

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Leandro Alves Evangelista

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA AO
LONGO DA SUA VIDA ÚTIL**

Belo Horizonte
2022

Leandro Alves Evangelista

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA AO
LONGO DA SUA VIDA ÚTIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Sistemas de recursos hídricos

Orientador: Dr. Gustavo Meirelles Lima

Belo Horizonte
2022

E92a

Evangelista, Leandro Alves.

Avaliação da eficiência de redes de distribuição de água ao longo da sua vida útil [recurso eletrônico] / Leandro Alves Evangelista. – 2022.
1 recurso online (126 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Gustavo Meirelles Lima.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 104-126.

Bibliografia: f. 96-103.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Eficiência energética - Teses. 4. Água - Distribuição - Teses. I. Lima, Gustavo Meirelles. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
 ESCOLA DE ENGENHARIA
 CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM **SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE **LEANDRO ALVES EVANGELISTA**

NÚMERO DE REGISTRO: 720

Às 14:00 horas do dia 29 de julho de 2022, reuniu-se na Escola de Engenharia da UFMG a Comissão Examinadora de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, indicada pelo Colegiado do PROGRAMA DE

PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, para julgar, em exame final, o trabalho final intitulado:

"AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA AO LONGO DA SUA VIDA ÚTIL"

requisito parcial para a obtenção do Grau de MESTRE em SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, Área de Concentração: HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS

Abrindo a sessão, o Orientador, Prof. Gustavo Meirelles Lima, após dar conhecimento aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa pelo candidato. Logo após, a Comissão se reuniu sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

BANCA EXAMINADORA	INSTITUIÇÃO	INDICAÇÃO
Prof. Dr. Gustavo Meirelles Lima - Orientador	EHR	<u> </u> APROVADO <u> </u>
Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior	UNICAMP	<u> </u> APROVADO <u> </u>
Prof. Dr. Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro	UNICAMP	<u> </u> APROVADO <u> </u>
Prof. Dr. Mário Luís Cabello Russo	IFMG	<u> </u> APROVADO <u> </u>

Pelas indicações, o candidato foi considerado APROVADO.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 29 de julho de 2022.

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Mário Luís Cabello Russo, Usuário Externo**, em 02/08/2022, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edevar Luvizotto Junior, Usuário Externo**, em 02/08/2022, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Meirelles Lima, Professor do Magistério Superior**, em 04/08/2022, às 08:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro, Usuário Externo**, em 04/08/2022, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1628626** e o código CRC **2EC3238E**.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Gabriela Alves, por estar comigo em todos os momentos dessa jornada contribuindo com muito apoio para que eu pudesse alcançar este momento. Sem você e seus cuidados a caminhada teria sido muito mais árdua;

Aos meus pais, Maria José e Paulo, por serem desde sempre, pilares para que eu pudesse chegar mais alto. As conquistas de hoje sempre estarão atribuídas a todo esforço e amor de vocês;

Ao meu orientador e professor Gustavo Meirelles Lima, por toda paciência e contribuição com o desenvolvimento deste trabalho, além das excelentes aulas. Os ensinamentos aprendidos com você durante todo percurso foram inestimáveis e serei sempre grato;

Aos docentes do programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, em especial aos do departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos por todo o aprendizado ao longo das disciplinas cursadas;

Aos colegas de Pós-graduação que ao longo da caminhada se fizeram presentes, mesmo com a distância imposta pela pandemia;

Aos servidores responsáveis por secretariar o programa de Pós-graduação, que são sempre muito solícitos e ágeis com as demandas inerentes ao curso. O bom desempenho do curso é um resultado do excelente trabalho desenvolvido por vocês;

Aos colaboradores do Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, por proporcionar um ambiente para produtivas aulas práticas e desenvolvimento de pesquisas;

Aos colegas de trabalho do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Santa Luzia, que sempre torceram pelo meu sucesso;

Ao Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Santa Luzia, que por meio de seus colaboradores, sempre mostraram apoio ao desenvolvimento pessoal de seus servidores contribuindo dessa forma com o desenvolvimento deste trabalho;

A todas as pessoas que não citei nominalmente, mas que contribuíram de alguma forma, os meus agradecimentos.

RESUMO

A infraestrutura responsável por distribuir água para os mais diversos tipos de consumidores são as redes de distribuição de água (RDA). Por se tratar de uma infraestrutura básica para atendimento às mais variadas necessidades humanas, além de ter um funcionamento dinâmico bastante complexo, essas são amplamente abordadas em estudos da literatura. RDA operam por longos períodos de tempo, e nesse contexto o presente trabalho propõe avaliar o impacto que alterações das características físicas e hidráulicas que ocorrem ao longo da vida útil de uma RDA, tais como a rugosidade das tubulações, o índice de vazamentos, o consumo de água e a deterioração das bombas, terão em sua eficiência operacional e em termos de custos. Para isso, as variações de cada um dos parâmetros citados foram modeladas matematicamente dentro de um ambiente de programação (MATLAB), acoplado ao simulador hidráulico EPANET 2.2, para análises em dois estudos de caso com redes da literatura. A rugosidade das tubulações foi modelada considerando que esta aumenta em uma taxa conhecida utilizando a equação de Hazen-Williams. Os vazamentos foram formulados considerando uma parcela mínima que aumenta com o tempo, mais um valor variável em função das sazonalidades de pressão da rede, calculado pela equação de orifícios. O aumento da demanda foi realizado considerando que o consumo cresce na mesma proporção do aumento da população, que foi estimado por taxas de crescimento do IBGE. A deterioração das bombas foi realizada calculando uma nova altura manométrica a cada período de tempo, seguindo formulações e taxas observadas na literatura. Todos parâmetros citados foram variados em torno de um valor médio de referência, como forma de representar incertezas. Após as análises realizadas nos parâmetros, considerando uma vida útil de 20 anos, duas medidas de eficiência energética foram implementadas e avaliadas em um dos estudos de caso, e posteriormente essas tiveram sua viabilidade analisada do ponto de vista econômico. Os resultados das análises nos parâmetros mostraram que os custos de operação são mais impactados pelos vazamentos da rede, e as pressões operacionais sofrem mais influência do aumento da rugosidade nas tubulações. As medidas de eficiência energética se mostraram muito relevantes para que seja mantido o funcionamento adequado da rede ao longo de sua vida útil. Em relação as análises financeiras, estas mostraram que a implantação das medidas de eficiência energética são atrativas também do ponto de vista econômico, pois trouxeram reduções nos custos totais à longo prazo.

Palavras-chave: Eficiência energética; Vida útil; Medidas de eficiência; Análise econômica

ABSTRACT

The infrastructure responsible for distributing water to various types of consumers is the water distribution network (WDN). Because it is a basic infrastructure to serve the most varied human needs, besides having a very complex dynamic functioning, these are widely approached in literature studies. WDN operate for long periods of time, and in this context the present work proposes to evaluate the impact that changes in physical and hydraulic characteristics that occur over the operational life of a WDN, such as pipe roughness, leakage rate, water consumption and pump deterioration, will have on its operational efficiency and in terms of costs. For this, the variations of each of the parameters cited were mathematically modeled within a programming environment (MATLAB), coupled to the hydraulic simulator EPANET 2.2, for analysis in two case studies with networks from the literature. The roughness of the pipes was modeled assuming that it increases at a known rate using the Hazen-Williams equation. The leakages were formulated considering a minimum flow that increases with time, plus a variable value depending on the pressure fluctuation of the network, calculated by the orifices equation. The increase in demand was carried out considering that consumption grows in the same proportion as the increase in population, which was estimated by IBGE growth rates. The deterioration of the pumps was performed by calculating a new head at each period of time, following formulations and rates observed in the literature. All parameters cited were varied around an average reference value, as a way of representing uncertainties. After the analyses performed on the parameters, considering a lifetime of 20 years, two energy efficiency measures were implemented and evaluated in one of the case studies, and later these had their feasibility analyzed from an economic point of view. The results of the parameter analyses showed that operating costs are most impacted by network leakage, and operating pressures are most influenced by increased pipe roughness. Energy efficiency measures have proven to be very relevant in order to maintain the proper functioning of the network throughout its lifetime. Regarding the financial analyses, these showed that the implementation of energy efficiency measures are attractive also from an economic point of view, as they brought reductions in total costs in long term.

Keywords: Energy efficiency; Life cycle; Efficiency measures; Economic analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Consumo médio per capita dos prestadores de serviços participantes do SNIS, entre 2017 e 2019, dos estados, Distrito Federal e Brasil.....	29
Figura 3.2 – Exemplo de redes a) ramificada b) malhada.....	31
Figura 3.3 – Curvas características vazão x altura manométrica, para 4 tamanhos de rotores em uma mesma bomba centrífuga.....	36
Figura 3.4 – Exemplo de uma curva característica de um sistema hipotético.....	37
Figura 3.5 – Identificação do ponto de operação ideal de uma bomba num dado sistema.....	37
Figura 3.6 – Associação de bombas em a) série b) paralelo.....	39
Figura 3.7 – Curvas características da bomba para duas diferentes velocidades.....	40
Figura 3.8 – Consumo de energia elétrica nos SAA dos prestadores de serviços participantes do SNIS, por estado, de 2015 a 2019.....	49
Figura 3.9 – Índice de perdas na distribuição – IN049 para as regiões do Brasil.....	52
Figura 3.10 – Índice de perdas na distribuição – IN049 no Brasil.....	52
Figura 3.11 – Diagrama para representação de um fluxo de caixa.....	57
Figura 3.12 – Fluxo para avaliação da qualidade operacional e econômica das medidas de eficiência.....	58
Figura 4.1 – Diagrama representativo da forma como foram abordadas as simulações.....	60
Figura 4.2 – a) Decréscimo do Coeficiente de Hazen-Williams para cada taxa considerada; b) Perda de carga unitária.....	63
Figura 4.3 – Rede de distribuição de água Anytown.....	73
Figura 4.4 – Rede de distribuição de água D-Town.....	75
Figura 5.1 – Custos totais anuais para diferentes taxas de aumento da rugosidade.....	77
Figura 5.2 – Pressões críticas para cada taxa de aumento da rugosidade.....	78
Figura 5.3 – Custos totais anuais para cada coeficiente de emissão.....	79
Figura 5.4 – Pressões críticas a cada ano para os diferentes coeficientes de emissão.....	80
Figura 5.5 – Percentual de vazamentos a cada ano para os diferentes coeficientes de emissão.....	81
Figura 5.6 – Custos totais anuais para os diferentes percentuais de crescimento populacional.....	82
Figura 5.7 – Pressões críticas para os diferentes percentuais de crescimento populacional.....	82
Figura 5.8 – Custos totais anuais para as diferentes taxas de deterioração da bomba.....	83
Figura 5.9 – Pressão crítica para as diferentes taxas de deterioração da bomba.....	84
Figura 5.10 – Custos totais anuais para cada cenário de referência avaliado na rede Anytown.....	85
Figura 5.11 – Pressões críticas anuais para cada cenário de referência avaliado na rede Anytown.....	86
Figura 5.12 – Custos totais anuais para diferentes taxas de aumento da rugosidade.....	87
Figura 5.13 - Pressões críticas a cada ano para as diferentes taxas de aumento da rugosidade.....	88
Figura 5.14 – Custos totais anuais para diferentes percentuais de vazamento.....	89
Figura 5.15 – Pressões críticas anuais para diferentes percentuais de vazamento.....	90
Figura 5.16 – Custos totais anuais para diferentes taxas de crescimento populacional.....	91

Figura 5.17 – Pressões críticas anuais para diferentes taxas de crescimento populacional	91
Figura 5.18 – Custos totais anuais para as diferentes taxas de deterioração da bomba	92
Figura 5.19 – Pressões críticas anuais para as diferentes taxas de deterioração da bomba	92
Figura 5.20 – Custos totais anuais para cada cenário avaliado, utilizando os parâmetros médios de referência.....	93
Figura 5.21 – Pressões críticas anuais para cada cenário avaliado, utilizando os parâmetros médios de referência.....	94
Figura 5.22 – Custos totais para o cenário intermediário antes e após a implementação da redução do percentual de vazamentos.	95
Figura 5.23 – Indicador Op24 da IWA a cada ano de operação antes e depois da aplicação das medidas.....	95
Figura 5.24 – Indicador IN058 do SNIS a cada ano de operação antes e depois da aplicação das medidas.....	96
Figura 5.25 – Mapa de pressões na rede antes e depois da redução do percentual de vazamentos.....	97
Figura 5.26 – Trechos de rede reabilitada em cada ano de operação até o fim da vida útil considerada.....	98
Figura 5.27 – Custos totais para o cenário intermediário antes e após a implementação da reabilitação percentual da rede.	99
Figura 5.28 – Indicador IN058 do SNIS a cada ano de operação antes e depois do início da reabilitação da rede.....	99
Figura 5.29 – Mapa de pressões na rede antes e depois da reabilitação da rede ..	100
Figura 5.30 – Custos totais anuais para implementação da redução dos vazamentos e economizados operacionalmente.....	101
Figura 5.31 – Custos da ME e do valor economizado em relação aos custos totais de operação.	102
Figura 5.32 – Balanço dos custos anuais a partir do ano de implementação da ME nos vazamentos.....	102
Figura 5.33 – Custos totais anuais para implementação da redução dos vazamentos e economizados operacionalmente.....	103
Figura 5.34 – Balanço dos custos anuais a partir do ano de implementação da ME nos vazamentos para 30 anos de vida útil.....	104
Figura 5.35 – Custos totais anuais para implementação da reabilitação da rede e economizados operacionalmente.....	105
Figura 5.36 – Custos da ME e do valor economizado em relação aos custos totais de operação	105
Figura 5.37 – Balanço dos custos anuais a partir do ano de reabilitação da rede ..	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros estimados para o polinômio de 3° grau e os respectivos coeficientes de determinação para o Brasil e unidades da federação	26
Tabela 3.2 – Valores do consumo médio per capita de água dos prestadores de serviços participantes do SNIS, em 2017, 2018 e 2019.....	28
Tabela 3.3 – Medidas de eficiência energética em SAA	56
Tabela 4.1 – Taxas de aumento da rugosidade interna das tubulações	62
Tabela 4.2 – Valores utilizados no coeficiente de emissão	65
Tabela 4.3 – Valores utilizados nos parâmetros KT e β	67
Tabela 4.4 - Estrutura tarifária da CEMIG para consumidor de alta tensão do grupo A2	72
Tabela 4.5 – Tarifas utilizadas para cálculo dos custos	74
Tabela 5.1 – Percentuais de vazamento para cada cenário de vazamentos avaliado	81

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AiBi	<i>Apportionment Method</i> (Método de repartição)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEP	<i>Best Efficiency Point</i> (Ponto de Melhor Eficiência)
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GA	<i>Genetic Algorithm</i> (Algoritmo Genético)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IWA	<i>International Water Association</i> (Associação Internacional da Água)
mca	metros de coluna d'água
ME	Medida de eficiência
NBR	Norma Brasileira
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i> (Carga positiva de sucção)
ONU	Organização das Nações Unidas
ProjPeq	Modelo dinâmico de projeção
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> (Otimização por enxame de partículas)
RDA	Redes de Distribuição de Água
SAA	Sistemas de Abastecimento de água
SLC	<i>Soccer League Competition</i> (Competição da Liga de Futebol)
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIR	Taxa Interna de Retorno
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
VPL	Valor Presente Líquido
VRP	Válvula Redutora de Pressão

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Parâmetro para Minas Gerais: 0,0000004335
A	Área do vazamento [m ²]
A15	Perdas de água [m ³]
A19	Perdas reais [m ³]
aB	Coeficientes "a" da curva da bomba
AG002	Quantidade de ligações ativas [n°]
AG005	Extensão da rede de água [km]
AG006	Volume de água produzido [m ³]
AG010	Volume de água consumido [m ³]
AG015	Volume de água importado [m ³]
AG018	Volume de água tratado importado [m ³]
AG024	Volume de serviço [m ³]
AG028	Consumo total de energia elétrica [kW]
arug	Taxa de aumento da rugosidade [mm/ano]
b	Parâmetro para Minas Gerais: -0,0000023355
B(t, t+n)	Nascimentos ocorridos entre t e t+n [n° de pessoas]
bB	Coeficientes "b" da curva da bomba
c	Parâmetro para Minas Gerais: -0,0007653779
C	Custos totais com o bombeamento [R\$]
C vol(i)	Custo de produção de água na hora i [R\$/m ³]
C\$ ano	Custo total durante o ano de operação [R\$]
C\$ dia	Custo durante um dia típico do ano de operação [R\$]
C\$ semana	Custo durante uma semana típica do ano de operação [R\$]
C24	Número de ramais [n°]
C7	Capacidade máxima de bombeamento das estações elevatórias [kW]
C8	Comprimento das tubulações [Km]
ca	Folga do anel de desgaste [mm]
ca0	Folga inicial do anel de desgaste [mm]
cb	Coeficientes "c" da curva da bomba
Cd	Coeficiente de descarga
Cener(i)	Custo de energia elétrica durante a hora i [R\$/kwh]
CHW	Coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams [m ² /s]

ct	Custo da energia no passo de tempo t [R\$/Kwh]
d	Parâmetro para Minas Gerais: 1,0003835392
D	Diâmetro da tubulação [m]
D(t, t+n)	Óbitos ocorridos entre t e $t+n$ [n° de pessoas]
D1	Consumo de energia para bombeamento [kWh]
D2	Consumo de energia máximo diário para bombeamento [kWh]
D3	Fator de uniformização [$m^3 \cdot 100 \text{ m}$]
D4	Consumo de energia reativa [kVarh]
D5	Recuperação de energia [Wh]
Da	Diâmetro do anel de desgaste [mm]
Dano	Número de dias do ano [dias]
Dener	Custo com demanda de energia elétrica [R\$]
Dsemana	Número de semanas do ano [n° de semanas]
e	Número de Euler
E(t, t+n)	Emigrantes entre t e $t+n$ [n° de pessoas]
e0	Rugosidade absoluta inicial [mm]
FCte	Fluxo de caixa no período t_e [R\$]
g	Aceleração gravitacional [m/s^2]
γ	Peso específico da água [N/m^3]
h	Carga de pressão no vazamento [m]
H1	Duração do período de referência [dia]
H2	Tempo de pressurização do sistema [dia]
$H_{i,t}$	Carga inserida no sistema pela bomba i no passo de tempo t [m]
H_p	Altura manométrica inicial [m]
H'_p	Altura manométrica corrigida [m]
i	Taxa de desconto [%]
$I(t, t+n)$	Imigrantes entre t e $t+n$ [n° de pessoas]
I_0	Investimento inicial [R\$]
IN049	Índice de perdas na distribuição [%]
IN050	Índice bruto de perdas lineares [%/km]
IN051	Índice de perdas por ligação [%/unidade]
IN058	Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água [kWh/m^3]

K1	Coeficiente do dia de maior consumo
K2	Coeficiente da hora de maior consumo no dia de maior consumo
kt	Taxa de aumento da rugosidade interna [$\text{ms}^2/\text{L}^2\text{h}$]
L	Comprimento da tubulação [m];
La	Comprimento axial do anel de desgaste [mm]
Lr	Comprimento total das tubulações da rede [km]
n	Tamanho do intervalo de anos [anos]
N	Número de bombas em operação [n° de bombas]
$\eta_{i,t}$	Rendimento da bomba i no passo de tempo t [%]
Np	Número de consumidores atendidos [pessoas]
nte	Número de períodos de te [anos]
Op23	Perdas de água por ramal [$\text{m}^3/\text{ramal}/\text{ano}$]
Op24	Perdas de água por comprimento de tubulação [$\text{m}^3/\text{km}/\text{dia}$]
Op27	Perdas reais por ramal [l/ramal/dia]
P	População a ser abastecida [n° de habitante]
P(i)	Potência consumida na hora i [kwh]
P(t)	População no ano t [n° de habitantes]
P(t+n)	População no ano t+n [n° de habitantes]
Ph4	Utilização da capacidade de bombeamento [%]
Ph5	Consumo de energia normalizado [$\text{kWh}/\text{m}^3 \times 100 \text{ m}$]
Ph6	Consumo de energia reativa [%]
Ph7	Percentual de recuperação de energia [%]
Pmáx	Custo com demanda de energia elétrica [R\$]
Q	Vazão no trecho [m^3/s]
q	Vazão de água perdida [m^3/s]
Q	Vazão da bomba [l/s]
$Q_{i,t}$	Vazão bombeada pela bomba i no passo de tempo t [m^3/s]
Qm	Vazão de distribuição [l/s]
qm	Consumo per capita da população [l/habitante/dia]
qmin	Volume total de vazamentos mínimo [m^3]
R	Vazão de recirculação interna da bomba [l/s]
t	Tempo [s]
T	Tempo de operação [h]

t_a	Tempo cumulativo de operação [h]
t_e	Enésimo período de tempo do investimento [anos]
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima admissível [m/s]
$Vol(i)$	Volume de água perdida na hora i [m ³]
X	Ano
Y	População
y	Expoente de emissão
β	Parâmetro de deterioração do anel de desgaste [1/h]
Δh	Perda de carga das tubulações [m]
Δt	Passo de tempo [h]
ω	Velocidade relativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
3.1	PROJETO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	23
3.1.1	Características populacionais.....	23
3.1.2	Dimensionamento da rede de distribuição	30
3.1.3	Dimensionamento das estações elevatórias	35
3.2	OPERAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	41
3.2.1	Operação das estações elevatórias	42
3.2.2	Indicadores de desempenho	45
3.2.3	Medidas de eficiência energética	53
3.3	ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	56
3.3.1	Linha de base	56
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	59
4.1	CENÁRIOS	59
4.1.1	Generalidade dos cenários.....	59
4.1.2	Cenário para avaliação da rugosidade das tubulações	61
4.1.3	Cenário para avaliação do índice de vazamentos	63
4.1.4	Cenário para avaliação do crescimento populacional	65
4.1.5	Cenário para avaliação da deterioração das bombas	65
4.1.6	Cenário ideal e intermediário.....	67
4.2	ADOÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	68
4.3	ANÁLISE ECONÔMICA	69
4.3.1	Ferramentas para análise econômica	69
4.3.2	Custos das tarifas de energia elétrica	71
4.3.3	Custos das medidas de eficiência	72
4.4	ESTUDOS DE CASO.....	73
4.4.1	Rede Anytown	73
4.4.2	Rede D-Town	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1	REDE ANYTOWN	77
5.1.1	Rugosidade das tubulações	77
5.1.2	Quantidade de vazamentos.....	79
5.1.3	Demanda de consumo	81
5.1.4	Deterioração da bomba	82
5.1.5	Avaliação entre os cenários de referência.....	84
5.2	REDE D-TOWN	88
5.2.1	Rugosidade das tubulações	88
5.2.2	Quantidade de vazamentos.....	89
5.2.3	Demanda de consumo	90
5.2.4	Deterioração da bomba	91
5.2.5	Avaliação entre os cenários de referência.....	93
5.3	ADOÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	94

5.3.1	Medidas aplicadas ao percentual de vazamentos	94
5.3.2	Medidas aplicadas na rugosidade das tubulações	97
5.4	ANÁLISE ECONÔMICA DAS MEDIDAS DE EFICIÊNCIA	100
5.4.1	Redução dos vazamentos	100
5.4.2	Reabilitação das tubulações.....	104
6	CONCLUSÕES	106
7	RECOMENDAÇÕES.....	112
	REFERÊNCIAS.....	114
	ANEXO A - DADOS DAS REDES.....	122

1 INTRODUÇÃO

A água constitui para humanidade um bem de valor inestimável, sendo necessária para que se tenha segurança alimentar, saúde humana, produção de energia, crescimento econômico, além de praticamente todos os ecossistemas dependerem dela. Dados da UNESCO (2020), estimam que o consumo mundial de água cresceu em seis vezes nos últimos cem anos, e continua aumentando de forma constante a uma taxa aproximada de 1% ao ano, como resultado do crescimento populacional, do desenvolvimento econômico e das mudanças nos padrões de consumo. Além disso, na contramão da crescente demanda por água registra-se menor disponibilidade hídrica e aumento da geração de resíduos, que em grande parte contribuem com a poluição de mananciais.

O sistema de abastecimento de água (SAA), é uma das infraestruturas essenciais para atendimento ao saneamento básico e está intimamente ligado com o desenvolvimento socioeconômico dos países. São responsáveis pela captação de água dos mananciais, tratamento e a entrega final para os mais diversos tipos de consumidores.

Para realizar todo processo de gestão das águas, os SAA necessitam de quantidades significativas de energia elétrica. Em todo o mundo, estimasse que entre 2 e 7% da geração de energia elétrica é consumida com tratamento e distribuição de água, além do tratamento de efluentes (MEIRELLES; BRETAN, 2019; WAKEEL et al., 2016; YANG et al., 2010).

No Brasil, dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), apontam que as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento participantes do SNIS atingem 7,12 bilhões de reais, com consumo de 13,26 TWh de energia elétrica, compostos por 11,84 TWh com abastecimento de água e 1,42 TWh com esgotamento sanitário. Esse consumo representa 2,1% de toda eletricidade gerada no país (EPE, 2019).

Uma das partes integrantes de um SAA são as redes de distribuição de água (RDA). A RDA é constituída por tubulações e órgãos acessórios, destinados a servir água aos consumidores finais de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressões

adequadas (ABNT, 1992; HELLER; PÁDUA, 2006; TSUTIYA, 2006). Na maioria dos casos, a operação das RDA é realizada por meio da operação de motobombas em estações elevatórias, seja a distribuição feita de forma direta ou indireta, através da alimentação de um reservatório elevado. O consumo de energia elétrica das estações elevatórias de um SAA representa cerca de 95% do consumo total desses sistemas (CHIRIBOGA et al., 2018; LUNA et al., 2019). Durante muito tempo as RDA eram projetadas e operadas enfocadas somente no atendimento da demanda dos consumidores. Contudo, no atual contexto de sustentabilidade, o uso de água e energia elétrica, profundamente conectados entre si, requerem que sejam feitas ações de forma mais eficiente. Com efeito, nas últimas décadas diversas pesquisas foram elaboradas com enfoque na otimização desses sistemas em duas frentes principais: o dimensionamento ideal (MEIRELLES et al., 2019; MOOSAVIAN; KASAEI; ROODSARI, 2014; SARBU; OSTAFE, 2016); e a operação ideal (AL-ANI; HABIBI, 2012; BRENTAN et al., 2018; SKWORCOW et al., 2014).

Mesmo com muitas pesquisas abordando diferentes temáticas relacionadas às RDAs, poucas consideram os efeitos de processos lentos de deterioração da rede, que ocorrem ao longo de grandes períodos de tempo, como por exemplo, o aumento da rugosidade das tubulações. Tais efeitos podem alterar significativamente o desempenho das redes ao longo do tempo, chegando ao ponto de necessitarem de intervenções para garantia do atendimento da demanda aos consumidores.

Se tais efeitos ao longo da vida útil de uma RDA puderem ser estimados ainda na fase de concepção, alternativas construtivas ou a programação para implementação de medidas de eficiência energética no futuro podem ser elaboradas antes delas serem urgentemente necessárias. Além disso, os custos dessas medidas podem ser devidamente considerados nos valores dos investimentos realizados na construção ou ampliação de redes.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma estratégia, baseando-se em procedimentos da literatura, para avaliar os impactos nos custos e nas pressões operacionais, decorrentes da deterioração de RDA ao longo da sua vida útil. Entre os processos com alteração lenta foram considerados a alteração da rugosidade das tubulações, a alteração do volume de vazamentos, a alteração da demanda de água

pela população consumidora e a deterioração dos conjuntos motobomba. A metodologia proposta foi aplicada em dois estudos de caso, com redes utilizadas na literatura. Além disso, medidas de eficiência energéticas foram implementadas em um dos estudos de caso e a qualidade dessas medidas foram avaliadas por meio de análises econômicas baseadas em teorias da administração financeira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o impacto que alterações das características físicas e hidráulicas que ocorrem ao longo da vida útil de uma RDA, tais como a rugosidade das tubulações, a deterioração das bombas, o índice de vazamentos e o consumo de água, terão na eficiência operacional.

2.2 Objetivos específicos

Para a realização desta pesquisa elencam-se os seguintes objetivos específicos.

- Avaliar cenários nas redes estudadas, onde houveram apenas mudanças da rugosidade das tubulações, analisando o impacto decorrente de sua deterioração com o tempo;
- Avaliar cenários nas redes estudadas, onde são propostas alterações apenas no índice de vazamentos, analisando como o percentual desses pode alterar o regime operacional;
- Avaliar cenários nas redes estudadas, onde são propostas alterações no consumo de água, devido a taxa com que cresce a população consumidora;
- Avaliar cenários intermediários nas redes estudadas, onde é realizada a alteração dos três parâmetros analisados anteriormente de forma simultânea, comportamento que simula o envelhecimento próximo do real em uma RDA.
- Após a avaliação dos cenários, implementar medidas de eficiência energética na RDA, que visem trazer benefícios a operação da rede em termos de custos e dos parâmetros operacionais.
- Analisar o impacto econômico decorrente da implementação das medidas de eficiência energética na RDA analisando a sua viabilidade econômica ao longo de sua vida útil.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Projeto de redes de distribuição de água

A construção de RDA tem grande impacto orçamentário para as empresas de saneamento, representando o maior custo dentro da implantação de um sistema de abastecimento de água (MARCHIORI et al., 2017; TSUTIYA, 2006), o que torna a elaboração dos projetos de RDA relevante ponto de atenção e amplamente estudado pela comunidade científica.

Dos itens 3.1.1 à 3.1.3, são abordados importantes pontos para o projeto de RDA no que tange as características populacionais, dimensionamento da RDA e dimensionamento das estações elevatórias. Os pontos abordados são tratados em tópicos diferentes, mas estão todos conectados entre si nos projetos de RDA.

3.1.1 Características populacionais

Nos projetos para implantação, ou mais usualmente, ampliação das RDA, a caracterização e previsão de crescimento da população é essencial para a estimativa do consumo de água no horizonte de projeto. Entender o comportamento do crescimento populacional é importante, não somente para os projetos de SAA, mas para o planejamento futuro em diversos setores importantes da sociedade, como a saúde e a educação (BORGES et al., 2016; WILSON; REES, 2005).

O dimensionamento dos elementos de uma RDA é função das vazões de água consumida, que por sua vez dependem do tamanho da população e seus hábitos de consumo, além de outras demandas como as perdas (HELLER; PÁDUA, 2006; TSUTIYA, 2006).

A demanda máxima de água requerida por uma dada população é frequentemente formulada pela Equação 3.1, onde observa-se a proporcionalidade direta entre a população e seus hábitos de consumo com a vazão. Os hábitos de consumo da população são inseridos na formulação por meio do consumo médio per capita e pelos coeficientes do dia e da hora de maior consumo, k_1 e k_2 respectivamente.

$$Q_m = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot P \cdot q_m}{t} \quad (3.1)$$

Onde:

Q_m : Vazão de distribuição [l/s];

k_1 : Coeficiente do dia de maior consumo;

k_2 : Coeficiente da hora de maior consumo no dia de maior consumo;

P : População a ser abastecida [habitante];

q_m : Consumo per capita da população [l/habitante/dia]; e

t : Tempo [s].

Os estudos para entender como se altera a população de uma região são tarefas complexas. Diversas variáveis interferem nas estimativas demográficas e muitas delas são de difícil quantificação ou mesmo não podem ser quantificadas.

Para a realização de projeções populacionais em projetos de saneamento, diversos aspectos como censos demográficos, plano diretor da região, situação socioeconômica e dinâmica de uso e ocupação do solo devem ser observados. Inferidos os dados que julgam-se relevantes, projeções podem ser estimadas por meio de extrapolação de curvas em equações matemáticas (TSUTIYA, 2006).

Segundo BORGES et al., (2016), os métodos mais conhecidos para a elaboração de projeções populacionais de pequenas áreas são: i) Métodos de extrapolação de funções matemáticas; ii) modelos de repartição e correlação com base em variáveis sintomáticas; iii) AiBi (*Apportionment Method*); iv) Parâmetros demográficos para pequenas áreas; v) Relação de cortes de Duchesne; e vi) modelo dinâmico de projeção ProjPeq.

Para maiores dimensões a metodologia utilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Organização das Nações Unidas (ONU) para projeções populacionais é o método das componentes demográficas (BORGES et al., 2016; IBGE, 2018). Nesse método, a população é projetada para um dado período futuro como uma função da dinâmica das componentes demográficas, fecundidade, mortalidade e migração (IBGE, 2018).

Conforme IBGE, (2018), o método das componentes demográficas origina-se da equação compensadora ou equação de equilíbrio populacional, dada pela Equação (3.2) a seguir:

$$P_{(t+n)} = P_{(t)} + B_{(t,t+n)} - D_{(t,t+n)} + I_{(t,t+n)} - E_{(t,t+n)} \quad (3.2)$$

Onde:

$P_{(t+n)}$: População no ano $t+n$;

P_t : População no ano t ;

$B_{(t,t+n)}$: Nascimentos ocorridos entre t e $t+n$;

$D_{(t,t+n)}$: Óbitos ocorridos entre t e $t+n$;

$I_{(t,t+n)}$: Imigrantes entre t e $t+n$;

$E_{(t,t+n)}$: Emigrantes entre t e $t+n$;

t : Ano inicial; e

n : Tamanho do intervalo de anos.

Para a realização da estimativa mensal da população brasileira e das unidades da federação no período de 01/07/2010 a 01/07/2030, o IBGE, (2019) ajusta um polinômio de terceiro grau aos dados obtidos a partir do método das componentes demográficas, apresentado na Equação 3.3. Na expressão, os parâmetros de ajuste do polinômio são estimados pelo método dos mínimos quadrados.

$$Y = aX^3 + bX^2 + cX + d \quad (3.3)$$

Em que:

Y : População;

X : Ano; e

a, b, c, d : Parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados.

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros de ajuste da equação polinomial e o coeficiente de determinação (R^2), para estimativa da população do Brasil e de todas as unidades da federação.

Tabela 3.1 – Parâmetros estimados para o polinômio de 3º grau e os respectivos coeficientes de determinação para o Brasil e unidades da federação

Brasil e unidades da federação	Parâmetros				Coeficiente de determinação R ²
	a	b	b	d	
Brasil	0,0001590776	-0,0013425106	-0,3334176803	1,1700836056	0,9999516748
Rondônia	0,0000000475	-0,0000006262	-0,0000982999	1,0000505748	0,9999953276
Acre	0,0000000070	0,0000001015	-0,0000667644	1,0000328284	0,9999934909
Amazonas	0,0000000446	0,0000005450	-0,0003452688	1,0001823232	0,9999944834
Roraima	0,0000003253	-0,0000094284	-0,0000143275	1,0000043461	0,9949837894
Pará	0,0000000649	0,0000016724	-0,0005076343	1,0002402857	0,9999936884
Amapá	0,0000000089	0,0000001912	-0,0000873050	1,0000456321	0,9999924047
Tocantins	0,0000000256	-0,0000002560	-0,0000891273	1,0000413487	0,9999874994
Maranhão	0,0000000940	-0,0000013509	-0,0002026442	1,0000794224	0,9999536098
Piauí	0,0000000563	-0,0000008091	-0,0000416341	1,0000144714	0,9998351813
Ceará	0,0000002174	-0,0000035756	-0,0002792383	1,0001319923	0,9999871109
Rio G. do Norte	0,0000000355	0,0000005172	-0,0001593126	1,0000773066	0,9999946823
Paraíba	0,0000001406	-0,0000036873	-0,0000762154	1,0000382543	0,9998852059
Pernambuco	0,0000001426	-0,0000012950	-0,0003249912	1,0001620767	0,9999872292
Alagoas	0,0000000149	0,0000005532	-0,0000864194	1,0000369064	0,9999332410
Sergipe	0,0000000362	-0,0000001355	-0,0001089229	1,0000521668	0,9999935549
Bahia	0,0000002596	-0,0000018303	-0,0003449939	1,0001483620	0,9999502013
Minas Gerais	0,0000004335	-0,0000023355	-0,0007653779	1,0003835392	0,9999945519
Espírito Santo	0,0000000912	-0,0000009345	-0,0002386374	1,0001234431	0,9999955884
Rio de Janeiro	0,0000004282	-0,0000050792	-0,0005730430	1,0003154190	0,9999682730
São Paulo	0,0000008980	0,0000026048	-0,0026666686	1,0014005223	0,9999931671
Paraná	0,0000002542	-0,0000030202	-0,0004529155	1,0002431938	0,9999855304
Santa Catarina	0,0000002124	-0,0000029991	-0,0004559741	1,0002365136	0,9999933038
Rio G. do Sul	0,0000002092	-0,0000012674	-0,0002807289	1,0001652622	0,9999324090
Mato G. do Sul	0,0000000539	-0,0000004229	-0,0001610859	1,0000850325	0,9999932565
Mato Grosso	0,0000001052	-0,0000019466	-0,0002044823	1,0001138664	0,9999753351
Goiás	0,0000001445	0,0000001762	-0,0005370739	1,0002791894	0,9999946226
Distrito Federal	0,0000000688	-0,0000005433	-0,0002115007	1,0001086377	0,9999963972

Fonte: (IBGE, 2019, p. 5) adaptado.

A demanda de água requerida na RDA vai depender de diversas características da população abastecida. Tradicionalmente, os consumidores são divididos em domésticos, comerciais, públicos e industriais. No Brasil, para estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água, os consumidores a serem considerados devem compreender os estabelecimentos residenciais, industriais e públicos (ABNT, 1992).

Segundo a ONU, cada pessoa necessita de aproximadamente 110 litros de água diariamente para atender todas as necessidades de consumo e higiene. Entretanto, este consumo é bastante variável e depende de diversas características da população. Entre essas, DIAS; MARTINEZ; LIBÂNIO, (2010) destacam que as condições socioeconômicas são as de papel mais relevante.

Outras características associadas a demanda per capita dos consumidores domésticos, de acordo com REZENDE; ROLAND; RIBEIRO, (2015) são:

- Características físicas do ambiente, como temperatura e umidade do ar, intensidade e frequência de precipitações;
- Características do domicílio, como renda agregada, área do terreno, área construída do imóvel e número de habitantes;
- Características do abastecimento de água, extensão da rede, pressão na rede e qualidade da água;
- Características relacionadas à forma de gerenciamento do SAA, como tarifas e micromedição;
- E as características culturais da comunidade.

A nível mundial o consumo de água per capita apresenta variações da ordem de menos de 30 e mais de 500 litros/habitante/dia. Essa discrepância de valores corrobora a associação do consumo de água a questões socioeconômicas, pois os países mais desenvolvidos apresentam os maiores consumos.

Dados do (SNIS, 2019) apresentam o consumo médio per capita dos volumes utilizados para satisfazer as necessidades domésticas, comercial, público e industrial, para os estados brasileiros, por macrorregião e para todo o Brasil. Os valores são apresentados na Tabela 3.2 e referem-se aos anos de 2017 a 2019.

Tabela 3.2 – Valores do consumo médio per capita de água dos prestadores de serviços participantes do SNIS, em 2017, 2018 e 2019

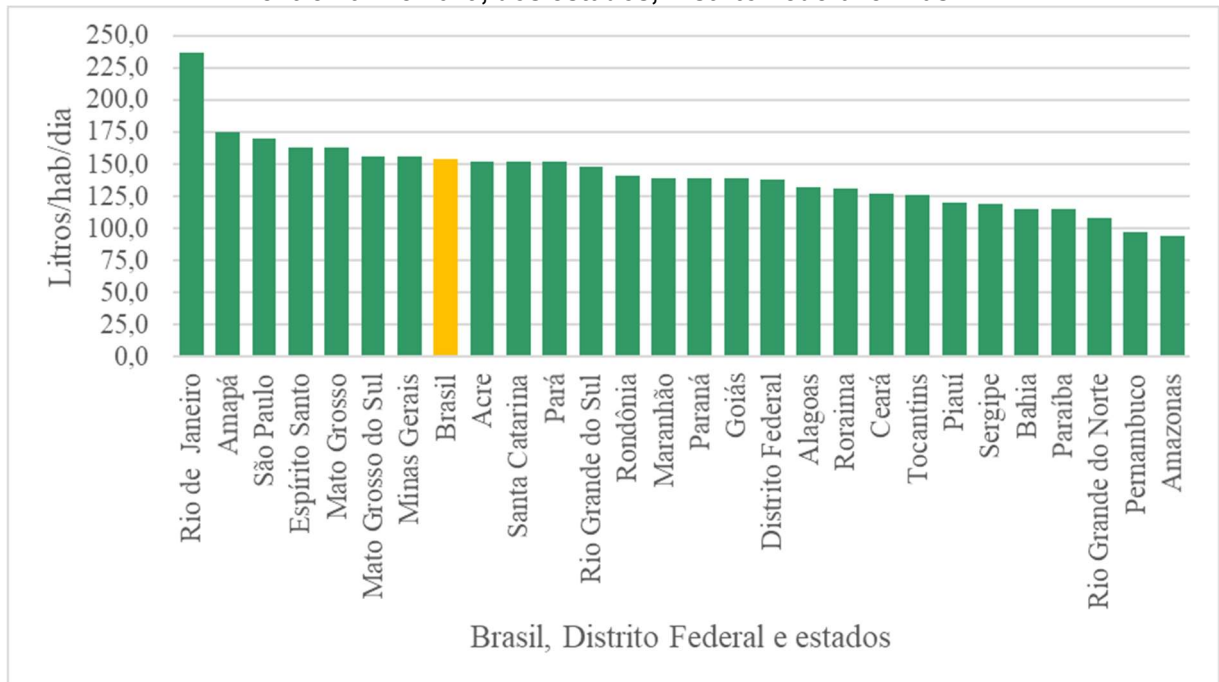
Estado/ Macrorregião	Anos (L/hab/dia)			Variação entre 2017 e 2019 (%)
	Ano 2017	Ano 2018	Ano 2019	
Acre	156,4	150,2	151,3	-3,3%
Amapá	183,9	178,6	164,2	-10,7%
Amazonas	95,7	92,1	94,8	-0,9%
Pará	154,2	153,9	148,5	-3,7%
Rondônia	138,6	140,2	143,6	3,6%
Roraima	132,7	132,1	130,2	-1,9%
Tocantins	128,9	124,5	126,3	-2,0%
Norte	132,3	131,8	129,1	-2,5%
Alagoas	95,8	143,0	158,4	65,4%
Bahia	115,6	115,6	115,4	-0,2%
Ceará	117,6	126,7	137,4	16,8%
Maranhão	141,3	136,5	140,9	-0,3%
Paraíba	116,3	115,3	113,4	-2,5%
Pernambuco	95,5	95,3	101,3	6,0%
Piauí	132,5	105,5	123,8	-6,6%
Rio Grande do Norte	112,0	108,1	103,5	-7,6%
Sergipe	111,9	112,3	132,9	18,7%
Nordeste	113,6	115,4	120,6	6,1%
Espírito Santo	156,5	160,6	173,2	10,7%
Minas Gerais	154,1	155,2	159,0	3,2%
Rio de Janeiro	249,7	254,9	207,0	17,1%
São Paulo	167,8	169,3	174,4	4,0%
Sudeste	180,3	182,6	177,4	-1,6%
Paraná	139,7	137,9	141,1	0,0%
Rio Grande do Sul	147,7	149,9	148,2	0,4%
Santa Catarina	151,0	154,0	152,3	0,9%
Sul	145,2	146,1	146,4	0,8%
Distrito Federal	132,4	135,2	145,9	10,2%
Goiás	142,0	139,2	135,0	-4,9%
Mato Grosso	160,4	161,2	168,7	5,1%
Mato Grosso do Sul	157,7	152,5	158,2	0,3%
Centro-Oeste	146,1	144,9	147,8	1,2%
Brasil	153,6	154,9	153,9	0,2%

Fonte: (SNIS, 2019) adaptado.

Em suma, o Brasil possui um consumo médio da ordem de 150 litros/habitante/dia, com estados como o Rio de Janeiro apresentando um consumo bastante superior à média nacional e estados como o Amazonas com valores bem abaixo. A Figura 3.1

resume a média do consumo per capita em ordem decrescente para todos os estados e Distrito Federal comparados ao Brasil, destacado na cor amarela. Vale ressaltar que os valores tabelados referem-se aos consumidores domésticos, comercial, público e industrial, pois mesmo em regiões com consumo de água per capita maiores que a recomendação da ONU (110 litros/hab/dia), existem pessoas vivendo em situações de extrema escassez hídrica.

Figura 3.1 – Consumo médio per capita dos prestadores de serviços participantes do SNIS, entre 2017 e 2019, dos estados, Distrito Federal e Brasil



Fonte: (SNIS, 2019) adaptado

Mesmo que o consumo de água per capita permaneça constante com o tempo, estimativas da ONU apontam para um crescimento populacional, o que reflete diretamente no consumo de água total no mundo.

Considerar a demanda futura de água é essencial nos projetos de RDA. Além disso, é necessário consultar o plano diretor da cidade para avaliar os mais prováveis cenários de expansão. Mesmo quando são consideradas as tendências de consumo e crescimento populacional, ainda é um parâmetro que apresenta incertezas e deve ser cuidadosamente analisado. A exemplo disso BABAYAN et al., (2005), utilizaram um algoritmo genético, tratando a demanda como um parâmetro incerto, para propor um projeto de menor custo de RDA. Posteriormente o método foi aplicado a dois estudos de casos com redes da literatura. Uma importante conclusão citada é que

negligenciar alguns cuidados na fase de projeto pode levar a um sério impacto no desempenho futuro das redes.

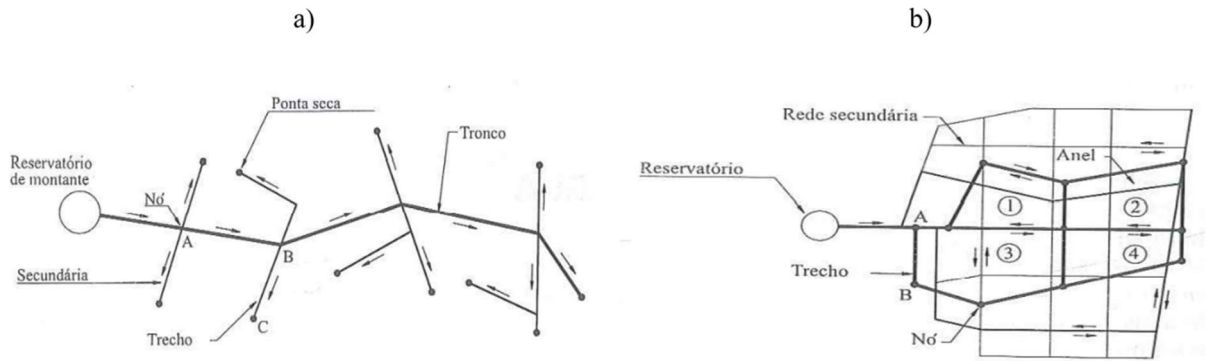
3.1.2 Dimensionamento da rede de distribuição

De forma bastante simplificada, o dimensionamento de uma RDA consiste da correta escolha das tubulações, órgãos acessórios e conjuntos motobomba, necessários para garantir o funcionamento da rede de modo a atender os consumidores finais com os padrões normativos de condições hidráulicas e de qualidade da água. Entretanto, devido a complexa relação envolvendo os parâmetros físicos e hidráulicos de uma rede, além do seu comportamento dinâmico, essa correta decisão não apresenta uma solução única e fácil de ser obtida. Além disso, do ponto de vista matemático, solucionar o problema hidráulico envolvendo as RDA consiste em resolver complexos sistemas de equações não lineares (SAVIC; WALTERS, 1997).

A concepção geométrica da RDA pode depender de diversos fatores tais como porte da cidade, questões viárias, topográficas, demanda, entre outros. De qualquer forma, elas sempre são constituídas por condutos que são classificados em principais e secundários. Os condutos principais possuem maiores diâmetros e tem basicamente a finalidade de abastecer os condutos secundários, que por sua vez possuem menores diâmetros e são responsáveis por abastecer diretamente os pontos de consumo. Em função da disposição dos condutos principais e secundários, as RDA podem ser classificadas em redes ramificadas e malhadas.

Conforme PORTO, (2006), a rede é classificada como ramificada quando o abastecimento é realizado a partir de uma tubulação principal, alimentada por um reservatório ou bomba de montante, que faz a distribuição para os condutos secundários e com o sentido da vazão sempre conhecido. Já as redes malhadas são constituídas por anéis formados pela rede principal, que alimentam a rede secundária e permitem a reversibilidade das vazões, ou seja, o sentido da vazão depende do consumo. A Figura 3.2 apresenta os dois tipos de redes.

Figura 3.2 – Exemplo de redes a) ramificada b) malhada.



Fonte: PORTO, (2006)

Independentemente do tipo de rede, ramificada ou malhada, o projeto deve sempre satisfazer algumas condições hidráulicas como pressões e velocidades, normalmente estabelecidas por agências reguladoras. Além disso, deve-se avaliar a eficiência de parâmetros importantes no dimensionamento como custos e resiliência do sistema.

A pressão na rede é uma importante condição hidráulica a ser respeitada. Em cada ponto de abastecimento a pressão deve apresentar valor suficiente para garantir o funcionamento de equipamentos hidráulicos (abastecimento direto) ou o abastecimento de reservatórios domiciliares (abastecimento indireto). Entretanto, não devem ser excessivamente altas para evitar perdas por vazamentos (ARAUJO; RAMOS; COELHO, 2006; CREACO; FRANCHINI, 2013) ou comprometer a integridade estrutural do sistema (JARA-ARRIAGADA; STOIANOV, 2021). No Brasil, a NBR 12218 estabelece que a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 50 mca, e a pressão dinâmica mínima de 10 mca. Devido a essas limitações de pressões, nas regiões em que a rede for construída com diferenças de elevação significativas, próximas de 50 metros, é conveniente a divisão em zonas de pressão e/ou utilizar válvulas reguladoras de pressão. Assim, tem-se melhor controle operacional das pressões na rede.

O equilíbrio entre a velocidade do escoamento e o diâmetro das tubulações é outro fator importante a ser analisado com impacto direto nos custos. Quando os valores de velocidade são excessivamente baixos, pode-se favorecer o depósito de materiais na tubulação, comprometendo a qualidade das águas. Por outro lado, se as velocidades são excessivamente altas, tem-se maior perda de carga por atrito nas tubulações que aumentam os custos de bombeamento, além de diminuir a vida útil da rede. A NBR

12218 estabelece limites superior e inferior para as velocidades, sendo respectivamente 3,5 m/s e 0,6 m/s. PORTO, (2006) apresenta a Equação 3.4 empírica, para encontrar a velocidade máxima admissível como função do diâmetro utilizado.

$$\begin{cases} V_{m\acute{a}x} = 0,60 + 1,5 \times D \\ V_{m\acute{a}x} \leq 2,00 \end{cases} \quad (3.4)$$

Em que:

$V_{m\acute{a}x}$: Velocidade máxima admissível [m/s]; e

D : Diâmetro da tubulação [m].

Devido aos grandes custos de construção envolvidos nas RDAs, somados a questões relacionadas a sustentabilidade desses sistemas e a evolução da computação, nas últimas décadas metodologias empregadas na construção das redes tiveram importantes avanços.

No passado, com o desenvolvimento das equações de Darcy-Weisbach em 1845, foi possível prever as perdas de carga nas tubulações. Com efeito, desenvolveu-se o primeiro método para dimensionamento de redes de abastecimento, onde os cálculos eram tratados de forma gráfica (RAMALINGAM; LINGIREDDY; ORMSBEE, 2002). O método consiste basicamente no desenvolvimento de curvas de vazão versus as perdas de carga nas tubulações.

Mais tarde CROSS (1936) desenvolveu uma metodologia, que inicialmente foi aplicada na análise de estruturas estaticamente determinadas, para resolver problemas de pressões e fluxos em redes de distribuição de água em circuitos fechados. Neste método são formuladas equações baseadas nos princípios da conservação de energia e da continuidade em cada um dos anéis que formam uma rede malhada, que em seguida são resolvidas por processos iterativos (PINTO; BAPTISTA, 2014).

Com a evolução da computação digital, HOAG; WEINBERG (1957) implementaram as técnicas propostas por CROSS (1936) em computadores, aplicando a metodologia

em uma rede de abastecimento de água na Califórnia (RAMALINGAM; LINGIREDDY; ORMSBEE, 2002).

Devido a limitações envolvendo o método de Hardy Cross para análise de sistemas maiores, e com o desenvolvimento de computadores com maior poder de cálculo, novas abordagens para solução do equacionamento das redes e metodologias para otimizar o seu dimensionamento foram propostas (RAMALINGAM; LINGIREDDY; ORMSBEE, 2002). Dentre essas, destacam-se o método linear e o método gradiente, esse último implementado no *software* de simulação hidráulica Epanet (ROSSMAN, 2000), frequentemente utilizado pela comunidade científica.

Com a crescente necessidade de serem cada vez mais eficientes, diversas propostas para otimização de RDAs foram avaliadas pela comunidade científica. Dentre os métodos empregados incluem-se técnicas de programação linear, programação não linear, programação dinâmica, análises multiobjetivo e algoritmos meta-heurísticos (BRENTAN et al., 2018; GUPTA; GUPTA; KHANNA, 1999; MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017; MEIRELLES et al., 2019; SARBU; OSTAFE, 2016; VAKILIFARD et al., 2018).

GUPTA; GUPTA; KHANNA, (1999) utilizaram um algoritmo meta-heurístico genético para abordar o projeto ideal de RDA comparando-a com uma técnica de programação não linear. As técnicas foram aplicadas a duas redes e o algoritmo genético apresentou melhor aplicabilidade em vista dos resultados observados.

FARMANI; WALTERS; SAVIC, (2006) aplicaram algoritmos meta-heurísticos de otimização multiobjetivo para o projeto e operação de uma rede *benchmark*, com enfoque na minimização dos custos totais, maximização da resiliência e minimização da idade máxima da água. Observaram que os resultados apresentaram uma rede com boa confiabilidade e qualidade da água, sem custos extras se comparado a outros métodos aplicados na rede estudada.

MOOSAVIAN; KASAEI ROODSARI, (2014) implementaram um algoritmo meta-heurístico evolutivo intitulado “*Soccer League Competition (SLC)*” para abordar o problema do dimensionamento otimizado de três RDA disponíveis na literatura. O

enfoque da otimização foi na minimização dos custos por meio da escolha do diâmetro dos tubos.

MEIRELLES et al., (2019) realizaram uma análise multicriterial para dimensionamento de uma RDA na qual utilizam não somente os custos como referência no processo de dimensionamento, mas outros indicadores importantes como resiliência do sistema e a satisfação da população, itens pouco contemplados em técnicas de otimização.

Outra metodologia considerada para dimensionamento de RDA consiste em aproveitar a topografia de regiões com diferenças de cotas significativas, para o estabelecimento de pontos nos quais é possível a geração de energia elétrica utilizando-se turbinas ou bombas adaptadas como turbinas em substituição as válvulas redutoras de pressão (VRP). Nesse caso, mesmo com a necessidade de um maior investimentos inicial para estruturação de todo aparato para geração, estudos mostram a viabilidade técnica e econômica desta alternativa, tornando a RDA mais eficiente (MEIRELLES; BRENTAN; LUVIZOTTO JR, 2018; VILANOVA; BALESTIERI, 2014).

O projeto adequado de uma RDA pode reduzir consideravelmente os custos de implantação (BABAYAN et al., 2007), por isso diversas são as metodologias adotadas no seu dimensionamento. Além disso, ressalta-se que a construção está intimamente relacionada com a forma de operação. A presença de reservatórios intermediários por exemplo, pode requerer um custo inicial na implantação, mas posteriormente ser compensando pelo regime operacional.

Um importante ponto e pouco considerado na literatura, são os efeitos futuros do envelhecimento da rede para dimensionamento presente. Com o decorrer de grandes períodos de tempo (anos), parâmetros como a rugosidade das tubulações, demanda de água, vazamentos e desempenho de conjuntos motobomba, podem ser alterados de forma significativa. Apesar de serem parâmetros de difícil estimativa futura, com dependência de inúmeros fatores, considerá-los no presente pode trazer benefícios ao longo da vida útil da rede.

Alguns autores tratam esses parâmetros futuros como incertezas em métodos de otimização para dimensionamento das RDA. BABAYAN et al., (2007) consideraram

duas formas para lidar com esses parâmetros tratando-os como incertezas futuras. A primeira considera uma “margem de segurança” para todos os parâmetros definidos como incertos para em seguida resolver o problema de otimização. A outra forma é inserir as incertezas dos parâmetros considerados diretamente na formulação do problema. Nas duas formas de lidar com o problema foi utilizado o algoritmo genético.

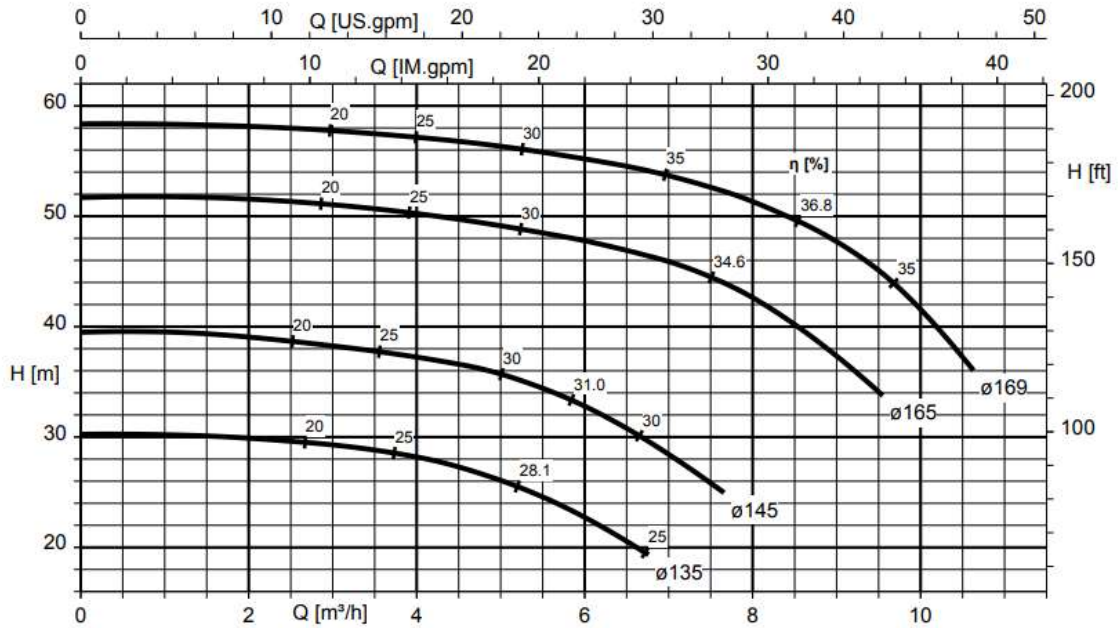
SEIFOLLAHI-AGHMIUNI et al., (2013) determinaram os efeitos qualitativos e quantitativos das incertezas relacionadas a rugosidade das tubulações independente das incertezas relacionadas as demandas nodais. Em seguida desenvolveram um modelo de otimização para análise hidráulica de uma rede sob várias combinações de valores de coeficientes de rugosidade das tubulações.

Mesmo com todos os avanços para consideração de parâmetros diversos, sejam incertos ou não, no dimensionamento das RDA, essa tarefa ainda é bastante complexa e campo de estudo para diversas pesquisas.

3.1.3 Dimensionamento das estações elevatórias

As bombas ou conjuntos motobomba presentes nas estações elevatórias possuem diversas características associadas a sua concepção que estão relacionadas com o seu funcionamento, tais como o tipo de bomba, tipo de rotor, o tamanho de ambos entre outras. Para a utilização adequada desses equipamentos é necessário conhecer as suas características de desempenho operacional que são representadas por relações funcionais. Essas relações são feitas entre a altura manométrica, a potência, a eficiência (ou rendimento), o NPSH (*Net Positive Suction Head*) requerido pela máquina e a vazão, e são conhecidas como curvas características (CALGARO; ROBAINA; PEITER, 2004; PORTO, 2006). A Figura 3.3 apresenta um exemplo de curvas características (Q, H), de uma bomba centrífuga para alguns tamanhos de rotores.

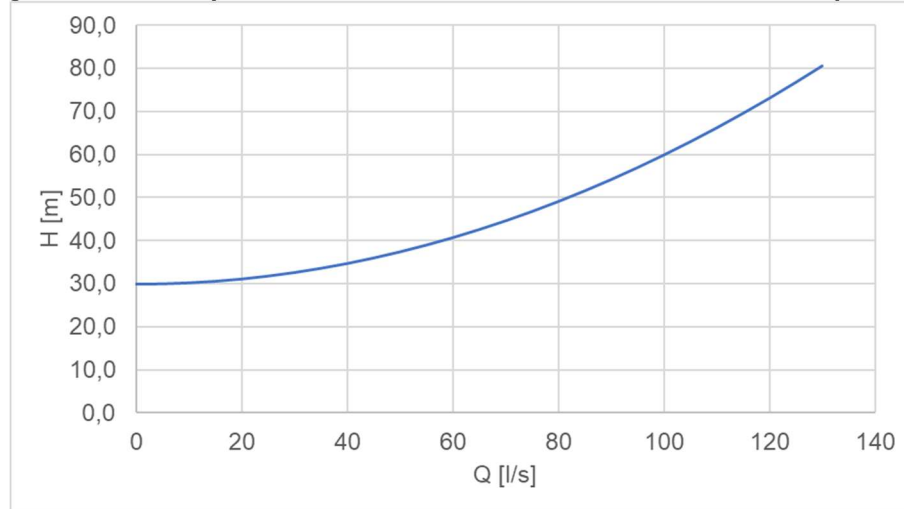
Figura 3.3 – Curvas características vazão x altura manométrica, para 4 tamanhos de rotores em uma mesma bomba centrífuga



Fonte: (KSB, 2022)

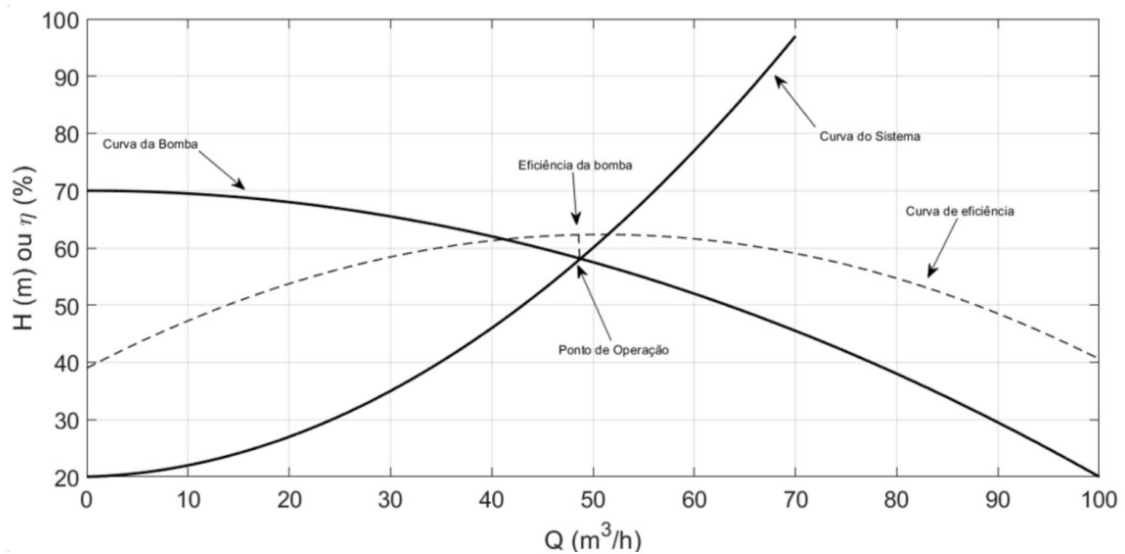
A rede ou sistema onde uma dada bomba esteja operando irá fornecer uma certa resistência ao escoamento devido as diferenças de elevação (altura geométrica), mais as perdas de carga localizadas e distribuídas. É possível demonstrar que numa instalação onde se conheçam as características do sistema responsáveis por essa resistência ao escoamento, pode-se relacionar a altura manométrica requerida pelo sistema com dependência somente da vazão. O gráfico que relaciona essas duas características é chamado de curva característica do sistema (PINTO; BAPTISTA, 2014). A Figura 3.4 apresenta um exemplo de curva característica de um sistema hipotético

Figura 3.4 – Exemplo de uma curva característica de um sistema hipotético.



A interseção da curva característica do sistema com a curva característica da bomba constitui o ponto ideal de operação desta bomba neste sistema, representado na Figura 3.5. Nessa interseção das curvas a bomba opera em seu ponto de melhor eficiência (*Best Efficiency Point – BEP*), em outras palavras o melhor rendimento possível para essa bomba neste sistema será observado neste ponto.

Figura 3.5 – Identificação do ponto de operação ideal de uma bomba num dado sistema



Fonte: (MEIRELLES; BRETAN, 2019)

Observa-se no entanto, que a operação nesse ponto é possível, mas incomum. Isso se deve ao fato que as RDA são dinâmicas e apresentam constantemente mudanças na sua curva característica devido a alterações na perda de carga. Essas mudanças na perda de carga podem acontecer em consequência de alterações de curto prazo,

como variação sazonais da demanda e manobras de válvulas, e/ou alterações de longo prazo, como aumento da rugosidade e volume de vazamentos da rede.

Além das mudanças ocorridas na rede, alterações nas bombas como a sua deterioração, também alteram a sua curva característica, o que vai impactar diretamente no seu desempenho. Diversos fatores, tais como cavitação, corrosão, incrustações, desalinhamentos e vibrações excessivas, podem interferir nesse processo de deterioração. Por exemplo, DE LIMA; DOS SANTOS; BRAGA, (2015) compararam a situação de sistemas operando com e sem indução de cavitação, utilizando-se dois arranjos diferentes para conjuntos motobomba operando em laboratório. A indução da cavitação causou reduções no rendimento do conjunto da ordem de 20%. RICHARDSON; HODKIEWICZ, (2011) sugerem uma metodologia para estimar a diminuição da altura manométrica da bomba em função de folgas e aumento da rugosidade interna com o tempo. A medida em que é alterada a altura manométrica da bomba sua curva característica também é deslocada.

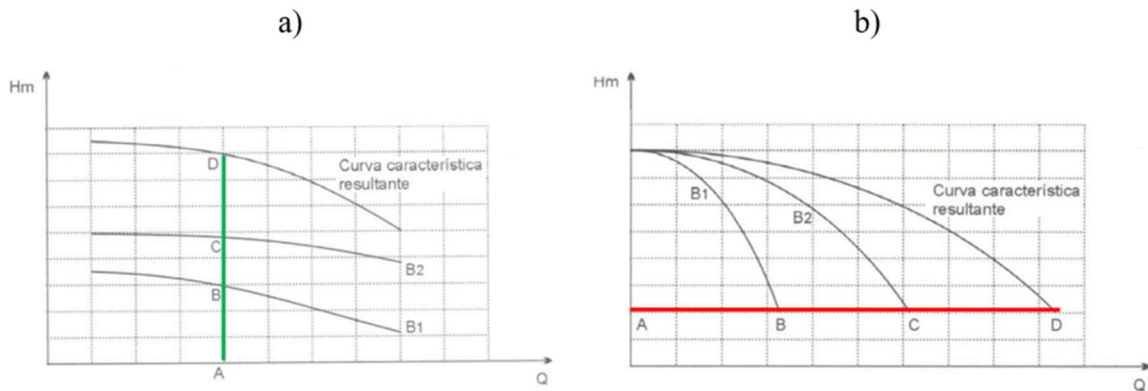
Visto a importância e o comportamento das curvas, pode se dizer de modo geral que, as estações elevatórias são dimensionadas a partir da curva de perda de carga do sistema. Com essa informação, as bombas das estações elevatórias são selecionadas de tal forma que o ponto de operação da estação elevatória esteja o mais próximo possível do ponto de melhor eficiência das bombas, o BEP (LIMA; BRETAN, 2019).

Como visto, para que se opere as estações elevatórias próximas ao BEP das bombas, é necessário que se conheçam as características físicas e hidráulicas da RDA, além do próprio conjunto motobomba. Para HELLER; PÁDUA, (2006), no dimensionamento de motobombas, os parâmetros hidráulicos mais importantes são: vazão, altura manométrica, potência e rendimento.

Para que se mantenha a operação das estações elevatórias próxima do melhor ponto de operação, mesmo com as mudanças ocorridas na rede, além de selecionar as bombas corretamente, algumas estratégias podem ser adotadas, como associação de bombas em série/paralelo e/ou a utilização de equipamentos que possibilitem o ajuste de velocidade da bomba (MÓLLER et al., 2020; OLSZEWSKI, 2016).

A associação em série consiste na conexão de bombas numa mesma linha de tal forma que o recalque da primeira bomba torna-se a sucção da segunda. Nesse tipo de associação a vazão recalçada pelas duas bombas permanece a mesma de uma única, entretanto a altura manométrica atingida é igual a soma das duas bombas associadas. Já na associação em paralelo cada bomba tem a sua própria sucção, mas recalcam para uma tubulação em comum. Nessa associação a altura manométrica das duas bombas permanece a mesma de uma única, entretanto a vazão recalçada é igual a soma das duas bombas. Em termos gerais, somam-se as alturas manométricas na associação em série e as vazões na associação em paralelo, como pode ser visto graficamente na Figura 3.6, onde são mostradas as curvas características para duas bombas B1 e B2 quaisquer.

Figura 3.6 – Associação de bombas em a) série b) paralelo



Fonte: (SOARES, 2022)

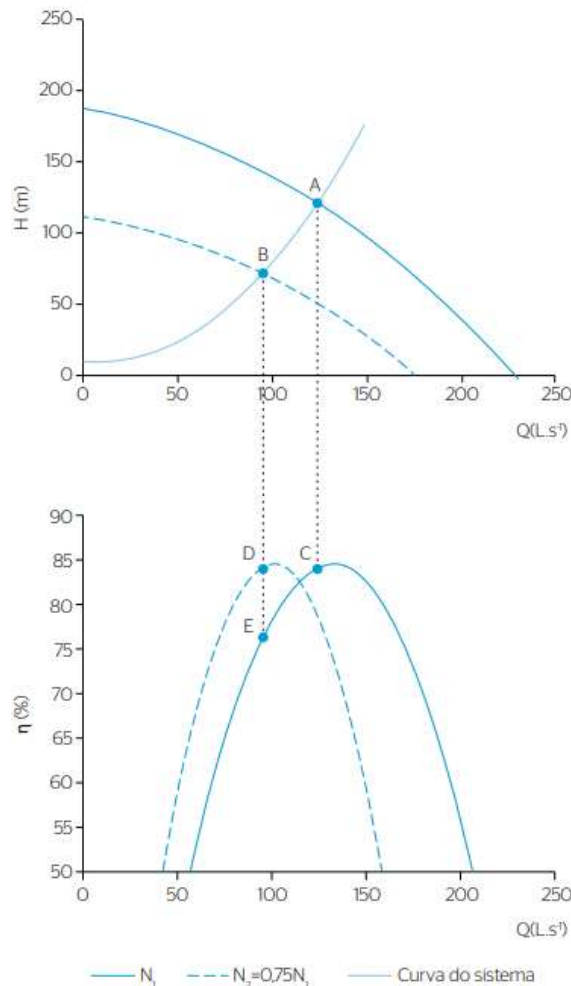
Utilizando-se a associação das bombas, elas podem ser ligadas e desligadas em função da demanda da rede para variações sazonais e diárias. Além disso, na construção de estações elevatórias, o projeto da RDA deve atender as demandas durante toda vida útil da rede, entretanto é antieconômico dimensionar as bombas para as vazões máximas do final de projeto. Assim, também recorre-se a associação de bombas ao longo do tempo, para garantir o atendimento da demanda a medida em que ela aumenta.

O uso de inversores de frequência para alteração da velocidade de rotação das bombas é outra estratégia adotada para alterar o ponto operacional das estações elevatórias em função da demanda da rede. Conforme citado por (COUTINHO; SOARES, 2017), a operação da bomba em diferentes velocidades de rotação resulta

em alterações em suas curvas características e, conseqüentemente, em seu desempenho. O seu uso permite que a curva da bomba possa se ajustar mais eficientemente a curva do sistema, mantendo as pressões e vazões mais próximas dos níveis mínimos exigidos, o que representa um grande potencial para economia de energia (WU et al., 2012).

A Figura 3.7 apresenta uma representação gráfica por meio das curvas características vazão x altura manométrica e vazão x rendimento, do principal benefício envolvendo o uso de bombas com rotação variável. A alteração da curva da bomba possibilita um melhor ajuste a curva do sistema, o que mantém a operação mais próxima do ponto de melhor eficiência.

Figura 3.7 – Curvas características da bomba para duas diferentes velocidades



Fonte: (COUTINHO; SOARES, 2017)

Mesmo com os benefícios do uso de bombas com rotação variável, ressalta-se que a implantação dos equipamentos requerem análise prévia de viabilidade econômica,

uma vez que os custos de implantação e posteriormente manutenção são maiores em relação a sistemas liga/desliga (COUTINHO; SOARES, 2017).

Uma outra forma de controle aplicado as bombas de uma estação elevatória consiste no manuseio de válvulas na sua desgarga. É uma prática muito comum segundo NETTO, (2018), mas mesmo que o controle funcione, é um modo muito ineficiente do ponto de vista energético, pois é inserida propositalmente uma perda de carga no sistema causando desperdício de energia.

Visto que a seleção das bombas em uma estação elevatória está estreitamente ligada com as características da RDA, além da sua forma de operação, os procedimentos para dimensionamento das estações elevatórias são formulados pela comunidade científica como problemas de otimização. São selecionados conjuntos motobomba que melhor se adequem a um dado sistema, objetivando o encontro de pontos ótimos, em geral relacionados a custos.

MÓLLER et al., (2020) utilizaram o algoritmo meta-heurístico *Particle Swarm Optimization* (PSO) para otimizar os custos de seleção de bombas, considerando a associação de bombas em paralelo e o uso de rotação variável. Seus resultados mostraram grandes impactos nos custos com o uso de rotação variável.

(KOOR; VASSILJEV; KOPPEL, 2014) implementaram um algoritmo para otimizar a operação de uma estação elevatória equipada com bombas centrífugas idênticas funcionando em paralelo. O algoritmo previa a realização de partidas e paradas das bombas com base na pressão e demanda da rede, otimizando os custos de operação. A metodologia foi utilizada em um estudo de caso no qual evidenciou melhorias na eficiência operacional.

3.2 Operação de redes de distribuição de água

A operação das RDA é fundamentalmente realizada por meio do controle de funcionamento de bombas e válvulas que, em função da demanda da rede, são manipuladas para o seu atendimento.

O desenvolvimento de melhores regras operacionais para bombas e válvulas pode trazer melhorias significativas para a eficiência hidroenergética dos SAA (BRENTAN

et al., 2018; SAVIC; WALTERS; SCHWAB, 1997; SKWORCOW et al., 2014). Entretanto, devido a dinamicidade do seu funcionamento, a decisão sobre o estado ideal de bombas e válvulas a cada instante é em geral uma tarefa complexa (ODAN, 2013).

Desde a década de 1970, pesquisadores abordam a otimização operacional de RDAs com enfoque em duas principais áreas, a operação ideal de bombas e otimização da qualidade da água (JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017). Os procedimentos de otimização operacional visam principalmente a operação ideal de sistemas de bombeamento, uma vez que os custos de funcionamento constituem um dos principais gastos das empresas de saneamento, sendo o segundo ou terceiro item mais importante no orçamento (PEREIRA; CONDURÚ, 2014; TSUTIYA, 2006)

Contudo, mesmo com o enfoque da literatura abordando principalmente a operação de bombas, frisa-se que a operação ideal pode ser aplicada também às VRP, que, se bem operadas, permitem a redução da perda de água por meio do gerenciamento da pressão (BRENTAN et al., 2018). Além disso, outras medidas como a setorização da RDA, pode permitir a aplicação de regras específicas de operação em determinados locais, o que pode trazer melhorias na eficiência energética da rede (CAMPBELL et al., 2016).

3.2.1 Operação das estações elevatórias

A operação das estações elevatórias está associada aos processos de ligamento/desligamento de conjuntos motobomba ou a variação de suas velocidades, nos casos em que se tem instalado inversores de frequência. Isso é realizado para que o ponto operacional da estação elevatória seja o mais próximo do ideal e minimize os custos de operação.

Os custos decorrentes do processo operacional compreendem valores de consumo de energia elétrica devido ao seu funcionamento juntamente com os valores de sua manutenção. Custos de funcionamento são computados em relação a cobrança de tarifa de energia elétrica. Já os custos de manutenção são mais difíceis de quantificar, e normalmente são incluídos usando uma medida indireta, como o número de

interrupções do funcionamento da bomba (JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017).

A maior parte da energia elétrica consumida pelos SAA está associada ao funcionamento de estações elevatórias, transformando a energia elétrica em energia hidráulica (MEIRELLES; BRENTAN, 2019). Devido a relevância dos valores para as empresas de saneamento, a operação ideal de bombas é frequentemente formulada como um problema de otimização de custos (AL-ANI; HABIBI, 2012; SAVIC; WALTERS; SCHWAB, 1997).

Otimizar o funcionamento da estação elevatória ou os custos decorrentes de sua operação consiste basicamente em operar bombas o mais próximo possível do seu BEP e/ou em quantidade e horários adequados. Entretanto, esse estado ideal de funcionamento é complexo de ser obtido, pois depende de diversos fatores da rede, os quais podem variar no tempo (ODAN, 2013).

Para se aproximar desses estados ideais de operação, a literatura tem realizado uma abordagem matemática desde a década de 1990 (JOWITT; XU, 1990; JOWITT; GERMANOPOULOS, 1992). Segundo LIMA; BRENTAN, (2019), o principal mecanismo por trás dessa abordagem está na minimização dos custos que pode ser descrito conforme a Equação 3.5.

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{Q_{i,t} \times H_{i,t} \times \gamma}{\eta_{i,t}} \times c_t \times \Delta t \quad (3.5)$$

Onde:

C : Custos totais com o bombeamento [R\$];

N : Número de bombas em operação;

T : Tempo de operação [h];

$Q_{i,t}$: Vazão bombeada pela bomba i no passo de tempo t [m³/s];

$H_{i,t}$: Carga inserida no sistema pela bomba i no passo de tempo t [m];

γ : Peso específico da água [N/m³];

$\eta_{i,t}$: Rendimento do conjunto motobomba i no passo de tempo t ;

c_t : Custo da energia no passo de tempo t [R\$/Kwh];

Δt : Passo de tempo;

Partindo do princípio da Equação 3.5 e estabelecendo certas restrições operacionais da rede, como pressões nos nós de consumo, níveis em tanques e o número de interrupções de funcionamento dos equipamentos, algumas técnicas são propostas pela literatura para a otimização da operação. Entre essas citam-se programação linear (JOWITT; GERMANOPOULOS, 1992); programação dinâmica (ZHUAN; XIA, 2013); e algoritmos meta-heurísticos, como o algoritmo genético (*Genetic Algorithm – GA*) (OLSZEWSKI, 2016), e a Otimização de Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization – PSO*) (ZHAO; FENG, 2019).

Estabelecer rotinas operacionais nas quais as bombas funcionem o menor tempo possível ou em menor quantidade durante os horários de ponta é uma alternativa de otimização da operação. Entretanto, para que isso possa ser viabilizado, a RDA deve contar com um sistema de reservação suficiente para acumular água nos períodos de bombeamento fora do horário de ponta, e posteriormente suprir a demanda por meio de escoamento gravitacional nos horários de ponta. Essa metodologia também é investigada pela literatura em processos de otimização.

BOULOS et al., (2001) propuseram um modelo para operação ideal de bombas empregando a técnica de algoritmos genéticos, com o objetivo de minimizar os custos decorrentes de sua operação. O modelo foi testado em RDA reais, com resultados satisfatórios, onde os custos operacionais eram reduzidos mantendo-se o desempenho hidráulico da rede.

MOHAMMADZADE NEGHARCHI et al., (2016), consideraram três métodos de otimização em seu estudo de caso numa estação elevatória do Irã, onde avaliaram o uso de bombas com rotações variáveis, a seleção de um arranjo apropriado e a operação reduzida fora dos horários de pico. Em seus resultados verificaram que com as medidas implementadas de forma adequada, é possível atingir reduções de até 36% dos custos operacionais.

3.2.2 Indicadores de desempenho

Diversas definições são atribuídas aos indicadores de desempenho pela literatura. ALEGRE, (1999) diz que são medidas de eficiência e da eficácia que referem-se as atividades desenvolvidas ou do comportamento de um dado sistema. Para POPOVA; SHARPANSKYKH, (2010), são indicadores quantitativos ou qualitativos que refletem o status e o progresso de uma empresa, unidade ou indivíduo. Em suma, pode-se resumir como um conjunto de informações que entidades gestoras utilizam para avaliar sua performance no âmbito da execução de suas atividades.

O uso de indicadores de desempenho é imprescindível na avaliação de SAA, pois esses permitem a identificação de problemas e posteriormente a adoção de medidas corretivas, além de auxiliarem em tomadas de decisão para formulação de ações, políticas e estratégias mais eficientes (BEZERRA; PERTEL; MACÊDO, 2019).

No que tange as agências reguladoras, os indicadores de desempenho podem ser ferramentas úteis para dispor de parâmetros de comparação entre a performance dos regulados, possibilitando a identificação de áreas de melhorias bem como a formulação de políticas para o setor (HAMDAN, 2016).

Os indicadores de eficiência energética mais usuais nos SAA, normalmente, são os de custo unitário da energia adquirida da concessionária (custo específico - R\$/kWh) e os que relacionam a energia consumida com o volume de água bombeado (consumo específico – kWh/m³) (ELETROBRÁS, 2005). Para (VILANOVA, 2012), entre os indicadores operacionais associados a eficiência energética, destacam-se: índice de perdas no faturamento, índice de perdas na distribuição, índice bruto de perdas lineares e o índice de perdas por ligação.

A publicação de ALEGRE et al., (2004) na *International Water Association (IWA)*, é considerada uma das principais referências internacionais em termos de indicadores de desempenho nos SAA (VILANOVA, 2012). Neste, os indicadores de desempenho em SAA podem ser divididos nos seguintes grupos: recursos hídricos, recursos humanos, infra-estruturais, operacionais, qualidade de serviço e econômico-financeiros. Do ponto de vista operacional, os indicadores de desempenho podem ser subdivididos em: inspeção e manutenção de infraestruturas, reabilitação de condutos,

válvulas e ramais, reabilitação de conjuntos motobombas, perdas de água, avarias, medição de vazão e monitorização da qualidade da água tratada.

O subgrupo “Bombeamento” do sistema IWA abrange os indicadores energéticos, sendo eles Ph4, Ph5, Ph6 e Ph7 (ALEGRE et al., 2004; VILANOVA, 2012):

Ph4 - utilização da capacidade de bombeamento (%) - Indica a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético, dado pela Equação 3.6.

$$Ph4 = \frac{D2}{(C7 \times 24)} \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

D2: Consumo de energia máximo diário para bombeamento [kWh]; e

C7: Capacidade máxima de bombeamento das estações elevatórias [kW];

Ph5 - Consumo de energia normalizado [kWh/m³ × 100 m] – Indica o consumo energético para o bombeamento de 1m³ a cada 100 m de altura, dado pela Equação 3.7.

$$Ph5 = \frac{D1}{D3} \quad (3.7)$$

Onde:

D1: Consumo de energia para bombeamento [kWh]; e

D3: Fator de uniformização [m³.100 m];

Ph6 - Consumo de energia reativa [%] – Indica o percentual de energia reativa consumida para bombeamento em relação ao consumo de energia

total, dado pela Equação 3.8.

$$Ph6 = \frac{D4}{D1} \times 100 \quad (3.8)$$

Onde:

D1: Consumo de energia para bombeamento [kWh]; e

D4: Consumo de energia reativa [kVarh];

Ph7 – Percentual de Recuperação de energia [%] – Indica o percentual de energia recuperado no sistema por meio de turbinas ou bombas funcionando como turbinas, dado pela Equação 3.9.

$$Ph7 = \frac{D5}{D1} \times 100 \quad (3.9)$$

Onde:

D5: Recuperação de energia [Wh]; e

D1: Consumo de energia para bombeamento [kWh];

Os dados do SNIS podem dar origem a uma diversidade de indicadores. Entretanto, segundo (VILANOVA, 2012), o único indicador relacionado diretamente à eficiência energética de SAAs é o índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (IN058), definido como o consumo total de energia elétrica (AG028), dividido pela soma do volume de água produzido (AG006) e importado (AG018) (SNIS, 2019), dado conforme Equação 3.10.

$$IN058 = \frac{AG028}{AG006 + AG018} \quad (3.10)$$

Este índice, por si só, não indica a eficiência energética do sistema, uma vez que outras condições devem ser avaliadas em conjunto. Ainda assim, é um importante parâmetro para a avaliação do histórico individual de um sistema específico, podendo trazer informações acerca da evolução de seu desempenho energético.

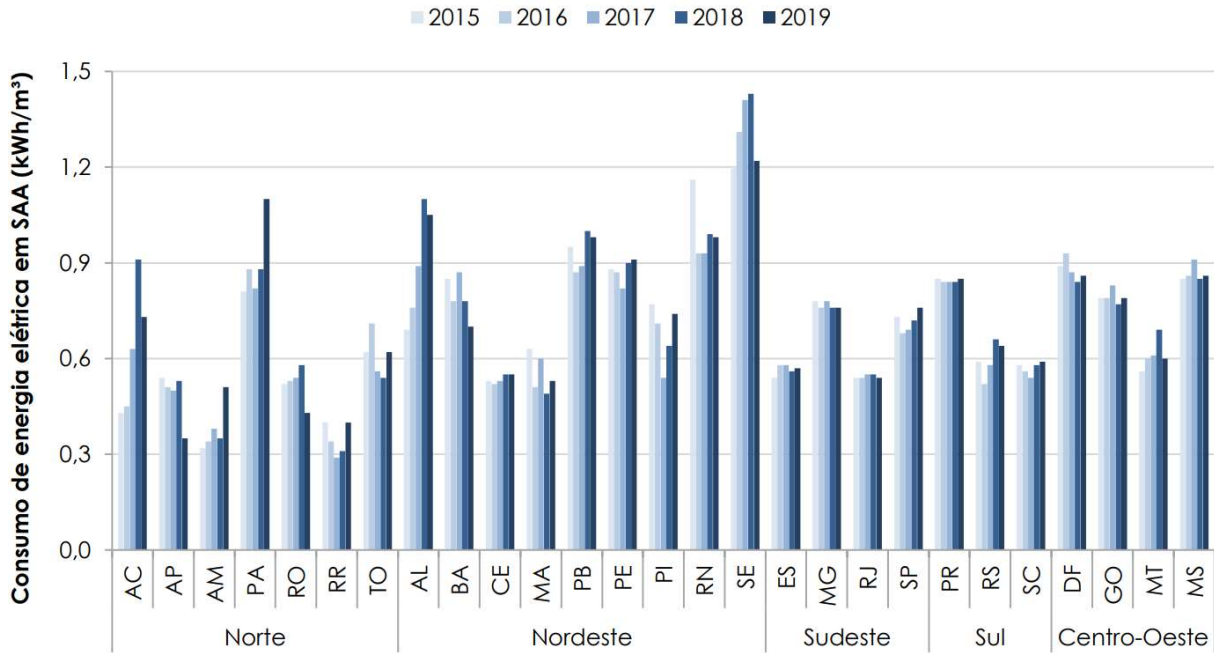
A Figura 3.8, apresenta o histórico de 2015 a 2019 do desempenho dos estados brasileiros relativos ao índice IN058 nos SAA. Para compreender o desempenho no índice alguns pontos devem ser esclarecidos. Segundo (SNIS, 2019), consideram-se tendências de melhoria ou agravamento claras, quando nos últimos 5 anos apresentam-se, respectivamente, consecutivas reduções ou aumento do índice. Se os valores anuais oscilam no máximo até 2,5%, para mais ou para menos, em torno

da média dos 5 anos, tem-se um estado de estabilidade clara. Quando não se observa um cenário de estabilidade, melhoria ou agravamento nos últimos 5 anos temos um cenário irregular. Para avaliação dos cenários irregulares calcula-se a média dos últimos 3 anos e compara-se com a média dos primeiros 3 anos. Se a relação entre as médias estiver dentro do percentual de 2,5% para mais ou menos, considera-se um estado de estabilidade irregular. Caso a média dos últimos 3 anos seja 2,5% maior que a média dos 3 primeiros anos, há um cenário de agravamento irregular, do contrário, se a média dos últimos 3 anos for 2,5% menor que a média dos últimos 3 anos, há um cenário de melhoria irregular.

Com essas informações e analisando os resultados da Figura 3.8 podemos realizar as seguintes considerações:

- Nas macrorregiões norte e nordeste, nenhum dos estados apresenta tendências claras de melhoria, agravamento ou estabilidade. Todos apresentam tendências irregulares com exceção da Bahia, Maranhão e Paraíba que não permitem o enquadramento em nenhuma das situações descritas.
- No Sudeste, os estados do Espírito Santo e São Paulo apresentam estabilidade irregular, enquanto o Rio de Janeiro e Minas Gerais apresentam tendência de estabilidade clara.
- No Sul, o estado do Rio Grande do Sul apresenta agravamento irregular, enquanto Santa Catarina apresenta estabilidade irregular e o Paraná tem o cenário de estabilidade clara.
- No Centro-Oeste, há agravamento irregular no estado de Mato Grosso. O Distrito Federal e os estados de Goiás e Mato Grosso do Sul apresentam estabilidade irregular.

Figura 3.8 – Consumo de energia elétrica nos SAA dos prestadores de serviços participantes do SNIS, por estado, de 2015 a 2019



Fonte: (SNIS, 2019)

Para ANDRADE; BORJA, (2016), a perda de água é um dos principais indicadores de desempenho operacional de SAA, presente desde a captação de água bruta até a distribuição de água tratada. Além do gasto desnecessário para o tratamento deste volume de água perdido, as perdas também afetam o consumo de energia das estações elevatórias, uma vez que a vazão bombeada deverá ser maior para suprir as perdas. O sistema da IWA também apresenta indicadores que se referem as perdas. Entre eles citam-se Op23, Op24 e Op27 por exemplo.

Op23 - Perdas de água por ramal [m^3 /ramal/ano] – Indica o volume de água perdida por ramal durante o período de um ano, dado pela Equação 3.11.

$$Op23 = \frac{(A15 \times 365)/H1}{C24} \quad (3.11)$$

Onde:

A15: Perdas de água [m^3];

C24: Número de ramais [n°]; e

H1: Duração do período de referência [dia];

Op24 - Perdas de água por comprimento de tubulação [m³/km/dia] – Indica o volume de água perdido por comprimento de tubulação durante o período de um dia, dado pela Equação 3.12.

$$Op24 = \frac{A15/H1}{C8} \quad (3.12)$$

Onde:

A15: Perdas de água [m³];

C8: Comprimento das tubulações [Km]; e

H1: Duração do período de referência [dia];

Op27 - Perdas reais por ramal [l/ramal/dia] – Indica o volume real de água perdida diariamente por ramal quando o sistema está pressurizado, dado pela Equação 3.13.

$$Op27 = \frac{A19 \times 100}{(C24 \times H2)/24} \quad (3.13)$$

Onde:

A19: Perdas reais [m³];

C24: Número de ramais [n°]; e

H2: Tempo de pressurização do sistema [dia];

O SNIS, (2019) também apresenta indicadores de perdas em SAA segundo três unidades diferentes: em percentual – Índice de perdas na distribuição (IN049); em litros por ligação ao dia – Índice de perdas por ligação (IN051); e em metros cúbicos por quilômetro de rede ao dia – Índice bruto de perdas lineares (IN050).

IN049 – Índice de perdas na distribuição, é um indicador volumétrico da água perdida na distribuição, em relação à água produzida, dado pela Equação 3.14

$$IN049 = \frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG006 + AG018 - AG024} \times 100 \quad (3.14)$$

Onde:

AG006: Volume de água produzido [m³];

AG010: Volume de água consumido [m³];

AG018: Volume de água tratado importado [m³]; e

AG024: Volume de serviço [m³];

IN050 – Índice bruto de perdas lineares, é um indicador volumétrico da água perdida na distribuição, por quilômetro de rede ao dia, dado pela Equação 3.15

$$IN050 = \frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG005} \times \frac{1000}{365} \quad (3.15)$$

Onde:

AG005: Extensão da rede de água [km];

AG006: Volume de água produzido [m³];

AG010: Volume de água consumido [m³];

AG018: Volume de água tratado importado [m³]; e

AG024: Volume de serviço [m³];

IN051 – Índice de perdas por ligação, é um indicador volumétrico da perda de água considerando o número de ligações ativas, dado pela Equação 3.16

$$IN051 = \frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG002} \times \frac{1000000}{365} \quad (3.16)$$

Onde:

AG002: Quantidade de ligações ativas [n°];

AG006: Volume de água produzido [m³];

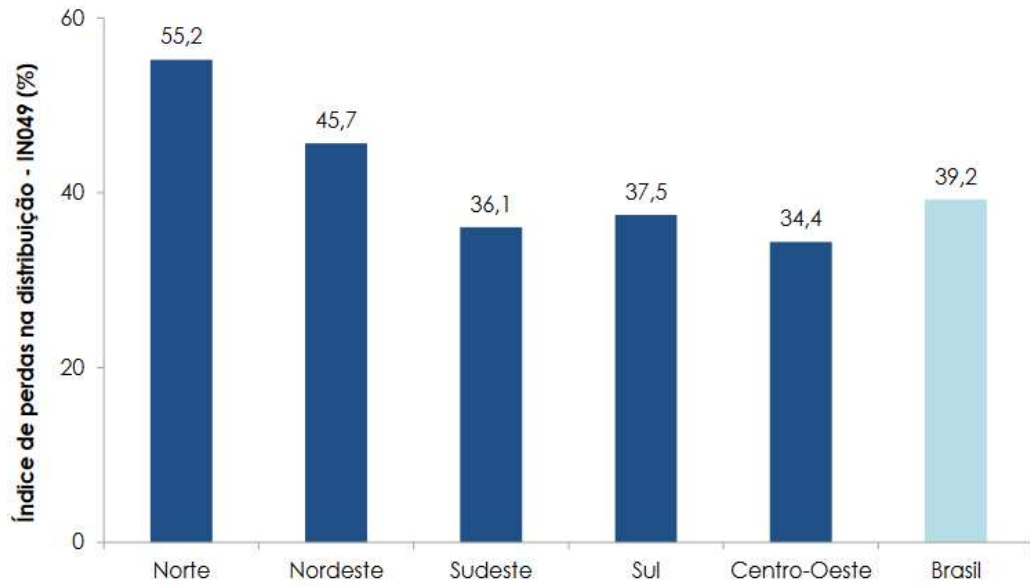
AG010: Volume de água consumido [m³];

AG018: Volume de água tratado importado [m³]; e

AG024: Volume de serviço [m³];

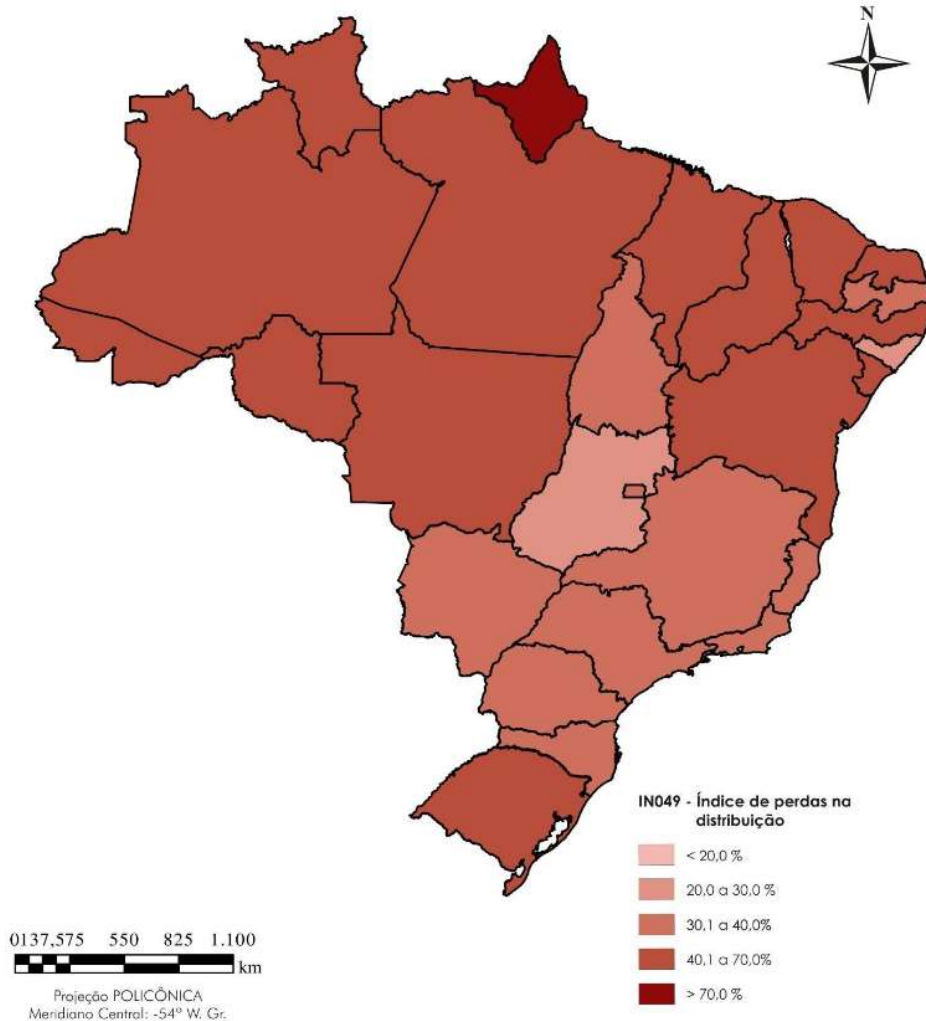
Com base nos dados do SNIS, a Figura 3.9 apresenta o indicador perdas na distribuição (IN049), para as regiões do Brasil e a média nacional. A Figura 3.10 apresenta o mesmo indicador (IN049), para todo o país em escala de cores dos percentuais perdidos dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2019.

Figura 3.9 – Índice de perdas na distribuição – IN049 para as regiões do Brasil



Fonte: (SNIS, 2019)

Figura 3.10 – Índice de perdas na distribuição – IN049 no Brasil



Fonte: (SNIS, 2019)

3.2.3 Medidas de eficiência energética

Existem diversas alternativas que podem ser empregadas no esforço de ser mais eficiente na operação de RDA. Dentre essas, pode-se realizar uma grande divisão baseando-se em dois grupos, sendo as medidas administrativas e as operacionais. As medidas administrativas compreendem ações que, praticamente, não envolvem custos para serem implantadas. Segundo GOMES, (2014), são ações relativas aos contratos existentes com as concessionárias de energia elétrica, resumindo-as em:

- Correção da classe de faturamento.
- Regularização da demanda contratada.
- Alteração da estrutura tarifária.
- Desativação das instalações sem utilização.
- Conferência de leitura da conta de energia elétrica.
- Entendimentos com as companhias energéticas para redução de tarifas.

As medidas operacionais estão associadas a ações de engenharia que normalmente envolvem custos para implementação. Essa medidas também podem ser divididas em ações que realizam alterações físicas e as que alteram regras operacionais.

As medidas que realizam alterações físicas, propõem-se em realizar mudanças na rede, como a substituição do conjunto motobomba por equipamentos mais eficientes, implantação de sistemas de geração de energia durante a operação, divisão da rede em setores, redução do volume de água bombeada por meio do controle de perdas e redução da altura manométrica do sistema por meio de programas de limpeza/substituição e remoção de ar das tubulações (CAMPBELL et al., 2016; MEIRELLES; BRENTAN; LUVIZOTTO JR, 2018; SPEIGHT, 2014; TSUTIYA, 1997).

Como os conjuntos motobomba são os principais responsáveis pelo consumo energético nas RDA, o funcionamento dos equipamentos fora do seu BEP por sub ou superdimensionamento, além do desgaste natural dos equipamentos, podem estar

associados a ineficiência dos sistemas. Neste caso a substituição por equipamentos mais eficientes deve ser considerada.

A implementação de recuperação de energia em SAA é uma alternativa que visa aumentar a eficiência energética utilizando os recursos renováveis disponíveis no local de implantação (VIEIRA; RAMOS, 2008), neste caso o aproveitamento da topografia. Com essa medida, a RDA em si não consome menos energia. Entretanto a geração realizada por meio de turbinas ou bombas funcionando como turbinas faz com que o balanço entre consumo e geração torne a rede mais eficiente.

KRAMER; TERHEIDEN; WIEPRECHT, (2018) investigaram o uso de bombas funcionando como turbinas em locais com baixa capacidade instalada, quanto a viabilidade técnica e econômica da implantação. Realizaram experimentos em campo e laboratório, além de análises financeiras baseando-se no método do valor presente líquido, constatando sinalização positiva para a adoção das medidas estudadas.

MEIRELLES et al., (2018) utilizaram um algoritmo meta-heurístico (PSO), para selecionar e otimizar a operação de bomba funcionando como turbina, com enfoque em maximizar a recuperação de energia e reduzir o volume de vazamentos. Foram encontrados resultados viáveis onde observou-se melhorias na redução dos vazamentos com a recuperação de energia, mantendo-se as condições hidráulicas requeridas.

Outra maneira adotada pelas concessionárias de água para melhoria da eficiência energética das RDA, é realizar um plano de reabilitação e/ou substituição dos tubos de modo a diminuir sua rugosidade e conseqüentemente a altura manométrica exigida pelo sistema. SPEIGHT, (2014) avaliou como a alteração da rugosidade, associada a diferentes planos de reabilitação dos tubos, influenciaram na eficiência energética do sistema, observando o consumo de energia elétrica das bombas de 28 estações elevatórias. Foram observadas algumas melhorias com relação à economia de energia. Entretanto, questões como a localização dos tubos com maior deterioração e a configuração do sistema têm impactos nos resultados, e portanto, as conclusões obtidas não devem ser generalizadas para todas as redes.

Com relação às medidas que realizam intervenções nas regras operacionais, cita-se a alteração no sistema bombeamento-reservação, implementação de sistemas autônomos de operação, otimização do funcionamento dos conjuntos motobomba existentes, uso de inversores de frequência e controle de pressão por meio de VRPs (BRENTAN et al., 2018; CHIRIBOGA et al., 2018; SOLER et al., 2015; TSUTIYA, 1997).

BRENTAN et al., (2018) propuseram um algoritmo de otimização híbrido para a operação de conjuntos motobombas dotados de inversores de frequência, simultaneamente com válvulas redutoras de pressão. O enfoque da otimização é em minimizar o consumo de energia e as perdas de água. Nos resultados foram observadas reduções no consumo energético de até 42,55% em um dos cenários em estudo, além de evidenciarem o melhor gerenciamento de pressão na rede.

NAZIF et al., (2010) utilizaram um modelo de otimização baseado em um Algoritmo Genético, para avaliar as variações horárias ótimas do nível de água em um tanque de armazenamento em diferentes estações do ano, a fim de minimizar o nível de vazamento por meio do gerenciamento de pressão. Os resultados apresentados mostraram que os vazamentos na rede poderiam ser reduzidos em aproximadamente 30% durante um ano, quando o nível de água do tanque foi otimizado pelo modelo utilizado.

GOMES, (2014) apresenta a Tabela 3.3 com um conjunto de ações de engenharia, compreendendo medidas físicas e operacionais, que podem possibilitar melhorias no desempenho de SAA.

Tabela 3.3 – Medidas de eficiência energética em SAA

Ações	Medidas
Ajuste dos equipamentos	Correção do fator de potência Alteração da tensão de alimentação
Diminuição da potência dos equipamentos	Melhoria no rendimento dos conjuntos motobomba Redução das perdas de carga nas tubulações Melhoria do fator de carga nas instalações Redução do índice de perdas de água Uso racional da água
Controle operacional	Alteração do sistema de bombeamento e reservação Utilização de inversor de frequência Alteração dos procedimentos operacionais das ETAs
Automação do SAA	Ações controladas de inversores de frequência e válvulas visando diminuir pressões excessivas
Alternativa para geração de energia	Aproveitamento de potenciais energéticos Uso de geradores nos horários de ponta
Redução no volume de água distribuído	Redução da altura geométrica Redução das perdas de carga Controle de perdas de água

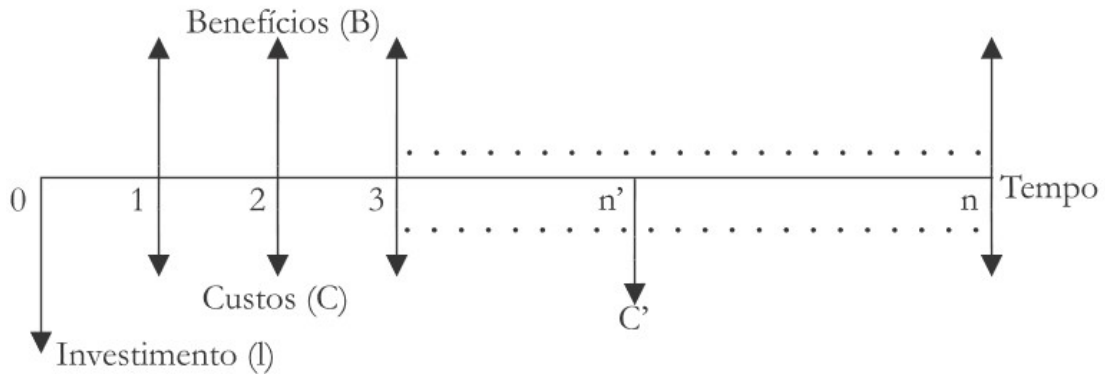
Fonte: (GOMES, 2014)

3.3 Análise econômica de projetos de eficiência energética

3.3.1 Linha de base

Durante a vida útil de um projeto de engenharia na área de saneamento, irão ocorrer custos e receitas, que incidirão em tempos distintos ao longo desse período (GOMES, 2014). Além disso, em determinada etapa da vida útil de um empreendimento pode ser necessária a adoção de medidas que irão requerer investimentos. Uma ferramenta gráfica simplificada utilizada para representar movimentações financeiras ao longo de períodos de tempo é apresentada na Figura 3.11. Essa ferramenta, conhecida como fluxo de caixa, ilustra uma linha do tempo (seta da esquerda para direita), com os fluxos financeiros representados pelas setas para baixo como despesas (investimentos e custos de operação e manutenção) e as setas para cima como receitas (benefícios e pagamentos).

Figura 3.11 – Diagrama para representação de um fluxo de caixa



Fonte: (GOMES, 2014)

Ao se analisar a qualidade financeira de um dado investimento, convencionou-se em trazer o investimento para o tempo zero, como representado na Figura 3.11. Assim é possível avaliar a viabilidade do próprio investimento e compará-lo com outras alternativas.

A ferramenta do fluxo de caixa permite visualizar um balanço econômico das despesas e receitas a cada período de tempo considerado, por isso é muito útil em SAA. Ao se implementar medidas de eficiência num dado sistema, esta é trazida para o tempo zero, possibilitando assim avaliar a qualidade do investimento em termos de custo.

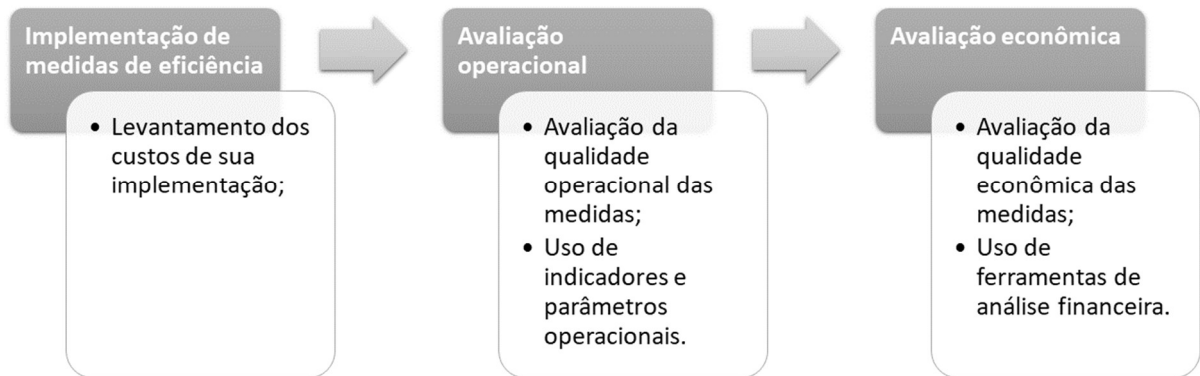
Ressalta-se que um investimento em medidas de eficiência nos SAA bem como em outros processos de engenharia, tem como enfoque inicial a qualidade operacional do sistema e em seguida nos custos, pois uma medida que tenha baixo custo e não traga benefícios operacionais não tem sentido prático.

A exemplo, (COVELLI et al., 2016) usaram um GA, para propor uma metodologia de controle de perdas em uma RDA utilizando-se VRPs. Foi otimizado o número de válvulas utilizadas tendo em vista os custos totais de aquisição, instalação e gerenciamento das válvulas, além dos custos estimados com as perdas. A proposta do método é que se mantenha uma pressão mínima necessária para o abastecimento da rede, diminuindo as perdas em juntas/conexões que são proporcionais as pressões observadas.

Do ponto de vista operacional, reduzir as pressões de trabalho trazem de fato benefícios a RDA. Entretanto, para que a otimização seja benéfica também do ponto de vista dos custos, o investimento realizado para aquisição, instalação e gerenciamento das válvulas deve ser pago pelos benefícios gerados por sua

implantação, mesmo que num período de tempo maior que em relação ao tempo de aquisição e implementação. Por isso, as medidas avaliadas neste trabalho seguiram o processo da Figura 3.12 para análise da sua qualidade operacional e econômica.

Figura 3.12 – Fluxo para avaliação da qualidade operacional e econômica das medidas de eficiência



Ao seguir o fluxo apresentado na Figura 3.12, as medidas de eficiência energética em uma RDA são avaliadas inicialmente do ponto de vista operacional, ou seja, analisando quais serão os benefícios observados. Em seguida são avaliadas do ponto de vista econômico, para analisar se as medidas trazem também retornos financeiros dentro de um prazo estipulado. Nesta etapa é importante conhecer o padrão de funcionamento e a sazonalidade do sistema, uma vez que, por exemplo, cidades turísticas recebem uma população flutuante significativa nas férias, alterando os possíveis benefícios durante este período. Em geral, o uso de indicadores facilita esta ponderação, uma vez que se encontram normalizados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Cenários

4.1.1 Generalidade dos cenários

Para a realização deste trabalho foi utilizado o *software* Matlab R2021. Nele foram elaborados algoritmos, que acoplados ao simulador hidráulico Epanet (ROSSMAN, 2000) e utilizando o Epanet-Matlab Toolkit desenvolvido por ELIADES et al., (2016), realiza as simulações hidráulicas e alterações necessárias para avaliação dos cenários de estudo que foram propostos.

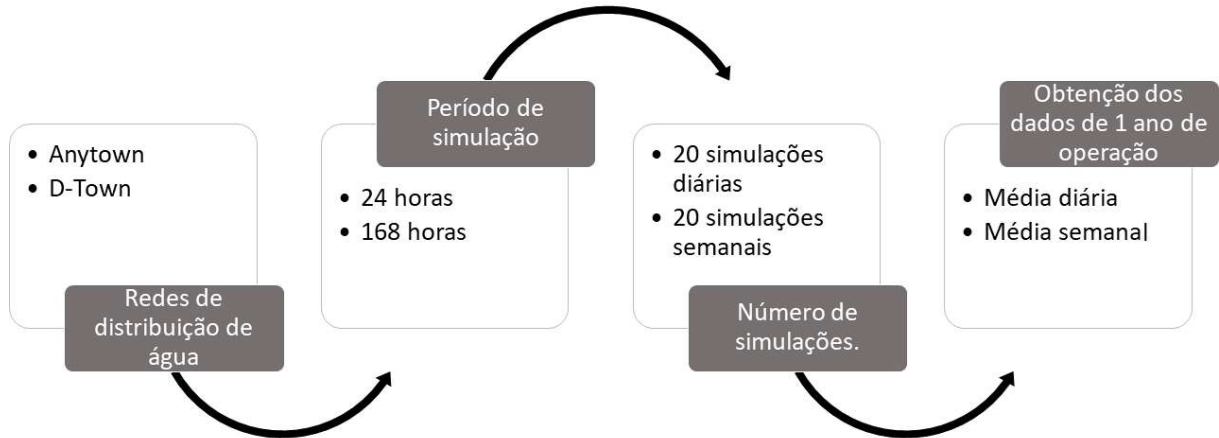
Conforme abordado em detalhes nas seções seguintes foram elaborados 4 diferentes cenários, onde em cada um deles, determinados parâmetros da RDA foram alterados individualmente ao longo de sua vida útil, simulando um processo de envelhecimento. Além desses 4 cenários, foi elaborado um cenário hipotético ideal e um cenário intermediário. O cenário ideal foi desenvolvido para servir como parâmetro de comparação entre uma situação hipotética ideal e os dados observados nos outros cenários em estudo. O cenário intermediário foi desenvolvido para simular uma situação de envelhecimento da RDA próxima da realidade, onde os parâmetros em estudo sofrem alterações com o tempo simultaneamente.

Algumas características utilizadas nas simulações hidráulicas e a forma de obtenção dos dados são as mesmas para todos os cenários. Em suma, os principais pontos são:

- Todos os cenários elaborados e suas respectivas alterações foram simulados em períodos de vida útil de 20 anos.
- Como as alterações estudadas neste trabalho ocorrem de forma lenta, foi realizada a seguinte abordagem nas simulações para os estudos de caso. Para a rede de pequeno porte Anytown, foram realizadas simulações hidráulicas horárias em um período de 24 horas, onde os dados obtidos nesse período de simulação representam a média de um dia típico do ano. Para a rede de grande porte D-Town, foram realizadas simulações hidráulicas horárias em um período de 168 horas, onde de forma semelhante, os dados observados nesse período de simulação representam a média de uma semana típica do ano. Desse modo, a simulação de toda a vida útil das RDAs se reduzem a 20 simulações hidráulicas

consecutivas diárias no caso da Anytown e semanais no caso da D-Town, onde os dados obtidos nas simulações representam médias anuais. A Figura 4.1 apresenta um diagrama resumindo o método abordado.

Figura 4.1 – Diagrama representativo da forma como foram abordadas as simulações



- Para obtenção dos custos totais de funcionamento da RDA, em todos os cenários estudados foram considerados os custos de água perdida por meio dos vazamentos e os custos de energia elétrica com a operação dos conjuntos motobomba. Nos custos de energia elétrica foram consideradas as diferenças tarifárias entre os horários de ponta e fora de ponta, observando as atuais tarifas da ANEEL, (2021). Já para o custo da água perdida, foi considerada como referência seu custo de produção (SNIS, 2019).
- De modo a avaliar o desempenho hidráulico da RDA no que se refere as pressões de operação, em todos os cenários foram obtidas as pressões críticas da rede. A pressão crítica é estabelecida como a menor pressão observada nos pontos de consumo da RDA durante a sua vida útil.
- As RDA nunca são totalmente estanques, por isso um dado índice de vazamentos mínimos foi considerado em todos os cenários conforme a Equação 4.5, que será abordada em detalhes na seção 4.1.3. Além disso, o aumento da demanda de água na rede devido ao crescimento da população consumidora, também foge ao controle dos gestores de SAA e por isso foi considerado em todos os cenários conforme a abordagem da seção 4.1.4.

4.1.2 Cenário para avaliação da rugosidade das tubulações

O processo de deterioração das tubulações pode ser classificado em duas categorias: (1) a deterioração estrutural, que diminui a capacidade das tubulações em resistir a esforços mecânicos; (2) a deterioração funcional, associada ao aumento da rugosidade da superfície interna das tubulações, diminuindo sua capacidade hidráulica (ABD RAHMAN et al., 2019; BERARDI et al., 2008).

A deterioração funcional, que se relaciona com a perda de carga das tubulações Δh , pode ser

atribuída a diversos fatores, tais como a sua idade, o material de que é fabricada, o diâmetro, o tipo de solo no seu entorno, a sua localização, além de parâmetros associados a qualidade da água (ABD RAHMAN et al., 2019). A perda de carga das tubulações pode ser calculada por meio da equação de Hazen-Williams, Equação 4.1.

$$\Delta h = 10,653 \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,85} D^{-4,87} L \quad (4.1)$$

Onde:

Δh : Perda de carga [m];

Q : vazão no trecho [m³/s];

L : comprimento da tubulação [m];

D : diâmetro da tubulação [m];

C_{HW} : coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams.

Esse cenário foi elaborado com o intuito de avaliar o impacto que o aumento da rugosidade das tubulações no decorrer do tempo traz a RDA. Para isso, o aumento da perda de carga das tubulações, devido ao crescimento da rugosidade, foi calculado encontrando-se a variação do parâmetro de Hazen-Williams, por meio da metodologia apresentada em SHARP; WALSKI, (1988), onde o aumento da rugosidade cresce a uma taxa constante conforme apresentado na Equação 4.2. Os autores propuseram este método revisando dados de rugosidade de tubos coletados de uma grande variedade de fontes ao longo de muitos anos, que permitiu a criação de um procedimento teórico para prever os valores futuros do parâmetro de Hazen-Williams.

$$C_{HW} = 18,0 - 37,2 \times \log\left(\frac{e_0 + a_{rug}t}{D}\right) \quad (4.2)$$

Onde:

C_{HW} : Parâmetro de Hazen-Williams;

e_0 : Rugosidade absoluta inicial [mm];

a_{rug} : Taxa de aumento da rugosidade [mm/ano];

t : Tempo [anos]; e

D : Diâmetro da tubulação [m].

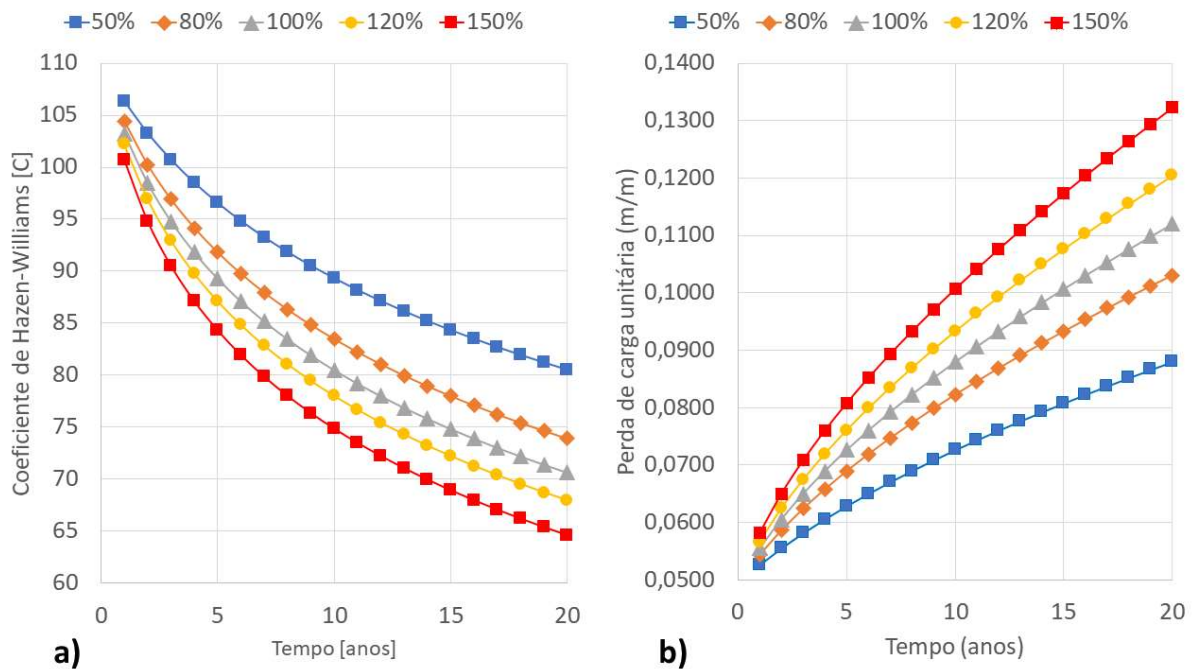
Os valores da rugosidade inicial e taxa de aumento da rugosidade são respectivamente 0,18 mm e 0,094488 mm/ano (SHARP; WALSKI, 1988). Entretanto, esses valores contêm muitas incertezas associadas, devido à sua dificuldade de mensuração direta (ABD RAHMAN et al., 2019; KANG; LANSEY, 2011). Desse modo, como forma de avaliar tais incertezas, foram elaborados cinco cenários, utilizando diferentes taxas de aumento da rugosidade, tendo a taxa citada como valor de referência central, conforme apresentado na Tabela 4.1. Assim, espera-se cobrir situações com maior ou menor severidade de deterioração funcional das tubulações.

Tabela 4.1 – Taxas de aumento da rugosidade interna das tubulações

Taxas [mm/ano]				
50%	80%	Ref=100%	120%	150%
0,047244	0,07559	0,094488	0,113386	0,141732

Utilizando a Equação 4.2, a Figura 4.2a apresenta como o coeficiente de Hazen-Williams decresce com o tempo, refletindo o crescimento da rugosidade interna das tubulações e conseqüentemente em sua perda de carga unitária, conforme Figura 4.2b. São apresentados os valores a cada ano para as taxas de aumento da rugosidade interna mostradas na Tabela 4.1. Considerou-se uma tubulação genérica de 32 mm e velocidade do fluxo de 1,5 m/s, afim de exemplificar o impacto.

Figura 4.2 – a) Decréscimo do Coeficiente de Hazen-Williams para cada taxa considerada; b) Perda de carga unitária



4.1.3 Cenário para avaliação do índice de vazamentos

Perdas de água nas RDAs correspondem aos volumes distribuídos, mas não contabilizados. Esses volumes englobam as perdas reais, como os vazamentos, e as perdas aparentes, como ligações clandestinas. Para cálculo da vazão de água perdida por meio de um único vazamento, frequentemente utiliza-se formulação dada pela Equação 4.3

$$q = C_d A (2gh)^{0,5} \quad (4.3)$$

Onde:

q : vazão de água perdida [m³/s];

C_d : coeficiente de descarga;

A : área do vazamento [m²];

g : aceleração gravitacional [m/s²]; e

h : carga de pressão no vazamento [m].

Contudo, para as aplicações em RDA reais e na modelagens hidráulicas por meio de *softwares*, a exemplo do EPANET, a Equação 4.3 pode ser reescrita de uma forma mais geral, conforme a Equação 4.4 (BOIAN et al., 2019; ROSSMAN, 2000). Nesse caso, os valores de C_e e y devem ser calibrados para a RDA em estudo.

$$q = C_e h^y \quad (4.4)$$

Onde:

C_e : coeficiente de descarga;

h : carga de pressão no vazamento [m]; e

y : expoente de emissão.

Por padrão o *software* EPANET emprega o valor do expoente de emissão igual a 0,5, frequentemente utilizado na modelagem de orifícios e bocais. Além disso, trabalhos sugerem valores semelhantes para RDA (BOIAN et al., 2019; MACEDO et al., 2018). Essa modelagem de vazamento é utilizada para representar perdas de água que podem ser corrigidas, pois têm grande impacto econômico. No entanto, pequenos vazamentos como os observados em ligações domiciliares e junções de tubulações são de difícil identificação, resultando em uma relação custo/benefício pouco atrativa para sua correção. Assim, outra proposta apresentada na literatura por AHOPELTO; VAHALA, (2020) é usada para estimar as perdas mínimas nas RDA. Esta formulação considera o comprimento da rede e o número de consumidores para estimar os valores mínimos de vazamentos, conforme apresentado na Equação 4.5.

$$q_{min} = 54 + 2,7 \left(\frac{N_p}{L_r} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

q_{min} : volume total de vazamentos mínimo a ser considerado [m³/km];

N_p : número de consumidores atendidos; e

L_r : comprimento total das tubulações da rede [km].

Nas equações propostas para modelagem dos vazamentos, observa-se que o volume perdido muda com a variação da pressão (variação diária) no nó quando modelado pela Equação 4.4, e muda com a variação da população (variação anual) quando modelado pela Equação 4.5. Para poder analisar o comportamento dos vazamentos tanto para as variações diárias na pressão quanto para mudanças ao longo da vida útil da RDA, neste trabalho os vazamentos foram modelados como a soma das duas formulações. Além disso, o coeficiente de emissão foi alterado em diferentes valores como forma de avaliar o impacto na RDA das variações no volume de vazamentos, conforme apresentado na Tabela 4.2, simulando redes mais ou menos eficientes do ponto de vista de controle de vazamentos

Tabela 4.2 – Valores utilizados no coeficiente de emissão

Coeficientes de emissão C_e				
25%	70%	$C_e=100\%$	130%	175%
0,125	0,350	0,50	0,650	0,875

4.1.4 Cenário para avaliação do crescimento populacional

A maior parte da demanda de água nas RDAs é atribuída à sua população consumidora. Assim, nesse cenário foi avaliado o impacto na RDA para diferentes taxas de crescimento populacional ao longo da sua vida útil. O aumento do consumo de água nos nós da rede, devido ao crescimento populacional, foi estimado adotando-se que o consumo cresce na mesma taxa do crescimento da população. A metodologia utilizada para a projeção do crescimento populacional foi o método das componentes demográficas ajustado a um polinômio de terceiro grau, utilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Organização das Nações Unidas (ONU) (BORGES et al., 2016; IBGE, 2018). O polinômio é dado pela Equação 3.3, no qual os parâmetros utilizados foram os valores atribuídos para o estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Tabela 3.1 (IBGE, 2019).

Afim de avaliar possíveis incertezas associadas a projeção do crescimento populacional e o impacto dessas incertezas, a taxa de crescimento obtida pela Equação 3.3 foi variada, para mais e para menos, em 2% e 5%. Assim, cinco cenários de crescimento populacional foram elaborados.

4.1.5 Cenário para avaliação da deterioração das bombas

As bombas utilizadas nas RDA estão sujeitas a deterioração ao longo da sua vida útil, principalmente se planos de manutenção não forem executados adequadamente. Diversos fatores, como cavitação, corrosão, incrustações, desalinhamentos e vibrações excessivas, podem interferir nesse processo de deterioração, o que reflete no desempenho da bomba. RICHARDSON; HODKIEWICZ, (2011) sugere que os dois principais mecanismos que causam a diminuição do desempenho da bomba são: 1) o desenvolvimento de fluxos internos devido a folgas; 2) aumento da rugosidade da superfície interna das bombas. Seguindo a metodologia inicialmente proposta por RICHARDSON; HODKIEWICZ, (2011), e usada por NAULT; PAPA, (2015), a alteração da altura manométrica da bomba ao longo de sua vida útil pode ser calculada de acordo com a Equação 4.6.

$$H'_p = \omega \left(a \left(\frac{Q+R}{\omega} \right)^2 + b \left(\frac{Q+R}{\omega} \right) + c - K_T t_a \left(\frac{Q}{\omega} \right)^2 \right) \quad (4.6)$$

Onde:

H'_p : Altura manométrica corrigida [m];

ω : Velocidade relativa;

a_B , b_B e c_B : Coeficientes da curva da bomba;

Q : Vazão da bomba [l/s];

R : Vazão de recirculação interna da bomba [l/s];

K_T : Taxa de aumento da rugosidade interna; e

t_a : Tempo cumulativo de operação [h].

A vazão de recirculação interna da bomba (R), varia com a altura manométrica inicial e com a folga no anel de desgaste do rotor da bomba, conforme a Equação 4.7.

$$R = 2\gamma D_a H_p^{0,5} \left(\sqrt{\frac{c_a^3}{75 \times c_a + L_a}} - \sqrt{\frac{c_{a0}^3}{75 \times c_{a0} + L_a}} \right) \quad (4.7)$$

Onde:

γ : Peso específico da água [N/m³];

D_a : Diâmetro do anel de desgaste [mm];

H_p : Altura manométrica inicial [m];

L_a : Comprimento axial do anel de desgaste [mm];

c_a : Folga do anel de desgaste [mm]; e

c_{a0} : Folga inicial do anel de desgaste [mm].

A folga no anel de desgaste do rotor da bomba aumenta com um parâmetro de deterioração (β), conforme a Equação 4.8.

$$c_a = c_{a0} \times \ln(\beta t_a + e) \quad (4.8)$$

Onde:

c_a : Folga do anel de desgaste [mm];

c_{a0} : Folga inicial do anel de desgaste [mm];

β : Parâmetro de deterioração do anel de desgaste;

t_a : Tempo cumulativo de operação [h]; e

e : Número de Euler.

Não existem valores de referência para os parâmetros de deterioração K_T e β . Idealmente, ambos devem ser obtidos por meio de calibrações feitas para cada situação. Contudo, na elaboração desta proposta, utilizou-se os valores dados por NAULT; PAPA, (2015), respectivamente $1,0 \times 10^{-9}$ e $5,0 \times 10^{-3}$, como valores de referência, e em seguida, para analisar o impacto de deteriorações mais ou menos severas, outras taxas proporcionais aos valores de referência foram utilizadas. As taxas foram alteradas em valores entre 10 vezes menor e 10 vezes maior que o valor central, como forma de representar os diversos fatores que podem interferir no processo de deterioração. Esses valores são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores utilizados nos parâmetros K_T e β
Taxas de alteração dos parâmetros K_T e β

Fator	10%	20%	50%	Ref. =100%	200%	500%	1000%
$K_T \times 10^{-9}$	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10
$\beta \times 10^{-3}$	0,5	1	2,5	5,0	10,0	25	50

4.1.6 Cenário ideal e intermediário

O cenário ideal foi elaborado como uma situação hipotética ideal em que as características da RDA avaliadas nesse trabalho se mantêm constantes ao longo do tempo, com exceção de dois parâmetros dos quais não se tem controle, o crescimento populacional e o valor mínimo de vazamentos. O crescimento populacional foi modelado com o mesmo equacionamento utilizado pelo IBGE, conforme a Equação 3.3 detalhada na seção 4.1.4. O volume mínimo de vazamentos da RDA foi modelado conforme Equação 4.5 da seção 4.1.3.

No cenário intermediário, buscou-se simular uma situação de envelhecimento próxima da realidade das RDA, onde todos os parâmetros considerados neste trabalho alteram-se com o tempo concomitantemente. Desse modo, na simulação do cenário intermediário, foram implementadas todas as alterações detalhadas da seção 4.1.2 à 4.1.5 de forma simultânea, ou seja, a rugosidade das tubulações, os vazamentos da RDA e a população consumidora crescem com o tempo, enquanto os conjuntos motobombas se deterioram. No cenário intermediário foram utilizados os valores dos parâmetros de referência avaliados em cada um dos cenários.

4.2 Adoção de medidas de eficiência energética

Realizadas as simulações hidráulicas com os diferentes cenários abordados nas seções anteriores e tendo avaliados os resultados obtidos, a próxima etapa consistiu da implementação de medidas de eficiência energética no cenário intermediário utilizando a rede D-Town como estudo de caso.

Entre as diversas medidas de eficiência energética possíveis de implementação, duas alternativas foram abordadas: medidas que reduzissem o percentual de vazamentos da rede e medidas que alterassem a perda de carga do sistema. Ambas alternativas foram implementadas a partir do ano que a rede começa a apresentar problemas com baixas pressões de operação.

Em relação a redução do percentual de vazamentos, diversas medidas tais como o controle de pressão na rede por meio de setorização, otimização da operação de bombas, otimização na operação de reservatórios e a própria identificação e tratamento dos vazamentos, podem ser utilizadas no processo (ZAMAN et al., 2020). Contudo, de forma a estimar os custos e benefícios decorrentes da implementação de uma medida de redução dos vazamentos de forma generalizada, foi adotado como referência um dos estudos de caso feitos pela (COMISSÃO EUROPEIA, 2013). Neste estudo de caso, realizado na cidade de Bordéus na França, foram calculados os preços para implementação de controles dos vazamentos, renovação e gerenciamento de pressão na rede, até que se obtenha um dado nível econômico sustentável de vazamentos, onde o custo de vazamento é igual ao custo marginal de produção da água.

Também foi utilizada a mesma referência, em termos de redução percentual do índice de vazamentos até um dado valor mínimo aceitável, neste caso uma redução de 10%.

Para a redução das perdas de carga no sistema, a medida implementada foi a reabilitação de trechos de tubulação da RDA sem alteração de diâmetro. Esta foi realizada a uma taxa de 1% ao ano, em acordo com dados observados pela (COMISSÃO EUROPEIA, 2013). Na definição da ordem de prioridade das tubulações a serem reabilitadas, partiu-se da rede troncal, que devido as maiores vazões

transportadas influenciam mais fortemente nas pressões operacionais da rede (MEIRELLES et al., 2018a).

A rede troncal pode ser definida basicamente como um caminho de fluxo principal que alimenta os setores de uma RDA (CAMPBELL et al., 2015). Por serem conexões principais entre a rede e a fonte de alimentação, podem apresentar maiores vazões e estão susceptíveis a apresentarem as maiores perdas de cargas com a deterioração das tubulações.

Com as medidas implementadas foram realizadas novas simulações hidráulicas onde foram obtidos novos dados de custos operacionais, além dos parâmetros de operação da rede para verificação do atendimento da demanda com as pressões mínimas exigidas. Constatadas as melhorias operacionais da adoção das medidas de eficiência energética, a etapa seguinte constituiu da análise econômica da implementação dessas medidas, conforme a seção seguinte.

4.3 Análise econômica

Para realizar a tomada de decisão acerca de investimentos é necessário que seja verificada de forma adequada a sua qualidade econômica. Empresas e instituições de diversos setores se deparam frequentemente com a necessidade de realizar investimentos, seja para propor melhorias ou para preservar a competitividade de seus produtos.

A necessidade de alterações em uma RDA, como a adoção de medidas de eficiência energética, requerem investimentos para realização. Sendo assim, essas propostas devem ser apreciadas com base em metodologias de avaliações financeiras.

4.3.1 Ferramentas para análise econômica

Segundo FANTI et al., (2015), as teorias da administração financeira fornecem diversas metodologias para avaliar a viabilidade de investimentos, onde algumas delas se destacam por serem mais utilizadas no âmbito acadêmico e organizacional. Entre elas citam-se as técnicas do Valor Presente Líquido (VPL), *payback* e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

O VPL é um dos critérios para avaliação de investimentos mais recomendados por especialistas em finanças (FANTI et al., 2015). Essa recomendação é embasada, principalmente, devido ao fato que essa metodologia considera o valor do dinheiro no tempo. A formulação geral para o método do VPL é dada pela Equação 4.9. Um VPL positivo, significa que o investimento realizado é executável e trará ganhos financeiros, enquanto um VPL negativo indica que o investimento é inexecutável e representa prejuízos.

$$VPL = \sum_{t_e=1}^{n_t} \frac{FC_t}{(1+i)^{t_e}} - I_0 \quad (4.9)$$

Onde:

FC_{t_e} : Fluxo de caixa no período t_e ;

t_e : Enésimo período de tempo do investimento;

n_{t_e} : Número de períodos de t_e ;

i : Taxa de desconto; e

I_0 : Investimento inicial [\$].

Na aplicação em SAA, quando são utilizadas alternativas de projeto que possuem os mesmos benefícios, aquela que proporcionar o menor VPL dos custos envolvidos será a alternativa mais atrativa (GOMES, 2014).

A TIR trata-se de uma métrica de análise financeira utilizada para avaliar o percentual de retorno de um investimento. A TIR pode ser compreendida também como a taxa de desconto que zera o VPL de um investimento (URTADO et al., 2009). Sendo assim, encontrar a TIR consiste em calcular a taxa de desconto i , da Equação 4.9, que torna o VPL igual a zero. Posteriormente, a TIR pode ser comparada com outras opções de investimento (ações, fundos imobiliários, etc.) para identificar se representa ou não uma boa alternativa do ponto de vista financeiro.

Payback, que em tradução literal significa “retorno”, consiste no período de tempo necessário para que as entradas de caixa se igualem ao valor investido, ou seja, o período de tempo para que se recupere o dinheiro investido inicialmente (FANTI et al., 2015; MOTTA et al., 2009). Em aplicações nas RDA e outras obras de engenharia, o

seu cálculo é importante para avaliar se as propostas de investimento em melhorias trazem retorno dentro da vida útil do projeto.

Como mencionado, as ferramentas citadas são as principais utilizadas em análises da qualidade financeira de investimentos, e portanto foram adotadas para as análises realizadas. Após terem sido implementadas as medidas de eficiência energética descritas na seção 4.2, realizadas novas simulações hidráulicas e observados os custos de sua implantação, foi possível por meio das técnicas citadas avaliar a qualidade financeira dos investimentos. Foi realizado um balanço anual dos custos e benefícios das medidas, calculado o VPL dentro de sua vida útil e o tempo de retorno do investimento realizado.

4.3.2 Custos das tarifas de energia elétrica

Um importante ponto nas análises econômicas de eficiência energética em SAA trata-se do conhecimento da diferenciação entre as tarifas para consumidores de baixa tensão, como residências e pequenos comércios, e consumidores de média/alta tensão, como indústrias. As tarifas de energia para consumidores de baixa tensão são aplicadas somente ao que for utilizado de energia. No caso de consumidores de alta tensão, em geral aplicáveis aos SAA, a tarifa é dividida em consumo e demanda. O consumo se refere a quantidade de energia elétrica utilizada (R\$/MWh), enquanto a demanda é remunerada pelo serviço de disponibilização de uma certa potência elétrica para o sistema (R\$/kW) (HERZOG et al., 2011).

No Brasil as tarifas de energia elétrica são determinadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), e as concessionárias devem exercer esses valores. Como exemplo, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 2021), atribui valores de consumo e demanda a diferentes grupos consumidores, os quais são divididos pela tensão fornecida. Dentro de cada grupo os valores de demanda e consumo sofrem ainda alterações dos valores em função do consumo em horário de ponta e fora de ponta, além das bandeiras tarifárias, que variam em função do regime hídrico disponível para geração de energia. A Tabela 4.4 apresenta a estrutura tarifária para um consumidor de alta tensão do grupo A2. Esses valores ainda estão livres da incidência de impostos, que são variáveis para cada estado Brasileiro.

Tabela 4.4 - Estrutura tarifária da CEMIG para consumidor de alta tensão do grupo A2

A2 - 88 Kv a 138Kv	Demanda R\$/Kw	Bandeira Verde Consumo R\$/Kwh	Bandeira Verde Consumo R\$/Kwh	Bandeira Amarela Consumo R\$/Kwh	Bandeira Vermelho 1 Consumo R\$/Kwh	Bandeira Escassez hídrica Consumo R\$/Kwh
Demanda de ponta	13,98					
Demanda fora de ponta	6,07					
Demanda ultra ponta	27,96					
Demanda ultra f. de ponta	12,14					
Cons. Ponta		0,469820	0,488560	0,509530	0,564760	0,611820
Cons. Fora de ponta		0,320800	0,339540	0,360510	0,457200	0,462800

Fonte: (CEMIG, 2021) adaptado

4.3.3 Custos das medidas de eficiência

Os custos para a adoção das medidas de eficiência foram calculados por meio do custo unitário de sua implementação: No caso dos vazamentos, um dado valor unitário para redução de 1m³ de água perdida e no caso da perda de carga da rede, um dado valor para reabilitação de 1 metro linear de tubulação, onde a reabilitação retorna as condições de rugosidade da tubulação a mesma de uma nova, sem alteração de diâmetro.

Na estimativa dos custos para redução dos vazamentos, os valores do trabalho realizado pela (COMISSÃO EUROPEIA, 2013), foram utilizados. Em um dos estudos de caso foram estimados valores entre 0,58 e 0,71 milhões de euros anuais para diminuir as perdas de águas em 1 milhão de metros cúbicos por ano. Ao transformar a média aritmética desses valores para cada metro cúbico por reais a cada ano encontrou-se um valor de 3,31 R\$/m³/ano. Contudo, como o trabalho realizado foi publicado no ano de 2013, o valor de R\$ 3,31 foi corrigido para o valor presente utilizando a calculadora para correção de valores do (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2022). Assim, o valor atual utilizado para estimativa dos custos para redução do percentual de vazamentos foi de 7,27 R\$/m³/ano. Em outras palavras, para reduzir 1 m³ de água perdida é necessário investir R\$ 7,27. Para que a redução seja mantida é

necessário que o valor seja investido a cada período de tempo, nesse caso anualmente.

Em relação aos custos de reabilitação da rede o valor utilizado foi 9,13 R\$/m, correspondente aos valores utilizados pela (CASAN, 2021), corrigidos para o valor presente.

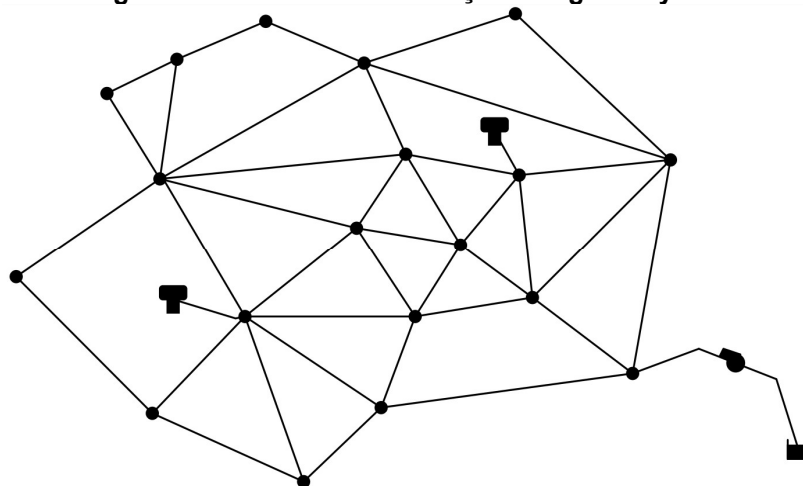
4.4 Estudos de caso

No desenvolvimento dos estudos de caso foram selecionadas duas RDA da literatura para aplicação da metodologia proposta, sendo uma de pequeno porte para análises iniciais dos parâmetros operacionais e testes nos algoritmos elaborados, e outra de grande porte onde também foram realizadas análises das medidas de eficiência para reabilitação das condições operacionais. As seções seguintes apresentam as RDA e mais detalhes sobre os estudos realizados em cada uma das redes.

4.4.1 Rede Anytown

A RDA de pequeno porte utilizada foi a Anytown, concebida por WALSKI et al., (1987) e apresentada na Figura 4.3. Essa RDA é composta por 40 trechos de tubulação, 19 nós, 2 tanques de níveis variáveis, 1 reservatório de nível fixo e 1 estação elevatória com 1 bomba.

Figura 4.3 – Rede de distribuição de água Anytown



Fonte: (WALSKI et al.,1987)

Todos os cenários elaborados das seções 4.1.2 à 4.1.6 foram simulados na rede Anytown. Em cada uma das simulações realizadas foram calculados os custos totais

anuais, conforme a Equação 4.10, e feita a aquisição dos valores de pressão a cada hora nos nós com demanda da rede.

$$C_{\$ ano} = C_{\$ dia} \times D_{ano} \quad (4.10)$$

Onde:

$C_{\$ ano}$: Custo total durante o ano de operação [R\$];

$C_{\$ dia}$: Custo durante um dia típico do ano de operação [R\$/dia]; e

D_{ano} : Número de dias do ano.

Os custos do dia típico foram calculados como a soma dos custos com energia elétrica durante todo o dia de operação, mais os custos referentes aos vazamentos durante o mesmo período, conforme Equação 4.11.

$$C_{\$ dia} = (D_{ener} \times P_{m\acute{a}x}) + \sum_{i=1}^{24} (P_{(i)} \times C_{ener (i)}) + (Vol_{(i)} \times C_{vol (i)}) \quad (4.11)$$

Onde:

$C_{\$ dia}$: é o custo total durante o dia típico [R\$];

$P_{(i)}$: Potência consumida na hora i [kwh];

$C_{ener (i)}$: Custo de energia elétrica durante a hora i [R\$/kwh];

D_{ener} : Custo com demanda de energia elétrica [R\$/kW];

$P_{m\acute{a}x}$: potência máxima observada no dia [kW];

$Vol_{(i)}$: Volume de água perdida na hora i [m³]; e

$C_{vol (i)}$: Custo de produção de água na hora i [R\$/m³].

Nos custos de energia elétrica foram consideradas as demandas e tarifas de energia elétrica em horários de ponta (17, 18 e 19 horas), onde as tarifas são mais caras, e nos horários fora de ponta, onde as tarifas são mais baratas. Os custos de vazamentos foram calculados como o produto do custo de produção de água pelo volume de água perdida. A Tabela 4.5 resume os custos considerados.

Tabela 4.5 – Tarifas utilizadas para cálculo dos custos

Fora de ponta		Hora de ponta		Produção de água [R\$/m ³]
Energia [R\$/Kwh]	Demanda [R\$/kW]	Energia [R\$/Kwh]	Demanda [R\$/kW]	
0,35666	13,95	0,53425	43,85	0,30

4.4.2 Rede D-Town

A RDA de grande porte utilizada neste trabalho foi a D-Town (MARCHI et al., 2014), apresentada na Figura 4.4. Esta é composta por 399 nós, 7 tanques de nível variável, 443 tubulações, 11 bombas, 5 válvulas e um reservatório de nível fixo.

Figura 4.4 – Rede de distribuição de água D-Town



Fonte: (MARCHI et al., 2014)

Tendo realizadas as simulações com todas as variações de parâmetros propostas neste trabalho com a rede Anytown, para filtrar os dados mais relevantes, na rede D-Town foram realizadas simulações com os valores médios de referência e os extremos superiores e inferiores em cada um dos cenários elaborados das seções 4.1.2 à 4.1.6. Da mesma forma, também foram calculados os custos totais anuais, conforme a Equação 4.12, e realizada a aquisição dos valores de pressão a cada hora nos nós com demanda da rede.

$$C_{\$ano} = C_{\$semana} \times D_{semana} \quad (4.12)$$

Onde:

$C_{\$ano}$: Custo total durante o ano de operação [R\$];

$C_{\$semana}$: Custo durante uma semana típica do ano de operação [R\$/semana]; e

D_{semana} : Número de semanas do ano.

Nessa rede os custos foram calculados a partir de uma semana típica (168 horas), do ano. Os custos foram calculados como a soma dos custos com energia elétrica durante uma semana de operação mais os custos referentes aos vazamentos durante o mesmo período, conforme Equação 4.13.

$$C_{\$semana} = (D_{ener} \times P_{m\acute{a}x}) + \sum_{i=1}^{168} (P_{(i)} \times C_{ener(i)}) + (Vol_{(i)} \times C_{vol(i)}) \quad (4.13)$$

Onde:

$C_{\$semana}$: é o custo total durante uma semana típica do ano [R\$];

$P_{(i)}$: é a potência consumida na hora (i) [kwh];

$C_{ener(i)}$: é o custo de energia elétrica durante a hora (i) [R\$/kwh];

D_{ener} : Custo com demanda de energia elétrica [R\$/kW];

$P_{m\acute{a}x}$: potência máxima observada na semana [kW];

$Vol_{(i)}$: é o volume de água perdida na hora (i) [m³]; e

$C_{vol(i)}$: é o custo de produção de água na hora (i) [R\$/m³].

As tarifas consideradas para os custos de energia elétrica e volume de água perdida foram os mesmos considerados para a rede Anytown, apresentados na Tabela 4.4.

Uma mudança em relação a forma de avaliar o cenário dos vazamentos foi implementada na rede D-Town. Ao invés de pré-selecionar valores do coeficiente de emissão, como realizado na rede Anytown, que segue os coeficientes apresentados na Tabela 4.2, nesta foram estabelecidos coeficientes de modo que se alcançasse percentuais de vazamento desejados. Dessa forma, os cenários nos quais avaliou-se os vazamentos da rede D-Town foram simulados atribuindo índices de vazamentos de 25%, 28% e 30%, próximo de valores observados em regiões do Brasil (SNIS, 2019).

A rede D-Town foi também utilizada para a implementação das medidas de eficiência propostas, das quais posteriormente foram avaliadas do ponto de vista operacional e dos custos.

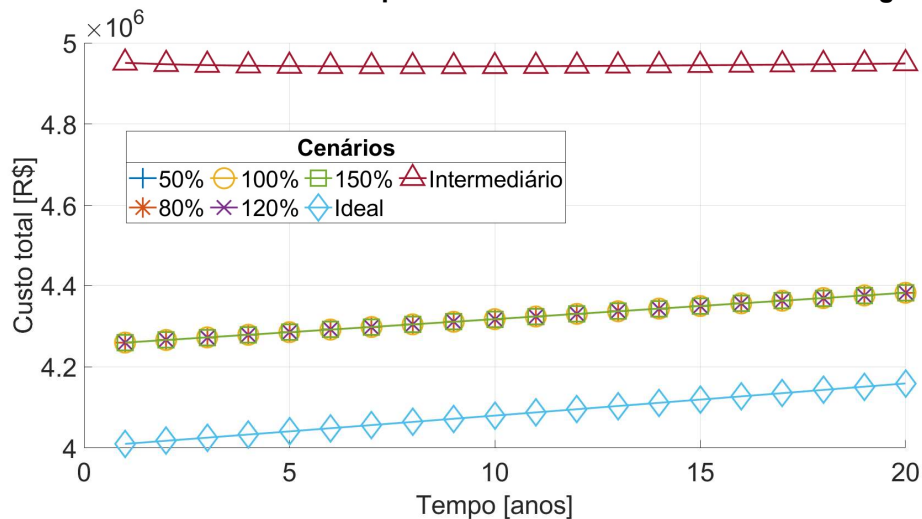
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Rede Anytown

5.1.1 Rugosidade das tubulações

A Figura 5.1 apresenta os custos totais anuais para cada taxa de aumento da rugosidade das tubulações avaliada, além dos cenários ideal e intermediário. A sobreposição das linhas para as diferentes taxas de aumento da rugosidade das tubulações indica que suas variações não interferem diretamente nos custos operacionais desta rede na forma como foram considerados. Isso se deve pois a alteração da rugosidade das tubulações não altera diretamente o ponto de operação da bomba. Contudo, essa alteração muda a curva de perda de carga da rede e pode comprometer a eficiência operacional da estação elevatória.

Figura 5.1 – Custos totais anuais para diferentes taxas de aumento da rugosidade



Comparando os custos dos diferentes cenários de rugosidade com os cenários ideal e intermediário, observa-se que:

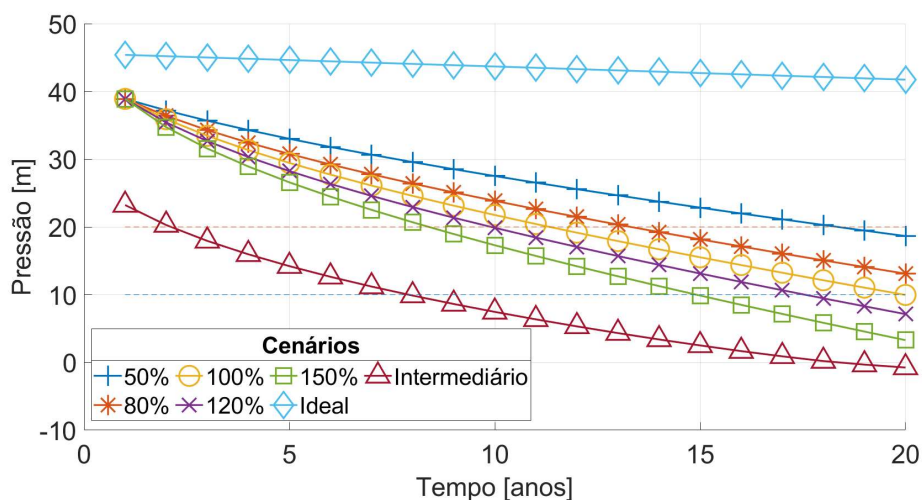
- Mesmo não sendo observadas variações diretas nos custos para as diferentes taxas de aumento da rugosidade, quando este cenário é comparado com o cenário ideal observa-se um aumento no valor de operação de aproximadamente 5%.
- Comparado ao cenário intermediário, os custos se mostram inferiores, com valores aproximadamente 12% menores a cada ano de operação.

- O aumento dos custos anuais, visto pela inclinação crescente das curvas, deve-se ao maior volume bombeado pelo aumento da demanda populacional, considerado em todos os cenários.

Mesmo que as mudanças na rugosidade não alterem diretamente o ponto de operação da bomba, devido à simulação hidráulica ser guiada pela demanda, as pressões operacionais da RDA são modificadas, como se observa na Figura 5.2. Na prática, seria necessária a alteração do ponto operacional da bomba ou a operação de outra, para regularizar as pressões na RDA, o que alteraria os custos operacionais.

Na Figura 5.2 são apresentadas as pressões críticas da RDA a cada ano durante o período de vida útil. A pressão observada no ano inicial é a mesma para todos os cenários. Contudo, para as diferentes taxas de aumento da rugosidade observa-se um impacto mais ou menos significativo no comportamento das pressões ao longo do tempo. No cenário com a taxa média utilizada (ref: 100% = 0,09448 mm/ano), observa-se que a pressão crítica na RDA alcança o valor de 20 mca no 11º ano e 10 mca no 20º ano de operação. Quando a taxa de aumento da rugosidade é 50% maior que o valor médio (150% = 0,141732 mm/ano), pior cenário considerado, observa-se que a pressão de 20 mca é alcançada no 8º ano e a de 10 mca no 15º ano de operação, mais cedo em relação ao cenário médio. Quando se analisa o melhor cenário, com a taxa de aumento da rugosidade 50% menor que o valor médio (50% = 0,047244 mm/ano), observa-se que a pressão de 20 mca é alcançada somente no 18º ano e a pressão de 10 mca não é alcançada dentro do período de vida útil considerado.

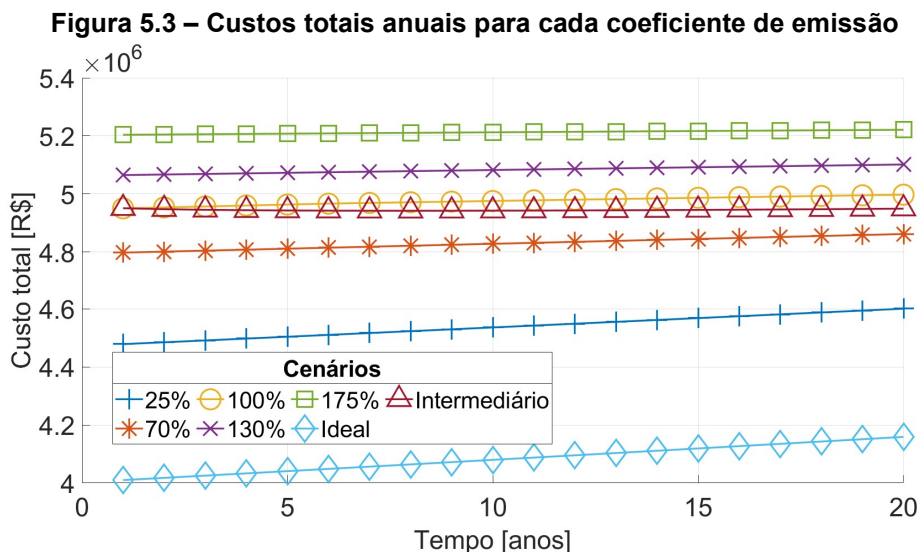
Figura 5.2 – Pressões críticas para cada taxa de aumento da rugosidade



Apesar dos custos operacionais se manterem semelhantes para as diferentes taxas de aumento da rugosidade, observa-se que após certos períodos de tempo a rede já não opera adequadamente, com pressões abaixo da mínima necessária para o abastecimento. Isso ocorre mais cedo quanto maior for a taxa de aumento da rugosidade das tubulações. Quando o aumento da rugosidade é somado a deterioração de outros parâmetros, como observado no cenário intermediário, a queda de pressão na rede é ainda mais proeminente.

5.1.2 Quantidade de vazamentos

Na Figura 5.3 são apresentados os custos totais a cada ano para o cenário onde avaliou-se as alterações do coeficiente de emissão. Nota-se que os custos operacionais são impactados de maneira significativa, apresentando os maiores valores totais observados entre todos os cenários avaliados neste trabalho. Isso se deve ao fato que, além de aumentar o volume de água perdida pelos diferentes coeficientes de emissão, altera-se consideravelmente o ponto de operação da bomba devido à maior demanda da rede.



Comparando os cenários onde foram alterados os coeficientes de emissão com os cenários ideal e intermediário observa-se que:

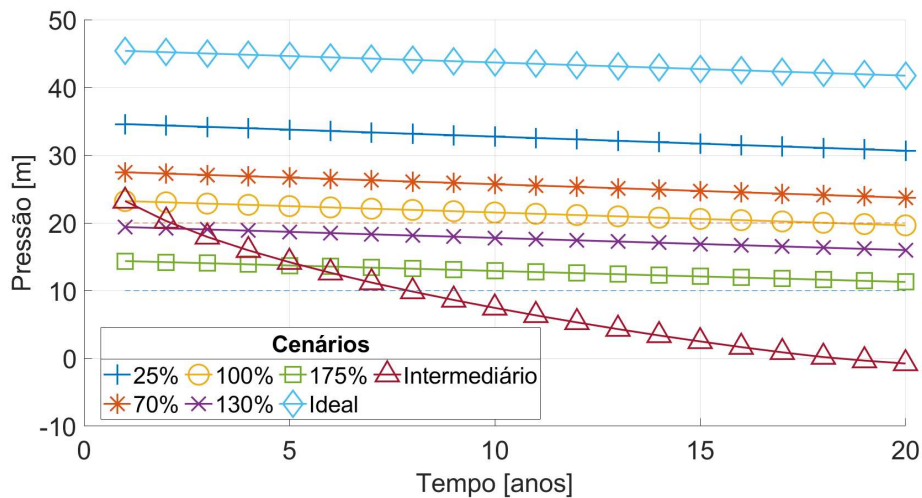
- Todos os cenários em que se avaliou os diferentes coeficientes de emissão apresentaram custos maiores que o cenário ideal, com valores percentualmente maiores entre 12% e 30% anualmente.
- Visto que dos 6 cenários onde avaliou-se os coeficientes de emissão, 3 deles apresentaram custos maiores que o cenário intermediário, onde além dos

vazamentos outros fatores também são contabilizados, pressupõe-se que a perda de água na rede é um dos principais fatores em termos de custo operacional.

- Em todos os cenários os custos permanecem crescentes ao longo do tempo, são maiores para os maiores coeficientes de emissão e menores para os menores coeficientes de emissão. Este aumento deve-se ao crescimento populacional e do índice mínimo de vazamentos da rede, que são considerados em todos os cenários.

As pressões críticas observadas sofrem variações significativas entre cada um dos cenários avaliados, conforme Figura 5.4. Essa diferença de pressão se deve a maior demanda da rede onde os coeficientes de emissão são maiores. As pressões críticas observadas no ano inicial variam de 14,37 mca para 34,59 mca, sendo respectivamente o pior e melhor cenários avaliados. Em todos os cenários se observa uma ligeira queda de pressão ao longo do tempo, que se deve ao crescimento populacional e do índice de vazamentos mínimos.

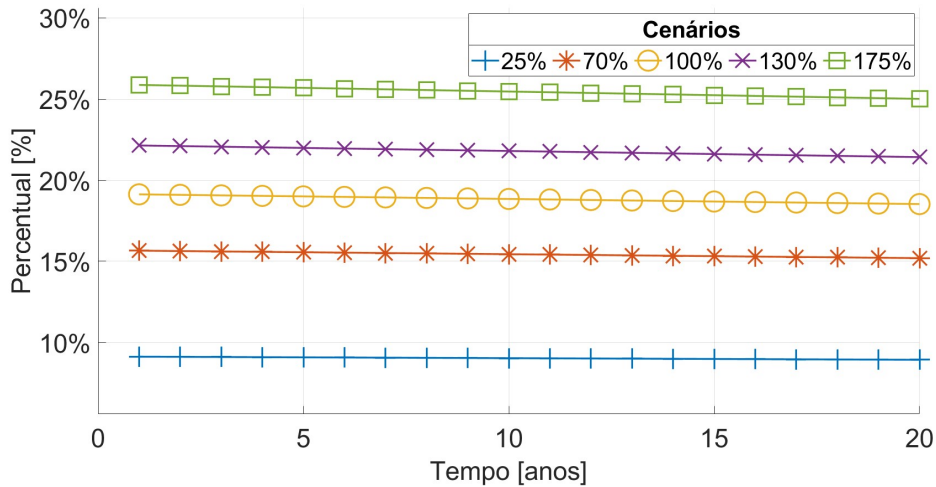
Figura 5.4 – Pressões críticas a cada ano para os diferentes coeficientes de emissão



O percentual de vazamentos na RDA sofre alterações significativas para cada um dos coeficientes de emissão avaliados, conforme observa-se na Figura 5.5. Nos extremos, para o coeficiente de emissão igual 0,875 (175% do valor de referência) o percentual de vazamentos observado está em torno de 25,5%, e, para o coeficiente de emissão igual a 0,125 (25% do valor de referência) o percentual de vazamentos observado é da ordem de 9,0%. Devido a diminuição de pressão na rede observada ao longo da

vida útil, conforme visto na Figura 5.4, o percentual de vazamentos apresenta um ligeiro decréscimo com o tempo.

Figura 5.5 – Percentual de vazamentos a cada ano para os diferentes coeficientes de emissão



A Tabela 5.1 apresenta o percentual de vazamentos médio na RDA para cada um dos cenários avaliados. Ressalta-se que os valores dos coeficientes de emissão utilizados geraram índices de vazamentos menores que a média nacional de 39,2 % (SNIS, 2019).

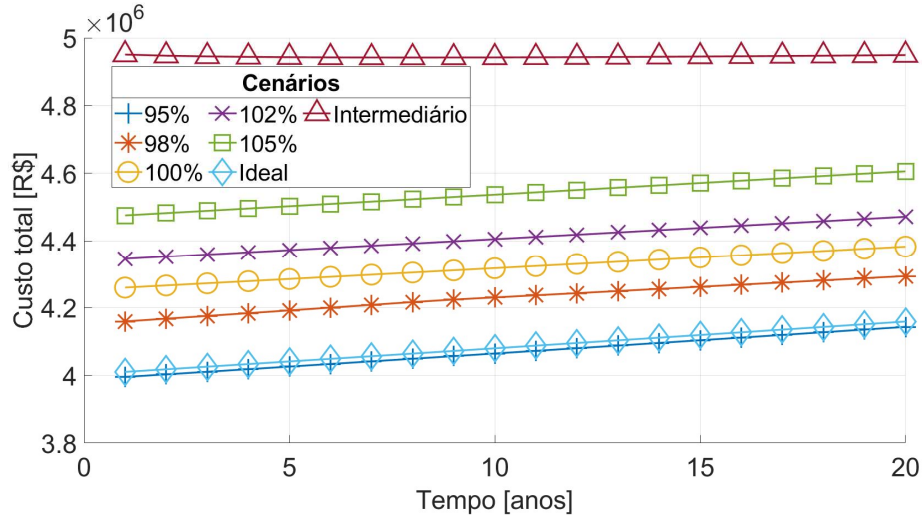
Tabela 5.1 – Percentuais de vazamento para cada cenário de vazamentos avaliado

	Coeficientes de descarga C				
	25%	70%	Ref=100%	130%	175%
Alterações	25%	70%	Ref=100%	130%	175%
Coeficientes	0,125	0,350	0,50	0,650	0,875
Índice de perdas	9,0%	15,4%	18,9%	21,8%	25,5%

5.1.3 Demanda de consumo

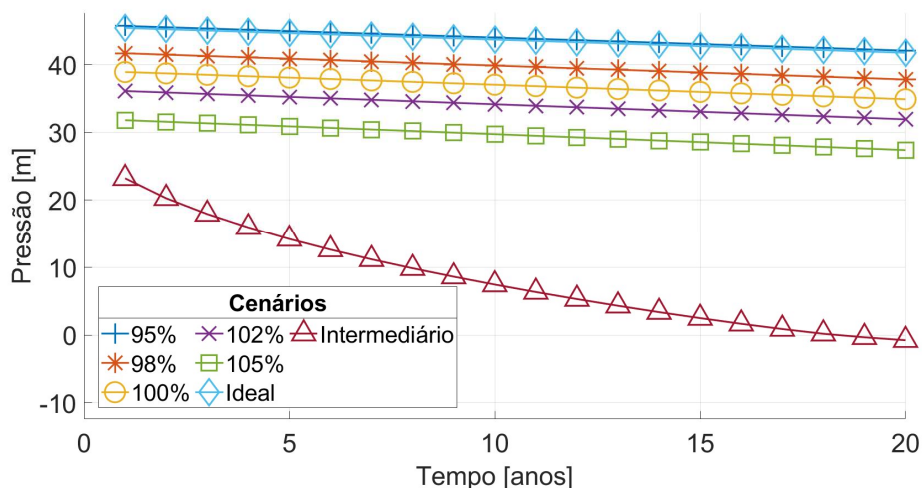
A Figura 5.6 apresenta os custos totais a cada ano para os diferentes percentuais de crescimento populacional e dos cenários ideal e intermediário. O comportamento observado nas curvas é equivalente às variações dos percentuais de crescimento populacional. Quando a população cresce com um percentual maior, os custos totais também crescem e as pressões críticas são menores durante a operação da RDA, conforme ilustra a Figura 5.7. Quando a população cresce com um percentual menor, os custos totais também são menores e as pressões críticas são maiores. Nota-se também que todos os cenários apresentam custos maiores que o cenário ideal, indicando como esperado, que o aumento do consumo eleve os custos de operação.

Figura 5.6 – Custos totais anuais para os diferentes percentuais de crescimento populacional



A diferença de pressão operacional para cada percentual de crescimento é significativa, com diferença de valores máximos alcançando 15 mca. Essas incertezas do crescimento populacional podem acarretar em diferentes formas de operar a RDA ao longo da vida útil. Contudo, em relação a outros parâmetros avaliados, essa demanda apresenta um impacto relativamente pequeno. Além disso, o crescimento populacional é algo que foge ao controle dos gestores das RDA e deve ser estimado adequadamente durante a construção ou expansão das redes. Ressalta-se ainda que neste trabalho não foi considerada a expansão territorial devido ao aumento da população, o que poderia alterar significativamente a topologia da rede.

Figura 5.7 – Pressões críticas para os diferentes percentuais de crescimento populacional

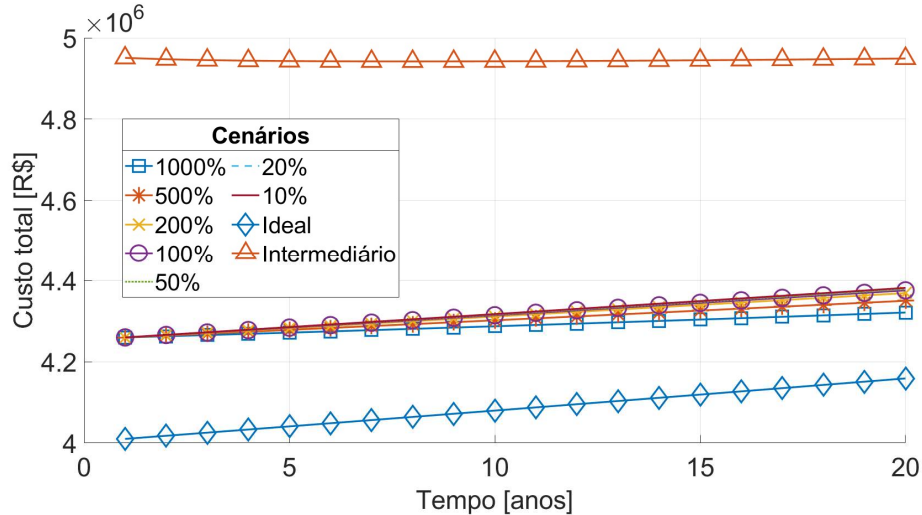


5.1.4 Deterioração da bomba

Os custos totais anuais, durante a vida útil da RDA, para cada cenário onde houve a alteração das taxas com que a bomba se deteriora são apresentados na Figura 5.8.

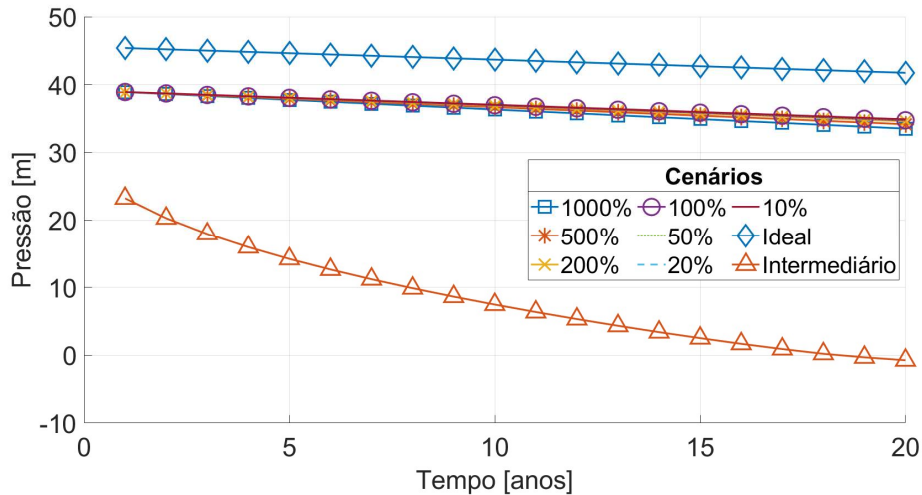
De forma contrária ao que intuitivamente seria esperado, a medida com que as taxas de deterioração da bomba aumentam, os custos operacionais apresentam uma ligeira queda.

Figura 5.8 – Custos totais anuais para as diferentes taxas de deterioração da bomba



O comportamento observado se deve ao fato que, conforme a taxa de deterioração da bomba aumenta, de acordo com a formulação utilizada, há uma diminuição da sua altura manométrica, e conseqüentemente a potência requerida para uma mesma vazão é menor, o que resulta em um menor consumo de energia. Entretanto, como a carga hidráulica fornecida é menor, as pressões críticas da rede devem ser verificadas para garantir o abastecimento. Além disso, a deterioração da bomba pode gerar falhas no abastecimento devido a outros problemas mecânicos causados por seu desgaste. A Figura 5.9 apresenta as pressões críticas na RDA para cada taxa de deterioração da bomba juntamente com os cenários ideal e intermediário. Observa-se que as pressões críticas em todos os cenários diminuem com o tempo, sendo mais impactadas com o aumento da taxa de deterioração. O fato de considerar a deterioração da bomba faz com que a pressão na rede nestes casos sejam sempre menores que o cenário ideal.

Figura 5.9 – Pressão crítica para as diferentes taxas de deterioração da bomba



Contudo, apesar de haver pequenas variações nas pressões críticas observadas nos cenários propostos, com a metodologia e taxas adotadas para deterioração da bomba neste trabalho, essas alterações são pouco expressivas para o tempo considerado, ou seja, o impacto do desgaste das bombas na rede só será significativo caso haja uma falha mecânica que impeça sua operação.

5.1.5 Avaliação entre os cenários de referência

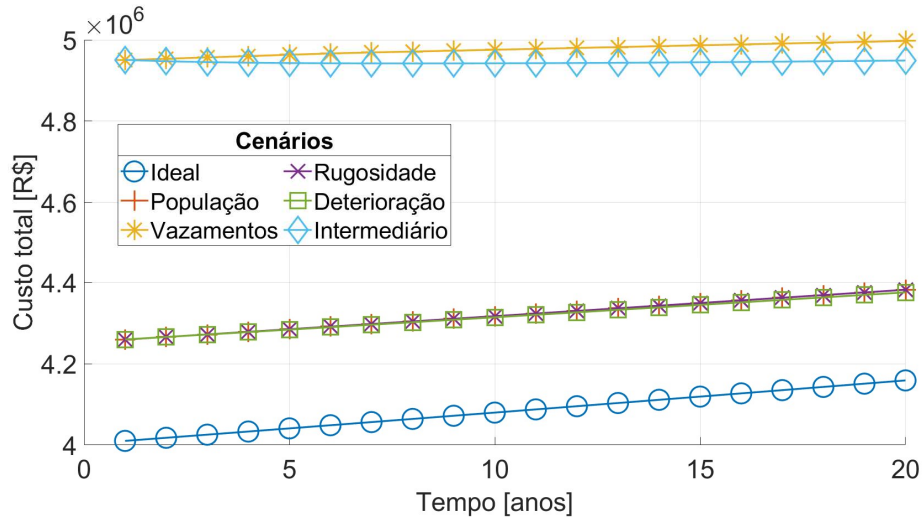
Observando os custos totais anuais para cada um dos cenários de referência, conforme Figura 5.10, evidencia-se de forma clara que os cenários onde são considerados os vazamentos (“Vazamentos” e “Intermediário”), apresentam maiores valores nos custos operacionais. A perda de água pelos vazamentos gera custo extra na sua produção, além de alterar o ponto de operação da bomba, tornando-a menos eficiente para aquela rede.

Os valores dos custos totais para os cenários “Rugosidade”, “População” e “Deterioração” apresentam valores semelhantes. Entretanto, ressalta-se que a deterioração das tubulações e das bombas podem gerar outros custos devido a falhas do seu envelhecimento, que não são considerados neste trabalho.

Os custos totais anuais no cenário onde foram avaliados os vazamentos são aproximadamente 14% maiores do que os cenários onde foram avaliados a rugosidade das tubulações, o crescimento populacional e a deterioração da bomba, e 22% maiores do que o cenário ideal de referência. Esses dados enfatizam o quão importante são intervenções que busquem reduzir as perdas de água em redes.

Os custos totais anuais nos cenários onde foram avaliados a rugosidade das tubulações, o crescimento populacional e a deterioração da bomba são aproximadamente 7% maiores que os custos do cenário ideal de referência. Esse aumento percentual nos custos se deve principalmente as perdas de água mínimas consideradas em todos os cenários.

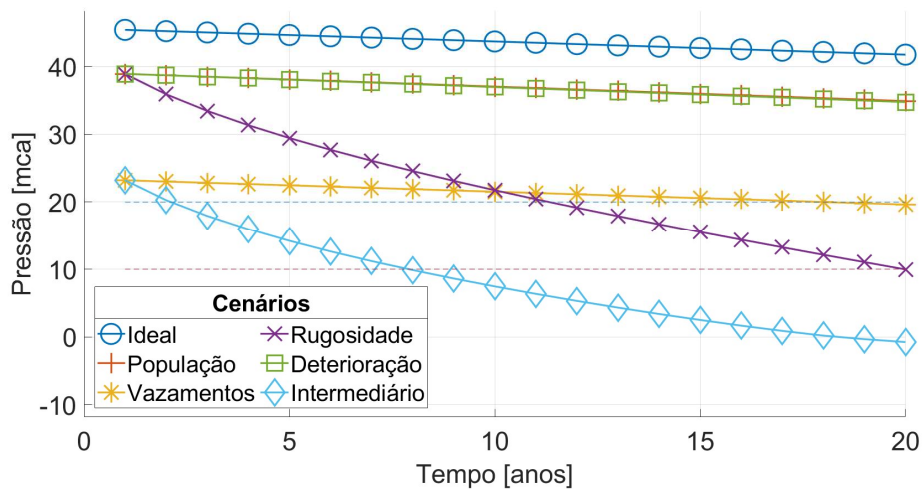
Figura 5.10 – Custos totais anuais para cada cenário de referência avaliado na rede Anytown



As pressões críticas a cada ano apresentadas na Figura 5.11 mostram que os cenários onde são considerados o aumento da rugosidade das tubulações (“Rugosidade” e “Intermediário”), são os mais afetados hidraulicamente. Em todos os cenários um decréscimo da pressão é observado ao longo do tempo, entretanto ele é mais expressivo nos cenários em que cresce a rugosidade das tubulações, o que aumenta a perda de carga da rede.

No cenário intermediário, a soma dos fatores: aumento da demanda de consumo, dos vazamentos, da rugosidade das tubulações e a deterioração da bomba, faz com que sejam observadas as menores pressões dentre todos os cenários. Neste caso onde foram utilizados os valores de referência, observa-se que a pressão decresce até o valor de 20 mca no 2º ano de operação e até 10 mca no 8º ano. Esses dados mostram que a RDA inevitavelmente necessitaria de intervenções para que continuasse a atender a demanda dos consumidores.

Figura 5.11 – Pressões críticas anuais para cada cenário de referência avaliado na rede Anytown



Ao comparar o cenário “Rugosidade” com o “Vazamentos”, observa-se que num primeiro momento o mais alto valor do índice de vazamentos da rede traz um maior impacto em termos de pressão. Contudo, dada a taxa de crescimento da rugosidade das tubulações, esse impacto é alterado no longo prazo. Em aplicações práticas nas RDA reais, o impacto das duas alterações ocorre de forma simultânea, sobrepondo os efeitos e gerando os valores vistos no cenário “Intermediário”.

O decréscimo de pressão semelhante que é observado nos cenários em que não são considerados o aumento da rugosidade das tubulações decorre do aumento do consumo e dos vazamentos mínimos, que são considerados em todos os cenários.

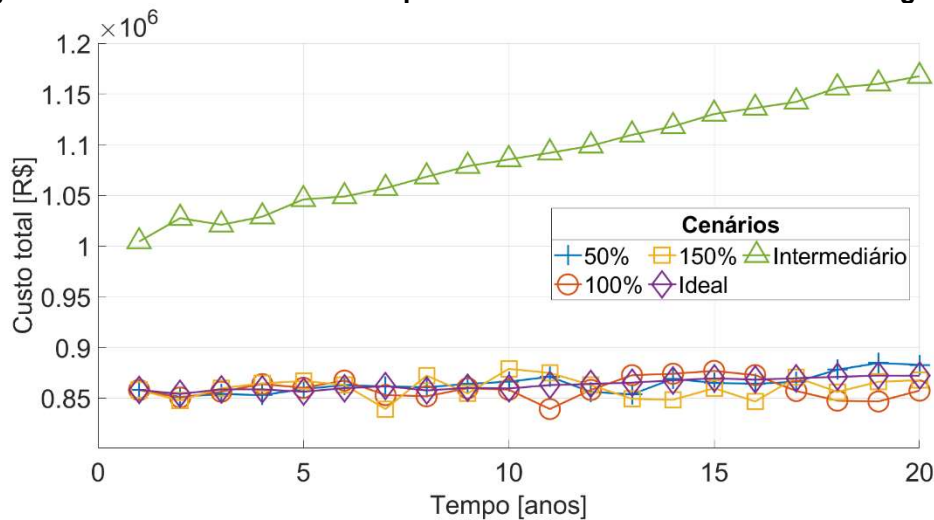
5.2 Rede D-Town

5.2.1 Rugosidade das tubulações

A Figura 5.12 apresenta os custos totais anuais para cada taxa de aumento da rugosidade comparados aos cenários ideal e intermediário. Observa-se que as diferentes taxas de aumento da rugosidade não alteram significativamente os custos de operação de forma direta, assim como no caso da rede Anytown. Contudo, a curva de perda de carga do sistema é alterada e modificações no ponto operacional das estações elevatórias deverão ser realizadas para manutenção das pressões mínimas durante o funcionamento da rede, como se observa nas pressões críticas apresentadas na Figura 5.13.

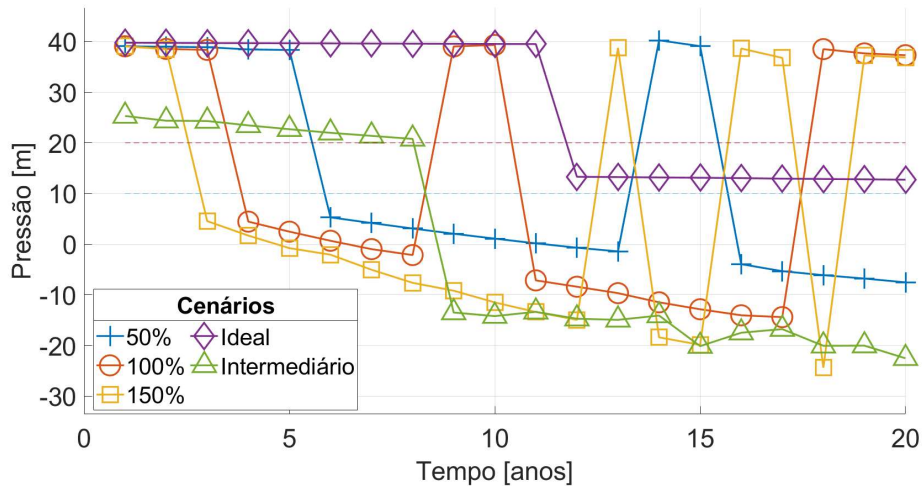
Os custos para as diferentes taxas de rugosidade comparados ao cenário intermediário são aproximadamente 15% menores no início da vida útil e 27% menores ao fim, sugerindo que outros fatores abordados no cenário intermediário alteram diretamente os custos operacionais da forma como foram considerados. Entretanto, cabe salientar que com a deterioração das tubulações cresce o risco de falhas estruturais podendo ocasionar grandes vazamentos e interrupções do abastecimento. Apesar das falhas estruturais serem questões tão relevantes quanto a deterioração funcional das tubulações, na metodologia abordada neste trabalho essas incertezas não foram contabilizadas.

Figura 5.12 – Custos totais anuais para diferentes taxas de aumento da rugosidade



Na Figura 5.13 podemos observar que em todos os cenários a pressão crítica inicia a sua vida útil em valores acima dos 20 mca. Contudo, devido ao aumento da rugosidade e conseqüente crescimento da perda de carga do sistema, a pressão nos nós tende a reduzir com a passagem do tempo.

Figura 5.13 - Pressões críticas a cada ano para as diferentes taxas de aumento da rugosidade



Analisando as curvas das pressões críticas a cada ano apresentadas na Figura 5.13 ressalta-se que:

- Assim como na rede Anytown, quanto maior for taxa de aumento da rugosidade, menores são as pressões observadas na rede e mais cedo elas são evidenciadas em termos da sua vida útil. Na prática, isso exige intervenções na rede mais cedo para garantia do atendimento da demanda a população consumidora.
- Devido a dinamicidade das RDA, além da rede D-Town apresentar um porte maior que a rede Anytown, com diversos tanques, válvulas e bombas, mudanças abruptas nas pressões são observadas nas curvas da Figura 5.13. Essas mudanças aparecem pois as curvas são plotadas considerando o valor da pressão crítica no mesmo horário de funcionamento em cada período de simulação. Assim, mesmo observando certas tendências no comportamento das curvas, essas alterações abruptas aparecem nas variações sazonais da RDA.
- As mínimas pressões críticas observadas nos cenários onde houveram as mudanças de taxas de aumento da rugosidade das tubulações em comparação com o cenário intermediário são semelhantes. Isso sugere, como foi observado também na rede Anytown, que o aumento da perda de carga do sistema devido ao aumento da rugosidade é um dos principais fatores que interferem nas

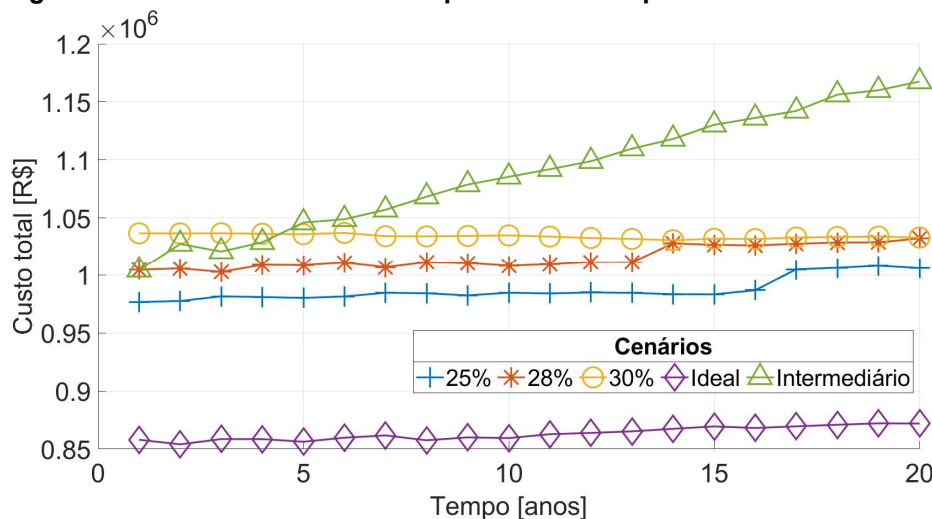
pressões de operação da rede. Avaliando de outra forma, é mais fácil manter as pressões adequadas de operação em uma RDA que possua tubulações novas com baixos valores de rugosidade e ofereçam menos resistência a distribuição de água.

5.2.2 Quantidade de vazamentos

Os custos totais anuais para três diferentes percentuais de vazamento da rede D-Town, junto com os cenários ideal e intermediário são apresentados na Figura 5.14. Observa-se que em todos os cenários onde os vazamentos são considerados, assim como na rede Anytown, os custos são maiores em relação ao cenário ideal. Em termos percentuais, os custos totais anuais para cada um dos cenários foram 14%, 16% e 21% maiores que o cenário ideal.

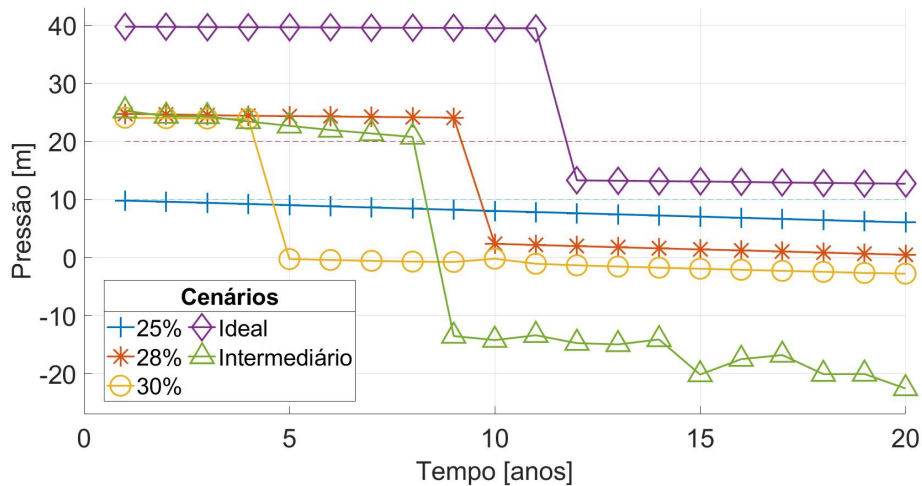
Com os percentuais de vazamento aproximadamente constantes temos custos operacionais também constantes, sendo maior tanto quanto for o percentual dos vazamentos. Contudo, quando o percentual médio de vazamentos da rede (28%), soma-se a deterioração de outros parâmetros da rede, como no cenário intermediário, os custos permanecem ascendentes ao longo da vida útil.

Figura 5.14 – Custos totais anuais para diferentes percentuais de vazamento



Em relação as pressões críticas, vemos na Figura 5.15 que para uma rede desse porte os vazamentos têm impactos significativos também nas pressões. São observados valores baixos, os quais demandam intervenções imediatas para atendimento do abastecimento.

Figura 5.15 – Pressões críticas anuais para diferentes percentuais de vazamento



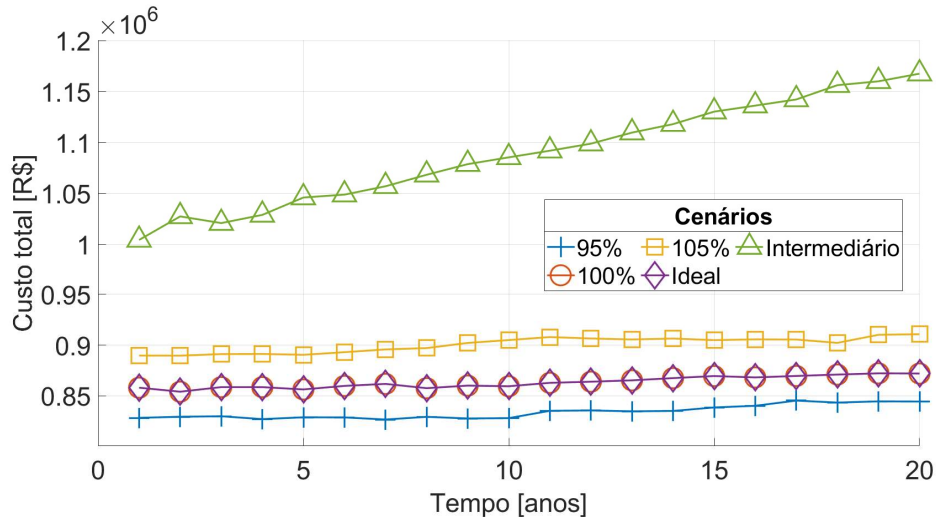
Assim como apresentado no cenário onde avaliou-se a rugosidade das tubulações, as mudanças abruptas observadas nas curvas estão relacionadas a sazonalidade da rede e a forma como o gráfico foi plotado, pois durante a operação os tanques podem não ter capacidade suficiente para manutenção das pressões operacionais devido à grande demanda. Contudo, comparando ao cenário ideal vemos que os valores permanecem sempre inferiores, evidenciando os seus impactos.

Observa-se, assim como nos custos, que os impactos na pressão da rede são maiores quando os percentuais de vazamentos também são.

5.2.3 Demanda de consumo

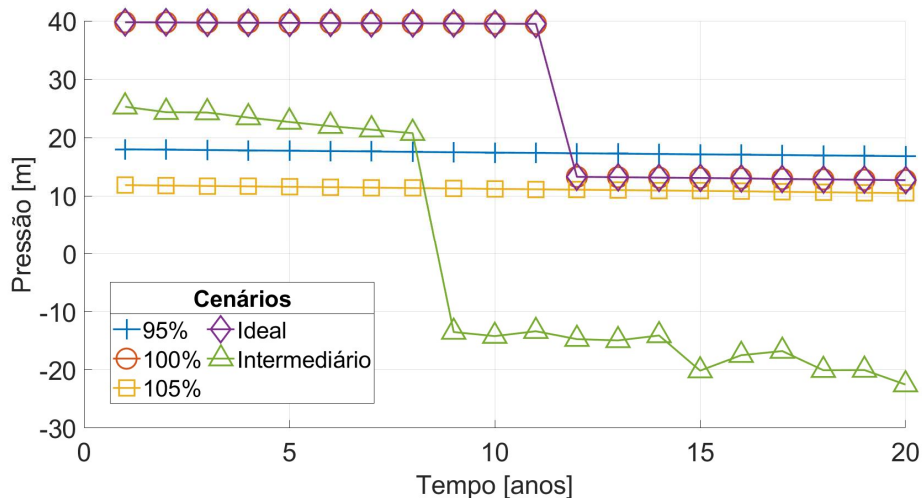
Os custos totais anuais para as diferentes taxas de crescimento populacional são apresentados na Figura 5.16. O impacto do crescimento populacional reflete no consumo que é visto nas curvas dos custos operacionais. Semelhante ao observado na rede Anytown, com taxas maiores de crescimento populacional maiores são os custos de operação.

Figura 5.16 – Custos totais anuais para diferentes taxas de crescimento populacional



Com a pressão crítica nesse cenário observa-se situação semelhante à vista na rede Anytown. Para as taxas de crescimento maiores, menores são as pressões observadas devido ao aumento do consumo. Contudo, o aumento do consumo por si só não é capaz de prejudicar a operação da rede, visto que a pressão crítica da rede se mantém próxima dos valores mínimos exigidos, conforme ilustra a figura 5.17. Ou seja, a deterioração da infraestrutura é a principal causa da possível falta de água aos consumidores.

Figura 5.17 – Pressões críticas anuais para diferentes taxas de crescimento populacional

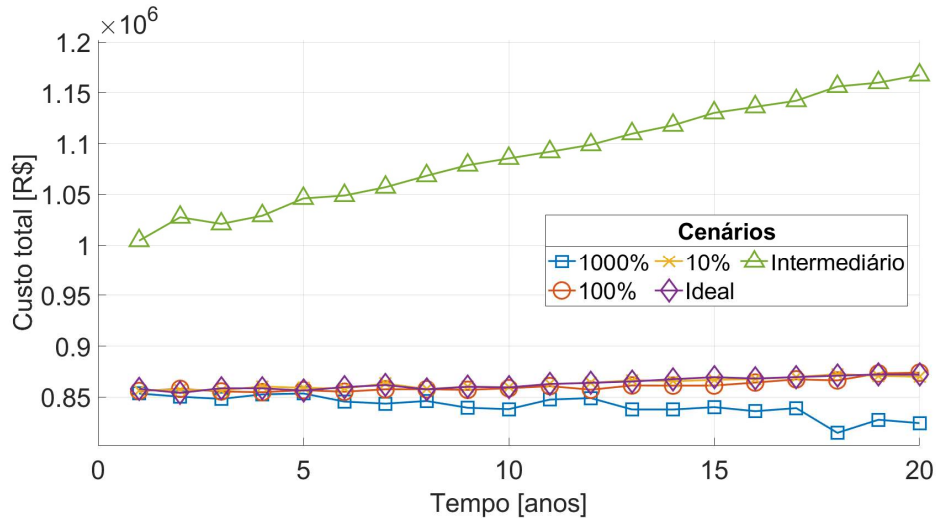


5.2.4 Deterioração da bomba

Os custos totais anuais no cenário em que se avaliou as diferentes taxas de deterioração das bombas são apresentados na Figura 5.18. Observa-se um comportamento semelhante ao apresentado na rede de pequeno porte devido a forma

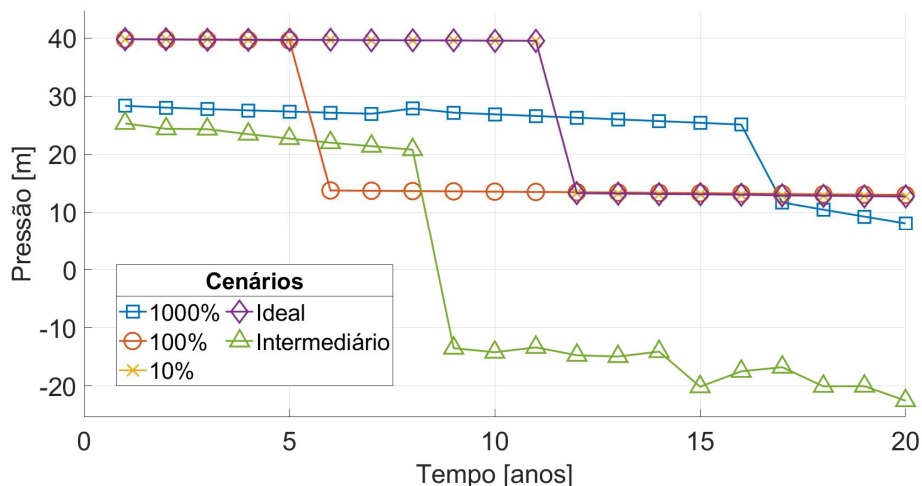
como a simulação da deterioração das bombas reflete no decréscimo de sua altura manométrica, gerando uma pequena queda dos custos operacionais. Contudo, assim como mencionado anteriormente, a deterioração dos equipamentos pode gerar falhas mecânicas que interrompem o abastecimento. Além disso, a soma da deterioração das bombas com a alteração de outros parâmetros causa um claro aumento nos custos, como pode ser visto na curva do cenário intermediário.

Figura 5.18 – Custos totais anuais para as diferentes taxas de deterioração da bomba



Comparados ao cenário ideal e intermediário, observa-se que os valores das pressões críticas se estabelecem durante a maioria da vida útil da rede dentro de uma faixa de pressões que mantém a continuidade do abastecimento, conforme ilustra a Figura 5.19. Entretanto, assim como no caso dos custos operacionais, o reflexo da deterioração nas pressões aparenta ser sutil quando não se leva em consideração a possibilidade de falha no abastecimento.

Figura 5.19 – Pressões críticas anuais para as diferentes taxas de deterioração da bomba

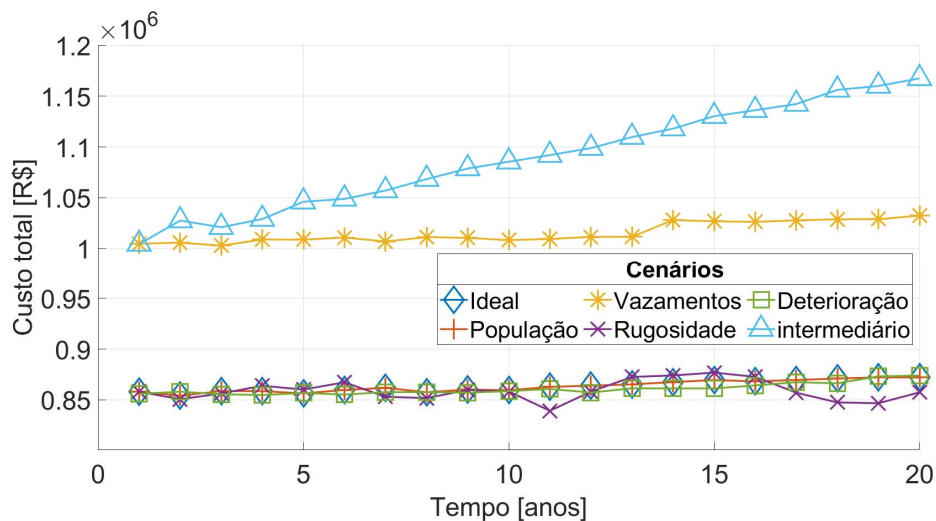


5.2.5 Avaliação entre os cenários de referência

Ao avaliar os custos totais anuais para cada um dos cenários de referência implementados na rede D-Town, Figura 5.20, e depois de ter realizado as simulações individuais das incertezas estudadas, notamos que:

- Os vazamentos manifestam-se como a principal causa do aumento nos custos operacionais totais, o que corrobora com as simulações da rede de menor porte além das observações práticas;
- No caso da rede D-Town, que possui porte maior que a Anytown, a deterioração conjunta de toda a rede avaliada por meio do cenário intermediário foi claramente mais expressiva. Além dos custos serem inicialmente mais altos, são também crescentes no tempo. Isso indica, como se observa na prática, que a manutenção da rede é fundamental para que se mantenha a eficiência em termos de custos além do abastecimento;
- Observando somente os custos operacionais nota-se que os cenários onde foi avaliado a rugosidade das tubulações, a deterioração das bombas e o aumento da demanda pelo crescimento populacional, tiveram valores semelhantes ao longo da vida útil. Apesar de não apresentarem impactos diretos nos custos, como no aumento da demanda pelos vazamentos, ressalta-se que a avaliação das pressões na rede, além de outras questões importantes como eficiência e a sua resiliência devem ser conjuntamente observadas.

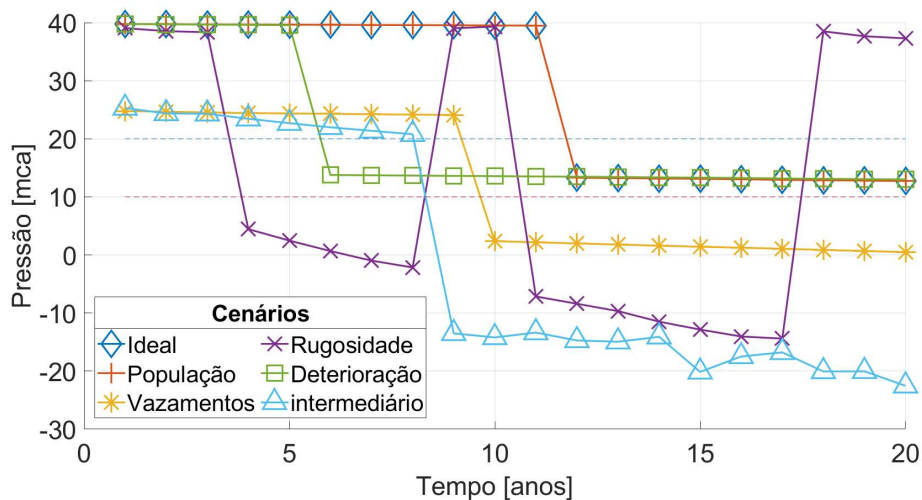
Figura 5.20 – Custos totais anuais para cada cenário avaliado, utilizando os parâmetros médios de referência



Em relação a pressão crítica na rede para os diversos cenários, observa-se que:

- A pressão na rede é impactada de certa forma por todos os cenários avaliados. Contudo, o aumento da perda de carga da rede causada pela maior rugosidade das tubulações apresenta uma alteração mais evidente e com os maiores efeitos. Nos dois cenários onde o aumento da rugosidade é considerado, a pressão alcança valores onde não haveria abastecimento;
- A sobreposição de todos os efeitos, como observado na prática, ocasionam os piores cenários em termos de pressão assim como no caso dos custos operacionais.
- Em aplicações práticas e considerando que os valores atribuídos ao cenário intermediário representam situações aproximadas de redes reais, seriam necessárias intervenções na rede a partir do 9º ano de operação ao avaliar somente as pressões na rede. Isso mostra o quão importante é a realização de medidas de eficiência energética na rede de forma contínua, para manutenção do abastecimento.

Figura 5.21 – Pressões críticas anuais para cada cenário avaliado, utilizando os parâmetros médios de referência

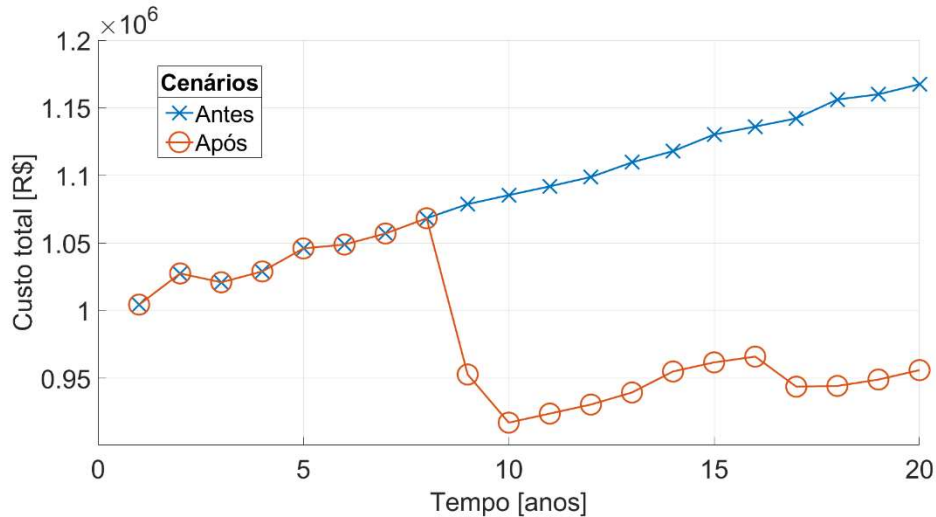


5.3 Adoção de medidas de eficiência energética

5.3.1 Medidas aplicadas ao percentual de vazamentos

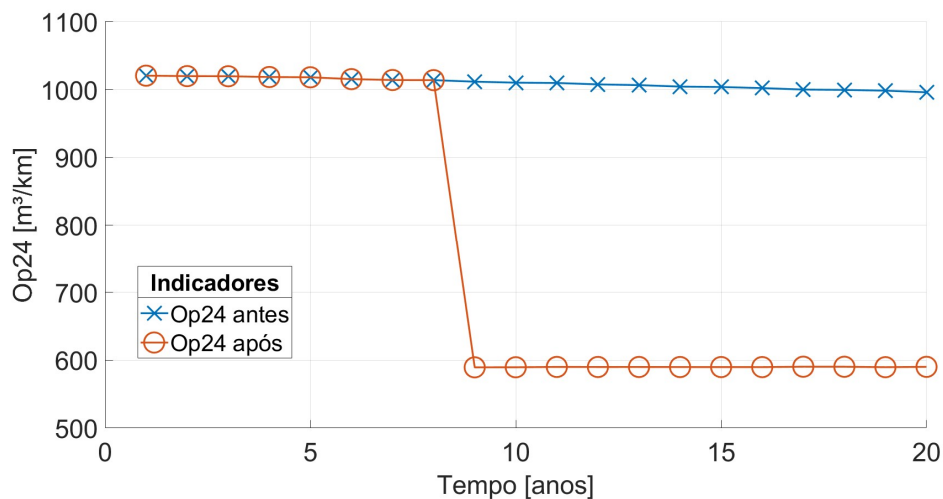
Após a aplicação das medidas de eficiência energética onde o percentual de vazamentos da rede D-Town foi reduzido em 10% a partir do 9º ano de operação, ano em que a pressão mínima requerida passa a não ser mais atendida, claras melhorias são observadas. Os custos totais de operação são reduzidos, com percentual médio da diminuição em 15,8% ao ano, Figura 5.22.

Figura 5.22 – Custos totais para o cenário intermediário antes e após a implementação da redução do percentual de vazamentos.



Para que fossem avaliadas as melhorias decorrentes da implementação da medida, dois indicadores de desempenho foram analisados, o Op24 e o IN058. O indicador de desempenho Op24 da IWA é apresentado a cada ano antes e após a redução do percentual de vazamentos, como mostra a Figura 5.23. Este representa o volume de água perdido em m^3 a cada quilômetro da rede. Após a implementação da redução dos vazamentos, o indicador apresenta uma queda da ordem de 40%. Esse valor representa uma economia de $400 m^3$ por quilômetro de rede a cada ano.

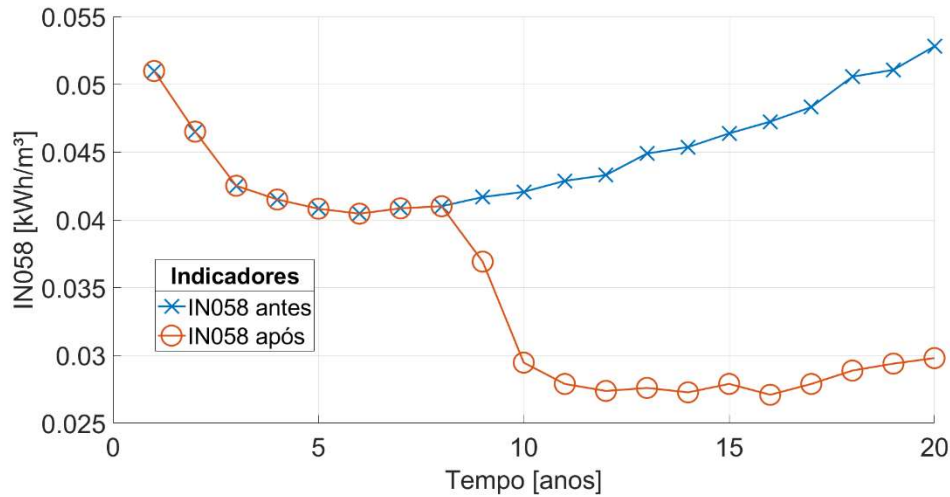
Figura 5.23 – Indicador Op24 da IWA a cada ano de operação antes e depois da aplicação das medidas



O indicador de desempenho IN058 do SNIS é apresentado na Figura 5.24 a cada ano antes e após a redução do percentual de vazamentos. Este indica a potência em kWh consumida na rede para que seja bombeado $1 m^3$ de água. Além da redução

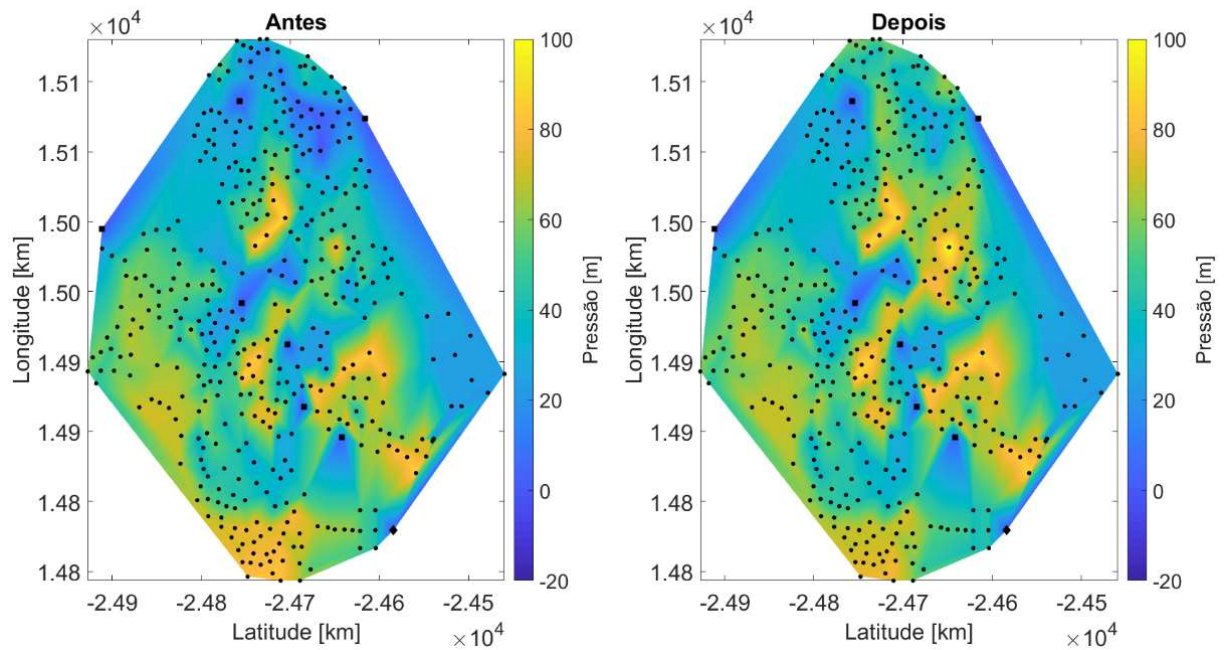
observada em todos os anos, a potência economizada apresenta tendência crescente, com uma economia de 42% no final da vida útil da rede.

Figura 5.24 – Indicador IN058 do SNIS a cada ano de operação antes e depois da aplicação das medidas



A medida de eficiência aplicada aos vazamentos não tinha como enfoque controlar as pressões da rede, mas deixá-las acima de um nível aceitável para o abastecimento (10 mca) e diminuir o percentual de vazamentos. Por isso, alguns pontos da rede apresentaram pressões excessivamente altas. Contudo, os valores apresentados no mapa de pressões antes e depois da redução dos vazamentos, Figura 5.25, também indicam melhorias. Comparando os mapas antes e depois na mesma hora (hora de maior consumo), verifica-se que alguns nós da região norte que apresentavam pressões mais baixas (cor azul escuro), tiveram elevações nas pressões (azul/verde claro), deixando-as dentro de faixas de pressões adequadas para o abastecimento. No mapa, os pontos circulares em preto representam os nós de consumo da RDA, os quadrados representam os reservatórios de nível variável e a forma em losango representa o reservatório de nível fixo, que abastece a rede.

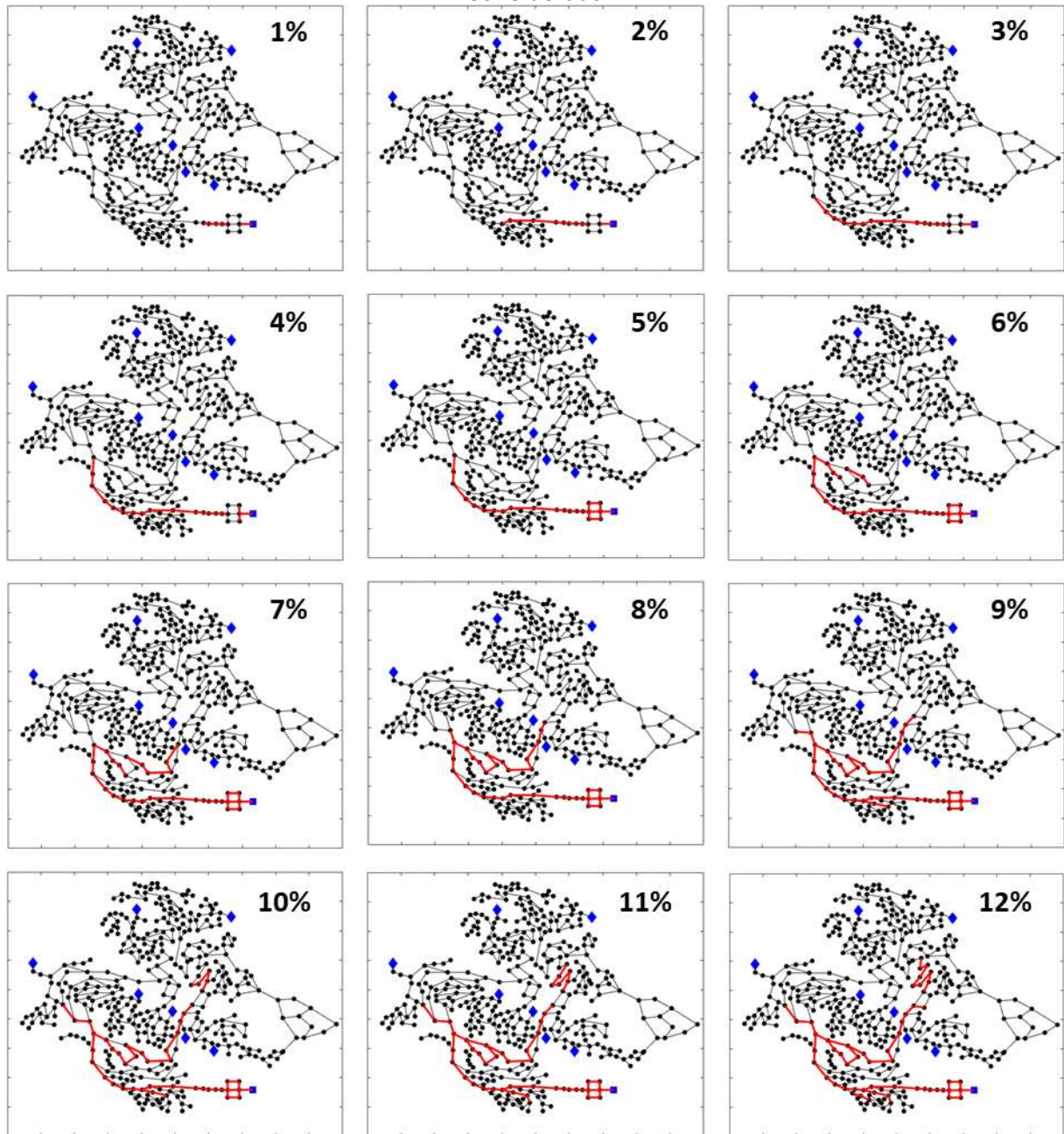
Figura 5.25 – Mapa de pressões na rede antes e depois da redução do percentual de vazamentos



5.3.2 Medidas aplicadas na rugosidade das tubulações

Conforme mencionado, a reabilitação da rede foi realizada a uma taxa de 1% ao ano em termos de comprimento partindo da rede troncal. A Figura 5.26 apresenta em destaque o caminho de reabilitação da rede realizada a cada ano. Observa-se que o abastecimento da rede é realizado de um único reservatório de nível fixo mostrando que nesse caso, o principal caminho do fluxo segue a partir deste reservatório.

Figura 5.26 – Trechos de rede rehabilitada em cada ano de operação até o fim da vida útil considerada

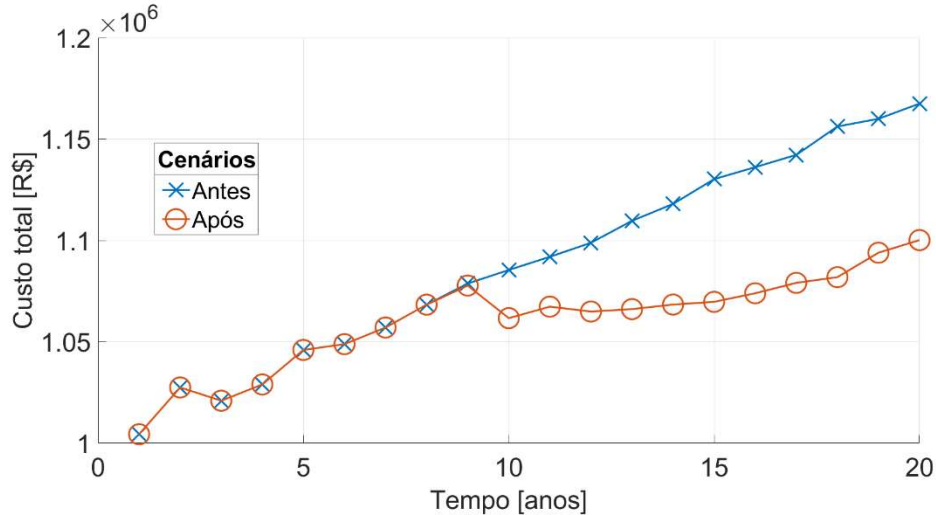


Ao comparar o cenário intermediário antes e após a implementação da reabilitação das tubulações no 9º ano notamos benefícios significativos. Em termos dos custos totais de operação, nota-se na Figura 5.27 que a partir do início de aplicação da medida há uma redução nos custos que variou de 2% a 6%. Como a reabilitação dos tubos é realizada em uma taxa anual observa-se um aumento da diferença nos custos totais no tempo antes e depois da implementação da medida.

Ressalta-se que os benefícios econômicos ao fim da vida útil se deram em uma reabilitação de 12% em termos de comprimento da rede. Contudo, os trechos que

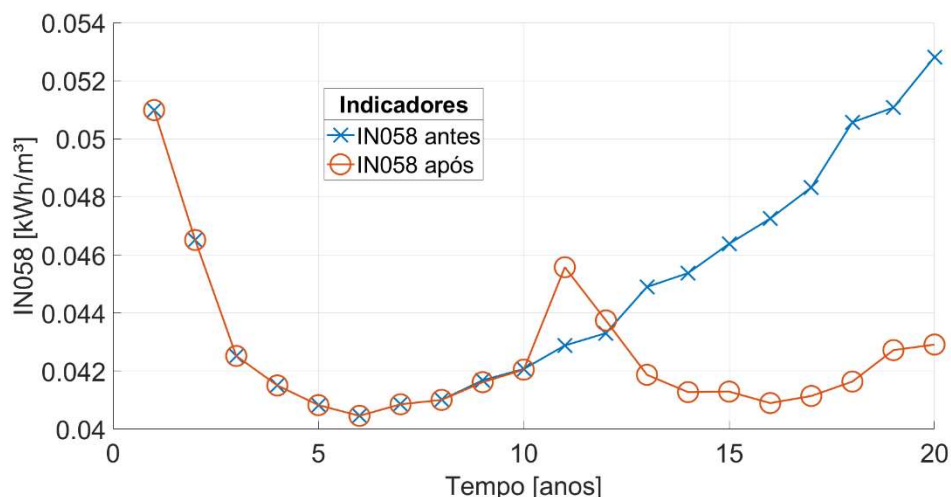
foram reabilitados no primeiro ano de implementação da medida, no 9º ano, ao fim da vida útil da rede já possuíam 12 anos de operação, desse modo já se encontravam com um certo nível de deterioração.

Figura 5.27 – Custos totais para o cenário intermediário antes e após a implementação da reabilitação percentual da rede.



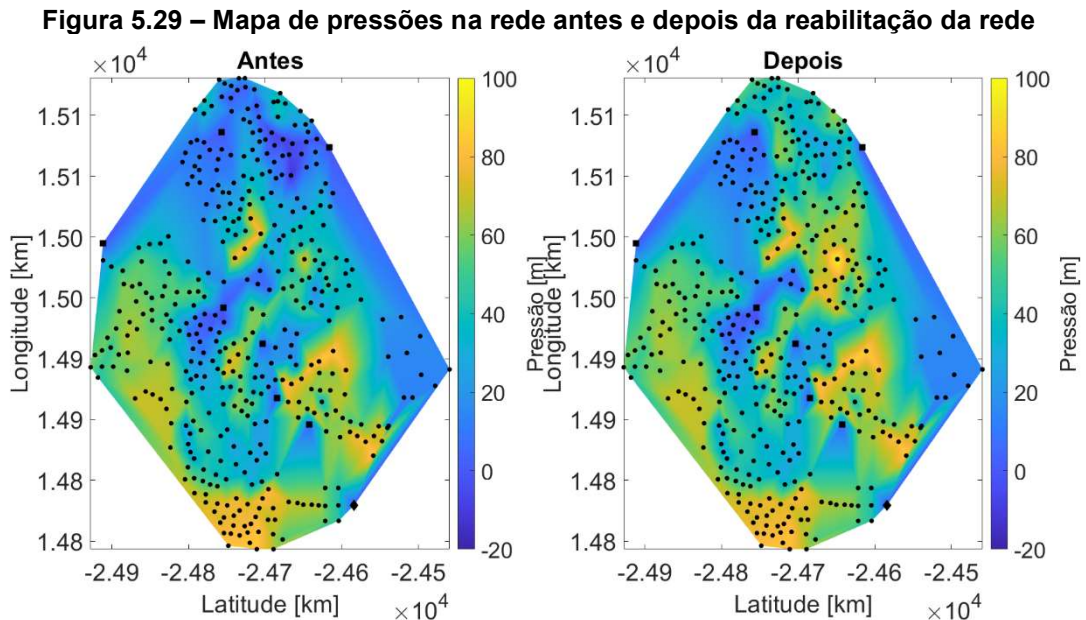
Avaliando o indicador de desempenho IN058 apresentado na Figura 5.28, observa-se uma redução na energia gasta de 2 a 10 Wh a cada m³. Apesar de ser aparentemente uma pequena diferença, para grandes volumes bombeados este pode não ser desprezível, fato esse observado pela diferença dos custos de operação antes e depois da implementação da medida.

Figura 5.28 – Indicador IN058 do SNIS a cada ano de operação antes e depois do início da reabilitação da rede.



Analisando o mapa de pressões da Figura 5.29, antes e depois da reabilitação durante a mesma hora de consumo, nota-se um claro aumento das pressões na região ao

norte. Assim como observado na pressão crítica dos cenários anteriores, o aumento da rugosidade das tubulações, apesar de não ser o único parâmetro, mostra-se como o principal a impactar nas pressões operacionais. Os dados vistos corroboram com o indicativo que podem ser alcançadas melhorias nas pressões operacionais da rede, com a alteração de sua rugosidade, nesse caso por meio da reabilitação.



Ressalta-se ainda que assim como no caso da implementação da redução dos vazamentos, as simulações não tinham como foco manter um bom controle das pressões operacionais da rede, mas sim analisar o impacto das mudanças realizadas. Por isso, alguns nós apresentam pressões relativamente altas, que numa rede real seriam alvos de ações de controle.

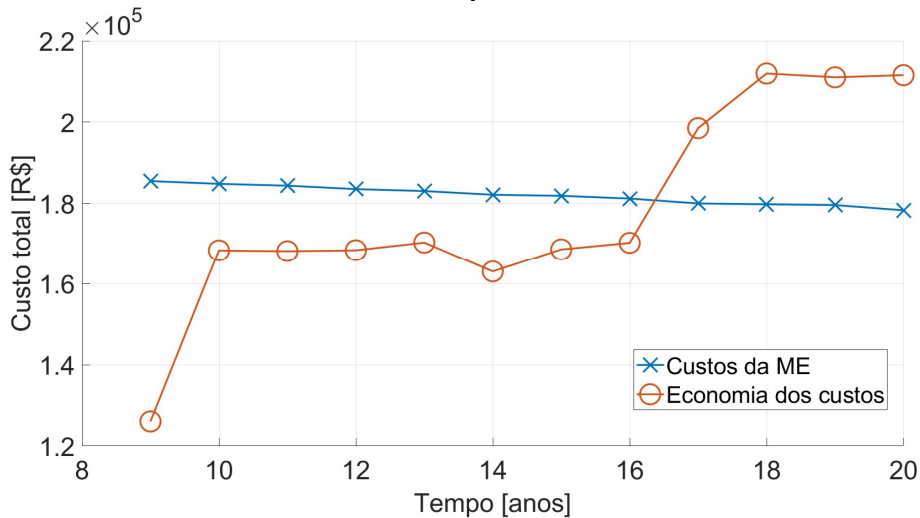
5.4 Análise econômica das medidas de eficiência

5.4.1 Redução dos vazamentos

Ao adotar os valores para implementação da medida de redução dos vazamentos observados no trabalho da (COMISSÃO EUROPEIA, 2013), e obtendo os dados dos volumes de vazamentos anuais das simulações realizadas foi possível estimar os custos necessários para reduzir o percentual de vazamentos da rede em cerca de 10%. Além disso, com os custos totais antes e depois da implementação da medida de redução dos vazamentos, apresentados na Figura 5.22, foi possível calcular a economia gerada. A Figura 5.30 apresenta os custos totais anuais para

implementação da medida de eficiência (ME) e da economia observada no mesmo período, a partir do 9º ano.

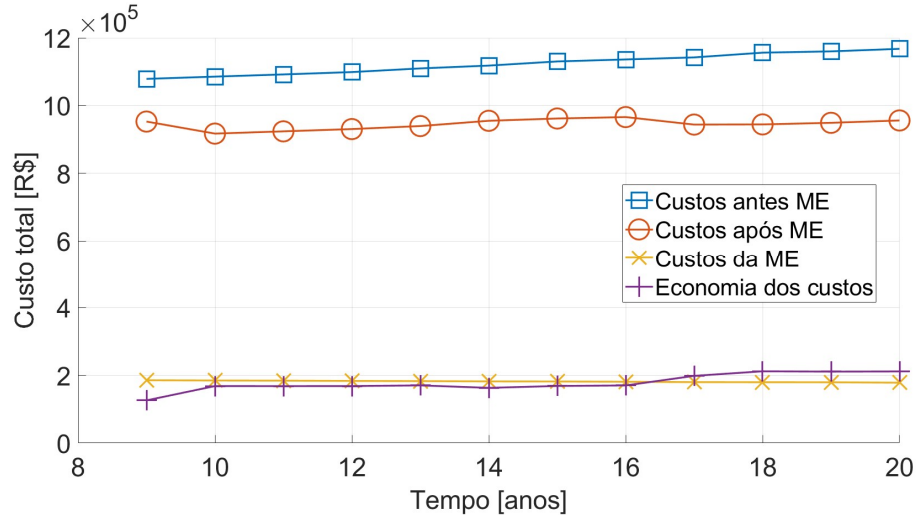
Figura 5.30 – Custos totais anuais para implementação da redução dos vazamentos e economizados operacionalmente.



Avaliando a tendência da curva de economia com os custos operacionais observa-se um comportamento crescente, o que é coerente em termos práticos, pois a rede continuaria sua deterioração devido ao envelhecimento. Este resultado mostra que as medidas de eficiência energética podem ter impactos mais significativos avaliando o médio/longo prazo.

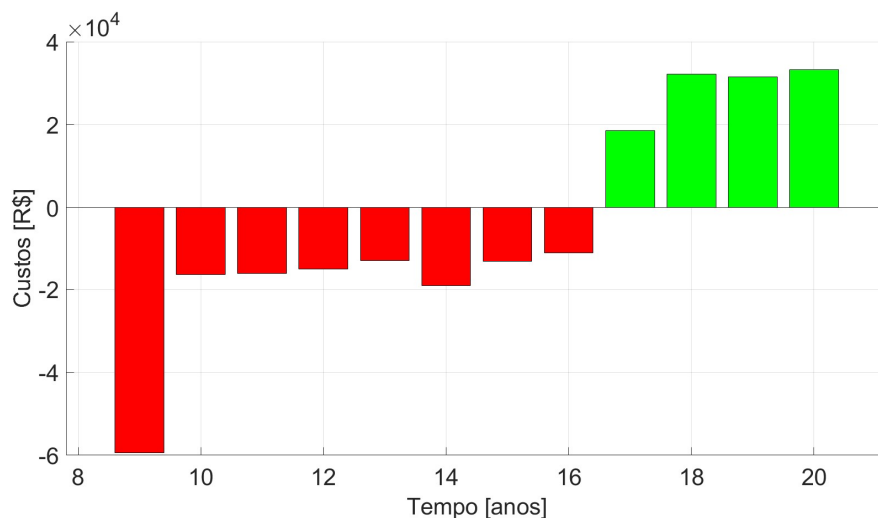
Os custos para implementação/manutenção do percentual de vazamentos é inicialmente maior que o valor economizado com a medida. Contudo, ao longo da vida útil da rede, a economia advinda da implantação da medida mostra-se mais relevante. Os valores dos custos operacionais economizados e de implantação da medida de redução dos vazamentos são da ordem de 15 a 20% dos custos totais operacionais. A Figura 5.31 apresenta esses custos em relação aos custos de operação da rede antes e depois da redução dos vazamentos.

Figura 5.31 – Custos da ME e do valor economizado em relação aos custos totais de operação.



Para encontrar o VPL da medida implementada dentro do horizonte de projeto considerado, um fluxo de caixa foi construído conforme estabelecido pela Equação 4.10, resultando em um VPL de R\$ -47.705,10. O VPL negativo pode ser visto mais claramente por meio do balanço dos custos anuais na Figura 5.32, onde o valor é positivo se a economia dos custos de operação for maior que os custos da implantação da medida de eficiência e negativo no caso contrário.

Figura 5.32 – Balanço dos custos anuais a partir do ano de implementação da ME nos vazamentos



Com um VPL negativo, num primeiro momento a implementação da medida de redução dos vazamentos pode não parecer estrategicamente atraente em termos econômicos. Entretanto, outras informações acerca do funcionamento da rede devem

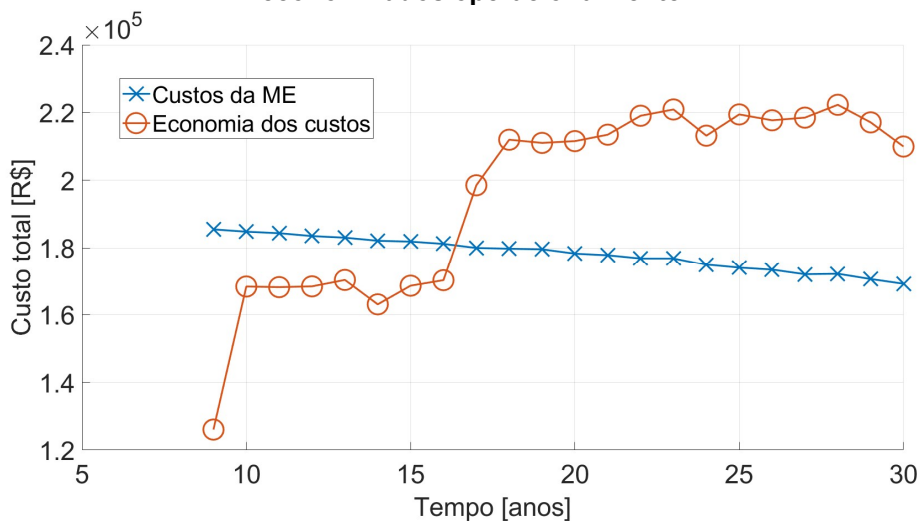
ser consideradas e duas a saber são as pressões operacionais e o tempo de vida útil da rede.

Em termos de pressões operacionais é importante frisar que os valores mínimos devem ser sempre atendidos. Assim, medidas de eficiência na rede seriam implementadas mesmo que o balanço dos custos não fossem positivos para garantir o fornecimento de água. Nesse caso, as medidas poderiam ter outros reflexos como nos custos de produção de água para os consumidores.

Em relação a vida útil da rede, observa-se que apesar da consideração de 20 anos de vida útil neste trabalho, normalmente elas operam por muito mais tempo. Assim, seguindo a mesma metodologia implementada para as simulações e obtenção dos dados, o cenário foi analisado por mais 10 anos, avaliando nesse caso um tempo de vida útil de 30 anos de operação.

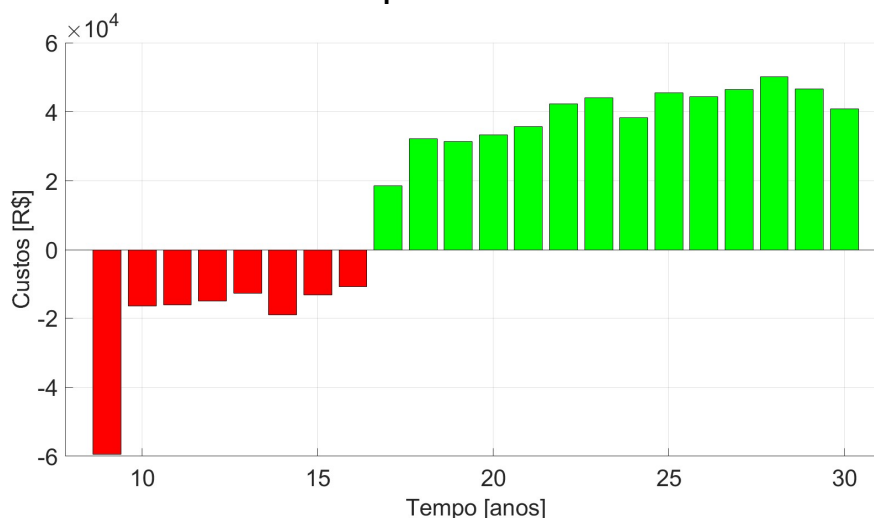
Os dados mostram que neste novo período de vida útil a implementação da medida de eficiência se torna atraente do ponto de vista econômico. A Figura 5.33 apresenta os custos totais anuais necessários para implementação da redução dos vazamentos e os custos devido a economia operacional no novo período de tempo. Nota-se que devido as tendências das curvas, após o 16º ano os valores economizados são maiores que os custos para manutenção do percentual de vazamentos, tornando o investimento mais benéfico.

Figura 5.33 – Custos totais anuais para implementação da redução dos vazamentos e economizados operacionalmente.



Calculando o novo VPL para o tempo de vida útil de 30 anos, este deixa de ser negativo, assumindo um valor de R\$ 386.469,60. O balanço dos custos anuais para o novo período de tempo pode ser visto na Figura 5.34, onde se nota dessa vez uma maioria de valores positivos.

Figura 5.34 – Balanço dos custos anuais a partir do ano de implementação da ME nos vazamentos para 30 anos de vida útil

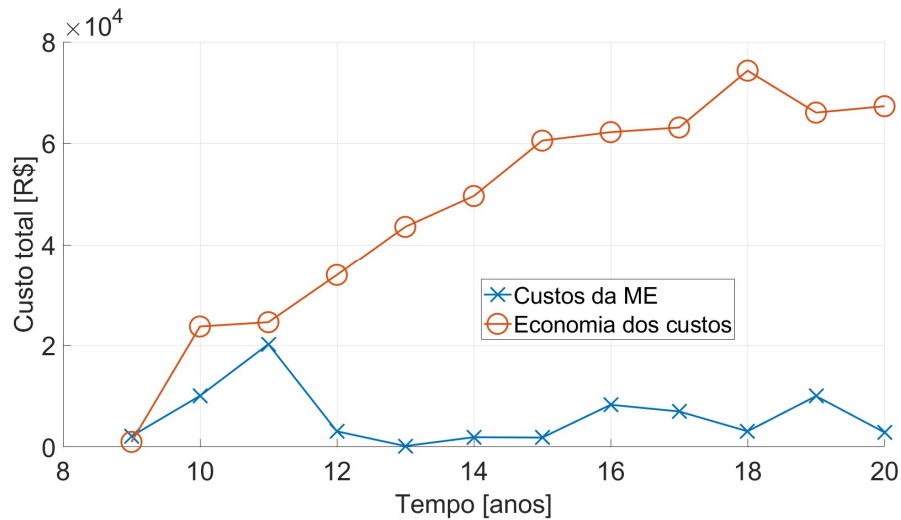


O tempo de retorno do investimento ou *payback* pode ser calculado encontrando o tempo necessário para que a economia gerada pelos benefícios da medida de eficiência iguale aos custos de sua implementação, ou seja, o tempo necessário para um VPL igual a zero. Nesse caso encontramos esse valor no 22º ano de operação da rede, 14 anos após a implementação da medida de redução dos vazamentos.

5.4.2 Reabilitação das tubulações

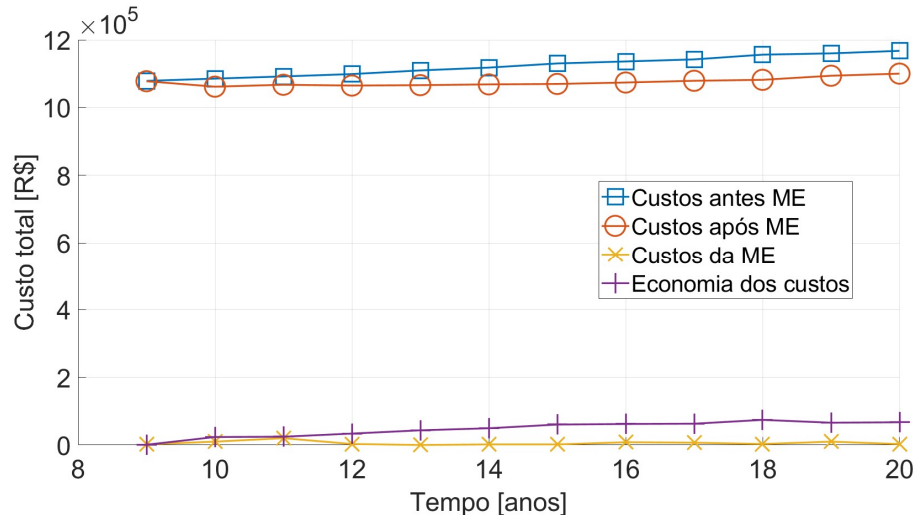
A economia observada nos custos operacionais com a reabilitação da rede é menor que a economia vista devido a diminuição do percentual de vazamentos. Em contrapartida o valor necessário para reabilitar a rede na taxa considerada também é menor. É possível observar na Figura 5.35 que o valor economizado nos custos é sempre maior que o custo necessário para implementar a reabilitação da rede, com exceção do 9º ano, ano inicial da ME. Como foi adotada uma taxa anual de reabilitação da rede de 1%, a diferença de custos poderia ser utilizada para investimentos em novas reabilitações que gerariam novas economias, assim potencializando o benefício da medida de eficiência.

Figura 5.35 – Custos totais anuais para implementação da reabilitação da rede e economizados operacionalmente.



A Figura 5.36 apresenta os custos totais de operação e reabilitação da rede, além da economia gerada. A economia nos custos operacionais alcança um valor máximo dentro do período de vida útil considerado de aproximadamente 6%. Contudo, o maior valor gasto para reabilitação da rede é menor que 2%, tornando-a uma alternativa a priori atraente para investimento.

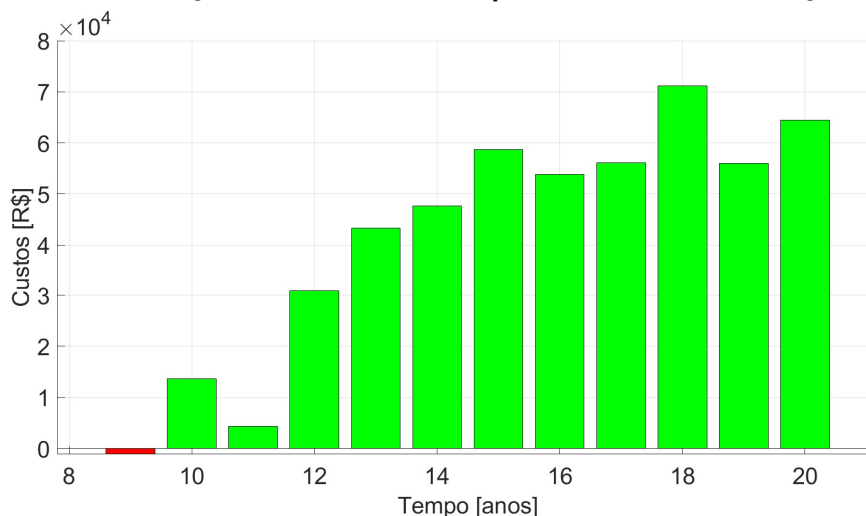
Figura 5.36 – Custos da ME e do valor economizado em relação aos custos totais de operação



Calculando o VPL da implementação dessa medida de eficiência é encontrado o valor de R\$ 499.110,76, indicando a viabilidade do investimento. Isso pode ser constatado graficamente ao visualizar o balanço dos custos anuais entre o valor economizado e o necessário para reabilitação da rede na Figura 5.37. O balanço é negativo no

primeiro ano de implementação da reabilitação da rede e após esse período, sempre se observa um balanço positivo nos custos.

Figura 5.37 – Balanço dos custos anuais a partir do ano de reabilitação da rede



Ao calcular o *payback* da implantação dessa medida encontra-se um período de 2 anos ou no 10º ano de operação da rede. Esse dado pode ser observado pela diferença de escala entre a barra vermelha no 9º ano e a barra verde no 10º ano da Figura 5.37. O valor investido para a reabilitação da rede é rapidamente recuperado pelo investidor, ao considerar todas as taxas e custos inerentes a essa avaliação.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu em estruturar, por meio de programação e simulações hidráulicas, uma metodologia que possibilitasse analisar os impactos decorrentes do envelhecimento de RDA ao longo da sua vida útil. Em seguida, implementar medidas de eficiência energética que pudessem ter os seus benefícios em termos operacionais avaliados, e assim, posteriormente avaliar o impacto financeiro para o investidor em implementar tais medidas. Dentro do contexto desta avaliação, algumas conclusões foram tomadas, a saber:

- 1) Quanto a elaboração e funcionamento do algoritmo para previsão da deterioração dos parâmetros e envelhecimento da RDA:
 - O funcionamento do algoritmo junto com as simulações hidráulicas apresentam resultados consistentes. A exemplo, com o aumento do consumo de água na

rede, os custos de energia elétrica são alterados devido a mudança do ponto operacional das bombas e com o aumento da perda de carga do sistema são observadas menores pressões de operação. Esses dados juntamente com outros observados nas simulações corroboram para constatar um funcionamento adequado do algoritmo para previsão do envelhecimento da rede.

- A forma como a metodologia foi construída possibilitou analisar de forma individual a relevância dos parâmetros estudados em termos de custos e pressões operacionais. Ainda foi possível comparar cada parâmetro dentro dos cenários avaliados com um cenário hipotético ideal e com um cenário nomeado de “intermediário”, que faz a melhor aproximação de um cenário real. Mesmo que em redes reais o envelhecimento não ocorra com os parâmetros individuais, a forma implementada permite que as diferentes taxas utilizadas possam ser analisadas individualmente possibilitando uma nova forma de entender o impacto da alteração dos parâmetros estudados.
- As análises realizadas com os dois estudos de caso apresentaram resultados em termos gerais semelhantes. A rede Anytown, que serviu como indicador inicial e referência para todas as análises posteriores realizadas na rede D-Town, mostrou impactos semelhantes resguardada a diferença de porte e complexidade. Esses resultados reforçaram o funcionamento adequado do algoritmo com base na metodologia utilizada, tendo em vista o que se observa em redes reais.

2) Para a realização de todas as simulações foram implementadas diversas metodologias de cálculo referentes aos parâmetros avaliados, além de variadas taxas observadas na literatura. Todas essas taxas possuem incertezas atribuídas que são inerentes a natureza desses parâmetros. Em relação as metodologias e taxas utilizadas, as seguintes conclusões são realizadas:

- As taxas utilizadas para deterioração da tubulação seguindo a metodologia proposta se mostraram satisfatórias para o que foi proposto no estudo. Os resultados esperados do ponto de vista operacional em uma rede que passa

por um aumento de perda de carga são de fato notados. Contudo, devido a todas incertezas inerentes ao aumento da rugosidade das tubulações, em aplicações reais realizar a estimativa dessas taxas localmente para cada rede em estudo trariam resultados mais fidedignos.

- A forma como parte dos vazamentos foram modelados por orifícios é uma estratégia que já foi usada pela literatura. Contudo, a proposta de ter um índice mínimo variável com o tempo trouxe uma novidade na forma de avaliação dos vazamentos em grandes períodos de tempo. Avaliar os vazamentos na rede pelo seu percentual, como foi realizado na rede D-Town, ao invés do coeficiente de emissão, como feito na rede Anytown, mostra-se mais adequado em termos práticos. Os percentuais utilizados para os estudos do cenário intermediário são correntes de redes práticas e representaram de forma adequada os vazamentos da rede.
- O crescimento populacional foi modelado seguindo dados do IBGE e representa de forma adequada a taxa de aumento de um grande número de pessoas. As simulações com esses dados mostraram resultados coerentes em termos práticos. Contudo, a taxa de crescimento observada em RDA de dimensões menores, como em bairros e pequenas cidades, pode estar numa taxa de alteração diferente ou mesmo estagnada. Assim, mesmo com resultados coerentes ressaltasse a importância de avaliar localmente a evolução da população que reflete na demanda de consumo.
- A metodologia utilizada para a deterioração das bombas reflete na redução da sua altura manométrica operacional, mas não são consideradas falhas devido a defeitos mecânicos. Com as taxas adotadas, apesar de notar alterações no regime operacional da rede, esses parecem menos relevantes que outros parâmetros considerados. Isso decorre da forma como a simulação é realizada, guiada pela demanda nodal da rede, e por não considerar falhas mecânicas que comprometeriam o abastecimento.

3) Neste trabalho, dois principais fatores foram considerados para direcionar os estudos realizados: os custos totais operacionais e as pressões críticas (mínimas). Os

fatores considerados são mais ou menos impactados pelos parâmetros estudados (vazamentos, rugosidade, demanda de consumo e deterioração das bombas). Dos parâmetros estudados, alguns apresentam mais relevância a saber:

- Os vazamentos causam os principais impactos em termos de custo operacional. O volume de água produzido para suprir a demanda dos vazamentos gera custo extra de produção de água potável, além de alterar o ponto de operação das bombas devido as maiores vazões. Assim como observado em termos práticos, nas simulações os vazamentos demonstraram ser o principal problema em termos de custo, e por isso foi um dos alvos das medidas de eficiência.
- O aumento da rugosidade das tubulações, que reflete no aumento da perda de carga em toda rede, demonstrou ser o principal parâmetro a impactar nas pressões operacionais da rede. Por isso, a rugosidade das tubulações também foi um dos alvos de medidas de eficiência.
- Os dois parâmetros que se mostraram mais relevantes nos estudos realizados, concordam com o que é apresentado na literatura. Metodologias que buscam maneiras ótimas de reabilitar as tubulações da rede ou gerir o volume de vazamentos são amplamente estudados. Cabe salientar que o aumento da demanda não é por si só a causa de intermitência ou desabastecimento das redes, a deterioração da infraestrutura é mais relevante.

4) Em razão dos resultados observados foram implementadas duas medidas de eficiência energética, uma que tinha como foco reduzir o percentual de vazamentos e outra que visava diminuir a perda de carga da rede. Em relação a essas medidas conclui-se que:

- A redução dos vazamentos traz excelentes benefícios a operação da rede. Os custos operacionais bem como os indicadores utilizados reforçam essa afirmativa. Esse fato era de certo modo esperado, entretanto não se tinha uma clareza do comportamento com a deterioração da rede ao longo de sua vida útil. Nesse caso, foi constatado que o benefício persiste dentro do prazo considerado.

- A redução da perda de carga da rede por meio da reabilitação funcional das tubulações também trouxe benefícios a operação como seria esperado de imediato. Avaliando para um prazo maior, como considerado neste trabalho, a reabilitação ainda se mostrou relevante. Vale ressaltar que os requisitos principais na forma como tratar a reabilitação da rede estão atrelados a escolha das tubulações a serem reabilitadas e a taxa de reabilitação. Dentro de uma RDA existem tubulações principais que são mais relevantes para o funcionamento e essas devem ser priorizadas. Além disso, com relação a taxa de reabilitação, deve ser levado em consideração todo contexto de onde a rede está inserida e os recursos disponíveis. Trocar todas as tubulações de uma rede trariam bons resultados, mas não é uma prática plausível em termos práticos.

5) As medidas de eficiência energética trouxeram claros resultados positivos à operação da rede, contudo é importante que sua viabilidade também fosse avaliada sob a ótica financeira. Em relação as análises financeiras, as seguintes conclusões são tomadas.

- A medida implementada para diminuir e manter os vazamentos da rede em um percentual de vazamentos 10% mais baixo que o valor atribuído a rede D-Town, obteve em um primeiro momento um resultado negativo em termos de custos de implantação, dentro da vida útil inicialmente considerada. Com os valores necessários para tratamento dos vazamentos e os benefícios gerados pela economia nos custos, as métricas financeiras mostravam que a implantação não era atrativa no período de vida útil considerado. Contudo, tendo em vista que as RDA normalmente operam por muito mais tempo e são tratadas a medida que são encontrados problemas, os mesmos procedimentos foram realizados para um período de vida útil mais extenso, nesse caso 30 anos, onde as métricas financeiras mostraram um resultado positivo. O tempo para que o retorno em termos financeiros fosse observado, era de dois anos além da vida útil inicialmente considerada (20 anos). O que pôde ser constatado é que olhando para um tempo de vida útil mais extenso, as análises financeiras da forma como foram conduzidas mostram que o investimento é atrativo. Contudo é importante salientar que esse retorno pode apresentar variações em funções

de diversas incertezas, além da consideração de uma referência europeia, que difere da realidade de outros países.

- No caso da implementação da reabilitação de trechos da RDA, com os valores e economias observadas, as análises financeiras mostram que a intervenção é bastante atrativa, com um rápido retorno. Contudo, vale ressaltar que um outro ponto importante não tratado nesta análise diz respeito a localização das tubulações e o acesso para intervenções. A reabilitação de trechos que estão localizados em avenidas extremamente movimentadas geram diversos outros impactos que podem inviabilizar as intervenções.

Concluindo de forma geral, a metodologia de estudo realizada se mostrou como uma ferramenta oportuna para tomada de decisões em RDA. Os resultados observados corroboram diversas vezes com observações práticas. Os resultados puderam mostrar ainda o quão importante é a aplicação de medidas de eficiência nas RDA, para que se consiga manter os padrões aceitáveis de abastecimento. Por fim, as análises financeiras mostram que a implantação das medidas de eficiências são atrativas não somente do ponto de vista operacional, mas também financeiro para os gestores das redes.

7 RECOMENDAÇÕES

Em meio as possibilidades exploradas ao longo desta pesquisa algumas recomendações para pesquisas futuras ou melhorias da metodologia proposta são expostas abaixo.

- Na avaliação dos processos de deterioração, analisar a possibilidade da implementação de defeitos pontuais, tais como falhas estruturais das tubulações ou falhas mecânicas nas bombas, considerando assim o impacto destas incertezas na RDA.
- Implementar pontos de grande consumo durante a simulação da RDA, como forma de avaliar a instalação de grandes consumidores, como shoppings e indústrias. Posteriormente analisar os dados encontrados comparando-os com cenários sem esse consumo.
- Extrapolar a vida útil de operação da rede para períodos de tempo muito maiores, como 50 a 100 anos, pois muitas redes reais operam por grandes períodos de tempo, que se aproximam dessa ordem de grandeza. Nesse período de tempo maior analisar a possibilidade de implantação de múltiplas medidas de eficiência e suas respostas financeiras.
- Propor estudos de caso em redes reais e comparar os dados simulados com observações práticas. Buscar ainda formas de calibrar as taxas utilizadas para a rede real simulada. Além disso, utilizar valores de implementação das medidas de eficiência menos genéricos para uma situação real.
- Avaliar a implantação das medidas de eficiência energética de forma conjunta, reduzindo o percentual de vazamentos simultaneamente com a reabilitação da rede, e analisar esse impacto em termos operacionais e financeiros. Analisar também outras medidas possíveis de se implementar por meio de simulações e programação.
- Como a metodologia de funcionamento utilizada no Epanet para resolução das equações hidráulicas são guiadas pela demanda nodal, sugere-se realizar

simulações guiadas pela pressão, possibilitando assim contabilizar o impacto da alteração do consumo nos custos.

REFERÊNCIAS

- ABD RAHMAN.; MUHAMMAD, N. S.; ABDULLAH, J.; WAN MOHTAR, W. H. M. **Model Performance Indicator of Aging Pipes in a Domestic Water Supply Distribution Network**. *Water*, v. 11, n. 11, p. 2378, nov. 2019.
- ABNT. NBR 12211/1992. **Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água**. . 1992, p. 14.
- AHOPELTO, S.; VAHALA, R. **Cost–Benefit Analysis of Leakage Reduction Methods in Water Supply Networks**. *Water*, v. 12, n. 1, p. 195, jan. 2020.
- AL-ANI, D.; HABIBI, S. **Optimal pump operation for water distribution systems using a new multi-agent Particle Swarm Optimization technique with EPANET**. 2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Anais... Em: 2012 25TH IEEE CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (CCECE). abr. 2012.
- ALEGRE, H. **Performance Indicators for Water Supply Systems**. (E. Cabrera, J. García-Serra, Eds.) *Drought Management Planning in Water Supply Systems*. Anais...: *Water Science and Technology Library*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999.
- ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; PARENA, R. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água**. Serie Guias Técnicos- Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.
- ANDRADE, R.; BORJA, P. C. **Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS**. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 21, p. 783–795, dez. 2016.
- ANEEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Governamental. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/tarifas>>. Acesso em: 25 jul. 2021.
- ARAUJO, L. S.; RAMOS, H.; COELHO, S. T. **Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management**. *Water Resources Management*, v. 20, n. 1, p. 133–149, 1 fev. 2006.
- BABAYAN, A.; SAVIC, D.; WALTERS, G.; KAPELAN, Z. **Least-Cost Design of Water Distribution Networks under Demand Uncertainty**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 131, n. 5, p. 375–382, 1 set. 2005.
- BABAYAN, A. V. ; KAPELAN, Z.; SAVIC, D.; WALTERS, G. **Robust Least-Cost Design of Water Distribution Networks Using Redundancy and Integration-Based Methodologies**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 133, n. 1, p. 67–77, 1 jan. 2007.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. BCB - **Calculadora do cidadão**. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?met hod=exibirFormCorrecaoValores>>. Acesso em: 29 maio. 2022.
- BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A. **Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR**. *Journal of Hydroinformatics*, v. 10, n. 2, p. 113–126, 1 mar. 2008.

- BEZERRA, S. DE T. M.; PERTEL, M.; MACÊDO, J. E. S. DE. **Avaliação de desempenho dos sistemas de abastecimento de água do Agreste brasileiro.** Ambiente Construído, v. 19, p. 249–258, 10 jun. 2019.
- BOIAN, R. F.; MACEDO, D. O.; OLIVEIRA, P. J. A.; JANZEN, J. G. **Comparação entre as equações de FAVAD e geral para avaliação da vazão perdida por meio de vazamentos em sistemas urbanos de distribuição de água.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, p. 1073–1080, 20 dez. 2019.
- BORGES, A. DA S.; MARQUES, C. S.; BRITO, L. P. G.; SILVA, V. R. L.; JANNUZZI, P. M. **Projeções populacionais no Brasil: subsídios para seu aprimoramento.** Anais, n. 0, p. 1–26, 8 abr. 2016.
- BOULOS, P. F.; WU, Z.; ORR, C. H.; MOORE, M.; HSIUNG, P.; THOMAS, D. **Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms.** Distribution system symposium. Anais...Citeseer, 2001.
- BRENTAN, B.; MEIRELLES, G. L.; LUVIZOTTO, E.; IZQUIERDO, J. **Joint Operation of Pressure-Reducing Valves and Pumps for Improving the Efficiency of Water Distribution Systems.** Journal of Water Resources Planning and Management, v. 144, n. 9, p. 04018055, 1 set. 2018.
- CALGARO, M.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X. **Curvas de desempenho operacional de bombas centrífugas determinadas a partir das características físicas do rotor i - valores nominais.** Irriga, v. 9, n. 1, p. 19–30, 13 abr. 2004.
- CAMPBELL, E.; IZQUIERDO, J.; MONTALVO, I.; ILAYA-AYZA, A.; PÉREZ-GARCÍA, R.; TAVERA M. **A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization.** Journal of Hydroinformatics, v. 18, n. 1, p. 62–76, 21 ago. 2015.
- CAMPBELL, E.; IZQUIERDO, J.; MONTALVO, I.; PÉREZ-GARCÍA, R. **A Novel Water Supply Network Sectorization Methodology Based on a Complete Economic Analysis, Including Uncertainties.** Water, v. 8, n. 5, p. 179, maio 2016.
- CASAN. CASAN - companhia catarinense de águas e saneamento - **Tabela de Preços de obras civis, 2021.**
- CEMIG. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos>>. Acesso em: 8 out. 2021.
- CHIRIBOGA, J. H.; GOMES, A. S.; NICOLA, A.; COSTA, C.; RAMOS, K.; BEEKMAN, G. **Ações de assistência técnica em redução e controle de perdas de água e uso eficiente de energia elétrica.** INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERAÇÃO PARA A AGRICULTURA – IICA, p. 66, 2018.
- COMISSÃO EUROPEIA. **Resource and Economic Efficiency of Water Distribution Networks in the EU.** Europa: Comissão Europeia, 2013.
- COUTINHO, R. S.; SOARES, A. K. **Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 22, p. 797–808, 8 mar. 2017.
- COVELLI, C.; CIMORELLI, L.; COZZOLINO, L.; DELLA MORTE, R.; PIANESE, D. **Reduction in water losses in water distribution systems using pressure reduction valves.** Water Supply, v. 16, n. 4, p. 1033–1045, 23 fev. 2016.

- CREACO, E.; FRANCHINI, M. **A new algorithm for real-time pressure control in water distribution networks**. *Water Supply*, v. 13, n. 4, p. 875–882, 1 ago. 2013.
- CROSS, H. **Analysis of flow in networks of conduits or conductors**. [s.l.] University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering, 1936.
- DE LIMA, C. A.; DOS SANTOS, D. C.; BRAGA, S. M. **Estudo da cavitação em bomba centrífuga e sua influência sobre o rendimento**. 2015.
- DIAS, D. M.; MARTINEZ, C. B.; LIBÂNIO, M. **Avaliação do impacto da variação da renda no consumo domiciliar de água**. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 15, p. 155–166, jun. 2010.
- ELETOBRÁS. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.
- ELIADES, D. G.; KYRIAKOU, M. S.; VRACHIMIS, S. G.; POLYCARPOU, M. EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. . Em: PROC. 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING AND CONTROL FOR THE WATER INDUSTRY (CCWI). 2016.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.
- FANTI, L. D.; DIAS, T. S.; LUCENA, L. P.; REIS, R. A.; NASCIMENTO, L. B. **O Uso das Técnicas de Valor Presente Líquido, Taxa de Interna de Retorno e Payback Descontado: Um Estudo de Viabilidade de Investimentos no Grupo Breda LTDA**. *Desafio Online*, v. 3, n. 2, p. 127–143, 1 ago. 2015.
- FARMANI, R.; WALTERS, G.; SAVIC, D. **Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: Total cost vs. reliability vs. water quality**. *Journal of hydroinformatics*, v. 8, p. 165–179, 1 jul. 2006.
- GOMES, H. P. **Avaliação Econômica: eficiência energética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2014.
- GUPTA, I.; GUPTA, A.; KHANNA, P. **Genetic algorithm for optimization of water distribution systems**. *Environmental Modelling & Software, Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence*. v. 14, n. 5, p. 437–446, 1 mar. 1999.
- HAMDAN, O. H. C. **Avaliação de indicadores aplicados a sistemas de abastecimento de água em minas gerais segundo portes populacionais**. Dissertação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. DE. **Abastecimento de água para consumo**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.
- HERZOG, A. A. S.; GOMES, A. C. J. A.; CORREA, G. B.; BUTTER, J. N.; SILVA, T. L. V.; OLIVEIRA R. R. **Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil? Rio de Janeiro: FIRJAN**, 2011. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/pagina-inicial.htm>>. Acesso em: 8 out. 2021.
- HOAG, L. N.; WEINBERG, G. **Pipeline Network Analysis by Electronic Digital Computer**. *Journal American Water Works Association*, v. 49, n. 5, p. 517–524, 1957.

IBGE (ED.). **Projeções da população: Brasil e unidades da Federação**, revisão 2018. 2ª edição ed. Rio de Janeiro: IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018.

IBGE. **Projeções da População Brasil e Unidades da Federação**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019. Disponível em: <https://ftp.ibge.gov.br/Projecao_da_Populacao/Projecao_da_Populacao_2018/Nota_Metodologica_Populacao_mensal_dias_1_e_15.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

JARA-ARRIAGADA, C.; STOIANOV, I. **Pipe breaks and estimating the impact of pressure control in water supply networks**. Reliability Engineering & System Safety, v. 210, p. 107525, 1 jun. 2021.

JETMAROVA, H. M.; SULTANOVA, N.; SAVIC, D. **Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation**. Environmental Modelling & Software, v. 93, p. 209–254, 1 jul. 2017.

JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G. **Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 118, n. 4, p. 406–422, 1 jul. 1992.

JOWITT, P. W.; XU, C. **Optimal Valve Control in Water-Distribution Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 116, n. 4, p. 455–472, 1 jul. 1990.

KANG, D.; LANSEY, K. **Demand and Roughness Estimation in Water Distribution Systems**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 137, n. 1, p. 20–30, 1 jan. 2011.

KOOR, M.; VASSILJEV, A.; KOPPEL, T. **Optimal Pump Count Prediction Algorithm for Identical Pumps Working in Parallel Mode**. Procedia Engineering, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013. v. 70, p. 951–958, 1 jan. 2014.

KRAMER, M.; TERHEIDEN, K.; WIEPRECHT, S. **Pumps as turbines for efficient energy recovery in water supply networks**. Renewable Energy, v. 122, p. 17–25, 1 jul. 2018.

KSB. MegaCPK - **Bomba de voluta dividida transversalmente com impulsor radial ou impulsor semi-axial**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ksb.com/pt-br/lc/products/bomba/bomba-de-instalacao-a-seco/megacpk/M48A#>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

LIMA, G. M.; BRETAN, B. M. **Uso racional de energia em sistemas de abastecimento de água**. Revista da Universidade Federal de Minas Gerais, v. 26, n. 1 e 2, p. 108–135, 2019.

LUNA, T.; RIBAU, J.; FIGUEIREDO, D.; ALVES, R. **Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization**. Journal of Cleaner Production, v. 213, p. 342–356, 10 mar. 2019.

MACEDO, D. O.; ALVES, P.; GONÇALVES, V. F.; IDE, N. C.; JANZEN, G. J. **Efeito de fatores geométricos e hidráulicos sobre a vazão perdida e o expoente de vazamento em sistema de distribuição de água**. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Investigación, desarrollo y práctica, v. 11, n. 2, p. 238–250, 8 jun. 2018.

- MALA-JETMAROVA, H.; SULTANOVA, N.; SAVIC, D. **Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation.** *Environmental Modelling & Software*, v. 93, p. 209–254, 1 jul. 2017.
- MARCHI, A.; SALOMONS, E.; OSTFELD, A.; KAPELAN, Z.; SIMPSON, A. R. **Battle of the Water Networks II.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 7, p. 04014009, 1 jul. 2014.
- MARCHIORI, I.; MEIRELLES, G. L.; BRENTAN, B.; LUVIZOTTO, J. E.; IZQUIERDO, J. **Avaliação de funções de penalização para o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água.** 3 jul. 2017.
- MEIRELLES, G. L.; BRENTAN B. M.; IZQUIERDO J.; RAMOS H.; LUVIZOTTO E. **Trunk network rehabilitation for resilience improvement and energy recovery in water distribution networks.** *Water*, v. 10, n. 6, p. 693, 2018a.
- MEIRELLES, G. L.; BRENTAN, B. M.; ZUFFO, A. C; LUVIZOTTO, J. E. **Dimensionamento de redes de distribuição de água por meio de análise multicriterial.** *Revista DAE*, v. 221, n. 68, p. 118–130, 2019.
- MEIRELLES, G. L.; BRENTAN, B. M.; LUVIZOTTO JR, E. L. **Optimal design of water supply networks using an energy recovery approach.** *Renewable Energy*, v. 117, p. 404–413, 1 mar. 2018.
- MEIRELLES, G. L.; BRENTAN, B. M. **Uso racional de energia em sistemas de abastecimento de água.** *Revista da Universidade Federal de Minas Gerais*, v. 26, n. 1 e 2, p. 108–135, 2019.
- MEIRELLES, G. L.; LUVIZOTTO, E.; BRENTAN, B. M.; RAMOS, H. M. **Leakage Control and Energy Recovery Using Variable Speed Pumps as Turbines.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 144, n. 1, p. 04017077, 1 jan. 2018b.
- MOHAMMADZADE N. S.; SHAFAGHAT, R.; NAJAFI, A.; BABAZADE, D. **Evaluation of methods for reducing the total cost in rural water pumping stations in Iran: a case study.** *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, v. 65, n. 3, p. 277–293, 7 jan. 2016.
- MÓLLER, D. S.; MEIRELLES, G. L.; BRENTAN, B. M.; BARROS D. B. **Optimal pump selection for variable speed operation in water distribution network.** *RBRH*, v. 25, 16 nov. 2020.
- MOOSAVIAN, N.; KASAEI ROODSARI, B. **Soccer league competition algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks.** *Swarm and Evolutionary Computation*, v. 17, p. 14–24, 1 ago. 2014.
- MOTTA, R. DA R.; GONÇALVES, A.; NEVES, C.; CALÔBA, G.; NAKAGAWA, M.; COSTA, R. P. *Engenharia econômica e finanças.* Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- NAULT, J.; PAPA, F. **Lifecycle Assessment of a Water Distribution System Pump.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, n. 12, p. A4015004, 1 dez. 2015.
- NAZIF, S.; KARAMOUZ, M.; TABESH M.; MORIDI, A. **Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks.** *Water Resources Management*, v. 24, n. 3, p. 437–458, 1 fev. 2010.

NETTO, J. M. DE A. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda, 2018.

ODAN, F. K. Estudo de confiabilidade aplicado à otimização da operação em tempo real de redes de abastecimento de água. Doutorado em Hidráulica e Saneamento – São Carlos: Universidade de São Paulo, 28 jun. 2013.

OLSZEWSKI, P. **Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps**. *Applied Energy*, v. 178, p. 527–539, 15 set. 2016.

PEREIRA, J. A. R.; CONDURÚ, M. T. **Abastecimento de água - Informação para Eficiência Hidroenergética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2014.

PINTO, M. M. L.; BAPTISTA, M. B. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

POPOVA, V.; SHARPANSKYKH, A. **Modeling Organizational Performance Indicators**. *Information Systems*, v. 35, p. 505–527, 1 jun. 2010.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo, 2006.

RAMALINGAM, D.; LINGIREDDY, S.; ORMSBEE, L. E. **History of Water Distribution Network Analysis: Over 100 Years of Progress**. *Environmental and Water Resources History*. Anais, em: environmental and water resources history sessions at asce civil engineering conference and exposition, 2002

REZENDE, S.; ROLAND, N.; RIBEIRO, R. V. B. L. **Estudo dos determinantes do consumo per capita de água nos municípios brasileiros**. . Em: 28º congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2015.

RICHARDSON, S.; HODKIEWICZ, M. **Modeling Tool to Support Budgeting and Planning Decisions for Pump Overhauls**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 137, p. 327–334, 13 mar. 2011.

ROSSMAN, L. A. EPANET 2 USERS MANUAL. p. 200, 2000.

SARBU, I.; OSTAFE, G. **Optimal design of urban water supply pipe networks**. *Urban Water Journal*, v. 13, n. 5, p. 521–535, 3 jul. 2016.

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. **Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 2, p. 67–77, 1 mar. 1997.

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; SCHWAB, M. **Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply**. Em: CORNE, D.; SHAPIRO, J. L. (Eds.). . *Evolutionary Computing. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. v. 1305p. 227–235.

SEIFOLLAHI-AGHMIUNI, S.; BOZORG HADDAD, O.; MARIÑO, M. A. **Effects of Pipe Roughness Uncertainty on Water Distribution Network Performance During its Operational Period**. *Water Resources Management*, v. 27, n. 5, p. 1581–1599, 1 mar. 2013.

SHARP, W. W.; WALSKI, T. M. **Predicting internal roughness in water mains**. *Journal-American Water Works Association*, v. 80, n. 11, p. 34–40, 1988.

SKWORCOW, P.; PALUSZCZYSZYN, D.; ULANICKI, B.; RUDEK R.; BELRAIN, T. **Optimisation of Pump and Valve Schedules in Complex Large-scale Water Distribution Systems Using GAMS Modelling Language**. Procedia Engineering, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013. v. 70, p. 1566–1574, 1 jan. 2014.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2019. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnosticos>>. Acesso em: 18 jul. 2021.

SOARES, H. Associação de bombas, 2022. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/HG_Cap%c3%adtulo-5_Parte-2.pdf>

SOLER, E. M.; TOLEDO, F. M. B.; SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. **Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água**. Production, v. 26, p. 385–401, 10 nov. 2015.

SPEIGHT, V. L. **Impact of Pipe Roughness on Pumping Energy in Complex Distribution Systems**. Procedia Engineering, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013. v. 70, p. 1575–1581, 1 jan. 2014.

TSUTIYA, M. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de engenharia hidráulica e sanitária da escola politécnica da universidade de São Paulo, 2006.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de água e esgoto**. . Em: Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. 1997.

UNESCO. Água e mudanças climáticas. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_por>. Acesso em: 24 jun. 2021.

URTADO, E. S.; SANTO, V. S.; QUINTAIROS, P. C. R.; OLIVEIRA, E. A. A. Q. **Aplicação do método do valor líquido presente (VPL) na análise da viabilidade econômica de projetos na indústria metal mecânica: Um estudo de caso**. . Em: IX encontro latino americano de pós-graduação – universidade do vale do paraíba. 2009.

VAKILIFARD, N.; ANDA, M.; BAHRI, A. P.; HO, G. **The role of water-energy nexus in optimising water supply systems – Review of techniques and approaches**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 1424–1432, 1 fev. 2018.

VIEIRA, F.; RAMOS, H. M. **Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study**. Energy Policy, Transition towards Sustainable Energy Systems. v. 36, n. 11, p. 4142–4148, 1 nov. 2008.

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. **Hydropower recovery in water supply systems: Models and case study**. Energy Conversion and Management, v. 84, p. 414–426, 1 ago. 2014.

VILANOVA, M. R. N. [UNESP. **Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões**. Aleph, p. 316 f. : il., 12 nov. 2012.

- WAKEEL, M.; CHEN, B.; HAYAT, T.; ALSAEDI.; AHMAD, B. **Energy consumption for water use cycles in different countries: A review.** Applied Energy, v. 178, p. 868–885, 15 set. 2016.
- WALSKI, T. M.; BRILL, E. D.; GESSLER, J.; GOULTER, I. C.; JEPPSON, R. M.; LANSEY, K.; LEE, H. L.; LIEBMAN J. C.; MAYS, L.; MORGAN, D. R.; ORMSBEE, L. **Battle of the Network Models: Epilogue.** Journal of Water Resources Planning and Management, v. 113, n. 2, p. 191–203, 1 mar. 1987.
- WILSON, T.; REES, P. **Recent developments in population projection methodology: a review.** Population, Space and Place, v. 11, n. 5, p. 337–360, 1 set. 2005.
- WU, W.; SIMPSON, A. R.; MAIER, H. R.; MARCHI, A. **Incorporation of Variable-Speed Pumping in Multiobjective Genetic Algorithm Optimization of the Design of Water Transmission Systems.** Journal of Water Resources Planning and Management, v. 138, n. 5, p. 543–552, 1 set. 2012.
- YANG, L.; ZENG, S.; CHEN, J.; HE, M.; YANG, W. **Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants.** Water Science and Technology, v. 62, n. 6, p. 1361–1370, 1 set. 2010.
- Zaman, D., Tiwari, M. K., Gupta, A. K., & Sen, D. (2020). **A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state.** Engineering Failure Analysis, 109, 104264.
- ZHAO, F.; FENG, X. **Evaluation strategy of particle swarm optimization and it's application in pumping station system optimal operation.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 240, p. 032034, mar. 2019.
- ZHUAN, X.; XIA, X. **Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps.** Applied Energy, v. 104, p. 250–257, 1 abr. 2013.

ANEXO A - DADOS DAS REDES

Principais dados da rede Anytown

NÓS				
ID	ELEVAÇÃO	DEMANDA	COORDENADA X	COORDENADA Y
20	6,096	31,545742	6391,6	4257,81
30	15,24	12,618297	6723,63	6181,64
40	15,24	12,618297	5327,15	7500
50	15,24	12,618297	3959,96	7050,78
55	24,384	0	3081,05	7431,64
60	15,24	31,545742	5366,21	6044,92
70	15,24	31,545742	5473,63	4931,64
75	24,384	0	2270,51	7089,84
80	15,24	31,545742	4340,82	6230,47
90	15,24	63,091484	4838,87	5410,16
100	15,24	31,545742	4428,71	4765,63
110	15,24	31,545742	4125,98	3945,31
115	24,384	0	1655,27	6787,11
120	36,576	12,618297	3413,09	3281,25
130	36,576	12,618297	2055,66	3896,48
140	24,384	12,618297	2124,02	6015,63
150	36,576	12,618297	3891,6	5566,41
160	36,576	50,473186	2895,51	4765,63
170	36,576	12,618297	825,2	5126,95

RESERVATÓRIO	
ID	CARGA
10	3,048

TUBULAÇÕES					
ID	NÓ INICIAL	NÓ FINAL	COMPRIMENTO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE
2	20	70	3657,6001	406,4	70
4	20	30	3657,6001	304,8	120
6	20	110	3657,6001	304,8	70
8	70	30	2743,2	304,8	70
10	70	100	182,88	304,8	70
12	70	90	182,88	254	70
14	70	60	182,88	304,8	70
16	90	60	182,88	254	70
18	60	80	182,88	304,8	70
20	90	80	182,88	254	70
22	90	150	182,88	254	70
24	90	100	182,88	254	70
26	100	150	182,88	304,8	70
28	150	80	182,88	254	70

30	60	30	182,88	254	120
32	30	40	182,88	254	120
34	30	50	182,88	254	120
36	40	50	182,88	254	120
38	50	80	182,88	254	120
40	80	140	182,88	254	120
42	150	140	182,88	203,2	120
44	150	160	182,88	203,2	120
46	100	160	182,88	203,2	120
48	100	110	182,88	203,2	70
50	110	160	182,88	254	120
52	110	120	182,88	203,2	120
54	120	160	182,88	304,8	130
56	120	130	182,88	203,2	120
58	130	160	182,88	254	120
60	130	170	182,88	203,2	120
62	160	140	182,88	203,2	120
64	170	140	3657,6001	203,2	120
66	50	140	3657,6001	203,2	120
68	140	115	1828,8	304,8	130
70	140	75	1828,8	304,8	130
72	115	75	1828,8	304,8	130
74	50	55	1828,8	304,8	130
76	55	75	1828,8	304,8	130

BOMBA

ID	NÓ INICIAL	NÓ FINAL
1	10	20

CURVA DA BOMBA

ID	VALOR X	VALOR Y
1	506	110

Principais dados da rede D-Town

NÓS				
ID	ELEVAÇÃO	DEMANDA	COORDENADA X	COORDENADA Y
J511	105,08	1,763868462	-246643,52	150768,11
J411	8,95	1,33356	-248212,98	148750,19
J414	34,36	1,448796923	-247493,99	148416,24
J415	65	0	-246594,18	149477,91
J416	42,6	0	-246486,73	149817,86
J417	37,38	1,936849615	-247408,47	148278,46
J418	37,39	0	-246985,61	148482,76
J419	40,5	0	-246866,83	148824,85
J310	51,84	2,036224615	-247788,57	148853,36

J311	55,95	1,772595	-247845,59	148962,64
J312	68,48	0,113381538	-247850,34	149138,43
J313	67,66	1,035083077	-247802,83	149048,16
J314	14,94	2,156548846	-248553,52	149542,29
J315	16,03	1,976200385	-248634,29	149613,56
J316	12,98	0,93384	-248943,12	149247,71
J318	53,67	2,404883077	-247964,37	148976,89
J319	39,29	2,178615	-248030,89	148896,12
J210	7,01	0,692307692	-248791,08	149048,16
J211	11,27	2,373893077	-248900,36	149390,25
J212	7,87	0,910046538	-248672,3	149242,96
J214	8,67	1,312171154	-248495,29	148973,68
J217	10,98	1,91778	-248681,81	149471,02
J218	7,68	0,133760769	-248767,33	149299,98
J219	52	1,481145	-247413,22	150126,69
J110	15,92	1,171750385	-247921,61	147893,61
J420	39,99	0	-246919,09	148962,64
J421	37,09	1,556741538	-247060,44	148293,87
J422	38,81	0	-246957,1	148767,84
J1153	22,14	0,659483077	-247793,32	149509,03
J1154	14,61	0,698355	-247988,12	149547,04
J1155	15,54	2,074504615	-247874,09	149551,79
J425	64,42	0	-246759,83	149576,07
J426	72,71	0	-246649,4	149729,45
J1157	22,21	2,465233846	-247870,26	149649,69
J427	67,65	0	-246649,4	149594,48
J1158	28,25	0,567165	-247931,11	149437,76
J428	16,2	1,737789231	-247978,62	148382,99
J429	12,56	2,450008846	-248002,38	148297,46
J320	46,73	0,609828462	-247617,53	148915,13
J321	44,59	1,334681538	-247555,76	148763,09
J322	48,02	0,265924615	-247451,23	148767,84
J324	42,38	2,498536154	-247545,1	148625,15
J1056	7,64	1,69044	-248271,79	148956,04
J327	49,68	0,039259615	-247684,04	148981,64
J1058	13,58	1,43796	-246843,07	148050,4
J328	45,69	0,250130769	-247589,02	149057,66
J329	44,05	0,257556923	-247517,75	149086,17
J220	60	1,997210769	-247384,72	150017,41
J221	77,07	0,711200769	-247650,79	149356,99
J225	13,33	0,114123462	-249057,15	149171,69
J226	11,1	0,739431923	-249218,7	149029,16
J50	71,8	0,955025769	-247845,59	149276,22
J51	72,42	0,752426538	-247788,57	149366,49
J53	80	2,371428462	-247612,78	150639,83
J54	80	2,449573846	-247723,02	150717,18

J128	85,26	1,003435385	-247446,48	151143,46
J55	71	0,6957	-247802,77	150140,49
J129	62,85	0,401103462	-247140,19	151214,11
J56	72	0,407053846	-247608,02	150250,23
J57	59	1,616466923	-247527,25	150155,2
J58	76	1,025183077	-247688,8	150388,01
J59	57	1,031918077	-247551,01	149960,4
J1160	24,91	1,781825769	-247379,97	148131,17
J1161	25,25	0,815515385	-247194,67	148226,19
J431	16,9	1,582946538	-247802,83	148088,41
J432	19,88	0,518903077	-247579,52	148159,68
J433	27,35	0,465033462	-247741,06	148235,7
J434	16,48	1,458398077	-247935,86	148487,51
J435	12,15	0,201786923	-248007,13	148107,41
J436	17,68	1,144929231	-247973,87	148230,95
J438	10,43	2,264325	-248026,13	148644,3
J1169	55,42	0,653420769	-246120,89	148877,12
J439	17,78	1,963030385	-248030,89	148449,5
J330	58,25	0,947255769	-247636,53	149143,19
J331	59,26	0,724163077	-247598,52	149214,45
J332	36	1,986	-247538,97	149631,29
J333	25,7	1,579355769	-248368,22	149946,15
J334	29,28	1,569105	-248262,89	150005,52
J335	25,08	1,071140769	-248506,01	149941,39
J336	23,81	0,244935	-248648,55	149912,89
J337	22,11	1,402600385	-248857,6	149722,84
J231	71,9	1,736214231	-247037,88	148853,36
J232	69,81	2,284294615	-247132,9	148843,86
J233	74,23	0	-246827,31	149717,18
J234	64,06	0,045	-246913,17	149873,54
J236	58	1,358401154	-247281,3	150502,45
J237	73,14	2,29041	-247408,47	150445,03
J130	54,52	1,075653462	-247698,3	151076,94
J131	88,05	1,694869615	-247109,52	151079,14
J132	74,55	1,256134615	-247199,42	150943,91
J133	69,58	1,284343846	-247280,19	150967,66
J60	55	1,157449615	-247484,49	150055,42
J134	80,7	0,883681154	-246919,09	150364,26
J135	70	1,012085769	-246995,51	149926,48
J62	60	0,674329615	-247650,79	150131,44
J64	80	0,138984231	-247565,26	150720,6
J65	80	0,609613846	-247446,94	150674,23
J66	72	2,447695385	-247612,78	150426,02
J67	79	0,152290385	-247630,99	150551,53
J68	73	0,975729231	-247855,09	150658,83
J69	71	0,912488077	-247950,11	150497,29

J1170	54,54	1,224736154	-246291,93	148881,87
J441	69	0	-246519,12	149644,17
J444	29,46	1,186148077	-248244,69	149157,44
J341	14,89	0,643168846	-248610,54	149798,86
J344	54,7	1,57188	-246282,43	148739,33
J345	49,97	1,355175	-246149,39	148739,33
J347	54,4	0,390755769	-246396,46	148748,83
J348	62,18	2,346363462	-247151,91	148725,08
J349	36,41	1,636248462	-247322,95	148853,36
J241	70	1,265218846	-247455,99	150273,98
J242	65	0,976179231	-247322,95	150226,47
J243	60	0,268438846	-247342,65	150152,76
J244	70	1,959988846	-247470,24	150364,26
J245	71	1,149101538	-247551,24	150367,49
J246	55	1,884220385	-247037,88	150516,3
J247	57	1,490236154	-247170,87	150477,91
J248	54	2,081825769	-247033,12	150316,74
J249	50	0,046895769	-247208,92	150378,51
J142	5,53	0,525921923	-248363,47	148668,06
J143	6,3	0,184883077	-248558,27	148729,83
J70	70	0,263633077	-248011,88	150435,52
J144	4,17	0,829235769	-248696,06	148672,81
J71	77	0,320625	-247888,66	150796,93
J72	75	0,000603462	-248040,39	150692,09
J73	80	1,341985385	-247796,64	150778,53
J74	75	1,642638462	-248078,4	150616,07
J76	70	1,360035	-247851,85	150447,24
J77	76	2,06853	-247969,12	150777,61
J78	60,56	0,204733846	-247912,1	149337,99
J350	33,82	0,479806154	-246111,38	149062,41
J351	25,51	1,697283462	-247417,98	148896,12
J352	47,55	1,135519615	-247223,17	149005,4
J353	22,64	0,892558846	-247351,46	149033,91
J354	18,68	0,374951538	-247541,51	148881,87
J355	28,87	1,760989615	-247305,84	148569,94
J358	22,3	2,321965385	-247246,93	148653,81
J359	17,57	1,325530385	-247170,91	148630,05
J250	67	0,224103462	-247299,19	150311,99
J251	75,19	1,894323462	-246796,64	150257,06
J252	83,82	1,004605385	-246486,73	150240,72
J253	74,69	1,154686154	-247436,98	151034,18
J254	74,59	1,230414231	-247565,26	151152,96
J257	80	0,519069231	-246638,77	150207,46
J154	43,69	0,82434	-246391,71	147798,58
J155	44,41	0,238572692	-246500,98	147798,58
J82	70,87	1,474481538	-247893,1	149204,95

J156	46,16	0,424683462	-246301,43	147793,83
J83	61,07	2,319041538	-247940,61	149081,42
J84	43,82	0,244824231	-247189,27	150152,76
J85	45	1,109656154	-247201,54	150269,33
J159	37,41	0,682367308	-246692,34	147821,47
J86	50	2,181366923	-247256,43	150050,67
J87	42,63	1,876719231	-247056,88	150026,92
J89	68,29	0,682355769	-247341,96	151305
J360	20,71	1,684118077	-247227,93	148530,27
J361	26,67	0,641571923	-247398,97	148611,05
J362	43,66	0,224741538	-247408,47	149124,18
J363	72,23	0	-246532,83	149938,04
J364	65	0	-246649,4	149876,69
J365	29,83	1,975323462	-248230,44	149309,48
J366	14,46	0,743145	-248344,47	149247,71
J1208	42,74	0,588205385	-247256,43	149157,44
J367	13,6	1,201186154	-248477,5	149399,75
J369	20,27	0,636504231	-248287,45	149361,74
J160	43,69	0,851516538	-246577	147812,84
J161	22,81	0,112335	-246961,86	147675,05
J162	36,88	1,206070385	-246771,81	147513,51
J163	16,2	0,515043462	-247227,93	147803,33
J164	17,34	2,161336154	-246871,58	147675,05
J91	64,09	1,471571538	-247262,89	151306,14
J165	16,69	1,887271154	-246895,34	147770,08
J166	23,95	2,319708462	-246895,34	147556,27
J167	23,91	0,827541923	-246890,59	147432,74
J94	30,75	1,357353462	-245797,8	148363,98
J95	22,56	0,201728077	-247774,32	147884,11
J96	30	1,585930385	-247622,28	147950,62
J97	34,19	1,025091923	-247717,3	147964,88
J976	6,3	2,401058077	-248468	148706,07
J571	77,11	0,286558846	-247099,64	150635,08
J572	76,4	2,308613077	-247164,73	150717,18
J573	81,62	1,550524615	-247361,05	151207,98
J574	67,36	0,869315769	-247441,73	151243,24
J575	75,27	0,373114615	-247161,41	150858,38
J576	80,8	1,199945769	-246937,74	150539,26
J370	20,46	0,548523462	-248173,42	149447,26
J371	68,81	0	-246630,99	150054,6
J372	23,2	0,326051538	-249128,42	148934,13
J373	27,22	0,072214615	-249180,69	148843,86
J374	13,7	0,863479615	-248981,13	148934,13
J375	22,72	1,369171154	-249014,39	149090,92
J376	12,18	2,307386538	-249128,42	149067,17
J377	13,12	1,345615385	-248800,59	148900,87

J1219	14,48	1,016053846	-247660,29	147741,57
J379	10,25	2,118114231	-249275,71	148929,38
J171	8,81	2,065564615	-247332,45	147546,77
J172	6,25	1,681069615	-247199,42	147485
J173	13	1,804736538	-247332,45	147751,07
J174	6,11	2,491929231	-247109,14	147432,74
J175	6,84	0,849514615	-247085,39	147575,27
J177	13,14	1,238028462	-247622,28	147808,09
J179	15,01	1,03242	-247774,32	147817,59
J580	105,08	1,738204615	-246686,28	150677,84
J486	86,11	0,447723462	-246995,11	150801,37
J487	79	1,057295769	-247066,57	150876,69
J488	89,16	1,357943077	-246974,55	150686,5
J489	85,02	2,036659615	-247080,64	150986,67
J381	36,02	1,352284615	-247322,95	148739,33
J1223	3,48	1,068833077	-248795,84	149190,7
J382	70,42	1,272670385	-247118,65	148948,38
J384	42,51	0	-247161,41	149214,45
J385	76,6	0	-246876,33	150098,19
J180	8,77	1,224575769	-247227,93	147570,52
J181	10,94	1,702048846	-247123,4	147698,81
J1024	5,83	2,216500385	-248287,45	148587,29
J183	13,28	0,926288077	-247408,47	147708,31
J1025	8,61	0,756243462	-248225,69	148468,51
J186	9,38	0,732167308	-247413,22	147627,54
J187	9,81	0,375778846	-247265,94	147622,79
J188	8,51	1,324553077	-247536,76	147565,77
J189	7,58	0,558154615	-247446,48	147561,02
J490	95,84	1,461324231	-246876,39	150753,99
J491	76,93	0,908646923	-247072,71	150784,66
J492	94,67	2,189936538	-246913,2	150858,28
J493	77,62	1,195035	-247226,08	151054,6
J494	93,76	0,476583462	-246771,81	150668,33
J495	91,15	1,710155769	-246881,08	150616,07
J496	91	1,868539615	-246781,31	150511,54
J497	105,63	1,534836923	-246765,96	150803,07
J498	90,12	1,955348077	-246857,33	150483,04
J500	75,52	0,404359615	-246610,26	150920,15
J499	72,24	2,01945	-246471,48	150925,77
J501	80,97	0,506545385	-246440,81	150864,42
J502	80,99	2,391905769	-246391,73	150956,44
J503	99,65	0,164628462	-246462,97	150782,36
J504	66,71	0,153805385	-246538,97	151036,2
J394	70,53	0,346153846	-246173,15	149604,06
J509	99,94	0,949013077	-246325,19	150806,12
J399	75	0	-246287,43	149888,96

J401	70	0	-246348,78	149809,2
J406	71,74	0	-246201,54	149661,96
J295	56,42	0,434433462	-248026,13	149290,47
J407	68	0	-246424,96	149665,82
J296	30,91	1,787041154	-248116,41	149228,71
J408	7,93	1,332556154	-248235,19	148268,96
J297	79,05	1,402524231	-247536,76	149299,98
J298	74,46	0,541834615	-247712,55	149242,96
J191	5,76	1,170013846	-247479,74	147461,24
J303	50,42	1,865885769	-247897,85	148858,11
J192	12,4	1,880776154	-247033,12	147850,85
J193	12,99	0,997330385	-246957,1	147926,87
J305	47,11	2,257748077	-247817,08	148758,33
J194	13,46	1,865018077	-247493,99	147793,83
J195	15,39	0,221398846	-247584,27	147651,29
J196	13,35	1,586428846	-247375,21	147850,85
J308	33,24	1,78257	-248005,22	149796,93
J198	18,54	0,039205385	-248311,21	149594,55
J200	15,75	1,077860769	-248149,67	149547,04
J199	16,26	1,004957308	-248250,62	149698,77
J201	35,86	0,688239231	-247741,42	149704,91
J202	10,41	2,463435	-248591,53	149366,49
J203	11,03	2,006469231	-248734,07	149594,55
J204	21,51	1,740252692	-248306,46	149798,86
J205	16,66	1,043997692	-248472,75	149314,23
J206	14,12	1,836220385	-248339,72	149513,78
J207	18,86	0,692920385	-248477,5	149499,53
J208	11,25	0,891466154	-248843,35	149613,56
J101	28,65	1,083642692	-247926,36	148017,14
J102	36,96	2,362428462	-247812,33	147993,38
J109	17,47	0,303874615	-248045,14	148007,64
J1	16,82	1,614879231	-247075,89	147770,08
J2	11,97	0,869582308	-247536,76	147694,06
J3	29,02	0,261080769	-247265,94	148064,65
J4	20,88	0,463505769	-247508,25	148007,64
J5	22,75	0,194211923	-247641,28	148045,65
J6	15,25	1,081899231	-247042,63	147988,63
J7	24,91	2,398178077	-247170,91	147964,88
J8	31,17	1,355073462	-246990,36	148221,44
J9	31,89	1,235941154	-247109,14	148164,43
J10	14,62	2,432416154	-247926,36	148178,68
J11	18,43	0,5445	-247836,08	148411,49
J12	29,27	0,947478462	-247579,52	148363,98
J13	32,04	0,989611154	-247731,56	148554,03
J14	37,91	0	-247132,9	148463,76
J15	102,84	0	-246353,7	149570,8

J16	88,89	0,346153846	-246258,67	149437,76
J17	82,75	0	-246287,43	149729,45
J18	84,96	0	-246256,76	149551,53
J19	90,94	0,346153846	-246404	149459,51
J20	80	0	-246238,35	149778,53
J21	80	0,346153846	-246391,71	149974,65
J22	82,74	0	-246815,04	149974,85
J23	75,96	0	-246759,83	150011,66
J25	94,13	0,161226923	-246115,65	150361,35
J26	76,35	1,890230769	-246152,46	150250,92
J27	82,08	1,751285769	-246211,16	150440,28
J28	45	1,242678462	-246054,37	149418,76
J29	49	0,38859	-245864,32	149732,34
J30	72,01	0,559344231	-246268,17	150373,76
J31	69,78	0,815359615	-246277,68	150259,73
J32	45	1,961221154	-245750,29	149485,27
J33	48	0,125656154	-246072,71	149563,8
J34	50	1,29504	-245949,84	149699,08
J35	67,78	1,892574231	-246238,35	150097,55
J36	51,08	2,001675	-245935,59	149808,36
J37	66,19	0,813013846	-246538,99	150083,93
J38	47	2,431821923	-245907,06	149600,61
J24	34,53	2,010668077	-249004,89	149756,1
J39	45,88	1,687065	-249114,17	149808,36
J40	12,8	2,262823846	-248909,87	149033,91
J123	38,41	2,189449615	-245474,72	148321,22
J140	39,94	1,041620769	-245517,48	148444,75
J141	41,45	0,307706538	-245579,24	148363,98
J157	31,49	2,385394615	-245688,52	148316,47
J158	25,88	1,993243846	-245588,75	148202,44
J168	40,21	1,740713077	-245892,83	148397,24
J170	46,87	1,004011154	-246021,11	148354,48
J176	50,64	0,040744615	-245987,85	148511,27
J178	58,87	0,419406923	-245888,07	148482,76
J184	56,09	0,410585769	-245745,54	148459,01
J185	43,71	1,274299615	-246078,12	148573,04
J190	58,49	1,015156154	-246196,91	148539,78
J197	41,86	0,265335	-246358,45	148554,03
J213	52,07	0,690309231	-246201,66	148401,99
J215	75,76	1,607618077	-246258,67	148644,3
J216	53,06	2,122750385	-246448,72	148587,29
J227	52,89	1,244923846	-246557,37	148643,56
J238	44,16	0,469438846	-246698,48	148643,56
J239	43,49	2,241541154	-246524,74	148834,35
J255	35,31	0,932035385	-246396,46	148948,38
J256	40	0	-246771,81	148824,85

J258	51,24	1,927081154	-246567,5	148516,02
J260	32,53	0,545000769	-246296,68	148976,89
J265	50,87	1,117483846	-245959,34	148706,07
J266	39,83	0,59007	-245945,09	148905,62
J267	22,31	2,195960769	-247465,49	148976,89
J61	72	1,526081538	-247916,86	150582,81
J92	72	0,936080769	-247857,99	150551,53
J268	69,68	0,973755	-247992,88	149195,45
J278	104,29	2,151474231	-246662,53	150506,79
J281	83,72	1,464844615	-246458,22	150573,31
J283	94,06	2,328898846	-246524,74	150682,59
J284	77,38	1,292981538	-246330,38	150600,61
J136	81,8	0,825751154	-247256,76	151232,52
J137	9,11	2,171134615	-247185,16	147641,79
J145	47,46	0,647651538	-245403,45	148430,5
J118	75	0,648853846	-247765,96	150269,33
J52	54,7	0,446733462	-247052,13	148710,82
J81	50	0,867393462	-246164,73	149312,27
J88	45	0,006264231	-246072,71	149827,61
J90	84	1,855855385	-246581,76	150316,74
J93	65	6,306651923	-246379,46	150201,84
J147	68	0,696474231	-247275,44	150663,58
J148	50	1,757425385	-247798,07	151015,18
J149	40	1,012163077	-247790,5	151122,09
J150	60	2,028928846	-247913,2	151048,47
J151	60	1,854451154	-247527,25	151262,24
J152	32	1,09416	-246802,77	151183,44
J153	60	0,194951538	-247600,32	151293,87
J169	42	1,026579231	-246888,66	151109,82
J182	40	0,848438077	-246833,44	150987,12
J222	32	1,776385385	-246833,44	151115,95
J224	37	0,78072	-246735,29	151097,55
J230	30	1,996933846	-247956,14	148717,18
J235	53	0,379390385	-247969,12	148829,6
J240	87	1,482478846	-246342,65	150698,77
J269	56	0	-246215,91	147789,08
J273	56	0	-246215,91	147936,37
J274	56	0	-246215,91	147665,55
J276	56	0	-246040,11	147665,55
J280	56	0	-246044,87	147793,83
J285	56	0	-246044,87	147936,37
J287	40	0	-246866,83	149090,92
J288	40	0	-246657,78	149109,93
J289	40	0	-246743,3	149238,21
J290	40	0	-246586,51	149204,95
J291	65	0	-246496,02	149416,56

J292	40	0	-246657,78	148791,59
J299	40	0	-246596,01	148948,38
J300	40	0	-246672,03	149014,9
J301	44	0	-247232,22	149649,69
J302	44	0	-247066,38	149722,84
J304	44	0	-247394,22	149827,36
J306	44	0	-247265,94	149903,38
J307	44	0	-246942,85	149566,05
J309	44	0	-247094,89	149613,56
J317	44	0	-247023,62	149361,74
J323	44	0	-247170,91	149409,25
N1	46,5	1,730769231	-245189	148679,99
N2	45,2	1,615384615	-245464,73	149322,42
N3	45,9	1,038461538	-245393,04	149016,37
N4	45,5	1,384615385	-245150,4	149046,7
N5	45,1	0,807692308	-244593,45	148911,59
N6	46,7	1,153846154	-244780,94	148776,49
N7	46,3	1,384615385	-245075,96	148679,99
N8	45,9	0,807692308	-244962,91	148867,48
N9	45	0,980769231	-244976,7	149184,56
N10	45,1	0,807692308	-245224,85	149341,72
N11	47,46	0	-245388,55	148447,25

RESERVATÓRIO

ID	CARGA
R1	100

TANQUES

ID	ELEVAÇÃO	NÍVEL INICIAL	NÍVEL MIN	NÍVEL MAX	DIÂMETRO
T3	112,9	3	0	6,75	13,73
T1	71,5	3	0	6,5	31,3
T7	102	2,5	0	5	7,14
T6	101,5	5,2	0	5,5	8,33
T5	105,8	1	0	4,5	11,89
T2	65	0,5	0	5,9	20,78
T4	132,5	2,5	0	4,7	11,64

TUBULAÇÕES

ID	NÓ INICIAL	NÓ FINAL	COMPRIMENTO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE
P1	J175	J174	52,9	203	72,4549
P10	J335	J336	79,23	76	108,0095
P100	J159	J160	107,88	406	76,5142
P1000	J341	J204	109,27	203	76,9461
P101	J166	J162	243,37	254	84,2085
P1016	J22	J233	164,77	305	85,2382

P102	J109	J408	1280,3	508	92,9472
P1022	J281	J283	200,76	102	99,5808
P1023	J278	J283	136,34	102	95,6885
P1024	J580	J278	375,62	102	89,6207
P1025	J575	J132	39,18	76	97,7766
P1026	J132	J493	45,61	76	88,4504
P1027	J486	J488	82,32	51	92,0106
P1028	J489	J486	9,57	51	86,9934
P1029	J489	J492	122,62	76	91,3396
P103	J2	J1219	35,98	254	79,371
P1030	J493	J489	95,25	76	104,6083
P1031	J494	J490	188,28	152	84,3741
P1032	J490	J492	143,29	152	98,431
P1033	J492	J131	128,79	152	84,6894
P1034	J254	J253	52,87	203	97,4185
P1035	J253	J128	122,47	152	97,7581
P1036	J131	J128	83,33	203	74,2979
P1039	J573	J128	121,38	203	92,1423
P104	J166	J167	33,11	203	99,8866
P1040	J136	J573	29,45	152	94,6888
P1041	J136	J129	307,54	102	112,5082
P1042	J89	J573	84,54	152	76,1502
P1044	T5	J64	65,8	203	100,2182
P1045	J64	J53	68,63	203	118,8214
P106	J102	J101	270,38	102	63,5511
P107	J171	J172	357	203	80,5098
P108	J101	J109	183,53	203	78,7205
P109	J175	J172	218,52	203	76,8934
P11	J318	J235	83,45	101,6	96,8344
P110	J179	J177	425,83	508	98,9941
P111	J976	J143	126,36	152	72,4117
P112	J142	J976	646,98	305	68,6009
P113	J137	J181	310,73	152	85,3538
P115	J408	J435	99,88	102	91,2315
P116	J186	J187	204,54	152	93,4739
P117	J435	J431	104	102	67,962
P118	J431	J432	115,91	102	84,6653
P119	J188	J189	64,88	305	78,1412
P12	J208	J337	85,24	406	89,6626
P120	J432	J1160	91,4	102	88,389
P121	J192	J193	42,23	152	100,3676
P122	J173	J194	45,06	305	78,978
P123	J1160	J3	51,21	152	61,0614
P124	J376	J225	99,09	102	78,8303
P125	J163	J196	193,35	508	84,7389
P126	J225	J316	109,6	76	89,7379

P127	J316	J40	87,22	102	73,6774
P128	J40	J374	165,63	102	90,9483
P129	J374	J377	79,59	102	78,0662
P13	J337	J24	62,56	406	83,0438
P130	J376	J226	56,79	76	70,7072
P131	J206	J207	86,5	76	74,7267
P132	J226	J379	67,35	76	88,5417
P134	J4	J5	68,79	76	78,568
P136	J5	J431	241,77	102	75,7332
P138	J203	J217	19,28	254	72,4853
P139	J208	J211	73,66	406	68,7185
P14	J24	J39	151,39	406	72,0091
P140	J219	J220	222,3	102	107,8347
P141	J221	J51	169,94	102	103,7881
P142	J37	J93	16,61	152,4	85,3907
P144	J382	T6	130,79	76	99,9191
P147	J232	J231	60,08	203	92,837
P148	J233	J234	561,69	305	96,4394
P15	J39	T1	395,29	406	90,483
P150	J82	J50	93,19	152	103,1527
P154	J245	J66	170,64	152	108,8316
P155	J60	J219	59,38	101,6	105,7092
P156	J242	J243	80,34	102	110,8685
P157	J244	J245	232,93	102	102,901
P158	J236	J246	69,88	76	105,0724
P159	J204	J336	118,78	203	80,1472
P16	J1208	J353	252,34	102	97,2483
P160	J248	J246	68,68	76	104,6279
P161	J361	J355	40,31	76	90,0133
P162	J249	J85	190,67	152	98,7606
P163	J251	J90	67,74	203	94,2302
P165	J135	J234	143,81	305	92,9343
P166	J352	J382	235	101,6	93,6027
P17	J408	J1025	32,42	508	77,2813
P174	J6	J7	278,59	102	89,3207
P177	J305	J303	56,8	102	100,6056
P18	J1025	J411	283,3	508	100,3
P184	J1208	J352	59,38	101,6	95,9147
P19	J411	J1056	750,87	508	97,7
P195	J7	J4	144,33	76	80,6314
P2	J175	J181	295,25	203	62,0478
P20	J1056	J214	579,67	508	89,6725
P201	J7	J8	102,19	76	96,6278
P21	J214	J212	176,48	406	86,6937
P211	J295	J296	202,33	76	84,0517
P215	J419	T2	140,76	254	81,4235

P218	J310	J311	54,55	102	81,7714
P219	J312	J313	67,98	102	86,836
P22	J159	J192	567,3	406	81,1136
P220	J314	J315	68,33	76	93,7376
P223	J318	J319	108,98	203	93,217
P225	J321	J322	120,77	102	92,6855
P228	J327	J328	42,72	76	99,2889
P23	J192	J196	316,91	508	77,1626
P230	J330	J327	114,61	76	77,3953
P231	J331	J330	12,21	76	98,4154
P233	J333	J334	58,66	76	97,2959
P234	J335	J333	41,63	76	87,2098
P235	J336	J337	92,74	76	84,3219
P237	J415	J441	12,01	305	100
P238	J441	J416	12,59	304,8	104,74
P24	J177	J194	71,05	508	88,6208
P241	J344	J345	49,46	102	114,8367
P242	J36	J29	25,06	152,4	99,015
P243	J36	J88	57,08	203,2	82,7962
P245	J87	J84	18,65	152,4	120,3989
P246	J249	J250	56,94	152,4	121,5968
P248	J250	J245	6,96	152,4	110,0673
P249	J359	J360	28,43	51	85,3808
P25	J196	J194	4,3	508	74,3773
P251	J329	J362	11,49	152	103,7333
P252	J363	J364	135,44	305	82,3004
P255	J369	J370	76,14	51	71,4672
P256	J371	J364	55,17	305	94,8591
P258	J372	J373	79,53	102	75,5123
P259	J374	J375	136,09	102	83,0936
P26	J163	J1	22,94	508	88,0075
P264	J242	J241	11,73	101,6	112,5051
P266	J250	J242	55,29	101,6	107,0558
P267	J572	J147	344,62	152,4	95,5913
P268	J130	J149	146,46	152,4	86,8378
P27	J1	J161	163,63	254	69,1055
P270	J149	J150	88,36	101,6	92,7697
P272	J8	J9	143,88	102	73,9529
P275	J149	J148	172,96	152,4	98,1649
P28	J1	J164	117,42	152	88,2667
P280	J407	J401	333,4	203	88,343
P282	J436	J10	131,93	102	86,7204
P284	J574	J151	198,97	76,2	89,125
P285	J151	J153	130,71	76,2	90,1826
P286	J169	J182	155,58	101,6	90,0054
P287	J419	J420	45,12	254	78,3493

P288	J169	J222	226,74	76,2	85,0527
P29	J1	J165	20,51	152	89,4838
P290	J222	J224	46,28	76,2	89,4448
P291	J425	J426	132,94	305	107,08
P292	J416	J427	13,54	305	97,2663
P293	J427	J425	125,2	305	92,1591
P294	J428	J429	101,2	102	79,9651
P295	J10	J435	133,23	76	72,4092
P296	J432	J433	231,87	76	82,9572
P297	J411	J438	42,53	406	73
P298	J438	J434	40,11	305	84,5511
P299	J436	J429	61,51	102	87,7099
P3	J181	J173	136,52	300	73,6491
P30	J161	J166	40,89	254	86,7096
P301	J434	J11	45,31	305	85,1892
P302	J11	J433	178,28	305	80,3402
P303	J428	J439	131,94	76	88,3345
P304	J222	J152	268,74	101,6	89,3927
P305	J407	J441	43,41	203	90,7993
P307	J433	J12	47,3	305	60,5122
P308	J426	J363	334,57	305	88,0772
P309	J235	J230	128,8	101,6	94,956
P31	J171	J186	144,67	152	108,7731
P310	J269	J156	9	610	87,268
P316	R1	J280	11,62	610	70,4519
P319	J274	J269	10,54	610	76,5927
P32	J186	J2	84,44	152	103,5584
P320	J273	J269	11,47	610	76,5188
P322	J280	J285	11,5	610	89,4331
P323	J280	J276	11,47	610	84,6872
P329	J503	J501	134,52	152	100,1836
P33	J1219	J179	22,81	254	73,036
P330	J501	J499	66,79	76	96,4229
P331	J486	J487	93,46	51	93,1933
P336	J495	J496	182,99	152	92,1737
P337	J497	J494	20,49	305	100
P338	J499	J500	74,38	76	100,3553
P339	J501	J502	307,49	102	88,653
P34	J179	J110	98	508	78,506
P340	J494	J496	96,21	305	101,0824
P341	J496	J498	189,74	305	94,6355
P343	J495	J576	111,65	152	100,2909
P344	J576	J571	45,26	152	85,9092
P346	J499	J504	54,91	51	93,9134
P347	J509	T4	385,56	305	96,2352
P348	J503	J509	42,47	305	88,7295

P349	J503	J511	39,12	305	97,0124
P35	J50	J51	64,56	152	84,3826
P350	J509	J240	400,16	203	99,8598
P37	J348	J52	180,61	203	97,8039
P372	J219	J86	6,42	101,6	113,1147
P374	J287	J288	15,83	254	91,9156
P375	J288	J300	7,79	254	75,4894
P376	J300	J299	6,64	254	102,6856
P378	J292	J256	6,47	254	112,4497
P379	J287	J289	6,43	254	101,7753
P38	J55	J56	169,49	76	106,465
P380	J289	J290	4,79	254	87,8132
P381	J291	J415	5,53	304,8	119,2071
P383	J571	J491	19,56	152	80,1493
P384	J491	J575	26,14	76	101,9127
P385	J498	J134	106,53	305	76,0237
P386	J134	J576	8,12	152	79,9011
P39	J490	J488	190,12	102	95,4376
P397	J332	J301	13,16	203,2	87,4272
P398	J301	J302	6,75	203,2	91,0504
P399	J302	J307	9,71	203,2	81,4136
P40	J59	J60	143,64	102	107,9144
P402	J307	J309	6,12	203,2	89,1549
P403	J304	J306	6,86	152,4	111,4725
P409	J306	J87	26,38	152,4	89,8979
P410	J323	J317	7,7	203,2	85,6677
P42	J54	J73	32,93	152	114,9191
P424	J317	J384	27,8	203,2	124,9857
P43	J64	J65	36,18	203	88,5373
P44	J66	J67	247,65	152	115,1682
P443	J13	J12	67,31	305	85,576
P445	J417	J421	7,8	254	86,2106
P446	J418	J421	31,15	254	102,1976
P450	J418	J422	19,47	254	96,9651
P46	J69	J70	70,86	102	112,6626
P465	J421	J14	18,2	254	86,5654
P467	J422	J420	15,17	254	96,1541
P468	J420	J287	31,29	254	105,2734
P48	J73	J71	28,98	152	113,5196
P482	J9	J3	321,89	152	78,9039
P484	J438	J13	336,57	203	79,98
P49	J72	J74	134,92	152	121,705
P492	J86	J243	157,32	101,6	114,1137
P5	J1223	J218	588,97	406	83,5619
P500	J90	J252	24,23	203	112,6228
P501	J571	J572	11,32	152,4	111,4535

P502	J89	J574	9,19	76,2	99,5946
P51	J68	J77	57,47	102	92,2379
P510	J16	J15	193,37	102	104,9547
P52	J78	J51	83,26	102	89,6542
P524	J511	J580	170,54	305	96,2278
P527	J580	J497	149,04	305	73,1242
P529	J278	J281	212,31	102	103,9178
P53	J384	J1208	10,32	203	87,5607
P54	J488	J491	111,67	51	92,3979
P55	J82	J83	99,86	76	87,653
P57	J84	J85	288,77	152	99,5967
P58	J86	J84	503,91	102	100,8492
P596	J56	J58	76,39	76	112,8056
P597	J281	J284	79,68	102	101,1212
P6	J180	J171	199,39	152	94,6451
P609	J57	J56	86,07	76	111,6336
P610	J15	J17	206,58	76	95,7998
P63	J96	J95	165,95	254	88,7273
P633	J54	J67	173,88	152	119,1333
P64	J96	J97	126,63	203	80,2477
P65	J353	J351	164,93	102	101,9473
P67	J97	J102	330,24	203	74,1138
P670	J17	J18	54,41	152	98,7041
P671	J18	J16	62,97	152	94,8379
P68	J195	J188	302,74	305	83,2209
P69	J1223	J40	103,63	152	72,3518
P697	J16	J19	88,89	102	97,7625
P7	J218	J211	60,22	508	78,4537
P70	J40	J375	88,36	152	72,8439
P71	J188	J191	419,4	254	84,7287
P72	J95	J110	247,46	305	85,0357
P724	J78	J268	92,72	152	96,707
P725	J78	J295	117,32	152	105,2924
P752	J297	T7	70,36	152	106,1657
P753	J297	J221	71,91	152	89,5241
P754	J19	J15	92,49	51	84,8277
P755	J140	J141	47,12	305	114,1299
P756	J123	J141	41,66	305	107,9167
P757	J1024	J142	568,43	305	99,8313
P758	J1025	J1024	102,21	305	93,3573
P759	J221	J298	97,19	152	104,435
P760	J298	J312	88,54	152	101,8544
P761	J312	J83	171,27	152	96,9921
P763	J141	J157	387,59	305	112,2055
P766	J318	J303	37,85	152	95,0373
P767	J157	J94	227,5	305	109,3149

P768	J157	J158	217,03	254	116,5116
P769	J94	J168	154,26	305	110,6186
P771	J168	J170	69,36	203	99,6322
P772	J168	J176	215,02	305	85,8031
P775	J176	J178	129,42	203	108,382
P776	J178	J184	144,5	102	114,3497
P777	J176	J185	402,31	305	111,7656
P779	J185	J190	524,49	203	87,9098
P780	J18	J406	153,56	203	104,9547
P781	J83	J318	130,18	152	90,9141
P783	J190	J197	674,96	203	115,0802
P784	J213	J190	88,96	102	98,432
P785	J190	J215	184,71	102	89,6475
P786	J197	J216	166,27	203	110,0002
P787	J216	T3	127,08	102	130,1224
P788	J216	J227	107,85	152	113,9141
P789	J1056	J366	285,95	203	74,9687
P791	J227	J238	82,5	152	115,9461
P794	J238	J239	39,04	203	123,9466
P795	J239	J255	129,41	203	97,7803
P796	J256	J238	22,42	203	89,8762
P797	J227	J258	21,64	102	117,0542
P798	J255	J260	684,07	203	116,0879
P8	J218	J212	11,35	406	76,0774
P800	J344	J1170	15,93	203	109,6676
P801	J1170	J347	9,47	203	104,4689
P804	J1169	J265	68,27	102	103,0053
P805	J265	J266	96,57	152	114,5602
P806	J266	J260	32,51	152	103,899
P807	J260	J350	162,82	203	100,1493
P808	J83	J311	253,47	203	92,0642
P809	J321	J324	17,35	102	109,3503
P810	J406	J394	64,3	203	88,939
P811	J320	J321	50,17	102	89,5672
P813	J328	J320	30,85	152	76,0416
P815	J329	J328	50,52	102	84,3422
P817	J1158	J1153	253,3	203	72,6581
P819	J1153	J1157	8,02	203	105,0733
P821	J354	J267	64,78	102	83,9452
P822	J267	J353	11,71	102	99,5936
P823	J236	J237	18,84	76	113,3618
P826	J237	J244	335,29	76	99,1486
P827	J244	J247	119,07	76	103,7402
P83	J155	J160	15,14	610	75,6638
P830	J247	J248	89,3	76	99,044
P831	J248	J249	62,2	76	86,2918

P84	J183	J187	148,63	203	97,4135
P840	J311	J320	235,28	203	97,7704
P841	J297	J331	347,83	76	93,6766
P842	J62	J55	64,41	52	95,5212
P844	J59	J62	12,49	102	113,8083
P846	J58	J118	94,84	203	103,9805
P847	J55	J118	68,63	152	91,0711
P85	J132	J133	36,6	76	69,9267
P850	J59	J57	241,13	101,6	112,5311
P851	J62	J57	228,78	76	121,9332
P852	J58	J67	40,39	203	105,3809
P853	J67	J53	295,68	203	118,6474
P855	J92	J76	37,88	102	114,8547
P858	J92	J68	195,38	102	113,41
P859	J71	J77	90,81	152	95,2859
P86	J134	J135	161	305	110,5
P861	J77	J72	110,79	152	87,941
P866	J68	J61	17,37	102	92,1738
P87	J187	J137	80,03	203	76,3985
P871	J61	J69	48,15	102	91,8071
P880	J1160	J1161	112,84	76	86,035
P889	J1169	J1170	15,72	203	88,7411
P89	J375	J372	104,3	152	78,4305
P892	J414	J13	30,39	254	69,8485
P9	J212	J217	49,95	254	66,7492
P90	J372	J376	98,94	102	62,3189
P91	J143	J144	572,34	102	94,3389
P914	J399	J20	38,61	203	91,18
P915	J1208	J362	10,58	152	72,7725
P92	J137	J180	63,12	203	83,1066
P924	J195	J1219	82,38	254	74,459
P927	J210	J1223	348,88	406	84,5315
P929	J401	J399	83,31	203	90,0826
P930	J399	J21	78,95	203	88,2
P931	J20	J406	248,4	203	87,0831
P932	J17	J399	381,56	203	84,9615
P933	J371	J23	130,54	305	87,9469
P934	J23	J385	18,46	254	102,9935
P935	J385	J22	152,13	305	100,0547
P937	J385	J251	198,09	254	74,2779
P938	J251	J257	168,95	254	74,4755
P939	J26	J25	248,76	152	95,7893
P94	J123	J145	51,35	305	139,0835
P940	J25	J27	187,99	152	99,2821
P941	J27	J30	142,58	152	79,3728
P942	J26	J27	85,08	152	83,5947

P943	J81	J28	84,21	76	86,7748
P944	J26	J31	59,58	254	82,353
P946	J30	J31	143,03	102	98,061
P947	J28	J32	122,43	152	76,8045
P948	J32	J29	74,71	152	104,8491
P949	J31	J35	24,39	254	92,687
P95	J140	J145	50,7	305	118,4307
P951	J257	J37	338,8	254	94,7131
P953	J37	J35	495,66	254	85,4054
P954	J36	J34	294,07	203	78,6689
P955	J34	J33	131,74	102	85,1813
P956	J34	J38	115,17	152	68,2529
P957	J38	J33	51,05	152	98,1514
P958	J38	J32	122,41	102	105,3081
P959	J33	J28	123,42	102	98,2207
P96	J414	J417	53,72	254	87,9028
P961	J444	J366	234,55	203	85,6539
P962	J6	J1058	49,83	152	90,7478
P963	J366	J205	93,54	203	85,5303
P964	J205	J369	129,91	152	96,2637
P965	J205	J367	135,06	203	93,9427
P966	J367	J206	31,32	203	82,5088
P967	J206	J200	207,54	203	82,1071
P968	J200	J198	68,17	102	78,3964
P969	J200	J1154	149,16	203	86,2672
P97	J154	J155	24,41	610	88,8953
P970	J1154	J199	165,04	203	87,7951
P971	J367	J370	136,94	152	77,8295
P972	J370	J1158	219,42	152	82,6695
P973	J1158	J365	164,68	203	71,9319
P974	J365	J444	186,4	203	72,7187
P975	J369	J365	159,56	152	74,7236
P976	J359	J358	83,33	76	83,2023
P977	J89	J91	45,98	102	102,4317
P978	J358	J355	178,97	76	78,8556
P98	J156	J154	174,53	610	71,7523
P981	J361	J351	36,19	76	80,2162
P982	J351	J349	87,24	203	98,5114
P983	J349	J352	180,2	101,6	91,8964
P984	J349	J381	16,03	101,6	108,9555
P986	J381	J348	229,54	101,6	87,084
P987	J348	J232	94,56	101,6	96,4064
P988	J232	J382	9,74	101,6	102,5172
P989	J1153	J1155	91,59	51	82,0703
P99	J110	J109	452,37	508	96,6382
P990	J1155	J1154	78,87	102	85,7877

P991	J214	J202	20,25	203	74,3133
P992	J202	J314	69,15	203	80,6408
P993	J314	J199	63,52	203	80,232
P994	J199	J1157	115,39	203	83,0944
P995	J1157	J201	228,99	152	82,4996
P996	J332	J201	10,22	203	84,5761
P997	J201	J308	154,87	203	96,6174
P998	J308	J204	107,98	203	90,6408
P999	J203	J341	81,67	254	68,7046
1	J32	N2	328,74	102	100
2	N11	N1	328,98	102	100
3	N1	N7	113,05	102	100
4	N7	N6	310,4	102	100
5	N6	N5	231,1	102	100
6	N7	N8	218,93	102	100
7	N8	N4	259,37	102	100
8	N9	N5	470,52	102	100
9	N4	N3	244,52	102	100
10	N1	N3	393,42	102	100
11	N3	N2	314,33	102	100
12	N2	N10	240,65	102	100
13	N10	N9	293,73	102	100
14	N4	N9	221,76	102	100

BOMBAS

ID	NÓ INICIAL	NÓ FINAL
PU1	J285	J273
PU2	J280	J269
PU3	J276	J274
PU4	J299	J292
PU5	J300	J256
PU6	J289	J415
PU7	J290	J291
PU8	J301	J304
PU9	J302	J306
PU10	J307	J317
PU11	J309	J323

VÁLVULAS

ID	NÓ INICIAL	NÓ FINAL	DIÂMETRO	TIPO
v1	J35	J88	203,2	PRV
V45	J253	J130	152,4	PRV
V47	J129	J169	101,6	PRV
V2	J14	J422	254	TCV
N15	J145	N11	12	PRV

CURVA DAS BOMBAS		
ID	VALOR X	VALOR Y
6	16,8889	156,7
	19,5	146,5
	22,1389	136,2
	25,9445	117,9
	33,3333	50
7	18,25	75
	23,3889	64
	30,6389	46
	38,8889	0
4	30,1222	221,76
	37,6361	202,41
	43,7306	182,16
	47,2222	160
5	31,9139	217,27
	37,8778	201,91
	42,5528	187,15
2	50	140
	9,8889	72,2
	12,5278	62,3
	13,3333	57,9
	18,0556	0
3	11,3028	76,59
	12,6583	68,19
	14,0306	60,29
	18,0556	0
1	3,9972	64,86
	41,9056	48,48
	56,1361	43,96
	69,4667	39,56
	77,2944	34,53
	97,6611	28,83
8	138,8889	1
	0	70
	60	50
	100	30
9	0	90
	30	70
	50	30
10	0	120
	30	110
	70	30
11	0	90
	30	50
	40	10