



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AMANDA SOUSA SAMPAIO

**AVALIAÇÃO DO OPERADOR ELITISMO NA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MÉTODO TRANSIENTE
INVERSO E ALGORITMO GENÉTICO**

FORTALEZA

2018

AMANDA SOUSA SAMPAIO

AVALIAÇÃO DO OPERADOR ELITISMO NA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MÉTODO TRANSIENTE
INVERSO E ALGORITMO GENÉTICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S181a Sampaio, Amanda Sousa.
Avaliação do operador Elitismo na detecção de vazamentos em rede de distribuição de água utilizando o Método Transiente Inverso e Algoritmo Genético / Amanda Sousa Sampaio. – 2018.
145 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo .
1. Análise Transiente Inversa. 2. Calibração. 3. Algoritmo Genético. 4. Vazamentos. 5. Elitismo. I.
Título.

CDD 627

AMANDA SOUSA SAMPAIO

AVALIAÇÃO DO OPERADOR ELITISMO NA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MÉTODO TRANSIENTE
INVERSO E ALGORITMO GENÉTICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 16/05/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda De Castro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Aos meus pais, Cleide e Almir.

AGRADECIMENTOS

Aos professores da pós-graduação do Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, pelos conhecimentos compartilhados.

De modo especial ao Prof. Dr. John Kennedy de Araújo, pela parceria e orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Marco Aurélio Holanda De Castro e José Maria Brabo Alves pelo tempo, colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

As minhas irmãs, Fabrízia e Fernanda, pela amizade, companhia e conselhos.

Aos meus pais, Cleide e Almir, por todo incentivo, compreensão e cuidados.

Ao Thibério por se fazer sempre presente, pela paciência e apoio durante essa jornada.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

“Não há no mundo coisa mais difícil do que a sinceridade e mais fácil do que a lisonja”
(DOSTOIÉVSKI, F.)

RESUMO

Detecção de vazamentos e calibração de modelos hidráulicos são questões importantes sobre o gerenciamento de redes de distribuição hidráulica. Quando se aplica Algoritmos Genéticos para otimizar a calibração é importante manter dois requisitos aparentemente contraditórios: preservar indivíduos promissores de uma geração para outra através da técnica elitista e manter a diversidade da população. Este trabalho avalia o desempenho do operador Elitismo utilizado na técnica de busca e otimização do Algoritmo Genético (AG), para localização e quantificação de vazamentos em redes, através do Método Transiente Inverso (MTI) que consiste em calibrar parâmetros desconhecidos da rede para minimizar os desvios entre as cargas hidráulicas transientes observadas e calculadas. É demonstrado o uso de um aplicativo computacional para a calibração dos vazamentos em um estudo de caso hipotético de pequenas dimensões. Os vazamentos foram tratados como demandas adicionais nos nós da rede analisada, e o parâmetro a ser calibrado é o C_{DA} do nó (produto do Coeficiente de Descarga pela Área de vazamento). Foram avaliados e comparados os resultados obtidos sem a aplicação do Elitismo ($p_e = 0\%$) e com outros dois tipos diferentes de Elitismo que divergem em relação à escolha dos indivíduos que irão compor a população de parâmetros. Com base nas análises, demonstra-se a influência do Elitismo sobre o comportamento da Função Objetivo, sobre as cargas permanentes e transientes calculadas, e sobre a qualidade da otimização. Ainda se analisou a influência da posição do nó vazado. O Elitismo tipo 2 com p_e igual a 20% foi o único a conseguir identificar e quantificar o vazamento os todos os casos em que foi aplicado. Independente do Elitismo, os melhores resultados ocorreram no nó próximo do reservatório e nos nós vizinhos ao nó monitorado. Conclui-se com o trabalho que as técnicas de Algoritmos Genéticos são apropriadas à calibração de redes hidráulicas, tratando-se de um tema que merece ser mais explorado.

Palavras-chave: Análise Transiente Inversa; Calibração; Algoritmo Genético; Vazamentos; Elitismo.

ABSTRACT

Leak detection and calibration of hydraulic models are important questions about the management of hydraulic distribution networks. When applying Genetic Algorithms to optimize calibration it is important to maintain two apparently contradictory requirements which are to preserve promising individuals from one generation to the next through the elitism strategies and to maintain the diversity of the population. This work evaluates the performance of the Elitism operator used in the Genetic Algorithm (GA) search and optimization technique for locating and quantifying network leakage through the Inverse Transient Method (ITM), which consists of calibrating unknown network parameters to minimize deviations between observed and calculated transient hydraulic loads. The use of a computational application for leak calibration is demonstrated in a small hypothetical case study. The leaks were treated as additional demands on the nodes of the analyzed network, and the parameter to be calibrated is the CDA of the node (product of the Discharge Coefficient by the Flow Area). The results obtained without the application of Elitism ($P_e = 0\%$) and with two other different types of Elitism, which diverge in relation to the choice of individuals that will compose the population of parameters, were evaluated and compared. Based on the analyzes, the influence of Elitism on the behavior of the Objective Function, on the calculated permanent and transient loads, and on the quality of the optimization is demonstrated. The influence of the position of the casting node was also analyzed. Elitism type 2 with P_e 20% was the only one to be able to identify and quantify the leakage in all the cases in which it was applied. Regardless of Elitism, the best results occurred in the node near the reservoir and in the neighboring nodes to the monitored node. It concludes with the work that Genetic Algorithm techniques are appropriate to the calibration of hydraulic networks, being a topic that deserves to be explored further.

Keywords: Inverse Transient Analysis. Calibration. Genetic algorithms. Leaks. Elitist strategy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linhas características no plano x-t.....	28
Figura 2 - Conexão Ramificada.....	31
Figura 3 - Sistema exemplo reservatório-tubo-válvula.	41
Figura 4 - Primeiro pico de pressão observado na válvula.....	42
Figura 5 - Linhas características da malha de cálculo do sistema exemplo.	42
Figura 6 – Estrutura básica do AG.	55
Figura 7 - Rotina de aplicação do Algoritmo Genético.....	63
Figura 8 - Tipos e taxas de Elitismo analisados.	67
Figura 9 - Rede Porto (2006), Rede Exemplo A.	69
Figura 10 - Rede Exemplo B, testes pilotos.	130
Figura 11 - Rede Exemplo C.	137

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Carga Hidráulica Transiente no nó monitorado (nó 5), Rede Exemplo A.....	70
Gráfico 2 - Manobra de fechamento da válvula, Rede Exemplo A.....	72
Gráfico 3 - Estimacão preliminar - melhor soluço (CDA m ²), Grupo 1 (Rede Porto).	75
Gráfico 4 - Estimacão final - melhor soluço (CDA m ²), Grupo 1 (Rede Porto).....	76
Gráfico 5 - Índice de Acerto, IA (%) - Populao Inicial, Grupo 1 (Rede Porto).....	76
Gráfico 6 - Índice de Acerto, IA (%) - Populao Final, Grupo 1 (Rede Porto).....	77
Gráfico 7 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 1 (Rede Porto).....	78
Gráfico 8 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 1 (Rede Porto).....	78
Gráfico 9 - Carga Hidráulica Transiente - Nó monitorado (5), Grupo 1 (Rede Porto).	79
Gráfico 10 - Funo Objetivo Inicial, Grupo 1 (Rede Porto).	80
Gráfico 11 - Funo Objetivo Final, Grupo 1 (Rede Porto).	81
Gráfico 12 - Estimacão preliminar - melhor soluço (CDA m ²), Grupo 2 (Rede Porto).	84
Gráfico 13 - Estimacão final - melhor soluço (CDA m ²), Grupo 2 (Rede Porto).....	84
Gráfico 14 - Índice de Acerto, IA (%) - Populao Inicial, Grupo 2 (Rede Porto).....	85
Gráfico 15- Índice de Acerto, IA (%) - Populao Final, Grupo 2 (Rede Porto).....	85
Gráfico 16 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 2 (Rede Porto).....	86
Gráfico 17 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 2 (Rede Porto).....	86
Gráfico 18 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 2 (Rede Porto).	87
Gráfico 19 - Funo Objetivo Inicial, Grupo 2 (Rede Porto).	89
Gráfico 20 - Funo Objetivo Final, Grupo 2 (Rede Porto).	89
Gráfico 21 – Rede Porto - Resultados (CDA m ²), casos Sem Elitismo ($P_e = 0\%$).	92
Gráfico 22 – Rede Porto - Resultados (CDA m ²), casos com Elitismo Tipo 1 ($P_e = 20\%$).	93
Gráfico 23 – Rede Porto - Resultados (CDA m ²), casos com Elitismo Tipo 1 ($P_e = 80\%$).	95
Gráfico 24 - Rede Porto - Resultados (CDA m ²), casos com Elitismo Tipo 2 ($P_e = 20\%$).	96
Gráfico 25 – Rede Porto - Resultados (CDA m ²), casos com Elitismo Tipo 2 ($P_e = 80\%$).	98
Gráfico 26 - Comparaco Elitismo 1 (20%) x Elitismo 2 (20%) - Rede Porto.	99
Gráfico 27 - Comparaco Elitismo 1 (80%) x Elitismo 2 (80%) - Rede Porto.	99
Gráfico 28 - Estimacão preliminar - melhor soluço (CDA m ²), Grupo 3.....	109
Gráfico 29 - Estimacão final - melhor soluço (CDA m ²), Grupo 3.	110
Gráfico 30 - Índice de Acerto, IA (%) - Populao Inicial, Grupo 3.	110
Gráfico 31 - Índice de Acerto, IA (%) - Populao Final, Grupo 3.	111
Gráfico 32 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 3.	111

Gráfico 33 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 3.	112
Gráfico 34 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 3.....	112
Gráfico 35 - Função Objetivo Inicial, Grupo 3.	113
Gráfico 36 - Função Objetivo Final, Grupo 3.	113
Gráfico 37 - Estimacão preliminar - melhor soluçã (CDA m ²), Grupo 4.....	114
Gráfico 38 - Estimacão final - melhor soluçã (CDA m ²), Grupo 4.	114
Gráfico 39 - Índice de Acerto, IA (%) - Populaçã Inicial, Grupo 4.	115
Gráfico 40 - Índice de Acerto, IA (%) - Populaçã Final, Grupo 4.	115
Gráfico 41 - Vazã nos trechos - Regime Permanente, Grupo 4.	116
Gráfico 42 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 4.	116
Gráfico 43 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 4.....	117
Gráfico 44 - Função Objetivo Inicial, Grupo 4.	117
Gráfico 45 - Função Objetivo Final, Grupo 4.	118
Gráfico 46 - Estimacão preliminar - melhor soluçã (CDA m ²), Grupo 5.....	119
Gráfico 47 - Estimacão final - melhor soluçã (CDA m ²), Grupo 5.	119
Gráfico 48 - Índice de Acerto, IA (%) - Populaçã Inicial, Grupo 5.	120
Gráfico 49 - Índice de Acerto, IA (%) - Populaçã Final, Grupo 5.	120
Gráfico 50 - Vazã nos trechos - Regime Permanente, Grupo 5.	121
Gráfico 51 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 5.	121
Gráfico 52 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 5.....	122
Gráfico 53 - Função Objetivo Inicial, Grupo 5.	122
Gráfico 54 - Função Objetivo Final, Grupo 5.	123
Gráfico 55 - Estimacão preliminar - melhor soluçã (CDA m ²), Grupo 6.....	124
Gráfico 56 - Estimacão final - melhor soluçã (CDA m ²), Grupo 6.	124
Gráfico 57 - Índice de Acerto, IA (%) - Populaçã Inicial, Grupo 6.	125
Gráfico 58 - Índice de Acerto, IA (%) - Populaçã Final, Grupo 6.	125
Gráfico 59 - Vazã nos trechos - Regime Permanente, Grupo 6.	126
Gráfico 60 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 6.	126
Gráfico 61 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 6.....	127
Gráfico 62 - Função Objetivo Inicial, Grupo 6.	127
Gráfico 63 - Função Objetivo Final, Grupo 6.	128
Gráfico 64 - Carga Hidráulica Transiente no nó monitorado (nó 4) - Rede Exemplo B (testes pilotos).....	131
Gráfico 65 - Manobra de fechamento da válvula (testes pilotos).....	132

Gráfico 66 – Resultados IA (%), testes pilotos, caso1.	133
Gráfico 67 - Resultados, testes pilotos, caso 2 (nó 2).....	135
Gráfico 68 - Resultados, testes pilotos, caso 2 (nó 6).....	136
Gráfico 69 – Resultados (CDA m ²), casos Sem Elitismo (Pe = 0%), Rede Exemplo C.	140
Gráfico 70 – Resultados (CDA m ²), casos Elitismo 1 (Pe = 20%), Rede Exemplo C.	141
Gráfico 71 – Resultados (CDA m ²), casos Elitismo 1 (Pe = 80%), Rede Exemplo C.	142
Gráfico 72 – Resultados (CDA m ²), casos Elitismo 2 (Pe = 20%), Rede Exemplo C.	143
Gráfico 73 – Resultados (CDA m ²), casos Elitismo 2 (Pe = 80%), Rede Exemplo C.	144
Gráfico 74 - Comparações dos resultados (Rede Exemplo C).	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configuração padrão utilizada no AG.....	67
Tabela 2 - Características dos tubos e vazões iniciais, Rede Exemplo A.	69
Tabela 3 - Dados do estado permanente para os nós da Rede Exemplo A.....	70
Tabela 4 - Casos analisados – rede exemplo A.	71
Tabela 5 - Estimção preliminar – Grupo 1 (Rede Porto).....	75
Tabela 6 - Estimção final – Grupo 1 (Rede Porto).	75
Tabela 7 - Função Objetivo Inicial, Grupo 1 (Rede Porto).	81
Tabela 8 - Função Objetivo Final, Grupo 1 (Rede Porto).	82
Tabela 9 - Estimção preliminar - Grupo 2 (Rede Porto).....	83
Tabela 10 - Estimção final – Grupo 2 (Rede Porto).	83
Tabela 11 - Função Objetivo Inicial, Grupo 2 (Rede Porto).	90
Tabela 12 - Função Objetivo Final, Grupo 2 (Rede Porto).	90
Tabela 13 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$).	91
Tabela 14 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$).	91
Tabela 15 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).	93
Tabela 16 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).	93
Tabela 17 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).	94
Tabela 18 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).	95
Tabela 19 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).	96
Tabela 20 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).	96
Tabela 21 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).	97
Tabela 22 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).	97
Tabela 23 - Dados do estado permanente para os nós da rede exemplo B (testes pilotos).	130
Tabela 24 - Características dos tubos e vazões iniciais, rede exemplo B (testes pilotos).	131
Tabela 25 - Configuração padrão utilizada no AG (testes pilotos).	132
Tabela 26 - Resultados, testes pilotos, caso 1.....	133
Tabela 27 - Resultados, testes pilotos, caso 2.....	135
Tabela 28 - Dados do estado permanente para os nós da rede exemplo C.....	138
Tabela 29 - Características dos tubos e vazões iniciais, rede exemplo C.....	138
Tabela 30 - Casos analisados – rede exemplo C.	139
Tabela 31 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$)..	140

Tabela 32 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$).	140
Tabela 34 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).	141
Tabela 35 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).	141
Tabela 36 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).	142
Tabela 37 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).	142
Tabela 38 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).	143
Tabela 39 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).	143
Tabela 40 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).	144
Tabela 41 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

τ	Coefficiente de abertura (ou fechamento) relativo da válvula
ε	Rugosidade absoluta do tubo [L]
λ	Operador do MOC (adimensional)
Δt	Intervalo de tempo computacional [T]
Δx	Intervalo de espaço [L]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
AGH	Algoritmo Genético Híbrido
AV	Área do Orifício
C ⁻	Linha característica negativa
C ⁺	Linha característica positiva
CD	Coefficiente de Descarga
CDA	Coefficiente de Descarga multiplicado pela Área do Orifício
CDG	CDA multiplicado pela $\sqrt{2g}$
EA	Emissão Acústica
FO	Função Objetivo
HV	Carga hidráulica no nó do vazamento
IA	Índice de Acerto (%)
IALV	Índice de Aceitação do Local de Vazamento (%)
LM	Método Levenberg-Marquardt
MOC	Método das Características
MTI	Método Transiente Inverso
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NC	População de indivíduos
NG	Número de gerações
NL	Número de locais de medida na rede
NV	Número total de nós suspeitos de vazamentos
P_C	Probabilidade de cruzamento
P_e	Taxa de elitismo (%)
p_m	Probabilidade de mutação (%)
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental

TS	Tempo de registro transiente [T]
\mathbf{V}	Conjunto de inteiros
z	Cota topográfica [L]
z_v	Cota do nó de vazamento [L]
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)
[L]	Dimensão de comprimento
[T]	Dimensão de tempo
[M]	Dimensão de massa
H	Carga hidráulica de pressão [L]
Q	Vazão volumétrica $[L]^3[T]^{-1}$
A	Área da seção transversal do tubo $[L]^2$
a	Celeridade da onda de pressão $[L][T]^{-1}$
D	Diâmetro da seção transversal do tubo [L]
g	Aceleração da gravidade $[L][T]^{-2}$
V	Velocidade média de escoamento do fluido $[L][T]^{-1}$
ν	Coefficiente de Poisson (adimensional)
E	Módulo de elasticidade de Young da parede do tubo $[M][T]^{-2}[L]^{-1}$
K	Módulo de elasticidade do fluido $[M][T]^{-2}[L]^{-1}$
ρ	Massa específica do fluido $[M][L]^{-3}$
∂	Derivada parcial
d	Derivada total
e	Espessura da parede do tubo [L]
L	Comprimento de trecho de escoamento [L]
ΔH	Perda de carga [L]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	20
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>20</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>21</i>
1.2	Organização da Dissertação	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Tipos de Escoamento em tubulações de redes de distribuição de água	23
<i>2.1.1</i>	<i>Regime permanente</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Regime transiente</i>	<i>24</i>
3	MODELO HIDRÁULICO	25
3.1	Análise hidráulica no escoamento transitório em tubulações	25
3.2	Método das Características	26
<i>3.2.1</i>	<i>Equações fundamentais</i>	<i>26</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Equacionamento para Transitórios em Redes</i>	<i>30</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Condições de Contorno</i>	<i>32</i>
4	VAZAMENTOS EM CONDUTOS FORÇADOS	35
4.1	Métodos de Detecção de Vazamentos	36
4.2	O Método Transiente Inverso: calibração e detecção de vazamentos	37
4.3	Detecção de vazamentos utilizando a reflexão da onda de pressão	40
5	ALGORITMO GENÉTICO	46
5.1	Breve Histórico Computação Evolutiva	46
5.2	Conceitos Biológicos	47
5.3	Estrutura dos Algoritmos Genéticos	48
<i>5.3.1</i>	<i>Codificação dos Parâmetros</i>	<i>49</i>
<i>5.3.2</i>	<i>Operadores Fundamentais do AG</i>	<i>51</i>
5.4	Critérios de parada do algoritmo	53
<i>5.4.1</i>	<i>Número máximo de Gerações</i>	<i>53</i>

5.4.2	<i>Variação da Função Objetivo</i>	54
5.5	Exemplo de Estrutura Básicas de um AG simples	55
5.6	Aplicações dos Algoritmos Genéticos com Estratégia Elitista	55
5.7	Aplicações dos Algoritmos Genéticos com Estratégia Elitista na Hidráulica	56
6	METODOLOGIA	59
6.1	Formulação e Solução do Problema Inverso	59
6.2	Estudo de casos na identificação de vazamentos	60
6.3	Medida de Eficiência da Calibração.....	61
6.4	Programas Computacionais	61
6.5	Avaliação do operador Elitismo e configuração geral do Algoritmo Genético	65
6.6	Estudo de Caso: dados da Rede Exemplo	68
6.6.1	<i>Rede Exemplo</i>	68
6.6.2	<i>Manobra de Válvula</i>	71
7	RESULTADOS E ANÁLISES	73
7.1	Rede Porto.....	73
7.1.1	<i>Análise das simulações do Grupo 1</i>	74
7.1.2	<i>Análise das simulações do Grupo 2</i>	82
7.1.3	<i>Análise das simulações dos casos Sem Elitismo ($P_e = 0\%$)</i>	90
7.1.4	<i>Análise das simulações dos casos com Elitismo 1 ($P_e = 20\%$)</i>	92
7.1.5	<i>Análise das simulações dos casos com Elitismo 1 ($P_e = 80\%$)</i>	94
7.1.6	<i>Análise das simulações dos casos com Elitismo 2 ($P_e = 20\%$)</i>	95
7.1.7	<i>Análise das simulações dos casos com Elitismo 2 ($P_e = 80\%$)</i>	97
7.1.8	<i>Comparação entre resultados: Elitismo 1 x Elitismo 2</i>	98
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICE A – RESULTADOS GRUPOS 3, 4, 5 E 6 DA REDE PORTO	109
	APÊNDICE B – TESTES PILOTOS	129
	APÊNDICE C – REDE EXEMPLO C	137

1 INTRODUÇÃO

As redes de condutos forçados são estruturas indispensáveis em muitos sistemas de condução de fluidos como, por exemplo, redes de distribuição de água para abastecimento humano e industrial, sistemas de disposição de esgoto, irrigação, hidroelétricas, oleodutos e gasodutos. Todos esses sistemas apresentam uma propriedade em comum: um fluido escoar ao longo de uma rede de tubos com variações de velocidade e pressão, no tempo e no espaço.

É válido ressaltar que durante a manutenção de sistemas de abastecimento de água são necessárias diversas manobras em válvulas, bombas, reservatórios e canalizações. Na maioria dos casos essas manobras causam alterações no regime de escoamento da água nas tubulações. Essas variações podem provocar fenômenos conhecidos como transientes hidráulicos, os quais podem acarretar consequências catastróficas, como o rompimento ou colapso de tubulações.

Outro importante tema é a ocorrência de vazamentos nos sistemas de distribuição de água para abastecimento. Ademais, os incidentes causados por eventos transitórios são responsáveis por elevadas perdas físicas e financeiras. Portanto, modelos para a detecção de vazamentos podem ser extremamente úteis, principalmente em análises no regime transitório de escoamento, devido à sua capacidade de análise dinâmica do sistema.

No entanto, o sucesso do modelo depende da precisão dos dados de entrada. Embora grande parte dos dados seja obtida diretamente dos registros da rede, alguns são indiretamente obtidos ou estimados. Isso adiciona incertezas ao modelo, o que leva a resultados de simulação ruins. Esses erros podem ser reduzidos por meio de um processo de calibração, o que minimiza as diferenças entre os valores monitorados e simulados, ajustando certos parâmetros de entrada do modelo (ORMSBEE, 1989). Normalmente, os parâmetros a serem ajustados incluem a rugosidade da tubulação e as demandas nodais (DINI; TABESH, 2014; ALVISI; FRANCHINI, 2010; CHENG; HE, 2011; YU *et al.*, 2009; MEIRELLES *et al.*, 2017).

Assim, muitos problemas reais requerem um algoritmo de otimização que seja capaz de explorar várias soluções ótimas em seu espaço de busca. A esse respeito, os Algoritmos Genéticos (AGs) demonstraram um excelente potencial para encontrar as soluções ótimas, pois utilizam uma abordagem de pesquisa baseada em uma população de possíveis soluções e têm fortes capacidades de otimização global. AGs provaram ser úteis na solução de diversos problemas de busca e otimização, como exemplo pode-se citar os trabalhos de Liang e Leung (2011); Whitley (1989); Costa e Oliveira (2003); Cortés *et al.* (2008); Zhang, Wu e

Liu (2007); Soremekun *et al.* (2001); Nayeem, Rahman e Rahman (2014); Vasconcelos, Costa e Araújo (2015); Santos e Silva (2013); Gambale (2000); Soares (2007); Jung e Karney (2008); Do *et al.* (2016); Nazif *et al.* (2010); Kapelan, Savic e Walters (2010).

No AG padrão para problemas de maximização, geralmente acaba com apenas uma solução. Se esta solução é um ótimo local, chamamos isso de convergência prematura. Esse fenômeno é ainda mais grave em AGs com estratégia elitista, que é um método amplamente adotado para melhorar a convergência da calibração.

Dessa forma, quando se aplica AG's para otimizar problemas é importante manter dois requisitos aparentemente contraditórios: preservar indivíduos promissores de uma geração para outra e manter a diversidade da população. O Elitismo é o operador genético computacional utilizado para reintroduzir os melhores indivíduos de uma geração para a seguinte, e deve ser aplicado no AG de forma que não comprometa a diversidade da população de soluções em busca do ótimo global.

Assim, o presente trabalho apresenta um estudo do operador Elitismo, em busca da melhor forma de aplicação desse método. O AG com e sem elitismo foi empregado na calibração e detecção de vazamentos em uma rede de distribuição de água no escoamento transitório. Além do AG sem a estratégia elitista ($P_e = 0\%$), foram avaliados dois tipos de Elitismo, que divergem em relação à escolha dos indivíduos que irão compor a população de parâmetros de uma geração para a seguinte. Cada um dos dois tipos analisados foi ainda aplicado com duas taxas diferentes: $P_e = 20\%$ e $P_e = 80\%$. A pesquisa mostra como o Elitismo pode comprometer a diversidade da população de soluções e diminuir a eficiências dos resultados, direcionando para a melhor forma de aplicação do método de calibração de redes de água com Algoritmos Genéticos e estratégia elitista.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do operador genético computacional Elitismo aplicado na calibração e localização de vazamentos em redes hidráulicas de distribuição de água através do Método Transiente Inverso (MTI) em conjunto a técnica de busca e otimização do Algoritmo Genético (AG), que consiste na minimização dos desvios entre as cargas hidráulicas transientes observadas e calculadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

De maneira específica os objetivos desse trabalho são:

- a) Avaliar a influência da posição do nó onde ocorre o vazamento no desempenho do modelo MTI-AG;
- b) Analisar os desvios entre as pressões observadas e calculadas do ponto monitorado;
- c) Analisar o comportamento da Função Objetivo com diferentes tipos e taxas de Elitismo;
- d) Comparar resultados com diferentes tipos e taxas do operador Elitismo do modelo MTI-AG no cálculo da quantificação de vazamentos em redes hidráulicas de abastecimento de água.

1.2 Organização da Dissertação

O capítulo 2 contém uma revisão teórica sobre tipos de escoamento em tubulações sob pressão de redes de distribuição de água.

O capítulo 3 fornece as equações básicas do escoamento transiente em tubulações e apresenta o modelo hidráulico utilizado para a análise de redes hidráulicas.

O capítulo 4 contém uma revisão bibliográfica da literatura sobre calibração e otimização na detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água, aborda os princípios e conceitos básicos do problema inverso e fornece as estratégias adotadas na resolução e ainda mostra o equacionamento para a detecção de vazamentos utilizando a reflexão da onda de pressão no regime transitório.

O capítulo 5 contém as definições e estabelece a estrutura do Algoritmo Genético utilizado e também contém uma revisão bibliográfica da literatura mostrando trabalhos que aplicaram o AG na otimização de problemas.

O capítulo 6 aborda a metodologia utilizada na calibração, apresentando a rede estudada neste trabalho e as diversas considerações feitas quanto a condições iniciais das mesmas, dados disponíveis de carga e demandas, parâmetros utilizados no Algoritmo Genético (AG), além da a manobra da válvula imposta às redes.

O capítulo 7 é uma aplicação do conteúdo apresentado nos capítulos anteriores para uma rede-exemplo. Resultados de simulações são apresentados para diferentes casos de

calibração com estratégia elitista. Discussões dos resultados, indicando a eficiência e as vantagens da técnica utilizada são também apresentadas.

O capítulo 8 contém as conclusões desta pesquisa e também sugestões para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Tipos de Escoamento em tubulações de redes de distribuição de água

Rede de distribuição de água é parte do sistema de abastecimento formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas. (ABNT, 2017).

Em redes de distribuição, devido à baixa viscosidade da água os escoamentos mais frequentes são classificados como turbulento. Escoamento laminar acontece para baixas velocidades e/ou para fluidos viscosos. Ainda segundo Porto (2006) o escoamento de água em tubulações de redes de distribuição é do tipo forçado, pois a água não está em contato com a atmosfera e ocupa toda a área geométrica. A pressão exercida pela água sobre a parede da tubulação é diferente da atmosférica e para qualquer perturbação do regime em determinada seção poderá ocorrer variações de velocidade e pressão nos diversos pontos da rede sem que haja a modificação da seção transversal da tubulação. O escoamento forçado pode ocorrer pela ação da gravidade ou através de bombeamento.

O escoamento em redes de distribuição de água é, portanto, turbulento, forçado e pode estar no regime permanente ou transiente.

2.1.1 Regime permanente

Entende-se por regime permanente aquele no qual as variáveis de estado, velocidade e pressão, permanecem constantes com o tempo. O escoamento em regime permanente caracteriza-se pela conservação de massa no sistema em estudo, considerando que para as propriedades se manterem constantes a quantidade de massa que entra no sistema deve ser igual à quantidade que sai.

Os modelos hidráulicos para a análise de redes em regime permanente, normalmente, baseiam-se no uso das leis da conservação da massa e nos princípios da mecânica dos fluidos. O número de parâmetros de indeterminação que podem ser resolvidos e as condições de contorno do problema são as principais características do uso desses modelos.

Esses modelos incluem várias técnicas: analogia elétrica, técnica de relaxação, aproximação linear, comprimento equivalente, técnica de Newton-Raphson, diâmetro equivalente, elementos finitos, técnica de Gauss-Seidel, mínimos quadrados, expansão da série

de Taylor. Nestes modelos os efeitos da inércia e compressibilidade são desprezados. A solução para o problema de redes é obtida quando algumas condições hidráulicas são satisfeitas: (a) a soma algébrica das vazões em qualquer nó deve ser zero; (b) a carga hidráulica em um nó deve ser a mesma para todos os tubos conectados a este nó; (c) a relação de perda de carga e vazão deve ser satisfeita para cada elemento da rede.

2.1.2 Regime transiente

O termo transiente se refere a uma situação em que no escoamento a velocidade e a pressão, em determinado ponto, são variantes com o tempo, variando também de um ponto a outro, o que torna o escoamento transiente mais complexo que o escoamento permanente, uma vez que o envolvimento da variável tempo requer a utilização de equações diferenciais, cujas soluções podem ser encontradas através de métodos numéricos ou gráficos. Considera-se que se a variação de velocidade for lenta não afeta significativamente o escoamento, já se a referida variação for rápida uma onda de pressão é criada e percorre a tubulação a altas velocidades, comparáveis à do som.

Segundo Chaudhry (1987) dependendo das condições em que ocorrem os transientes os mesmos podem ser classificados como: transientes em condutos fechados, transientes em canais abertos, ou transientes em sistemas combinados entre parte aberta e parte pressurizada. O autor afirma que algumas causas dos transientes podem ser: a abertura ou fechamento de válvulas, e ainda partida ou para de uma bomba.

Para o caso do fechamento de válvulas, quando a alteração é gradual, a análise pode ser feita da mesma maneira que para oscilações de massa, admitidos o líquido incompressível e o conduto rígido (WYLIE; STREETER, 1978). Neste caso, a onda de alta pressão ao atingir a extremidade do conduto é defletida e quando retorna cancela a onda subsequente que se move em sentido contrário. Este processo de fechamento da válvula é chamado de manobra lenta. Por outro lado, quando ocorre uma mudança brusca na abertura da válvula, a vazão também sofre alteração repentina, ocasionando uma onda de pressão que se propaga na tubulação à montante da válvula, e esta onda de pressão atua de forma a reduzir a velocidade do escoamento. Analogamente, à jusante do local da manobra ocorre uma redução de pressão, que também reduz a velocidade do escoamento.

Nó Tópico a seguir serão demonstradas as equações do escoamento transiente e o método de resolução das equações proposto pelo método das características.

3 MODELO HIDRÁULICO

3.1 Análise hidráulica no escoamento transitório em tubulações

Durante a operação de sistemas de abastecimento de água são necessárias diversas manobras em válvulas, bombas, reservatórios e canalizações. Em muitos casos estas manobras causam alterações no regime de escoamento da água nos condutos. Estas variações podem gerar fenômenos conhecidos como transientes hidráulicos (golpe de aríete), os quais podem trazer consequências desastrosas, como o rompimento ou colapso de tubulações.

As equações do escoamento transiente foram introduzidas e demonstradas por Wylie e Streeter (1978) e Chaudhry (1987) e o método de resolução das equações proposto foi o método das características. Entende-se que no regime transiente o escoamento em condutos forçados a vazão é alterada e ocorre conversão de energia principalmente se o fluido em questão for de baixa compressibilidade, como é o caso da água. As fórmulas matemáticas que regem essas transformações de energia são baseadas em equações diferenciais parciais não-lineares representativas da conservação quantidade de movimento (1) e da conservação de massa (2).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

onde H é a carga piezométrica [L], Q é a vazão volumétrica [L]³[T]⁻¹, A é a área da seção transversal do tubo [L]², a é a velocidade da onda de pressão (celeridade) [L][T]⁻¹, D é o diâmetro interno da tubulação [L], f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional), g é a aceleração da gravidade [L][T]⁻², x é a distância [L] e t o tempo [T].

Em geral não há uma solução analítica simples para esse conjunto de equações. Utiliza-se, portanto, o recurso de métodos numéricos. Antes da aplicação do método numérico, essas equações devem ser transformadas em equações diferenciais ordinárias para serem resolvidas. Neste capítulo utiliza-se o modelo da coluna elástica que considera os efeitos de elasticidade do líquido e do conduto, utilizado para a análise do golpe de aríete (transitórios rápidos com altas frequências), através do método das características como ferramenta de modelagem do

fenômeno transiente. Este método é capaz de converter duas equações diferenciais parciais em quatro equações diferenciais ordinárias.

3.2 Método das Características

O transitório hidráulico pode ser expresso matematicamente pelas equações (1) e (2). Essas duas equações diferenciais permitem calcular os valores da vazão Q e da carga piezométrica H ao longo da tubulação x e do tempo t . Há muitas referências (CHAUDHRY, 1987; e WYLIE; STREETER, 1978) que fornecem as deduções dessas equações e ilustram o uso delas em simulações com fluxo de redes hidráulicas.

Para resolver o sistema de equações diferenciais torna-se necessário um método numérico e as condições de contorno do sistema necessitam ser especificadas. Na literatura há vários métodos numéricos, tais como: método das características; método das diferenças finitas; método dos elementos finitos; método espectral; método de contorno integral; método de volumes finitos. Sabe-se que estes métodos são aproximados, mas com uma boa escolha dos intervalos de discretização e uma definição explícita e coerente das condições de contorno do problema, as soluções são bastante razoáveis. Dentre os métodos, há a preferência ao método das características pelo fato do fenômeno transitório seguir uma lei de propagação de ondas que associa o tempo t com a abcissa x definida ao longo da canalização através da celeridade a . A principal vantagem do método das características é apresentar a possibilidade de obter equações explícitas para a determinação das cargas e vazões.

3.2.1 Equações fundamentais

É necessário transformá-las em equações diferenciais ordinárias lineares e especificar as condições de contorno e valores iniciais para as variáveis de estado. Além disso, de acordo com este método, o fenômeno transitório segue uma lei de propagação de ondas, dada pela celeridade, associada ao tempo e espaço ao longo da tubulação.

Assim, as equações (1) e (2) podem ser reescritas na forma:

A equação de conservação de movimento:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (3)$$

E a equação de conservação de massa:

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

As equações L_1 e L_2 podem ser combinadas linearmente utilizando um multiplicador λ , de forma que a solução da equação resultante seja a solução de cada uma das equações originais simultaneamente. Então,

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (5)$$

Sendo λ um número real qualquer. Assim,

$$L = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{Q|Q|}{2DA} + \lambda \left(a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (6)$$

$$L = \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (7)$$

As variáveis H e Q são funções de x e t , $H(x,t)$ e $Q(x,t)$, a variável independente x é função de t , então as derivadas totais de H e Q são dadas por:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (8)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (9)$$

Assim, de acordo com as equações (7), (8) e (9), podemos definir o multiplicador λ como:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \quad (10)$$

O que resulta em:

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (11)$$

Substituindo a equação (10) em (11), obtemos uma relação entre x e t :

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (12)$$

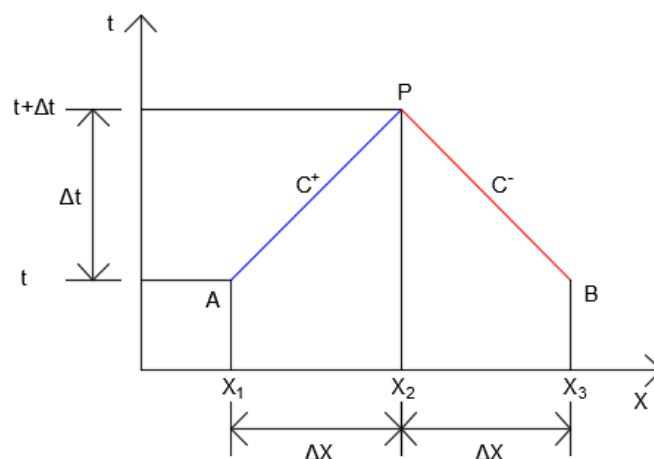
Considerando que a variável independente x seja função do tempo e rearranjando as equações (8), (9) e (10), chegamos a um par de equações descritas como característica positiva C^+ e característica negativa C^- , dadas por:

$$C^+: \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0, \quad \text{se} \quad \frac{dx}{dt} = +a \quad (13)$$

$$C^-: \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0, \quad \text{se} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (14)$$

A solução das equações anteriores pode ser aproximadas através de retas num plano $x-t$, de acordo com a Figura 1, onde x localiza um ponto no conduto e t o instante no qual as variáveis Q e H devem se derterminadas.

Figura 1 - Linhas características no plano $x-t$.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Chaudhry (1987).

Onde reta AP, de declividade $1/a$, representa a solução da equação característica positiva e a reta BP, de inclinação $-1/a$, representa a solução da equação característica negativa.

Multiplicando-se a equação (13) por $a \cdot dt / Ag = dx / A g$, e introduzindo-se a relação, a integração ao longo de C^+ é dada por:

$$\int_A^P dH + \frac{a}{gA} \int_A^P dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_A^P Q|Q|dx = 0 \quad (15)$$

Assim, se utilizada uma aproximação mista para a integração do termo $Q|Q|$, ou seja, com informação de Q em P e A , e uma integração análoga da equação (14) ao longo de BP , obtém-se as seguintes equações para a resolução de HP :

$$C^+: H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_P|Q_A| \quad (16)$$

$$C^-: H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) + RQ_P|Q_B| \quad (17)$$

em que B é função das propriedades físicas do fluido e do tubo, frequentemente chamado de Impedância característica e R é o coeficiente de resistência, dados por:

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (18)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (19)$$

O fator de atrito f pode ser constante ou variar de acordo com o número de Reynolds para cada intervalo de tempo da simulação. A solução do problema transitório usualmente inicia a partir do conhecimento do regime permanente no instante zero. Portanto, se H e Q são valores iniciais conhecidos em cada intervalo, os valores de H e Q para uma seção genérica P podem ser determinados. Assim, as equações (16) e (17) podem ser escritas da seguinte maneira:

$$C^+: H_P = C_A - BQ_P \quad (20)$$

$$C^-: H_P = C_B + BQ_P \quad (21)$$

Onde:

$$C_A = H_A + BQ_A - RQ_A|Q_A| \quad (22)$$

$$C_B = H_B - BH_B + RQ_B|Q_B| \quad (23)$$

Os valores de C_A e C_B dependem apenas das condições no instante t , assim, no instante $t + \Delta t$:

$$H_P = \frac{C_A + C_B}{2} \quad (24)$$

$$Q_P = \frac{C_A - C_B}{2B} \quad (25)$$

Os equacionamentos apresentados para a malha regular permitem a determinação de H e Q nas seções interiores da malha de cálculo da Figura 1. Para os pontos extremos das tubulações são necessárias equações complementares em termos de H e Q para a obtenção da solução nos contornos, pois se dispõe de apenas uma reta característica em cada extremidade.

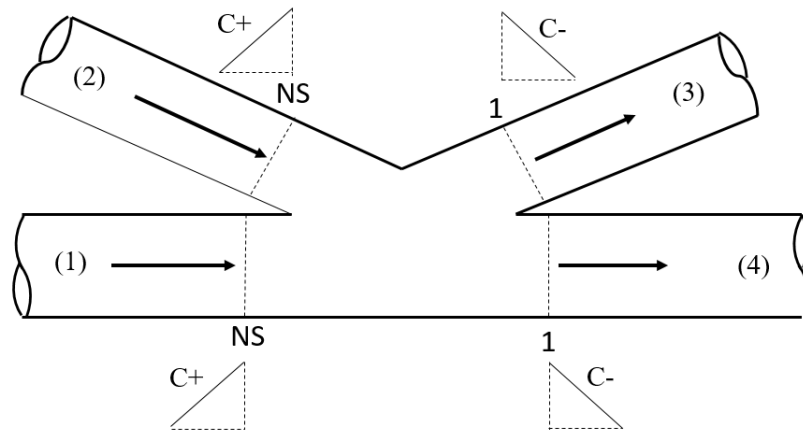
3.2.2 Equacionamento para Transitórios em Redes

Quando um sistema de distribuição de água contém mais de uma tubulação, as seções de cálculo de cada tubo são tratadas independentemente de outras partes do sistema em cada instante do tempo. As seções extremas de cada tubulação devem coincidir com outras tubulações ou com elementos de contorno. Novamente, cada condição de contorno é tratada, também, independentemente de outras partes do sistema. No entanto, em uma conexão de várias tubulações de diferentes propriedades, é conveniente formular um equacionamento geral para a obtenção da carga piezométrica no nó e das vazões em cada tubo. Além disso, componentes hidráulicos e outros elementos de diferentes naturezas, como vazamentos e demandas variáveis com a pressão, também devem constar dos equacionamentos desenvolvidos.

A seguir será apresentado o equacionamento adotado por Wylie e Streeter (1978) para representar o transitório em redes. Para uma junção ramificada (exemplo, Figura 2), a equação de continuidade é usada e despreza os efeitos das perdas localizadas no nó, e pode-se estabelecer um valor de H_p comum aos extremos que se conectam, as equações de compatibilidade são necessárias em cada tubo: equação da característica positiva para o tubo 1

e 2 e equação da característica negativa para os tubos 3 e 4. Se as equações de compatibilidade forem escritas da forma a seguir, um somatório fornece uma solução simples para a carga comum, H_p . Ainda na conexão, pode ser que exista uma vazão adicional de demanda $Q_{demanda}$, que pode ser de entrada ou de saída.

Figura 2 - Conexão Ramificada.



Fonte: Adaptado de Wylie e Streeter (1978).

$$H_p = H_{P_{1,NS}} = P_{P_{2,NS}} = H_{P_{3,1}} = H_{P_{4,1}} \quad (26)$$

$$Q_{P_{entra}} - Q_{P_{sai}} + Q_{demanda} = 0 \quad (27)$$

$$Q_{P_{1,NS}} + Q_{P_{2,NS}} - Q_{P_{3,1}} - Q_{P_{4,1}} + Q_{demanda} = 0 \quad (28)$$

Pelo uso das equações características, Equação (20) e Equação (21):

$$Q_{P_{1,NS}} = -\frac{H_p}{B_1} + \frac{C_{A_1}}{B_1} \quad (29)$$

$$Q_{P_{2,NS}} = -\frac{H_p}{B_2} + \frac{C_{A_2}}{B_2} \quad (30)$$

$$-Q_{P_{3,1}} = -\frac{H_p}{B_3} + \frac{C_{B_3}}{B_3} \quad (31)$$

$$-Q_{P_{4,1}} = -\frac{H_p}{B_4} + \frac{C_{B_4}}{B_4} \quad (32)$$

Substituindo as equações (29), (30), (31) e (32) na Equação (28), tem-se:

$$\sum Q_P = 0 = -H_p \sum \frac{1}{B} + \frac{C_{A_1}}{B_1} + \frac{C_{A_2}}{B_2} + \frac{C_{B_3}}{B_3} + \frac{C_{B_4}}{B_4} + Q_{demanda} \quad (33)$$

$$H_P = \frac{\frac{C_{A_1}}{B_1} + \frac{C_{A_2}}{B_2} + \frac{C_{B_3}}{B_3} + \frac{C_{B_4}}{B_4} + Q_{demanda}}{\sum \frac{1}{B}} \quad (34)$$

em que as equações (33) e (34) se aplicam a todos os tubos na junção. Este método pode ser aplicado a qualquer número de tubos, incluindo a conexão em série.

Para uma conexão com j tubos, tem-se:

$$\sum \frac{C_{A_j}}{B_j} + \sum \frac{C_{B_j}}{B_j} - H_P \sum \frac{1}{B_j} + Q_{demanda} = 0 \quad (35)$$

onde:

$$Q_{demanda} = C_d A_v \sqrt{2g(H_P - z)} = CDG \sqrt{(H_P - z)} \quad (36)$$

em que j é o número do tubo; $B(j) = a/gA$; $Q_{demanda}$ é negativa para um fluxo de saída. C_d = coeficiente de descarga, A_v = área do orifício e z = cota de elevação do ponto P .

3.2.3 Condições de Contorno

3.2.3.1 Reservatório de nível constante à montante

Considerando desprezíveis as perdas locais de entrada no conduto, bem como a carga cinética, comparadas às perdas de carga ao longo da tubulação, o nível da água do reservatório será constante, resulta que a carga em qualquer instante na seção $x = 0$, é constante e igual a própria altura estática nesta seção.

Desta forma:

$$H_P = H_{Res} \quad (37)$$

onde H_{Res} é o nível da água no reservatório medido em relação ao plano de referência.

Como o reservatório é a montante, deve-se utilizar a equação característica negativa, Equação (21), podendo ser escrita na seguinte forma:

$$Q_P = C_B + BH_{Res} \quad (38)$$

Assim, fornecendo-se o nível da água do reservatório (constante) determina-se a vazão na seção considerada.

3.2.3.2 Reservatório de nível constante à jusante

Da mesma forma, desprezando as perdas locais de saída do conduto e a carga de velocidade, resulta que a carga, em qualquer instante na seção $x = L$, é constante e igual a própria altura estática nesta seção.

De forma semelhante ao item anterior, tem-se que a carga no ponto P será igual a carga do reservatório (Equação 37). Neste caso, como o reservatório localiza-se a jusante, para se determinar a vazão na seção deve-se utilizar a equação característica positiva (20), podendo ser escrita na seguinte forma:

$$Q_P = C_A - BH_{Res} \quad (39)$$

3.2.3.3 Válvula na extremidade a jusante de um conduto

A equação para o escoamento através de uma válvula, para as condições de fluxo permanente, é dada por:

$$Q_0 = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_v} \quad (40)$$

Onde, Q_0 é a vazão no regime permanente inicial; H_v é a perda de carga através da válvula e $C_d A_v$ é a área de abertura da válvula vezes o coeficiente de descarga que depende do tipo e do grau de abertura da válvula.

Para uma abertura qualquer de válvula temos:

$$Q_p = (C_d A_v)_p \sqrt{2gH_p} \quad (41)$$

Pode-se então definir a abertura adimensional da válvula como:

$$\tau = \frac{(C_d A_v)_p}{(C_d A_v)_0} \quad (42)$$

sendo τ o coeficiente de abertura ou fechamento relativo da válvula.

Desta forma teremos:

$$Q_p^2 = \frac{(Q_0 \tau)^2 H_p}{H_v} \quad (43)$$

Substituindo H_p da equação característica positiva (20) na equação anterior:

$$Q_p^2 + C_v Q_p - C_A C_v = 0 \quad (44)$$

Em que:

$$C_v = \frac{(\tau Q_0)^2}{(B H_0)} \quad (45)$$

Assim, a vazão (Q_p) na válvula pode ser calculada como:

$$Q_p = \frac{(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_A C_v})}{2} \quad (46)$$

E a carga de pressão na válvula (H_p) pode ser determinada pela equação característica positiva (20), de forma que:

$$H_p = \frac{C_A - Q_p}{B} \quad (47)$$

4 VAZAMENTOS EM CONDUTOS FORÇADOS

O controle de perdas de água em sistemas de abastecimento está diretamente relacionado com a receita e a despesa das empresas de saneamento básico. Desta forma, juntando-se ao fato de que a água está se tornando um recurso cada mais escasso, devido ao processo de poluição dos recursos hídricos, desequilíbrio ambiental e às mudanças climáticas, o controle de perdas torna-se fundamental.

Com relação ao conceito de perdas, teoricamente, as perdas se dividem em perdas aparentes e perdas reais. As perdas aparentes, também chamadas de perdas não físicas, correspondem à água consumida e não registrada, que não é medida, devido à imprecisão e falhas nos hidrômetros, ligações clandestinas ou não cadastradas, fraudes em hidrômetros e outras. Já as perdas reais, também conhecidas como perdas físicas, representam a parcela de água que efetivamente não chega ao consumo, essas perdas acontecem por vazamentos em adutoras, redes, ramais, conexões, reservatórios e outras unidades operacionais do sistema. As perdas reais compreendem principalmente os vazamentos em tubulações da rede de distribuição, provocados especialmente pelo excesso de pressão, habitualmente em regiões com grande variação topográfica. Os vazamentos também estão associados à qualidade dos materiais utilizados, à idade das tubulações, à qualidade da mão-de-obra e à ausência de programas de monitoramento de perdas, dentre outros fatores.

Em geral, os vazamentos são o resultado de diversos fatores como mau funcionamento na operação e manutenção do sistema, envelhecimento das tubulações e conexões e acidentes repentinos. A ocorrência de vazamentos nos sistemas de distribuição de água é problema que une governos, comunidades, pesquisadores e cientistas. Segundo dados do Ministério das Cidades (SNSA, 2016), a média brasileira de perdas de água na distribuição tem diminuído ao longo dos anos e situa-se, atualmente, no patamar dos 37%, incluindo perdas reais e aparentes. Nesse cenário, projetos de redução de vazamentos tornam-se prioritários para autoridades e pesquisadores, são fundamentais programas de avaliação, controle e redução de perdas contínuos e efetivos.

Os vazamentos visíveis são facilmente notados pela população, que notifica a empresa, sendo que o reparo é normalmente feito em curto espaço de tempo. Já os vazamentos não visíveis não afloram à superfície, normalmente infiltram-se na terra, formando fluxos internos no solo e, portanto, leva-se um longo tempo para localizá-los e consertá-los, uma vez que são necessárias inspeções especiais para a sua detecção. É desejável que a localização de

vazamentos de elevada magnitude seja rápida, desta forma surgiu uma busca por métodos de simulação hidráulica para a detecção de vazamentos em redes de distribuição de água.

4.1 Métodos de Detecção de Vazamentos

Métodos de localização e quantificação de vazamentos surgiram na metade do século 20, com a exploração e transporte de petróleo em tubulações. Estes métodos variam desde o uso de técnicas de geofonamento (geofone é um instrumento que serve para escutar ruídos na terra) até a utilização de radares sofisticados. Métodos simples de localização de vazamentos podem ser de grande ajuda, tanto do ponto de vista econômico quanto operacional.

Várias são as referências que dizem respeito a vazamentos e algumas enfocam o problema de controle e operação ótima de válvula visando a minimização das perdas. Destacam-se os trabalhos de Jowitt e Xu (1990) e Reis, Porto e Chaudhry (1997) que abordam a localização ótima de válvulas de controle.

Muitos autores têm proposto métodos alternativos para localização de vazamentos em tubulações usando medidas de carga e vazão, diferenciando, cada método, da técnica de otimização. Pudar e Liggett (1992) propuseram uma metodologia baseada na comparação de cargas ou vazões medidas em regime permanente, com simulação computacional do sistema hidráulico. Este método é conhecido como Análise Inversa e pode ser efetuado também em regime transiente. Vasconcelos, Costa e Araújo (2015); Santos e Silva (2013); Gambale (2000); Soares (2007); Jung e Karney (2008); Do *et al.* (2016); Nazif *et al.* (2010); Kapelan, Savic e Walters (2010), utilizaram a análise inversa transiente.

Além de técnicas inversas resolvidas com métodos de busca direta, o problema de detecção e localização de vazamentos tem sido investigado por diversos autores através de diferentes metodologias, pois os vazamentos ocorrem em praticamente qualquer sistema de distribuição de água por diferentes razões, tais como a ocorrência de elevados níveis de pressão durante eventos transitórios, e são usualmente indicadores da deterioração física do sistema. Exemplos são os métodos baseados no balanço de massa do sistema (LIOU, 1994), na sequência de sinais pseudoaleatórios binários (LIOU, 1998), no decremento ou distúrbio das pressões e vazões no sistema (GRIEBENOW; MEARS, 1989; LIOU; TIAN, 1995), na onda refletida de pressão (BRUNONE, 1999), na análise de frequência (MPESHA; GASSMAN; CHAUDHRY, 2001; LEE *et al.*, 2002; WANG *et al.*, 2002), ondaletas (STOIANOV *et al.*, 2002; FERRANTE; BRUNONE, 2003) e outros, todos aplicados ao escoamento em regime transitório.

Zhang e Wang (2011) elaborou um método baseado na teoria *Bayesiana* e na lei de *Fisher* para detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água. Rajeswaran, Narasimhan e Narasimhan (2018) apresentaram um método para detecção de vazamentos em redes urbanas de distribuição de água usando balanço hídrico repetido e uso de medidas adicionais de fluxo *off-line*. Moser, Paal e Smith (2018) apresentam uma metodologia de identificação de sistemas conhecida como *error-domain model falsification* adaptada para avaliação de desempenho de redes de distribuição de água e, mais especificamente, para detectar regiões de vazamento nessas redes.

Ahadi e Bakhtiar (2010) detecção de vazamentos em tubulações plásticas cheias de água através da aplicação de transformadas ondaletas sintonizadas em sinais de emissão acústica. Neste método, uma assinatura de sinal de vazamento no domínio do tempo é primeiro capturada monitorando as transformadas de Fourier de tempo curto de sinais, Emissão Acústica (EA), durante um intervalo de tempo relativamente longo. O sinal capturado é então usado para encontrar uma ondaleta mãe (ondaleta sintonizada) para a melhor localização do sinal nos domínios de tempo e frequência. Li, Song e Zhou (2018); Martini, Troncosi e Rivola (2016), também utilizaram técnicas de Emissão Acústica (EA).

Berglund *et al.* (2017) exploraram uma metodologia alternativa de detecção de vazamentos para redes de distribuição de água urbana baseada em medições de pressão e Métodos Sucessivos de Aproximação Linear. Mashford *et al.* (2012) apresenta a análise *Support Vector Machines* para interpretar os dados obtidos por uma coleção de sensores de pressão ou dispositivos de medição de fluxo monitorando uma rede de tubulação para obter informações sobre a localização e o tamanho dos vazamentos na rede.

Muitos trabalhos avaliam os vazamentos em tubulações em série e não em redes de distribuição de água, caracterizadas por complexas topologias. No caso das redes, os métodos de busca direta, notadamente os Algoritmos Genéticos, revelam-se muito eficazes, pois são técnicas mais gerais, úteis a sistemas com topologias mais complexas.

4.2 O Método Transiente Inverso: calibração e detecção de vazamentos

A aplicabilidade dos modelos de redes hidráulicas depende da precisão dos dados de entrada. Assim, o emprego de modelos de simulação de redes, por sua vez, requer que os parâmetros relevantes do ponto de vista hidráulico sejam identificados com vistas à reprodução

(previsão) realística do comportamento de tais sistemas, sob diferentes condições operacionais. Este processo de identificação é chamado calibração.

Entende-se o Método Transiente Inverso (MTI) como um método de calibração do tipo implícito que lança mão de dados disponíveis de carga hidráulica transiente para a identificação de parâmetros físicos da rede a ser calibrada ou ainda para a detecção de vazamentos e demandas nos nós, de forma a obter um ótimo ajuste entre os valores observados e calculados das referidas cargas através de técnicas de otimização e para isso deve-se utilizar uma função objetivo (ARAÚJO, 2003).

A resolução do problema inverso consiste em minimizar uma função objetivo, dada pela norma do erro total, que corresponde à soma das diferenças entre os valores das variáveis de estado (pressões e vazões) medidas e calculadas, onde as variáveis de decisão são os parâmetros desconhecidos do modelo.

Pudar e Liggett (1992) teoricamente elaboraram o método inverso para detecção de vazamento aplicado apenas ao estado estacionário. Liggett e Chen (1994) estenderam a metodologia para eventos transitórios, a análise inversa usando medidas do regime transiente permite, simultaneamente, a calibração do sistema e identificação de vazamentos. Além disso, com o uso de dados transientes, o monitoramento da rede torna-se mais adequado. Na verdade, efetuando, continuamente ou periodicamente, a calibração do sistema torna-se possível conhecer o estado de conservação geral da rede e prever vários problemas que podem ocorrer no futuro. Outra vantagem é proporcionar a rápida localização de rupturas repentinas. Os autores aplicaram o método de *Levenberg-Marquardt* que é uma técnica de otimização padrão e usa derivadas generalizadas por meio de análises conjuntas na intenção de ajustar dados medidos e calculados pelo modelo. A técnica do Algoritmo Genético (AG) é um método alternativo ao método de *Levenberg-Marquardt*.

Procedimentos para a detecção de vazamentos através da calibração de modelos de sistemas de distribuição de água no regime não permanente vêm sendo propostas por diversos autores, como Vítkovský, Simpson e Lambert (2000, 2002), Kapelan, Savic e Walters (2002, 2003, 2004, 2010), Covas (2003), Covas *et al.* (2004). Duan (2015) fez uma análise de incerteza da modelagem de fluxo transiente e detecção de vazamento baseado no método da coluna elástica.

Kapelan, Savic e Walters (2002) propõem um algoritmo para a calibração de fatores de atrito e detecção de vazamentos de uma rede de distribuição de água operando em escoamento transiente. Utilizam um modelo híbrido (algoritmos genéticos com método de

Levenberg-Marquardt) melhorou a desempenho computacional do método, além de refinar o grau de precisão da solução final.

Araújo (2003) desenvolve uma metodologia associando o Método Transiente Inverso e os Algoritmos Genéticos empregando o método das características na solução das equações do movimento para escoamento transiente em redes de tubos. O objetivo é estimar os parâmetros físicos da rede hidráulica como: fatores de atrito, rugosidades absolutas, diâmetros, além da identificação e quantificação de vazamentos, que são grandezas desconhecidas. As calibrações são realizadas a partir de dados observados de cargas hidráulicas transientes. A resolução do problema inverso segue o procedimento indireto com a minimização da diferença entre os resultados de carga observados e calculados.

Soares (2007) faz o estudo dos transitórios hidráulicos visando a calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas de distribuição de água. Para isso utiliza dados de redes hipotéticas e de laboratório, e os modelos inversos são resolvidos com métodos de busca global (Algoritmo Genético) e local (método Levenberg-Marquardt e método Nelder-Mead). Na rede de laboratório são utilizados tubos de plástico e o clássico modelo de coluna elástica se mostrou ineficiente na reprodução do comportamento hidráulico do sistema. Os resultados então são satisfatórios quando se considera o comportamento viscoelástico dos materiais dos tubos da rede experimental.

Araújo e Chaudhry (2003) afirmam que durante um evento transiente um distúrbio é transmitido à rede. Ondas transientes podem se deslocar com altas velocidades. Essas ondas refletem-se nas junções, válvulas e contornos do sistema. Tem-se então que a coleta de informações através dessa propagação de onda transiente é a razão de que o Método Transiente Inverso oferece maior potencial quando comparado às técnicas de calibração em estado permanente.

Kapelan, Savic e Walters (2010) fizeram um estudo de detecção de vazamento e calibração de rugosidade em redes de tubulação, duas técnicas de otimização são testadas: o algoritmo genético (AG) e o método Levenberg-Marquardt (LM). Depois de examinar seu desempenho, um novo algoritmo genético híbrido (AGH) foi desenvolvido para explorar as vantagens de combinar os dois métodos. O modelo transiente inverso baseado em AGH provou ser mais estável que o modelo baseado em LM e é mais preciso e muito mais rápido do que o modelo transiente inverso baseado em AG.

A análise transiente inversa normalmente está associada a um método de otimização da busca pela melhor solução. Muitos trabalhos utilizam os Algoritmos Genéticos para fazer

essa calibração dos parâmetros estudados, no Capítulo 5 é feito um detalhamento sobre os AG's e são listados exemplos de pesquisas que utilizam a associação do método transiente inverso com o AG.

4.3 Detecção de vazamentos utilizando a reflexão da onda de pressão

Quando uma onda de pressão provocada por uma mudança nas condições de escoamento se propaga em um tubo, forças de atrito causam um progressivo amortecimento dos picos de pressão. Além disso, dispositivos de proteção, mudanças nas características do tubo, sedimentos ou ar acumulado, e vazamentos também afetam as características da onda de pressão. Brunone, Ferrante e Ubertini (2000) comentam que os vazamentos influenciam em três aspectos a forma da onda de pressão. O primeiro deles acontece quando a onda de pressão atinge o ponto do vazamento. A reflexão produzida pode ser analisada através da observação da variação da pressão em determinada seção do tubo. O tempo decorrido entre o instante em que a onda de pressão foi produzida e o instante em que a onda é refletida pode ser observado, e a localização do vazamento determinada pela seguinte expressão:

$$x_L = \frac{\Delta t_L}{2} a \quad (48)$$

Onde x_L é a distância do ponto do vazamento até a seção onde a onda de pressão é produzida; Δt_L o tempo entre a onda de pressão inicial e a onda refletida; e a é a velocidade de propagação da onda.

O segundo efeito é a distorção nos picos de pressão depois do pico inicial e o terceiro efeito, e último, é a redução na amplitude da variação de pressão depois que o pico de pressão inicial tenha ocorrido.

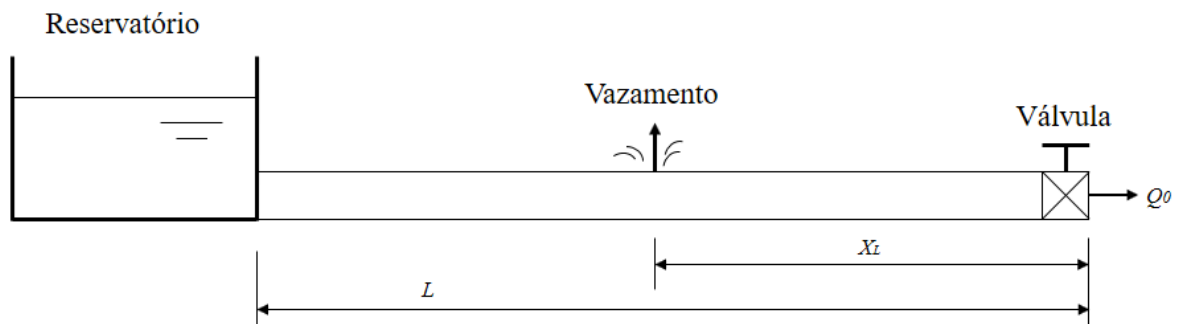
Portanto, a presença de um vazamento pode ser detectada através da análise do primeiro sinal de pressão em determinado ponto do sistema, comparando-se as variações de pressão do conduto intacto e do mesmo conduto na presença de vazamento. Assim, quanto maior e mais rápida a mudança no estado do escoamento do sistema, mais abruptos serão os efeitos da onda de pressão e melhor será a detecção do vazamento.

Vítkovský (2001) descreve as características do primeiro pico de pressão utilizando um modelo teórico. A detecção de vazamentos em um sistema em série pode ser realizada por

meio da observação da variação da pressão em uma válvula, após o fechamento rápido desta, o mesmo método proposto por Brunone, Ferrante e Ubertini (2000). O autor considera um sistema análogo ao da Figura 3.

O exemplo consiste de uma tubulação de comprimento L e vazão inicial Q_0 , com um reservatório de nível constante a montante e uma válvula a jusante. Um vazamento ocorre a uma distância x_L da válvula que, por sua vez, estabelece as condições transitórias no sistema através de seu fechamento instantâneo. Considera-se que o escoamento ocorra sem atrito, o que pode ser justificado, segundo Vítkovský (2001), pelo fato de que os efeitos de atrito variável e do atrito em escoamento permanente não são significantes na análise do primeiro pico de pressão.

Figura 3 - Sistema exemplo reservatório-tubo-válvula.



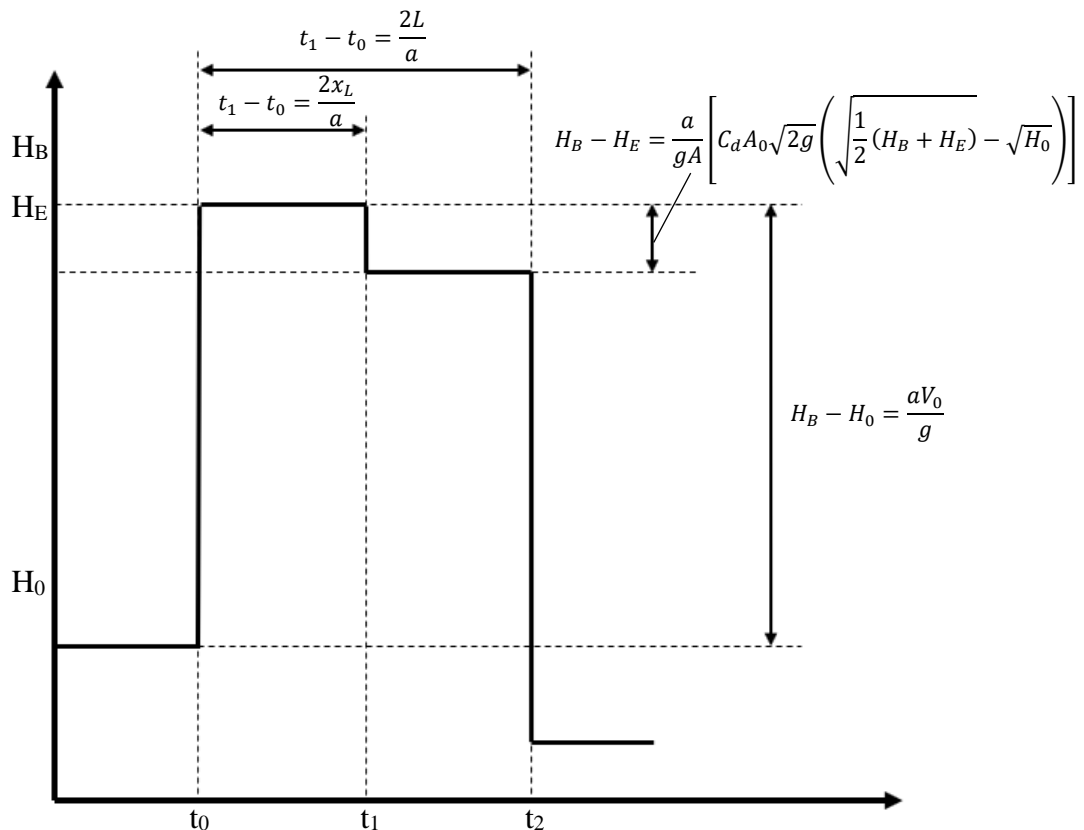
Fonte: Adaptado de Vítkovský (2001).

O esquema teórico do primeiro pico de pressão observado na válvula (com vazamento) é mostrado na Figura 4. No instante $t_L = t_0 + 1/2(t_1 - t_0)$, a onda de pressão devido à manobra da válvula atinge o ponto do vazamento no tubo, o qual provoca um amortecimento da pressão. Assim, o distúrbio deste amortecimento de pressão se propaga em ambas as direções, a montante do vazamento em direção ao reservatório, e a jusante em direção à válvula, sendo esta última informação a de maior interesse. Quando a onda de pressão referente ao vazamento atinge a válvula, a distância entre o ponto do vazamento no tubo e a válvula pode ser definida pela expressão:

$$x_L = \frac{1}{2}a(t_1 - t_0) \quad (49)$$

Para um maior entendimento do problema, as linhas características são mostradas na Figura 5, em que se pode observar a propagação das ondas de pressão devido ao vazamento e ao fechamento instantâneo da válvula.

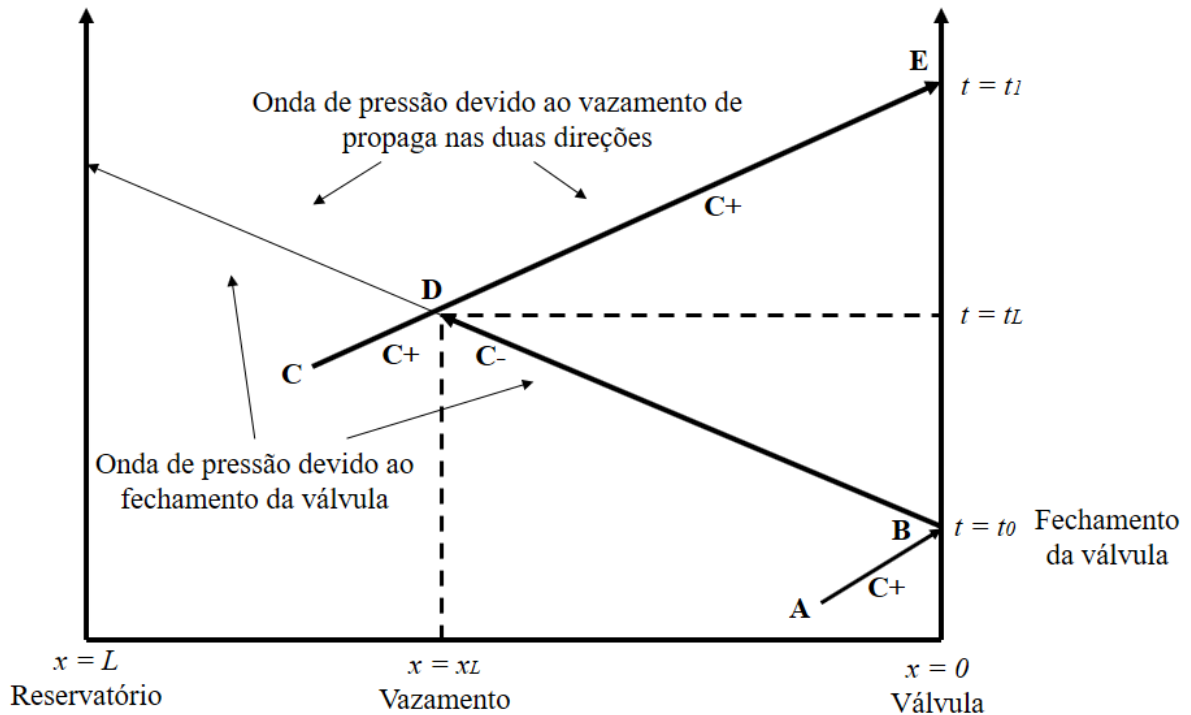
Figura 4 - Primeiro pico de pressão observado na válvula.



Fonte: Adaptado de Vítkovský (2001).

O evento transitório é iniciado no instante t_0 com o fechamento instantâneo da válvula, correspondente ao ponto B da malha característica mostrada na Figura 5. Nos pontos A e C prevalecem condições iniciais de escoamento permanente. O ponto D é definido quando a onda de pressão devido ao fechamento da válvula atinge o ponto de ocorrência do vazamento. Já o ponto E é definido quando a onda de pressão devido o vazamento retorna à válvula. A montante do ponto D, uma onda de pressão, resultante da combinação dos distúrbios referentes ao fechamento da válvula e do vazamento, se propaga em direção ao reservatório.

Figura 5 - Linhas características da malha de cálculo do sistema exemplo.



Fonte: Adaptado de Vítkovský (2001).

A magnitude do amortecimento de pressão observada na válvula é utilizada para determinar a magnitude do vazamento ($C_d A_0$). Vítkovský (2001) desenvolve a formulação para o cálculo da constante $C_d A_0$, aqui reportada.

As condições (pressão e vazão) no ponto A são estabelecidas pelo escoamento permanente, ou seja:

$$H_A = H_0 \quad (50)$$

$$Q_A = Q_0 \quad (51)$$

A vazão no ponto B é igual a zero devido ao fechamento instantâneo da válvula. A pressão no ponto B é determinada pela Equação (20) da característica positiva:

$$H_B = H_0 + BQ_0 \quad (52)$$

$$Q_B = 0 \quad (53)$$

sendo B a impedância característica, dada pela Equação (19).

O cálculo da pressão e da vazão no ponto D requer o conhecimento das condições nos pontos B, já determinadas, e C (escoamento permanente). A vazão no ponto C é determinada satisfazendo-se a equação da continuidade. Logo:

$$H_C = H_0 \quad (54)$$

$$Q_C = Q_0 + C_d A_0 \sqrt{2gH_0} \quad (55)$$

As incógnitas a serem determinadas para o ponto D são a pressão H_D e as vazões a montante e jusante do vazamento, respectivamente, Q_D^+ e Q_D^- , correspondentes às linhas características C^+ e C^- . Assim, as condições em D são determinadas considerando a equação da continuidade e as equações características positiva (ponto C) e negativa (ponto B):

$$H_D = H_B - \frac{1}{2} B C_d A_0 \sqrt{2g} (\sqrt{H_D} - \sqrt{H_0}) \quad (56)$$

$$Q_D^+ = \frac{1}{2} C_d A_0 \sqrt{2g} (\sqrt{H_D} + \sqrt{H_0}) \quad (57)$$

$$Q_D^- = \frac{1}{2} C_d A_0 \sqrt{2g} (\sqrt{H_D} - \sqrt{H_0}) \quad (58)$$

Finalmente, as condições no ponto E são determinadas e, como a válvula está fechada, a vazão é igual a zero. Assim, a equação característica positiva é utilizada para o cálculo da pressão H_E utilizando Q_E e as condições no ponto D. Logo:

$$H_E = H_D - \frac{1}{2} B C_d A_0 \sqrt{2g} (\sqrt{H_D} - \sqrt{H_0}) \quad (59)$$

$$Q_E = 0 \quad (60)$$

Para que a expressão final de cálculo da constante $C_d A_0$ seja escrita em função apenas de pressões observadas na válvula (H_B e H_E , além de H_0), combinações lineares das expressões para as pressões devem ser realizadas, uma vez que a pressão no ponto D (H_D) e a vazão inicial Q_0 estão presentes nas expressões para cálculo de H_E e H_B (equações (59) e (52), respectivamente).

A primeira combinação pode ser feita através da subtração das equações (56) e (59), resultando em uma expressão para o cálculo da pressão no ponto do vazamento (H_D) em função apenas das pressões na válvula (H_B e H_E), dada por:

$$H_D = \frac{1}{2}(H_B + H_E) \quad (61)$$

A segunda combinação é realizada pela adição da equação (56) e à equação (59), resultando em:

$$H_E = H_B - BC_dA_0\sqrt{2g}(\sqrt{H_D} - \sqrt{H_0}) \quad (62)$$

Substituindo a eq. (61) na eq. (62), o termo H_D é eliminado, resultando em:

$$H_E = H_B - BC_dA_0\sqrt{2g} \left(\sqrt{\frac{1}{2}(H_B + H_E)} - \sqrt{H_0} \right) \quad (63)$$

Rearranjando-se a Equação (63) e o termo da impedância característica, obtém-se uma expressão para o cálculo da constante C_dA_0 em função apenas das pressões observadas na válvula.

$$C_dA_0 = \frac{A}{a} \sqrt{\frac{g}{2}} \frac{(H_B - H_E)}{\left(\sqrt{\frac{1}{2}(H_B + H_E)} - \sqrt{H_0} \right)} \quad (64)$$

A equação (64) é utilizada para a avaliação da magnitude do vazamento.

5 ALGORITMO GENÉTICO

5.1 Breve Histórico Computação Evolutiva

Entre os anos 1950 e 1960 iniciaram-se pesquisas na área computacional que exploravam o desenvolvimento de métodos baseados na teoria da evolução, partiu-se do princípio de que os mecanismos de evolução natural de populações de seres vivos poderiam ser utilizados como base para a elaboração de novos métodos de otimização para solucionar problemas de engenharia. A ideia geral era propor uma população de possíveis soluções para um dado problema e aplicar operadores computacionais inspirados na genética e na seleção natural para evoluir essa população inicial até encontrar a solução ótima.

Na década de 1960, foram introduzidas as estratégias evolutivas, em um método para otimizar aerofólios de aeronaves elaborado por Rechenberg (1965), que constituem uma classe de algoritmos evolutivos utilizados principalmente para resolver problemas de otimização de parâmetros. O campo das estratégias evolutivas permanece em atividade como uma área independente do campo dos algoritmos genéticos. Em seguida, surgiram as primeiras técnicas da programação evolutiva, onde foi aplicada mutação aleatória nas possíveis soluções de um problema para modifica-las.

Os Algoritmos Genéticos (AG's) foram introduzidos por Holland (1975) e popularizados por um de seus alunos, Goldberg (1989). AG é um método de otimização e busca que usa técnicas de programação evolucionária baseados na teoria da evolução dos seres vivos e seleção natural do naturalista britânico Charles Darwin em 1859. Holland (1975) apresentou o algoritmo genético como uma abstração da evolução biológica e forneceu as bases teóricas para a sua aplicação em sistemas computacionais, introduzindo a ideia de trabalhar com uma população inicial para gerar outras populações usando o cruzamento e a mutação, sendo a principal inovação com relação às estratégias de evolução.

Essas três técnicas, as estratégias evolutivas, a programação evolutiva, e os algoritmos genéticos formam o campo da computação evolutiva. Nos últimos anos tem havido uma interação entre os vários métodos computacionais usando a teoria evolutiva. Atualmente, os pesquisadores usam o termo Algoritmo Genético para descrever algo mais do que a ideia original de Holland, e tentam aprimorar a efeitos dos operadores genéticos: seleção, mutação e cruzamento, os quais são os principais responsáveis pela eficiência da calibração dos AG's.

5.2 Conceitos Biológicos

Um algoritmo genético é uma metáfora da teoria da evolução natural, por esse motivo os AG's possuem muitos termos originados da biologia. A seguir são descritos os principais termos biológicos utilizados no AG encontrados na literatura:

- a) **Cromossomo e Genoma:** na biologia, genoma é o conjunto completo de genes de um organismo. Um genoma pode ter vários cromossomos. Nos AG's, os dois representam a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, ou seja, um cromossomo ou genoma representa um simples ponto no espaço de busca;
- b) **Gene:** na biologia, é a unidade de hereditariedade que é transmitida pelo cromossomo e que controla as características do organismo. Nos AG's, é um parâmetro codificado que representa uma variável de decisão no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o cromossomo;
- c) **Variabilidade Genética:** engloba todos os alelos possíveis, existentes em uma determinada população, sendo a responsável pelas variações que ocorrem nas futuras gerações, determinando diretamente a diversidade da população;
- d) **Indivíduo:** um simples membro da população. Nos AG's, um indivíduo é uma possível solução para o problema;
- e) **Genótipo:** na biologia, representa a composição genética contida no genoma. Nos AG's, representa a informação contida no cromossomo ou genoma;
- f) **Fenótipo:** nos AG's, representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo. É o cromossomo decodificado. Por exemplo, considere que o cromossomo codifica parâmetros como as dimensões das vigas em um projeto de construção de um edifício, ou as conexões e pesos de uma Rede Neural. O fenótipo seria o edifício construído ou a Rede Neural;
- g) **Alelo:** na biologia, representa uma das formas alternativas de um gene. Nos AG's, representa os valores que o gene pode assumir. Por exemplo, um gene que representa o parâmetro cor de um objeto poderia ter o alelo azul, preto, verde, etc;

h) Recombinação ou Reprodução Sexual: é a responsável pela evolução natural.

Toma-se dois genótipos e produz-se um novo, resultante da mistura dos genes encontrados nos originais. São formas de recombinação:

- *Crossover*: dois cromossomos se recombina para criar um novo cromossomo, possibilitando a seleção das características boas de dois indivíduos diferentes;
- *Mutação*: trata-se da modificação dos genes resultantes da evolução natural.

5.3 Estrutura dos Algoritmos Genéticos

O primeiro passo de um AG típico é a geração de uma população inicial de cromossomos que é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam possíveis soluções do problema a ser resolvido. Em geral, um cromossomo representa um conjunto de parâmetros da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada. O conjunto de todas as configurações que o cromossomo pode assumir forma o seu espaço de busca. A cada cromossomo c_i é atribuída uma aptidão f_i . Aptidão é um valor que avalia quão boa é a solução codificada em c_i , refletindo a qualidade da solução que ele representa. Em geral, os cromossomos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados (Darwinismo). Os membros selecionados podem sofrer modificações em suas características fundamentais através dos operadores de *crossover* (cruzamento ou recombinação) e *mutação*, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

De maneira geral se pode dizer que as principais inovações no método de otimização de parâmetros dos AG's são:

- a) Os parâmetros são codificados, não se trabalha com os parâmetros propriamente ditos;
- b) Funcionam inicialmente com um grupo de soluções possíveis, não com uma solução única;
- c) Utilizam uma função objetivo para avaliar a precisão da solução;
- d) Usam regras probabilísticas, ao invés de determinísticas.

5.3.1 Codificação dos Parâmetros

A codificação tem o objetivo de adaptar os parâmetros para a devida aplicação dos operadores genéticos. Os códigos (genes) de acordo com a necessidade podem ser representados de diversas formas.

5.3.1.1 Representação Binária

Se V é um conjunto de inteiros que varia no intervalo de $\{0, 1, \dots, 2^l - 1\}$ então pode-se codificá-lo usando a representação binária, $e = [b_0, \dots, b_l]$, com l “bits”, onde $bin_i \in \{0, 1\}$ de tal forma que:

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (65)$$

Se $V \in \{m, m + 1, \dots, m + 2^l - 1\}$ então pode-se codificar a variável $V - m$ da mesma forma.

As operações com números binários podem ser entendidas da seguinte forma:

- **Representação de um número na base dois:** Escrever um número inteiro em binário, isto é, na base dois, não apresenta problema. Cada posição digital representará uma potência de dois, da mesma forma que nos números decimais cada posição, uma potência de dez. Assim, o número 23457 significa:

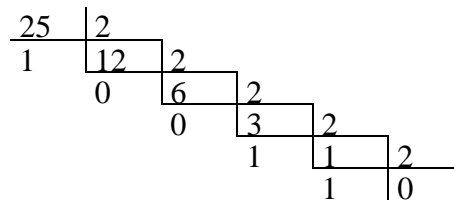
$$2 \times 10^4 + 3 \times 10^3 + 4 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 7 \times 10^0.$$

Na base dois, a base usada nos computadores binários, o número 1 1 0 1 0 1 representa:

$$1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (53)_{\text{decimal}}$$

- **Conversão Decimal – Binário:** A conversão do número inteiro, na base dez para binário, será feita da direita para a esquerda, isto é, determina-se primeiro os algarismos das unidades (o que vai ser multiplicado por 2^0), em seguida o segundo algarismo da direita (o que vai ser multiplicado por 2^1), e assim por diante. O importante é observar se o número é par ou ímpar. Em binário, o número par termina em 0 e o ímpar em 1. Assim, determina-se o algarismo da

direita, pela simples divisão do número por 2; se o resto for 0 (número par) o algarismo da direita é 0; se for 1 (número ímpar) o algarismo da direita é 1. Como exemplo, o número 25 pode ser convertido para binário da seguinte forma:



$$25 = 11001$$

A representação binária é historicamente importante, uma vez que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de Holland (1975). É a representação tradicional, sendo fácil de utilizar e manipular, como também é simples de analisar teoricamente. Contudo, se um problema tem parâmetros contínuos e o usuário quer trabalhar com boa precisão numérica, ele precisará armazenar cromossomos longos na memória. Quando há muitos parâmetros, obtêm-se cadeias de *bits* que podem fazer o algoritmo convergir vagarosamente. Por exemplo, mutação nos primeiros *bits* do gene afeta mais a aptidão que mutação nos últimos *bits* do gene.

5.3.1.2 Representação Real

A representação real, ou com ponto flutuante, gera cromossomos menores e é compreendida mais naturalmente pelo ser humano do que a cadeia de *bits*. Outra vantagem da representação real é a facilidade de criar novos operadores. Araújo e Chaudhry (2003) estudaram a qualidade da estimação de fatores de atrito em uma rede de distribuição de água, na análise do desempenho do algoritmo genético com as representações real e binária, eles notaram que a representação real apresenta melhores resultados tanto na estimativa dos fatores de atrito como nos valores da função objetivo. Além disso, a representação real consome menos tempo de processamento.

Os parâmetros podem ser representados com casas decimais ou inteiros por escalonamento ou quantificação. Se $V \in \{V_{max}, V_{min}\}$, então e é a representação binária da parte inteira de:

$$\frac{(2^l - 1)V}{V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}} \quad (66)$$

5.3.2 Operadores Fundamentais do AG

5.3.2.1 Seleção

A seleção é um processo através do qual os cromossomos são escolhidos de acordo com os valores da função objetivo (também chamada de aptidão). A função objetivo representa uma medida de benefício, utilidade ou vantagem que se deseja maximizar. Os cromossomos com um alto valor desses benefícios têm maior probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes na próxima geração. Este operador, logicamente, é uma versão artificial da seleção natural de Darwin. Em populações naturais, a aptidão é determinada pela habilidade do ser vivo sobreviver aos predadores, às doenças e a outros obstáculos para a idade adulta e a subsequente reprodução. Nos esquemas artificiais, a função objetivo funciona como mediador que decide se o cromossomo deve ser descartado ou selecionado para a próxima geração.

Há diversas maneiras de proceder-se na escolha dos cromossomos mais aptos. A mais utilizada em pesquisas é a seleção proporcional à aptidão baseado na ideia do Elitismo. O Elitismo foi proposto por Dejong (1975) e é uma estratégia que permite transferir os melhores cromossomos de uma geração para outra sem alterações. De forma geral seu funcionamento pode ser descrito da seguinte forma: seja a população de NC indivíduos (a_1, a_2, \dots, a_{NC}); a aptidão, $F_{obj}(a_i)$, de cada indivíduo é calculada conforme o valor da função objetivo; faz-se o ordenamento decrescente da aptidão (para problema de maximização); os melhores indivíduos deste ordenamento serão selecionados para formar parte da nova população ($p_e \times NC$) indivíduos, onde p_e é definida como taxa de elitismo.

A seleção proporcional à aptidão pode apresentar alguns problemas, a saber:

- a) Convergência prematura: o AG converge para um mínimo ou máximo local, impedindo de encontrar a solução global. Esse problema é causado principalmente pelo excessivo número de filhos de um mesmo indivíduo (o superindivíduo) e pela perda de diversidade.
- b) Estagnação: em direção ao final do procedimento todos os indivíduos tendem a ter altos e similares valores de aptidão, isto é, a evolução está presa num mínimo ou máximo local e as diferenças entre os indivíduos são mínimas.

5.3.2.2 Cruzamento

O operador genético taxa de cruzamento, também chamado de *crossover*, permite a criação de uma nova geração e representa a transmissão de características, garantindo que os cromossomos filhos herdem características de seus cromossomos pais, mas que ainda assim sejam ligeiramente diferentes. Assim, o crossover é essencial na garantia de que o algoritmo não se torne uma busca aleatória. Ele é considerado o principal mecanismo de busca dos AG's para explorar regiões desconhecidas do espaço de busca. Quanto maior for a taxa desse operador, mais rapidamente estruturas com boas aptidões poderão ser introduzidas na população, mas da mesma maneira tais indivíduos de boa qualidade podem ser mais rapidamente descartados. Já com um baixo valor, o algoritmo tende a se tornar aleatório e pode se tornar muito lento. Há inúmeros tipos de cruzamento na literatura especializada, tanto para codificação binária quanto codificação real. O cruzamento tipo aritmético é o mais recomendado para a codificação real.

Os operadores aritméticos realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais. O cruzamento aritmético foi proposto por Michalewicz (1994) e é uma combinação linear entre dois vetores.

Sejam p_1 e p_2 os cromossomos pais representados por:

$$p_1 = p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l} \quad (67)$$

$$p_2 = p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2l} \quad (68)$$

onde: $p_{ij} \in \mathfrak{R}$.

Os cromossomos filhos c_1 e c_2 são produzidos da seguinte forma:

$$c_1 = P_c p_1 + (1 - P_c)p_2 \quad (69)$$

$$c_2 = (1 - P_c)p_1 + P_c p_2 \quad (70)$$

onde $c_i \in \mathfrak{R}$ e P_c é a taxa de cruzamento.

5.3.2.3 Mutação

Após a operação de cruzamento, o operador de mutação é aplicado, com uma probabilidade P_m , em cada cromossomo filho gerado. A mutação consiste em injetar novos cromossomos na população e permitir que o Algoritmo Genético busque soluções fora dos limites definidos pela população inicial, garantindo uma diversidade genética no decorrer das gerações, por outro lado, destrói informação contida no cromossomo. Uma taxa de mutação baixa demais implicará em uma convergência genética, já uma taxa de mutação excessivamente alta pode levar o algoritmo a um estado de aleatoriedade no estabelecimento de suas próximas gerações. Logo, deve ser utilizada uma probabilidade de mutação pequena, mas suficiente para assegurar a diversidade.

A mutação uniforme é um dos vários tipos de operadores de mutação existentes aplicados a cromossomos de representação real. A mutação uniforme é a simples substituição de um gene individual por um número aleatório. A mutação é aplicada para cada gene individual com uma probabilidade P_m . Dado um cromossomo p , com o j -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo c da seguinte forma:

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ p, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (71)$$

onde a_i e b_i representam os limites do intervalo permitido para o gene c_i ; e $U(a_i, b_i)$ representa um número aleatório de uma distribuição uniforme no intervalo $[a_i, b_i]$.

5.4 Critérios de parada do algoritmo

5.4.1 Número máximo de Gerações

A geração é a iteração completa do AG que gera uma nova população. O parâmetro Número de Gerações (NG) é o critério de parada dos loops executados pelo algoritmo. É a garantia de que o processo vai terminar em tempo finito. A cada iteração, há um refinamento nos resultados de forma a se garantir progressivamente melhores resultados. Entretanto, quanto maior o número de gerações, maior será o tempo de processamento e nem sempre a melhoria relativa dos resultados compensa esse tempo perdido. Para cada tipo de problema é preciso

avaliar e testar qual valor para o número de gerações atinge um resultado satisfatório no menor tempo possível.

5.4.2 Variação da Função Objetivo

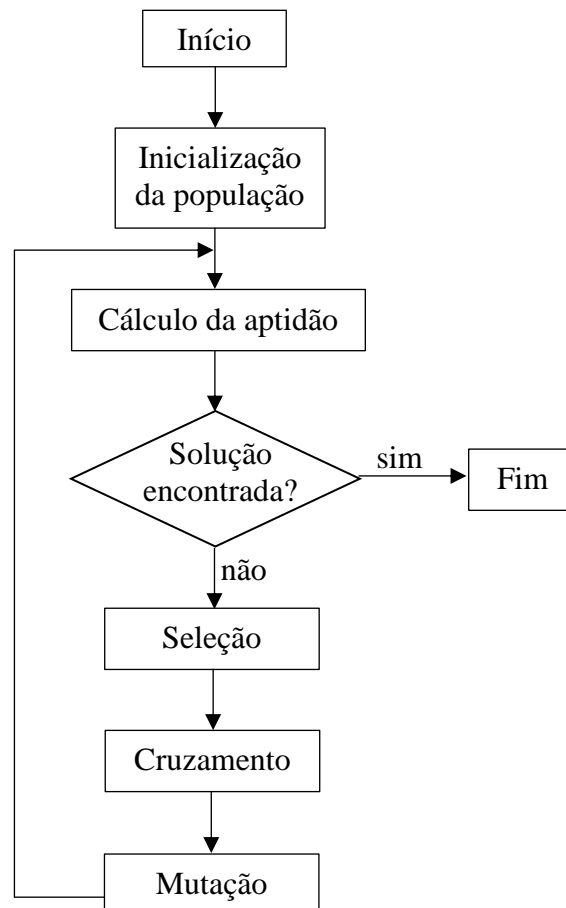
Há na literatura inúmeras formas de proceder-se ao ajuste entre os parâmetros medidos e calculados. Há funções objetivos que levam em consideração várias medidas tais como: cargas hidráulicas, vazões nos tubos, demandas e custos. Estas medidas são aglomeradas na função objetivo através da definição de pesos que servem como indicadores dos respectivos graus de influência da medida no processo de otimização.

Pode-se utilizar a variação de informações sobre a população para terminar o processo evolutivo. Se a população estagnar e não mais evoluir significa que se chegou a algum local que pode ser ou não a solução. Em problemas de teste, para os quais se conhece a solução, pode-se utilizar como critério de parada a distância entre o indivíduo mais apto e o indivíduo solução. Quando a distância do indivíduo mais apto até a solução do problema tender a zero, dentro de certa vizinhança, o processo pode ser parado.

5.5 Exemplo de Estrutura Básicas de um AG simples

A estrutura básica do algoritmo genético é mostrada na Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Estrutura básica do AG.



5.6 Aplicações dos Algoritmos Genéticos com Estratégia Elitista

Segundo Liang e Leung (2011) qualquer tentativa de melhorar a eficiência do AG esbarra com o dilema entre a busca elitista versus a manutenção da diversidade. Assim como foi visto nos tópicos anteriores, a aplicação do Elitismo pode comprometer a diversidade da população de soluções durante o processo evolutivo, acarretando na convergência prematura ou a estagnação dos resultados, duas situações indesejadas que diminuem a eficiência do método. Como equilibrar tanto a busca elitista quanto a manutenção da diversidade é uma questão importante para a construção de um AG eficiente.

Os algoritmos genéticos com estratégia elitista têm sido usados nas mais diversas áreas de pesquisa e preservam a melhor solução de diferentes formas, tentando manter a diversidade populacional. Por exemplo, Whitley (1989) propôs uma abordagem que gera apenas um filho para cada ciclo, substituindo o pior indivíduo da população. Eshelman (1991) introduziu o algoritmo com busca adaptativa para selecionar os melhores indivíduos da população, o que une todos os pais e filhos. Para uma otimização multimodal, Mahfoud (1992), só substitui um dos pais se a descendência concorrente for melhor. O Procedimento de Compensação de Petrowski (1996) preserva a adequação do indivíduo dominante, enquanto redefine para zero a adequação de todos os outros indivíduos da mesma subpopulação. Li *et al.*, 2002, copia o indivíduo dominante de cada uma das espécies para a próxima geração como as sementes da espécie.

Costa e Oliveira (2003) propuseram estratégia de evolução com método elitista para otimização multiobjetivo. Cortés *et al.* (2008) propuseram um novo sistema viral com estratégia elitista para lidar com problemas combinatórios. Zhang, Wu e Liu (2007) propuseram um algoritmo eficiente de aprendizado incremental baseado na população com estratégia elitista.

Liang e Leung (2011) apresentaram um método de busca elitista- adaptativa, para otimização de funções multimodais, a técnica baseia-se no conceito de ajustar adaptativamente o tamanho da população de acordo com a dissimilaridade dos indivíduos, usando operadores genéticos elitistas. Soremekun *et al.* (2001) propôs uma otimização de projeto laminado composto por algoritmo genético com seleção elitista generalizada. Nayeem, Rahman e Rahman (2014) elaboraram um projeto de rede de trânsito por algoritmo genético com elitismo.

Espera-se que o AG seja um otimizador com capacidade de busca para encorajar a exploração das soluções ótimas globais. Assim, a estratégia elitista é amplamente adotada nos processos de busca dos AG's para melhorar a chance de encontrar a solução ótima global. Infelizmente, a estratégia elitista concentra-se nos melhores indivíduos, mas reduz a diversidade da população e, por sua vez, leva a uma convergência prematura. Ao contrário, os AG's precisam manter a diversidade da população em seus processos de pesquisa para encontrar a solução ideal.

5.7 Aplicações dos Algoritmos Genéticos com Estratégia Elitista na Hidráulica

Araújo e Chaudhry (2003) estudaram a qualidade da estimação de fatores de atrito em uma rede de distribuição de água com AG utilizando probabilidade de elitismo proporcional

à aptidão, $P_e = 50\%$. Os resultados previram que quanto mais amplo é o programa de observações de cargas na rede, menor o erro de estimação dos fatores de atrito. Particularmente os nós próximos ao local de ocorrência do transiente fornecem registros de dados que conduzem às estimativas de maior qualidade dos parâmetros sob calibração.

Vasconcelos, Costa e Araújo (2015), fizeram um estudo de calibração do fator de atrito em uma rede sintética de distribuição de água com otimização da solução utilizando algoritmo genético, verificando a influência do tipo de seleção do algoritmo genético (com elitismo e sem elitismo), taxa de elitismo 0% e 50%. Os resultados para a identificação do fator de atrito apresentaram resultados mais satisfatórios para a situação sem elitismo.

Santos e Silva (2013), utilizaram o procedimento inverso associado ao AG para calibração de rugosidades em rede de distribuição de água, com taxa de elitismo proporcional a aptidão de 17%, os valores de rugosidades obtidos representam um conjunto de combinações de informações que conduziram a uma boa calibração.

Gambale (2000) utilizou o AG para a calibração dos coeficientes de rugosidade dos tubos de uma rede de abastecimento de água. A probabilidade elitista utilizada foi $\frac{1}{\sum_{i=1}^m f_i}$, onde f_i é valor da aptidão, m é o número máximo de soluções na população. Notou-se que os maiores desvios entre as pressões observadas e calculadas ocorre nas condições de maiores vazões, e ainda que quanto maior o número de pontos monitorados, menor a diferença máxima entre as pressões observadas e calculadas. Yu *et al.* (2009) também aplicou o AG com estratégia elitista para calibração de coeficientes de rugosidade em tubulações.

Soares (2007) realizou calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório, foram testados dois tipos de AGs, AG geracional com taxa de elitismo P_e igual a 30%, e AG *Steady-State*, onde são criadas n soluções “filhas” (geralmente dois) para substituírem as n soluções “pais” de performance inferior da população em cada geração. O tipo de seleção empregado foi a *Stochastic Remainder Sampling*, inspirada em duas outras formas de seleção: Roda da Roleta e Amostragem Determinística. O AG geracional elitista consumiu maior tempo de processamento computacional. O mesmo comportamento não foi verificado em relação ao AG *Steady-State*, que requereu poucas gerações para que a convergência fosse atingida. Os AGs revelaram dificuldades quanto à precisão dos valores das variáveis de decisão em termos da solução final, principalmente à medida que o número de variáveis de decisão era ampliado.

Jung e Karney (2008) aplicaram a técnica AG com elitismo para resolver a análise transitória inversa, buscando a detecção de vazamentos e fator de atrito. O melhor indivíduo foi copiado para o próximo geração. Três diferentes combinações de pressão nodal monitorada foram avaliadas. Os autores observam que com um menor número de pontos monitorados, resultaram em um menor valor da função objetivo e convergência mais rápida, mas os resultados da calibração são menos precisos. Embora a convergência seja alcançada, eles concluem que o conjunto de soluções pode não estar correto e que o fator de atrito tem menos precisão do que os resultados da detecção de vazamentos. Vitkovsky *et al.* (2003) afirmam que esta resposta é devida à maior sensibilidade do problema ao vazamento do que ao fator de atrito.

Recentemente, Do *et al.* (2016) apresentou um processo de calibração de fatores multiplicadores de demanda usando o AG com elitismo, onde existem mais variáveis de parâmetros do que pontos monitorados. O estudo é baseado em três estudos de caso. O AG conseguiu ter uma boa estimativa dos dados monitorados para diferentes soluções das demandas nodais, e os resultados mostraram alta sensibilidade à localização e tipos de sensores utilizados. Os autores também descobriram que a estimativa de vazão em tubos com valores de vazão mais altos foi mais precisa.

Nazif *et al.* (2010) desenvolvem um modelo de otimização baseado no AG para minimizar as perdas de água através do controle de pressão. Os autores testaram uma rede neural que alimenta dados de entrada para o AG com a pressão para diferentes cenários. O AG é usado para determinar o nível ideal no tanque de armazenamento, e então a pressão e as perdas nos nós da rede são previstas dependendo do nível do reservatório, do consumo nodal e da elevação.

Kapelan, Savic e Walters (2010) fizeram um estudo de detecção de vazamento e calibração de rugosidade em redes de tubulação, duas técnicas de otimização são testadas: o algoritmo genético (AG) e o método Levenberg-Marquardt (LM). Depois de examinar seu desempenho, um novo algoritmo genético híbrido (AGH) foi desenvolvido para explorar as vantagens de combinar os dois métodos. O modelo transiente inverso baseado em AGH provou ser mais estável que o modelo baseado em LM e é mais preciso e muito mais rápido do que o modelo transiente inverso baseado em AG.

6 METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado o Método Transiente Inverso (MTI) cuja otimização foi realizada através de Algoritmos Genéticos (AG), com a finalidade de identificar e quantificar vazamentos nos trechos de tubulações de uma rede hidráulica hipotética a partir de dados de carga transientes.

6.1 Formulação e Solução do Problema Inverso

O problema inverso tratado neste trabalho segue o seguinte procedimento: dadas medidas de carga hidráulica transientes em um ou mais nós de uma rede hidráulica, obter os valores de parâmetros de forma a lograr um ótimo ajuste entre os valores observados e calculados destas cargas. Para esse trabalho, os parâmetros estudados são os vazamentos nos nós, que são tratados como demandas adicionais nos nós da rede hidráulica, representados pelo $C_D A_v$ (produto do Coeficiente de Descarga pela Área de Vazamento), o próximo tópico explica melhor como são analisadas as vazões vazadas.

A resolução do problema inverso segue o procedimento indireto com a minimização da diferença entre os resultados observados e calculados. A descrição formal pode ser posta na forma da Equação (72) a seguir, denominada de Função Objetivo do AG.

$$FO = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} |H_{i,j}^m - H_{i,j}^c| \quad (72)$$

onde: TS = intervalo do transiente; NL = número de locais de medida na rede; $H_{i,j}^m$ = carga medida; $H_{i,j}^c$ = carga calculada; $i = 1, 2, \dots, NL$; e $j = 1, 2, \dots, TS$.

O procedimento correto do método inverso proposto neste trabalho seria adquirir medições de campo e ainda dados observados sobre variação temporal da carga hidráulica e, utilizando tais dados, resolver o problema inverso realizando um confronto entre as cargas hidráulicas coletadas e estimadas. Neste estudo, submete-se a metodologia de estimação dos parâmetros a testes de validação com dados sintéticos. Neste procedimento, as cargas hidráulicas transientes em uma rede hidráulicas de parâmetros reais conhecidos são geradas e consideradas como sendo “observações” de campo. Ressalta-se que no método inverso, tais

parâmetros são considerados desconhecidos sendo objeto de busca no problema de calibração. Só posteriormente à calibração, os parâmetros reais serão comparados com os estimados.

6.2 Estudo de casos na identificação de vazamentos

Na análise dos sistemas de distribuição de água, as demandas ocorrem normalmente nos nós. Neste trabalho, assume-se que os vazamentos ocorrem nos nós, caso contrário seriam necessárias medidas adicionais e métodos mais sofisticados. Em virtude de os vazamentos ocorrerem nos nós, os mesmos tornam-se simplesmente demandas adicionais.

Fisicamente, um vazamento funciona como um orifício descarregando livremente na atmosfera. Desprezando a energia cinética no interior do tubo, o vazamento, Q_v , pode ser calculado pela equação do orifício:

$$Q_v = C_D A_V \sqrt{2g(H_V - z_V)} \quad (73)$$

onde: C_D = coeficiente de descarga, A_V = área do orifício, H_V = carga hidráulica no nó do vazamento e z_V = cota do nó do vazamento.

Os valores de $C_D A_V$ tornam-se as incógnitas em vez de Q_v . Essa formulação facilita os cálculos pois os valores de Q_v não são variáveis independentes, mas os $C_D A_V$'s são.

Nesta fase de identificação do nó com vazamento e sua magnitude, as possíveis soluções do problema, ou seja, as áreas de vazamentos, foram tratadas como variáveis contínuas obedecendo ao seguinte intervalo $10^{-6} \text{ m}^2 \leq C_D A_V \leq 10^{-3,37} \text{ m}^2$. Este intervalo largo foi adotado em vista de inicialmente desconhecer-se a ordem de grandeza do vazamento real.

Como critério para descartar vazamentos desprezíveis, utilizou-se o Índice de Aceitação do Local de Vazamento, $IALV$:

$$IALV_i(\%) = \frac{Q_{vi}}{\sum_{i=1}^{NV} Q_{vi}} \times 100 \quad (74)$$

onde: Q_{vi} = vazamento no nó i e NV = número total de nós suspeitos de vazamentos.

6.3 Medida de Eficiência da Calibração

Com o objetivo de quantificar o resultado da calibração dos parâmetros da rede hidráulica, este trabalho propõe um índice para avaliar o grau de acerto na localização e magnitude de vazamento, o Índice de Acerto (IA) pode ser escrito assim:

$$IA(\%) = \left[1 - \frac{|Q_{Vi}^{real} - Q_{Vi}^{estimado}|}{Q_{Vi}^{real}} \right] \times 100 \quad (75)$$

onde: Q_{Vi} = vazamento no nó i , em L/s e i = número do nó que contém vazamento real.

6.4 Programas Computacionais

Utilizou-se três aplicativos computacionais (P1, P2 e P3) desenvolvidos por Araújo (2003) na linguagem FORTRAN, que se baseiam no Método das Características (MOC) para calcular cargas e vazões de redes de abastecimento. P1 e P2 calculam as cargas e vazões consideradas observadas, reais, as cargas transientes calculadas em P2 serão comparadas com as calculadas em P3.

O primeiro programa (P1) determina as cargas e vazões iniciais no estado permanentes de redes hidráulicas com parâmetros conhecidos. Os dados de entrada da rede em P1 são: carga do reservatório; vazões nos nós; cota geométrica dos nós; comprimento dos trechos; diâmetro das tubulações; rugosidade das tubulações; celeridade (dx/dt).

O segundo programa (P2) calcula as cargas hidráulicas transientes em um nó monitorado da rede, assim como P1 também com parâmetros já conhecidos. Os dados de entrada da rede em P2 englobam os dados necessários em P1 e ainda: vazões iniciais permanentes nos trechos; cargas permanentes os nós; $C_D G$ de cada nó ao longo do tempo de monitoramento do transiente ($C_D G = C_D A \sqrt{2g}$).

Já o terceiro programa (P3) aplica o modelo MTI-AG, para calibração dos vazamentos. De forma resumida pode-se descrever o procedimento de P3 desta forma: inicialmente o programa calcula as cargas e vazões no regime permanente, depois é calculado as cargas transientes no nó monitorado, o próximo passo é obter o valor da diferença entre as cargas transientes calculadas e as observadas que foram obtidas no P2. Os dados de entrada para o P3 englobam os dados necessários em P2, mas no $C_D G$ dos nós não está incluído a

demanda adicional que representa o vazamento, e também as cargas transientes calculadas em P2 são dados de entrada em P3. A Figura 7 representa a rotina de aplicação do terceiro programa que utiliza o Método Transiente Inverso em conjunto com a otimização do Algoritmo Genético.

Todo o procedimento descrito na Figura 7 é repetido NV vezes dentro do P3, onde NV é o número total de nós suspeitos de vazamentos, cada repetição é chamada de tentativa. Na primeira tentativa todos os nós, menos o nó do reservatório e o monitorado (nó da válvula), são considerados como possíveis localizações do vazamento. A cada tentativa é eliminado o nó com menor IALV. Em cada tentativa são calculadas NG soluções, onde NG é o número de gerações. Ao final, o programa mostra a melhor solução de cada geração da tentativa inicial e a melhor solução de cada geração da última tentativa. A última tentativa é a qual representará a solução final, com indicação de apenas um nó como suspeito de conter o vazamento. O resultado da primeira tentativa serve apenas para avaliar em quais casos já se considerou o nó real vazado como mais suspeito, indicando uma rápida convergência para o resultado final.

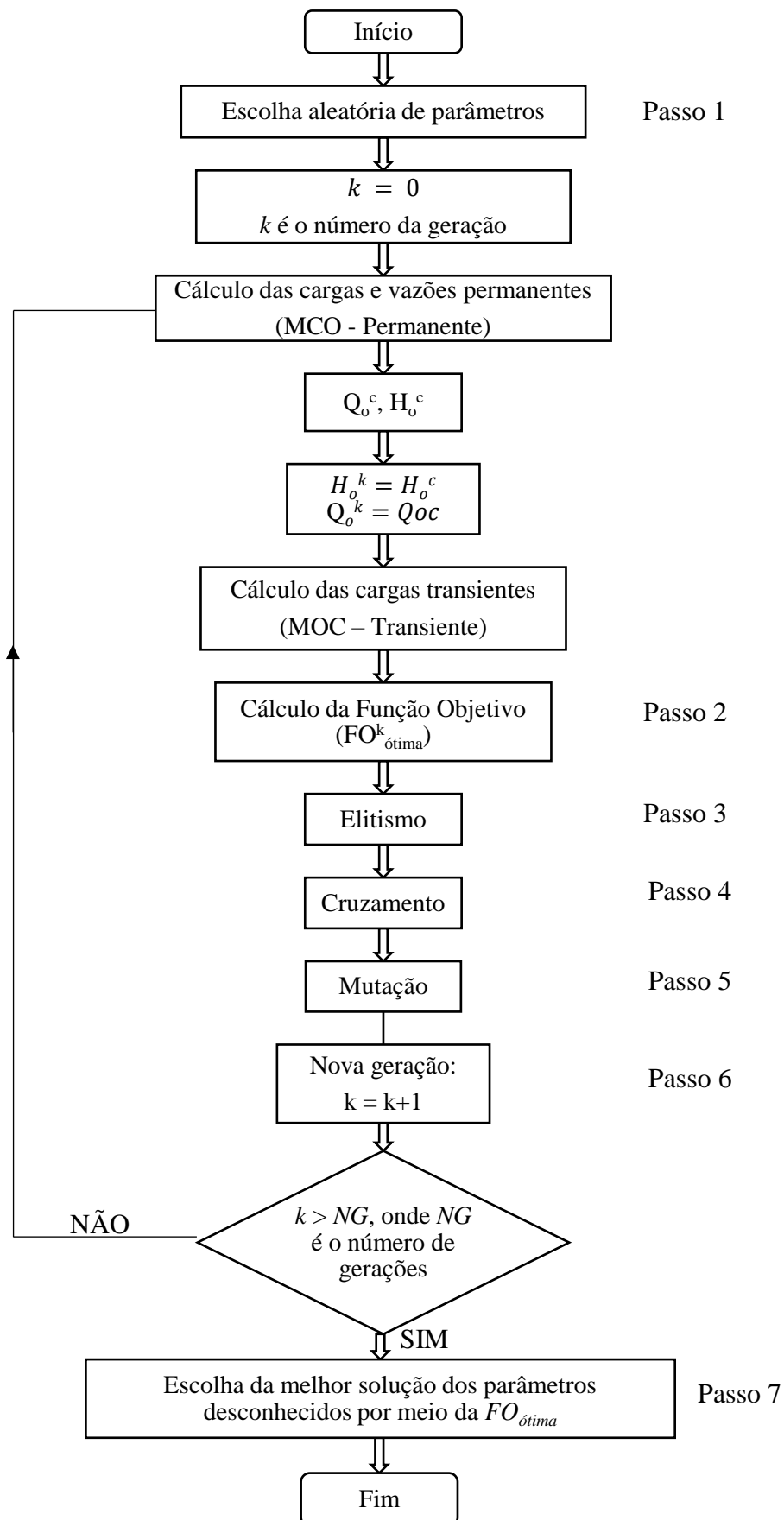


Figura 7 - Rotina de aplicação do Algoritmo Genético.

Passo 1: Geração da População inicial

Será criada uma matriz com NC linhas e NV colunas, cada linha representando uma população de soluções, ou seja, um grupo de vazamentos (C_{DAV}) em cada nó suspeito. NC é o número de cromossomos da população, e NV é o número total de nós suspeitos de vazamentos.

Passo 2: Cálculo da Função Objetivo

Após o cálculo das cargas transientes procede-se ao cálculo da função objetivo de cada possível solução. Cada geração conterá NC funções objetivos, então escolhe-se a $FO^k_{ótima}$ (Função Objetivo ótima da geração k) que representa a melhor solução para aquela determinada geração. Vale lembrar que no caso deste trabalho a função objetivo ótima será o menor valor encontrado, ou seja a menor diferença entre a carga transiente observada e calculada.

Passo 3: Elitismo

Após o cálculo das FO's da geração anterior, inicia-se a formação da nova geração. O primeiro passo para a composição de uma nova geração é a aplicação do operador Elitismo em que os filhos são compostos por uma taxa Pe dos pais. A geração anterior é organizada em ordem crescente de aptidão (FO). Serão selecionados os primeiros Pe das soluções da geração passada. Já o restante da população é escolhida de acordo com o tipo de elitismo aplicado, que eu vou definir melhor nos próximos slides.

Passo 4: Cruzamento

Foi utilizado o tipo de Cruzamento Aritmético, com $P_c = 60\%$. Os operadores aritméticos realizam uma combinação linear entre os cromossomos pais. Os vetores solução ordenados de forma crescente à aptidão serão dispostos dois a dois, para serem cruzados. Segue o procedimento descrito no Capítulo 5, Equações (67), (68), (69) e (70).

Passo 5: Mutação

A mutação utilizada foi a tipo uniforme, funciona como uma simples substituição de um gene individual por um número aleatório. Segue o procedimento descrito no Capítulo 5, Equação (71). A mutação é aplicada para cada gene individual com uma probabilidade P_m , calculada de acordo com a Equação a seguir:

$$P_m = \frac{1}{NC \times NV} \quad (76)$$

onde P_m = probabilidade de mutação; NC = número de cromossomos e NV = número de nós suspeitos.

Passo 6: Repetição da avaliação e produção de sucessivas gerações

Após a aplicação dos operadores Elitismo, Mutação e Cruzamento é formada a nova geração de soluções e repete-se o procedimento de cálculo das cargas e vazões até a obtenção das novas FOs de cada solução dessa nova geração, onde determina-se novamente a $FO^{k_{ótima}}$. Esse processo é repetido até o critério de parada que é que o número máximo de gerações estabelecido inicialmente.

Passo 7: Escolha da melhor solução por meio da FO

Quando o critério de parada é atingido, tem-se posse do valor da $FO^{k_{ótima}}$ de cada geração. Então seleciona-se o menor dentre esses valores, que corresponderá à melhor solução de todo o procedimento, $FO^{ótima}$. O vetor com menor FO mostra o C_{DAV} de cada nó considerado suspeito.

6.5 Avaliação do operador Elitismo e configuração geral do Algoritmo Genético

O Elitismo é um processo através do qual os cromossomos são escolhidos de acordo com os valores da função objetivo. A função objetivo representa uma medida de benefício, utilidade ou vantagem que se deseja maximizar ou minimizar. Os cromossomos com um alto

valor desses benefícios têm maior probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes na próxima geração.

Como forma de se obter melhores soluções ao aplicar o código para identificação de vazamentos em redes de distribuição, o parâmetro Elitismo do Algoritmo Genético foi avaliado. Serão aplicados dois tipos diferentes de Elitismo, que divergem na forma como a população de filhos é escolhida, assim definidos:

- a) Elitismo 1: Selecionam-se os melhores indivíduos do ordenamento crescente da aptidão de maneira a formar uma população de $p_e \times NC$ indivíduos, onde p_e é definido como taxa de elitismo, depois forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos dentro do intervalo de busca determinado inicialmente.
- b) Elitismo 2: Selecionam-se os melhores indivíduos do ordenamento crescente da aptidão de maneira a formar uma população de $p_e \times NC$ indivíduos, onde p_e é definido como taxa de elitismo, depois forma-se o restante da população com uma escolha de indivíduos dentre os melhores que compõem a população de pais

Cada tipo de Elitismo analisado foi aplicado com duas taxas diferentes, 20% e 80%.

Ainda foram realizados casos sem o Elitismo, ou seja, com taxa de 0%, onde a população é escolhida de forma aleatória em todas as gerações. A Figura 8 ilustra os casos propostos. A Tabela 1 mostra a configuração padrão utilizada no AG em todos os casos.

A estrutura do AG (com todos os seus operadores) aqui adotado foi definida com base em testes realizados em uma rede proposta por de Ligget e Chen (1994), a Rede Exemplo B, durante todo o processo de revisão bibliográfica. O Apêndice B apresenta os passos que permitiram chegar a versão final.

O procedimento do operador Elitismo adotado pode ser melhor explicado na sequência a seguir:

1. Seja a população de NC indivíduos (a_1, a_2, \dots, a_{NC});
2. A aptidão, $FO(a_i)$, de cada indivíduo é calculada conforme o valor da função objetivo;
3. Faz-se o ordenamento crescente da aptidão (para problema de minimização da FO);
4. Selecionam-se os melhores indivíduos deste ordenamento de maneira a formar uma população de $p_e \times NC$ indivíduos, onde p_e está sendo definido como taxa de elitismo;

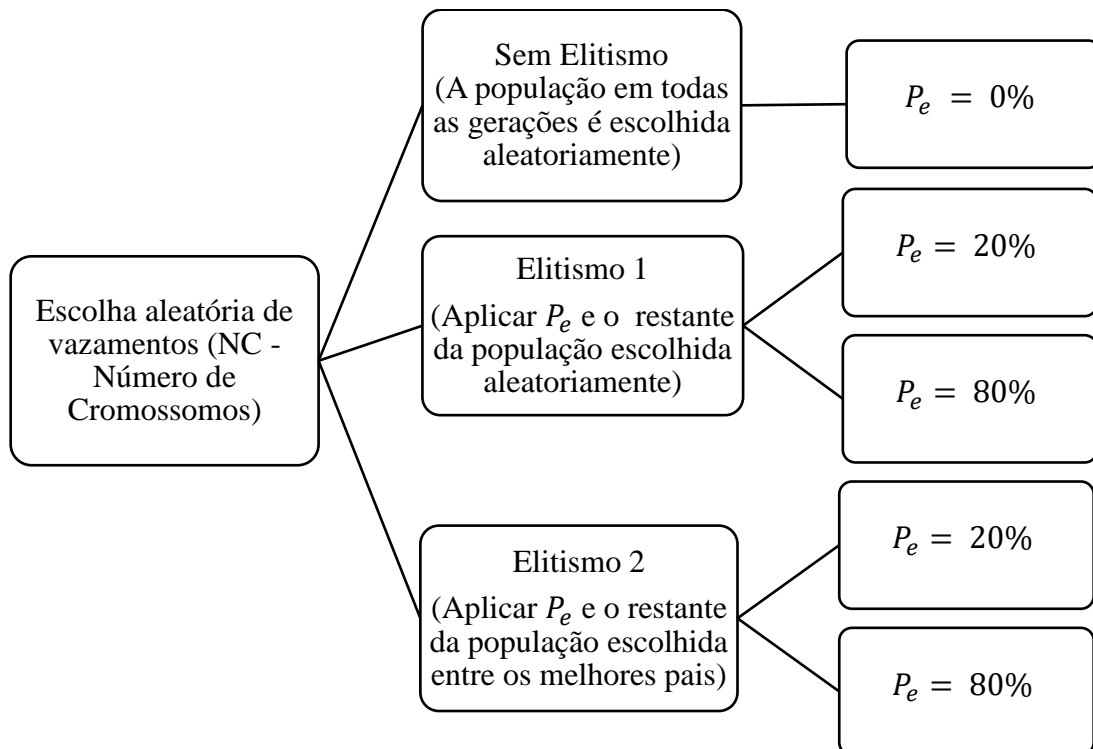
5. De acordo com o tipo de Elitismo aplicado o restante da população será composta por:
 - a. Elitismo 1: uma escolha aleatória de indivíduos.
 - b. Elitismo 2: uma escolha de indivíduos dentre os melhores que compõem a população de pais.
6. A geração de filhos foi formada e segue-se para a aplicação da Mutação e do Cruzamento.

Tabela 1 - Configuração padrão utilizada no AG.

Representação dos parâmetros (codificação):	Real
Tamanho da população (NC):	80
Tipo de cruzamento:	Aritmético
Probabilidade de cruzamento:	60%
Tipo de mutação:	Uniforme
Taxa de ocorrência de mutação:	Variada ($P_m = \frac{1}{NC \times NV}$)
Taxa de elitismo:	Variada (0%, 20% ou 80%)
Número de gerações (NG):	10

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 8 - Tipos e taxas de Elitismo analisados.



Fonte: elaborada pela autora.

6.6 Estudo de Caso: dados da Rede Exemplo

O Algoritmo genético será utilizado para calibração de vazamentos nos nós, tratados como demandas adicionais, de uma rede de abastecimento de água. Trata-se uma rede hipotética, na qual todas as variáveis do problema são conhecidas e corretas, tais como, topografia do terreno, diâmetro, comprimento e rugosidade das tubulações, demandas nodais e nível do reservatório que abastece o sistema.

6.6.1 Rede Exemplo

A rede exemplo A hipotética foi adaptada do exemplo elaborado por Porto (2006). A Rede é malhada e apresenta 9 trechos e 8 nós, sendo o nó 1 correspondente à localização do reservatório de abastecimento da rede, com cota do nível d'água de 485,8m, e ainda uma válvula está localizada no nó 5. É possível visualizar a rede exemplo na Figura 9 a seguir.

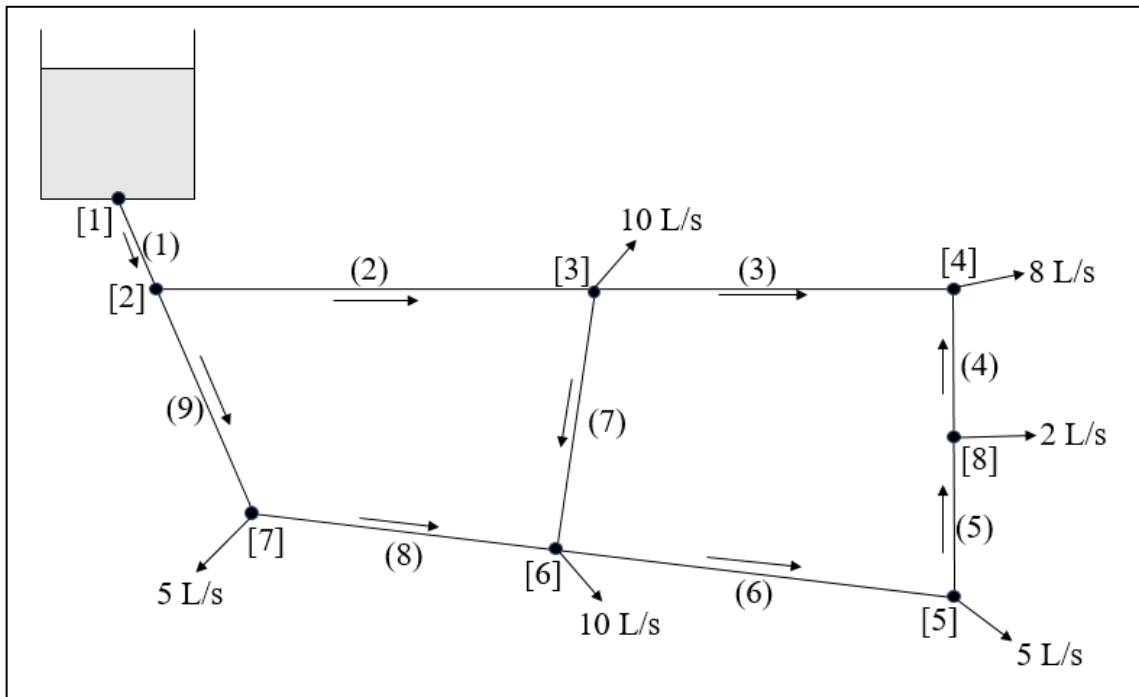
A aplicação do procedimento MTI-AG não impõe restrição no tamanho do sistema. Como estabelecido na estratégia de solução do problema inverso, as cargas hidráulicas transientes observadas e as condições iniciais de regime permanente foram obtidas usando o Método das Características através dos programas P1 e P2. A Tabela 2 mostra as características físicas dos tubos e vazões iniciais, a Tabela 3 ilustra os dados do estado permanente para os nós da rede e o Gráfico 1 expõem as cargas transiente no nó da válvula.

Neste trabalho, estuda-se o procedimento de localização e quantificação de vazamentos considerando que todos os nós da Rede exemplo, com exceção dos nós 1 e 5, são pontos possíveis para a ocorrência de vazamentos. O método MTI-AG deverá identificar as situações listadas na Tabela 4.

O evento transiente do sistema causado pela manobra da válvula de controle no nó 5 foi simulado durante 20s. O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional foi de 0,5s. Com este intervalo de tempo selecionado, os tubos foram discretizados em 12 trechos, cada um com cerca de 600m de comprimento. Demais dados utilizados na rede: coeficiente de Poisson, $\nu = 0,25$; módulo de elasticidade do material do tubo, $E = 120\text{GPa}$; módulo de elasticidade da água, $K = 2,19\text{GPa}$; espessura da parede do tubo, $e = 10\text{mm}$; massa específica da água, $\rho = 999\text{kg/m}^3$.

O procedimento de aplicação do modelo MTI-AG aqui apresentado também foi aplicado em uma rede proposta por Walski (1983) e modificada por Gambale (2000), a Rede Exemplo C, os dados e resultados foram apresentados no Apêndice C.

Figura 9 - Rede Porto (2006), Rede Exemplo A.



Fonte: adaptada de Porto (2006).

Legenda:

() – número do tubo;

[] – número do nó.

Tabela 2 - Características dos tubos e vazões iniciais, Rede Exemplo A.

Trecho	L (m)	D (mm)	ε (mm)	Q (L/s)	V (m/s)
1	520,0	250	0,0500	40,00	0,81
2	1850,0	150	0,0230	14,33	0,81
3	790,0	125	0,1000	8,71	0,71
4	700,0	100	0,0100	0,71	0,09
5	600,0	100	0,0120	1,29	0,16
6	980,0	100	0,0180	6,29	0,80
7	850,0	100	0,0240	4,38	0,56
8	650,0	200	0,6000	20,67	0,66
9	850,0	200	0,0700	25,67	0,82

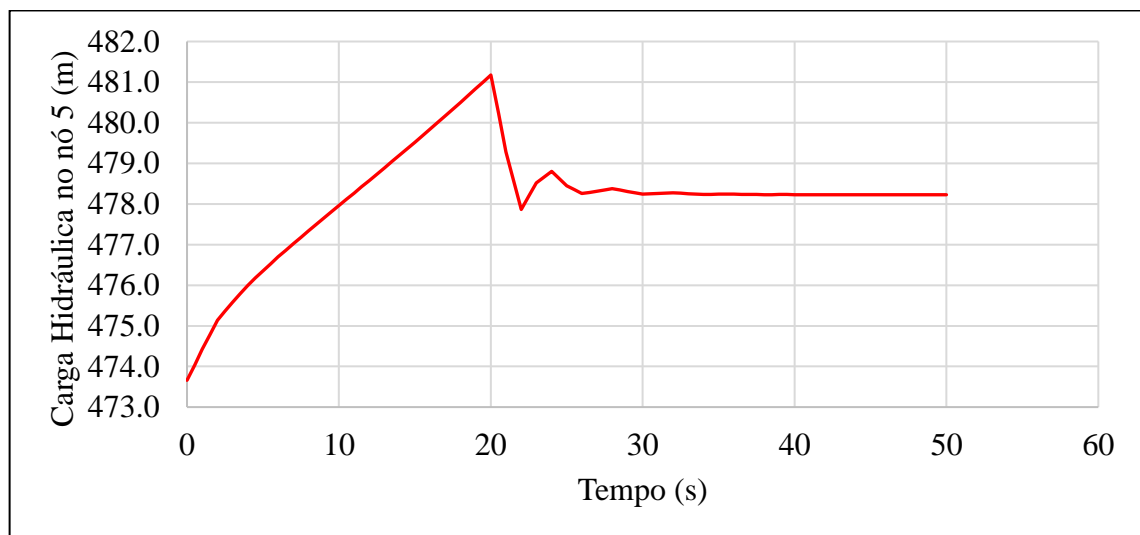
Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 3 - Dados do estado permanente para os nós da Rede Exemplo A.

Nó	Consumo (L/s)	Cota do Terreno (m)	Carga Hidráulica (m)
1	0,0	470,8	485,80
2	0,0	463,2	484,60
3	10,0	460,2	477,09
4	8,0	458,9	473,53
5	5,0	461,2	473,66
6	10,0	457,7	479,95
7	5,0	463,2	481,92
8	2,0	459,2	473,44

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 1 - Carga Hidráulica Transiente no nó monitorado (nó 5), Rede Exemplo A.



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 4 - Casos analisados – rede exemplo A.

Grupo	Caso	NC	NG	Pc (%)	Tipo de Elitismo	Pe (%)	Nó de vazamento	Nó monitorado	Qv (L/s)	C _D A _V (real) (m ²)
Grupo 1	1	80	10	60,0	Nenhum	0,0	2	5	5,0	0,000246
	2	80	10	60,0	1	20,0	2	5	5,0	0,000246
	3	80	10	60,0	2	20,0	2	5	5,0	0,000246
	4	80	10	60,0	1	80,0	2	5	5,0	0,000246
	5	80	10	60,0	2	80,0	2	5	5,0	0,000246
Grupo 2	6	80	10	60,0	Nenhum	0,0	8	5	5,0	0,000411
	7	80	10	60,0	1	20,0	8	5	5,0	0,000411
	8	80	10	60,0	2	20,0	8	5	5,0	0,000411
	9	80	10	60,0	1	80,0	8	5	5,0	0,000411
	10	80	10	60,0	2	80,0	8	5	5,0	0,000411
Grupo 3	11	80	10	60,0	Nenhum	0,0	4	5	5,0	0,000378
	12	80	10	60,0	1	20,0	4	5	5,0	0,000378
	13	80	10	60,0	2	20,0	4	5	5,0	0,000378
	14	80	10	60,0	1	80,0	4	5	5,0	0,000378
	15	80	10	60,0	2	80,0	4	5	5,0	0,000378
Grupo 4	16	80	10	60,0	Nenhum	0,0	6	5	5,0	0,000251
	17	80	10	60,0	1	20,0	6	5	5,0	0,000251
	18	80	10	60,0	2	20,0	6	5	5,0	0,000251
	19	80	10	60,0	1	80,0	6	5	5,0	0,000251
	20	80	10	60,0	2	80,0	6	5	5,0	0,000251
Grupo 5	21	80	10	60,0	Nenhum	0,0	7	5	5,0	0,000270
	22	80	10	60,0	1	20,0	7	5	5,0	0,000270
	23	80	10	60,0	2	20,0	7	5	5,0	0,000270
	24	80	10	60,0	1	80,0	7	5	5,0	0,000270
	25	80	10	60,0	2	80,0	7	5	5,0	0,000270
Grupo 6	26	80	10	60,0	Nenhum	0,0	3	5	5,0	0,000305
	27	80	10	60,0	1	20,0	3	5	5,0	0,000305
	28	80	10	60,0	2	20,0	3	5	5,0	0,000305
	29	80	10	60,0	1	80,0	3	5	5,0	0,000305
	30	80	10	60,0	2	80,0	3	5	5,0	0,000305

Fonte: elaborada pela autora.

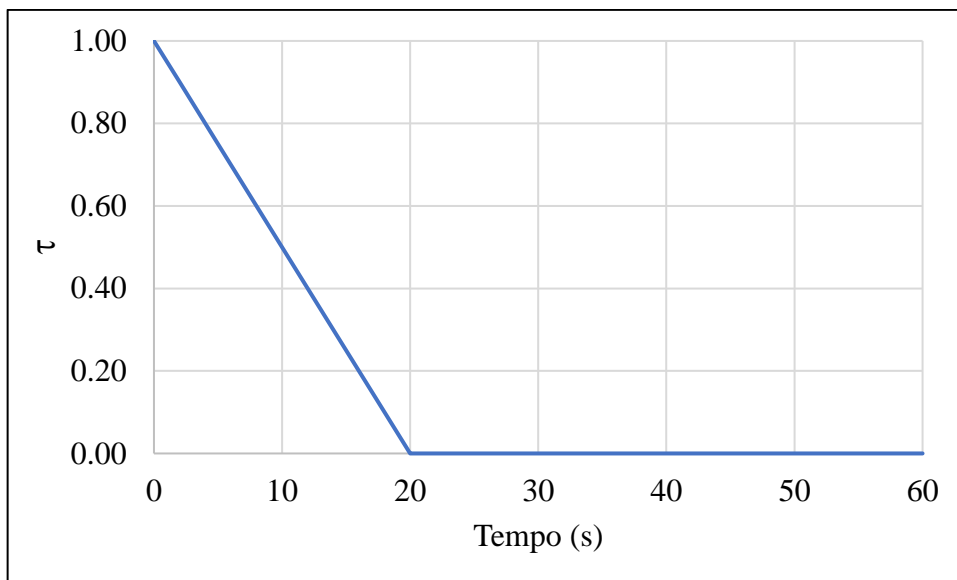
6.6.2 Manobra de Válvula

Com o objetivo de obter o efeito do transiente na rede analisada e utilizar as cargas hidráulicas transientes sintéticas na identificação dos parâmetros, uma manobra suave de

fechamento de válvula foi simulada no sistema. Estas cargas transientes são coletadas em apenas um nó (onde se encontra a válvula) e usadas em todo o processo de identificação dos vazamentos. Na rede exemplo analisada a válvula se encontra no nó 5.

A manobra é caracterizada pela relação entre o coeficiente de abertura (ou fechamento) relativo da válvula, τ (*Tau*), em função do tempo t . A manobra suave segue o seguinte procedimento, a válvula de controle encontra-se inicialmente aberta ($\tau = 1$) no tempo $t = 0,0$ s e fecha-se linearmente até o $t = 20$ s. O Gráfico 2 mostra o comportamento da manobra.

Gráfico 2 - Manobra de fechamento da válvula, Rede Exemplo A.



Fonte: elaborada pela autora.

7 RESULTADOS E ANÁLISES

7.1 Rede Porto

Na presente dissertação, onde utilizou-se o Método Transiente Inverso otimizado pelo Algoritmo Genético (MTI-AG), foram realizadas 30 simulações com os programas desenvolvidos por Araújo (2003) divididas em 6 grupos, para análise da metodologia aplicada sob os mais amplos aspectos. Foram feitas as análises comparativos dos Grupos 1 e 2, assim como dos resultados reunidos por tipo e taxa de Elitismo aplicada. Os resultados dos Grupos 3, 4, 5 e 6 podem ser visualizados no Apêndice A. A saber:

Grupo 1: São os casos 1 a 5, que diferem entre si pelo tipo e taxa de Elitismo aplicada, visando analisar sua influência sobre a qualidade dos resultados obtidos. Esse grupo apresenta o nó 2 como nó de localização do vazamento, posicionado próximo ao reservatório de abastecimento da rede analisada.

Grupo 2: São os casos 6 a 10, que diferem entre si pelo tipo e taxa de Elitismo aplicada, visando analisar sua influência sobre a qualidade dos resultados obtidos. Esse grupo apresenta o nó 8 como nó de localização do vazamento, posicionado afastado do reservatório de abastecimento da rede analisada.

Grupo 3: São os casos 11 a 15, que diferem entre si pelo tipo e taxa de Elitismo aplicada, visando analisar sua influência sobre a qualidade dos resultados obtidos. Esse grupo apresenta o nó 4 como nó de localização do vazamento.

Grupo 4: São os casos 16 a 20, que diferem entre si pelo tipo e taxa de Elitismo aplicada, visando analisar sua influência sobre a qualidade dos resultados obtidos. Esse grupo apresenta o nó 6 como nó de localização do vazamento.

Grupo 5: São os casos 21 a 25, que diferem entre si pelo tipo e taxa de Elitismo aplicada, visando analisar sua influência sobre a qualidade dos resultados obtidos. Esse grupo apresenta o nó 7 como nó de localização do vazamento.

Grupo 6: São os casos 26 a 30, que diferem entre si pelo tipo e taxa de Elitismo aplicada, visando analisar sua influência sobre a qualidade dos resultados obtidos. Esse grupo apresenta o nó 3 como nó de localização do vazamento.

7.1.1 Análise das simulações do Grupo 1

A condições iniciais para o Grupo 1 são as seguintes:

- Nó de vazamento: 2;
- Nó monitorado: 5;
- Número máximo de iterações (gerações): 10;
- População de soluções: 80;
- Probabilidade de Cruzamento: 60%;
- Probabilidade de Mutação: Variada $P_m = \frac{1}{NC \times NV}$

O Grupo 1 engloba os seguintes casos:

- Caso 1: Sem Elitismo, $p_e = 0\%$
- Caso 2: Elitismo 1, $p_e = 20\%$
- Caso 3: Elitismo 2, $p_e = 20\%$
- Caso 4: Elitismo 1, $p_e = 80\%$
- Caso 5: Elitismo 2, $p_e = 80\%$

7.1.1.1 Localização e quantificação do vazamento

Os resultados da aplicação do MTI-AG para identificação de vazamentos referente ao Grupo 1 (casos 1, 2, 3, 4, e 5), com um único vazamento na rede localizado no nó 2, próximo do reservatório, são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6 a seguir.

Na estimativa preliminar, que trata todos os nós da rede (exceto os nós 1 e 5) como possíveis locais de vazamento, ilustrada no Gráfico 3 e Gráfico 5, percebe-se que nos casos 1, 4 e 5, o nó 2 já se revela como o provável nó do vazamento. Contudo, os casos 2 e 3, apontam, na estimativa preliminar, outro nó (nó 7 e nó 3, respectivamente) como possível local de vazamento. O caso 4, que representa o Elitismo 1 com p_e de 80%, apresentou maior Índice de Acerto (IA) na 1ª tentativa, enquanto o menor IA foi do caso 2 (Elitismo 1 p_e de 20%).

O Gráfico 4 e o Gráfico 6 referentes à estimação final, confirma o nó 2 como o real local de vazamento com altíssimo índice de acerto, IALV igual a 100% e IA igual a 99,90% em todos os casos. Os resultados mostraram que o método MTI-AG é bastante eficiente na identificação do vazamento real para um nó localizado próximo do reservatório,

independentemente do tipo de Elitismo utilizado, porém na estimativa preliminar os casos 2 e 3 (em que a taxa elitista aplicada é 20%) foram os menos precisos, indicando uma convergência mais lenta.

Tabela 5 - Estimação preliminar – Grupo 1 (Rede Porto).

	Caso	Elitismo	$C_{DAV}(\text{real})$ (m^2)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m^2)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
Grupo 1	1	0%	0,000246	0,000020	0,41	47,29	8,14	290,08
	2	E1 (20%)	0,000246	0,000014	0,28	27,71	5,70	119,55
	3	E2 (20%)	0,000246	0,000016	0,33	33,72	6,51	108,26
	4	E1 (80%)	0,000246	0,000023	0,47	41,49	9,36	107,65
	5	E2 (80%)	0,000246	0,000020	0,41	47,29	8,14	106,77

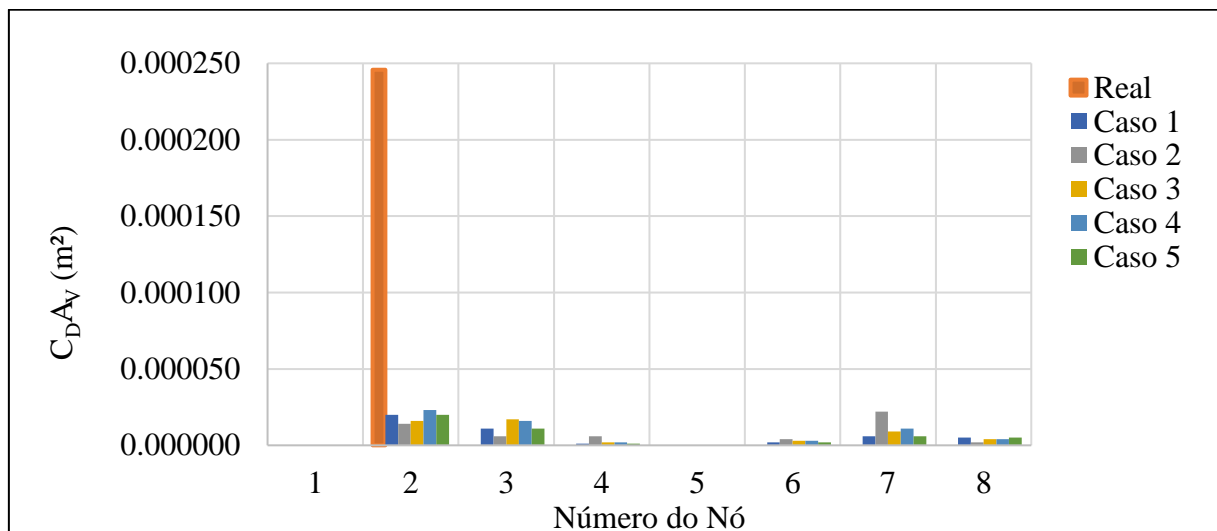
Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 6 - Estimação final – Grupo 1 (Rede Porto).

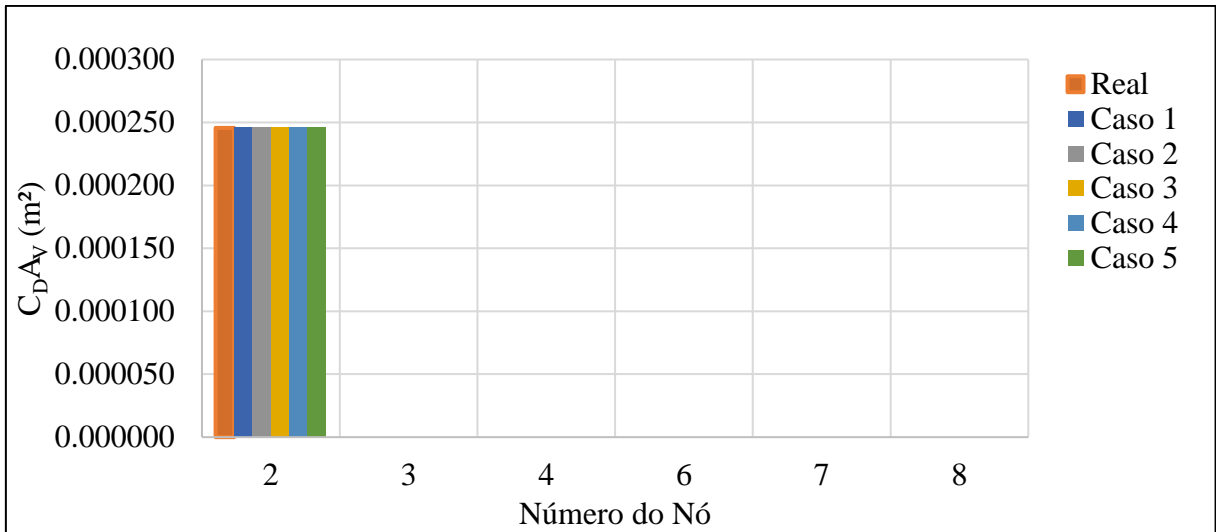
	Caso	Elitismo	$C_{DAV}(\text{real})$ (m^2)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m^2)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
Grupo 1	1	0%	0,000246	0,000246	5,01	100,0	99,90	290,08
	2	E1 (20%)	0,000246	0,000246	5,01	100,0	99,90	119,55
	3	E2 (20%)	0,000246	0,000246	5,01	100,0	99,90	108,26
	4	E1 (80%)	0,000246	0,000246	5,01	100,0	99,90	107,65
	5	E2 (80%)	0,000246	0,000246	5,01	100,0	99,90	106,77

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 3 - Estimação preliminar - melhor solução (C_{DAV} m^2), Grupo 1 (Rede Porto).

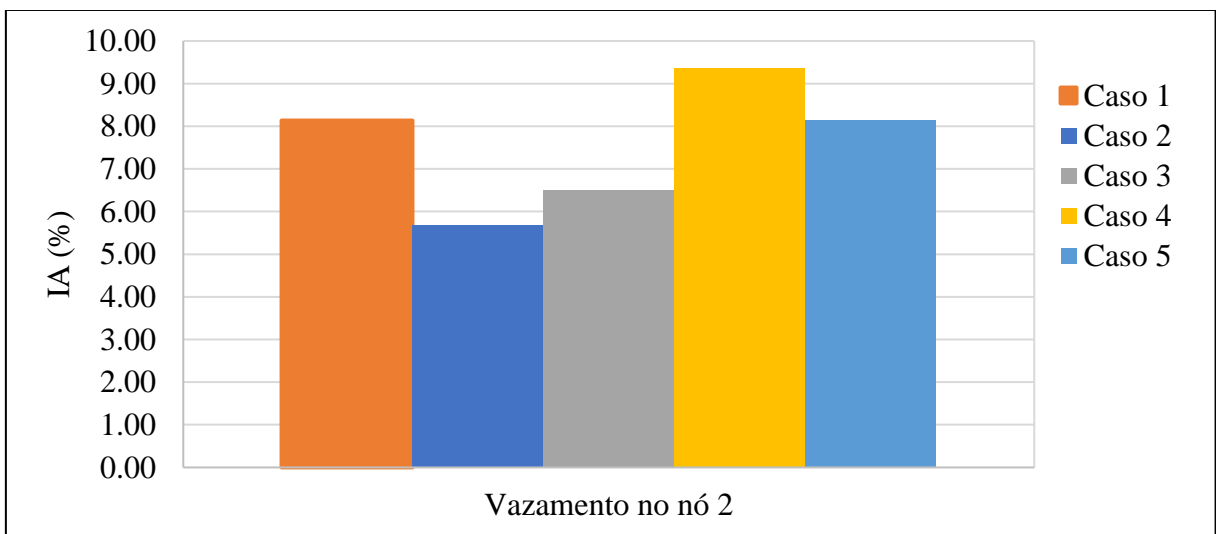


Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 4 - Estimação final - melhor solução ($C_D A_V$ m²), Grupo 1 (Rede Porto).

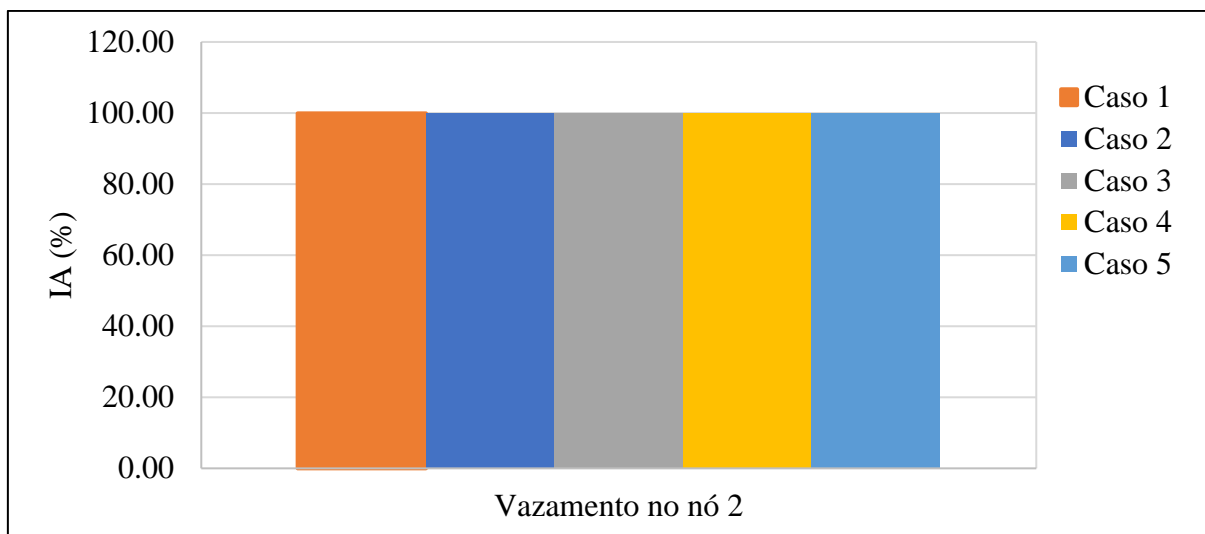
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 5 - Índice de Acerto, IA (%) - População Inicial, Grupo 1 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 6 - Índice de Acerto, IA (%) - População Final, Grupo 1 (Rede Porto).

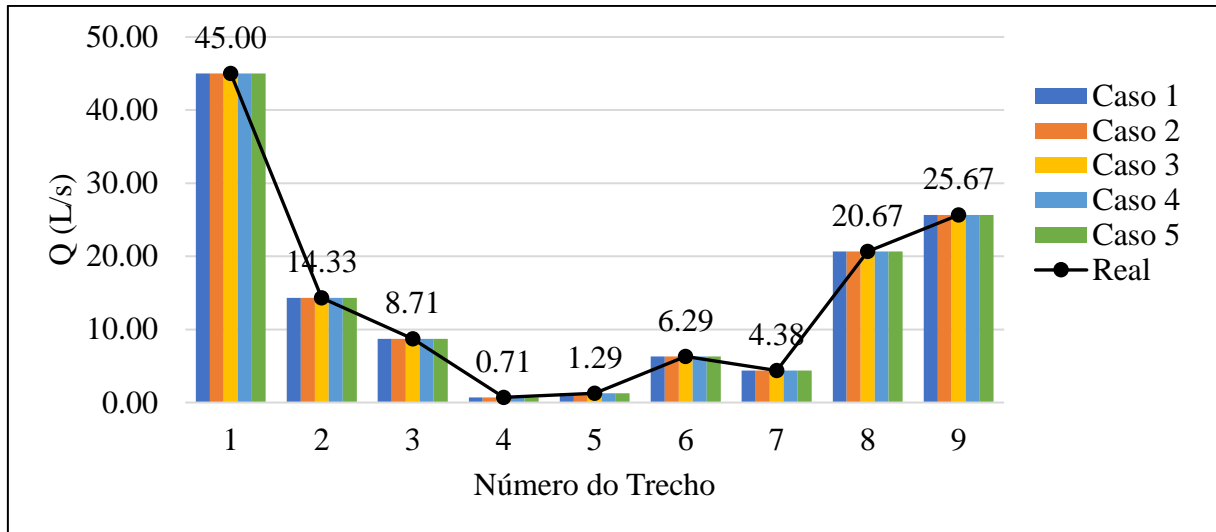


Fonte: elaborada pela autora.

7.1.1.2 *Condição Permanente*

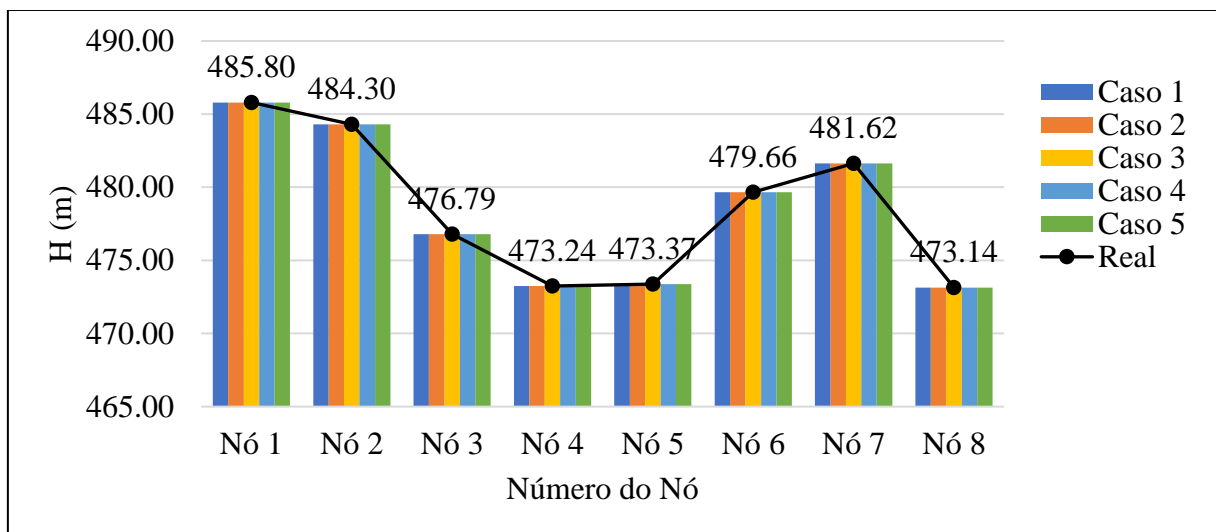
Todos os casos do Grupo 1 localizaram e quantificaram corretamente o vazamento na estimativa final. A vazão vazada estimada pelo método MTI-AG foi 5,01 L/s no nó 2, enquanto a real é 5,00 L/s, indicando um IA igual a 99,90% em todos os casos analisados. Essa pequena diferença na vazão vazada não alterou as vazões nos trechos e cargas nos nós no regime permanente, nos 5 casos constatou-se apenas uma diferença na vazão no trecho 1 de 0,02%, as demais vazões e cargas não apresentaram diferença absoluta. O Gráfico 7 e Gráfico 8 demonstram o comportamento das vazões nos trechos e das cargas nos nós, no regime permanente, nos 5 casos analisados no Grupo 1.

Gráfico 7 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 1 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 8 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 1 (Rede Porto).

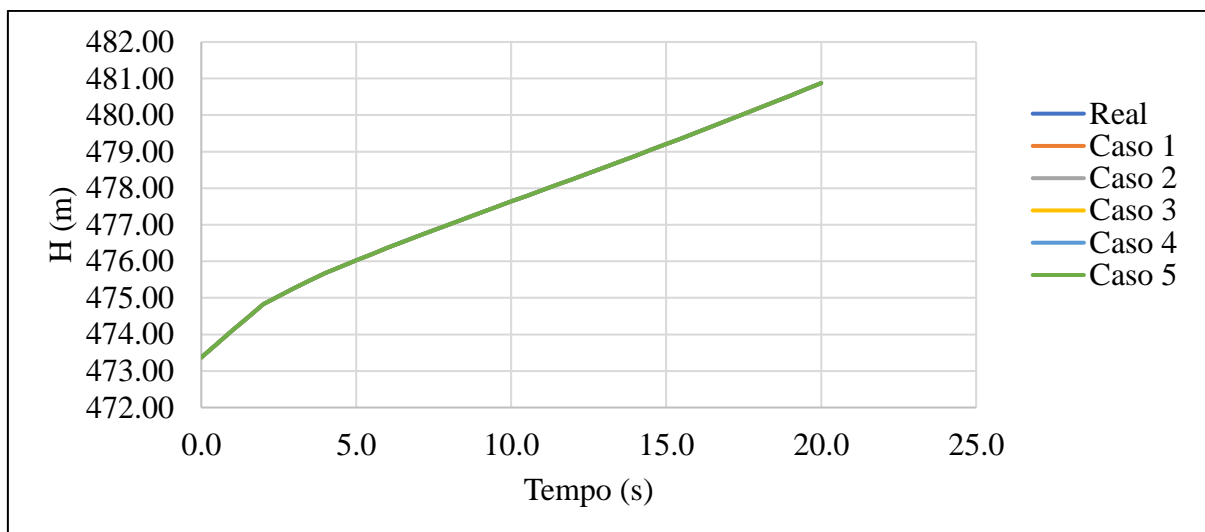


Fonte: elaborada pela autora.

7.1.1.3 Transiente

O Gráfico 9 abaixo ilustra o comportamento da carga hidráulica transiente no nó monitorado (nó 5) durante os 20s de manobra da válvula nos 5 casos analisados. Assim como no regime permanente, o regime transiente não apresentou diferença absoluta significativa nas pressões calculadas em relação às observadas, por isso as linhas do gráfico coincidem.

Gráfico 9 - Carga Hidráulica Transiente - Nó monitorado (5), Grupo 1 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

7.1.1.4 Função objetivo

O objetivo do método MTI-AG é minimizar a diferença entre as cargas transientes observadas e calculadas no nó observado (nó 5), para isso o método procura encontrar os melhores parâmetros para minimizar essa diferença, nos casos analisados o parâmetro estudado é o vazamento ($C_D A_V$). A Função Objetivo (FO) ilustra o comportamento da diferença entre as cargas transientes simuladas e a observada.

O comportamento da FO no decorrer das gerações na estimativa inicial, está exposto no Gráfico 10 abaixo, enquanto o Gráfico 11 demonstra o desempenho da FO na estimativa final. A FO na estimativa inicial mostra valores bem mais altos do que na final, comportamento que era esperado, uma vez que a cada tentativa o nó menos provável para localização do vazamento é descartado e chegasse mais próximo do resultado esperado.

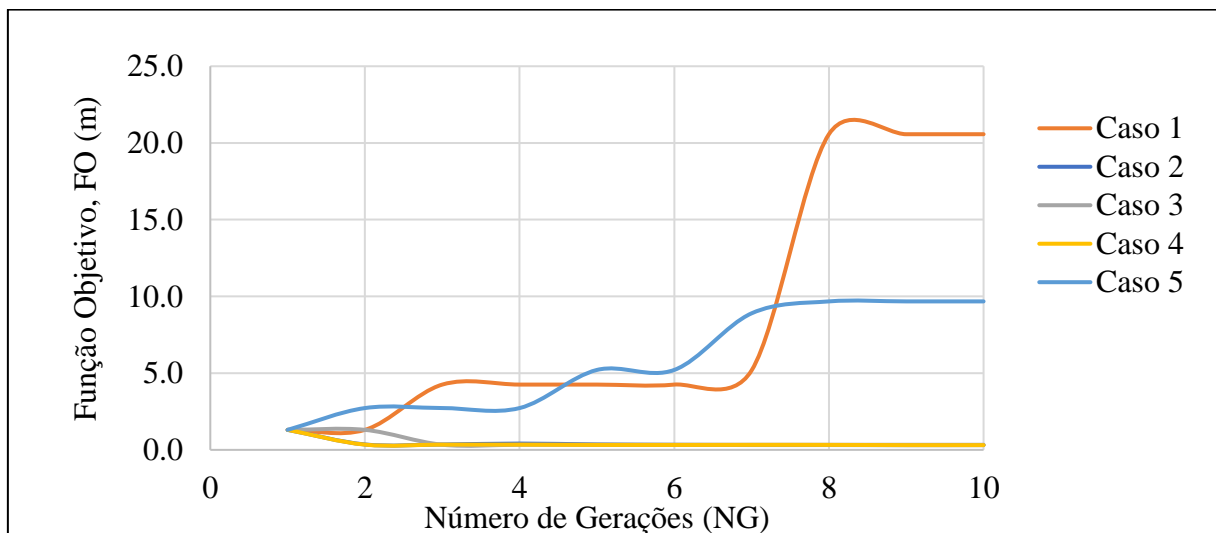
O caso 1, em que o elitismo é ausente (p_e de 0%), mostrou um comportamento de crescimento da FO inicial e final. Já que a população em todas as gerações é escolhida de forma aleatória, os resultados não convergem para reduzir a FO, mesmo assim o caso conseguiu encontrar um resultado satisfatório na geração 3 que apresentou $FO = 0,014m$, que já foi suficiente para localizar e quantificar o vazamento com a mesma precisão dos demais casos.

O comportamento da FO dos casos 2, 3 e 4 foi semelhante, começou com valores altos, após 10 gerações convergiu para valores inferiores. Na primeira tentativa, partindo com média de $FO = 1,3m$ e finaliza na geração 10 com FO média de $0,3m$. Na última tentativa, inicia

com média de 0,08m, cai para 0,005m após 10 gerações. É importante ressaltar que a rápida convergência se deve ao tipo de seleção escolhida, a seleção proporcional a aptidão, que faz com que indivíduos com alta aptidão em relação aos demais (no nosso problema significa baixos valores da FO) sejam escolhidos com maior probabilidade para as seguintes etapas do processo. O maior problema associado a este fato é a possibilidade de se levar a solução para a estagnação (paralisação da evolução) ou convergência prematura, em algumas situações. Esses problemas ocorreram no caso 5.

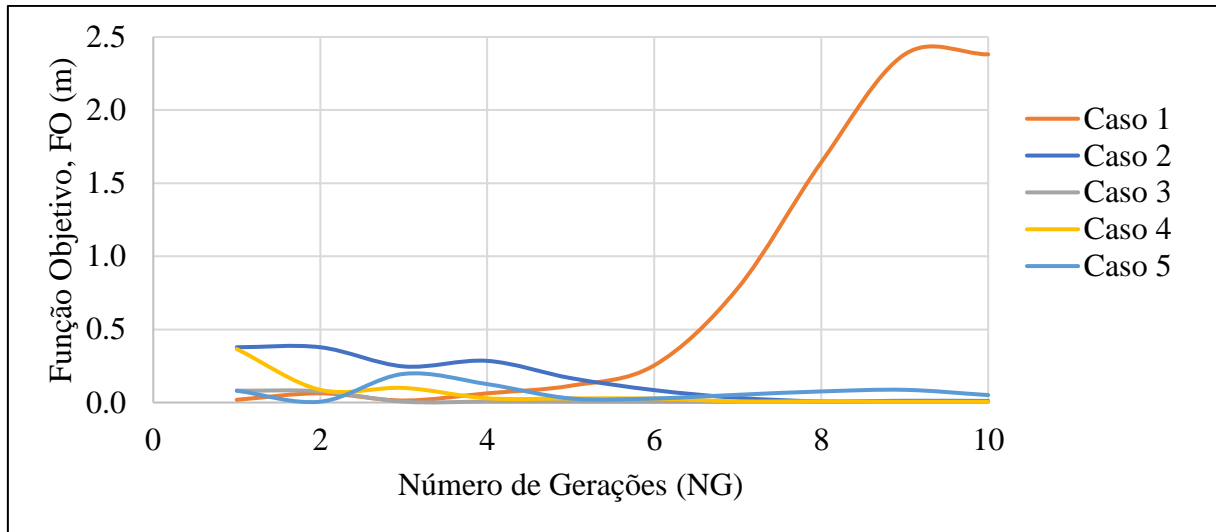
O caso 5 deveria ter apresentado comportamento semelhante aos casos 2, 3 e 4, entretanto, por conta do tipo e alta taxa elitista, a sua FO inicial mostrou um crescimento da geração 1 para a 10, e sua FO final subiu na geração 3 e depois foi se reduzindo até chegar na geração 10 com 0,05m. A melhor solução do caso 5 ocorreu na geração 2 (FO = 0,006m), enquanto que nos demais casos com elitismo a melhor solução foi encontrada nas últimas gerações. Esse comportamento no caso 5 pode ser explicado pelo fato de que ao utilizar uma alta taxa do Elitismo 2, novas gerações estão sendo compostas em sua maioria por indivíduos de gerações anteriores dando uma pequena, quase reduzida, margem para a evolução atuar, desta forma a precisão do resultado pode ser comprometida nas gerações mais avançadas.

Gráfico 10 - Função Objetivo Inicial, Grupo 1 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 11 - Função Objetivo Final, Grupo 1 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 7 - Função Objetivo Inicial, Grupo 1 (Rede Porto).

NG	FO inicial (m)				
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1	1,304	1,304	1,304	1,304	1,304
2	1,304	0,352	1,304	0,340	2,723
3	4,254	0,352	0,333	0,340	2,723
4	4,254	0,410	0,333	0,338	2,723
5	4,254	0,353	0,333	0,322	5,207
6	4,254	0,327	0,331	0,319	5,207
7	5,176	0,315	0,331	0,324	8,898
8	20,570	0,313	0,331	0,324	9,675
9	20,570	0,308	0,331	0,307	9,675
10	20,570	0,310	0,331	0,307	9,675
Média	8,651	0,434	0,526	0,423	5,781
Máximo	20,570	1,304	1,304	1,304	9,675
Mínimo	1,304	0,308	0,331	0,307	1,304

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 8 - Função Objetivo Final, Grupo 1 (Rede Porto).

NG	FO final (m)				
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1	0,019	0,378	0,081	0,366	0,081
2	0,063	0,378	0,077	0,087	0,006
3	0,014	0,247	0,006	0,100	0,196
4	0,063	0,285	0,006	0,029	0,126
5	0,115	0,167	0,006	0,028	0,028
6	0,254	0,085	0,005	0,027	0,028
7	0,781	0,032	0,005	0,008	0,053
8	1,642	0,008	0,005	0,008	0,076
9	2,381	0,012	0,005	0,006	0,087
10	2,381	0,011	0,005	0,006	0,051
Média	0,771	0,160	0,020	0,067	0,073
Máximo	2,381	0,378	0,081	0,366	0,196
Mínimo	0,014	0,008	0,005	0,006	0,006

Fonte: elaborada pela autora.

7.1.2 Análise das simulações do Grupo 2

A condições iniciais para o Grupo 1 são as seguintes:

- Nó de vazamento: 8;
- Nó monitorado: 5;
- Número máximo de iterações (gerações): 10;
- População de soluções: 80;
- Probabilidade de Cruzamento: 60%;
- Probabilidade de Mutação: Variada $P_m = \frac{1}{NC \times NV}$

O Grupo 2 engloba os seguintes casos:

- Caso 6: Sem Elitismo, $p_e = 0\%$
- Caso 7: Elitismo 1, $p_e = 20\%$
- Caso 8: Elitismo 2, $p_e = 20\%$
- Caso 9: Elitismo 1, $p_e = 80\%$
- Caso 10: Elitismo 2, $p_e = 80\%$

7.1.2.1 Localização e quantificação do vazamento

Os resultados da aplicação do MTI-AG para identificação de vazamentos referente ao Grupo 2 (casos 6, 7, 8, 9, e 10), com um único vazamento na rede localizado no nó 8, distante do reservatório e próxima da válvula, são apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10 a seguir.

Na estimativa preliminar, que trata todos os nós da rede (exceto os nós 1 e 5) como possíveis locais de vazamento, ilustrada no Gráfico 12 e Gráfico 14, percebe-se que em todos os casos analisados o nó 8 já se revela como o provável nó do vazamento. Contudo, os casos 7, 8 e 10, foram os mais precisos na localização inicial. O caso 8, que representa o Elitismo 2 com p_e de 20%, apresentou maior Índice de Acerto (IA) na tentativa inicial, enquanto o menor IA foi do caso 9 (Elitismo 1- p_e de 80%).

O Gráfico 13 Gráfico 15 e referente à estimação final confirma o nó 8 como o real local de vazamento com IALV igual a 100% em todos os casos. Já o grau de acerto da magnitude do vazamento (IA) foi menor no caso 1 (IA = 96,54%) e maior nos casos 8 e 9 (IA = 99,95%). Os resultados mostraram que o método MTI-AG é bastante eficiente na identificação do vazamento real para um nó localizado distante do reservatório. O caso 8 apresentou melhor resultado desde a primeira tentativa, demonstrando uma rápida convergência para a melhor solução.

Tabela 9 - Estimação preliminar - Grupo 2 (Rede Porto).

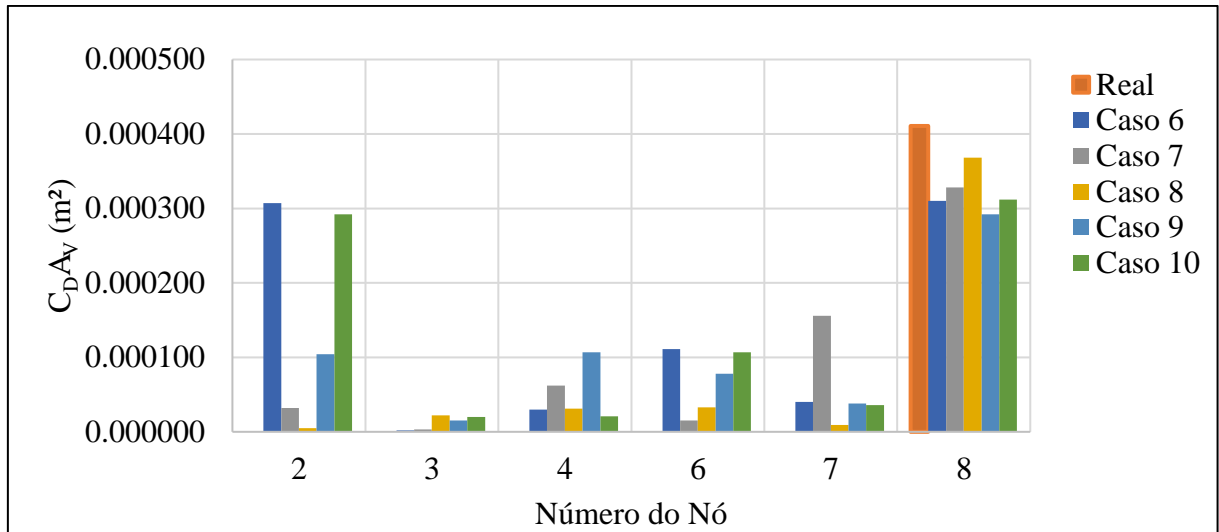
	Caso	Elitismo	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
Grupo 2	6	0%	0,000411	0,000310	3,77	28,05	75,47	107,95
	7	E1 (20%)	0,000411	0,000328	3,99	45,56	79,85	115,36
	8	E2 (20%)	0,000411	0,000368	4,48	72,14	89,59	107,79
	9	E1 (80%)	0,000411	0,000292	3,55	36,75	71,09	107,56
	10	E2 (80%)	0,000411	0,000312	3,80	28,78	75,95	109,31

Fonte: elaborada pela autora.

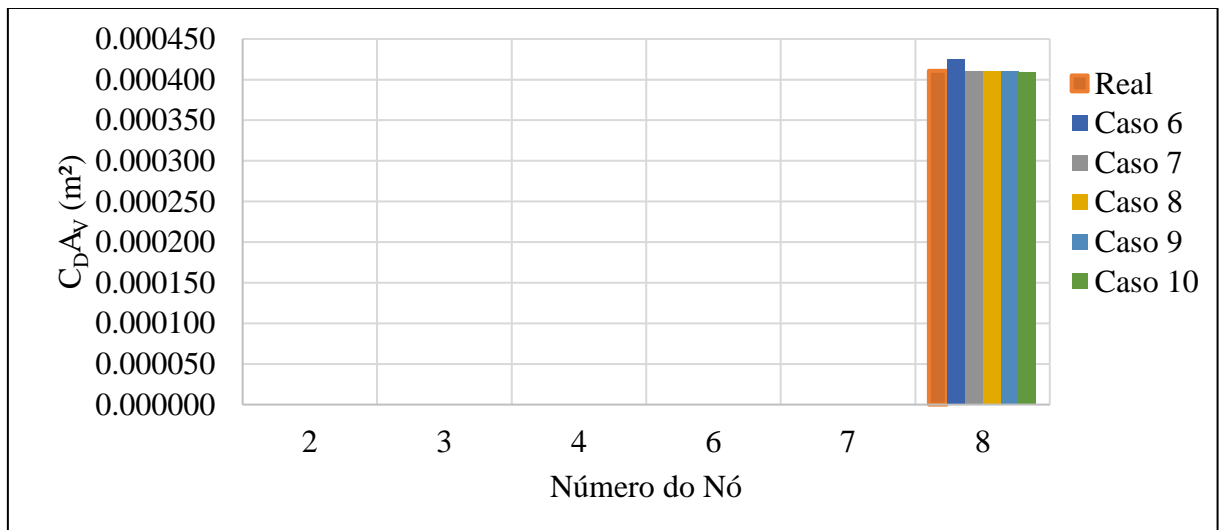
Tabela 10 - Estimação final – Grupo 2 (Rede Porto).

	Caso	Elitismo	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
Grupo 2	6	0%	0,000411	0,000425	5,173	100,0	96,54	107,95
	7	E1 (20%)	0,000411	0,000410	4,991	100,0	99,81	115,36
	8	E2 (20%)	0,000411	0,000411	5,003	100,0	99,95	107,79
	9	E1 (80%)	0,000411	0,000411	5,003	100,0	99,95	107,56
	10	E2 (80%)	0,000411	0,000409	4,978	100,0	99,57	109,31

Fonte: elaborada pela autora.

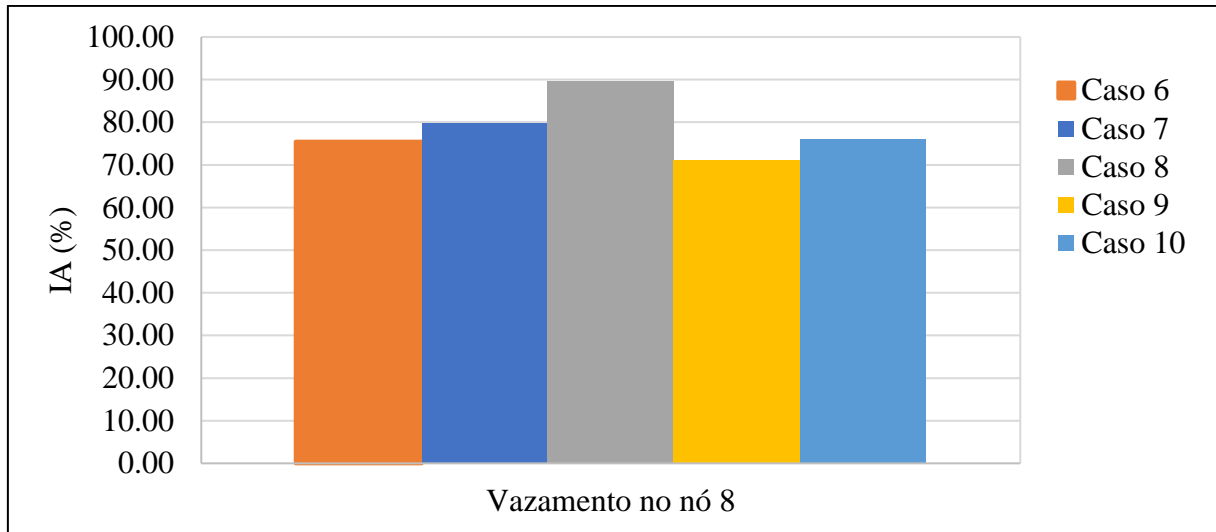
Gráfico 12 - Estimação preliminar - melhor solução ($C_D A_V$ m²), Grupo 2 (Rede Porto).

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 13 - Estimação final - melhor solução ($C_D A_V$ m²), Grupo 2 (Rede Porto).

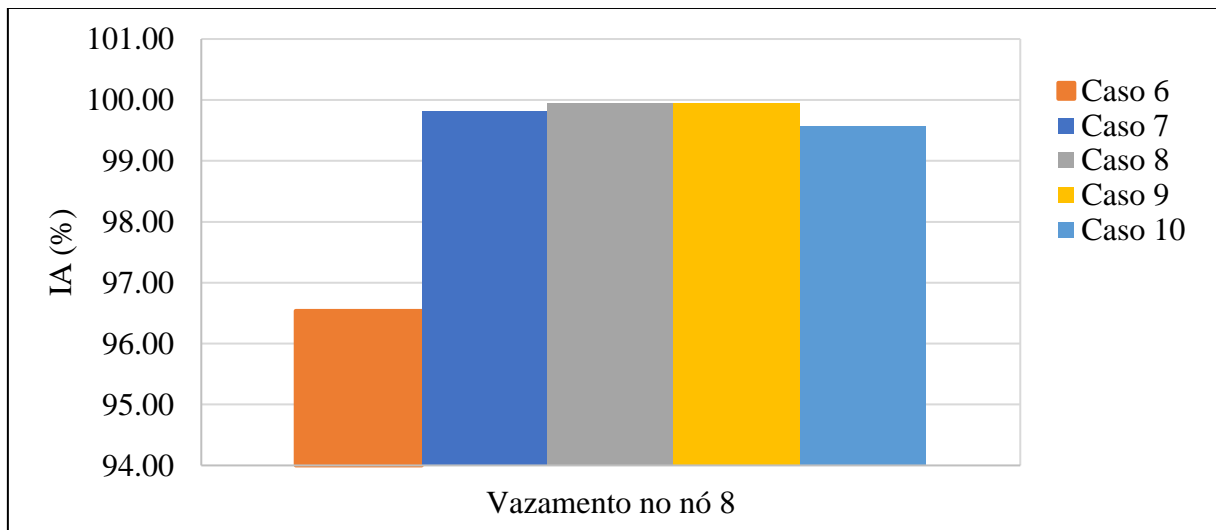
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 14 - Índice de Acerto, IA (%) - População Inicial, Grupo 2 (Rede Porto).



Fonte: Elaborada pela autora.

Gráfico 15- Índice de Acerto, IA (%) - População Final, Grupo 2 (Rede Porto).



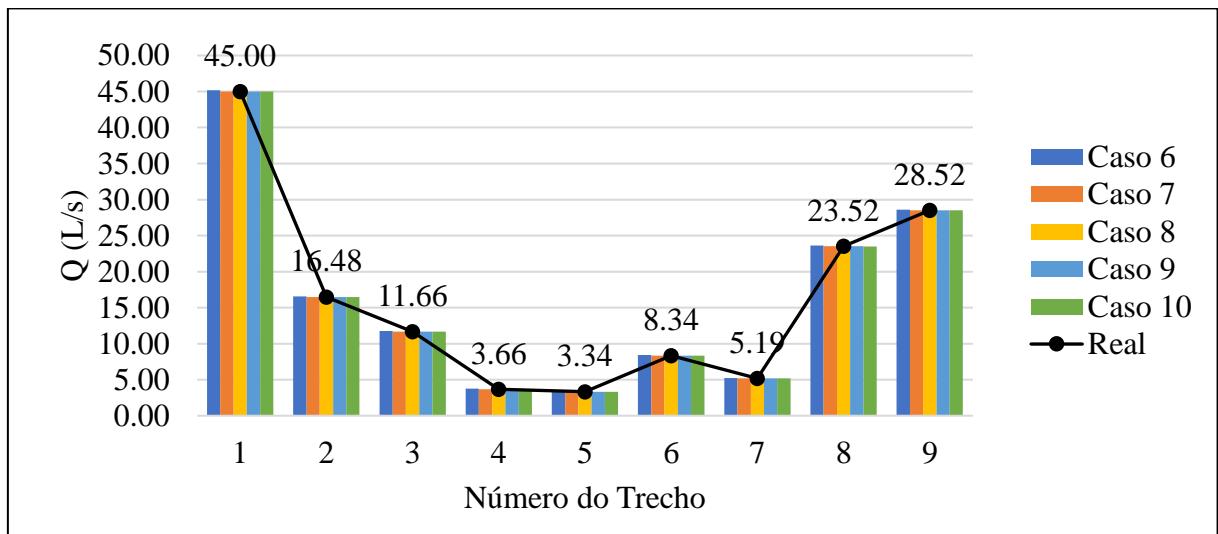
Fonte: elaborada pela autora.

7.1.2.2 *Condição Permanente*

Todos os casos do Grupo 2 localizaram e quantificaram corretamente o vazamento na estimativa final. A vazão vazada estimada pelo método MTI-AG (melhor solução, casos 8 e 9) foi 5,003 L/s no nó 8, enquanto a real é 5,00 L/s, indicando um IA igual a 99,95%. Já a vazão vazada da solução menos precisa foi 5,17 L/s (caso 6), um IA igual a 96,54%. Essa pequena diferença na vazão vazada não alterou significativamente as vazões nos trechos e cargas nos

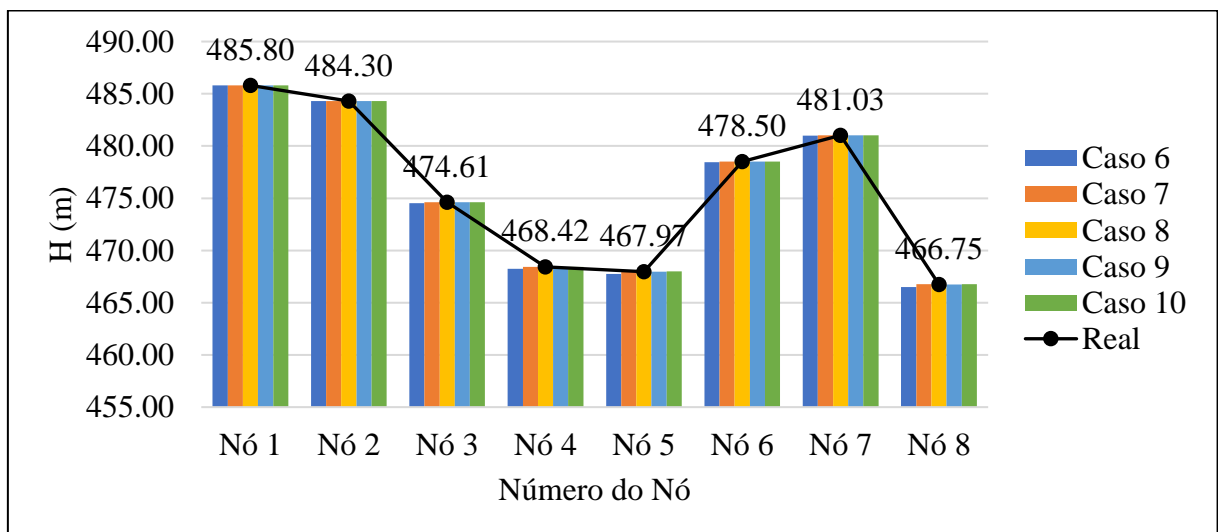
nós no regime permanente. Nos 5 casos a maior diferença constatada foi no caso 6; pressão no nó 8 com desvio percentual de 0,06%, e vazão no trecho 4 com desvio de 2,67%. As demais vazões e cargas apresentaram diferença absoluta entre valores observados e calculados inferiores aos citados acima. O Gráfico 16 e Gráfico 17 demonstram o comportamento das vazões nos trechos e das cargas nos nós, no regime permanente, nos 5 casos analisados no Grupo 2.

Gráfico 16 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 2 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 17 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 2 (Rede Porto).

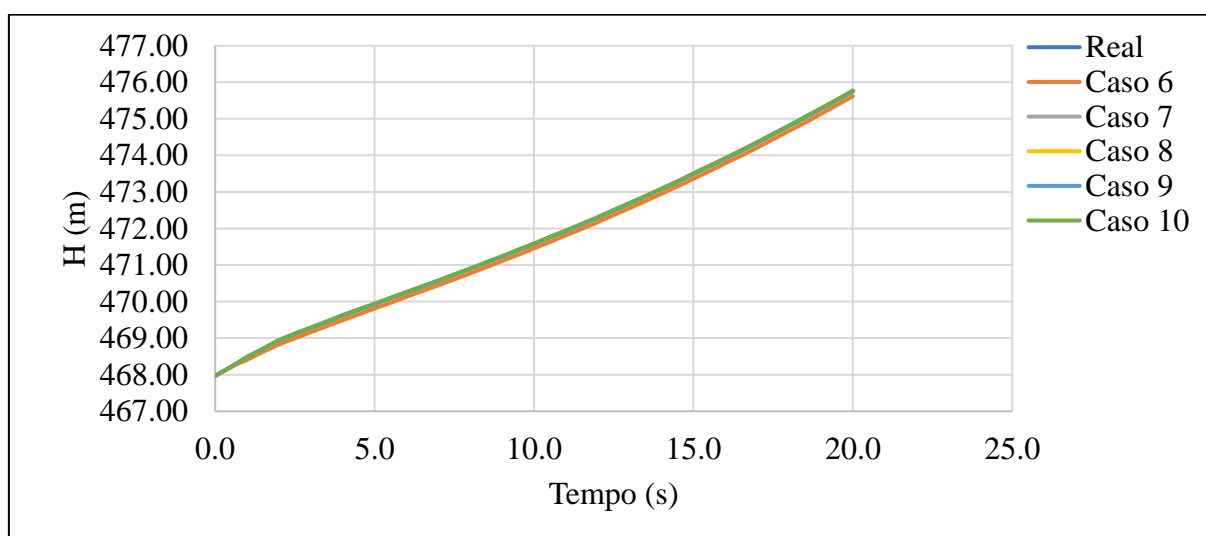


Fonte: elaborada pela autora.

7.1.2.3 *Transiente*

O Gráfico 18 abaixo ilustra o comportamento da carga hidráulica transiente no nó monitorado (nó 5) durante os 20s de manobra da válvula nos 5 casos analisados. A diferença absoluta média entre as cargas transientes observadas e calculadas no caso 6 foi de 0,03%. Os demais casos não apresentaram diferença absoluta significativa, por isso as linhas do gráfico coincidem.

Gráfico 18 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 2 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

7.1.2.4 *Função objetivo*

O objetivo do método MTI-AG é minimizar a diferença entre as cargas transientes observadas e calculadas no nó observado (nó 5), para isso o método procura encontrar os melhores parâmetros para minimizar essa diferença, nos casos analisados o parâmetro estudado é o vazamento. A Função Objetivo (FO) ilustra o comportamento da diferença entre as cargas transientes simuladas e a observada.

O comportamento da FO no decorrer das gerações na estimativa inicial, está exposto no Gráfico 19, enquanto o Gráfico 20 demonstra o desempenho da FO na estimativa final. A FO na estimativa inicial deve mostrar valores bem mais altos do que na final, uma vez que a cada passo o nó menos provável para localização do vazamento é descartado e chegasse

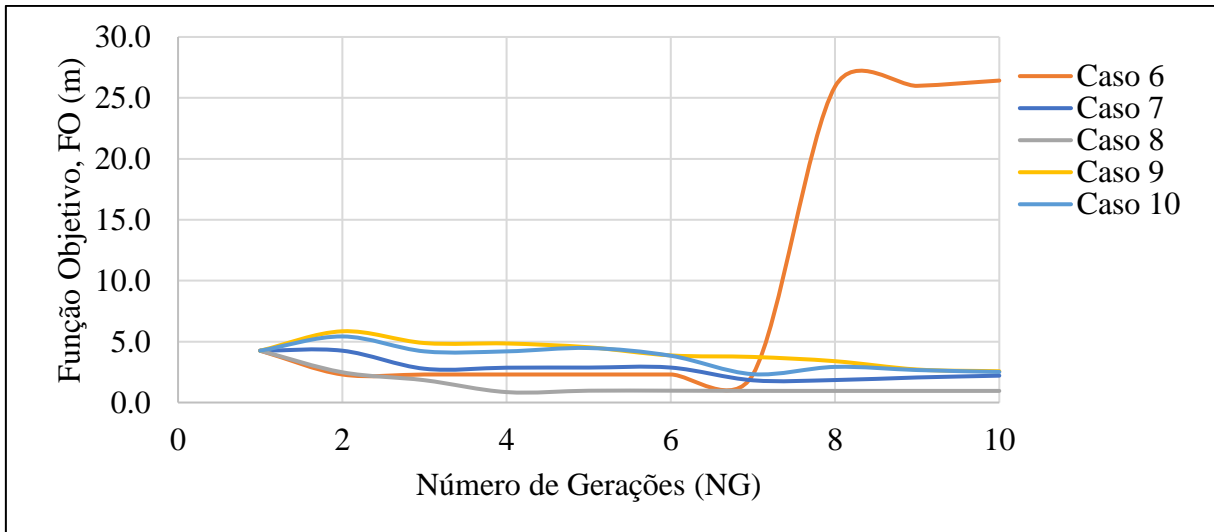
mais próximo do resultado esperado, minimizando a FO. Esse comportamento esperado não ocorreu nos casos 6 e 10, já que os valores da FO foram maiores na estimativa final.

O caso 6, em que o elitismo é ausente (p_e de 0%), a FO final se manteve a mesma na geração 1 e 2; a partir da geração 3 os valores aumentaram, chegando a 75m. Já que para esse tipo de elitismo a população em todas as gerações é escolhida de forma aleatória, os resultados não convergem para reduzir a FO, mesmo assim o caso conseguiu encontrar um resultado satisfatório logo na primeira geração, que apresentou FO = 3,645m, suficiente para localizar e quantificar o vazamento com IA de 96,54%.

O comportamento da FO dos casos 7, 8 e 9 foi semelhante, começou com valores altos, após 10 gerações convergiu para valores inferiores. Na 1ª tentativa com média de FO = 2,79m. Na última tentativa com média de 0,52. Os casos 7 e 9, que trabalham com o Elitismo 1, encontrou a melhor solução na última geração, já o caso 8 (Elitismo 2) encontrou a solução na geração 4. É importante ressaltar que a rápida convergência se deve ao tipo de seleção escolhida, a seleção proporcional a aptidão, que faz com que indivíduos com alta aptidão em relação aos demais (no nosso problema significa baixos valores da FO) sejam escolhidos com maior probabilidade para as seguintes etapas do processo. O maior problema associado a este fato é a possibilidade de se levar a solução para a estagnação (paralização da evolução) ou convergência prematura, em algumas situações. Esses problemas ocorreram no caso 10.

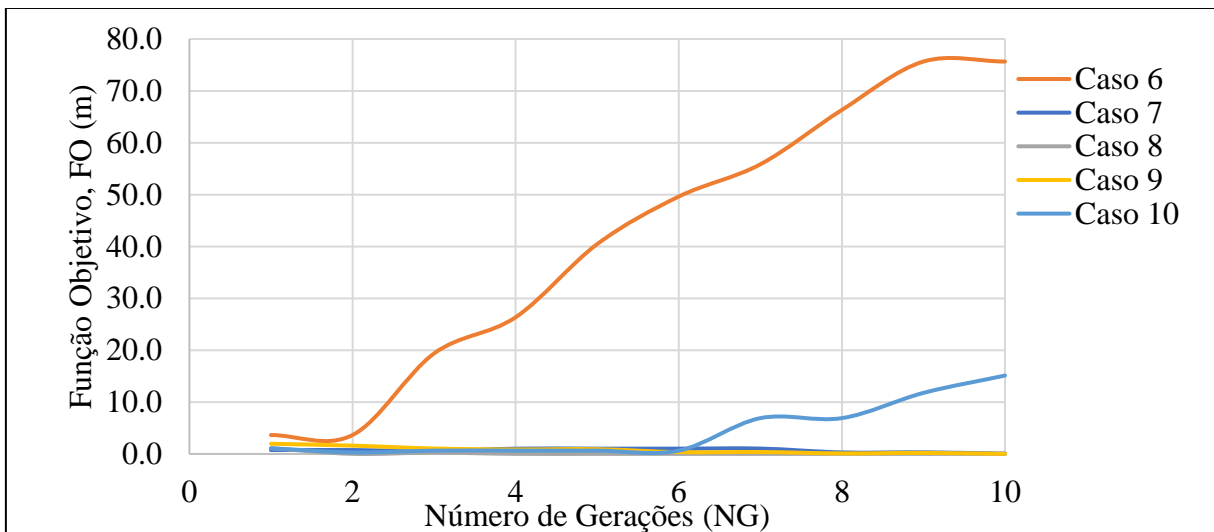
O caso 10, por conta da presença do elitismo, deveria ter apresentado comportamento semelhante aos casos 7, 8 e 9, entretanto, a sua FO final subiu na geração 3 até chegar na geração 10 com 15,12m. A melhor solução do caso 10 ocorreu na geração 2 (FO = 0,296m) IA de 99,57%, entretanto, nos demais casos com elitismo a melhor solução foi encontrada nas últimas gerações. Esse comportamento no caso 10 pode ser explicado pelo fato de que ao utilizar uma alta taxa do Elitismo 2, novas gerações estão sendo compostas em sua maioria por indivíduos de gerações anteriores dando uma pequena, quase reduzida, margem para a evolução atuar, desta forma a precisão do resultado pode ser comprometida nas gerações mais avançadas.

Gráfico 19 - Função Objetivo Inicial, Grupo 2 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 20 - Função Objetivo Final, Grupo 2 (Rede Porto).



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 11 - Função Objetivo Inicial, Grupo 2 (Rede Porto).

NG	FO inicial (m)				
	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10
1	4,255	4,255	4,255	4,255	4,255
2	2,303	4,255	2,484	5,845	5,425
3	2,303	2,774	1,833	4,883	4,199
4	2,303	2,860	0,856	4,847	4,199
5	2,303	2,869	0,972	4,535	4,473
6	2,303	2,869	0,972	3,867	3,840
7	2,303	1,825	0,958	3,742	2,326
8	25,929	1,847	0,956	3,393	2,926
9	25,988	2,058	0,956	2,712	2,668
10	26,423	2,205	0,956	2,568	2,508
Média	9,641	2,782	1,520	4,065	3,682
Máximo	26,423	4,255	4,255	5,845	5,425
Mínimo	2,303	1,825	0,856	2,568	2,326

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 12 - Função Objetivo Final, Grupo 2 (Rede Porto).

NG	FO final (m)				
	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10
1	3,645	0,748	1,103	1,966	1,103
2	3,645	0,748	0,020	1,605	0,296
3	19,379	0,550	0,256	1,049	0,639
4	26,357	1,023	0,017	0,862	0,639
5	40,461	1,023	0,017	0,916	0,639
6	49,629	1,023	0,017	0,346	0,639
7	55,845	1,038	0,017	0,374	6,905
8	66,332	0,291	0,017	0,103	6,905
9	75,660	0,312	0,017	0,199	11,773
10	75,660	0,059	0,017	0,013	15,116
Média	41,661	0,682	0,150	0,743	4,465
Máximo	75,660	1,038	1,103	1,966	15,116
Mínimo	3,645	0,059	0,017	0,013	0,296

Fonte: elaborada pela autora.

7.1.3 Análise das simulações dos casos Sem Elitismo ($P_e = 0\%$)

Na Tabela 13 e Tabela 14 estão dispostos os resultados obtidos para os casos sem aplicação do Elitismo.

Na estimativa inicial o Caso 6 apontou erroneamente o nó 2, e o Caso 21 o nó 6 como localização mais provável para o vazamento. No caso 21, em que o vazamento real ocorre no nó 7, o MTI-AG não conseguiu identificar a posição correta da vazão vazada na estimativa final, o resultado continuou apontando o nó 6 como local do vazamento, com IA de 60,61%.

Os demais casos detectaram o vazamento na posição correta, com IALV de 100%, já o índice de acerto da magnitude da vazão vazada foi maior no caso 1, onde o nó vazado está posicionado próximo ao reservatório (nó 2), já o menor IA ocorreu no caso 6, onde o local do nó vazado fica distante do reservatório (nó 8). A configuração sem seleção ($P_e = 0\%$) encontrou a melhor solução entre as gerações 1 e 4, ou seja, entre as primeiras iterações, esse fato é explicado por conta da população em todas as gerações ser escolhida de forma aleatória, desta forma, os resultados não convergem para reduzir a FO, mesmo assim os casos sem elitismo conseguiram encontrar um resultado satisfatório.

No Gráfico 21 é possível visualizar melhor a diferença entre o coeficiente C_{DAV} real e o estimado em cada caso.

Tabela 13 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$).

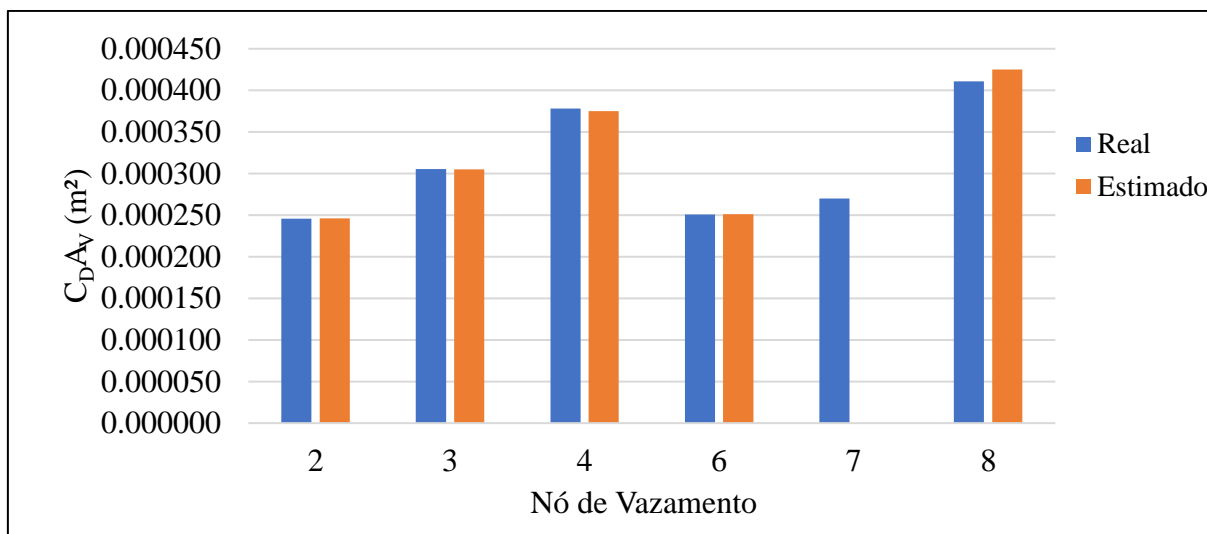
Nó de vazamento	Caso	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_{V}(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	1	0,000246	0,000020	0,41	47,29	8,14	290,08
3	26	0,000305	0,000120	1,96	44,28	39,29	107,46
4	11	0,000378	0,000332	4,39	69,22	87,80	112,08
6	16	0,000251	0,000095	1,89	40,60	37,89	109,04
7	21	0,000270	0,000001	0,02	0,63	0,37	112,49
8	6	0,000411	0,000310	3,77	28,05	75,47	107,95

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 14 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_{V}(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	1	3	0,000246	0,000246	5,01	100,00	99,90	290,08
3	26	1	0,000305	0,000305	4,99	100,00	99,85	107,46
4	11	1	0,000378	0,000375	4,96	100,00	99,17	112,08
6	16	4	0,000251	0,000251	5,01	100,00	99,89	109,04
7	21	2	0,000270	0,000000	0,00	0,00	0,00	112,49
8	6	1	0,000411	0,000425	5,17	100,00	96,54	107,95

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 21 – Rede Porto - Resultados (C_{DAV} m²), casos Sem Elitismo ($P_e = 0\%$).

Fonte: elaborada pela autora.

7.1.4 Análise das simulações dos casos com Elitismo 1 ($P_e = 20\%$)

Na Tabela 15 e Tabela 16 estão dispostos os resultados obtidos para os casos com aplicação do Elitismo tipo 1 com probabilidade igual a 20%.

Na estimativa inicial o Caso 2 apontou erroneamente o nó 7, o Caso 17 o nó 7, e o caso 22 o nó 6, como localização mais provável para o vazamento. No caso 22, em que o vazamento real ocorre no nó 7, o MTI-AG não conseguiu identificar a posição correta da vazão vazada na estimativa final, o resultado continuou apontando o nó 6 como local do vazamento, com IA de 60,61%. Mesmo resultado obtido nos casos 21 (sem Elitismo).

Os demais casos detectaram o vazamento na posição correta, com IALV de 100%, e índice de acerto da magnitude da vazão vazada foi maior que 99%. O maior IA ocorreu no caso 12, onde o nó vazado está posicionado no nó 4, já o menor IA ocorreu no caso 7, onde o local do nó vazado fica distante do reservatório (nó 8). A configuração de seleção do Elitismo 1 encontra a melhor solução entre as gerações 7 e 10, ou seja, entre as últimas iterações.

No Gráfico 22 é possível visualizar melhor a diferença entre o coeficiente C_{DAV} real e o estimado em cada caso.

Tabela 15 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).

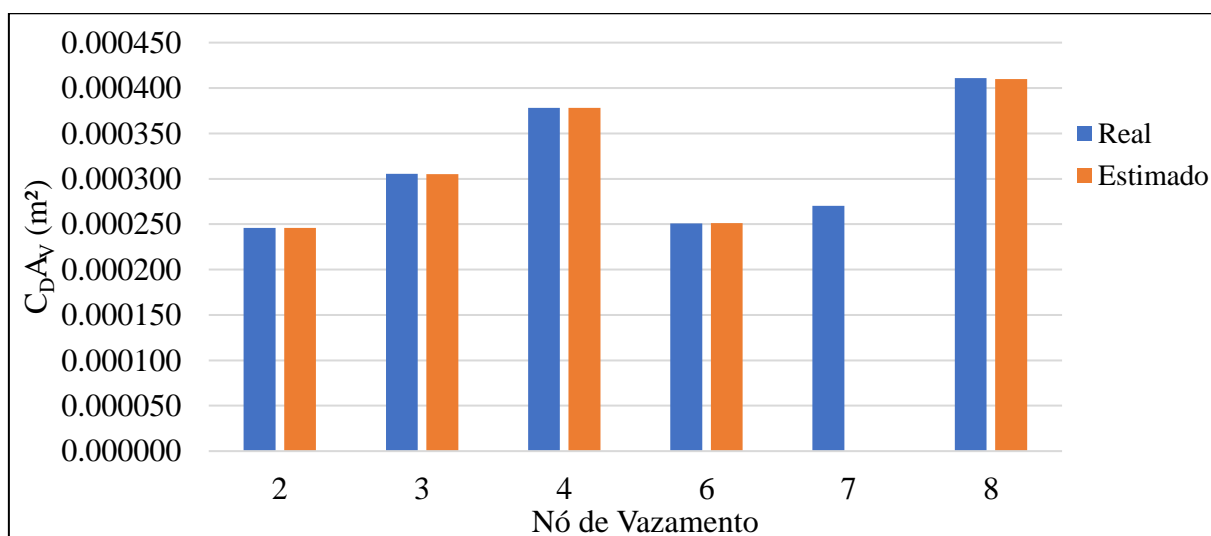
Nó de vazamento	Caso	$C_{DAV}(\text{real})$ (m^2)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m^2)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	2	0,000246	0,000014	0,28	27,71	5,70	119,55
3	27	0,000305	0,000240	3,93	69,34	78,57	107,21
4	12	0,000378	0,000368	4,87	87,43	97,32	111,37
6	17	0,000251	0,000047	0,94	10,82	18,75	112,05
7	22	0,000270	0,000001	0,02	0,63	0,37	114,25
8	7	0,000411	0,000328	3,99	45,56	79,85	115,36

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 16 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	$C_{DAV}(\text{real})$ (m^2)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m^2)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	2	8	0,000246	0,000246	5,01	100,00	99,90	119,55
3	27	8	0,000305	0,000305	4,99	100,00	99,85	107,21
4	12	7	0,000378	0,000378	5,00	100,00	99,97	111,37
6	17	8	0,000251	0,000251	5,01	100,00	99,89	112,05
7	22	4	0,000270	0,000000	0,00	0,00	0,00	114,25
8	7	10	0,000411	0,000410	4,99	100,00	99,81	115,36

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 22 – Rede Porto - Resultados (C_{DAV} m^2), casos com Elitismo Tipo 1 ($P_e = 20\%$).

Fonte: elaborada pela autora.

7.1.5 Análise das simulações dos casos com Elitismo 1 ($P_e = 80\%$)

Na Tabela 17 e Tabela 18 estão dispostos os resultados obtidos para os casos com aplicação do Elitismo tipo 1 com probabilidade igual a 80%.

Na estimativa inicial o Caso 19 apontou erroneamente o nó 7, e o Caso 24 o nó 6, como localização mais provável para o vazamento. No caso 24, em que o vazamento real ocorre no nó 7, o MTI-AG não conseguiu identificar a posição correta da vazão vazada na estimativa final, o resultado continuou apontando o nó 6 como local do vazamento, com IA de 60,61%. Mesmo resultado obtido nos casos 21 (sem Elitismo) e 22 (Elitismo 1 – 20%), analisados nos tópicos anteriores.

Os demais casos detectaram o vazamento na posição correta, com IALV de 100%, e índice de acerto da magnitude da vazão vazada foi maior que 99%. O maior IA ocorreu no caso 9, onde o nó vazado está posicionado no nó 8 (distante do reservatório), já o menor IA ocorreu no caso 14, onde o local de vazamento é o nó 4. Assim como no Elitismo 1 com P_e igual a 20%, a configuração de seleção com Elitismo 1 ($P_e = 80\%$) encontrou a melhor solução entre as últimas iterações, entre as gerações 8 e 10.

No Gráfico 23 é possível visualizar melhor a diferença entre o coeficiente C_{DAV} real e o estimado em cada caso.

Tabela 17 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).

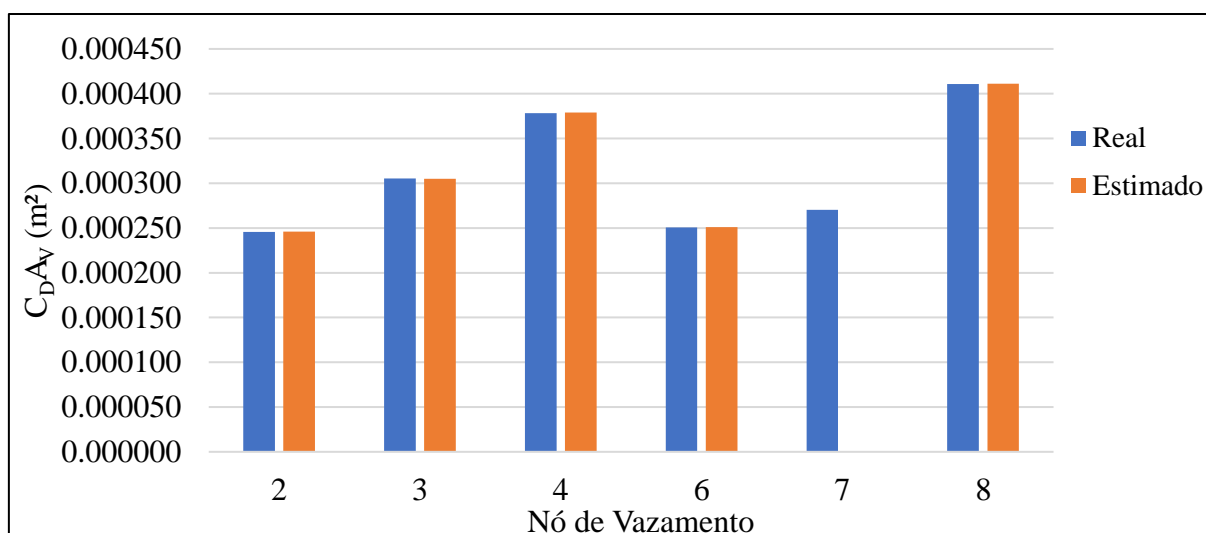
Nó de vazamento	Caso	$C_{DAV}(\text{real})$ (m^2)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m^2)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	4	0,000246	0,000023	0,47	41,49	9,36	107,65
3	29	0,000305	0,000201	3,29	51,30	65,81	107,41
4	14	0,000378	0,000332	4,39	69,22	87,80	113,00
6	19	0,000251	0,000082	1,64	27,55	32,71	107,56
7	24	0,000270	0,000001	0,02	0,63	0,37	107,59
8	9	0,000411	0,000292	3,55	36,75	71,09	107,56

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 18 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	$C_{DAV}^{(real)}$ (m ²)	$C_{DAV}^{(estimado)}$ (m ²)	$Q_V^{(estimado)}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	4	9	0,000246	0,000246	5,005	100	99,90	107,7
3	29	8	0,000305	0,000305	4,993	100	99,85	107,4
4	14	10	0,000378	0,000379	5,012	100	99,77	113,0
6	19	8	0,000251	0,000251	5,006	100	99,89	107,6
7	24	5	0,000270	0,000000	0,000	0,0	0,00	107,6
8	9	8	0,000411	0,000411	5,003	100	99,95	107,6

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 23 – Rede Porto - Resultados (C_{DAV} m²), casos com Elitismo Tipo 1 ($P_e = 80\%$).

Fonte: elaborada pela autora.

7.1.6 Análise das simulações dos casos com Elitismo 2 ($P_e = 20\%$)

Na Tabela 19 e Tabela 20 estão dispostos os resultados obtidos para os casos com aplicação do Elitismo tipo 2 com probabilidade igual a 20%.

Na estimativa inicial o Caso 18 apontou erroneamente o nó 7, e o Caso 23 o nó 6, como localização mais provável para o vazamento. O caso em que foi aplicado o Elitismo tipo 2 ($P_e = 20\%$) foi o único que detectou corretamente o vazamento no nó 7 na estimativa final, apresentando resultado com IALV igual a 100% e IA igual a 99,95%. Os demais casos também mostraram resultados satisfatórios com IALV de 100% e IA todos acima de 99,8%.

A configuração da seleção do Elitismo 2 faz com que a melhor solução seja encontrada mais rapidamente em comparação com o Elitismo 1. A melhor solução de cada caso

analisado nesse tópico foi encontrada entre a geração 4 e 7, enquanto que no Elitismo 1, analisado nos tópicos anteriores, a melhor solução foi encontrada entre as gerações 8 e 10.

No Gráfico 24 é possível visualizar melhor a diferença entre o coeficiente C_{DAV} real e o estimado em cada caso.

Tabela 19 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).

Nó de vazamento	Caso	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	3	0.000246	0,000016	0,33	33,72	6,51	108,26
3	28	0.000305	0,000134	2,19	35,36	43,87	113,33
4	13	0.000378	0,000275	3,64	47,30	72,73	107,56
6	18	0.000251	0,000009	0,18	2,30	3,59	107,67
7	23	0.000270	0,000002	0,04	1,27	0,74	109,40
8	8	0.000411	0,000368	4,48	72,14	89,59	107,79

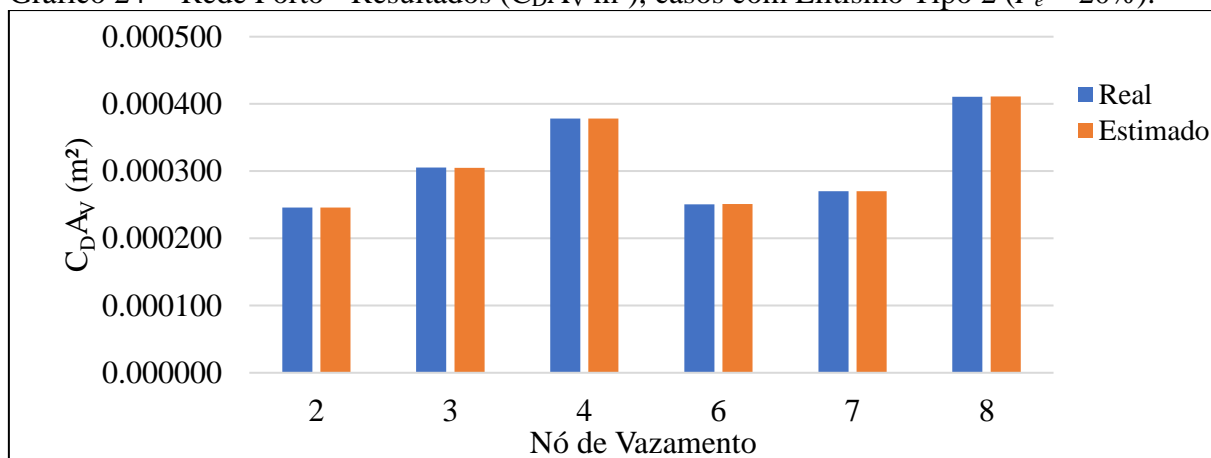
Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 20 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).

Nó de vazament o	Caso	Geração da solução ótima	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	3	6	0,000246	0,000246	5,005	100	99,90	108,26
3	28	7	0,000305	0,000305	4,993	100	99,85	113,33
4	13	7	0,000378	0,000378	4,998	100	99,97	107,56
6	18	5	0,000251	0,000251	5,006	100	99,89	107,67
7	23	5	0,000270	0,000270	4,998	100	99,95	109,40
8	8	4	0,000411	0,000411	5,003	100	99,95	107,79

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 24 - Rede Porto - Resultados (C_{DAV} m²), casos com Elitismo Tipo 2 ($P_e = 20\%$).



Fonte: elaborada pela autora.

7.1.7 Análise das simulações dos casos com Elitismo 2 ($P_e = 80\%$)

Na Tabela 21 e Tabela 22 estão dispostos os resultados obtidos para os casos com aplicação do Elitismo tipo 2 com probabilidade igual a 80%.

Na estimativa inicial o Caso 25, em que o vazamento real ocorre no nó 7, apontou erroneamente o nó 6 como localização mais provável para o vazamento. O MTI-AG não conseguiu identificar a posição correta da vazão vazada, o resultado final continuou apontando o nó 6 como local do vazamento, com IA de 60,21%. Mesmo resultado obtido nos casos 21 (sem Elitismo) e 22 (Elitismo 1 – 20%) e 23 (Elitismo 1 – 80%), analisados nos tópicos anteriores.

Os resultados encontrados nas simulações com o Elitismo tipo 2 com taxa de 80% mostraram uma convergência prematura, pois a maioria dos casos encontrou a melhor solução entre as gerações 1 e 3, mas esse fato não prejudicou a eficiência dos resultados. O resultado mais preciso ocorreu no nó 2, que fica próxima ao reservatório.

No Gráfico 25 é possível visualizar melhor a diferença entre o coeficiente C_{DA} real e o estimado em cada caso.

Tabela 21 - Quadro Resumo (Rede Porto) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).

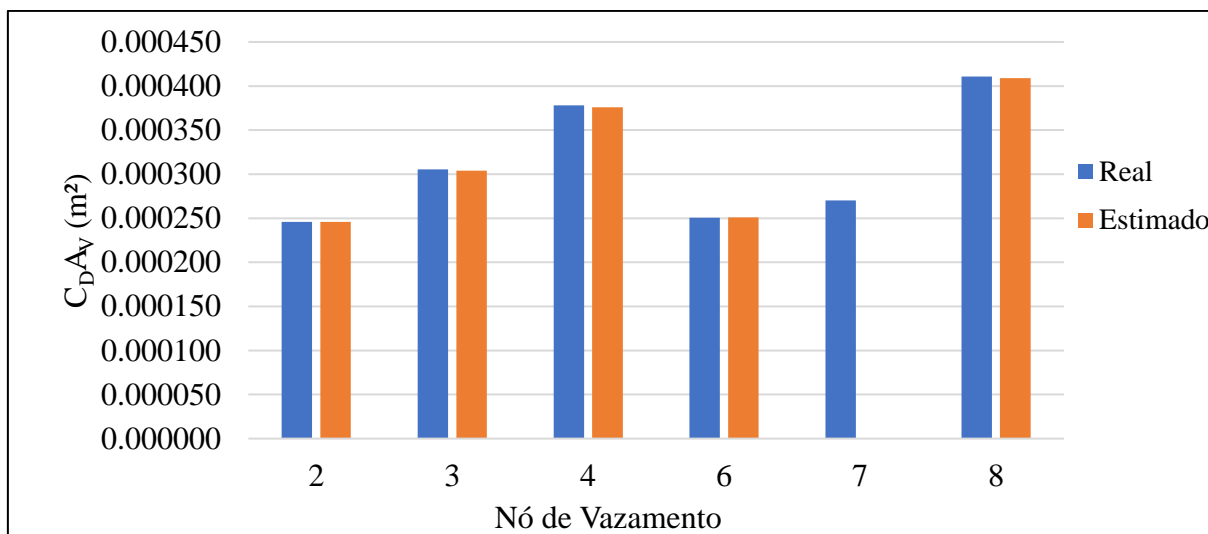
Nó de vazamento	Caso	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	5	0,000246	0,000020	0,41	47,29	8,14	106,77
3	30	0,000305	0,000304	4,98	44,28	99,53	106,76
4	15	0,000378	0,000332	4,39	69,22	87,80	112,97
6	20	0,000251	0,000081	1,62	29,94	32,31	110,61
7	25	0,000270	0,000270	0,00	0,63	0,37	107,61
8	10	0,000411	0,000312	3,80	28,78	75,95	109,31

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 22 - Quadro Resumo (Rede Porto) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	$C_{DAV}(\text{real})$ (m ²)	$C_{DAV}(\text{estimado})$ (m ²)	$Q_V(\text{estimado})$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	5	2	0,000246	0,000246	5,005	100,00	99,90	106,77
3	30	3	0,000305	0,000304	4,976	100,00	99,53	106,76
4	15	1	0,000378	0,000376	4,972	100,00	99,44	112,97
6	20	8	0,000251	0,000251	5,006	100,00	99,89	110,61
7	25	9	0,000270	0,000000	0,000	0,00	0,00	107,61
8	10	2	0,000411	0,000409	4,978	100,00	99,57	109,31

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 25 – Rede Porto - Resultados (C_{DAV} m²), casos com Elitismo Tipo 2 ($P_e = 80\%$).

Fonte: elaborada pela autora.

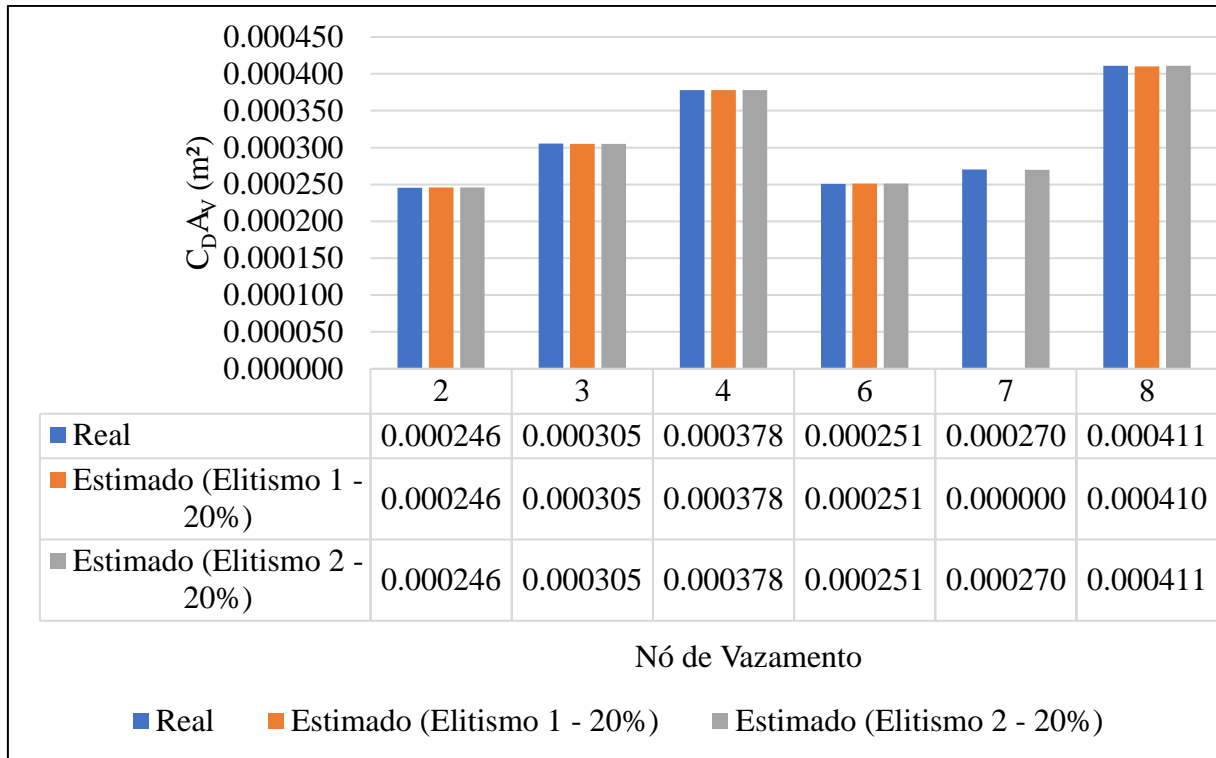
7.1.8 Comparação entre resultados: Elitismo 1 x Elitismo 2

O Elitismo 2 gera uma população de filhos completamente a partir dos melhores pais, por isso uma alta taxa desse tipo de elitismo pode comprometer a diversidade da população de soluções, acarretando na convergência prematura ou a estagnação dos resultados, levando a encontrar um máximo local e não global. Mesmo assim, o Elitismo 2 com p_e igual a 20% ainda mostrou resultados com eficiência superior ao Elitismo 1 com p_e igual a 20%. Já o Elitismo 2 com p_e igual a 80% apresentou resultados menos satisfatórios do que com o Elitismo 1 com p_e igual a 80%.

O Elitismo 1 possui maior diversidade na população de indivíduos soluções, enquanto o Elitismo 2 preserva mais a características dos melhores cromossomos pais, reduzindo a diversidade populacional. Desta forma, observou-se que o Elitismo 2 encontra a melhor solução mais rápido do que o Elitismo 1, mas altas taxas daquele tipo de elitismo reduz a eficiência do AG, uma vez que encontra prematuramente o resultado, convergindo para uma solução local e não a ótima global.

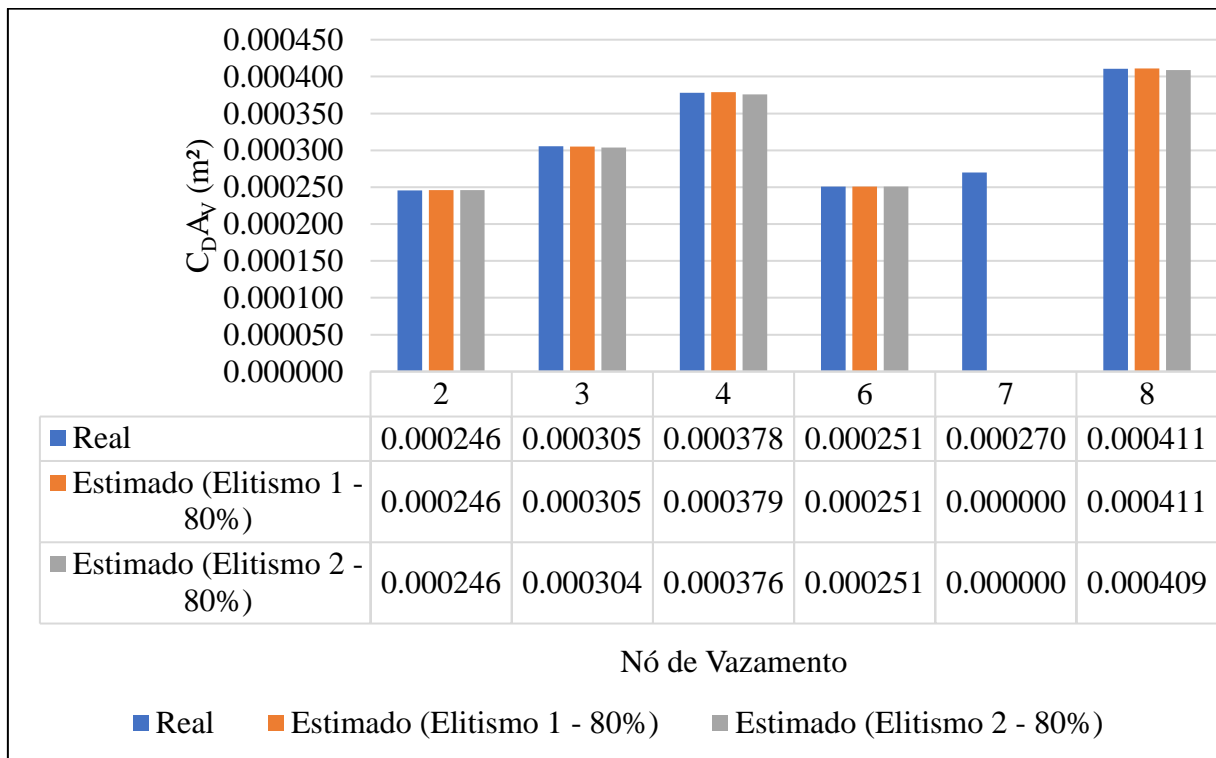
O Gráfico 26 compra os resultados do Elitismo 1 (20%) com o Elitismo 2 (20%) e o Gráfico 27 compra os resultados do Elitismo 1 (80%) com o Elitismo 2 (80%).

Gráfico 26 - Comparação Elitismo 1 (20%) x Elitismo 2 (20%) - Rede Porto.



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 27 - Comparação Elitismo 1 (80%) x Elitismo 2 (80%) - Rede Porto.



Fonte: elaborada pela autora.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho apresentou uma análise do operador Elitismo, em busca da melhor forma de aplicação desse método. O AG com e sem elitismo foi empregado na calibração e detecção de vazamentos em uma rede de distribuição de água no escoamento transitório. Além do AG sem a estratégia elitista ($P_e = 0\%$), foram avaliados dois tipos de Elitismo, que divergem em relação à escolha dos indivíduos que irão compor a população de parâmetros de uma geração para a seguinte. Cada um dos dois tipos analisados foi ainda aplicado com duas taxas diferentes: $P_e = 20\%$ e $P_e = 80\%$.

No Elitismo 1 Selecionam-se os melhores indivíduos do ordenamento crescente da aptidão (FO) de maneira a formar uma população de $P_e \times NC$ indivíduos, posteriormente, forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos dentro do intervalo de busca determinado inicialmente. No Elitismo 2 os primeiros indivíduos são escolhidos da mesma forma, proporcional à aptidão ($P_e \times NC$), posteriormente, forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos dentre os melhores que compõem a população de pais.

O AG utilizado neste trabalho foi adequado ao problema proposto, proporcionando resultados satisfatórios. A codificação e os operadores seleção com elitismo, cruzamento e mutação foram aplicados com sucesso. O comportamento transiente foi imposto por uma manobra de válvula. As condições iniciais de regime permanente foram calculadas por programas computacionais para todas as situações específicas.

Os resultados mostraram que o Elitismo 2 (20%) apresentou melhores resultados do que o Elitismo 1 (20%), já no Elitismo 1 (80%) os resultados conseguiram obter uma melhor calibração do que no Elitismo 2 (80%). Elitismo 1 possui maior diversidade na população de indivíduos, fazendo com que mesmo uma alta taxa elitista não ocorra a convergência prematura nem a estagnação dos resultados. No entanto, o Elitismo 2 preserva mais as melhores características dos cromossomos pais, desta forma a solução ótima é encontrada mais rápido do que no Elitismo 1, entretanto uma alta probabilidade elitista para esse tipo faz com que a população seja comprometida com superindivíduos das gerações passadas, levando a convergência prematura e a calibração acaba encontrando um ótimo local e não global. Os casos sem elitismo mostram bons resultados, levantando a questão se a estratégia elitista traz melhorias significativas nos resultados da calibração. Entretanto para o vazamento localizado no nó 8 o IA sem elitismo foi quase 4% inferior em relação aos resultados com elitismo.

Nas análises em que o nó 7 apresenta o vazamento, somente o Elitismo tipo 2 com P_e igual a 20% conseguiu identificar e quantificar corretamente o vazamento. Os demais casos, apontaram o nó 6, vizinho ao nó 7 e mais próximo do nó monitorado, como a possível localização da vazão vazada. Essa incapacidade de encontrar a correta localização não apresenta causas definidas, podendo ter sido gerada por uma série de fatores. A literatura aponta que os maiores desvios entre as pressões observadas e calculadas ocorreram na condição de maiores vazões. O nó 7 está localizado entre os trechos que apresentam as vazões mais elevadas, depois da vazão originada do reservatório, essa pode ser uma das causas do erro na identificação do vazamento. Entretanto, uma vez que o nó apontado está posicionado vizinho ao nó real já mostra o alto potencial do método.

Conclui-se ao comparar os resultados com diferentes tipos e taxas do operador Elitismo do modelo MTI-AG no cálculo da quantificação de vazamentos em redes de água, que o Elitismo tipo 2, com probabilidade elitista de 20% forma a melhor configuração do modelo MTI-AG na calibração e detecção de vazamentos em redes de distribuição de água. Taxas maiores podem ser testadas, aumentando-se as probabilidades de Mutação para garantir a diversidade populacional.

Pôde-se observar na avaliação da influência da posição do nó onde ocorre o vazamento no desempenho do modelo MTI-AG que independente do Elitismo, os melhores resultados ocorreram no nó próximo do reservatório e nos nós vizinhos ao nó monitorado. Os nós próximos ao local de ocorrência do transiente fornecem registros de dados que conduzem às estimativas de maior qualidade dos parâmetros sob calibração.

A pesquisa mostra como o Elitismo pode comprometer a diversidade da população de soluções e diminuir a eficiência dos resultados, fazendo o método convergir por uma solução local, problema denominado de convergência prematura ou estagnação dos indivíduos da população de soluções. Desta forma, este estudo direciona para a melhor forma de aplicação do método de calibração de redes de água com Algoritmos Genéticos e estratégia elitista.

Uma rede hidráulica hipotética simples com uma válvula de controle foi usada para o projeto. Embora uma rede simples tenha sido considerada neste trabalho para demonstrar em detalhe um procedimento para a formulação de um algoritmo de solução do problema inverso, presume-se que o mesmo procedimento possa ser usado para a calibração de redes mais complexas. Por fim, recomenda-se que os modelos desenvolvidos neste trabalho sejam aplicados a sistemas de abastecimento reais.

Existem ainda outras questões a serem investigadas:

- a) Análise com mais de um nó monitorado ao mesmo tempo;
- b) Avaliar mais de um vazamento ocorrendo ao mesmo tempo na rede;
- c) A identificação de vazamentos que ocorrem no interior das tubulações de formas e dimensões variadas.
- d) O efeito de outros tipos de eventos transientes na identificação dos parâmetros tais como partida e parada de bombas e variação temporal da demanda.

REFERÊNCIAS

- AHADI, M.; BAKHTIAR, M. S. Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to Acoustic Emission signals. **Applied Acoustics**, n. 71, p. 634–639, 2010.
- ALVISI, S.; FRANCHINI, M. Pipe roughness calibration in water distribution systems using grey numbers. **Journal of Hydroinformatics**, Ferrara, v. 12, n. 4, p. 424–445, out. 2010.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicada à escoamento transiente**. 2003. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H. Calibração de Redes Hidráulicas com Dados Transientes de Precisão Variável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 55-66, 2004.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.
- BERGLUND, A.; ARETI, V. S.; BRILL, D.; MAHINTHAKUMAR, G. K. Successive Linear Approximation Methods for Leak Detection in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 8, 2017.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p.
- BRUNONE, B. Transient Test-Based Technique for Leak Detection in Outfall Pipes. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 125, n. 5, p. 302-306, set/out. 1999.
- BRUNONE, B.; FERRANTE, M.; UBERTINI, L. Leak Analysis in Pipes Using Transients. Annual Seminar on Comparative Urban Projects, 2., Roma, 2000. **Anais...** Roma, 2000.
- CHAUDHRY, M. H. - **Applied hydraulic transients**. 3. ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- CHENG, W.; HE, Z. Calibration of nodal demand in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 137, n. 1, p. 31–40, fev. 2011.
- CORTÉS, P.; GARCÍA, J. M.; LARRAÑETA, J.; ONIEVA, L. Viral systems: a new bioinspired optimisation approach, **Computers & Operations Research**, v. 35 (9), p. 2840–2860, (2008).
- COSTA, L.; OLIVEIRA, P. An adaptive sharing elitist evolution strategy for multiobjective optimization, **Evolutionary Computation** 11, v. 4, p. 417–438, 2003.
- COVAS, D. I. C. **Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems Modelling Special Dynamic Effects**. 2003. Tese (Doutorado) -

Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 2003.

COVAS, D.; RAMOS, H.; BRUNONE, B.; YOUNG, A. Leak Detection in Water Trunk Mains using Transient Pressure Signals: Field Tests in Scottish Water. *In: International Conference on Pressure Surges*, 9., 2004, Chester. **Anais...** Chester, 2004, p. 185-198.

DEJONG, K. **The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems**. 1975. Tese (Doutorado) - University of Michigan, 1975.

DINI, M.; TABESH, M. A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems. **Water Resour Manage**, Tehran, v. 28, p. 2021–2034, mar. 2014.

DO, N. C.; SIMPSON, A. R.; DEUERLEIN, J. W.; PILLER, O. Calibration of water demand multipliers in water distribution systems using Genetic Algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 11, nov. 2016.

DUAN, H. F. Uncertainty Analysis of Transient Flow Modeling and Transient-Based Leak Detection in Elastic Water Pipeline Systems. **Water Resour Manage**, v. 29, p. 5413-5427, 2015.

ESHELMAN, L. J. The CHC adaptive search algorithm: how to have safe search when engaging in nontraditional genetic recombination. *In: Proceedings of the First Workshop on Foundations of Genetic Algorithms*, Indiana, 1991. **Anais...** Indiana, USA, 1991, p. 265–283.

FERRANTE, M.; BRUNONE, B. Pipe System Diagnosis and Leak Detection by Unsteady-State Tests. 2. Wavelet Analysis. **Advances in Water Resources**, v. 26, n. 1, p. 107-116, 2003.

GAMBALE, S. R. **Aplicação de Algoritmo Genético na Calibração de Redes de Água**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. 1. ed. Addison-Wesley Professional, 1989. 432 p.

GRIEBENOW, G.; MEARS, M. Leak Detection Implementation: Modeling and Tuning Methods. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 111, n. 2, p. 66-71, jun. 1989.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Bradford Books Usa, 1975. 232 p.

JOWITT, P. W.; XU, C. Optimal valve control in water-distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, v. 116, n. 4, p. 455-472, 1990.

JUNG, B.S.; KARNEY, B.W. Systematic exploration of pipeline network calibration using transientes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 46, n. 1, p. 129–137, 2008.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Hybrid GA for Calibration of Water Distribution Hydraulic Models. *In: Conference on Water Resources Planning and Management, 2002, Virginia. Anais...* Virginia: American Society of Civil Engineers, 2002.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Hybrid Inverse Transient Model for Leakage Detection and Roughness Calibration in Pipe Networks. **Journal of Hydraulic Research**, v. 41, n. 5, p. 481-492, 2003.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Incorporation of Prior Information on Parameters in Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Roughness Calibration. **Urban Water Journal**, v. 1, n. 2, p. 129-143, 2004.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. **Journal of Hydraulic Research**, v. 41, n. 5, p. 481-492, 2010.

LEE, P. J.; VÍTKOVSKÝ, J. P.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; LIGGETT, J. A. Leak Detection in Pipelines Using an Inverse Resonance Method. *In: Conference on Water Resources Planning and Management, 2002, Virginia. Anais...* Virginia: American Society of Civil Engineers, 2002.

LI, J.P.; BALAZS M. E.; PARKS, G. T.; GLARKSON P. J. A species conserving genetic algorithms for multimodal function optimization. **Evolutionary Computation**, v. 10, n. 3, p. 207–234, 2002.

LI, S.; SONG, Y.; ZHOU, G. Leak detection of water distribution pipeline subject to failure of socket joint based on acoustic emission and pattern recognition. **Measurement**, v. 115, p. 39–44, 2018.

LIANG, Y.; LEUNG, K-S. Genetic Algorithm with adaptive elitist-population strategies for multimodal function optimization. **Applied Soft Computing**, v. 11, p. 2017–2034, 2011.

LIGGETT, J. A.; CHEN, L. C. Inverse transient analysis in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 120, n. 8, p. 934-955, 1994.

LIYOU, J. C. P. Mass Imbalance Error of Water Hammer Equations and Leak Detection. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, n. 1, p. 103-109, mar. 1994.

LIYOU, J. C. P. Pipeline Leak Detection by Impulse Response Extraction. **Journal of Fluids Engineering**, v. 120, n. 4, p. 833-838, dec. 1998.

LIYOU, J. C. P.; TIAN, J. Leak Detection-Transient Flow Simulation Approaches. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 117, n. 3, p. 243-248, set. 1995.

MAHFOUD, S.W. Crowding and Preselection Revisited. **Parallel Problem Solving From Nature**, Amsterdam, v. 2, p. 27-36, 1992.

- MARTINI A.; TRONCOSSI, M.; RIVOLA, A. Leak detection in water-filled small-diameter polyethylene pipes by means of acoustic emission measurements. **Applied Sciences**, v. 7, 2016.
- MASHFORD, J.; SILVA, D. DE; BURN, S.; MARNEY, D. Leak Detection in Simulated Water Pipe Networks Using SVM. **Applied Artificial Intelligence**, v. 26, p. 429–444, 2012.
- MEIRELLES, G.; MANZI, D.; BRENTAN, B.; GOULART, T.; LUVIZOTTO JÚNIOR, E. Calibration Model for Water Distribution Network Using Pressures Estimated by Artificial Neural Networks. **Water Resour Manage**, v. 31, p. 4339–4351, 2017.
- MOSER, G.; PAAL, S. G.; SMITH, I. F. C. Leak Detection of Water Supply Networks Using Error-Domain Model Falsification. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 32, n. 2, 2018.
- MPESHA, W.; GASSMAN, S. L.; CHAUDHRY, M. H. Leak Detection in Pipes by Frequency Response Method. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 127, n. 2, p. 134-147, fev. 2001.
- NAYEEM, M. A.; RAHMAN, M. K.; RAHMAN, M. S. Transit network design by genetic algorithm with elitism. **Transportation Research Part C**, v. 46, p. 25-45, set. 2014.
- NAZIF, S.; KARAMOUZ, M.; TABESH, M.; MORIDI, A. Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks. **Water Resour Manage**, v. 24, n. 3, p. 437–458, 2010.
- ORMSBEE, L. E. Implicit network calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, n. 2, p. 243-257, mar. 1989.
- PETROWSKI, A. A Clearing procedure as a niching method for genetic algorithms. *In*: Conf. on Evolutionary Computation, Nagoya, 1996. **Anais...** Japan, 1996, p. 798–803.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos USP, 1998. 540 p.
- PUDAR, R. S.; LIGGETT, J. A. Leaks in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 118, n. 7, p. 1031-1046, 1992.
- RAJESWARAN, A.; NARASIMHAN, Sridharakumar, S. NARASIMHAN, S. A graph partitioning algorithm for leak detection in water distribution networks. **Computers and Chemical Engineering**, v. 108, p. 11–23, 2018.
- RECHENBERG, I. Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem. **Royal Aircraft Establishment, Library Translation**, Farnborough, 1965.
- REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 6, p. 317-326, 1997.

SANTOS, A. C. N.; SILVA, F. G. B. Estudo de calibração de Rugosidade em Rede de Distribuição de Água do Bairro Jardim América - MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.18, n.3, p. 261-269, 2013.

SOARES, A. K. **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório**. 2007. 336 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SOREMEKUN, G.; GURDAL, Z.; HAFTKA, R. T.; WATSON, L.T. Composite laminate design optimization by genetic algorithm with generalized elitist selection. **Computers and Structures**, v. 79, p. 131-143, 2001.

STOIANOV, I.; KARNEY, B. W.; COVAS, D.; MAKSIMOVIC, C.; GRAHAM, N. Wavelet Processing of Transient Signals for Pipeline Leak Location and Quantification. *In: Conference on Water Resources Planning and Management, 2002, Virginia. Anais...* Virginia: American Society of Civil Engineers, 2002.

VASCONCELOS, G. C. M. P. DE; COSTA, B. C. A.; e ARAÚJO, J. K. Identificação do Fator de Atrito em Rede de Distribuição de Água por meio do Método do Transiente Inverso - Algoritmo Genético (MTI-AG) e Fórmula de Swamee. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 980 – 990, out./dez. 2015.

VÍTKOVSKÝ, J. P. **Inverse Analysis and Modelling of Unsteady Pipe Flow: Theory, Applications and Experimental Verification**. Tese (Doutorado) - Department of Civil and Environmental Engineering, Adelaide University, Australia, 2001.

VITKOVSKY, J. P.; LIGGETT, J. A.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Optimal Measurement Site Locations for Inverse Transient Analysis in Pipe Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 6, p. 480–492, nov. 2003.

VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Leak Detection and Calibration Using Transients and Genetic Algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 4, p. 262-265, 2000.

VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Minimization Algorithms and Experimental Inverse Transient Leak Detection. *In: Conference on Water Resources Planning and Management, 2002, Virginia. Anais...* Virginia: American Society of Civil Engineers, 2002.

WALSKI, T. M. Technique for calibration network models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.

WANG, X. J.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; LIGGETT, J. A.; VÍTKOVSKÝ, J. P. Leak Detection in Pipelines Using the Damping of Fluid Transients. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 7, p. 697-711, 2002.

WHITLEY, D. The Genitor algorithm and selection pressure: why rank-based allocation of reproductive trials is best. **Proceedings of the third international conference on Genetic algorithms**, San Francisco, p. 116–121, 1989.

- WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. **Fluid transients**. New York, McGraw-Hill, 1978, 384p.
- YU, Z.; TIAN, Y.; ZHENG, Y.; ZHAI, X. Calibration of pipe roughness coefficient based on manning formula and Genetic Algorithm. **Transactions of Tianjin University**, Tianjin, v. 15, p. 452-456, 2009.
- ZHANG, H.; WANG, L. Leak Detection in Water Distribution Systems Using Bayesian Theory and Fisher's Law. **Transactions of Tianjin University**, v. 17, p. 181-186, 2011.
- ZHANG, Q. B.; Wu, T. H.; LIU, B. A population-based incremental learning algorithm with elitist strategy. *In*: International Conference on Natural Computation, 3., 2007, Haikou. **Anais...** Haikou, 2007, p. 583-587.

APÊNDICE A – RESULTADOS GRUPOS 3, 4, 5 E 6 DA REDE PORTO

Grupo 3:

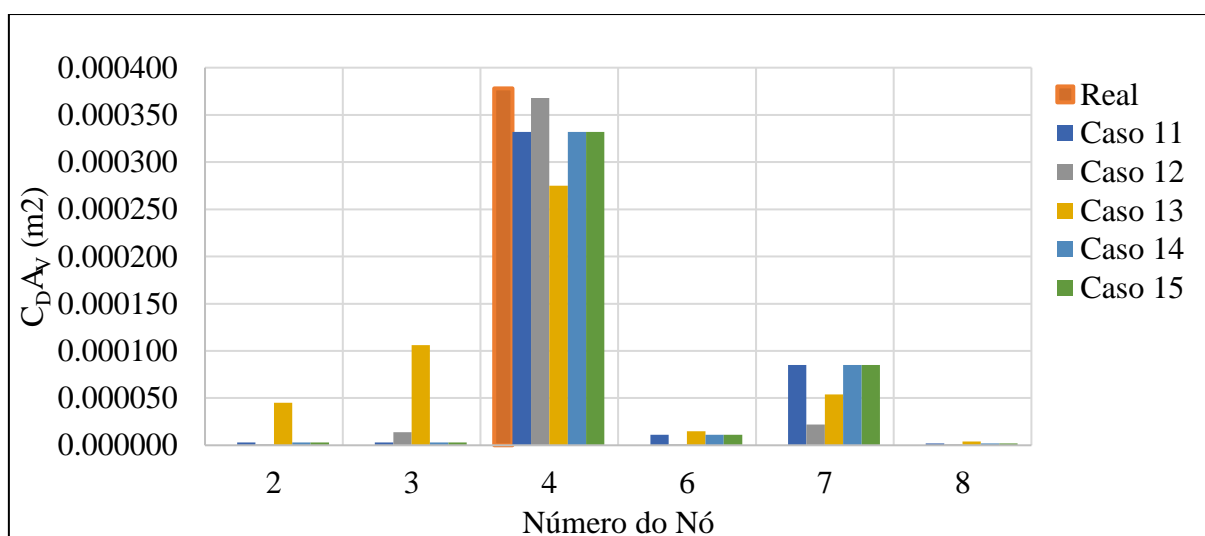
A condições iniciais para o Grupo 3 são as seguintes:

- Nó de vazamento: 4;
- Nó monitorado: 5;
- Número máximo de iterações (gerações): 10;
- População de soluções: 80;
- Probabilidade de Cruzamento: 60%;
- Probabilidade de Mutação: Variada $P_m = \frac{1}{NC \times NV}$

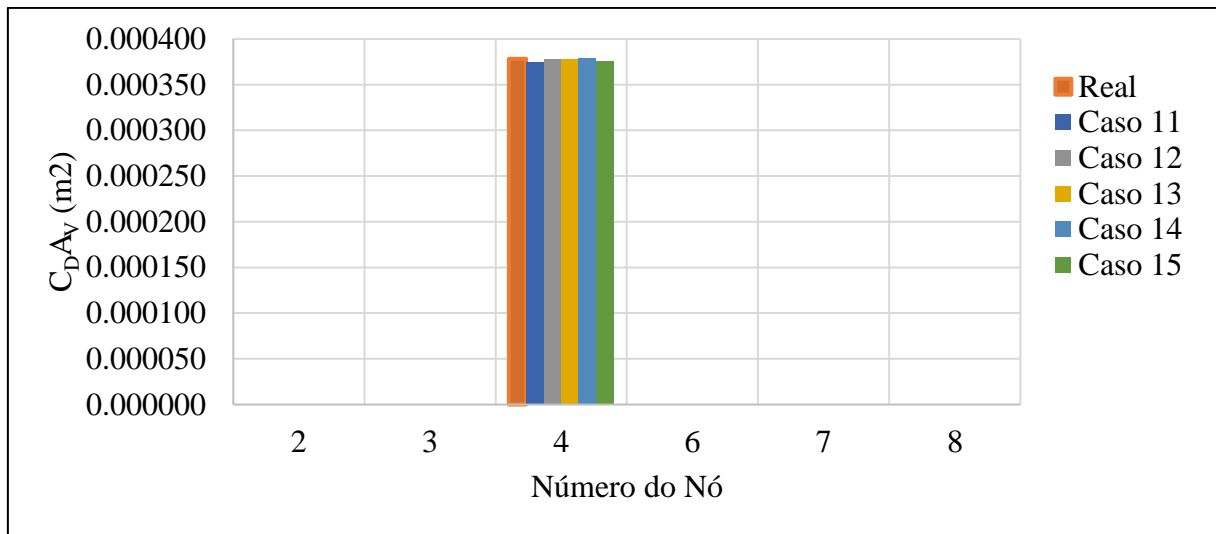
O Grupo 1 engloba os seguintes casos:

- Caso 11: Sem Elitismo, $p_e = 0\%$
- Caso 12: Elitismo 1, $p_e = 20\%$
- Caso 13: Elitismo 2, $p_e = 20\%$
- Caso 14: Elitismo 1, $p_e = 80\%$
- Caso 15: Elitismo 2, $p_e = 80\%$

Gráfico 28 - Estimação preliminar - melhor solução ($C_D A_v$ m²), Grupo 3.

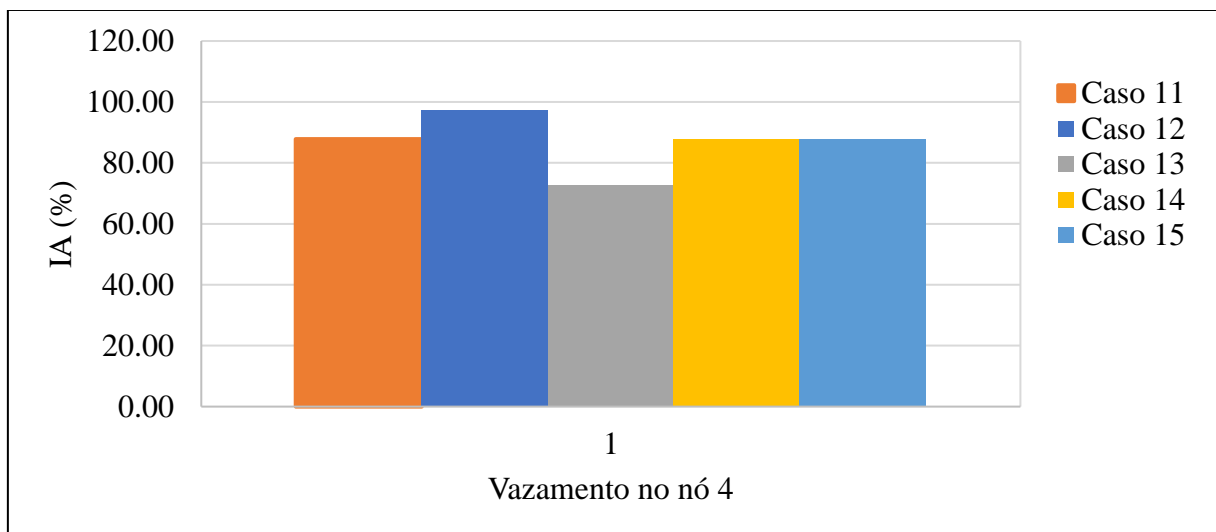


Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 29 - Estimação final - melhor solução (C_{DAV} m²), Grupo 3.

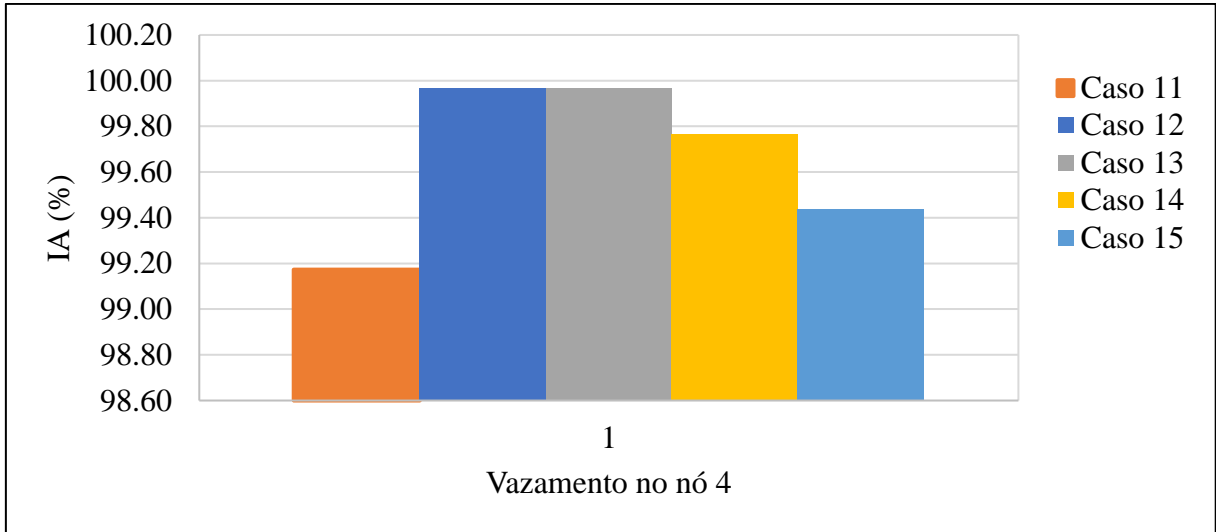
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 30 - Índice de Acerto, IA (%) - População Inicial, Grupo 3.



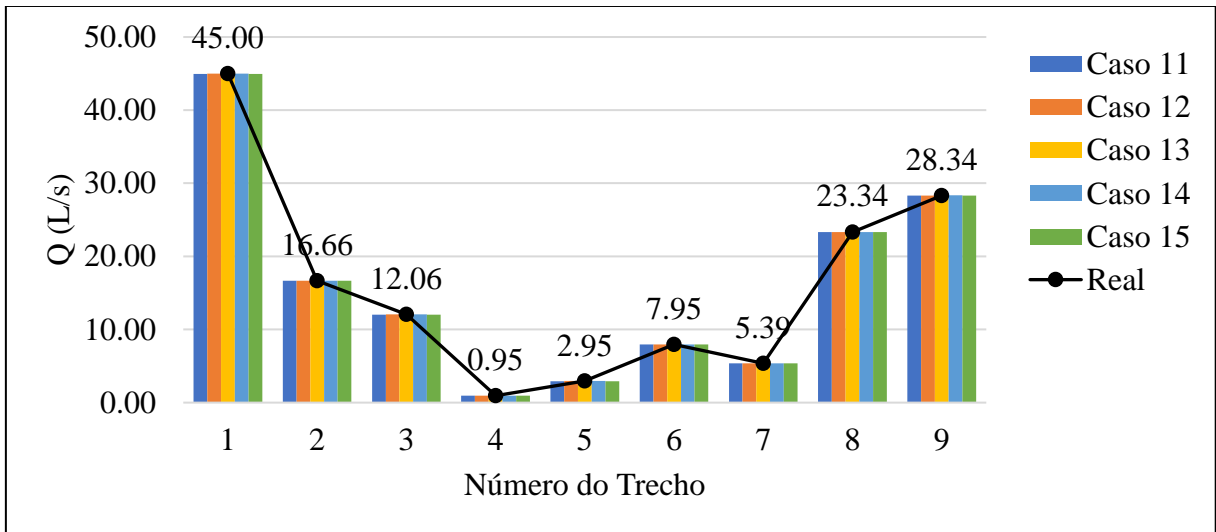
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 31 - Índice de Acerto, IA (%) - População Final, Grupo 3.



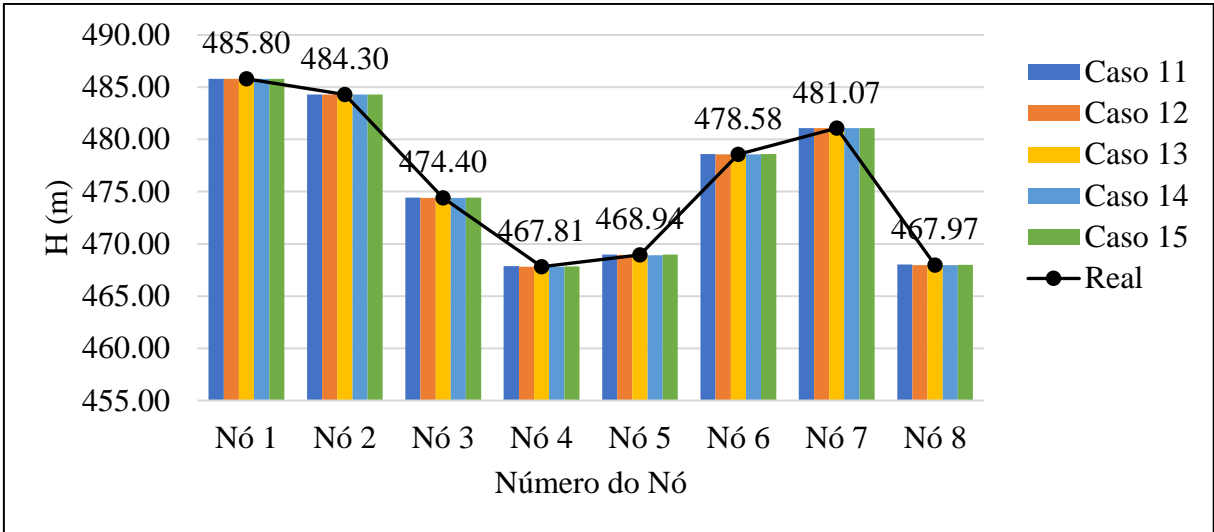
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 32 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 3.



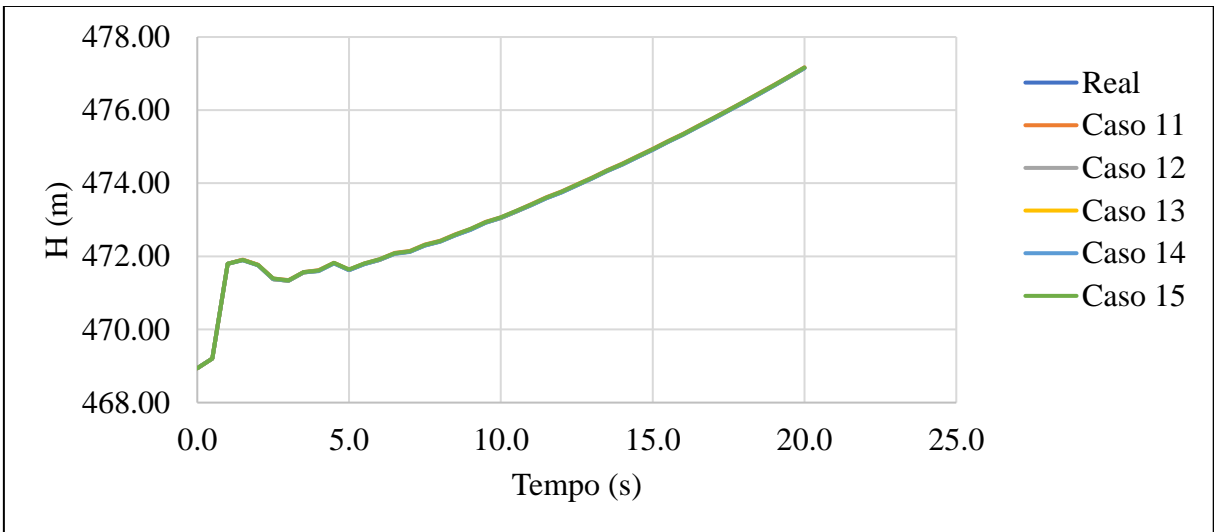
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 33 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 3.



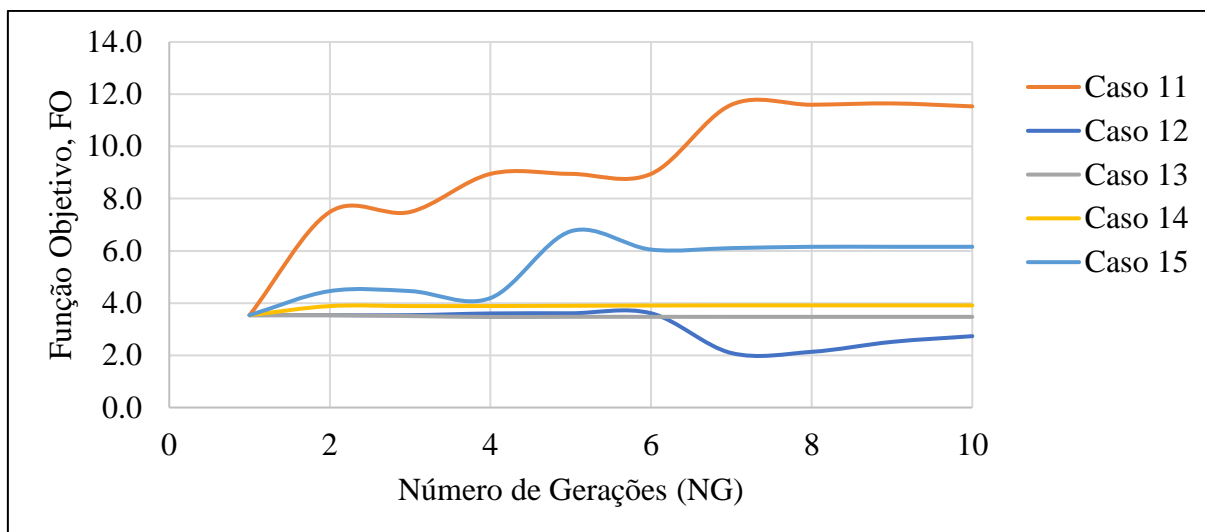
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 34 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 3.



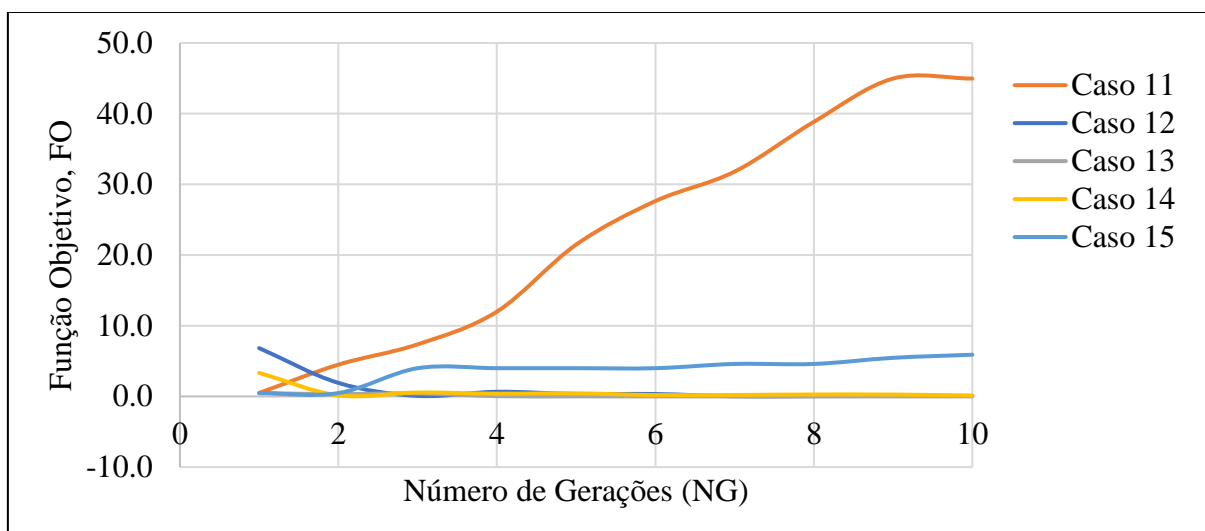
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 35 - Função Objetivo Inicial, Grupo 3.



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 36 - Função Objetivo Final, Grupo 3.



Fonte: elaborada pela autora.

Grupo 4:

A condições iniciais para o Grupo 4 são as seguintes:

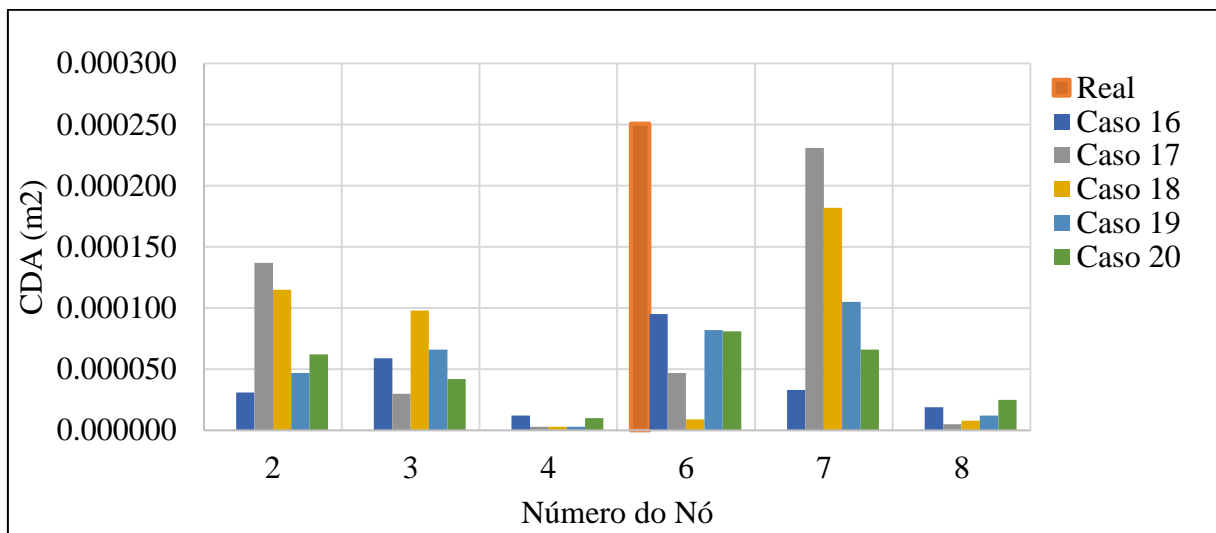
- Nó de vazamento: 6;
- Nó monitorado: 5;
- Número máximo de iterações (gerações): 10;
- População de soluções: 80;
- Probabilidade de Cruzamento: 60%;

- Probabilidade de Mutação: Variada $P_m = \frac{1}{NC \times NV}$

O Grupo 1 engloba os seguintes casos:

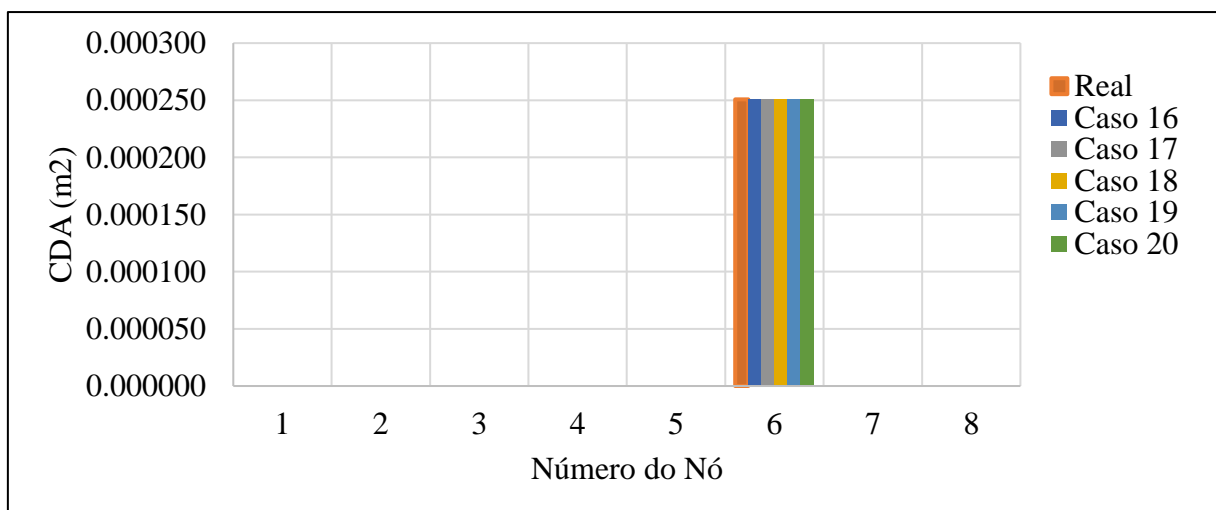
- Caso 16: Sem Elitismo, $p_e = 0\%$
- Caso 17: Elitismo 1, $p_e = 20\%$
- Caso 18: Elitismo 2, $p_e = 20\%$
- Caso 19: Elitismo 1, $p_e = 80\%$
- Caso 20: Elitismo 2, $p_e = 80\%$

Gráfico 37 - Estimação preliminar - melhor solução (CDA m²), Grupo 4.



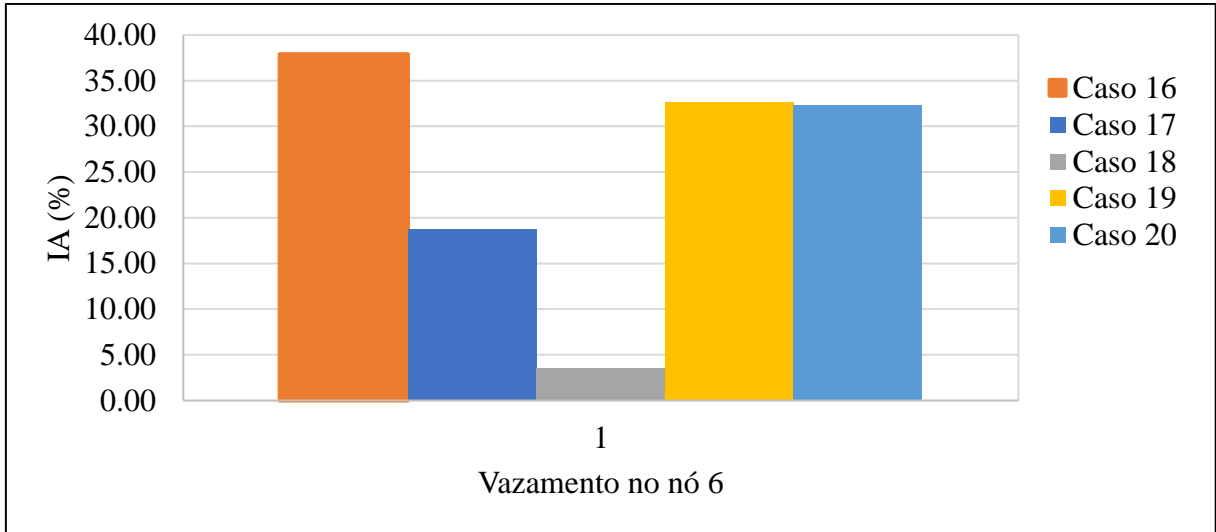
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 38 - Estimação final - melhor solução (CDA m²), Grupo 4.



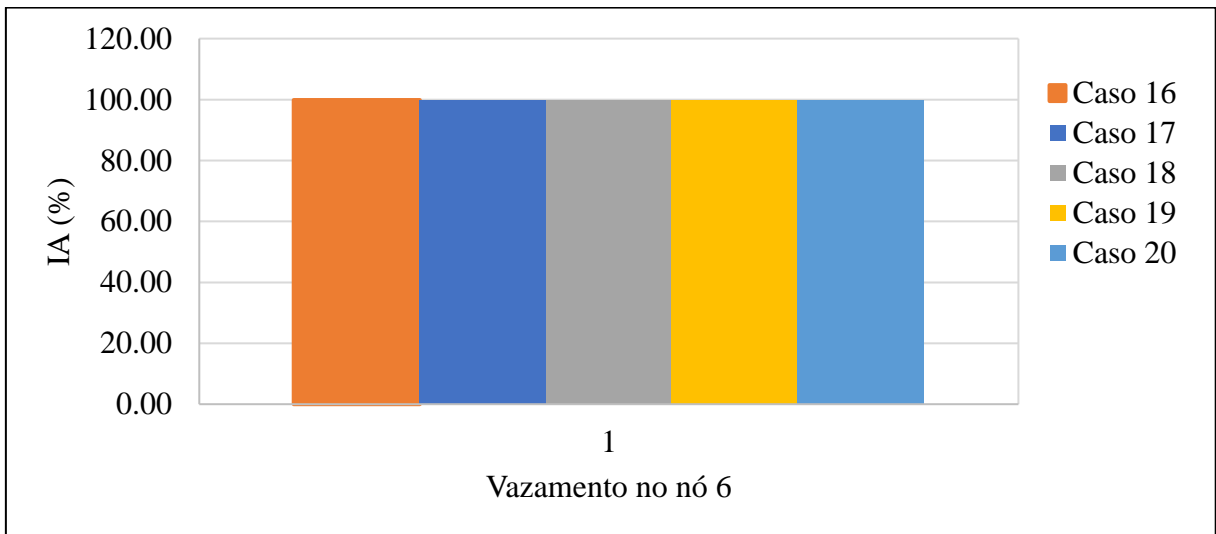
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 39 - Índice de Acerto, IA (%) - População Inicial, Grupo 4.



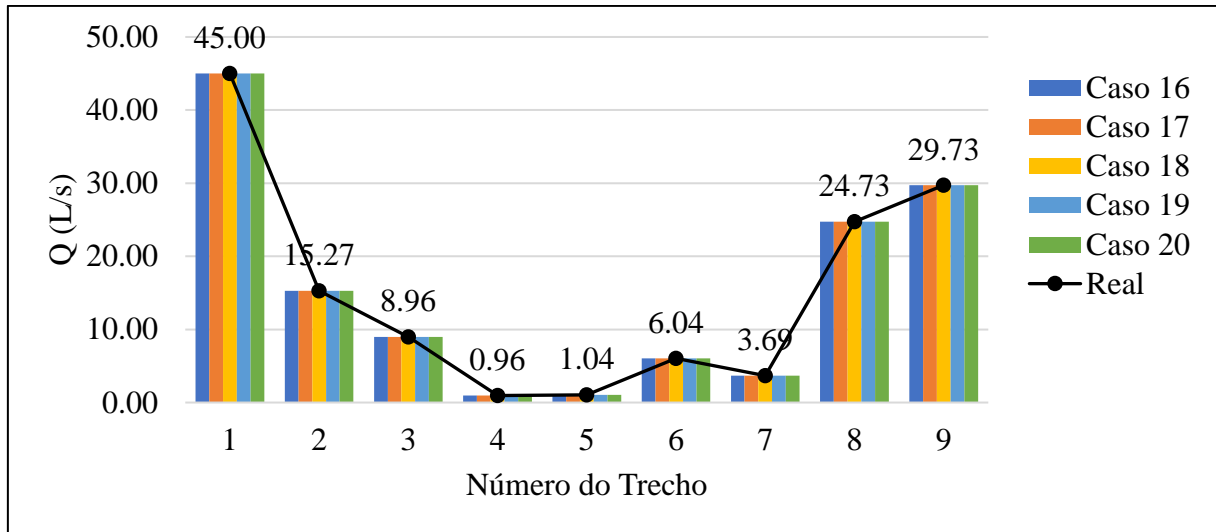
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 40 - Índice de Acerto, IA (%) - População Final, Grupo 4.



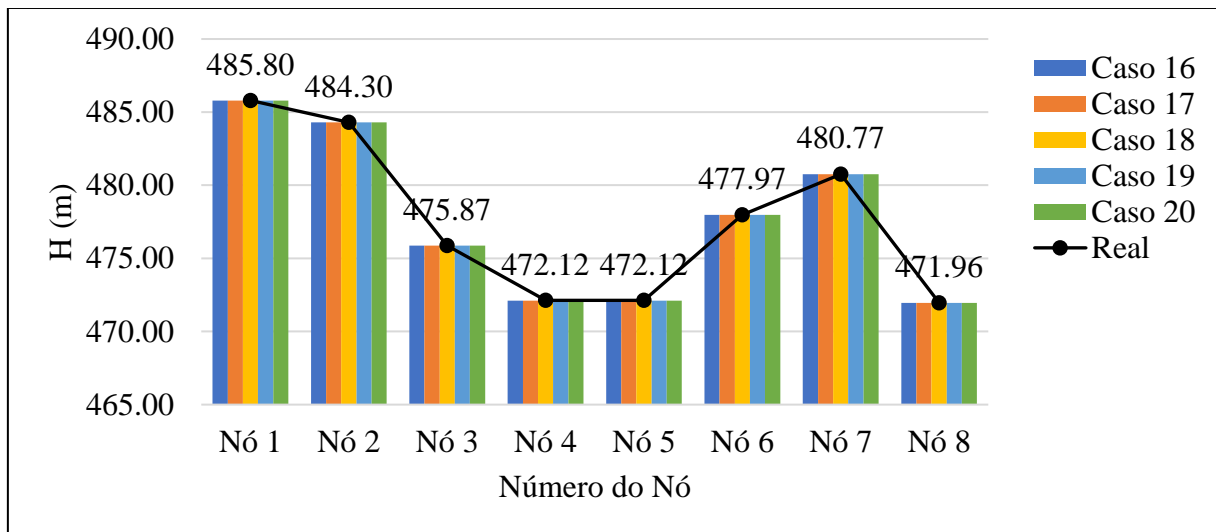
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 41 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 4.



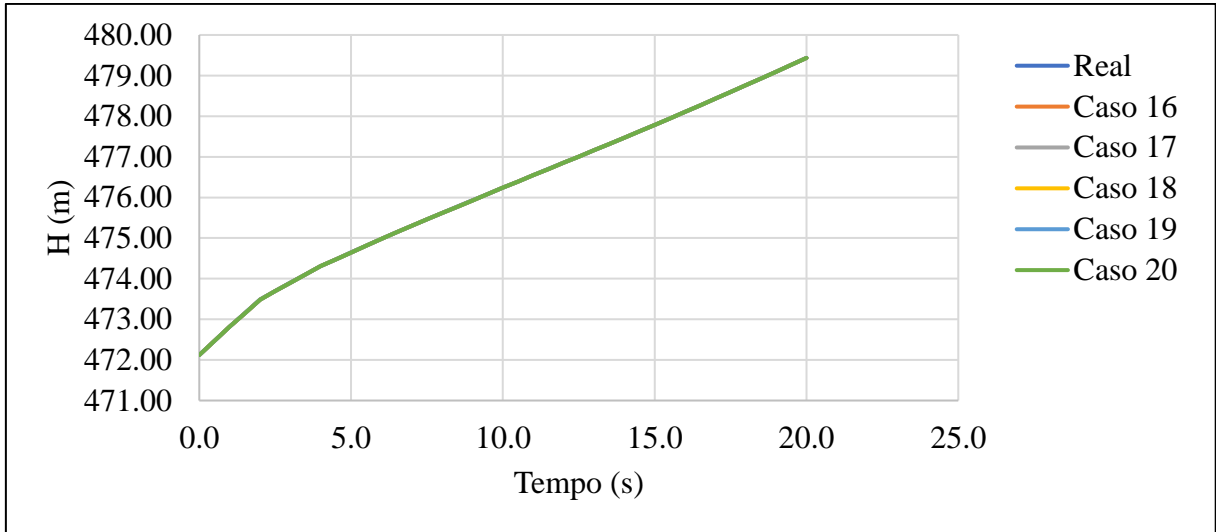
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 42 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 4.



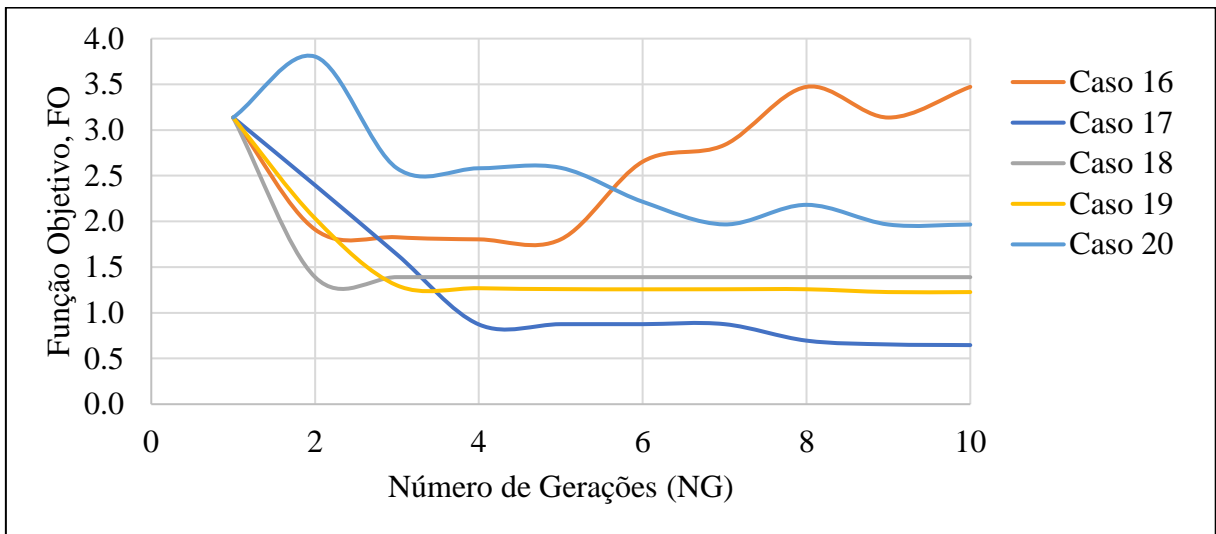
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 43 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 4.



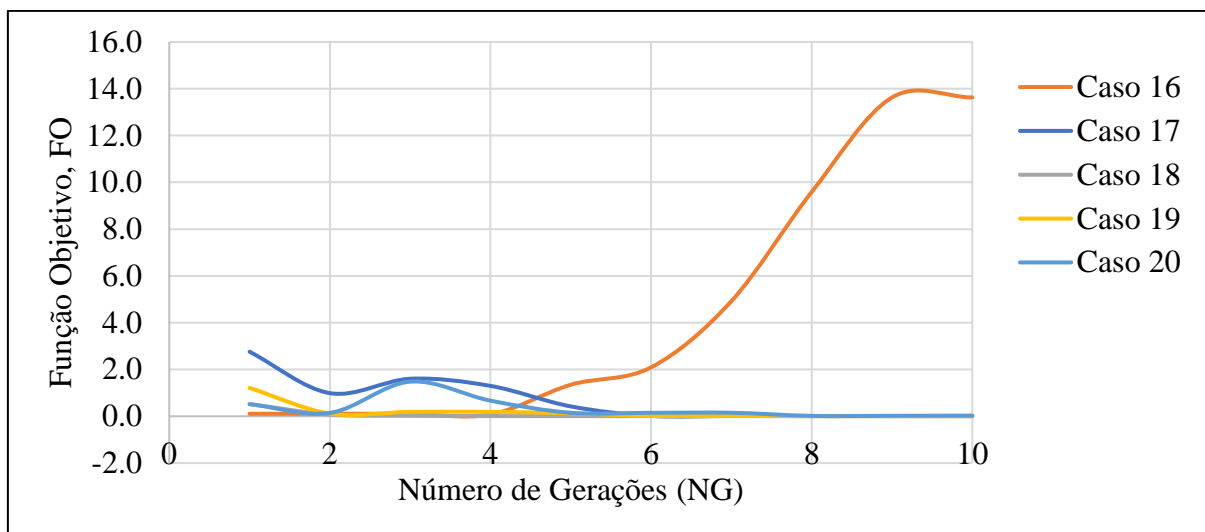
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 44 - Função Objetivo Inicial, Grupo 4.



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 45 - Função Objetivo Final, Grupo 4.



Fonte: elaborada pela autora.

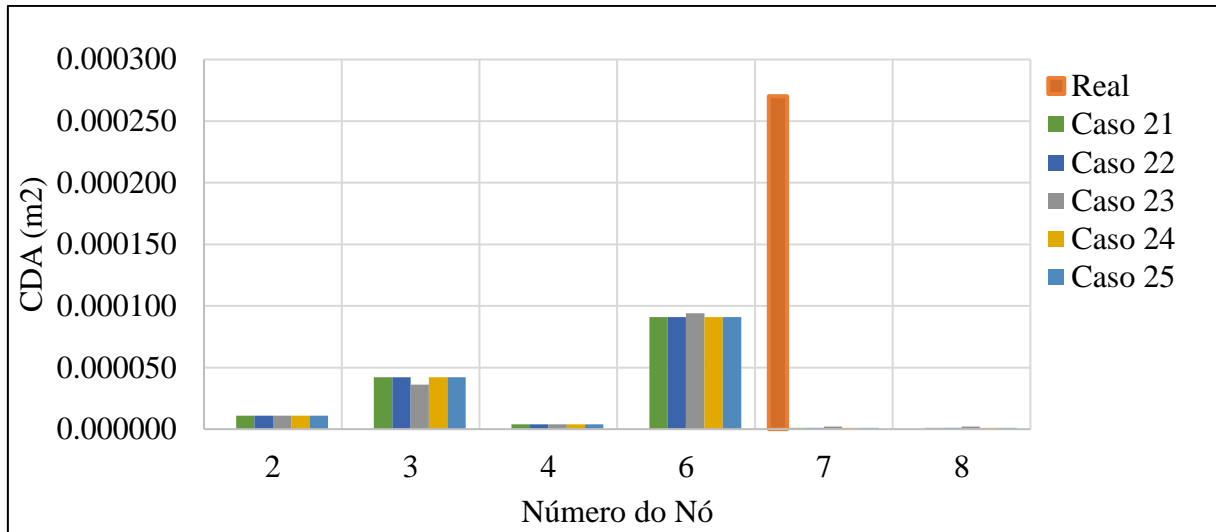
Grupo 5:

A condições iniciais para o Grupo 5 são as seguintes:

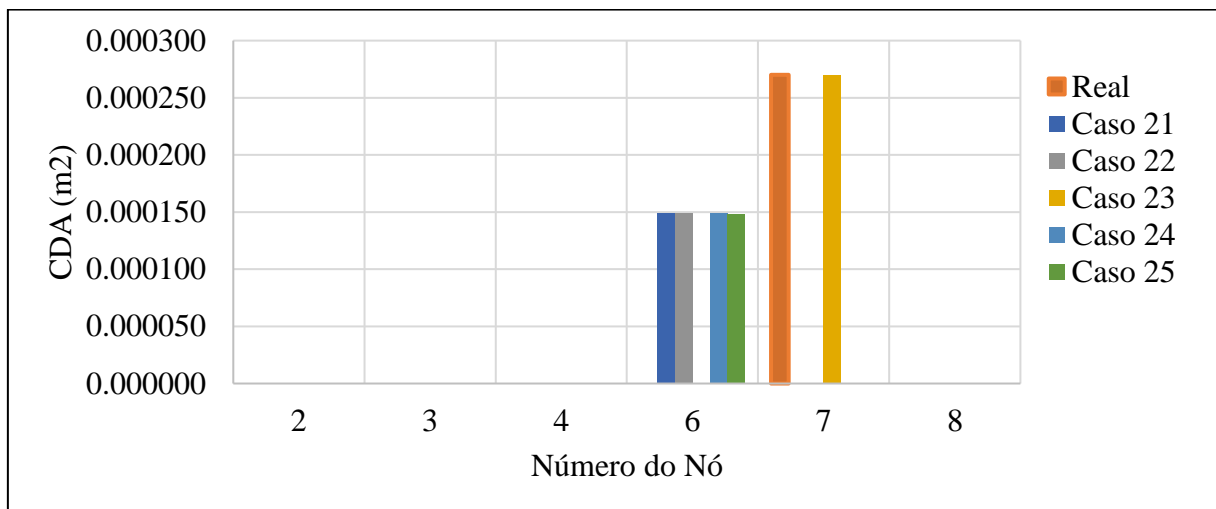
- Nó de vazamento: 7;
- Nó monitorado: 5;
- Número máximo de iterações (gerações): 10;
- População de soluções: 80;
- Probabilidade de Cruzamento: 60%;
- Probabilidade de Mutação: Variada $P_m = \frac{1}{NC \times NV}$

O Grupo 1 engloba os seguintes casos:

- Caso 21: Sem Elitismo, $p_e = 0\%$
- Caso 22: Elitismo 1, $p_e = 20\%$
- Caso 23: Elitismo 2, $p_e = 20\%$
- Caso 24: Elitismo 1, $p_e = 80\%$
- Caso 25: Elitismo 2, $p_e = 80\%$

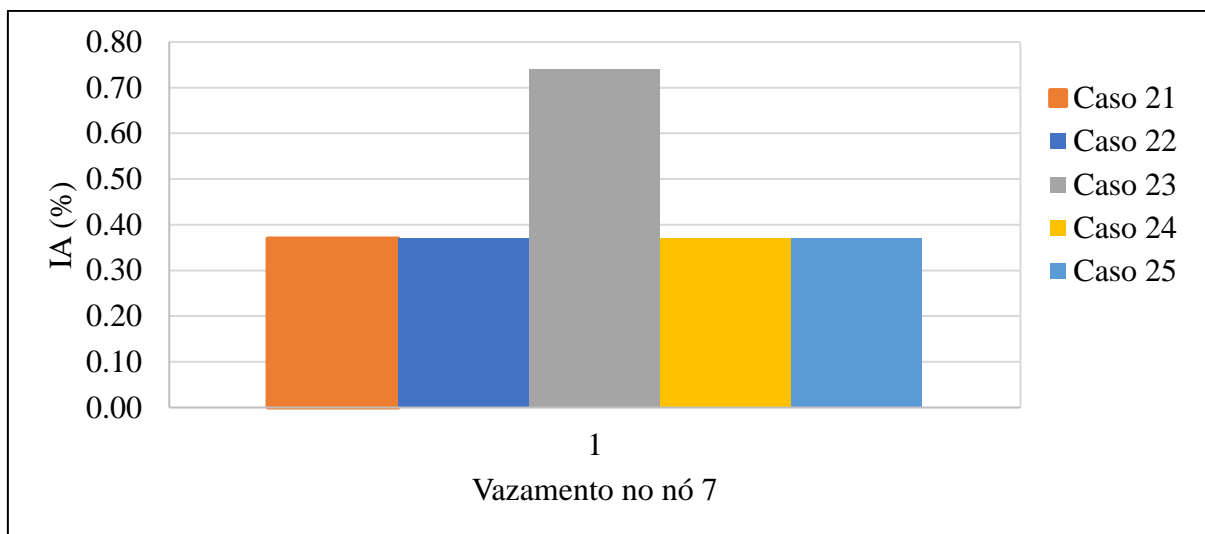
Gráfico 46 - Estimação preliminar - melhor solução (CDA m²), Grupo 5.

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 47 - Estimação final - melhor solução (CDA m²), Grupo 5.

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 48 - Índice de Acerto, IA (%) - População Inicial, Grupo 5.



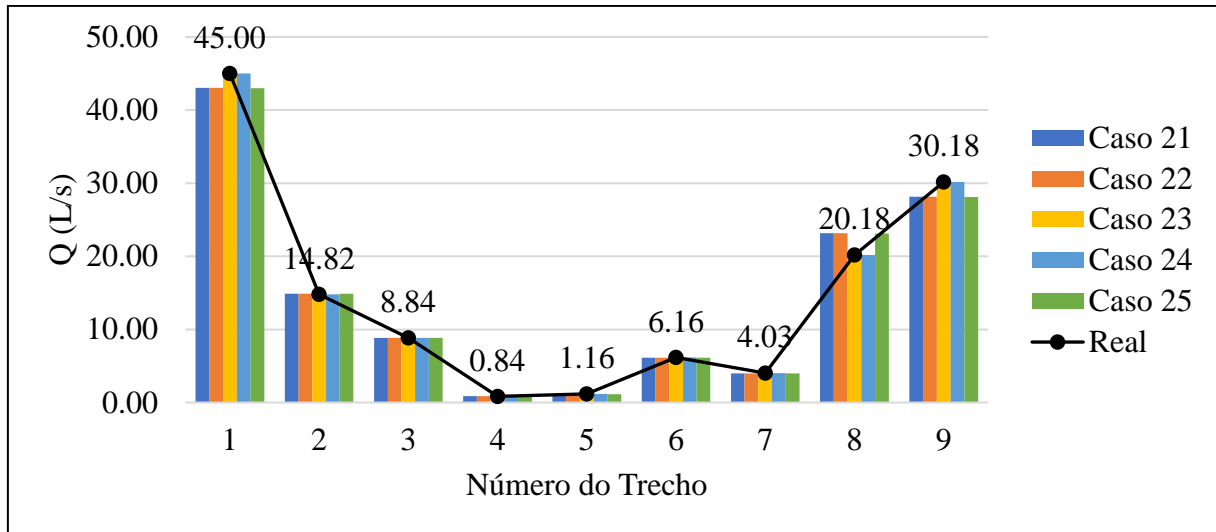
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 49 - Índice de Acerto, IA (%) - População Final, Grupo 5.



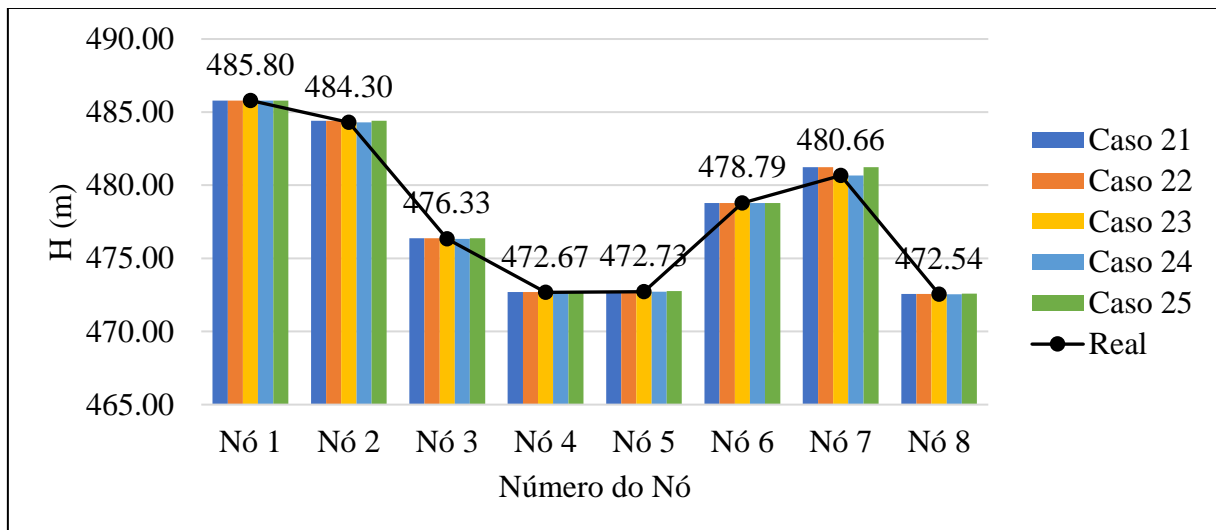
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 50 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 5.



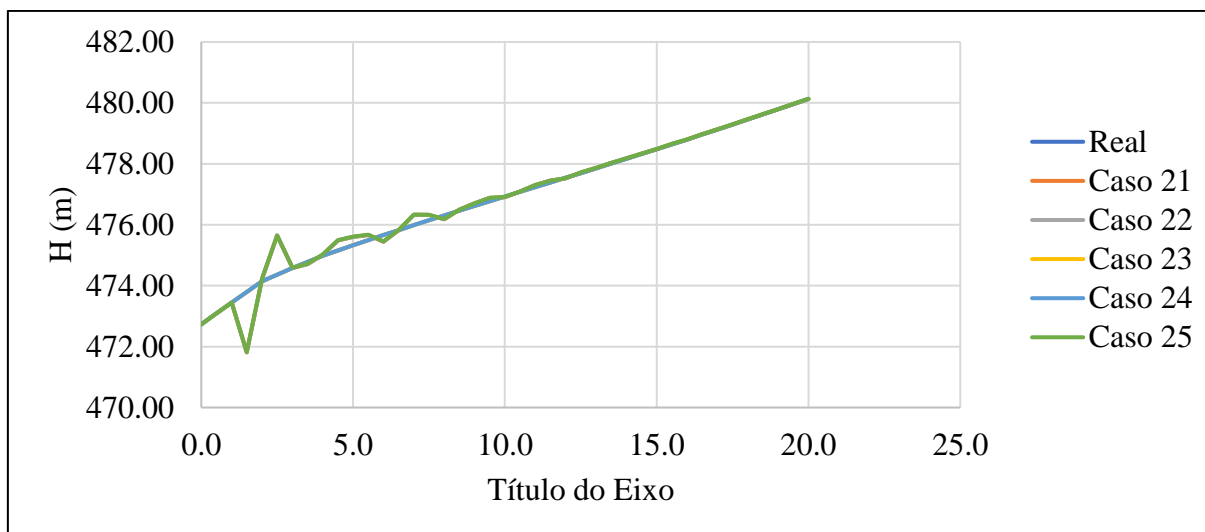
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 51 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 5.



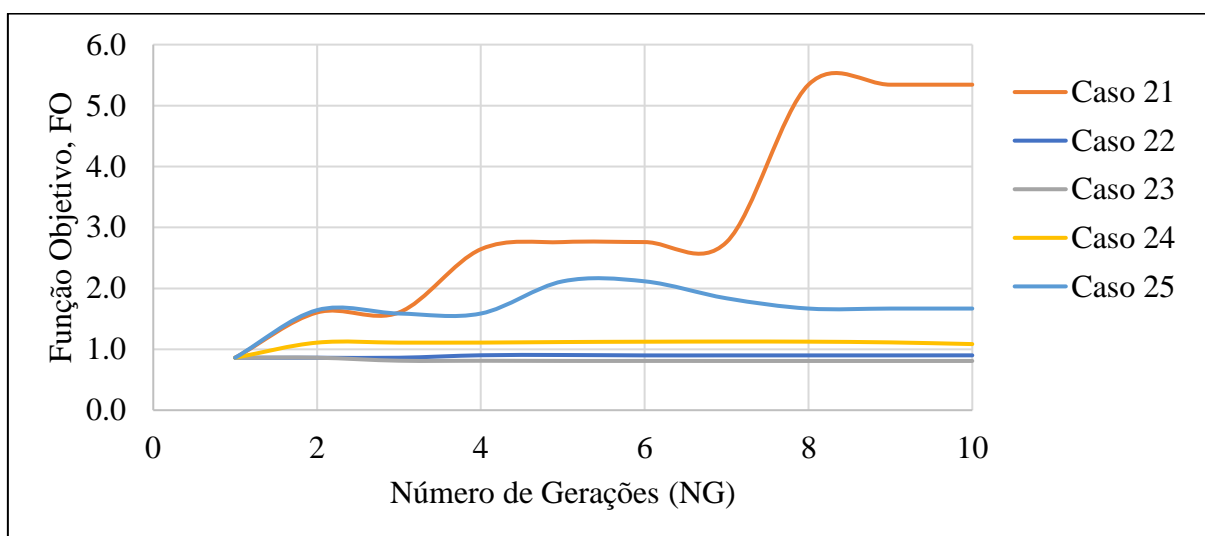
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 52 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 5.



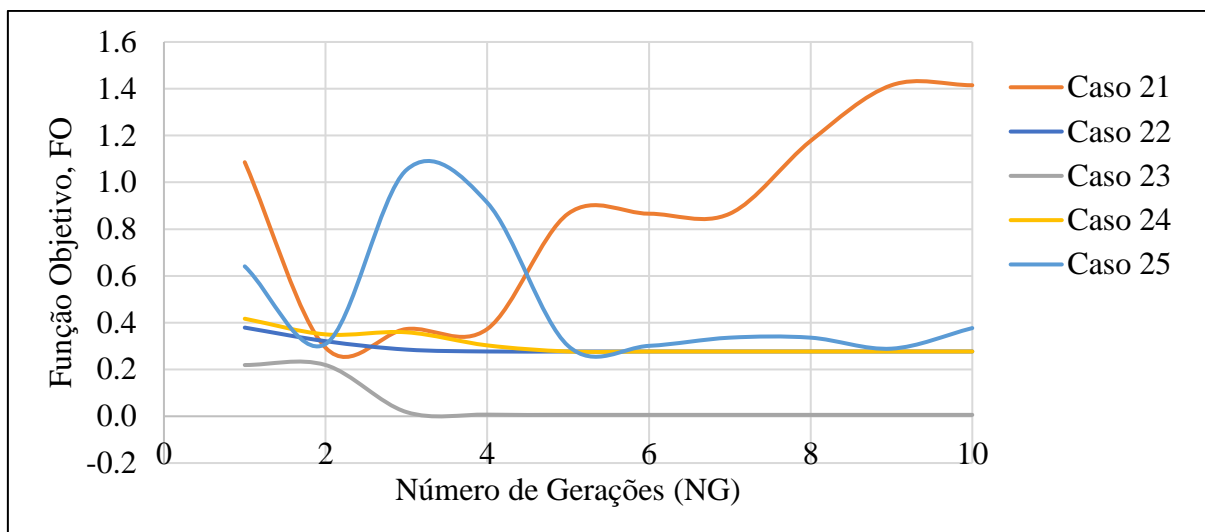
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 53 - Função Objetivo Inicial, Grupo 5.



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 54 - Função Objetivo Final, Grupo 5.



Fonte: elaborada pela autora.

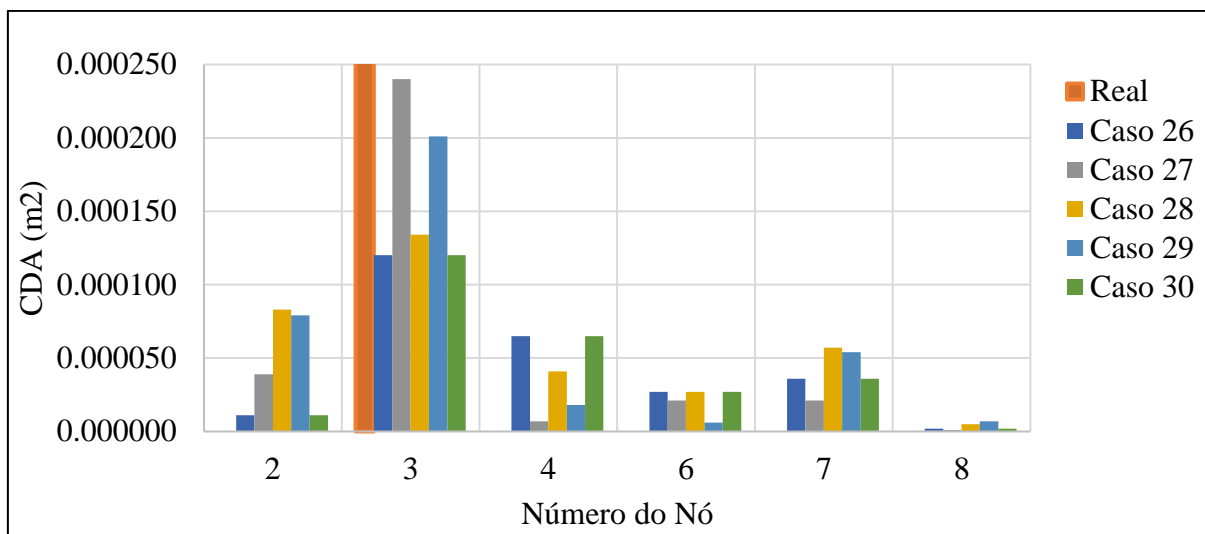
Grupo 6:

A condições iniciais para o Grupo 1 são as seguintes:

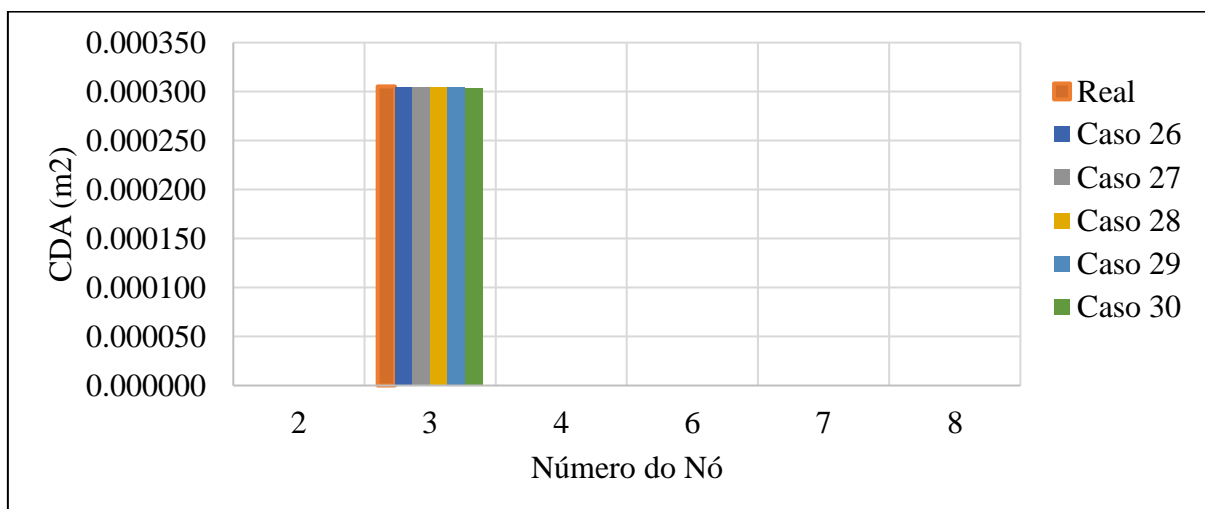
- Nó de vazamento: 3;
- Nó monitorado: 5;
- Número máximo de iterações (gerações): 10;
- População de soluções: 80;
- Probabilidade de Cruzamento: 60%;
- Probabilidade de Mutação: Variada $P_m = \frac{1}{NC \times NV}$

O Grupo 1 engloba os seguintes casos:

- Caso 26: Sem Elitismo, $p_e = 0\%$
- Caso 27: Elitismo 1, $p_e = 20\%$
- Caso 28: Elitismo 2, $p_e = 20\%$
- Caso 29: Elitismo 1, $p_e = 80\%$
- Caso 30: Elitismo 2, $p_e = 80\%$

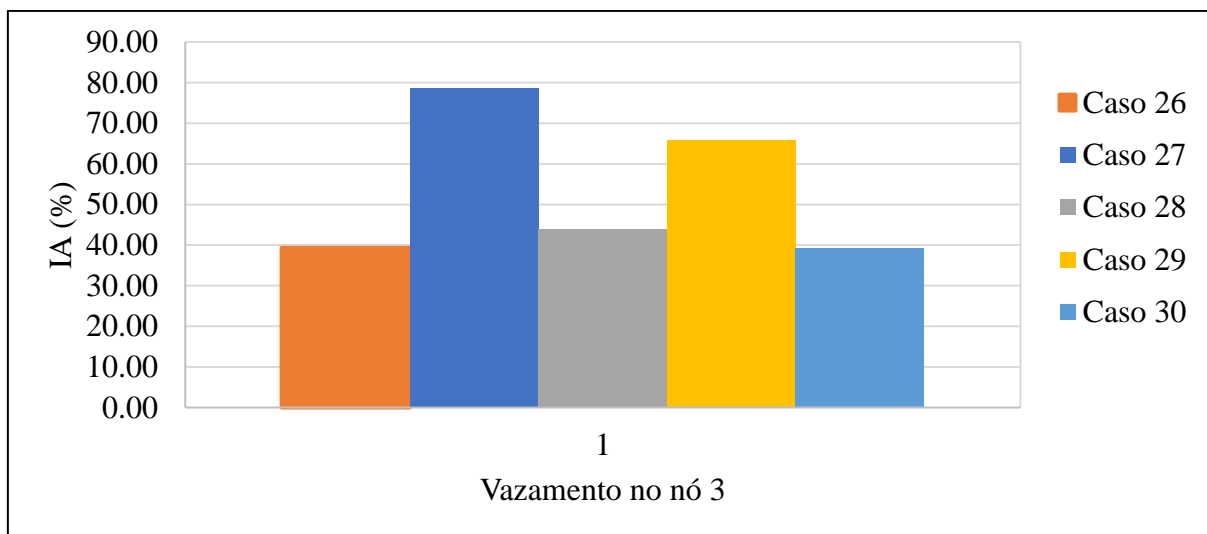
Gráfico 55 - Estimação preliminar - melhor solução (CDA m²), Grupo 6.

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 56 - Estimação final - melhor solução (CDA m²), Grupo 6.

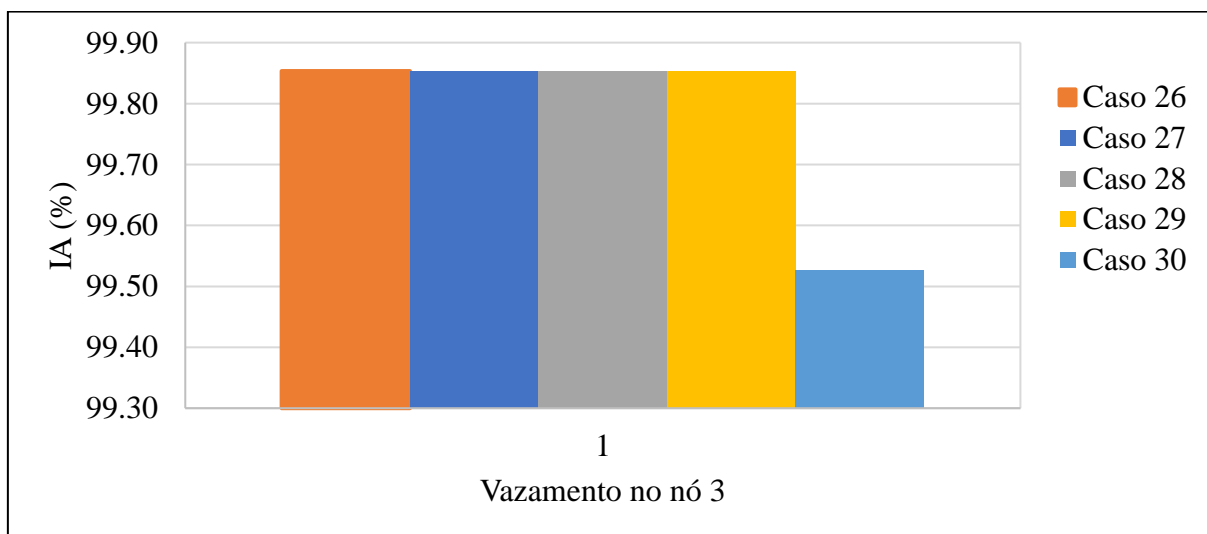
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 57 - Índice de Acerto, IA (%) - População Inicial, Grupo 6.



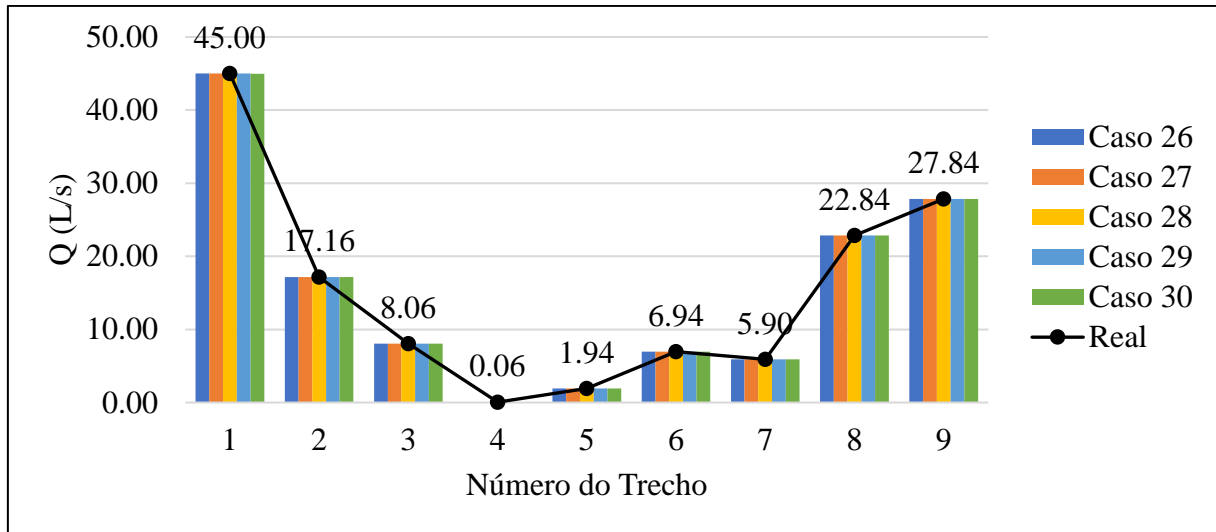
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 58 - Índice de Acerto, IA (%) - População Final, Grupo 6.



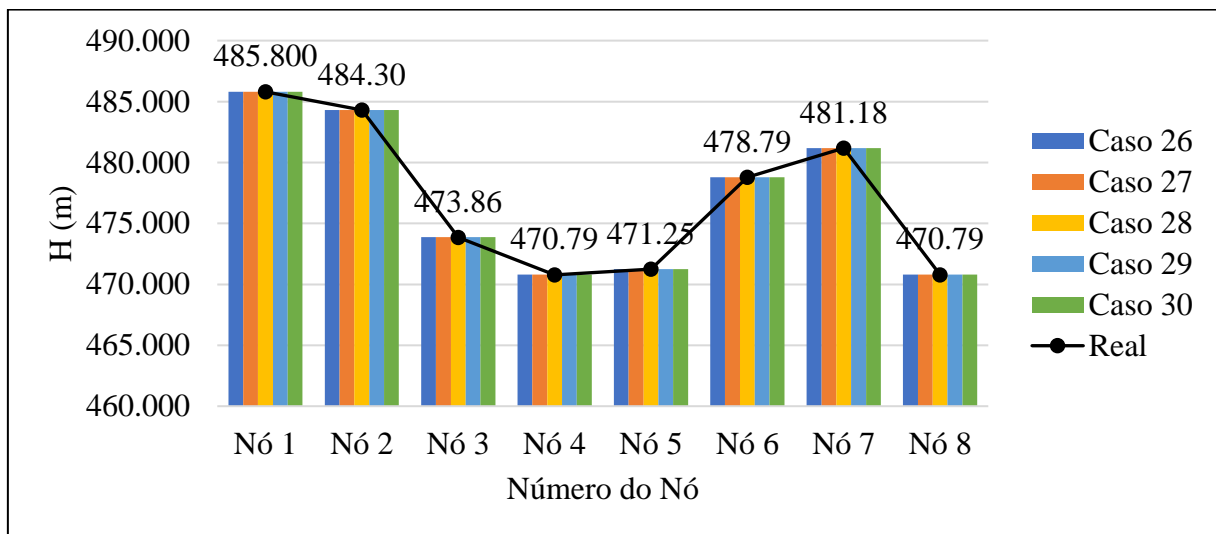
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 59 - Vazão nos trechos - Regime Permanente, Grupo 6.



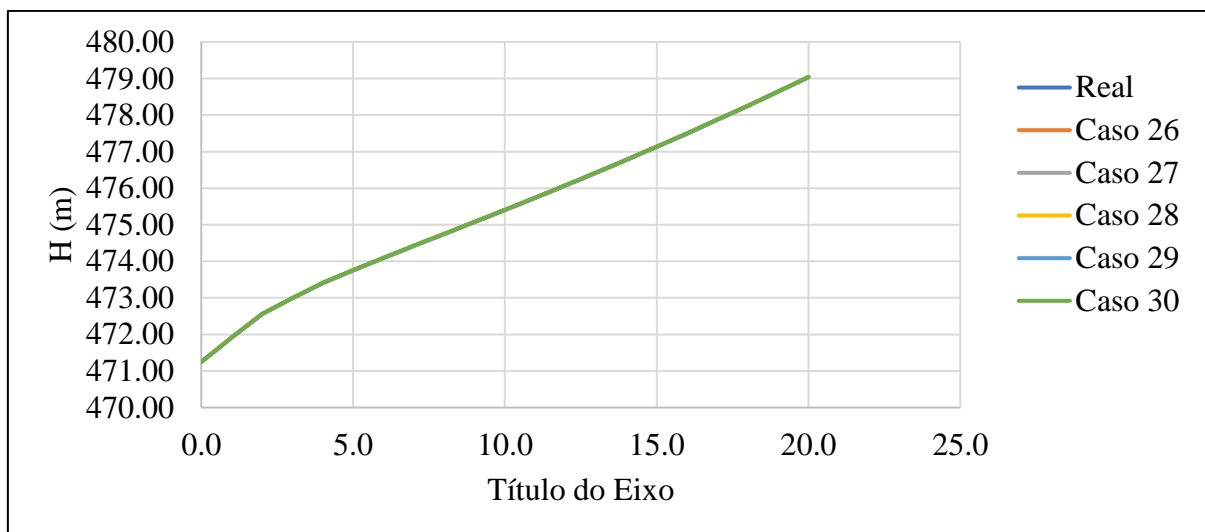
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 60 - Carga Hidráulica - Regime Permanente, Grupo 6.



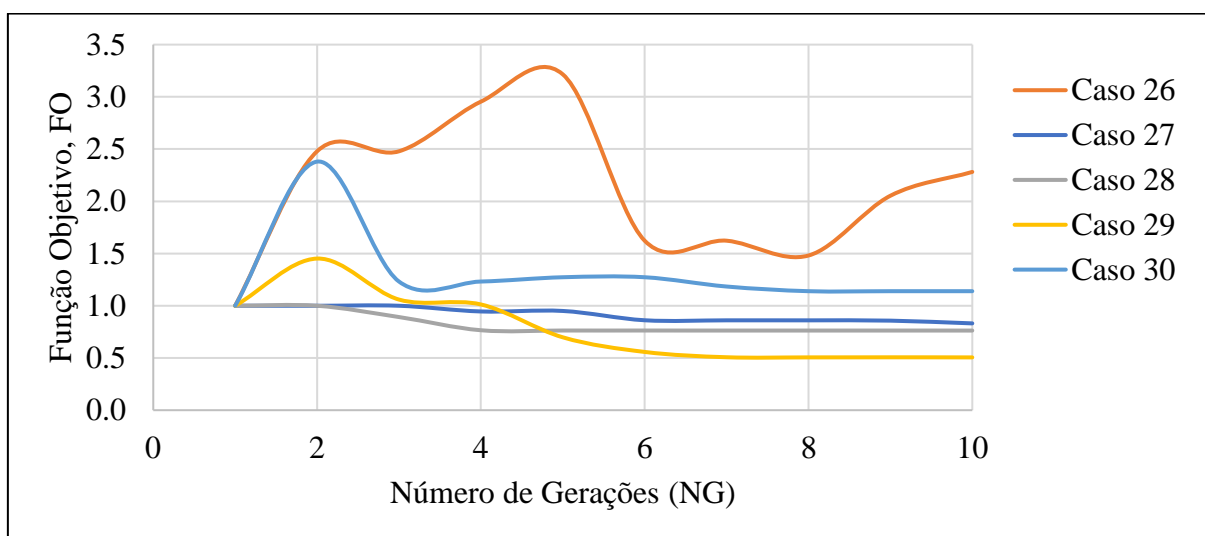
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 61 - Carga Hidráulica Transiente - nó monitorado (5) – Grupo 6.



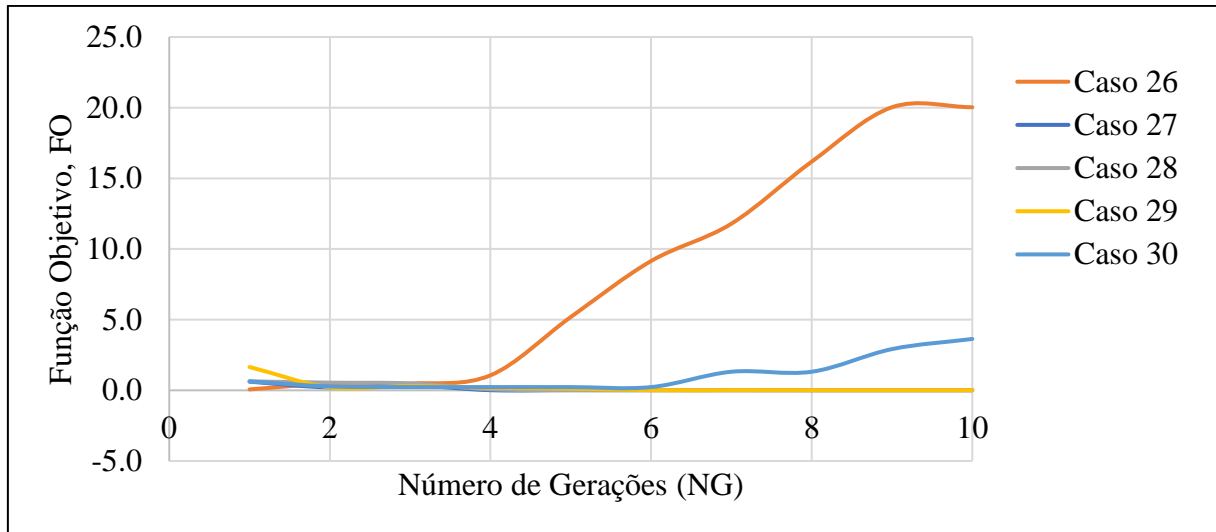
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 62 - Função Objetivo Inicial, Grupo 6.



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 63 - Função Objetivo Final, Grupo 6.



Fonte: elaborada pela autora.

APÊNDICE B – TESTES PILOTOS

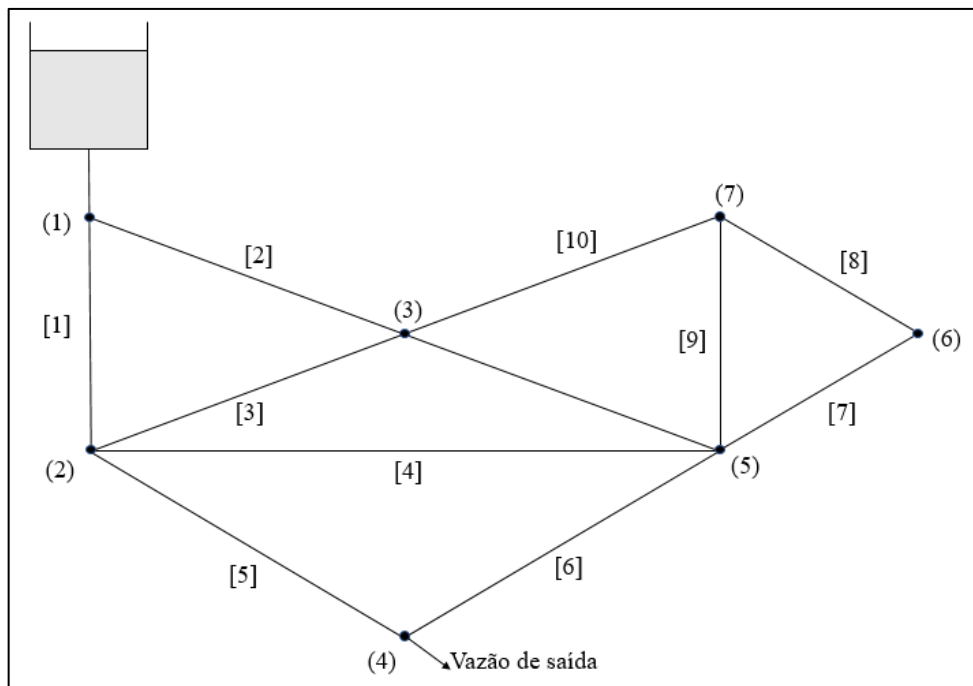
A Figura 10 mostra a rede exemplo adotada nos testes pilotos. A rede contém 11 tubos, 1 reservatório de carga constante (nó 1), 1 nó de demanda constante (nó 4), 4 nós comuns e uma válvula de controle (nó 4). A Tabela 24 mostra as características físicas dos tubos e vazões iniciais, a Tabela 23 ilustra os dados do estado permanente para os nós da rede e o Gráfico 64 expõem as cargas transiente no nó da válvula. O Gráfico 65 mostra o comportamento da manobra da válvula utilizada para simular o transiente.

Estuda-se o procedimento de localização e quantificação de vazamentos considerando que todos os nós, com exceção dos nós 1 e 4, são pontos possíveis para a ocorrência de vazamentos. O operador Elitismo tipo 1 variando de 10% a 100%, em intervalos de 10%, totalizando 10 simulações, foi aplicado. O método MTI-AG deverá identificar as seguintes situações:

- a) Caso 1: Ocorre um vazamento no nó 2 de 10 L/s, com $CDA = 0,000429m^2$.
- b) Caso 2: Ocorrem dois vazamentos, nó 2 (10L/s) e nó 6 (10L/s), com $CDA = 0,000433m^2$ e $CDA = 0,000437m^2$, respectivamente.

A Tabela 25 mostra a configuração geral do AG utilizada nos testes pilotos. Demais dados utilizados na rede: coeficiente de Poisson, $\nu = 0,25$; módulo de elasticidade do material do tubo, $E = 120GPa$; módulo de elasticidade da água, $K = 2,19GPa$; massa específica da água, $\rho = 999kg/m^3$. O evento transiente do sistema causado pela manobra da válvula de controle no nó 4 foi simulado durante 20s. O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional foi de 0,5s. Com este intervalo de tempo selecionado, os tubos foram discretizados em 15 trechos, cada um com cerca de 650m de comprimento.

Figura 10 - Rede Exemplo B, testes pilotos.



Fonte: adaptada de Ligget e Chen (1994).

Legenda:

() – número do nó;

[] – número do tubo.

Tabela 23 - Dados do estado permanente para os nós da rede exemplo B (testes pilotos).

Nó	Consumo (L/s)	HO(m)
1	0,00	30,00
2	0,00	27,75
3	0,00	28,28
4	58,00	26,70
5	0,00	27,71
6	0,00	27,71
7	0,00	27,76

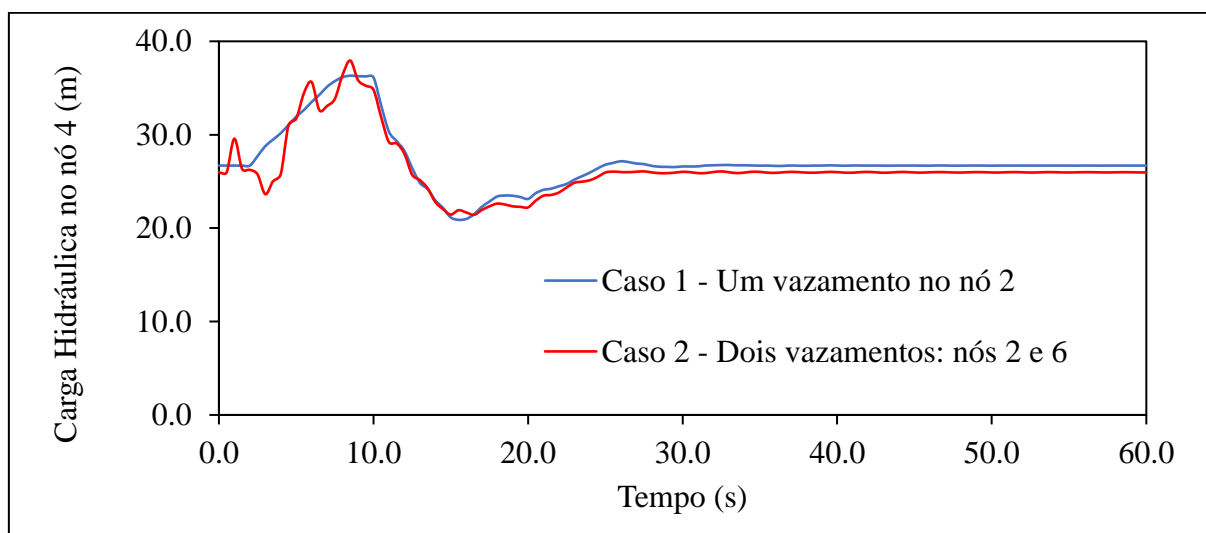
Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 24 - Características dos tubos e vazões iniciais, rede exemplo B (testes pilotos).

Tubo	L (m)	D (m)	ϵ (mm)	Q (L/s)
1	1300,0	0,250	0,3	30,2615
2	650,0	0,250	0,3	37,7384
3	650,0	0,200	0,3	11,2395
4	1300,0	0,200	0,3	2,1491
5	650,0	0,250	0,3	29,352
6	650,0	0,250	0,3	28,648
7	650,0	0,200	0,3	0,9833
8	1250,0	0,150	0,3	0,9833
9	1250,0	0,250	0,3	4,212
10	650,0	0,150	0,3	5,1953
11	650,0	0,250	0,3	21,3036

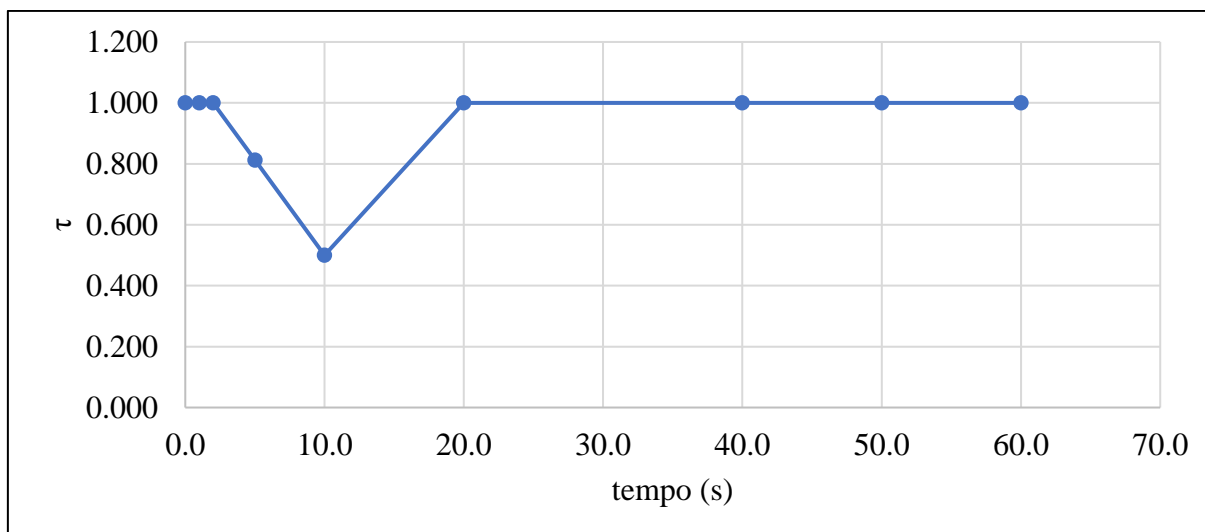
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 64 - Carga Hidráulica Transiente no nó monitorado (nó 4) - Rede Exemplo B (testes pilotos).



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 65 - Manobra de fechamento da válvula (testes pilotos).



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 25 - Configuração padrão utilizada no AG (testes pilotos).

Taxa de Elitismo	Variada (%)
Taxa de Mutação	0,5%
Taxa de Cruzamento	100%
Número de Gerações	20
Tamanho da População	20

Fonte: elaborada pela autora.

Caso 1 - Ocorre um vazamento:

Os resultados da aplicação do MTI-AG para identificação de vazamentos referente ao caso 1 são apresentados na Tabela 26. Verifica-se desta tabela que, no caso da existência de um único vazamento na rede (nó 2) o método de identificação mostrou-se bastante eficiente na localização do vazamento real com o Índice de Aceitação do Local de Vazamento, *IALV* (%) de 100% em todas as simulações realizadas. A Tabela 26 referente à estimação final de cada simulação, variando a taxa de elitismo, confirma o nó 2 como o real local de vazamento com altíssimo índice de acerto.

Percebe-se através dos resultados expostos que ao variar o elitismo entre 0% a 100% (Gráfico 66) inicialmente há um aumento na eficiência do algoritmo e a partir de 50% ele tem sua precisão reduzida gradativamente até $P_e = 80\%$ quando ele volta a crescer. Essa redução se deve ao fato de que ao utilizar uma alta taxa de elitismo, novas gerações estão sendo compostas em sua maioria por indivíduos de gerações anteriores dando uma pequena margem

para a evolução atuar, desta forma o comportamento das simulações deveria mostrar resultados de redução gradativa até os 100%, contradizendo os resultados das três últimas simulações da aplicação analisada.

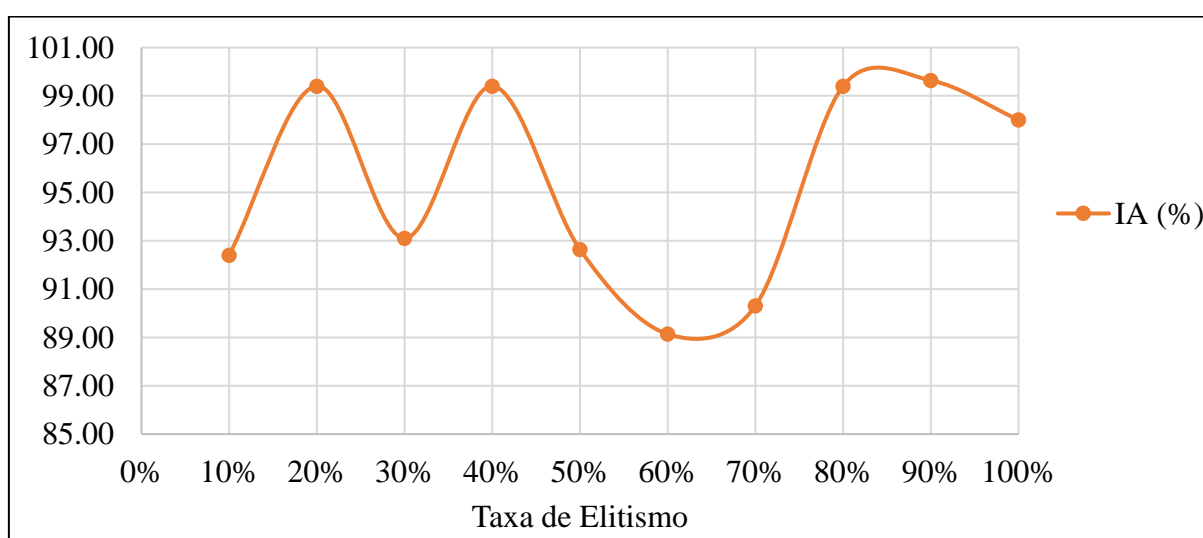
O índice de acerto foi maior quando utilizado um valor de 90% para o elitismo, entretanto o valor de 40% já alcançou alto IA (99,41%), e por ser uma taxa menor, dando uma boa margem para a evolução, esse valor poderá encontrar resultado mais precisos em aplicações futuras, sendo essa simulação que representa a melhor solução, representando 40% de Elitismo, com 99,41% de índice de acerto e tempo decorrido de simulação de 4min e 29s.

Tabela 26 - Resultados, testes pilotos, caso 1.

Elitismo 1 (P_e)	CDA_{real} (m^2)	$CDA_{estimado}$ (m^2)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo Decorrido (HH:MM:SS)
10%	0,000429	0,000396	9,24	100,00	92,41	00:01:43
20%	0,000429	0,000426	9,94	100,00	99,41	00:01:46
30%	0,000429	0,000399	9,31	100,00	93,11	00:01:46
40%	0,000429	0,000426	9,94	100,00	99,41	00:04:29
50%	0,000429	0,000397	9,26	100,00	92,64	00:04:27
60%	0,000429	0,000382	8,91	100,00	89,14	00:04:34
70%	0,000429	0,000387	9,03	100,00	90,31	00:04:51
80%	0,000429	0,000426	9,94	100,00	99,41	00:04:32
90%	0,000429	0,000427	9,96	100,00	99,64	00:04:45
100%	0,000429	0,000420	9,80	100,00	98,01	00:04:28

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 66 – Resultados IA (%), testes pilotos, caso1.



Fonte: elaborada pela autora.

Caso 2 - Ocorrem dois vazamentos.

Os resultados da aplicação do MTI-AG para identificação de vazamentos referente ao caso 2 são apresentados na

Tabela 27, essa Tabela mostra a estimativa final de cada simulação para os nós 2 e 6, variando o operador Taxa de Elitismo. O Índice de Aceitação do Local de Vazamento, IALV (%), para o caso 2 deve ser de 50% para o nó 2 e 50% para o nó 6, indicando que o vazamento total de 20 L/s ocorre nesses dois nós com a mesma vazão de saída.

Verifica-se que, no caso da existência de dois vazamentos na rede (nó 2 e nó 6) o método de identificação em não foi completamente eficiente, uma vez que mais da metade das simulações não acertaram a localização do vazamento no nó 2, já o vazamento no nó 6 foi detectado em todas as simulações. As taxas de elitismo de 10%, 40%, 50%, 60%, 80% e 90% não encontraram vazamento no nó 2, mas indicaram perda no nó 5, 3, 5, 7, 5 e 3, respectivamente, além da perda no nó 6 que foi localizada corretamente.

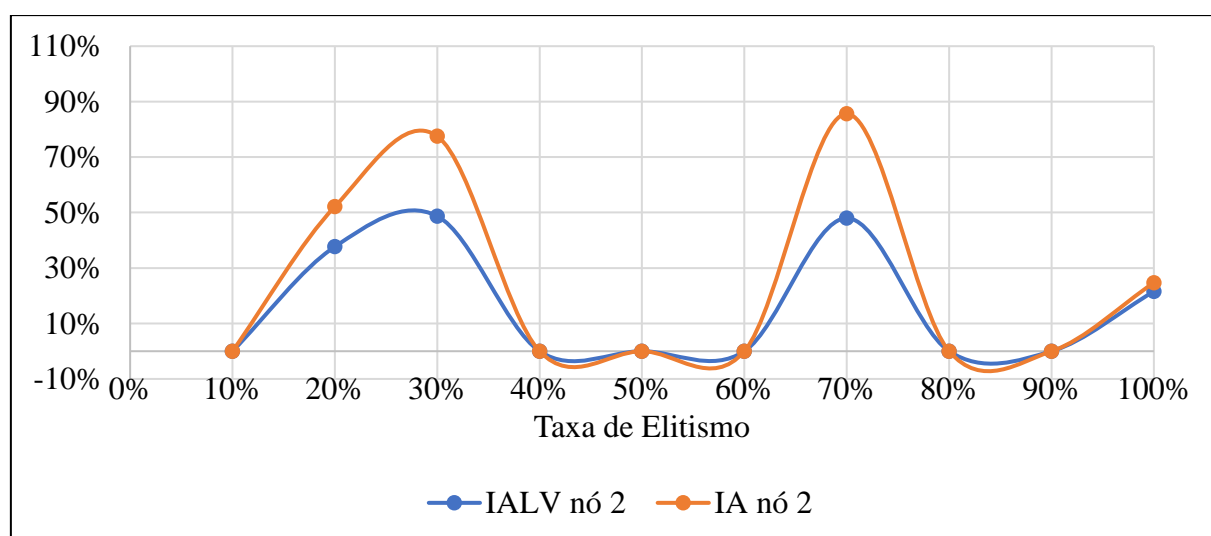
No Gráfico 67 e Gráfico 68, pode-se visualizar melhor a variação do Índice de Acerto (IA) e do Índice de Aceitação do Local de Vazamento (IALV) para os nós 2 e 6, respectivamente. A simulação com taxa de elitismo igual a 70% foi a que apresentou melhores resultados na combinação de vazamento em dois nós, IALV igual a 47,97% para o nó 2, e 52,03% para o nó 6, e IA igual a 85,61% para o nó 2 e 92,85% para o nó 6.

Tabela 27 - Resultados, testes pilotos, caso 2.

Elitismo 1 (P_e)	Vazamento	CDA_{real} (m^2)	$CDA_{estimado}$ (m^2)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (HH:MM:SS)
10%	nó 2	0,000433	0,000000	0,00	0,00	0,00	00:01:44
	nó 6	0,000437	0,000381	8,71	57,27	87,13	
20%	nó 2	0,000433	0,000226	5,21	37,69	52,15	00:01:48
	nó 6	0,000437	0,000377	8,62	62,31	86,22	
30%	nó 2	0,000433	0,000336	7,75	48,71	77,53	00:01:43
	nó 6	0,000437	0,000357	8,16	51,29	81,64	
40%	nó 2	0,000433	0,000000	0,00	0,00	0,00	00:01:43
	nó 6	0,000437	0,000358	8,19	70,49	81,87	
50%	nó 2	0,000433	0,000000	0,00	0,00	0,00	00:01:43
	nó 6	0,000437	0,000356	8,14	60,13	81,42	
60%	nó 2	0,000433	0,000000	0,00	0,00	0,00	00:01:43
	nó 6	0,000437	0,000406	9,29	90,78	92,85	
70%	nó 2	0,000433	0,000371	8,56	47,97	85,61	00:01:43
	nó 6	0,000437	0,000406	9,29	52,03	92,85	
80%	nó 2	0,000433	0,000000	0,00	0,00	0,00	00:01:50
	nó 6	0,000437	0,000304	6,95	60,33	69,52	
90%	nó 2	0,000433	0,000000	0,00	0,00	0,00	00:01:46
	nó 6	0,000437	0,000200	4,57	67,84	45,74	
100%	nó 2	0,000433	0,000107	2,47	21,55	24,69	00:01:46
	nó 6	0,000437	0,000393	8,99	78,45	89,88	

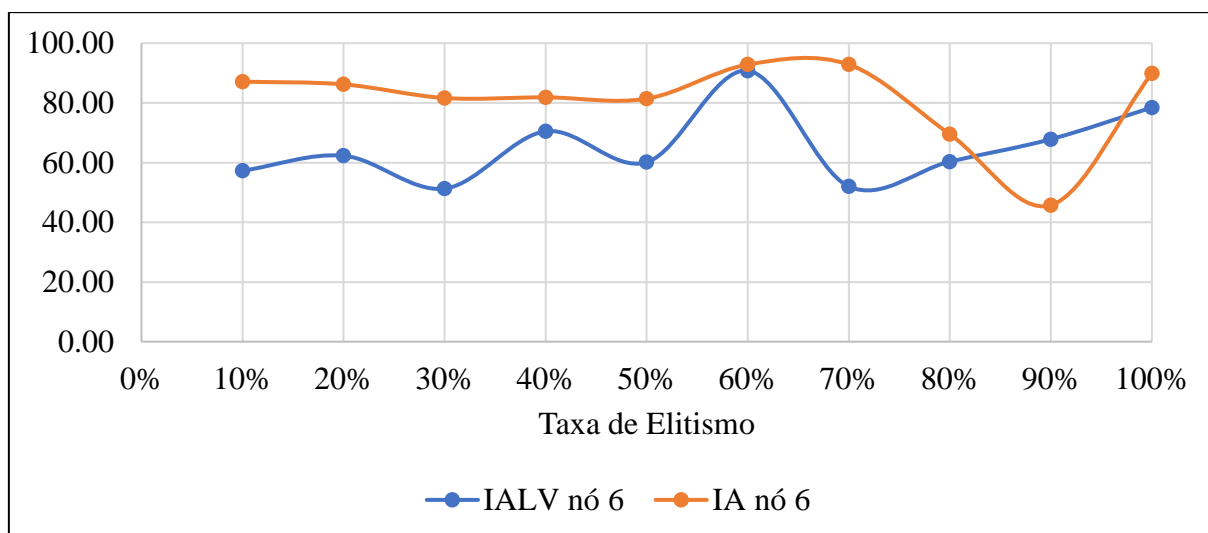
Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 67 - Resultados, testes pilotos, caso 2 (nó 2).



Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 68 - Resultados, testes pilotos, caso 2 (nó 6).



Fonte: elaborada pela autora.

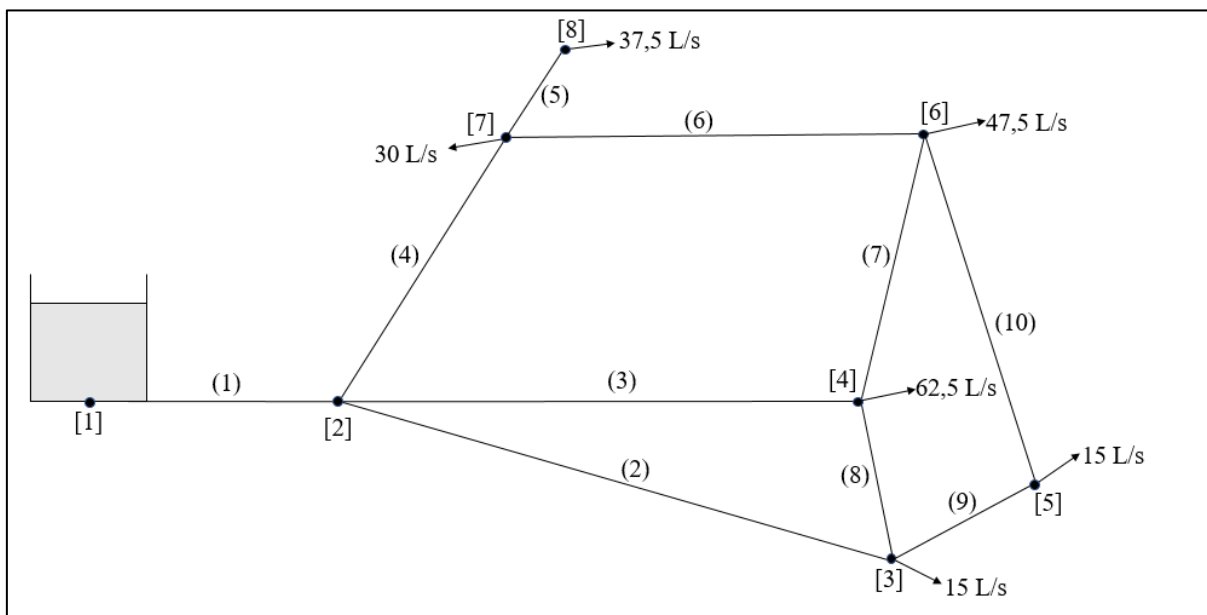
APÊNDICE C – REDE EXEMPLO C

Foi executado o mesmo procedimento exposto no capítulo 6 deste trabalho na Rede malhada proposta por Walski (1983) e modificada por Gambale (2000). A rede apresenta 10 trechos e 7 nós, sendo o nó 1 correspondente à localização do reservatório de abastecimento da rede, com cota do nível d'água de 60m, e ainda uma válvula está localizada no nó 8. É possível visualizar a rede exemplo na Figura 11 abaixo.

O evento transiente do sistema causado pela manobra da válvula de controle no nó 8 foi simulado durante 20s. O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional foi de 0,35s. Com este intervalo de tempo selecionado, os tubos foram discretizados em 33 trechos, cada um com cerca de 300m de comprimento. Demais dados utilizados na rede: coeficiente de Poisson, $\nu = 0,25$; módulo de elasticidade do material do tubo, $E = 120\text{GPa}$; módulo de elasticidade da água, $K = 2,19\text{GPa}$; massa específica da água, $\rho = 999\text{kg/m}^3$.

A Tabela 29 mostra as características físicas dos tubos e vazões iniciais, a Tabela 28 ilustra os dados do estado permanente para os nós da rede. Na Tabela 30 estão dispostos os casos analisados na rede exemplo C.

Figura 11 - Rede Exemplo C.



Fonte: adaptada de Walski (1983) e Gambale (2000).

Tabela 28 - Dados do estado permanente para os nós da rede exemplo C.

Nó	Consumo (L/s)	HO(m)
1	0,00	60,00
2	0,00	58,85
3	15,00	56,83
4	62,5	56,93
5	15,00	55,58
6	47,50	54,90
7	30,00	55,37
8	37,5	54,63

Tabela 29 - Características dos tubos e vazões iniciais, rede exemplo C.

Tubo	L (m)	D (m)	ϵ (mm)	Q (L/s)
1	700,0	0,500	0,0070	217,49
2	1800,0	0,250	0,0150	27,81
3	1520,0	0,400	0,0100	104,06
4	1220,0	0,300	0,0120	75,62
5	600,0	0,300	0,7000	37,50
6	1220,0	0,200	0,1000	8,12
7	920,0	0,250	0,0800	38,11
8	300,0	0,150	0,0600	3,45
9	600,0	0,200	0,9000	16,27
10	1220,0	0,100	1,0000	1,27

Tabela 30 - Casos analisados – rede exemplo C.

Grupo	Caso	NC	NG	PC (%)	Tipo de Elitismo	P_e (%)	Nó de vazamento	Nó monitorado	Q_v (L/s)
Grupo 1	1	80	10	60,0	Nenhum	0,0	2	8	10,0
	2	80	10	60,0	1	20,0	2	8	10,0
	3	80	10	60,0	2	20,0	2	8	10,0
	4	80	10	60,0	1	80,0	2	8	10,0
	5	80	10	60,0	2	80,0	2	8	10,0
Grupo 2	6	80	10	60,0	Nenhum	0,0	3	8	10,0
	7	80	10	60,0	1	20,0	3	8	10,0
	8	80	10	60,0	2	20,0	3	8	10,0
	9	80	10	60,0	1	80,0	3	8	10,0
	10	80	10	60,0	2	80,0	3	8	10,0
Grupo 3	11	80	10	60,0	Nenhum	0,0	4	8	10,0
	12	80	10	60,0	1	20,0	4	8	10,0
	13	80	10	60,0	2	20,0	4	8	10,0
	14	80	10	60,0	1	80,0	4	8	10,0
	15	80	10	60,0	2	80,0	4	8	10,0
Grupo 4	16	80	10	60,0	Nenhum	0,0	5	8	10,0
	17	80	10	60,0	1	20,0	5	8	10,0
	18	80	10	60,0	2	20,0	5	8	10,0
	19	80	10	60,0	1	80,0	5	8	10,0
	20	80	10	60,0	2	80,0	5	8	10,0
Grupo 5	21	80	10	60,0	Nenhum	0,0	6	8	10,0
	22	80	10	60,0	1	20,0	6	8	10,0
	23	80	10	60,0	2	20,0	6	8	10,0
	24	80	10	60,0	1	80,0	6	8	10,0
	25	80	10	60,0	2	80,0	6	8	10,0
Grupo 6	26	80	10	60,0	Nenhum	0,0	7	8	10,0
	27	80	10	60,0	1	20,0	7	8	10,0
	28	80	10	60,0	2	20,0	7	8	10,0
	29	80	10	60,0	1	80,0	7	8	10,0
	30	80	10	60,0	2	80,0	7	8	10,0

Fonte: elaborada pela autora.

Casos sem Elitismo ($P_e = 0\%$):

Tabela 31 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$).

Nó de vazamento	Caso	CDA_{real} (m ²)	$CDA_{estimado}$ (m ²)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	1	0,000294	0,000018	0,612	13,622	6,116	167,43
3	6	0,000301	0,000120	3,986	46,001	39,861	156,61
4	11	0,000300	0,000065	2,167	24,978	21,673	153,08
5	16	0,000308	0,000000	0,000	0,000	0,000	153,09
6	21	0,000307	0,000039	1,271	9,573	12,706	156,99
7	26	0,000305	0,000011	0,361	2,269	3,605	152,91

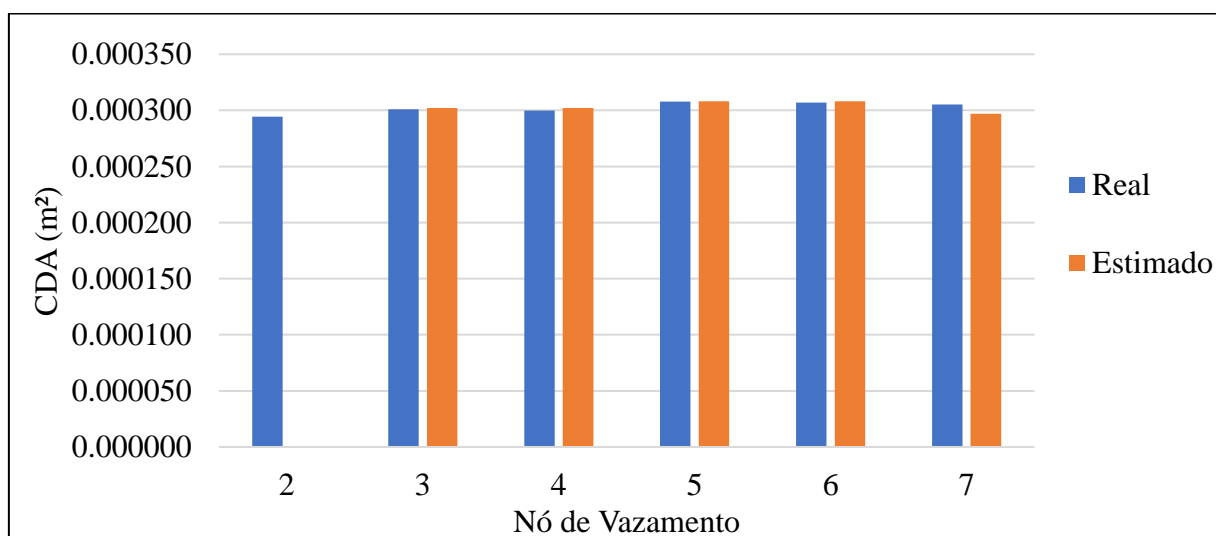
Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 32 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Sem Elitismo; $P_e = 0\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	CDA_{real} (m ²)	$CDA_{estimado}$ (m ²)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	1	5	0,000294	0,000000	0,00	0,00	0,00	167,43
3	6	4	0,000301	0,000302	10,03	100,00	99,68	156,61
4	11	4	0,000300	0,000302	10,07	100,00	99,30	153,08
5	16	1	0,000308	0,000308	10,00	100,00	99,97	153,09
6	21	1	0,000307	0,000308	10,03	100,00	99,65	156,99
7	26	1	0,000305	0,000297	9,73	100,00	97,34	152,91

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 69 – Resultados (CDA m²), casos Sem Elitismo ($P_e = 0\%$), Rede Exemplo C.



Fonte: elaborada pela autora.

Casos com Elitismo 1 ($P_e = 20\%$):

Tabela 33 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).

Nó de vazamento	Caso	CDAreal (m ²)	CDAestimado (m ²)	QVestimado (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	2	0,000294	0,000139	4,72	74,8	47,2	165,83
3	7	0,000301	0,000087	2,89	38,2	28,9	160,90
4	12	0,000300	0,000087	2,90	31,9	29,0	153,38
5	17	0,000308	0,000000	0,00	0,0	0,0	152,89
6	22	0,000307	0,000015	0,49	3,9	4,9	152,75
7	27	0,000305	0,000013	0,43	1,6	4,3	152,71

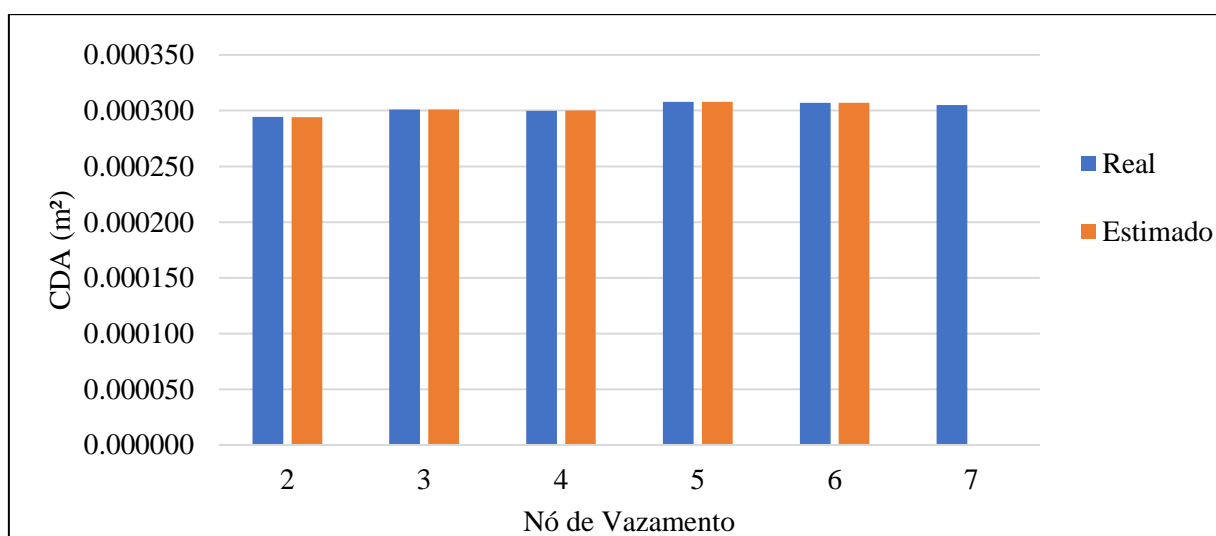
Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 34 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 20\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	CDAreal (m ²)	CDAestimado (m ²)	QVestimado (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	2	7	0,000294	0,000294	9,99	100,0	99,9	165,83
3	7	8	0,000301	0,000301	10,00	100,0	100,0	160,90
4	12	3	0,000300	0,000300	10,00	100,0	100,0	153,38
5	17	4	0,000308	0,000308	10,00	100,0	100,0	152,89
6	22	6	0,000307	0,000307	10,00	100,0	100,0	152,75
7	27	8	0,000305	0,000000	0,00	0,0	0,0	152,71

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 70 – Resultados (CDA m²), casos Elitismo 1 ($P_e = 20\%$), Rede Exemplo C.



Fonte: elaborada pela autora.

Casos com Elitismo 1 ($P_e = 80\%$):

Tabela 35 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).

Nó de vazamento	Caso	CDAreál (m ²)	CDAestimado (m ²)	QVestimado (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	4	0,000294	0,000032	1,09	30,4	10,9	169,56
3	9	0,000301	0,000072	2,39	28,2	23,9	158,42
4	14	0,000300	0,000093	3,10	33,4	31,0	152,89
5	19	0,000308	0,000000	0,00	0,0	0,0	153,11
6	24	0,000307	0,000020	0,65	5,5	6,5	152,97
7	29	0,000305	0,000086	2,82	9,9	28,2	153,17

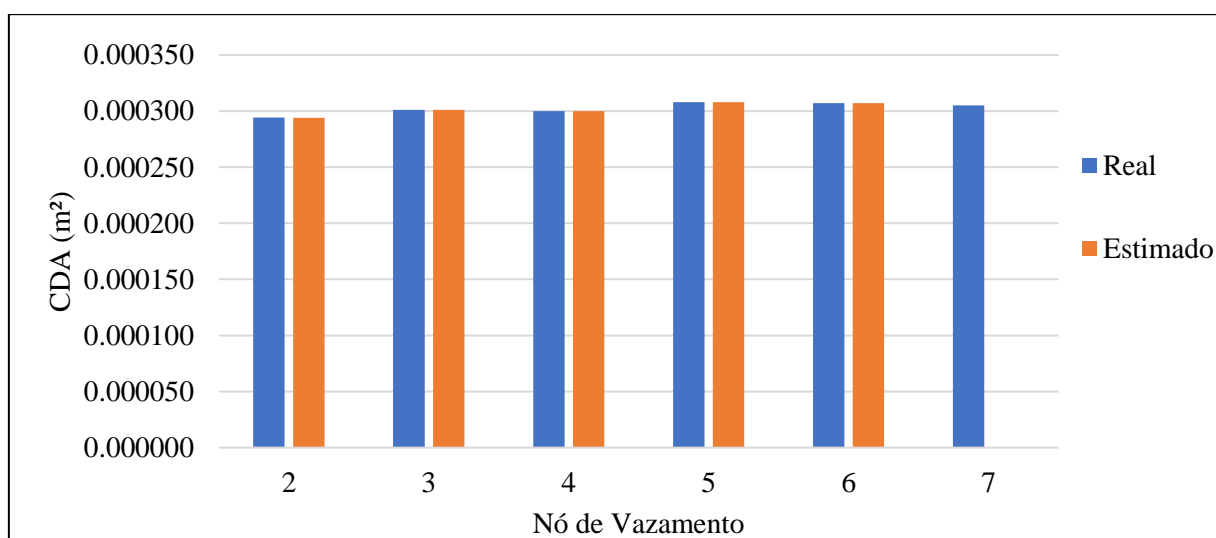
Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 36 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 1; $P_e = 80\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	CDA _{real} (m ²)	CDA _{estimado} (m ²)	QV _{estimado} (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	4	7	0,000294	0,000294	9,99	100,0	99,9	169,56
3	9	8	0,000301	0,000301	10,00	100,0	100,0	158,42
4	14	9	0,000300	0,000300	10,00	100,0	100,0	152,89
5	19	8	0,000308	0,000308	10,00	100,0	100,0	153,11
6	24	7	0,000307	0,000307	10,00	100,0	100,0	152,97
7	29	1	0,000305	0,000000	0,00	0,0	0,0	153,17

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 71 – Resultados (CDA m²), casos Elitismo 1 ($P_e = 80\%$), Rede Exemplo C.



Fonte: elaborada pela autora.

Casos com Elitismo 2 ($P_e = 20\%$):

Tabela 37 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).

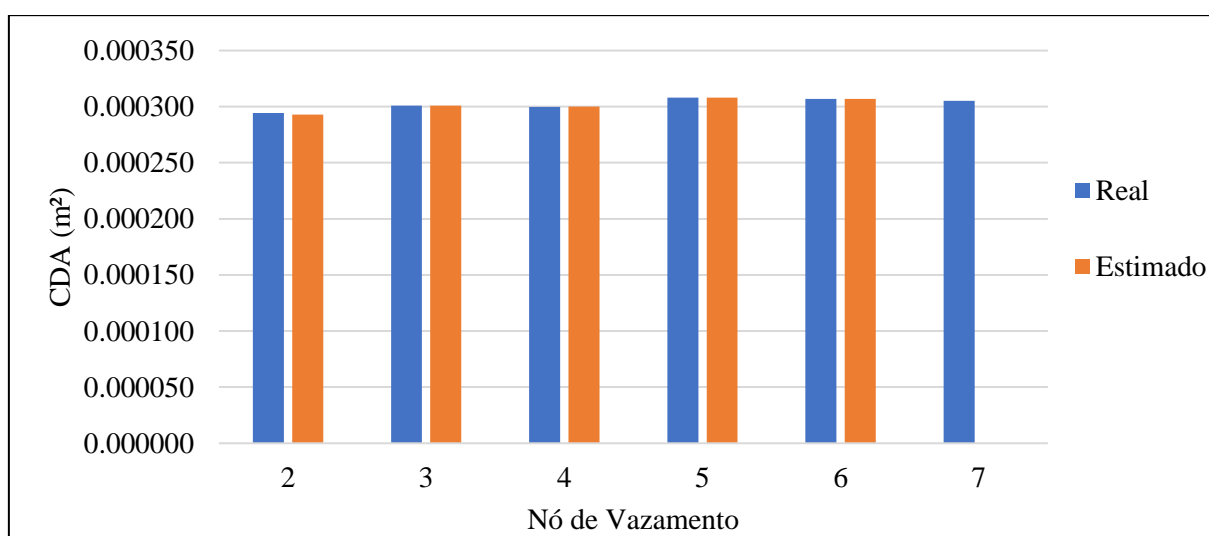
Nó de vazamento	Caso	CDA_{real} (m ²)	$CDA_{estimado}$ (m ²)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	3	0,000294	0,000024	0,82	21,1	8,2	158,17
3	8	0,000301	0,000109	3,62	44,5	36,2	155,25
4	13	0,000300	0,000086	2,87	31,4	28,7	152,98
5	18	0,000308	0,000000	0,00	0,0	0,0	152,84
6	23	0,000307	0,000021	0,68	5,7	6,8	154,63
7	28	0,000305	0,000028	0,92	6,4	9,2	152,52

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 38 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 20\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	CDA_{real} (m ²)	$CDA_{estimado}$ (m ²)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	3	7	0,000294	0,000293	9,96	100,0	99,6	158,17
3	8	7	0,000301	0,000301	10,00	100,0	100,0	155,25
4	13	7	0,000300	0,000300	10,00	100,0	100,0	152,98
5	18	7	0,000308	0,000308	10,00	100,0	100,0	152,84
6	23	6	0,000307	0,000307	10,00	100,0	100,0	154,63
7	28	5	0,000305	0,000000	0,00	0,0	0,0	152,52

Gráfico 72 – Resultados (CDA m²), casos Elitismo 2 ($P_e = 20\%$), Rede Exemplo C.



Fonte: elaborada pela autora.

Casos com Elitismo 2 ($P_e = 80\%$):

Tabela 39 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – 1ª Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).

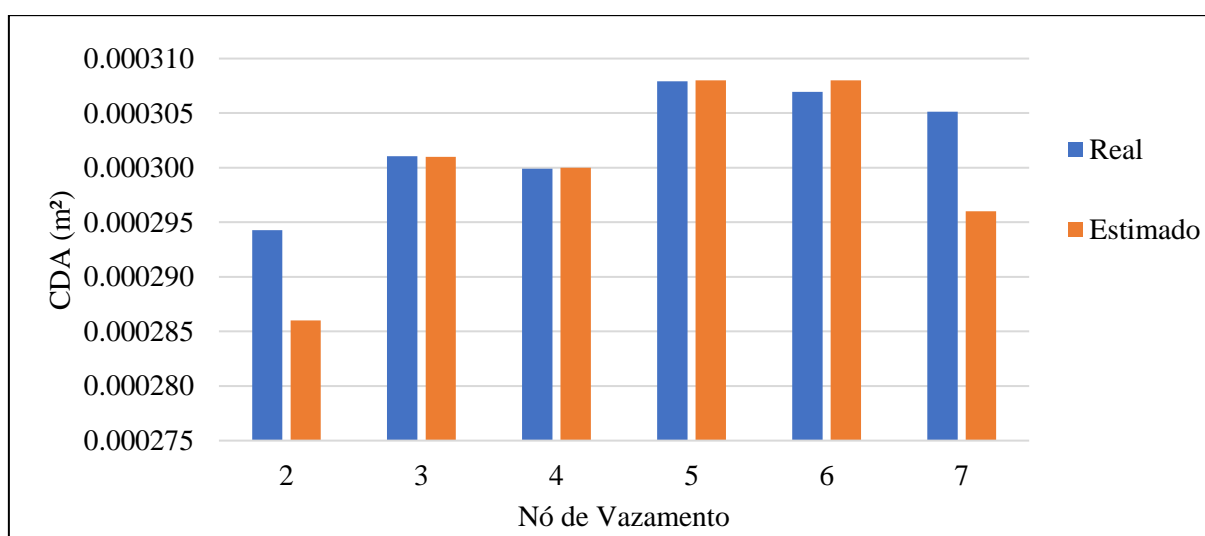
Nó de vazamento	Caso	CDA_{real} (m ²)	$CDA_{estimado}$ (m ²)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	5	0,000294	0,000019	0,65	16,9	6,5	157,69
3	10	0,000301	0,000038	1,26	14,0	12,6	158,47
4	15	0,000300	0,000065	2,17	25,0	21,7	153,13
5	20	0,000308	0,000000	0,00	0,0	0,0	152,91
6	25	0,000307	0,000036	1,17	8,8	11,7	152,63
7	20	0,000305	0,000027	0,88	3,1	8,8	152,58

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 40 - Quadro Resumo (Rede Exemplo C) – Última Tentativa - (Elitismo 2; $P_e = 80\%$).

Nó de vazamento	Caso	Geração da solução ótima	CDA_{real} (m ²)	$CDA_{estimado}$ (m ²)	$QV_{estimado}$ (L/s)	IALV (%)	IA (%)	Tempo (s)
2	5	4	0,000294	0,000286	9,72	100,0	97,2	157,69
3	10	10	0,000301	0,000301	10,00	100,0	100,0	158,47
4	15	8	0,000300	0,000300	10,00	100,0	100,0	153,13
5	20	8	0,000308	0,000308	10,00	100,0	100,0	152,91
6	25	2	0,000307	0,000308	10,03	100,0	99,7	152,63
7	30	8	0,000305	0,000296	9,70	100,0	97,0	152,58

Gráfico 73 – Resultados (CDA m²), casos Elitismo 2 ($P_e = 80\%$), Rede Exemplo C.



Fonte: elaborada pela autora.

Comparações:

Caso 1 (Sem Elitismo, com vazamento no nó 2) detectou erroneamente a vazão vazada no nó 3, com IA de 64,8%. Os casos 27 (Elitismo 1, 20%), 28 (Elitismo 2, 20%), e 29 (Elitismo 1, 80%), com vazamento no nó 7, detectaram erroneamente a vazão vazada no nó 6, com IA de 59,7%, 63,9% e 63,6%, respectivamente. O Elitismo tipo 2 com probabilidade elitista de 80% foi o único a conseguir identificar corretamente o vazamento em todos os casos em que foi aplicado.

Gráfico 74 - Comparações dos resultados (Rede Exemplo C).

