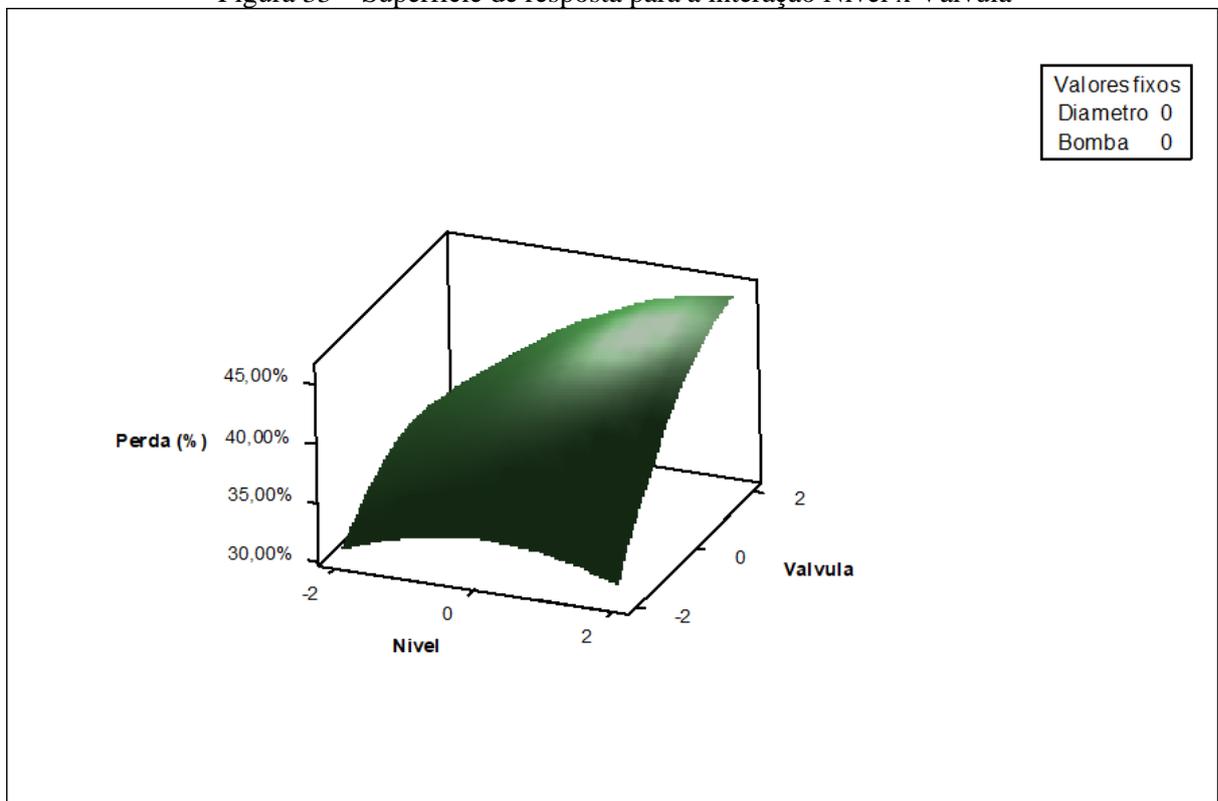
As superfícies de respostas geradas mostram que existem um ponto estacionário de máximo nos níveis máximos de trabalhos das variáveis independentes, como pode ser visto nos gráficos das Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 a seguir.

Figura 32 – Superfície de resposta para a interação Bomba x Válvula



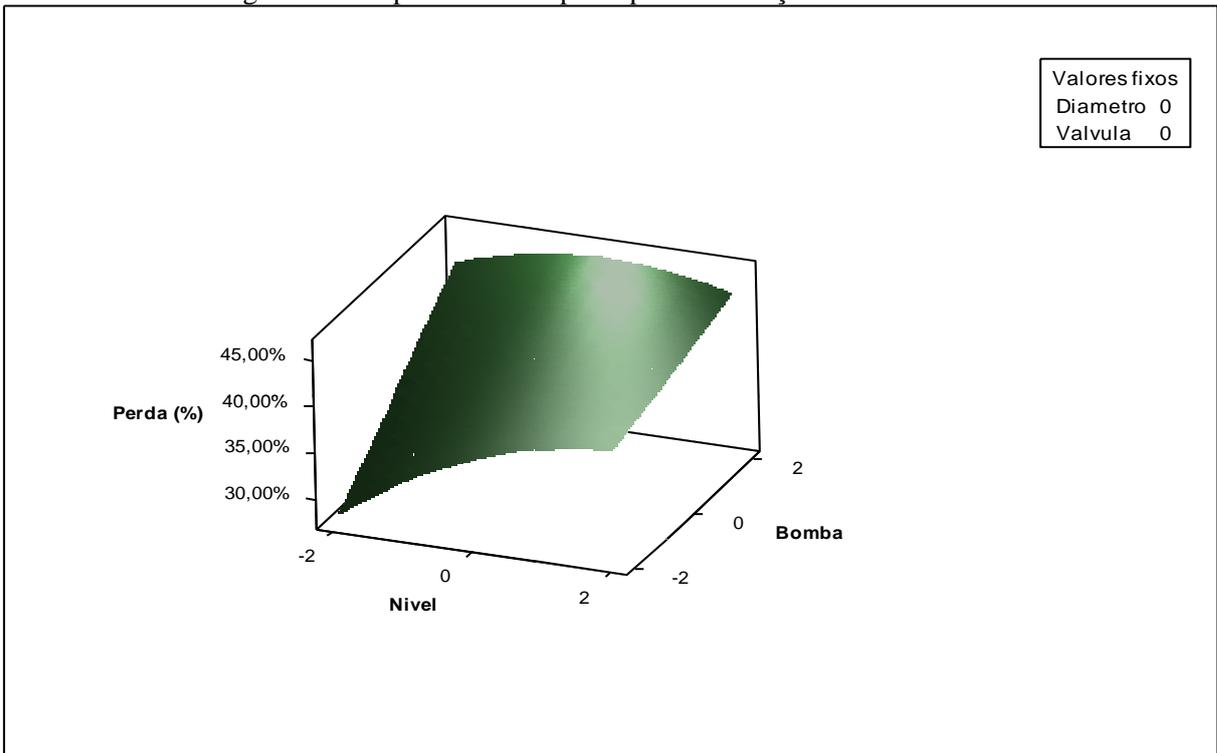
Fonte: autor (2019)

Figura 33 – Superfície de resposta para a interação Nível x Válvula



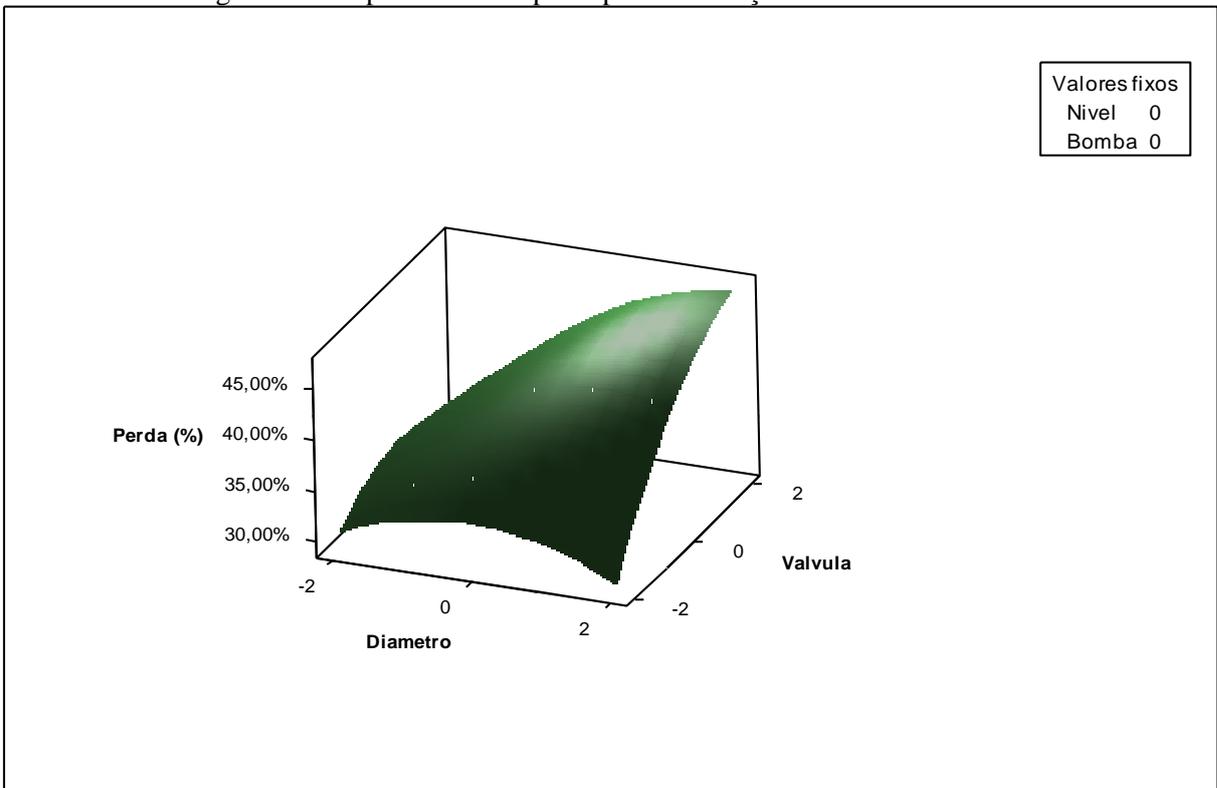
Fonte: autor (2019)

Figura 34 – Superfície de resposta para a interação Nível x Bomba



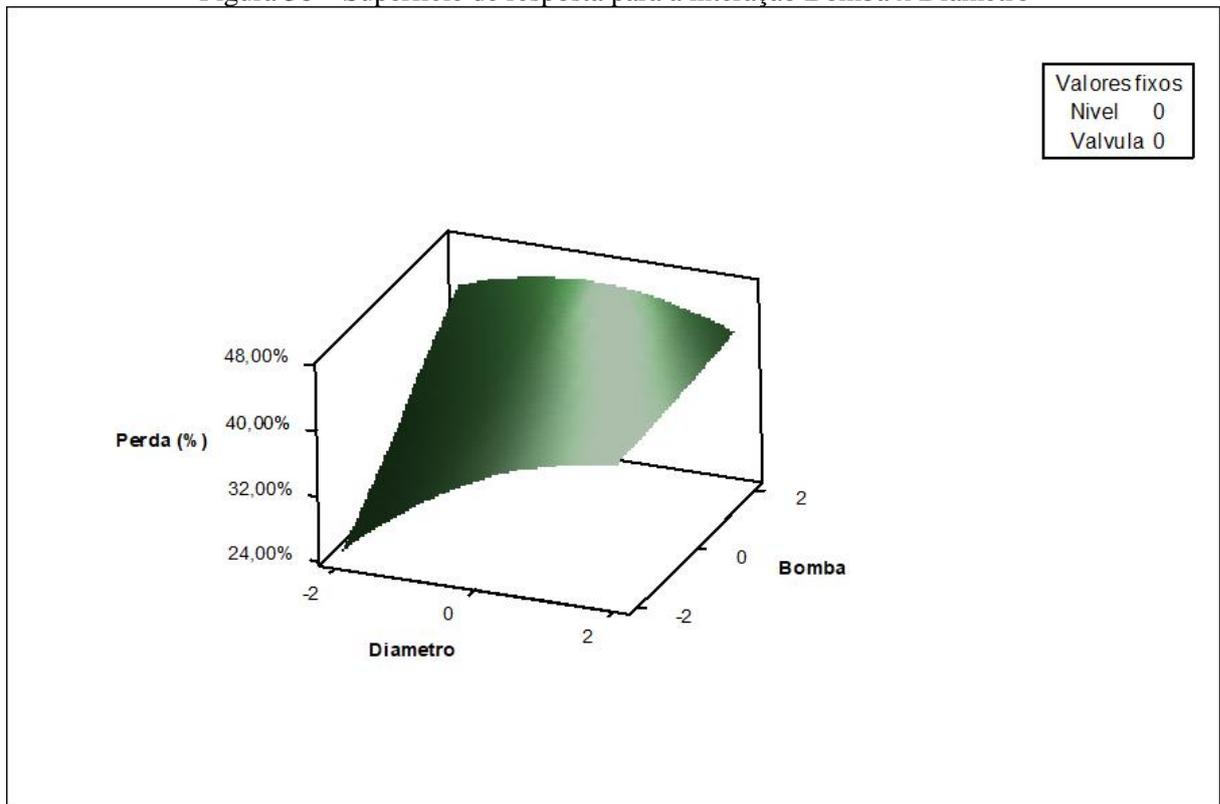
Fonte: autor (2019)

Figura 35 – Superfície de resposta para a interação Válvula x Diâmetro



Fonte: autor (2019)

Figura 36 – Superfície de resposta para a interação Bomba x Diâmetro



Fonte: autor (2019)

Observou-se que a curvatura existente para os intervalos selecionados pode-se obter então a equação do modelo e buscar sua otimização buscando a menor perda de água possível.

5.4.3 Otimização da equação da superfície de resposta

Para saber a definição da matriz hessiana, calculou-se seu autovalor λ em planilha eletrônica, como na equação 18:

$$|B - \lambda I| = 0 \quad (18)$$

onde:

$$B = \begin{bmatrix} -0,008 & 0,004 & -0,005 & 0,005 \\ 0,004 & -0,006 & -0,003 & 0,003 \\ -0,005 & -0,003 & 0,004 & -0,001 \\ 0,005 & 0,003 & -0,001 & -0,008 \end{bmatrix} \text{ e } I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

resultando em:

$$\lambda = \begin{bmatrix} -0,0140 \\ -0,0098 \\ 0,0083 \\ -0,0029 \end{bmatrix}$$

Como existem autovalores positivos e negativos, a hessiana é negativa, indicando um ponto ótimo de sela. Assim, lançou-se então a equação que modela a resposta em planilha eletrônica e então utilizou-se o algoritmo de otimização “Gradientes Reduzidos Generalizados” de forma a se obter as variáveis de decisão, ou seja, os valores codificados dos fatores A, B, C e D que resultem na menor perda possível, respeitada a restrição de -2 a 2, valores mínimos e máximos dos fatores (codificados), respectivamente. Então, obteve-se os seguintes valores codificados para os fatores, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores codificados para o ponto ótimo

Fatores		Ótimo codificado
A	Diâmetro	-0,55575436
B	Nível	-0,773126664
C	Pressão de Bomba	-1,831157824
D	Pressão de Válvula	-1,806128688

Fonte: autor (2019)

Esses fatores decodificados correspondem aos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores decodificados para o ponto ótimo

Fatores		Ótimo decodificado	Unidades
A	Diâmetro	0,299977635	m
B	Nível	818,9702834	m
C	Pressão de Bomba	8,766316317	m.c.a.
D	Pressão de Válvula	21,93871312	m.c.a.

Fonte: autor (2019)

Para tais valores, a perda prevista \hat{Y} foi de 27,86%. O único fator que precisou de ajuste foi o fator C – Pressão de bomba, uma vez que o mesmo foi alterado para 10 m.c.a., de forma

a atender a norma NBR 12218 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994) que preconiza tal valor de pressão como o mínimo em uma rede de distribuição de água. O valor do diâmetro foi arredondado para 0,300 m, valor comercial exemplificado em Porto (2006), e os demais fatores foram arredondados para a segunda casa decimal depois da vírgula para o lançamento dos mesmos no algoritmo de otimização de redes, conforme apresentado na Tabela 10.

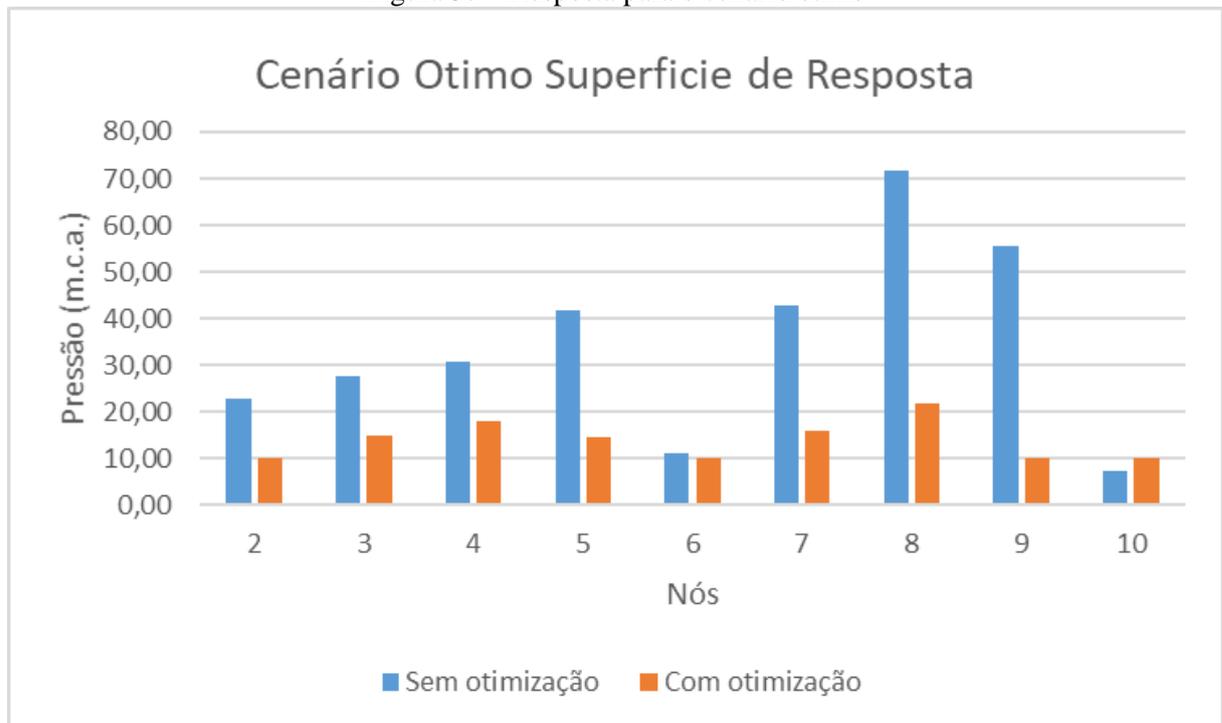
Tabela 10 – Valores aplicados no algoritmo de otimização de redes

	Fatores	Valores aplicados	Unidades
A	Diâmetro	0,30	m
B	Nível	818,97	m
C	Pressão de Bomba	10,00	m.c.a.
D	Pressão de Válvula	21,94	m.c.a.

Fonte: autor (2019)

Obteve-se então a seguinte resposta do algoritmo de otimização, ilustrada na Figura 37.

Figura 37 – Resposta para o cenário ótimo



Fonte: autor (2019)

Neste cenário, foram inseridas bombas nos seguintes trechos:

- a) Trecho 5: pressão de 26,19 m.c.a.;
- b) Trecho 8: pressão de 3,86 m.c.a.;
- c) Trecho 9: pressão de 47,03 m.c.a.

Foi também inserida uma válvula no trecho 7, gerando uma perda de carga de 22,19 m.c.a.

As perdas neste cenário foram de 26,61%, uma redução de 16,19 pontos percentuais em relação ao cenário sem otimização, um valor que se encontra dentro do erro R^2 de 89,12% para a resposta, portanto, estando dentro do previsto na equação do modelo. Assim, este cenário definirá a estratégia operacional para a rede, uma vez que obteve a maior redução de perda em comparação com os demais cenários anteriormente testados, bem como exigiu um número relativamente baixo de bombas e válvulas implantadas para atender as pressões.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como foi necessária a idealização de uma rede teórica para o desenvolvimento desta dissertação, elaboraram-se diversas propostas de redes ramificadas que atendessem as necessidades do trabalho. A rede adotada mostrou-se adequada por ser simples o suficiente para uma rápida implementação no EPANET e no programa desenvolvido em FORTRAN, sua topologia possui irregularidades o suficiente para haver pontos de baixa e alta pressão onde fosse necessária a otimização, bem como a escolha dos diâmetros originais, baseadas em diâmetros comerciais. Para trabalhos futuros, pretende-se aplicar trechos de redes reais já estudadas pelo NUMMARH.

A calibração da rede teórica através do algoritmo genético de calibração foi bem sucedida, uma vez que os critérios da WRc foram atendidos em 100% dos casos com pequena margem de erro. Contudo, esta etapa consumiu cerca de 6 minutos para ser finalizada pois foram usadas 10000 gerações, ainda que tenha sido feito uso das opções de multiprocessamento de modo a se ganhar velocidade, abrindo a possibilidade de futuros ajustes no código da rotina de calibração, bem como nas opções que o ambiente de desenvolvimento oferece, que otimizem o funcionamento do código de modo a reduzir o tempo computacional do programa sem prejuízo da confiabilidade dos resultados da calibração.

A etapa de otimização da rede se mostrou adequada a proposta da pesquisa, uma vez que o programa permite a entrada dos limites desejados para as pressões de bombeamento e a pressão desejada a jusante das válvulas redutoras de pressão e também da quantidade de trechos que se deseja substituir, bem como a possibilidade de se escolher pela substituição de todos os trechos da rede, permitindo a escolha do diâmetro então a ser adotado e a adoção do nível de reservatório desejado. O algoritmo genético de otimização obteve um bom desempenho, sendo capaz de manter as pressões dentro dos limites estabelecidos na pesquisa e indicar a quantidade de bombas e válvulas utilizados, bem como as pressões de bombeamento ou a perda de carga gerada pela válvula e os trechos de implantação das mesmas em um tempo inferior a um minuto, em média, para 10000 gerações. Recomenda-se para futuros trabalhos a incorporação de um algoritmo que permita estimar a potência e vazão das bombas implantadas nos trechos de tal maneira que facilite a comparação com curvas de catálogo dos fabricantes para bombas reais, assim como um algoritmo de cálculo da energia elétrica consumida pelas bombas implantadas.

A implantação de válvulas redutoras de pressão em uma rede de distribuição de água é uma prática hidráulicamente correta embora seja considerada um desperdício de energia, sendo

possível a implementação de bombas funcionando como turbinas (BFTs) para a sua recuperação como pode ser visto em Fecarotta et al. (2015). Assim, pode-se também futuramente implementar um algoritmo que considere a implementação de BFTs e faça o cálculo da energia elétrica recuperada ao invés do uso de válvulas redutoras de pressão, caso a pressão a ser reduzida no trecho justifique a recuperação da energia.

A análise estatística compreendeu um Experimento Fatorial Completo, que concluiu sobre a influência dos fatores, quer em conjunto, quer individuais, na resposta do problema, como no caso do fator diâmetro (A) e pressão de bombeamento (C), que isolados atuam no aumento das perdas mas combinados atuam na redução das mesmas. Também concluiu que os limites máximos e mínimos das variáveis otimizadas (fatores) foram adequados, atestando a qualidade do algoritmo de otimização desenvolvido em FORTRAN, o que permitiu uma análise por superfície de resposta em busca da otimização da equação gerada pela mesma, encontrando um ponto ótimo e viável de operação. Assim, conclui-se que o planejamento de experimentos e as ferramentas estatísticas utilizadas foram fundamentais na elaboração de cenários de modo a se avaliar o comportamento dos fatores na resposta da rede sem a necessidade de se gerar cenários redundantes ou desnecessários que demandassem tempo de execução e tivessem pouco valor experimental.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a inclusão dos custos relativos a implantação dos cenários de otimização na rotina de cálculos, que compreendem custos de substituição de tubulações, implantação de bombas e válvulas, uso de bombas funcionando como turbinas para recuperação de energia e redução de pressão, custo da energia, custo do tratamento da água, bem como a modificação do algoritmo de seleção de respostas de modo a se incluir a possibilidade de otimização do custo e, assim, através de ferramentas estatísticas, analisar a viabilidade de implantação de diferentes cenários de acordo com a realidade econômica onde a rede se insere.

REFERÊNCIAS

ABDULSHAHEED, A.; MUSTAPHA, F.; GHAVAMIAN, A. A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 69, p. 902–911, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304373>. Acesso em: 25 jan. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate**. São Paulo: ABES, 2013. 45p. Disponível em: <http://www.abes-sp.org.br/arquivos/perdas.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12.218**: projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12.218**: projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

CECON, P. R.; SILVA, A. R. **Introdução à metodologia de superfícies de resposta**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011. 35 p.

CHINI, C. M.; STILLWELL, A. S. The State of U. S. Urban Water: Data and the Energy-Water Nexus. **Water Resources Research**, Washington, v. 54, n. 3, p. 1796-1811, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017WR022265>. Acesso em: 10 jan. 2019

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 30, p. 59-84, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006692>. Acesso em: 13 nov. 2017.

COVELLI, C.; COZZOLINO, L.; CIMORELLI, L.; MORTE, R. D.; PIANESE, D. Optimal location and setting of prvs in wds for leakage minimization. **Water Resources Management**, Basel, v. 30, n. 5, p. 1803–1817, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-016-1252-7>. Acesso em: 15 jul. 2017.

DO, N. C.; SIMPSON, A. R.; DEUERLEIN, J. W.; PILLER, O.. Calibration of water demand multipliers in water distribution systems using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Reston, v. 142, n. 11, p. 1-13, 2016. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000691](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000691). Acesso em: 17 mai. 2017

FECAROTTA, O; ARICÒ, C.; CARRAVETTA, A.; MARTINO, R; RAMOS, H. M. Hydropower potential in water distribution networks: pressure control by pats. **Water Resources Management**, Basel, v. 29, n. 3, p. 699-714, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-014-0836-3>. Acesso em: 17 mai. 2017.

- FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Losses reduction and energy production in water-distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 138, n. 3, p. 237–244, 2012. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000179](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000179). Acesso em: 18 mai. 2017.
- GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P. W. Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 87, n. 2, p. 195–214, 1989. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/iicep.1989.2003>. Acesso em: 20 jun 2017.
- GOMES, J. H. F. Método dos polinômios canônicos de misturas para otimização multi-objetivo. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/724>. Acesso em: 12 dez. 2018.
- HAN, R.; LIU, J. Spectral clustering and genetic algorithm for design of district metered areas in water distribution systems. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 186, p. 152–159, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581731370X>. Acesso em: 12 fev. 2018.
- JOWITT, P. W.; XU, C. Optimal valve control in water-distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 116, n. 4, p. 455–472, 1990. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1990\)116:4\(455\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9496(1990)116:4(455)). Acesso em: 15 jun. 2017.
- KANAKOUDIS, V.; MUHAMMETOGLU, H. Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: two case studies from Greece and Turkey. **Clean**, Weinheim, v. 42, n. 7, p. 880–892, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/clen.201300138>. Acesso em: 10 abr. 2017.
- KEPA, U.; STAŃCZYK-MAZANEK, E. A hydraulic model as a useful tool in the operation of a water-pipe network. **Polish Journal of Environmental Studies**, Olzstyn, v. 23, n. 3, p. 995–1001, 2014. Disponível em: <http://www.pjoes.com/A-Hydraulic-Model-as-a-Useful-Tool-r-nin-the-Operation-of-a-Water-Pipe-Network,89274,0,2.html>. Acesso em: 13 ago. 2017.
- KHATAVKAR, P.; MAYS, L. W. Model for Optimal Operation of Water Distribution Pumps with Uncertain Demand Patterns. **Water Resources Management**, Basel, v. 31, n. 12, p. 3867–3880, 2017a. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1712-8>. Acesso em: 18 abr. 2018.
- KHATAVKAR, P.; MAYS, L. W. Testing an optimization/simulation model for the real-time operations of water distribution systems under limited power availability. *In: CONGRESS ON TECHNICAL ADVANCEMENT*, 1., 2017, Duluth. **Proceedings [...]**. Reston: ASCE, 2017b. p. 1-9. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784481028.001>. Acesso em: 18 abr. 2018.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Introdução aos Algoritmos Genéticos: Sistemas Inteligentes - Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UGRGS, 1999.

MAKISHA, N; KAZIMIROVA, T. Principles of energy saving in water supply and sewage systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH IN MECHANICAL ENGINEERING SCIENCES, 2017, Manipal. **Proceedings** [...]. Paris: EDP Sciences, 2018. p. 1-6. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/03/mateconf_rimes2017_04013/mateconf_rimes2017_04013.html. Acesso em: 15 jul. 2018.

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**, Reston, v. 139, n. 2, p. 166–174, 2013. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000245](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000245). Acesso em: 21 jul. 2017.

NARDO, A.; NATALE, M.; GIUDICIANNI, C.; SANTONASTASO, G. F.; TZATCHKOV, V.; VARELA, J. M. R. Economic and energy criteria for district meter areas design of water distribution networks. **Water**, Basel, v. 9, n. 7, p. 1-13, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/7/463>. Acesso em: 09 ago. 2018.

OIKONOMOU, K.; PARVANIA, M. Optimal coordination of water distribution energy flexibility with power systems operation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Argonne, v. 10, n. 1, p. 1101-1110, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8333809>. Acesso em: 20 fev. 2019.

NAJAFI, B.; ARDABILI, S. F.; MOSAVI, A.; SHAMSHIRBAND, S.; RABCZUK, T. An intelligent artificial neural network-response surface methodology method for accessing the optimum biodiesel and diesel fuel blending conditions in a diesel engine from the viewpoint of exergy and energy analysis. **Energies**, Basel, v. 11, n. 4, p. 1-18, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/860>. Acesso em: 13 fev. 2019.

OUGUI, J. Y. **Estudo da operação otimizada de sistema de bombeamento de água**. 2006. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01112016-162819/pt-br.php>. Acesso em: 12 ago. 2017.

PEREIRA, F. M. V.; PEREIRA-FILHO, E. R. Aplicação de programa computacional livre em planejamento de experimentos: um tutorial. **Química Nova**, São Paulo, v. 41, n. 9, p. 1061–1071, 2018. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/NT20180130.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2019

PINNTO, M. R.; CASTRO, M. A. H.; BARBOSA, J. M. C.; MAIA JUNIOR, J. V. F. Dimensionamento econômico otimizado de redes de distribuição de água considerando custos de manutenção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 145-153, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1413-41522017000100145&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 06 set. 2018.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4 ed. São Carlos: EESC – USP, 2006.

RAHMANI, F.; MUHAMMED, K.; BEHZADIAN, K.; FARMANI, R. Optimal operation of water distribution systems using a graph theory–based configuration of district metered areas. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 144, n. 8, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000941>. Acesso em: 05 jan. 2019.

ROSSI, J. W.; NEVES, C. **Econometria e séries temporais com aplicações a dados da economia brasileira**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SALVADOR, F. J.; CARRERES, M.; CRIALESI-ESPOSITO, M.; PLAZAS, A. H. Determination of critical operating and geometrical parameters in diesel injectors through one dimensional modelling, design of experiments and an analysis of variance. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, Thousand Oaks, v. 232, n. 13, p. 1762–1781, 2018. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954407017735262>. Acesso em: 14 fev. 2019.

SALVINO, M. M.; CARVALHO, P. S. O.; GOMES, H. P. Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 503–512, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522015000300503&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 05 abr. 2017.

SANCHEZ, S. M.; SANCHEZ, P. J.; WAN, H. Work smarter, not harder: a tutorial on designing and conducting simulation experiments. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2018, Gothenburg. **Proceedings [...]** Gothenburg: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8632311>. Acesso em: 14 fev. 2019.

SANTOS, J. **Estudo do Modelo de Calibração para ajuste de parâmetros de rugosidade, demanda e vazamento visando eficiência hídrica e energética em redes de abastecimento de água. Estudo de caso em São Lourenço - MG**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/500>. Acesso em: 03 abr. 2017.

SANZ, G.; PÉREZ, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. Leak detection and localization through demand components calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 142, n. 2, p. 159-164, 2016. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000592](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000592). Acesso em: 13 abr. 2017.

SILVA, F. G. B. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos**. 2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-23112016-163209/pt-br.php>. Acesso em: 20 mar. 2017.

SOLDEVILA, A.; FERNANDEZ-CANTI, R. M.; BLESÁ, J.; TORNIL-SIN, S.; PUIG, V. Leak localization in water distribution networks using Bayesian classifiers. **Journal of Process Control**, Amsterdam, v. 55, p. 1–9, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152417300781>. Acesso em: 07 ago. 2018.

SOLER, E. M.; TOLEDO, F. M. B.; SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. Otimização dos custos de energia elétrica na programação do armazenamento e distribuição de água em redes urbanas. **Production**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 385–401, 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132016000200385&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 14 abr. 2018.

SOPHOCLEOUS, S.; SAVIC, D.; KAPELAN, Z.; SHEN, Y.; SAGE, P. Advances in water mains network modelling for improved operations. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 119, p. 593–602, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815025825>. Acesso em: 23 mai. 2018.

TANYIMBOH, T. T.; SEYOUM, A. G. Efficient parallel evolutionary optimization algorithm applied to a water distribution system. **European Water**, Athens, v. 58, p. 375–381, 2017. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/6d39/851b3725f0e4a8043a69cac4887c92c5374b.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2018.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed. São Paulo: USP, 2006a.

TSUTIYA, M. T. **Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água**. 1. ed. São Paulo: ABES, 2006b.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 125, n. 3, p. 277–285, 1999. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:3\(277\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:3(277)). Acesso em: 14 abr. 2017.

VAKILIFARD, N.; ANDA, M.; BAHRI, P. A.; HO, G. The role of water-energy nexus in optimising water supply systems – Review of techniques and approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 82, p. 1424–1432, 2018. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307621>. Acesso em: 03 jan. 2019.

VIANA, A. N. C.; NOGUEIRA, F. J. H. Bombas de fluxo operando como turbinas - procedimento de seleção. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais [...]**. São Paulo: USP, 2002. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/AGRENER2002/pdf/0098.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2017.

WATER RESEARCH CENTRE. **Network analysis: a code of practice**. Swindon: WRc, 1989.

YONGFAN, L.; SHUAI, Z.; JING, W. Research on the optimization design of motorcycle engine based on DOE methodology. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 174, p. 740–747, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817302163>. Acesso em: 15 fev. 2019.

YU, P.; LOW, M. Y.; ZHOU, W. Design of experiments and regression modelling in food flavour and sensory analysis: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 71, p. 202–215, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224417300109>. Acesso em: 15 fev. 2019.

ZOCOLER, J. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; SAAD, J. C. C.; CRUZ, R. L. Período de recuperação do investimento em bomba hidráulica de melhor rendimento em sistemas de bombeamento na tarifa horossazonal verde. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 290-302, 2011. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000200009&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 20 jun. 2017.