



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

ITALO RUAN DANTAS FERREIRA

**ESTUDO DA CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
SUBMETIDAS AO REGIME TRANSIENTE UTILIZANDO ALGORITMOS
GENÉTICOS E DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO**

FORTALEZA

2019

ITALO RUAN DANTAS FERREIRA

ESTUDO DA CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA SUBMETIDAS
AO REGIME TRANSIENTE UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS E
DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO

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

2019

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)

- F441e Ferreira, Italo Ruan Dantas.
Estudo da Calibração de Redes de Distribuição de Água Submetidas ao Regime Transiente Utilizando Algoritmos Genéticos e Diferentes Funções Objetivo / Italo Ruan Dantas Ferreira. – 2019.
186 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.
1. Função objetivo. 2. Rugosidade. 3. Transiente hidráulico. 4. Redes de distribuição de água. 5. Algoritmos Genéticos. I. Título.

CDD 627

ITALO RUAN DANTAS FERREIRA

ESTUDO DA CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA SUBMETIDAS
AO REGIME TRANSIENTE UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS E
DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO

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: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Aos meus pais, Magnólia e Marcos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo apoio financeiro oferecido.

À Universidade Federal do Ceará, por todo o suporte, conhecimento e apoio oferecido a mim durante todos esses anos que aqui estive.

Aos meus pais, Magnólia e Marcos, por sempre acreditarem em mim, me apoiarem em tudo e por acreditarem que a educação de seus filhos é o mais importante em suas vidas. A vocês devo tudo.

Ao Prof. Dr. John Kenedy de Araújo, não somente pela orientação desde o período de finalização da graduação, mas por todo suporte e conhecimento passado durante esses anos em que trabalhamos juntos nesses projetos.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Marco Aurélio e Prof. Dr. Emerson Mariano por terem aceitado esse convite.

“A ignorância gera mais frequentemente confiança do que o conhecimento: são os que sabem pouco, e não aqueles que sabem muito, que afirmam de uma forma tão categórica que este ou aquele problema nunca será resolvido pela ciência” (Charles Darwin)

RESUMO

Nessa dissertação se decorreu sobre como a calibração da rugosidade de tubos de redes de distribuição de água com diferentes funções objetivo se dá. É de amplo conhecimento as dificuldades que se tem quando não existe o conhecimento dos parâmetros físicos de uma rede, sobretudo quando essa se encontra submetida a regimes transientes. Ao se aplicar Algoritmos Genéticos em duas redes submetidas a um transiente com diferentes funções objetivo, visou-se obter parâmetros, como as vazões e cargas hidráulicas permanentes e transientes, aplicar e obter os valores de três funções objetivo, previamente selecionadas e modificadas para melhor representar os objetivos do estudo, quando utilizadas para calibrar a rugosidade a partir de nós e seções selecionados das redes estudadas, sendo as melhores três soluções de cada uma analisadas. Duas redes hipotéticas com parâmetros conhecidos foram aqui utilizadas, aplicando um transiente hidráulico por variação de demanda. As três funções objetivo escolhidas representam a diferença quadrática entre as cargas reais e simuladas (FO1), a diferença quadrática entre as vazões reais e simuladas (FO2) e as duas diferenças anteriores somadas utilizando pesos individuais para cada uma delas (FO3). Quatro nós foram selecionados em cada uma das redes, cada um com uma característica marcante, sendo elas, a maior e a menor distância do nó até o reservatório de abastecimento da rede, um nó com uma grande quantidade de tubos a ele ligados e um nó que estivesse na extremidade da rede. Os resultados apresentam que a FO1 obteve um desempenho mais importante em 3 dos 4 grupos analisados, quando se leva em consideração o Erro Médio Relativo (EMR) na calibração das rugosidades, além dos valores de carga hidráulica e vazão em regime permanente e transiente, assim percebe-se que a carga hidráulica se mostra melhor para representar esses pontos estudados. Quando se olha para as três melhores soluções de cada função objetivo, nota-se que não existe uma relação direta entre o menor valor de função com a produção de um menor erro, principalmente na calibração da rugosidade, além de que o erro na rugosidade é consideravelmente superior àquele apresentado pela carga hidráulica, por exemplo. Nota-se a aplicação das funções objetivos selecionadas ainda provocam um EMR considerável na calibração de rugosidades, mesmo que esse erro não se propague pela carga, então é de se notar que mudanças necessitam ser feitas nessas funções para melhor representar a realidade, apesar de se mostrarem um bom o começo para o estudo e de que as vantagens que o algoritmo genético traz para os processos de calibração são sempre positivos e devem ser explorados.

Palavras-chave: Função objetivo. Rugosidade. Transiente hidráulico. Redes de distribuição de água. Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

In this dissertation it was carried out on how the calibration of the roughness of pipes of water distribution networks with different objective functions takes place. It is widely known the difficulties that are experienced when there is no knowledge of the physical parameters of a network, especially when it is subject to transient regimes. When applying Genetic Algorithms in two networks submitted to a transient with different objective functions, it was aimed to obtain parameters, such as permanent and transient hydraulic flows and loads, to apply and obtain the values of three objective functions previously selected and modified to better represent the objectives of the study, when used to calibrate the roughness from nodes and selected sections of the studied networks, the best three solutions of each one being analyzed. Two hypothetical networks with known parameters were used here, applying a hydraulic transient by demand variation. The three objective functions chosen represent the quadratic difference between the actual and simulated loads (FO1), the quadratic difference between the actual and simulated flows (FO2) and the two previous differences summed using individual weights for each (FO3). Four nodes were selected in each of the nets, each with a striking characteristic, being the largest and the smallest distance from the node to the supply reservoir of the network, a node with a large number of tubes connected to it and a node that was at the end of the net. The results show that FO1 obtained a more important performance in 3 of the 4 groups analyzed, when considering the Relative Mean Error (RMS) in the roughness calibration, besides the values of hydraulic load and flow in permanent and transient regime, as well it can be seen that the hydraulic load is better shown to represent these points studied. When looking at the three best solutions of each objective function, it is noted that there is no direct relationship between the lower function value and the production of a smaller error, especially in the roughness calibration, besides that the roughness error is considerably higher than the hydraulic load, for example. It is noted that the application of the selected objective functions still cause a considerable RMS in the roughness calibration, even if this error does not propagate through the load, then it is to be noted that changes need to be made in these functions to better represent the reality, although show a good beginning for the study and that the advantages that the genetic algorithm brings to the calibration processes are always positive and should be explored.

Keywords: Objective function. Roughness. Hydraulic transient. Water distribution networks. Genetic Algorithms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das parcelas de energia por unidade de peso	32
Figura 2 - Linhas características no plano x-t	44
Figura 3 - Implicação das linhas características coma Condição de Courant	46
Figura 4 - Esquematisação do cruzamento de um ponto.....	54
Figura 5 - Esquematisação do cruzamento de dois pontos.....	54
Figura 6 - Esquematisação da mutação	56
Figura 7 - Exemplo de conversão de real em binário	58
Figura 8 - Representação de um cromossomo da população.....	60
Figura 9 - Rede 1 utilizada no estudo	72
Figura 10 - Rede 2 utilizada no estudo	74
Figura 11 - Arquivo de indexação dos tubos da Rede 1	80
Figura 12 - Arquivo de indexação dos tubos da Rede 2	80
Figura 13 - Captura de tela do programa R1	81
Figura 14 - Captura de tela do programa R2	83
Figura 15 - Exemplo de vetor solução para a Rede 1	85
Figura 16 - Exemplo de vetor solução para a Rede 2.....	86
Figura 17 - Captura de tela do programa R3	87
Figura 18 - Captura de tela do programa R1_Completo	88
Figura 19 - Captura de tela do programa R2_Completo	89
Figura 20 - Fluxograma da metodologia	89
Figura 21 - Rede 1 com numeração de cada seção.....	92
Figura 22 - Rede 2 com numeração de cada seção.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	95
Gráfico 2 – Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 Nó 3 Seção 4	96
Gráfico 3 – Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 4 Seção 3 da Rede 1	96
Gráfico 4 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	98
Gráfico 5 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 Nó 6 Seção14.....	98
Gráfico 6 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Nó 6 Seção 14 da Rede 1	99
Gráfico 7 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	100
Gráfico 8 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 Nó 7 Seção 8	100
Gráfico 9 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 7 Seção 8 da Rede 1	101
Gráfico 10 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	102
Gráfico 11 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 Nó 8 Seção 20	102
Gráfico 12 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 8 Seção 20 da Rede 1	103
Gráfico 13 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	104
Gráfico 14 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	105
Gráfico 15 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 1	105
Gráfico 16 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	107
Gráfico 17 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO 2 Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	107
Gráfico 18 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 6 Seção 14 Rede 1.....	108
Gráfico 19 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	109
Gráfico 20 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 1 Nó 7 Seção 8	110
Gráfico 21 - Comportamento da FO2 nas gerações no Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	110
Gráfico 22 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Nó 8 Seção 20	112
Gráfico 23 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 1 Nó 8 Seção 20	112
Gráfico 24 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 8 Seção 20 da Rede 1	113

Gráfico 25 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	114
Gráfico 26 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	115
Gráfico 27 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 1	115
Gráfico 28 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 6 Seção 14 da Rede 1	117
Gráfico 29 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	117
Gráfico 30 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 6 Seção 14 da Rede 1	118
Gráfico 31 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	119
Gráfico 32 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	120
Gráfico 33 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 7 Seção 8 da Rede 1	120
Gráfico 34 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	122
Gráfico 35 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	122
Gráfico 36 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 8 Seção 20 da Rede 10.....	123
Gráfico 37- Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	125
Gráfico 38 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	125
Gráfico 39 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 8 Seção 10 da Rede 2.....	126
Gráfico 40 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	127
Gráfico 41 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	128
Gráfico 42 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 4 Seção 8 da Rede 2.....	128
Gráfico 43 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	130
Gráfico 44 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	130
Gráfico 45 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 2.....	131
Gráfico 46 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	132
Gráfico 47 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	133
Gráfico 48 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 13 Seção 32 da Rede 2.....	133
Gráfico 49 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	135
Gráfico 50 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	135

Gráfico 51 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 8 Seção 10 da Rede 2	136
Gráfico 52 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 Nó 4 Seção 8	137
Gráfico 53 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 Nó 4 Seção 8	138
Gráfico 54 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 4 Seção 8 da Rede 2	138
Gráfico 55 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 Nó 3 Seção 4	140
Gráfico 56 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 Nó 3 Seção 4	140
Gráfico 57 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 2	141
Gráfico 58 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 Nó 13 Seção 32	142
Gráfico 59 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 Nó 13 Seção 32	143
Gráfico 60 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 13 Seção 32 da Rede 2	143
Gráfico 61 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 Nó 3 Seção 12	145
Gráfico 62 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 Nó 3 Seção 12	145
Gráfico 63 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 13 Seção 3 da Rede 12	146
Gráfico 64 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 Nó 4 Seção 8	147
Gráfico 65 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 Nó 4 Seção 8	148
Gráfico 66 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 4 Seção 8 da Rede 2	148
Gráfico 67 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 Nó 3 Seção 4	150
Gráfico 68 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 Nó 3 Seção 4	150
Gráfico 69 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 2	151
Gráfico 70 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 Nó 13 Seção 32	152
Gráfico 71 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 Nó 13 Seção 32	153
Gráfico 72 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 13 Seção 32 da Rede 2	153
Gráfico 73 – ER na rugosidade na calibração Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	155
Gráfico 74 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10	155
Gráfico 75 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	156
Gráfico 76 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	156
Gráfico 77 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	157

Gráfico 78 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	157
Gráfico 79 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 3 Rede 1	158
Gráfico 80 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 8 Rede 2	158
Gráfico 81 - Vazão transiente no Tubo 8 da Rede 1 calculada com rugosidades simuladas ..	159
Gráfico 82 - Vazão transiente no Tubo 12 da Rede 2 calculada com rugosidades simuladas	159
Gráfico 83 - ER na rugosidade na calibração Rede 1 Nó 6 Seção 14	160
Gráfico 84 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 Nó 4 Seção 8	160
Gráfico 85 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	161
Gráfico 86 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	161
Gráfico 87 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	162
Gráfico 88 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	162
Gráfico 89 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 6 Rede 1	163
Gráfico 90 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 6 Rede 2	163
Gráfico 91 - Vazão transiente no Tubo 7 da Rede 1 calculada com rugosidades simuladas ..	164
Gráfico 92 - Vazão transiente no Tubo 3 da Rede 2 calculada com rugosidades simuladas ..	164
Gráfico 93 - ER na rugosidade na calibração Rede 1 Nó 7 Seção 8	165
Gráfico 94 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 Nó 3 Seção 4	165
Gráfico 95 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	166
Gráfico 96 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	166
Gráfico 97 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	167
Gráfico 98 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	167
Gráfico 99 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 7 Rede 1	168
Gráfico 100 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 3 Rede 2	168
Gráfico 101 - Vazão transiente no Tubo 4 da Rede 1 calculada com rugosidades simuladas	169
Gráfico 102 - Vazão transiente no Tubo 2 da Rede 2 calculada com rugosidades simuladas	169
Gráfico 103 - ER na rugosidade na calibração Rede 1 Nó 8 Seção 20	170
Gráfico 104 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 Nó 13 Seção 32	170
Gráfico 105 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	171
Gráfico 106 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	171
Gráfico 107 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	172
Gráfico 108 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	172
Gráfico 109 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 8 Rede 1	173
Gráfico 110 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 13 Rede 2	173
Gráfico 111 - Vazão transiente no Tubo 5 da Rede 1 calculada com rugosidade simulada ...	174

Gráfico 112 - Vazão transiente no Tubo 16 da Rede 2 calculada com rugosidade simulada .174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de escoamento.....	34
Tabela 2 - Equações para cálculo do fator de atrito.....	34
Tabela 3 - Expressões de ψ de acordo com o tipo de conduto	42
Tabela 4 - Resumo dos operadores de crossover	55
Tabela 5 - Tipos de mutação	57
Tabela 6 - Representação em binário e real de duas variáveis	60
Tabela 7 - Características físicas da tubulação da Rede 1	73
Tabela 8 - Demandas e cotas dos nós da Rede 1	73
Tabela 9 - Características do reservatório R1 da Rede 1	73
Tabela 10 - Características físicas da tubulação da Rede 2	74
Tabela 11 - Demandas e cotas dos nós da Rede 2	75
Tabela 12 - Características do reservatório R1 da Rede 2	75
Tabela 13 - Rugosidades reais para tubos da Rede1	76
Tabela 14 - Rugosidades reais para tubos da Rede 2.....	76
Tabela 15 - Rugosidades absolutas equivalentes	77
Tabela 16 - Valores discretos das rugosidades absolutas em mm.....	78
Tabela 17 - Código para a indexação dos nós	79
Tabela 18 - Vazões obtidas no R1 para a Rede 1	81
Tabela 19 - Carga hidráulica obtida no R1 para a Rede 1	81
Tabela 20 - Vazões obtidas no R1 para a Rede 2	82
Tabela 21 - Carga hidráulica obtida no R1 para a Rede 2	82
Tabela 22 - Representação binária dos valores discretos da rugosidade	85
Tabela 23 - Parâmetros do algoritmo genético	86
Tabela 24 - Resumo dos nós e seções simulados.....	91
Tabela 25 - Nó e seções selecionados na Rede 2.....	93
Tabela 26 - Características do AG utilizadas no programa R3	94
Tabela 27 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	95
Tabela 28 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	95
Tabela 29 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	97
Tabela 30 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	97
Tabela 31 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	99
Tabela 32 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	100

Tabela 33 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	101
Tabela 34 - Valor da FO 3 e geração ótima para FO1 e Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	102
Tabela 35 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	103
Tabela 36 - Valor da FO 1 e geração ótima para FO2 e Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	104
Tabela 37 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	106
Tabela 38 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	106
Tabela 39 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	108
Tabela 40 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	109
Tabela 41 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	111
Tabela 42 - Valor da FO 2 e geração ótima para FO 2 e Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	111
Tabela 43 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	113
Tabela 44 - Valor da FO 3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 Nó 3 Seção 4.....	114
Tabela 45 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	116
Tabela 46 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 Nó 6 Seção 14.....	116
Tabela 47 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	118
Tabela 48 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 Nó 7 Seção 8.....	119
Tabela 49 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	121
Tabela 50 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 Nó 8 Seção 20.....	121
Tabela 51 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	123
Tabela 52 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	124
Tabela 53 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	126
Tabela 54 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	127
Tabela 55 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	129
Tabela 56 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	129
Tabela 57 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	131
Tabela 58 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	132
Tabela 59 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	134
Tabela 60 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 Nó 8 Seção 10.....	134
Tabela 61 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	136
Tabela 62 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	137
Tabela 63 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	139
Tabela 64 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	139
Tabela 65 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	141
Tabela 66 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	142

Tabela 67 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 Nó 3 Seção 12.....	144
Tabela 68 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 Nó 3 Seção 12.....	144
Tabela 69 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	146
Tabela 70 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 Nó 4 Seção 8.....	147
Tabela 71 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	149
Tabela 72 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 Nó 3 Seção 4.....	149
Tabela 73 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	151
Tabela 74 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 Nó 13 Seção 32.....	152
Tabela 69 – Três melhores valores de FO1 e seus EMRs em rugosidade e carga e vazão permanente.....	175
Tabela 70 – Três melhores valores de EMR na rugosidade e valor da FO1 correspondente .	175
Tabela 71 – Três melhores valores de FO2 e seus EMRs em rugosidade e carga e vazão permanente.....	175
Tabela 72 – Três melhores valores de EMR na rugosidade e valor da FO2 correspondente .	175
Tabela 73 – Três melhores valores de FO3 e seus EMRs em rugosidade e carga e vazão permanente.....	176
Tabela 74 – Três melhores valores de EMR na rugosidade e valor da FO3 correspondente .	176

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
BWCN	<i>Battle of The Water Calibration Networks</i>
DE	Evolução Diferencial
DO	Demanda de Oxigênio
EMR	Erro Médio Relativo
ER	Erro Relativo
FO	Função Objetivo
FORTRAN	<i>IBM Mathematical Formula Translation System</i>
NSGA-II	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
PSO	Otimização por Enxame de Partículas
PVC	Policloreto de Vinila
SCE-UA	<i>Shuffled Complex Evolution – University of Arizona</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRS	<i>Stochastic Remainder Sampling</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>

LISTA DE VARIÁVEIS

[M]	Unidade de Massa
[L]	Unidade de Comprimento
[T]	Unidade de Tempo
H	Carga Hidráulica [L]
γ	Peso Específico $[M]/([T][L]^2)$
z	Cota Topográfica [L]
V	Velocidade $[L]/[T]$
g	Aceleração da Gravidade $[L]/[T]^2$
ΔH	Perda de Carga [L]
C	Coefficiente de Hazen-Williams $[L]^{0,367}/[T]$
f	Fator de Atrito - adimensional
L	Comprimento [L]
D	Diâmetro [L]
Rey	Coefficiente de Reynolds - adimensional
ε	Rugosidade [L]
K	Módulo de Elasticidade Volumétrica do Fluido $[M]/([T]^2[L])$
Δh	Perda de Carga Localizada [L]
L_e	Comprimento Equivalente [L]
ρ	Massa Específica $[M]/[L]^3$
e	Espessura [L]
E	Módulo de Elasticidade do Material $[M]/([T]^2[L])$
Ψ	Parâmetro Adimensional Dependente das Propriedades Elásticas do Conduto
ν	Módulo de Poisson - adimensional
a	Celeridade $[L]/[T]$
NV	Número de Tubos da Rede
L1	Comprimento do Gene (bits)
NB	Comprimento do Cromossomo (bits)
FILHOS	Probabilidade de Aplicação do Elitismo (%)
PC	Taxa de Cruzamento (%)
PM	Probabilidade de Mutação (%)
Δt	Tamanho do Passo de Tempo [T]

NTEMPO Tempo de Aplicação do Transiente [T]

NG Número de Gerações

NC Tamanho da População

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Contextualização	25
1.2	Problematização e justificativa	26
1.3	Objetivos	27
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	27
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	27
1.4	Organização da dissertação	28
2	MODELO HIDRÁULICO	29
2.1	Escoamento em redes de distribuição de água	29
<i>2.1.1</i>	<i>Escoamento Permanente</i>	29
<i>2.1.2</i>	<i>Escoamento Transiente</i>	30
2.2	Equilíbrio hidráulico	31
2.3	Regime de escoamento transiente	36
<i>2.3.1</i>	<i>Equação da continuidade</i>	37
<i>2.3.2</i>	<i>Equação da quantidade de movimento</i>	39
<i>2.3.3</i>	<i>Celeridade</i>	41
2.4	Método das características	42
<i>2.4.1</i>	<i>Equação das características</i>	43
<i>2.4.2</i>	<i>Convergência e estabilidade</i>	45
<i>2.4.3</i>	<i>Incremento de tempo</i>	47
<i>2.4.4</i>	<i>Condições de contorno</i>	47
3	ALGORITMOS GENÉTICOS	49
3.1	Terminologia	51
3.2	Estrutura	51
<i>3.2.1</i>	<i>População inicial</i>	51
<i>3.2.2</i>	<i>Seleção</i>	52
<i>3.2.3</i>	<i>Crossover</i>	53
<i>3.2.4</i>	<i>Mutação</i>	56
<i>3.2.5</i>	<i>Tipos de representação</i>	57
<i>3.2.5.1</i>	<i>Representação binária</i>	57
<i>3.2.5.2</i>	<i>Representação real</i>	60
<i>3.2.6</i>	<i>Crítérios de parada</i>	60
<i>3.2.7</i>	<i>Ferramentas de otimização tradicionais e os algoritmos genéticos</i>	61

4	FUNÇÕES OBJETIVOS EM PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO E OTIMIZAÇÃO	62
4.1	Conceitos e formulação	62
4.2	Funções objetivo na literatura	63
5	METODOLOGIA	72
5.1	Características físicas das redes	72
5.1.1	Rede 1	72
5.1.2	Rede 2	74
5.2	Rugosidades reais	75
5.3	Indexação	78
5.4	Cargas e vazões em regime permanente	80
5.5	Cargas e vazões em regime transiente	82
5.6	Funções Objetivo	83
5.7	Configuração do Algoritmo Genético	84
5.8	Simulação da rugosidade	87
5.9	Avaliação da eficiência da calibração	87
5.10	Cálculo das cargas e vazões permanentes com rugosidades calculadas utilizando AG	88
5.11	Cálculo das cargas e vazões transientes com rugosidades calculadas utilizando AG	88
5.12	Fluxograma de aplicação da metodologia	89
5.13	Nós, seções e tubos estudados	91
6	RESULTADOS OBTIDOS	94
6.1	Rede 1	94
6.1.1	Função Objetivo 1	94
6.1.1.1	Nó 3 Seção 4	94
6.1.1.2	Nó 6 Seção 14	97
6.1.1.3	Nó 7 Seção 8	99
6.1.1.4	Nó 8 Seção 20	101
6.1.2	Função Objetivo 2	103
6.1.2.1	Nó 3 Seção 4	103
6.1.2.2	Nó 6 Seção 14	106
6.1.2.3	Nó 7 Seção 8	108
6.1.2.4	Nó 8 Seção 20	111

6.1.3	<i>Função Objetivo 3</i>	113
6.1.3.1	<i>Nó 3 Seção 4</i>	113
6.1.3.2	<i>Nó 6 Seção 14</i>	116
6.1.3.3	<i>Nó 7 Seção 8</i>	118
6.1.3.4	<i>Nó 8 Seção 20</i>	121
6.2	Rede 2	123
6.2.1	<i>Função Objetivo 1</i>	123
6.2.1.1	<i>Nó 8 Seção 10</i>	123
6.2.1.2	<i>Nó 4 Seção 8</i>	126
6.2.1.3	<i>Nó 3 Seção 4</i>	129
6.2.1.4	<i>Nó 13 Seção 32</i>	131
6.2.2	<i>Função Objetivo 2</i>	134
6.2.2.1	<i>Nó 8 Seção 10</i>	134
6.2.2.2	<i>Nó 4 Seção 8</i>	136
6.2.2.3	<i>Nó 3 Seção 4</i>	139
6.2.2.4	<i>Nó 13 Seção 32</i>	141
6.2.3	<i>Função Objetivo 3</i>	144
6.2.3.1	<i>Nó 8 Seção 10</i>	144
6.2.3.2	<i>Nó 4 Seção 8</i>	146
6.2.3.3	<i>Nó 3 Seção 4</i>	148
6.2.3.4	<i>Nó 13 Seção 32</i>	151
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	154
7.1	Grupo 1	154
7.2	Grupo 2	159
7.3	Grupo 3	165
7.4	Grupo 4	169
7.5	Comparação das três melhores gerações	175
7.6	Avaliação da integração entre as funções objetivo e os parâmetros estudados da rede	176
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	178
	REFERÊNCIAS	181

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As fontes de água, sejam elas rios, lagos, lagoas, etc., foram sempre decisivas para que existisse o assentamento das populações humanas em várias regiões ao redor do globo. Por ser de extrema importância para a vida no geral, esse líquido regeu a distribuição dos seres humanos por muito tempo. O crescimento populacional e o afastamento das aglomerações das proximidades da água levaram a necessidade de transportá-la para locais cada vez mais distantes e em áreas maiores, evoluções tecnológicas permitiram melhorar esses trabalhos, chegando até os tempos mais modernos com as redes de distribuição de água em condutos forçados, sistemas esses que são cada vez mais demandados com o rápido aumento populacional vivido nos últimos tempos. Logo, os estudos dos pesquisadores por muito tempo estavam ligados ao dimensionamento de redes, desenvolvendo modelos hidráulicos para o cálculo de diâmetros e vazões. O aspecto econômico passou a desempenhar um papel relevante para uma otimização do sistema (ARAÚJO, 2003).

Nessas redes, utilizadas tanto para o abastecimento humano como industrial, a água pode trabalhar em regime não-permanente, onde ocorrem mudanças de pressão e vazão, com o tempo, segundo Araújo (2003) essas pressões geradas pelos transientes chegam a ser, frequentemente, três vezes superiores aos valores de pressões em operações normais. As mudanças estão relacionadas com a variação nas taxas de consumo final e nos níveis dos reservatórios, entre outros fatores. Porém, o tempo em que essas inconstâncias, que ocorrem entre dois períodos de regime permanente sucessivos, são negligenciadas, devido à complexidade que aporta aos estudos a não-permanência do regime. Durante muito tempo os pesquisadores levaram em conta essas dificuldades e acabaram deixando de lado o regime transiente em seus cálculos.

As equações que governam o regime transiente são conhecidas, mas de difícil solução analítica ou exata, acarretando na desistência de utilização das mesmas. Conforme Rocha (2013) com o advento dos computadores tornou-se possível a solução numérica das equações básicas que descrevem o transiente hidráulico. Assim, com esses avanços, os estudos começaram a incluir os regimes transientes em seus trabalhos relacionados a sistemas hidráulicos, porém vê-se uma escassez em tratar os mesmos juntamente a calibrações de redes de distribuição de água. A importância do estudo desse sistema pode ser relacionada ao tema

desse trabalho no que envolve a calibração da rugosidade utilizando algumas funções objetivos diferentes.

Para que se chegue a esse resultado final de simulação do comportamento de uma rede hidráulica os parâmetros devem ser obtidos de forma eficiente a fim de que seja possível uma ótima aproximação entre os valores calculados e os valores reais. Um dos propósitos dessa simulação são as ampliações de rede, as mudanças nos traçados ou também a substituição de tubulações, sendo assim visa-se que problemas futuros não acontecem como o rompimento de trechos, a perda de água, chegando até mesmo ao extremo da falta de água em determinados locais.

1.2 Problematização e justificativa

O crescimento e o acréscimo na complexidade das redes de distribuição de água vistos nos últimos anos, devido ao grande crescimento populacional tem levado aos pesquisadores um grande problema em relação ao dimensionamento e a gerência dessas redes. Convencionados a fazer uma análise econômica, pois nos dias de hoje esse parâmetro passou a ter uma importância jamais vistas nesses projetos, novas medidas começam a ser tomadas para diminuir os custos sem deixar de apresentar trabalhos que respeitem as normas. O desconhecimento pelas companhias de distribuição de muitos dos parâmetros físicos de suas redes dificulta o monitoramento das mesmas acarretando na não otimização da água.

A complexidade das redes de distribuição de água nos últimos anos aumentou seguindo o ritmo do crescimento populacional, inserindo nos processos de decisão e dimensionamento um novo parâmetro, o econômico.

Essas redes têm um peso enorme na implantação do sistema público de abastecimento de água, o que tem levando aos profissionais da área a estudos que mostrem um menor investimento e uma maior eficiência do sistema, sem deixar de seguir as normas necessárias.

Os transientes hidráulicos foram negligenciados por bastante tempo no momento de projeto das redes, por apresentarem um nível de complexidade matemática considerável. Outros fatores que contribuíam para esse descuido com tais parâmetros foram a consideração de que eles não tinham muitos efeitos consideráveis nas redes no geral e o alto custo de implantação de mecanismos que aliviassem a severidade dos transientes.

A monitoração dos parâmetros físicos das redes hidráulicas pelos órgãos responsáveis aprimorou-se bastante nos últimos tempos, mas há, ainda, uma incerteza dessas companhias em relação à caracterização dos elementos físicos da rede. Esse desconhecimento, seja ele total ou parcial dos elementos (material do tubo, diâmetro, rugosidade e fator de atrito), na rede como um todo ou somente em áreas concentradas pode dificultar o funcionamento correto da rede. Justamente com a finalidade de tornar conhecidos esse parâmetro desejado é um processo que se chama calibração que pode ser interpretado como um procedimento de modelagem.

O estudo dos transientes hidráulicos também se mostra importante economicamente pelos prejuízos que são causados à rede por esse fenômeno pouco estudado e pouco considerado no momento de dimensionamento nos dias de hoje.

Ainda de acordo com Zahed Filho (1990) a rugosidade é o parâmetro que se apresenta como um dos mais difíceis de ser identificados entre aqueles parâmetros que são necessários para reproduzir o comportamento hidráulico, já que a dinamicidade de suas características exige que haja um levantamento abrangente e contínuo sobre o sistema completo.

No processo de calibração e otimização, a função objetivo desempenha um importante papel como avaliadora dos resultados obtidos, por esse motivo, elegeu-se essa etapa como a central no presente estudo. Essa função detém o poder de decidir se o cromossomo irá sobreviver na população ou não (ARAÚJO, 2003). Sabe-se, também, da importância que a função objetivo tem no bom desempenho de um processo de calibração, como também na confiabilidade que existirá nos resultados obtidos por esse processo (NEVES, 2007).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo principal estudar a calibração da rugosidade em duas redes de distribuição de água submetidas ao regime transiente utilizando algoritmos genéticos e diferentes funções objetivos para que se faça um estudo comparativo.

1.3.2 Objetivos específicos

Esse trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

1. Calcular as cargas hidráulicas permanentes e transientes nos nós;

2. Calcular as vazões permanentes e transientes nos tubos;
3. Selecionar e adaptar três funções objetivo para serem utilizadas no estudo;
4. Calcular os valores das funções objetivo quando da identificação das rugosidades;
5. Avaliar o desempenho da ferramenta Algoritmo Genético nas duas redes selecionadas;
6. Comparar as melhores soluções de cada função objetivo em nós selecionados das duas redes; e
7. Comparar as segundas e melhores soluções de cada função objetivo em um nó selecionado de uma das duas redes.

1.4 Organização da dissertação

O capítulo 01 possui uma introdução ao tema proposto, com uma pequena contextualização, o problema e a justificativa do tema, além dos objetivos (geral e específicos) que norteiam todo o trabalho.

A segunda parte, que apresenta uma revisão bibliográfica da literatura dos temas pertinentes ao trabalho, está assim dividida:

- a) Capítulo 02: apresenta os modelos hidráulicos e as equações básicas que regem os escoamentos permanentes e transientes;
- b) Capítulo 03: contém o histórico e os princípios básicos dos algoritmos genéticos; e
- c) Capítulo 04: apresenta uma explanação do papel da função objetivo, com exemplos de aplicações e uma pesquisa na literatura das principais funções usadas no decorrer dos anos.

A metodologia empregada no presente trabalho está apresentada no capítulo 05, mostrando os principais passos e as decisões tomadas durante a execução da pesquisa.

No capítulo 06 se encontram os resultados que foram objetivadas e encontradas ao fim da aplicação da metodologia proposta. No capítulo 07 tem-se a análise dos resultados encontrados. No capítulo 08 estão presentes as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 MODELO HIDRÁULICO

Uma rede de distribuição é uma “unidade do sistema de abastecimento constituída de tubulações, componentes e equipamentos acessórios, destinada a disponibilizar água potável aos consumidores” (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2017, p. 8).

Para melhor calibrar uma rede, como foi descrita anteriormente é necessário conhecer como se dá o comportamento do fluido durante o escoamento, como também as suas principais características e variações.

2.1 Escoamento em redes de distribuição de água

Segundo Porto (2006) os escoamentos, em hidráulica, recebem diversas classificações a depender das características relacionadas, podendo ser: laminar, turbulento, unidimensional, bidimensional, rotacional, irrotacional, permanente, variável, uniforme, variado, livre, forçado, fluvial, torrencial, entre outro. No caso da água, devido à sua baixa viscosidade o escoamento tende a ser turbulento em que as partículas se deslocam em trajetórias irregulares com movimentos aleatórios, diferentemente do escoamento laminar em que as partículas se movimentam em trajetórias bem definidas.

Por ocorrer dentro de tubulações e, geralmente, possuírem pressões superiores aquelas da atmosfera, o escoamento de água em tubulações é dito forçado e qualquer mudança que ocorra em um ponto alterará a pressão e a velocidade do fluido.

2.1.1 Escoamento Permanente

Em se tratando de regime permanente, os modelos hidráulicos estão baseados nas leis de conservação da massa e da energia, sendo limitados pelas condições de contorno e pela quantidade de parâmetros indeterminados. O regime permanente é caracterizado pela não variação das componentes de pressão e velocidade com tempo.

Nesse estado permanente a resolução dos problemas de rede de distribuição se atingindo quando:

- a) A soma algébrica das vazões nos nós é igual a zero;
- b) A carga hidráulica de um dado nó é igual àquela dos tubos que nele estão conectados; e
- c) A relação entre perda de carga e vazão é satisfeita para cada um dos elementos da rede de distribuição.

2.1.2 Escoamento Transiente

O transiente hidráulico acontece quando ocorre a mudança de um estado permanente para outro, esses distúrbios podem acontecer por alterações planejadas ou acidentais nas configurações do equipamento artificial ou por mudanças nas entradas ou saídas de um sistema natural. Chaudhry (2014) lista os principais exemplos de transientes em sistemas de engenharia:

- a) Abertura e fechamento de válvulas em tubulações;
- b) Ligar ou desligar bombas em sistemas de bombeamento;
- c) Ligar uma turbina hidráulica;
- d) Vibrações das palhetas de um rotor;
- e) Repentinamente abrir ou fechar as comportas de um canal;
- f) Falha ou colapso de uma barragem; e
- g) Aumentos repentinos no rio ou esgoto devido às chuvas repentinas.

Segundo Righetto (1972) e Chaudhry (1987) apud Santos (2000) algumas hipóteses são necessárias para o desenvolvimento teórico de obtenção das equações da continuidade e da quantidade de movimento, são elas:

- a) O escoamento da água na tubulação é considerado unidimensional e, na seção transversal do conduto, a distribuição de pressão é constante;
- b) O módulo de elasticidade do material da tubulação é constante e as deformações de elasticidade da tubulação, em decorrência da variação de pressão são consideradas pequenas e são regidas pela lei de Hooke;
- c) O módulo de elasticidade volumétrica do líquido é constante, sendo a variação de seu volume unitário proporcional ao aumento ou diminuição da pressão;
- d) A água conserva o seu estado líquido sem ocorrência de vaporização sob qualquer circunstância;
- e) A carga cinética ($\frac{V^2}{2g}$) é desprezível em relação às demais; e
- f) As expressões para o cálculo da perda de carga em regime permanente são consideradas válidas na condição do regime não permanente.

2.2 Equilíbrio hidráulico

Para que se atinja o equilíbrio hidráulico duas leis físicas devem ser obedecidas pelo escoamento a lei da conservação da massa e a lei da conservação da energia, estando essas associadas à perda de carga e à vazão.

A lei de conservação da energia é apresentada a seguir, também conhecida como figura de Bernoulli para líquidos perfeitos e em regime permanente, representa a constância do valor da carga total (H), por unidade de peso do líquido, ao longo da trajetória de escoamento (Porto, 2006):

$$H = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} + \Delta H \quad (1)$$

Em que:

H é a carga total por unidade de peso;

$\frac{p}{\gamma}$ é a energia de pressão por unidade de peso;

z é a energia potencial por unidade de peso;

$\frac{V^2}{2g}$ é a energia cinética por unidade de peso; e

ΔH é a perda de carga por unidade de peso, devido aos mais diversos fatores.

A lei de conservação de massa é dada por:

$$\sum_{j \in J_i} (Q_{ij}) - C_i = 0 \quad (2)$$

Em que:

J_i representa o conjunto de condutos conectados ao nó i ;

C_i representa a demanda no nó i ; e

Q_{ij} representa a vazão que chega ao nó i pelo conduto j , positiva se afluente e negativa se efluente.

Ao se ampliar a Equação 1 para que represente o caminhamento entre dois pontos, desprezando-se as perdas de carga localizada, tem-se:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (3)$$

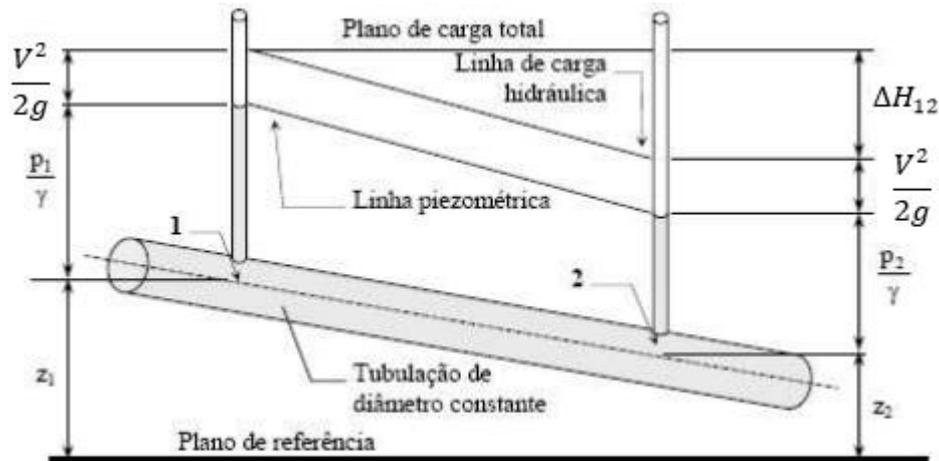
Em que:

O índice 1 e 2 representam os valores que as grandezas apresentam nas seções 1 e 2 respectivamente; e

ΔH_{12} representa a perda de carga entre essas duas seções.

Por cada parcela representa energia por unidade de peso e terem como unidade uma dimensão de comprimento é possível fazer uma representação geométrica de suma importância para o entendimento dos fenômenos que regem o escoamento hidráulico, representação essa apresentada na figura 1 seguir:

Figura 1- Representação das parcelas de energia por unidade de peso



Fonte: Adaptado de Hidráulica [20--]

De acordo com Brunetti (2008) a linha de carga efetiva ou linha piezométrica é aquela dada pela adição da cota geométrica com a energia ou a carga de pressão, tendo cada valor individualmente o nome de cota ou carga piezométrica. Ao acrescentar ao valor anterior aquele correspondente à energia ou carga cinética tem-se a linha de carga hidráulica ou linha de energia, que representa a energia mecânica total por peso do líquido. Para os fluidos reais em escoamento permanente existe a perda de carga ao longo do escoamento, logo essas linhas não são constantes e diminuem com o sentido do movimento e a diferença entre dois pontos situados sobre a mesma linha representa a perda de carga entre esses dois pontos, como representado na figura 1.

Segundo Porto (2006) estas são algumas considerações importantes que podem ser feitas sobre as linhas anteriormente apresentadas:

- A linha piezométrica pode coincidir ou até mesmo estar abaixo da trajetória, no primeiro caso indicando um escoamento em superfície livre e no segundo, pressões abaixo da atmosfera. Isso ocorre devido a escala que normalmente é utilizada, a escala efetiva;
- As parcelas da Equação 3 devem ser representadas perpendicularmente ao plano horizontal, não tendo importância a possível curvatura que a trajetória possa ter;

- c) Para cada seção do conduto, a diferença entre a cota piezométrica e a cota geométrica é a carga de pressão disponível, podendo esse valor ser positivo, nulo ou negativo, a depender da situação;
- d) A linha de energia sempre decai no sentido do escoamento, mudando somente se ocorrer a inserção de uma bomba, que dará energia externa ao escoamento. Já a linha piezométrica pode não acompanhar esse comportamento, como quando ocorre mudança na área da seção transversal que promove um crescimento da velocidade na seção; e
- e) Normalmente a perda de carga entre dois pontos é dada pela perda de energia total, com exceção de quando o escoamento é forçado e permanente em seção geométrica constante na tubulação, assim a energia cinética também é constante, assim as linhas de energia e piezométricas são paralelas, logo podendo ser usada também para representação da perda de carga.

A perda de carga é dada pela fórmula de Darcy-Weisbach, mais conhecida como fórmula universal, representada na Equação 4 a seguir:

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Em que:

ΔH é a perda de carga;

f é o fator de atrito;

L é comprimento da tubulação;

D é o diâmetro do tubo;

V é a velocidade média na seção; e

g é a aceleração da gravidade.

A classificação do escoamento (TABELA 1) entre laminar e turbulento é dado pelo número de Reynolds, expressão adimensional dada pela Equação 5, seguinte:

$$Rey = \frac{VD}{\nu} \quad (5)$$

Em que:

Rey é o número de Reynolds;

V é a velocidade média na seção;

D é o diâmetro da seção; e

ν é a viscosidade dinâmica da água.

Tabela 1- Tipos de escoamento

Tipo de escoamento	Intervalo do número de Reynolds
Laminar	$Rey \leq 2300$
De Transição	$2300 < Rey < 4000$
Turbulento	$Rey \geq 4000$

Fonte: Adaptado de Porto (2006)

Para o cálculo do fator de atrito são necessárias diversas equações a depender do tipo do escoamento, como pode ser visto na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2- Equações para cálculo do fator de atrito

Escoamento Laminar	$f = \frac{64}{Rey}$
Escoamento de transição	Utilizar Diagrama de Moody
Escoamento turbulento	$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) \right]^2}$

Fonte: Adaptado de Porto (2006)

Sawmee (1993) apresentou uma equação para o cálculo do fator de atrito que não necessita da diferenciação apresentada na Tabela 2 anterior, uma vez que engloba todos os tipos de escoamento, segue a fórmula:

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

Em que:

f é o fator de atrito;

Rey é o número de Reynolds;

D é o diâmetro da seção; e

ε é a rugosidade na seção.

Outra opção para o cálculo da perda de carga é da pela equação de Hazen-Williams, uma das formas empíricas mais utilizada e apresentada a seguir:

$$\Delta H = 10,65 \frac{LQ^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (7)$$

Em que:

ΔH é a perda de carga;

L é comprimento da tubulação;

D é o diâmetro do tubo;

Q é a vazão; e

C é o coeficiente de rugosidade que depende da natureza e estado das paredes do tubo.

As perdas de carga localizadas, até agora desconsideradas, podem ser calculadas de duas maneiras diferentes. A primeira é a expressão geral das perdas localizadas, que é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

Em que:

Δh é a perda de carga localizada;

K é o coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds, da rugosidade da parede; e

g é a aceleração da gravidade.

O segundo método é conhecido como método dos comprimentos equivalentes, nele as singularidades são expressas como comprimentos retilíneos que provocam a mesma perda de carga que o acessório, e é dado pela seguinte expressão:

$$L_e = \frac{KD}{f} \quad (9)$$

Em que:

L_e é o comprimento equivalente;

K é o coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds, da rugosidade da parede;

D é o diâmetro do tubo; e

f é o fator de atrito;

Segundo Silva (2006) para se resolver problemas de hidráulica que envolvam a análise das condições de equilíbrio de redes ramificadas é necessário somente que se solucione as equações de continuidade nos nós, se calcule as vazões de modo separado para cada trecho da rede, em seguida utilizar-se da relação entre vazão e perda de carga para, por fim, se determinar as cotas piezométricas dos nós.

Já para uma rede malhada que possui j tubos e i nós, necessita-se calcular j equações que estejam relacionadas com a perda de carga nos tubos, além de i equações de continuidade

nos nós. Assim os cálculos das redes malhadas se tornam mais complexos devido a não-linearidade das equações de perda de carga, necessitando-se, portanto, da criação de métodos especiais para a resolução desse tipo de problema.

Um dos métodos mais utilizados para a resolução desse tipo de problema é o apresentado por Hardy-Cross, que consiste de um processo iterativo onde uma só equação é resolvida repetidamente até que se observe a convergência obedecendo a tolerância desejada.

Matin e Peters (1963) apresentaram uma outra metodologia em que um sistema de equações lineares deve ser resolvido para se obter a resposta, aumentando a eficiência e convergência quando comparado ao método anterior.

Um terceiro método conhecido como teoria linear, foi proposto por Wood e Charles (1972), nele ocorre uma resolução simultânea de um sistema de equações de conservação de energia, tomando-se um valor de vazão aproximado para cada trecho, sendo também um processo iterativo que prossegue até que se atinja a tolerância, apresentando facilidade de programação e alta velocidade para convergir.

Porto (2006) afirma que o método de Hardy-Cross se destaca dos outros que também utilizam aproximações sucessivas por apresentar um desenvolvimento numérico que pode ser feito manualmente em sistemas simples, além de possuir um significado físico que promove uma melhor compreensão dos dados e etapas intermediários do processo.

2.3 Regime de escoamento transiente

O escoamento em regime transiente em tubulações forçadas é dado por equações diferenciais, partindo dessa premissa a dificuldade de resolução e a negligência dada ao estudo do regime para o projeto das redes. Esse fenômeno é descrito pela Equação da Continuidade e pela Equação da Quantidade de Movimento, as duas devem resolvidas ao mesmo tempo, essas equações fazem parte de um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico não sendo possível obter-se uma solução exata, somente por métodos numéricos desenvolvidos para solucionar esses sistemas em questão.

Existem vários métodos utilizados: Método das Características, Método das Diferenças Finitas, Método dos Elementos Finitos, Método Espectral e o Método dos Elementos de Contorno. Segundo Chaudhry (2014) o Método das Características tornou-se o mais popular entre os cientistas do meio, por sua facilidade de simular a onda íngreme, a ilustração da propagação da onda, a facilidade de programação e eficiência de cálculos. Por ser um método de grande importância na solução de complexos sistemas de engenharia a sua utilização para o modelo matemático de transientes hidráulicos é justificado de acordo com o

mesmo autor.

2.3.1 Equação da continuidade

Tomando como base o desenvolvimento proposto por Chaudhry (2014) a equação da continuidade é aqui mostrada. A lei da conservação de massa é aplicada a um volume de controle, levando-se em consideração um fluido ligeiramente compressível dentro de um conduto com paredes linearmente elásticas. O volume o interior do tubo pode variar de acordo com a mudança de pressão e a superfície estudada está compreendida entre duas seções (1 e 2).

Considerando que essas duas seções estejam fixas e distantes entre si de Δx e uma deformação axial da seção transversal como função do tempo, a diferença de descarga fluida, num instante qualquer t , é iguala variação de massa por unidade de tempo:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} \Delta x + (\rho AV)_2 - (\rho AV)_1 = 0 \quad (10)$$

Em que:

$$\Delta x = x_1 - x_2$$

Dividindo-se a Equação 10 por Δx e fazendo $\Delta x \rightarrow 0$ tem-se:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

Expandindo a Equação 11:

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial A}{\partial t} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

Sabe-se que:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} \quad (13)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (14)$$

Substituindo as Equações 13 e 14 na Equação 12 temos:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

Considerando K como sendo o módulo de elasticidade volumétrica do fluido, dado por:

$$K = \frac{dp}{\frac{d\rho}{\rho}} \quad (16)$$

Tem-se que:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \quad (17)$$

Sendo e a espessura da parede do tubo, E o módulo de elasticidade do material do tubo, D o diâmetro do conduto e p a pressão, tem-se que:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{D}{eE} \frac{dp}{dt} \quad (18)$$

Portanto a Equação 15 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \left(1 + \frac{K D}{E e} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

Sabe-se que o quadrado da celeridade da onda em uma tubulação é dado por:

$$a^2 = \frac{K}{\rho \left(1 + \frac{DK}{eE} \right)} \quad (20)$$

Substituindo a Equação 20 na Equação 19, tem-se que a Equação da Continuidade definida por:

$$\frac{dp}{dt} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \partial a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

Em casos práticos o termo $V \frac{\partial p}{\partial x}$ é pouco influente, o que permite que a Equação 21 seja expressa em termos de vazão e de carga piezométrica:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (22)$$

Em que:

$\frac{\partial H}{\partial t}$ é a variação do fluxo de massa;

$\frac{\partial Q}{\partial x}$ é a variação de massa; e

A é a celeridade de propagação das ondas de pressão e velocidade durante o transitório hidráulico.

2.3.2 Equação da quantidade de movimento

Utilizando a segunda lei de Newton para a dedução da Equação da Quantidade de Movimento, aplicamos ela em uma tubulação com água sob pressão em regime permanente com volume controlado, portanto o líquido estará limitado por duas seções distantes Δx .

Aplicando o teorema do valor médio à segunda lei de Newton, a Equação da Quantidade de Movimento fica:

$$\frac{\partial(\rho AV)}{\partial t} + \frac{(\rho AV^2)_2 - (\rho AV^2)_1}{\Delta x} = \frac{\sum F}{\Delta x} \quad (23)$$

Em que:

ρ é a massa específica do fluido;

A é a área da seção transversal do tubo;

V é a velocidade média do escoamento;

Existem várias forças atuando no sistema: forças de pressões nas seções 1 e 2, força de alargamento ou encurtamento, força peso e a força devido ao atrito, adotando-se o sentido positivo como aquele paralelo ao fluxo da água temos o equilíbrio dado por:

$$\sum F = F_{p1} - F_{p2} - F_{p12} - F_{wx} - F_s \quad (24)$$

Em que:

$F_{p1} = p_1 A_1$, é a força de pressão na seção 1;

$F_{p2} = p_2 A_2$, é a força de pressão na seção 2;

$F_{p12} = (p_1 + p_2)(A_1 - A_2)0,5$, é a força de alargamento ou encurtamento;

$F_{wx} = \rho g A(x_2 - x_1)\text{sen}\theta$, é a componente da força peso na direção X;

$F_s = \tau_0 \pi D(x_2 - x_1)$ é a força devido ao atrito nas paredes do tubo.

Com a substituição das forças acima citadas na Equação 15, após reescrevendo na Equação 14 e fazendo $\Delta x \rightarrow 0$, obtemos:

$$\frac{\partial(\rho AV)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho AV^2)}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \text{sen}\theta + \tau_0 \pi D = 0 \quad (25)$$

A tensão de cisalhamento gera uma perda de carga, considerando uma tensão de cisalhamento média:

$$\tau_0 = \rho f \frac{V|V|}{8} \quad (26)$$

Onde f é o coeficiente de Darcy-Waisbach, definido em função da velocidade característica do escoamento não permanente e da rugosidade relativa do material da tubulação.

Substituindo a tensão de cisalhamento média na Equação 25, chegamos a:

$$V \left[\frac{\partial(\rho AV)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho AV^2)}{\partial x} \right] + \rho A \frac{\partial V}{\partial t} + \rho AV \frac{\partial V}{\partial x} + A \frac{\partial d}{\partial x} + \rho g A \text{sen}\theta + \rho A f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (27)$$

Como visto na Equação da Continuidade, os termos entre colchetes na Equação 27 são nulos, logo se dividirmos a Equação 27 por ρA obtemos a Equação da Quantidade de Movimento:

$$V \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \text{sen}\theta + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (28)$$

Como visto anteriormente em casos práticos o termo $V \frac{\partial \rho}{\partial x}$ pouco influi permitindo reescrever a equação como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (29)$$

Em que:

$\frac{\partial Q}{\partial t}$ é a variação da aceleração do movimento,

$gA \frac{\partial H}{\partial x}$ é a variação do gradiente de pressão e

$\frac{f}{2DA} Q|Q|$ representa os efeitos decorrentes da dissipação de energia.

2.3.3 Celeridade

Halliwell (1963) apresentou a seguinte Equação 30 para o cálculo da celeridade, que depende além das propriedades elásticas do conduto (tamanho, espessura e material), das condições de contorno externas (tipo de suporte e graus de liberdade ao movimento longitudinal do tubo), além das características do fluido (presença de ar e compressibilidade):

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left(1 + \frac{K}{E} \Psi \right)}} \quad (30)$$

Em que:

K é o módulo de elasticidade volumétrica do fluido;

E é o módulo de elasticidade do material da tubulação;

ρ é a massa específica do fluido; e

ψ é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto.

Os valores de ψ estão representados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Expressões de ψ de acordo com o tipo de conduto

Tipo de conduto		Expressões de ψ
Conduto Rígido		$\Psi = 0$
Conduto Elástico		
Parede espessa	Ancorado contra a movimentação longitudinal em toda a extensão	$\psi = 2(1 + \nu) \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{2\nu R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right)$
	Ancorado contra movimentação longitudinal na extremidade final	$\psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + 1,5R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{\nu(R_o^2 + R_i^2)}{R_o^2 - R_i^2} \right)$
	Com junta de dilatação	$\psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \nu \right)$
Paredes finas	Ancorado contra a movimentação longitudinal em toda a extensão	$\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2)$
	Ancorado contra movimentação longitudinal na extremidade final	$\psi = \frac{D}{e} (1 - 0,5\nu)$
	Com junta de dilatação	$\psi = \frac{D}{e} (1 - 0,5\nu)$
Túnel de rocha	Sem revestimento	$\Psi = 1$
	Com revestimento metálico	$\psi = \frac{DE}{GD + Ee}$
Concreto reforçado		$\psi = E_r e_c + \frac{A_s}{l_s}$

Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014)

2.4 Método das características

Esse método permite transformar as equações da continuidade e da quantidade de movimento acima mostradas, que são diferenciais parciais em quatro equações diferenciais totais, sendo essas expressas em forma de diferença finita utilizando o método de intervalos de

tempo específicos e as soluções são obtidas por meio computacional. Do fato das condições de contorno serem facilmente programadas e o critérios de estabilidade serem pré-estabelecidos, além de ser o método com a melhor precisão, esse método se mostra o mais vantajoso (STREETER e WYLIE, 1978).

2.4.1 Equação das características

Repetindo a Equação 13 e multiplicando a Equação 14 por gA obtemos:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (31)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (32)$$

Utilizando a combinação linear mostrada na Equação 24 nas Equações 22 e 23, temos:

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (33)$$

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (34)$$

Sendo a vazão $Q(x,t)$ e a carga $H(x,t)$ em função da posição e do tempo e são soluções das equações 13 e 14, pela Regra da Cadeia temos que as derivadas totais são:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (35)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (36)$$

O parâmetro λ é definido a partir das últimas duas equações como dependente de x e t , logo:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \Rightarrow \lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (37)$$

Podemos reescrever a Equação 34 como:

$$L = \frac{dQ}{dt} + \lambda gA \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (38)$$

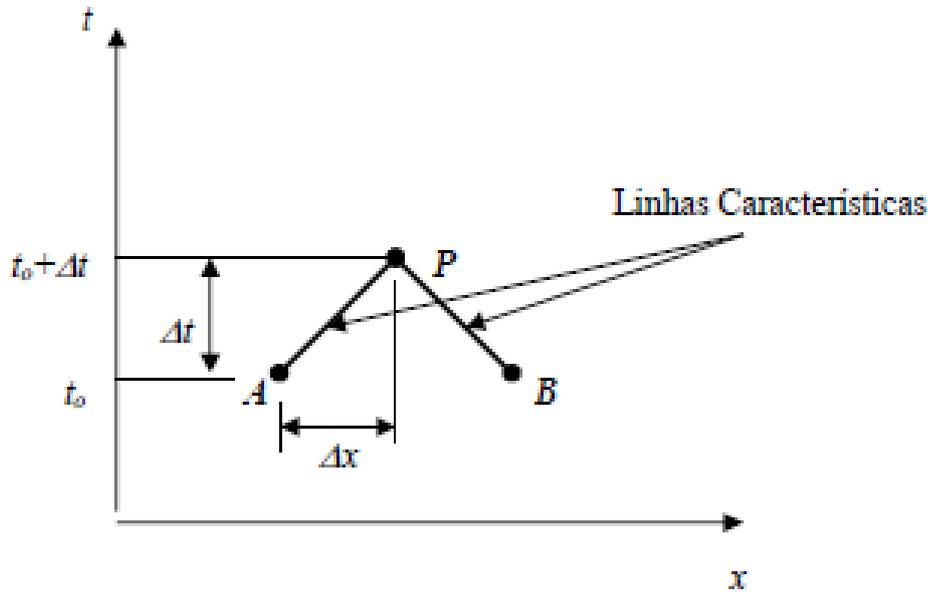
Com o valor de λ obtido na Equação 37 substituído na Equação 38 encontramos as equações diferenciais ordinárias do Método das Características:

$$L_1^* = \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad \text{Se } \frac{dx}{dt} = a \quad (39)$$

$$L_2^* = \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad \text{Se } \frac{dx}{dt} = -a \quad (40)$$

Segundo Araújo (2003) essas duas relações representam duas linhas retas com inclinações $\pm 1/a$ quando em um plano x-t, sendo essas duas curvas conhecidas como linhas características. Elas dividem o plano em duas regiões como podemos ver na figura 2.

Figura 2 - Linhas características no plano x-t



Fonte: Araújo (2003)

Segundo Streeter e Wylie (1978) quando integramos as equações 39 e 40 por diferenças finitas de primeira ordem obtemos as seguintes equações:

Para o seguimento AP:

$$(Q_P - Q_M) + \frac{gA}{a} (H_P - H_M) + \frac{f}{2DA} \Delta t Q_M |Q_M| = 0 \quad (41)$$

Para o seguimento PB:

$$(Q_P - Q_J) - \frac{gA}{a} (H_P - H_J) + \frac{f}{2DA} \Delta t Q_J |Q_J| = 0 \quad (42)$$

Combinando os termos das equações 41 e 42 temos:

Para o seguimento AP:

$$Q_p = C_p - C_A H_p \quad (43)$$

Para o seguimento PB:

$$Q_p = C_p - C_A H_p \quad (44)$$

Em que:

$$C_p = Q_M + \frac{gA}{a} H_M - \frac{f}{2DA} \Delta t Q_M |Q_M| \quad (45)$$

$$C_N = Q_j - \frac{gA}{a} H_j - \frac{f}{2DA} \Delta t Q_j |Q_j| \quad (46)$$

$$C_A = \frac{gA}{a} \quad (47)$$

As equações só são válidas para o intervalo em que são definidas e os valores de C_p e C_N variam de acordo com o intervalo de tempo e a constante C_A depende das características do tubo.

Da resolução simultânea das equações 43 e 44 encontramos:

$$Q_p = 0,5(C_p + C_N) \quad (48)$$

$$H = \frac{0,5}{C_A}(C_p - C_N) \quad (49)$$

A utilização do método por diferenças de primeira ordem se mostra suficientemente acurado. Nos casos em que a perda de carga por atrito se mostre demasiadamente alta, recomenda-se utilizar um esquema de diferenças finitas de segunda ordem com a finalidade de evitar possíveis instabilidades originadas das aproximações (STREETER e WYLIE, 1978 e CHAUDRY, 2014).

2.4.2 Convergência e estabilidade

As condições de convergência e estabilidade devem ser satisfeitas para que a solução numérica precisa de uma equação diferencial parcial seja obtida com sucesso (CHAUDRY, 2014).

Como o computador admite somente um número finito de casa decimais a obtenção de soluções exatas utilizando métodos numérico se torna impossível, assim força-se as dimensões Δx e Δy da malha ao zero tornando a solução mais realista e convergente. Contudo, essa redução acarreta um crescimento no número de operações aritméticas ampliando os erros computacionais que estão embutidos em arredondamentos e truncamentos no cálculo do transiente hidráulico (SANTOS, 2000 e BARBOSA, 2006).

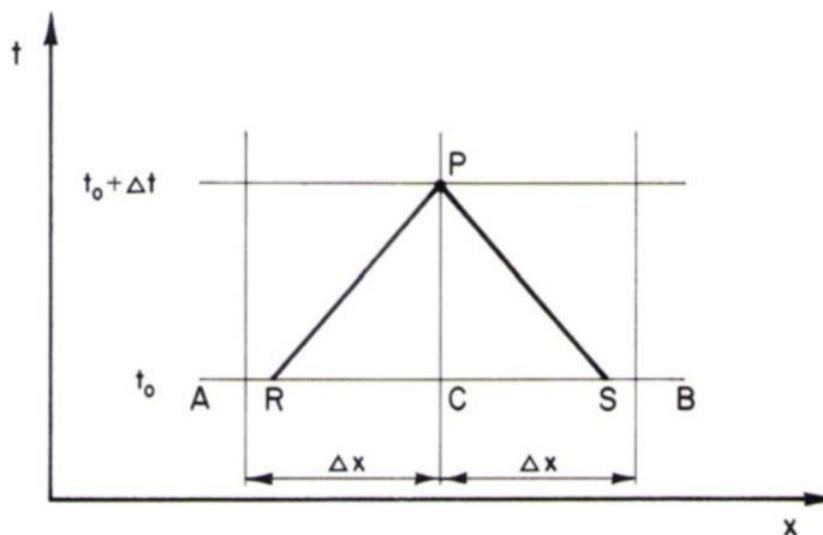
Como afirmado por Chaudhry (2014) um esquema de diferenças finitas é convergente quando a solução exata da equação da diferença finita tende para solução exata da equação diferencial parcial assim como Δx e Δy tendem a zero, assim como um esquema de diferenças finitas é convergente se ele é estável e consistente com a equação diferencial.

Ainda de acordo com Chaudhry (2014), do momento em o erro acumulado aumenta com o progresso da solução, o esquema de diferenças finitas é dito instável. Como opção para se alcançar a estabilidade e convergência, tem-se que satisfazer a Condição de Estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy ou simplesmente Condição de Courant (EQUAÇÃO 50).

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq a \quad (50)$$

Essa condição implica que as linhas características através de P devem tocar o trecho AB entre A e C e entre C e B, conforme figura 3.

Figura 3 - Implicação das linhas características como Condição de Courant



Fonte: Chadrhy (2014)

Santos (2000), levando em conta os resultados das pesquisas apresentadas por Chaudhry (1987), Streeter (1978), Almeida (1981) e Koelle (1983), sugere que com a finalidade de determinar com maior precisão a solução da Equação 50, ela pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = a \quad (51)$$

2.4.3 Incremento de tempo

Quando existem dois ou mais tubos, deve-se utilizar o mesmo intervalo de tempo em todos para que no mesmo passo de tempo possa-se computar as mesmas condições de contorno nas junções e determinar as incógnitas, para tanto a condição de Courant deve ser respeitada. Sendo assim o incremento de tempo, Δt , quando o comprimento de qualquer tubo não é igual a $a\Delta x$, deve ser escolhido levando-se em consideração o número inteiro de divisões N para que a condição anteriormente citada seja obedecida (CHAUDHRY, 2014 e SANTOS, 2000), assim:

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i N_i} \quad (52)$$

Em que:

Δt é o incremento de tempo;

L_i é o comprimento do tubo i ;

a_i é a celeridade no tubo i ; e

N_i é o número de trechos do tubo i .

Conforme Lessa (1984) pequenos ajustes na celeridade que permitem satisfazer a condição da Equação 51, em sistemas que possuem tubos com diferentes comprimentos, mostraram-se bastante satisfatórios em seus resultados. Essas pequenas mudanças são aceitáveis uma vez que a celeridade da propagação das perturbações não possui um conhecimento muito preciso.

2.4.4 Condições de contorno

As condições de contorno descrevem relações especiais que acontecem nas fronteiras do sistema, sejam elas a montante ou jusante. Essas condições podem definir a vazão ou a carga hidráulica na fronteira, ou então uma relação entre a vazão e a carga hidráulica nesse mesmo ponto. Tais condições são dadas a partir das equações características positivas ou negativas, que juntas são válidas somente para seções interiores do tubo, e na extremidade devem ser utilizadas isoladamente e combinadas com as condições de fronteira (CHAUDHRY, 2014).

Diversas são as condições de contorno que podem ser encontradas em um sistema hidráulico, pode-se notar algumas mais importantes: reservatório de nível constante a montante, reservatório de nível constante a jusante, nó de consumo ou demanda, válvula a jusante, ponta seca, junção de tubos em série, bifurcação, entre outras, cada uma possui equações que se juntam às características permitindo a resolução do transiente.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos (AGs) são técnicas de otimização utilizadas desde a década de 1970 com a finalidade de encontrar soluções para problemas que não estavam bem resolvidos pelos métodos mais comuns à época. Baseando-se na teoria da evolução proposta pelo naturalista e fisiologista Charles Darwin em 1859 este algoritmo segue o princípio de sobrevivência do mais forte e do mais apto.

Desde as décadas de 1950 e 1960 os cientistas tiveram a ideia de implementar a teoria da evolução das espécies como um possível método de otimização de problemas nos campos das engenharias. Esse método introduzido em 1975 por John Holland, criou as primeiras bases teóricas para a aplicação em conjunto a métodos computacionais, ele não pretendia encontrar a solução de problemas específicos, mas sim de uma gama de fenômenos adaptativos que ocorrem na natureza. Segundo Araújo (2003) Holland apresentou as bases teóricas de aplicação do método tendo como referência a evolução biológica.

Essa ferramenta trabalha com uma população inicial de cromossomos que é gerada aleatoriamente ou de acordo com os dados obtidos, dependendo do caso, esses cromossomos representam possíveis soluções do problema em estudo. Para que ocorra uma hierarquização da população em relação à qualidade de ser solução do problema uma nota ou “aptidão” é dado a cada cromossomo. Normalmente aqueles mais aptos são os selecionados deixando os menos aptos desaparecerem. Após a seleção podem ocorrer processos de *crossover* e mutação que são os responsáveis pela variabilidade genética da população e permitem a criação dos indivíduos da geração seguinte. Este processo se repete até o encontro de uma solução satisfatória (GALVÃO *et al.*, 1999).

Uma grande quantidade trabalhos que utilizam AGs em problemas de recursos hídricos mostram a habilidade dos mesmos em obter soluções melhores que as dos métodos convencionais. Araújo (2003) cita alguns mais importantes, a aplicação dos AGs para obtenção do ótimo global para problema de projeto em redes hidráulicas por Simpson, Dandy e Murphy (1994) e Savic e Walters (1997). Trabalhando com problemas de grande complexidade e com similaridade ao mundo real, Ritzel, Eheart e Ranjithan (1994) enfatizou a importância do AG perante a otimização convencionais. Cieniawski, Eheart e Ranjithan (1995) estudaram um problema de monitoramento multi-objetivo em água subterrânea usando AGs e dois objetivos, maximização da confiabilidade e minimização de áreas contaminadas, afirmando que a solução obtida tem uma vantagem sobre aproximações multi-objetivo tradicionais pois pode gerar

tantos pontos convexos como não-convexos, acomodar não-linearidade nas duas funções objetivo, encontrar vários pontos Pareto ótimo em uma simples interação. Gambale (2000) aplicou a técnica dos algoritmos genéticos à calibração dos coeficientes de rugosidades de redes hidráulicas em regime permanente. Simpson, Vitkosviký e Lambert (2000) usaram o AG na calibração das rugosidades dos tubos sob condições transientes em um sistema de distribuição de água.

Kondageski (2008) cita uma aplicação feita por Park *et al.* (2006) que integra os algoritmos genéticos e um sistema de informações geográficas (SIG) com a finalidade de maximizar a alocação ótima de estações de monitoramento de qualidade de água na bacia do Nakdong, Coréia. Foi mostrado pelos resultados que a configuração atual das estações está aquém da otimizada pelo AG como também que a melhoria na função-objetivo decresce com a aproximação do ponto ótimo.

Costa *et al.* (2010) comenta que o AG possui uma grande flexibilidade no estudo do espaço de busca além de permitir facilmente sua conectividade com modelos de simulação, sendo esses uns dos principais motivos para a existência de inúmeros trabalhos no Brasil que utilizam o AG como ferramenta de otimização.

Marchi *et al.* (2014) realizou uma comparação entre diferentes algoritmos evolucionários, entre eles o AG, além da otimização por enxame de partículas (PSO) e evolução diferencial (DE), apesar da existência de outros trabalhos fazendo comparações entre diferentes técnicas de otimização esse propôs uma metodologia diferenciada que consiste em avaliar (1) a melhor solução obtida, (2) a velocidade de convergência e (3) a dispersão e a consistência das soluções obtidas. Utilizando, para tanto, dois casos conhecidos de redes de distribuição de água (New York Tunnels e a rede de Hanói) além de um caso real com 476 tubos.

Salvino *et al.* (2015) implementam uma metodologia que usa um AG multivariado em uma rede de distribuição com a finalidade de identificar irregularidades como: vazamentos, obstruções e válvulas inoperantes ou estranguladas, o modelo permite a utilização de no máximo 7 variáveis, são elas: rugosidade, demanda, perda de carga singular, cota, vazamentos, diâmetros e válvulas, ao mesmo tempo ou uma combinação entre elas.

Vieira e Silva (2017) utilizaram o AG com a finalidade de otimizar o custo de uma rede de distribuição de água, adicionando um fator diferencial chamado de *monjus*, que implica na obrigatoriedade do diâmetro à jusante ser de menor dimensão do que aquele a montante,

desde o reservatório até o último ponto da rede, critério esse que ainda não tinha sido utilizado, segundo os autores.

3.1 Terminologia

Sendo os AGs uma metáfora da seleção natural das espécies, os termos aqui empregados estão diretamente ligados àqueles utilizados na biologia, apresentamos a seguir alguns dos termos aqui utilizados e presentes na literatura (GALVÃO *et al.*, 1999):

- a) Cromossomo e genoma: representam um ponto de resposta no espaço de busca da solução;
- b) Gene: um parâmetro codificado no cromossomo;
- c) Indivíduo: o conjunto feito pelo cromossomo e a sua aptidão;
- d) Genótipo: representação da informação contida no cromossomo;
- e) Fenótipo: é o cromossomo decodificado, ou seja, a representação da estrutura construído a partir das informações do genótipo.
- f) Alelo: no caso dos AGs representa os valores que o gene pode assumir; e
- g) Epistasia: ocorre quando um gene interfere no valor de outro gene.

3.2 Estrutura

3.2.1 População inicial

A eficiência do AG também está relacionada ao tamanho da população inicial, quando essa é pequena tem-se um espaço limitado de pesquisa e desenvolvimento das respostas do algoritmo, podendo chegar a um ótimo local que não representa a melhor solução. Do contrário, ao se usar uma grande população maiores áreas do espaço de busca são percorridas, porém para isso é necessário maior tempo e poder de processamento, o que pode vir a ser uma dificuldade.

Normalmente, a população inicial é gerada de modo aleatório, porém existem alguns métodos que podem ser aplicados tanto para a geração dos indivíduos, como também para a escolha do tamanho da população inicial.

Lacerda e Carvalho (1999), por exemplo, mostram uma alternativa em que se gera a primeira metade da população aleatoriamente e a segunda metade é gerada a partir desses primeiros indivíduos, invertendo os bits.

De acordo com Silva (2006) uma outra maneira de melhorar a população inicial é através da técnica conhecida como *seeding* que consiste na inserção de soluções obtidas em outros problemas de otimização, garantindo assim que se encontre uma solução melhor do que aquelas encontradas nos métodos anteriores.

3.2.2 Seleção

O processo de seleção dos cromossomos que serão responsáveis pela geração de filhos se dá de acordo com a aptidão. Normalmente esse parâmetro é calculado para cada cromossomo de acordo com a função objetivo, segundo Araújo (2003) a função objetivo representa uma característica que desejamos otimizar, logo aqueles que possuem grande aptidão terão as maiores chances de contribuir para a formação de filhos da geração futura.

Em algumas alternativas de processo de seleção a utilização da aptidão como mostrada anteriormente pode apresentar problemas devido ao fato da mesma vir a ter valores negativos. Pode-se ver isso no algoritmo *Roda de Roleta* que não aceita aptidões abaixo de zero, Galvão *et al.* (1999) comenta que podemos contornar o problema utilizando outras alternativas como a *Seleção por Torneio*, em que n cromossomos são escolhidos aleatoriamente e com probabilidade iguais e aquele que possuir maior aptidão é escolhido, ou ainda o *Ordenamento* em que é dado um certo valor de aptidão a um cromossomo e zero a outro e todos os outros serão interpolados linearmente entre os dois iniciais. Além desses, Santos (2010) e Goulart (2015) enumeram e explicam alguns outros métodos de seleção:

- a) *Roda de roleta*: nesse modelo a depender da razão de aptidão do cromossomo e da aptidão da população acumulada, as probabilidades de seleção são calculadas, em uma segunda etapa um número aleatório, que está compreendido entre zero e o valor da aptidão acumulada, é gerado, a solução que foi selecionada prossegue no processo de cruzamento e mutação. Uma das desvantagens desse método é a convergência prematura, uma vez que não aceita aptidões negativas;
- b) *Seleção uniforme*: aqui a aptidão individual de cada cromossomo não é levada em conta, a seleção daqueles que prosseguirão para o cruzamento e a mutação, é feita aleatoriamente. Nesse método a probabilidade de seleção é sempre a mesma para todos os cromossomos;
- c) *Seleção por amostragem determinística*: como na seleção por roda de roleta aqui as probabilidades também são calculadas, então a probabilidade individual é multiplicada pelo número total de cromossomos na população. Assim os

- indivíduos que possuem valores de aptidões inteiros são selecionados e posteriormente os que possuem os maiores valores fracionários;
- d) *Stochastic Remainder Sampling* (SRS): dividido em duas etapas, assim como a amostragem determinística, a primeira fase é similar nos dois processos, porém no SRS a parte fracionária é escolhida de diferentes formas: aleatória, por ordem crescente de desempenho, competição entre indivíduos, entre outras;
 - e) Proporcional: nesse processo aqueles indivíduos que têm as maiores aptidões possuem uma maior probabilidade de serem copiados, enquanto aqueles com as menores aptidões têm maiores possibilidades de serem descartados; e
 - f) Aleatória: simplesmente a escolha dos cromossomos é feita de forma aleatória, sem nenhum critério de escolha.

De acordo com Araújo (2003) uma outra importante forma de seleção foi proposta em 1975 por DeJong e se chama *Elitismo*, nesse processo os cromossomos que parecem ter mais chances de possuir a solução do problema são automaticamente guardados para a próxima geração sem ter que passar por outros processos, essa alternativa visa principalmente que as melhores soluções não se percam, o autor ainda comenta que esse processo visa o aprimoramento do desempenho do AG.

3.2.3 *Crossover*

O operador *crossover* ou cruzamento é o responsável pela criação da geração nova de cromossomos, esse processo é de grande importância uma vez que sem ele os filhos seriam sempre iguais aos pais. Essa etapa é aplicada aos cromossomos que foram anteriormente selecionados estão localizados em uma população intermediária, existe uma probabilidade de aplicação de cruzamento que segundo Galvão *et al.* (1999) gira em torno de 60% a 90% e essa taxa é importante para a preservação de algumas soluções presente em gerações anteriores.

Existem vários métodos de cruzamentos, basicamente eles dividem a sequência do cromossomo em dois e estas são trocadas entre os pais, assim formam-se dois filhos com uma sequência genética nova. Cada tipo de representação, real ou binária, possuem um grande número de métodos de *crossover*, que podem ser de divisão de cadeia (convencionais), aritméticos ou outros.

Segundo Cunha (2009) os operadores convencionais são mais comuns e podem ser divididos em 2 tipos o tipo de n pontos de corte e o uniforme. Abaixo pode-se ver os

cruzamentos convencionais de 1 (FIGURA 4) e 2 (FIGURA 5) pontos, em que dois pais dão origem a dois filhos distintos com informações de cada um deles.

Figura 4 - Esquematização do cruzamento de um ponto

Cruzamento de um ponto
 Pai 1: 1010|101010 Filho1: 1010001100
 Pai 2: 1110|001100 Filho 2: 1110101010
 ↑
 Ponto de corte

Fonte: Autor (2019)

Figura 5 - Esquematização do cruzamento de dois pontos

Cruzamento de um ponto
 Pai 1: 1010|101|010 Filho1: 1010001010
 Pai 2: 1110|001|100 Filho 2: 1110101100
 ↑ ↑
 Pontos de corte

Fonte: Autor (2019)

Soares (2003) e Cunha (2009) afirmam que a funcionalidade dos operadores convencionais é eficiente quando se trata de representação binária, uma vez que na representação real ela não gera novos dados somente uma troca de valores que não acrescenta muito à pesquisa da melhor solução, para a representação ideal são indicados os operadores aritméticos. Nesses existem duas possibilidades, o *crossover* aritmético e a BLX- α ou *blend crossover*.

Segundo Goulart (2014) no *crossover* BLX- α o novo indivíduo é gerado a partir do pais utilizando a seguinte equação 53:

$$FILHO = PAI_1 + b(PAI_2 - PAI_1) \quad (53)$$

Em que b é um valor contido entre $(-\alpha, 1 + \alpha)$ e que pertence a cada par de genes.

Já no *crossover* aritmético é feita uma recombinação linear entre os cromossomos pais e assim, gerando dois cromossomos filhos, da seguinte forma (GOULART, 2014):

$$FILHO_1 = bPAI_1 + (1 - b)PAI_2 \quad (54)$$

$$FILHO_2 = (1 - b)PAI_1 + bPAI_2 \quad (55)$$

Na Tabela 4 abaixo tem-se um resumo de alguns operadores de *crossover*.

Tabela 4 - Resumo dos operadores de crossover

Tipo de Cruzamento	Descrição
Cruzamento em um ponto	Correspondente à divisão do material genético em um ponto de corte aleatório, a partir do qual há troca de informações genéticas entre os pais
Cruzamento de n pontos	Correspondente à divisão do material genético em n pontos de cortes aleatórios, havendo troca de informações genéticas dos pais
Cruzamento média	Corresponde à soma dos parâmetros dos pais divididos por dois. Assim ocorre uma aproximação dos dados para o meio do intervalos, preservando a uniformidade
Cruzamento BLX-α	Usado para representação real, simula o cruzamento médio geométrico a partir do parâmetro α
Cruzamento linear	Seleciona-se o melhor indivíduo através da aplicação das seguintes fórmulas: $c = 0,5p_1 + 0,5p_2 \quad c = 1,5p_1 - 0,5p_2$ $c = -0,5p_1 + 1,5p_2$
Cruzamento Heurístico	Realiza uma extrapolação linear entre os pais usando a informação da aptidão. Dados dois pais em que o primeiro apresenta maior aptidão é produzido um filho c , tal que, $c = p_1 + r(p_1 - p_2), \text{ sendo } 0 \leq r \leq 1$
Cruzamento simples	Variação do cruzamento em um ponto adaptados para a representação real

Fonte: Adaptado de Neves (2007)

3.2.4 Mutação

O processo de mutação ocorre após a criação dos filhos, nessa o operador age com determinada probabilidade em cada bit de cada cromossomo, com essa probabilidade girando em torno de 0,1% a 5% (SILVA, 2006). Assim se caso for selecionado o bit muda de valor aleatoriamente, no caso de uma representação binária os valores se alternam entre 0 e 1.

Schaetzen (2000), por sua vez, faz a recomendação que a taxa de mutação seja calculada de acordo com a expressão abaixo:

$$P_m = \frac{1}{N_{genes}} \quad (56)$$

Em que:

P_m é a probabilidade de mutação; e

N_{genes} é a quantidade de elementos de cada solução.

A aplicação desse método é importante para garantir a diversidade da população, porém possui a característica de destruir informações, por isso a aplicação de uma probabilidade baixa (ARAÚJO, 2003).

Na figura 6 abaixo vê-se a aplicação da mutação em dois filhos gerados anteriormente:

Figura 6 - Esquematização da mutação

Antes	filho ₁	01001	<u>1</u>	01111	<u>00</u>
	filho ₂	01	<u>1</u>	10001	<u>0</u> 1011
Depois	filho ₁	01001	<u>0</u>	01111	<u>1</u> 0
	filho ₂	01	<u>0</u>	10001	<u>1</u> 1011

Fonte: Autor (2019)

Diversos são os tipos de mutação, sendo a mais comum a mutação uniforme representada abaixo pela Equação 57, mas na tabla 5 pode-se ver algumas das mais encontradas na literatura.

$$Filho_1 = \begin{cases} \text{uniforme}(a_i; b_i) & \text{se } i = j \\ Pai_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (57)$$

Onde a_i e b_i representam os limites do intervalo permitido para o gene.

Na Tabela 5 tem-se um resumo com os tipos de mutação mais utilizados.

Tabela 5 - Tipos de mutação

Tipo de mutação	Descrição
Uniforme	Substituição simples da informação de um gene por outra
Gaussiana	Substituição de um gene por um número aleatório de distribuição normal
Tipo creep	Acontece pela adição de um número pequeno ao parâmetro que sofrerá mutação ou pela multiplicação de um número em torno de um valor do parâmetro
Limite	Substituição do parâmetro mutante por um dos limites permitidos
Não-uniforme	Simple substituição por um valor obtido em uma distribuição não uniforme
Mudança de sequência da lista	Parte dos bits de um cromossomo é trocada de posição dentro do mesmo indivíduo

Fonte: Adaptado de Neves (2007)

3.2.5 Tipos de representação

Os cromossomos podem ser representados tanto como binários ou como reais. A representação binária mostra sua importância histórica por estar presente nos primeiros estudos do assunto e por possuir uma facilitação de manipulação e utilização. Alguns problemas enfrentados pela representação binária está o fato de se tornar muito grande quando tratar de parâmetros contínuos se desejarmos grandes precisões.

A representação real se mostra mais precisa e ocupa menor memória além de ser melhor compreendida pela mente humana, alguns estudos foram feitos e muitos deles têm se mostrados mais favoráveis à representação real quando comparada à binária. Para cada uma das duas escolhas existem diferentes tipos de operadores de cruzamento e mutação, porém para a opção real temos mais opções e uma maior facilidade de criação de novas operações.

3.2.5.1 Representação binária

Sendo V uma variável que varia no intervalo de $\{0,1, \dots, 2^l-1\}$, então é possível

decodifica-lo utilizando a seguinte representação binária, $e=[b_0, \dots, b_l]$, com l “bits”, onde $bin_i \in \{0,1\}$ de tal maneira que:

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (53)$$

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

A representação de um número binário pode ser feita na base de dois, não apresentando nenhum problema. Para tanto, cada posição digital irá representar uma potência de dois, da mesma maneira que acontece nos números decimais, cada posição será uma potência de dez, assim, por exemplo, o número 59267 representa:

$$5 \times 10^4 + 9 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 7 \times 10^0$$

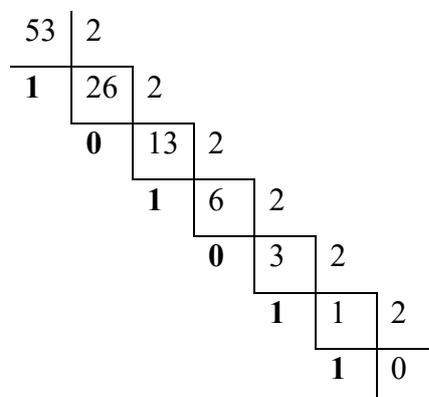
Na base dois, a base usada nos computadores binários, o número 110101 representa:

$$1 \times 10^5 + 1 \times 10^4 + 0 \times 10^3 + 1 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 1 \times 10^0 = (53)_{Decimal}$$

Para se converter um número inteiro decimal em binário precisa-se começar pela direita e caminhar para a esquerda, assim, determina-se primeiramente o algarismo das unidades (aquele multiplicado por 2^0), em seguida o segundo algarismo da direita (o que vai ser multiplicado por 2^1) e assim sucessivamente.

Um ponto importante a ser observado é se o número é par ou ímpar, na representação binária o número par termina por 0 e o ímpar por 1. Sendo assim determina-se o algarismo da direita pela simples divisão do número por 2, se o resto for 0 (par) o algarismo da direita é 0, já se o resto for 1 (ímpar) o algarismo da direita é ímpar. Como por exemplo, o número 53 convertido em binário é o seguinte (FIGURA 7):

Figura 7 - Exemplo de conversão de real em binário



Fonte: Autor (2019)

Quando se representa binariamente um algoritmo genético, comprimento do

cromossomo depende da precisão escolhida. Por exemplo: se o domínio da variável x_j é $[a_j, b_j]$ e a precisão desejada seja de 5 casas decimais. A precisão implica que o intervalo do domínio de cada variável possa ser dividido no mínimo por $(b_j - a_j) \times 10^5$ intervalos. Dessa forma, é possível calcular a quantidade de bits necessários para uma variável como se segue:

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j)10^5 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (54)$$

Em que:

m_j é o número de bits necessários num cromossomo.

Segundo Gen e Chen (1997) para se mapear o cromossomo binário para um número real na variável x_j usa-se a expressão a seguir:

$$x_j = a_j + decimal(\text{indivíduo}_j) \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (55)$$

Em que:

Decimal (indivíduo_j) é o valor decimal do cromossomo j para a variável de decisão x_j .

Por exemplo, para a situação apresentada por Gen e Chen (1997) com uma precisão de 4 casas decimais:

$$\begin{aligned} \max f(x_1, x_2) &= 21,5 + x_1 \text{sen}(4\pi x_1) + x_2 \text{sen}(20\pi x_2) \\ -3,0 &\leq x_1 \leq 12,1 \\ 4,1 &\leq x_2 \leq 5,8 \end{aligned}$$

A quantidade de bits necessários para as variáveis x_1 e x_2 são dados pela Equação 54:

$$(12,1 - (-3,0))10^4 = 151000$$

$$2^{17} < 151000 < 2^{18}, m_1 = 18$$

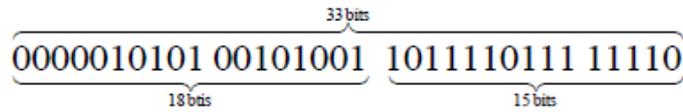
$$(5,8 - 4,1)10^4 = 17000$$

$$2^{14} < 17000 < 2^{15}, m_2 = 15$$

$$m = m_1 + m_2 = 18 + 15 = 33$$

Logo, o comprimento do cromossomo é 33, abaixo vê-se a representação de um cromossomo qualquer da população (FIGURA 8):

Figura 8 - Representação de um cromossomo da população



Fonte: Andrade (2017)

Essas duas variáveis (x_1 e x_2) em binário e real são vistas na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 - Representação em binário e real de duas variáveis

Variável	Rep. Binária	Rep. Decimal
x_1	000001010100101001	5417
x_2	101111011111110	24318

Fonte: Autor (2019)

3.2.5.2 Representação real

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

$$\frac{(2^l - 1)V}{(V_{max} - V_{min})} \quad (56)$$

No exemplo anterior referente à codificação binária, o cromossomo em questão seria representado por um vetor, (-2.687969; 5.361653), de dois números com ponto flutuante conforme a Equação 56:

$$x_1 = -3 + 5147 \frac{12,1 - (-3)}{2^{18} - 1} = -2,687969$$

$$x_2 = 4,1 + 24318 \frac{5,8 - 4,1}{2^{15} - 1} = 5,361653$$

3.2.6 Critérios de parada

Galvão *et al.* (1999) comenta alguns dos critérios de parada utilizados nas análises de AGs:

- Quando atingirmos um referido número de gerações ou ciclos;
- Se conhecermos o valor ótimo da função objetivo, paramos ao alcançá-lo;
- Ou quando ocorrer convergência, isto é não existir melhoramento significativo da solução encontradas entre gerações; e

d) Em relação à convergência, se 90% da população tem um mesmo valor para o gene ou se 90% a 95% dos genes convergirem consideramos que o conjunto (AG) convergiu.

3.2.7 Ferramentas de otimização tradicionais e os algoritmos genéticos

Existem alguns métodos de otimização que são bastante utilizados, porém que não se mostram eficientes para alguns tipos de problema. Podemos citar alguns como o *Gerar e Testar*, *Métodos Analíticos* e o *Subida de Encosta*, esses métodos possuem as vantagens e desvantagens, assim como os AGs. O último é bastante utilizado em problemas mais complicados de otimização em que os outros métodos citados falham. Algumas vantagens dos AGs listadas por Galvão *et al.* (1999) são apresentadas a seguir:

- a) A possibilidade de utilizar tanto parâmetros contínuos ou discretos ou mesmo uma combinação dos dois;
- b) Por trabalharem com uma população e não um ponto realizam buscas em várias regiões do espaço;
- c) Um conhecimento matemático muito profundo do problema não se mostra necessário;
- d) São capazes de otimizar um grande número de variáveis;
- e) Podem trabalhar com dados gerados experimentalmente;
- f) Possuem facilidade para ser implementadas em computadores; e
- g) Capazes de trabalhar com a otimização de múltiplas funções, mesmo com objetivos conflitantes.

Os Algoritmos Genéticos possuem a desvantagem de se mostrarem bastantes lentos em sua busca pela otimização quando comparados a outros métodos. Os operadores de cruzamento e mutação se mostram de suma importância no método para evitar uma convergência prematura, um dos problemas ligados ao AG, quando uma solução é encontrada, mas na realidade ela ainda não é a melhor, sendo a taxa de mutação o principal meio de evitar isso.

4 FUNÇÕES OBJETIVOS EM PROCESSOS DE CALIBRAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

4.1 Conceitos e formulação

Dentro do campo de calibração e otimização as funções objetivas têm a finalidade de serem maximizadas ou minimizadas de acordo com as definições feitas pelo usuário, para assim mostrarem a aptidão de cada resultado obtido na simulação, fazendo assim a conexão entre o AG e o problema estudado. Os dados de entradas são cadeias de *bits* que saem com um valor real.

Diskin e Simon (1977) afirmam que a escolha da função objetivo em sim é um processo subjetivo que influencia bastante os valores ótimos dos parâmetros do modelo, logo o conjunto ótimo de parâmetros é ótimo apenas no contexto da função objetiva selecionada.

A aptidão de cada indivíduo da população é avaliada pela função objetivo, seja ela uma maximização ou uma minimização, quando tem uma solução com um máximo global, normalmente, os valores da aptidão são os próprios da função objetivo, porém se não for adequado a utilização direta dos resultados da função se mostra necessária a conversão utilizando ordenamento e escalonamento (ANDRADE, 2017).

De acordo com Carrijo (2004) é necessário que haja algum procedimento que permita a observação da distância entre o valor que um cromossomo apresenta e o valor correspondentemente real, sendo esse processo real ou não e em casos em que exista uma maior complexidade alguma técnica heurística pode ser apresentada.

Goulart (2015) afirma que, normalmente, os valores da função aptidão ou objetivo estão contidas no intervalo $[0,1]$, a mesma pode ser considerada uniforme. Sendo o cromossomo que apresenta valor 1 (máximo possível) a solução ótima do sistema, já aquele que tivesse valor 0 (mínimo possível) a pior solução encontrada.

Mas a função objetivo não necessariamente precisa ser uniformizada, já que apresenta valores reais e, por se tratar de uma comparação entre os próprios cromossomos solução, os valores relativos de cada um já servem como parâmetro de comparação. Valores negativos devem ser evitados para que não afetem a agilidade e eficiência da função. Outro ponto relevante sobre as funções objetivos nos AGs é levantado por Goulart (2015) quando é afirmado que é possível que os valores da função piorem para depois melhorarem, mostrando assim, uma flexibilidade do método.

Podem ser utilizadas tanto uma como várias funções objetivos ao mesmo tempo, quando se quer representar o funcionamento real do sistema, uma vez que em muitas situações os objetivos se complementam ou são conflitantes, Maier *et al* (2014) faz um levantamento da situação que envolve essas duas opções, ao se utilizar uma só função objetivo se encontra uma só solução ótima do problema é encontrada, porém alguns trabalhos mostram que é difícil, ou até mesmo impossível, criar uma função objetivo que consiga consistência interna suficiente para se atingir tal objetivo. Porém, o outro extremo também tem mostrado algumas dificuldades quando se colocam mais de 4 objetivos simultâneos, além das limitações perceptivas de se considerar tantos critérios simultaneamente.

Os principais parâmetros utilizados para a formulação da função objetivo em problemas relacionados aos recursos hídricos são: as cargas hidráulicas, as pressões, as vazões, as demandas e os custos. Podendo essas medidas serem utilizadas em conjunto através da aplicação de pesos ou fatores de escala que permitem uma maior influência de um ou outro de acordo com a importância dada ao mesmo na simulação ou da influência que ele tem no processo.

4.2 Funções objetivo na literatura

Na literatura estão presentes diversos exemplos de função objetivo, utilizadas nos mais diversos tipos de estudo e com as mais diferentes formulações. Alguns exemplos, apresentados em ordem cronológica de publicação:

- Ormsbee (1989) utilizou a seguinte função objetivo (FO) (EQUAÇÃO 57) no desenvolvimento de um modelo matemático para calibração implícita de uma rede distribuição de água.

$$\min \sum_{ij}^J \sum^I \left| \frac{O_{ij} - P_{ij}}{O_{ij}} \right| \quad (57)$$

Em que:

O_{ij} é valor observado no ponto j; e

P_{ij} é o valor real no ponto j para as mesmas condições.

- Lansey e Basnet (1991) estimaram parâmetros em redes de distribuição de água utilizando a seguinte FO (EQUAÇÃO 58):

$$\min f(HC, QC, TC) = \sum_{l=1}^{NLOADS} \left[\sum_{i=1}^{NNODES} WH_{il} (HC_{il} - HO_{il})^n + \sum_{j=1}^{NPIPES} WQ_{jl} (QC_{jl} - QO_{jl})^n \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^{NTANKS} WT_{kl} (TC_{kl} - TO_{kl})^n \right] \quad (58)$$

Em que:

HO_{il} e HC_{il} são as cargas de pressão observadas e computadas no nó i , respectivamente;

$NNODES$ é número de nós;

$NLOADS$ representa todas as condições de carregamento;

QO_{jl} e QC_{jl} são as vazões observadas e computadas no tubo j , respectivamente;

$NPIPES$ é o número de tubos;

TO_{kl} e TC_{kl} são os níveis observados e computados no reservatório k , respectivamente;

$NTANKS$ é o número de reservatórios;

n pode ser 1 ou 2;

WH_{il} , WQ_{jl} e WT_{kl} são os fatores de escala.

- Liong, Chan e ShreeRam (1995) usaram AG e *storm water management model* (SWMM) para prever o fluxo de pico de uma chuva, a FO seguinte foi a utilizada (EQUAÇÃO 59):

$$\min \sum_{i=1}^n \left[(Q_i)_s - (Q_i)_m \right]^2 \quad (59)$$

Em que:

$(Q_i)_s$ e $(Q_i)_m$ são as vazões simuladas e medidas, respectivamente.

- Ormsbee e Lingireddy (1997) utilizaram a FO representada pela Equação 60 para calibrar modelos de redes hidráulicas.

$$\min f(x) = \alpha \sum_{j=1}^J (OP_j - PP_j)^2 + \beta \sum_{p=1}^P (OQ_p - PQ_p)^2 \quad (60)$$

Em que:

OP_j e PP_j são as pressões observadas e previstas na junção j ;

OQ_p e PQ_p são as vazões observadas e previstas no tubo p ; e

α e β são pesos normalizadores.

- Awad (20--) utilizou *shuffled complex evolution* – *University of Arizona* (SCE-UA) e a FO abaixo apresentada (EQUAÇÃO 61) para uma calibração implícita de uma rede de distribuição de água.

$$\min \sum_{k=1}^{K \max} \left[\sum_{i=1}^{n_g} |WP_{ki} (P_{ki} - \bar{P}_{ki})| + \sum_{j=1}^{n_m} |WF_{kj} (F_{kj} - \bar{F}_{kj})| \right] \quad (61)$$

Em que:

n_g é o número de nós de pressão observados;

n_m é o número de tubos com vazão observados;

P_{ki} é a pressão calculada no nó i ;

\bar{P}_{ki} é a pressão observada no nó i ;

F_{kj} é a vazão calculada no tubo j ; e

WP_{ki} e WF_{kj} são os fatores de escala.

- Gambale (2000) utilizou a FO dada pela Equação 62 para calibrar redes de água utilizando AG.

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |P_{oij} - P_{cij}|}{m * n} \leq \text{Pre} \quad (62)$$

Em que:

P_{oij} e P_{cij} são as pressões observadas e calculadas no ponto i e cenário j ;

Pre é precisão imposta como dado de entrada;

i é o número do nó; e

j é o número do cenário.

- Vitkovský, Simpson e Lambert (2000) calibraram e detectou vazamentos em uma rede de distribuição de água usando transientes e AG com a FO abaixo:

$$\max \text{fitness} = - \sum_{i=1}^M |H_i^* - H_i| \quad (63)$$

Em que:

H_i^* e H_i são as cargas hidráulicas medidas e modeladas.

- Wu *et al* (2002) calibrou uma rede de distribuição de água com AG e utilizando, separadamente, as três FOs representada pelas equações 64, 65 e 66:

$$\min \frac{\sum_{nh=1}^{NH} W_{nh} \left(\frac{H_{sim_{nh}} - H_{obs_{nh}}}{H_{pnt}} \right)^2 + \sum_{nf=1}^{NF} W_{nf} \left(\frac{F_{sim_{nf}} - F_{obs_{nf}}}{F_{pnt}} \right)^2}{NH + NF} \quad (64)$$

$$\min \frac{\sum_{nh=1}^{NH} W_{nh} \left(\frac{H_{sim_{nh}} - H_{obs_{nh}}}{H_{pnt}} \right) + \sum_{nf=1}^{NF} W_{nf} \left(\frac{F_{sim_{nf}} - F_{obs_{nf}}}{F_{pnt}} \right)}{NH + NF} \quad (65)$$

$$\max \left\{ \max_{nh=1}^{NH} W_{nh} \left| \frac{H_{sim_{nh}} - H_{obs_{nh}}}{H_{pnt}} \right|, \max_{nf=1}^{NF} W_{nf} \left| \frac{F_{sim_{nf}} - F_{obs_{nf}}}{F_{pnt}} \right| \right\} \quad (66)$$

Em que:

$H_{sim_{nh}}$ e $H_{obs_{nh}}$ são as cargas hidráulicas simuladas e observadas, respectivamente;

$F_{sim_{nf}}$ e $F_{obs_{nf}}$ são as vazões simuladas e observadas, respectivamente;

H_{pnt} é a carga hidráulica por ponto *fitness*;

F_{pnt} é a vazão por ponto *fitness*;

NH é o número de cargas hidráulicas observados;

NF é o número de vazões observados; e

W_{nh} e W_{nf} são os pesos normalizadores para a carga hidráulica e vazão, respectivamente.

- Goktas e Aksoy (2005) utilizaram as três FOs a seguir (equações 67, 68 e 69) para avaliar o impacto que elas produzem na calibração ótima do modelo de qualidade QUAL2E.

$$\min z_1 = \left[\sum_{i=1}^N (C_{ci} - S_{ci})^2 \right] \left[1 + \sum_{i=1}^N (C_{vi} - S_{vi})^2 \right] \quad (67)$$

$$\min z_2 = \left[\sum_{i=1}^N (C_{ci} - S_{ci})^2 \right] \left[1 + \sum_{i=1}^N (C_{vi} - S_{vi})^2 \right] + \left[\sum_{i=1}^N (C_{vi} - S_{vi})^2 \right] \left[1 + \sum_{i=1}^N (C_{ci} - S_{ci})^2 \right] \quad (68)$$

$$\min z_1 = \left[\sum_{i=1}^N (C_{ci} - S_{ci})^2 \right] \left[1 + W_c (D_{\max c}) \right] \left[1 + W_v (D_{\max v}) \right] \quad (69)$$

Em que:

C_{ci} e C_{vi} são as demandas de oxigênio (DO) para a calibração e a verificação,

respectivamente;

S_{ci} e S_{vi} são as Dos previstas para a calibração e a verificação, respectivamente;

$D_{\max c}$ e $D_{\max v}$ são os erros máximos para a calibração e a verificação, respectivamente; e

W_c e W_v são os pesos.

- Fuentes, Galvis e Valderrama (2006) utilizaram transientes hidráulicos e AG para detectar vazamentos em uma rede de distribuição de água real com a seguinte FO:

$$\min FO(x_i^k) = \min \frac{\sum_{j=0}^{NP} (P_j^{Mod} - P_j^{Obs})^2 \Big|_{i=calibrationNode}}{NP} \quad (70)$$

Em que:

P_j^{Mod} é a pressão modelada;

P_j^{Obs} é a pressão observada; e

NP é o número de dados de pressão coletados.

- Goktas e Aksoy (2007) calibraram e otimizou o QUAL2E usando otimização por AG, a sua FO foi a seguinte:

$$\min Z_1 = \sum_{j=1}^K W_j \left\{ \left[\sum_{i=1}^M (C_{coij} - C_{cpij})^2 \right] \left[1 + \sum_{i=1}^M (C_{voij} - C_{vpj})^2 \right] \right\} \quad (71)$$

Em que:

C_{coij} e C_{cpij} são as concentrações observadas e simuladas (previstas) da calibração, respectivamente; e

C_{voij} e C_{vpj} são as concentrações observadas e simuladas (previstas) da verificação, respectivamente.

- Mota (2007) dimensionou economicamente uma rede de distribuição hidráulica utilizando AG e a FO apresentada pela Equação 72.

$$\min F = \sum_{i=1}^{NC} \frac{D_i^5}{Q_i^2} \quad (72)$$

Em que:

D_i é o diâmetro do conduto i ;

Q_i é a vazão no conduto i ; e

NC é o número total de condutos na rede.

- Kadu, Gupta e Bhave (2008) utilizaram um AG modificado com espaço de pesquisa reduzido para encontrar um design ótimo de uma rede de distribuição de água com a seguinte FO:

$$\min f(D_1, \dots, D_x) = \sum_{x=1}^x u |D_x| L_x + \sum_{j=1}^{M-S} pq_i \left\{ \max(H_j^{\min} - H_j; 0) \right\} \quad (73)$$

Em que:

p multiplicador de penalidade;

$\left\{ \max(H_j^{\min} - H_j; 0) \right\}$ é a violação máxima das condições de pressão no nó j ;

$u |D_x|$ é o custo unitário do tubo de diâmetro D ;

q é a demanda nodal;

M é o número total de demandas;

S é o número de nós fonte;

H_j^{\min} é a carga mínima permitida no nó j ; e

X é o número de ligações na rede.

- Covas e Ramos (2010) utilizaram o modelo inverso com transiente hidráulico para estudar casos de localização e detecção de vazamentos em redes de distribuição de água com a seguinte FO:

$$\min_p OF(p) = \frac{1}{M} \left[q^* - q(p) \right]^T \left[q^* - q(p) \right] = \frac{\sum_{i=1}^M \left[q^* - q(p) \right]^2}{M} \quad (74)$$

Em que:

p é o vetor de parâmetros com N variáveis;

$q(p)$ é o vetor resposta previsto do sistema para um dado vetor de parâmetro p ;

q^* o vetor de observação nos quais os elementos são as cargas hidráulicas; e

M é o número de medições.

- Koppel e Vassiljev (2010) propuseram uma calibração para a *battle of the water calibration networks* (BWCN) com a FO apresentada na Equação 75:

$$OF = \sum_{i=1}^{nh} W_H (H_i^O - H_i^P)^2 + \sum_{j=1}^{nq} W_Q (Q_j^O - Q_j^P)^2 \quad (75)$$

Em que:

H_i^O e H_i^P são as cargas hidráulicas observadas e previstas, respectivamente;

Q_j^O e Q_j^P são as vazões observadas e previstas, respectivamente;

W_H e W_Q são os fatores de escala para a carga hidráulica e a vazão, respectivamente; e

nh e nq são os números de cargas hidráulicas e vazões observados, respectivamente.

- Shinma e Reis (2011) usaram o *non-dominated sorting genetic algorithm II* (NSGA-II) em uma calibração automática multiobjetiva do SWMM com as três FOs a seguir (equações 76, 77 e 78):

$$FO_1 = \sum_{k=0}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obsij} - Q_{simij})^2 \right] \quad (76)$$

$$FO_2 = \sum_{j=0}^m \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsij} - Q_{simij})^2}{(Q_{obsij} - \bar{Q})^2} \right] \quad (77)$$

$$FO_3 = \sum_{j=0}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_{obsij}} - \frac{1}{Q_{simij}} \right) \right] \quad (78)$$

Em que:

Q_{obsij} e Q_{simij} são os valores de *runoff* observados e simulados para o passo de tempo i , para o j -ésimo ponto de monitoramento de vazão;

\bar{Q} é o *runoff* médio observado;

n é o número de passos de tempo no evento; e

m é o número de pontos de monitoramento de vazão.

- Soares, Covas e Reis (2011) fizeram uma análise de detecção de vazamentos com o modelo inverso utilizando transientes hidráulicos em um sistema experimental de distribuição de tubos em policloreto de vinila (PVC), com a FO a seguir:

$$\min_z OF = \sum_{t=1}^{DT} \left\{ \sum_{j=1}^{n^H} \left[\frac{(H_{tj} - H_{tj}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n^H} \frac{H_{ti}^*}{n^H} \right)^2} \right] \right\} \quad (79)$$

Em que:

DT é o número de passos de tempo do evento de transiente hidráulico observado;

H é a carga piezométrica calculada;

H^* é a carga piezométrica observada;

n^H é o número de locais com pressão observada no sistema; e

z é o vetor das variáveis de decisão composto dos parâmetros de calibração desconhecidos.

- Nasirian, Maghrebi e Yazdani (2013) detectaram vazamentos em uma rede de distribuição baseando-se no novo modelo de AG heurístico com a seguinte FO:

$$f(x) = \min \left[\frac{\sum_{nh=1}^{NH} W_{nh} \left(\frac{H_{simnh} - H_{obsnh}}{H_{pnt}} \right)^2}{NH} \right] \quad (80)$$

Em que:

H_{obsnh} , H_{simnh} e H_{pnt} são os parâmetros medidos, calculados e ajustados de cada nó;

nh é o número de medidas de pressão;

NH é o número total de nós de observação; e

W_{nh} é índice de peso.

- Cunha *et al* (2015) fizeram uma calibração do modelo hidráulico de redes de abastecimento de água utilizando modelo inverso e a FO representada a seguir (EQUAÇÃO 81):

$$\min_z FO = \sum_{t=1}^{n^{PD}} \left[\sum_{j=1}^{n_t^P} \frac{(P_{tj} - P_{tj}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^P} \frac{P_{ti}^*}{n_t^P} \right)^2} + \sum_{j=1}^{n_t^Q} \frac{(Q_{tj} - Q_{tj}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^Q} \frac{Q_{ti}^*}{n_t^Q} \right)^2} \right] \quad (81)$$

Em que:

n^{PD} é o número de padrões de demanda observados;

n_t^P é o número de observações de pressões realizadas para o padrão t ;

n_t^Q é o número de observações de vazões realizadas para o padrão t ;

P_{ij} e P_{ij}^* são as pressões simuladas e observadas, respectivamente;

Q_{ij} e Q_{ij}^* são as vazões simuladas e observadas, respectivamente; e

z o conjunto de todas as variáveis de decisão do problema.

- Do *et al* (2016) calibraram multiplicadores de demanda em sistemas de distribuição de água usando AG com a seguinte FO:

$$\min F = \sum_{i=1}^{NH} W_i (H_i^{Meas} - H_i^{Sim})^2 + \sum_{j=1}^{NQ} W_j (Q_j^{Meas} - Q_j^{Sim})^2 \quad (82)$$

Em que:

H^{Meas} e H^{Sim} são as cargas hidráulicas medidas e simuladas, respectivamente;

Q^{Meas} e Q^{Sim} são as vazões medidas e simuladas, respectivamente;

NH e NQ são os números de cargas hidráulicas e vazões medidas, respectivamente; e

W_i e W_j são os fatores de peso.

Na literatura se encontram os mais diversos tipos de FO, o que demonstra a variabilidade que esse processo tem nas metodologias propostas e, também, mostram o horizonte de escolhas que podem ser feitas.

5 METODOLOGIA

Nesse estudo os algoritmos genéticos foram utilizados na calibração dos fatores de atrito das tubulações de duas redes hipotéticas, que são elas: Rede 1 que foi criada por Walski (1983) e adaptada por Gambale (2000) e a Rede 2 criada por Lansey et al (2001) e adaptada por Tabesh, Jamasb e Moeini (2011).

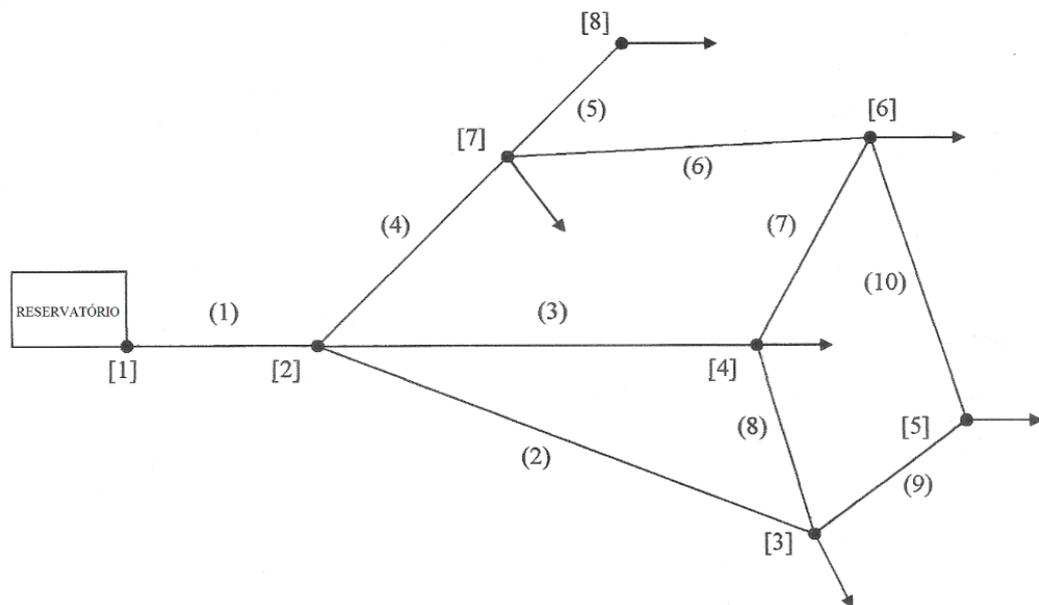
Dessas redes todas as características físicas são conhecidas: diâmetros, rugosidades, comprimentos, elevação dos nós, demandas nodais e nível do reservatório que abastece cada sistema.

5.1 Características físicas das redes

5.1.1 Rede 1

A Rede 1 foi adaptada por Gambale (2000) daquela criada por Walski (1983), na Figura 9, a seguir, tem-se uma representação do sistema com todos os seus tubos, representados pelos algarismos entre parênteses, as junções, representadas pelos algarismos entre colchetes, e o reservatório de abastecimento, totalizando 10 tubos e 8 nós.

Figura 9 - Rede 1 utilizada no estudo



Fonte: Adaptado de Gambale (2000)

Os parâmetros da rede possuem as seguintes unidades: o comprimento “L” dos tubos é dado em metros (m), a rugosidade “ ϵ ” em milímetros (mm), a vazão “Q” em litros por segundo (L/s) e a cota piezométrica “z” em metros (m). Na Tabela 7, a seguir, tem-se um resumo das características físicas da tubulação da Rede 1.

Tabela 7 - Características físicas da tubulação da Rede 1

Tubo	L (m)	D (m)
1	700	0,500
2	1800	0,250
3	1520	0,400
4	1220	0,300
5	600	0,300
6	1220	0,200
7	920	0,250
8	300	0,150
9	600	0,200
10	1220	0,100

Fonte: Adaptado de Gambale (2000)

A Tabela 8, a seguir, contém os dados referentes a cada um dos nós da rede, demandas nodais hipotéticas e a cota topográfica de cada um.

Tabela 8 - Demandas e cotas dos nós da Rede 1

Nó	Demanda (L/s)	Cota (m)
1	0	0
2	0	0
3	30	0
4	125	0
5	30	0
6	95	0
7	60	0
8	75	0

Fonte: Adaptado de Gambale (2000)

O reservatório do sistema tem as suas características apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características do reservatório R1 da Rede 1

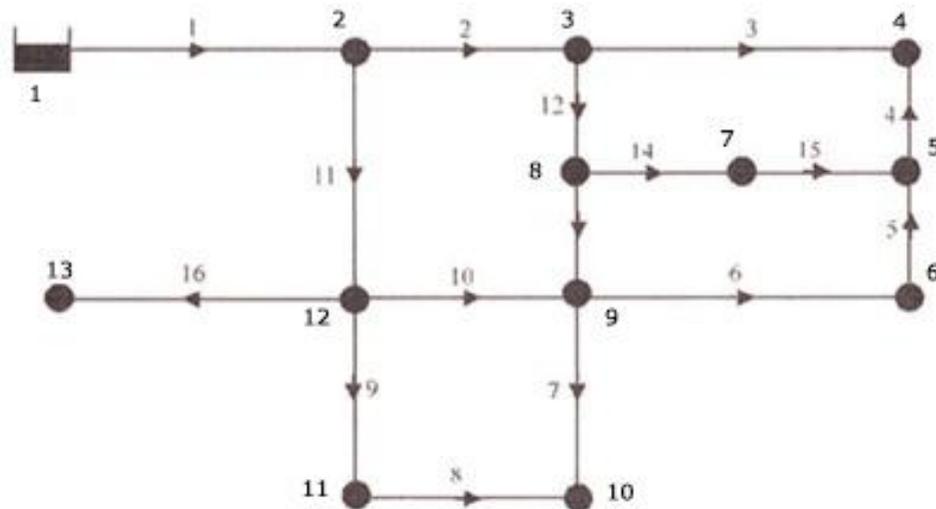
Reservatório	Demanda Total (L/s)	Nível Piezométrico (m)
RNF1	415	60

Fonte: Adaptado de Gambale (2000)

5.1.2 Rede 2

A Rede 2 foi adaptada por Tabesh, Jamasb e Moeini (2011) daquela apresentada por Lansley (2001), na Figura 10, a seguir, tem-se a representação da Rede 2 com a sua tubulação, nós e o reservatório que alimenta o sistema. No total o sistema conta com 16 tubos, 12 junções e um reservatório.

Figura 10 - Rede 2 utilizada no estudo



Fonte: Adaptado de Tabesh, Jamasb e Moeini (2011)

Os parâmetros da rede possuem as seguintes unidades: o comprimento “L” dos tubos é dado em metros (m), a rugosidade “ ϵ ” em milímetros (mm), a vazão “Q” em litros por segundo (L/s) e a cota piezométrica “z” em metros (m). Na Tabela 10, a seguir, tem-se um resumo das características físicas da tubulação da Rede 2.

Tabela 10 - Características físicas da tubulação da Rede 2

Tubo	L (m)	D (m)	Tubo	L (m)	D (m)
1	3048	0,610	9	1066,8	0,305
2	1524	0,457	10	670,6	0,381
3	1524	0,406	11	1981,2	0,457
4	1676,4	0,356	12	1524	0,356
5	1066,8	0,305	13	1676,4	0,305
6	1676,4	0,356	14	914,4	0,356
7	1371,6	0,305	15	1219,2	0,305
8	762	0,152	16	1219,2	0,406

Fonte: Adaptado de Tabesh, Jamasb e Moeini (2011)

Na Tabela 11 mostra-se os dados referentes a cada um dos nós da rede, demandas nodais hipotéticas e a cota topográfica de cada um, em que o nó 1 representa o reservatório de nível fixo do sistema.

Tabela 11 - Demandas e cotas dos nós da Rede 2

Nó	Demanda (L/s)	Cota (m)
1	-	-
2	0	45,7
3	44	48,7
4	41	50,3
5	37	48,7
6	31	45,7
7	24	47,2
8	24	44,2
9	0	42,7
10	27	39,6
11	22	41,1
12	0	44,2
13	17	39,6

Fonte: Adaptado de Tabesh, Jamasb e Moeini (2011)

O reservatório do sistema tem as suas características apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Características do reservatório R1 da Rede 2

Reservatório	Demanda Total (L/s)	Nível Piezométrico (m)
RNF2	267	115,8

Fonte: Adaptado de Tabesh, Jamasb e Moeini (2011)

5.2 Rugosidades reais

Devido à sua importância como fator determinante para os cálculos de perdas de carga em geral das tubulações, as rugosidades nem sempre são disponibilizadas facilmente pelos próprios fabricantes.

Assim, os valores de rugosidade são levantados pelo material utilizado na tubulação levando-se em conta os intervalos possíveis encontrados na bibliografia. Na Tabela 13, abaixo,

tem-se os valores de rugosidade para a Rede 1 e na Tabela 14, após a anterior, vê-se aqueles para a Rede 2.

Tabela 13 - Rugosidades reais para tubos da Rede 1

Tubo	Rugosidade ϵ (mm)
1	0,1600
2	1,2500
3	0,3000
4	0,3000
5	2,0000
6	1,2500
7	0,4000
8	1,2500
9	2,0000
10	6,0000

Fonte: Autor (2019)

Tabela 14 - Rugosidades reais para tubos da Rede 2

Tubo	Rugosidade ϵ (mm)
1	2,0000
2	2,0000
3	1,2500
4	1,2500
5	0,1000
6	0,1000
7	4,0000
8	4,0000
9	4,0000
10	4,0000
11	2,0000
12	1,2500
13	0,1000
14	1,2500
15	1,2500
16	4,0000

Fonte: Autor (2019)

Para esse trabalho utilizou-se os intervalos apresentados por Porto (2006), como apresentados na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Rugosidades absolutas equivalentes

Material	ϵ (mm) Rugosidade absoluta equivalente
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

Fonte: Porto (2006)

Uma adaptação da Tabela 15 foi feita, em que um só valor foi escolhido para os

materiais, os intervalos foram simplificados pela média e aqueles que possuem o mesmo valor foram colocados em uma só categoria, resumidas na Tabela 16, a seguir.

Tabela 16 - Valores discretos das rugosidades absolutas em mm

Material	ϵ (mm) Rugosidade absoluta equivalente
PVC	0,0058
Cimento amianto novo	0,0250
Concreto protendido Freyssinet	0,0400
Aço comercial novo; Aço laminado revestido de asfalto; Ferro forjado; Ferro fundido centrifugado	0,0500
Aço laminado novo; Aço soldado novo	0,0700
Aço soldado revestido de cimento centrifugado; Aço galvanizado, sem costura; Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,1000
Ferro fundido com revestimento asfáltico; Concreto centrifugado novo	0,1600
Aço soldado limpo, usado; Aço galvanizado, com costura	0,1750
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,2500
Ferro fundido com leve oxidação	0,3000
Ferro fundido novo	0,3750
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4000
Ferro fundido oxidado	1,2500
Aço rebitado novo; Concreto com acabamento normal	2,0000
Ferro fundido velho	4,0000
Aço rebitado em uso	6,0000

Fonte: Autor (2019)

Os valores apresentados na Tabela 16 são aqueles que foram aplicados nas duas redes, logo, após as simulações, esses são os valores atribuídos para os tubos após as simulações.

5.3 Indexação

Segundo Streeter e Wylie (1978) o processo de indexação tem como principal funcionalidade descrever a geometria e as propriedades de um sistema de maneira que um

programa consiga, eficientemente, resolver as condições de contorno. Assim cada nó do sistema pode ser escrito de uma maneira legível, para a linguagem desejada, considerando algumas condições, como as mostradas a seguir na Tabela 17.

Tabela 17 - Código para a indexação dos nós

Nó	Quantidade de tubos	Tipo
+	+	Nó comum
+	-	Nó com demanda
-	+	Reservatório
-	-	Válvula

Fonte: Ferreira (2016)

Aqui tem-se a definição de um nó comum como aquele em que não se encontram nenhuma característica especial de ser reservatório ou válvula ou ainda ter uma demanda pontual, sendo assim é aquele que possui somente a ligação de tubos.

Assim cada nó do sistema é descrito como uma sequência de algarismos, seguindo o esquema mostrado a seguir:

1º algarismo (\pm número do nó), 2º algarismo (\pm quantidade tubos que se ligam ao nó), 3º algarismo (\pm número do tubo), 4º algarismo (número da seção do tubo no nó), 5º algarismo (número da seção do tubo no nó seguinte) ...

Por exemplo para o nó 1 da Rede 1 em estudo, tem-se:

-1, 1, -1, 1, 2

Quanto a variação entre positivo e negativo no algarismo representando o número do tubo considera-se que o mesmo é positivo quando a vazão está chegando ao nó e negativo quando a mesma está saindo. Considerou-se que a todos os nós seriam do tipo “nó com demanda” colocando como zero o valor das demandas nos nós 1 e 2. Nas Figura 11 e 12, a seguir, vê-se o arquivo de entrada que contém os dados de indexação dos tubos da Rede 1 e da Rede 2, respectivamente.

Figura 11 - Arquivo de indexação dos tubos da Rede 1

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda										
-1	1	-1	1	2										
2	-4	1	2	1	-2	3	4	-3	5	6	-4	7	8	
3	-3	2	4	3	8	9	10	-9	11	12				
4	-3	3	6	5	-7	13	14	-8	10	9				
5	-2	9	12	11	-10	15	16							
6	-3	6	17	18	7	14	13	10	16	15				
7	-3	4	8	7	-5	19	20	-6	18	17				
8	-1	5	20	19	0									

Fonte: Autor (2019)

Figura 12 - Arquivo de indexação dos tubos da Rede 2

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda										
-1	1	-1	1	2										
2	-3	1	2	1	-2	3	4	-11	5	6				
3	-3	2	4	3	-3	7	8	-12	9	10				
4	-2	3	8	7	-4	11	12							
5	-3	4	12	11	5	13	14	15	15	16				
6	-2	6	17	18	-5	14	13							
7	-2	14	19	20	-15	16	15							
8	-3	12	10	9	13	21	22	-14	20	19				
9	-4	-6	18	17	-7	23	24	10	25	26	-13	22	21	
10	-2	7	24	23	8	27	28							
11	-2	-8	28	27	9	29	30							
12	-4	-9	30	29	-10	26	25	11	6	5	-16	31	32	
13	-1	16	32	31	0									

Fonte: Autor (2019)

5.4 Cargas e vazões em regime permanente

Por se tratar de uma rede hipotética, as pressões nos nós e as vazões nos tubos não são obtidas em campo, mas sim calculadas com auxílio de ferramentas computacionais. Para tal fim utilizou-se um programa desenvolvido por Araújo (2003).

O programa aqui chamado de R1 (com a sua interface mostrada na Figura 13 utiliza a linguagem FORTRAN e é capaz de discretizar a rede e realizar as interações necessárias para o cálculo em regime permanente. Como dados de entradas no R1 têm-se as características físicas da rede apresentadas nas Tabelas 7, 8, 9 e 13 para a Rede 1 e Tabelas 10, 11, 12 e 14 para a Rede 2, além dos respectivos arquivos de indexação.

Figura 13 - Captura de tela do programa R1

```

Microsoft Developer Studio - r2_tran - [r1_tran.f90]
File Edit View Insert Build Tools Window Help

ANÁLISE DE TRANSIENTES EM UMA REDE HIDRÁULICA

PROGRAM REDEEXEMPLO
PARAMETER(JO=6, JMAX=10006, NPIPE=10, NOJ=0, NSECOES=20)
PARAMETER(NQ=18, NCDG=18, DT=-3, JPR=1, NMAXTUBO=4, LOOPS=1)
PARAMETER(INDEXACAO=77)
PARAMETER(OMIN=0,000001,PREC=0,000000000001)
DIMENSION IR(NPIPE), HO(NOJ), L(NPIPE), D(NPIPE), CEL(NPIPE)
DIMENSION RUG(NPIPE), IND(INDEXACAO), R(NPIPE), B(NPIPE)
DIMENSION HJ(NOJ, JMAX)
DIMENSION H(NSECOES, JMAX), Q(NSECOES, JMAX), CC(NMAXTUBO)
DIMENSION Z(NOJ)
DIMENSION QO(NOJ, NQ)
DIMENSION VAZAOINICIAL(NPIPE)
DIMENSION HF(NPIPE), PERDA(LOOPS)
REAL L

LEITURA E IMPRESSÃO DOS DADOS DE ENTRADA

DADOS GERAIS
OPEN(1, FILE='dados1.dat')
READ(1, *) (IR(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (HO(I), I=1, NOJ)
DO I=1, NOJ
  READ(1, *) (QO(I, J), J=1, NQ)
END DO
READ(1, *) (Z(I), I=1, NOJ)
READ(1, *) (L(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (D(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (CEL(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (RUG(I), I=1, NPIPE)
DO I=1, NPIPE
  R(I)=0 *F(I)*L(I)/(3.14**2*D(I)**5*9.81)
  B(I)=4 *CEL(I)/(3.14*D(I)**2*9.81)
END DO
OPEN(2, FILE='indexacao1.dat')

```

Fonte: Autor (2019)

Como dados de saída do R1 têm-se os valores de vazão e carga em regime transiente para cada tubo e nó, respectivamente de cada rede. Nas Tabelas 18 e 19 estão representados os valores de vazão e carga para a Rede 1, respectivamente, e nas Tabelas 19 e 20 para a Rede 2.

Tabela 18 - Vazões obtidas no R1 para a Rede 1

Tubo	Vazão (L/s)
1	415,00
2	43,83
3	225,64
4	145,53
5	75,00

Tubo	Vazão (L/s)
6	10,53
7	83,57
8	17,08
9	30,90
10	0,90

Fonte: Autor (2019)

Tabela 19 - Carga hidráulica obtida no R1 para a Rede 1

Nó	Carga hidráulica (mca)
1	60,00
2	56,81
3	44,27
4	47,34

Nó	Carga hidráulica (mca)
5	37,26
6	31,56
7	34,46
8	30,21

Fonte: Autor (2019)

Tabela 20 - Vazões obtidas no R1 para a Rede 2

Tubo	Vazão (L/s)	Tubo	Vazão (L/s)
1	265,56	9	18,30
2	157,44	10	74,27
3	63,74	11	108,13
4	22,74	12	49,69
5	3,02	13	9,54
6	34,02	14	35,24
7	30,70	15	11,24
8	3,70	16	17,01

Fonte: Autor (2019)

Tabela 21 - Carga hidráulica obtida no R1 para a Rede 2

Nó	Carga hidráulica (mca)	Nó	Carga hidráulica (mca)
1	115,80	7	104,59
2	110,08	8	104,89
3	106,02	9	105,01
4	104,76	10	104,15
5	104,49	11	103,70
6	104,49	12	106,06

Fonte: Autor (2019)

5.5 Cargas e vazões em regime transiente

Para o cálculo das pressões geradas pela aplicação do regime transiente nas redes utilizou-se o programa aqui chamado de R2 (Figura 14), sendo um programa adaptado daquele apresentado por Araújo (2003), assim como o anterior o presente também utiliza uma linguagem FORTRAN e tem como saída um arquivo com os valores das pressões em um determinado nó e a vazão em um tubo escolhido, adjacente ao nó, no espaço de tempo desejado.

no tubo k ;

M tempo total de duração do transiente;

N é a quantidade de pontos monitorados;

W_H e W_Q são os pesos dados para a carga hidráulica e a vazão, respectivamente.

As três FOs foram aplicadas separadamente simulando as duas redes com o objetivo de calibrar os fatores de atrito de cada tubo. A FO1 foi adaptada daquela apresentada por Fuentes, Galvis e Valderrama (2006), já FO2 é uma modificação da FO1 trocando a carga hidráulica pela vazão e a FO3 é uma adaptação de Koppel e Vassiljev (2010), todas anteriormente apresentadas no capítulo 4.

Tais funções foram escolhidas para poder avaliar o funcionamento da calibração utilizando a carga hidráulico como parâmetro na FO, após a vazão e por último os dois utilizados juntamente e associados com os pesos que correspondem a cada um.

A FO3 possui um diferencial por conter os pesos atribuídos para cada uma das parcelas da função, na literatura existem diversos métodos para o cálculo de tais fatores, como: Lansley e Basnet (1991), Wu *et al* (2002), Koppel e Vassiljev (2010), Tabesh, Jamasb e Moeini (2011) e Do *et al* (2016).

Nesse trabalho optou-se pela metodologia aplicada por Tabesh, Jamasb e Moeini (2011) que consiste em aplicar as seguintes expressões para o cálculo dos pesos:

$$W_H = \frac{H_{loss_j}^{meas}}{\sum H_{loss_j}^{meas}} \quad (86)$$

$$W_Q = \frac{Q_j^{meas}}{\sum Q_j^{meas}} \quad (87)$$

A partir dessas expressões o W_H é calculado fazendo a razão entre a perda de carga entre o reservatório e o nó medido (numerador) e a perda de carga total do sistema (denominador), já W_Q é calculado fazendo a razão entre a vazão no tubo (numerador) e a vazão total do sistema (denominador).

Em um primeiro momento o W_H foi calculado utilizando o menor caminho entre o reservatório e nó, seguindo sempre o sentido do escoamento.

5.7 Configuração do Algoritmo Genético

A cadeia de binária que representa a solução do problema é composta de 40 posições para a Rede 1 e 64 posições para a Rede 2, logo representando o comprimento do cromossomo (NB), sendo 10 o número de tubos da Rede 1 e 16 da Rede 2 (NV), a cada 4 números tem-se a rugosidade de um tubo, sendo 4 o comprimento de cada variável (L1).

Pode-se notar que os valores foram representados em uma cadeia binária de comprimento 4, logo podendo representar um número decimal de 0 até 15, assim a rugosidade assume qualquer valor apresentado na Tabela 16, anteriormente apresentada, a seguir pode-se ver a representação binária das rugosidades.

Tabela 22 - Representação binária dos valores discretos da rugosidade

Decimal	Cadeia de binário				Binário	ϵ (mm)
0	0	0	0	0	0000	0,0058
1	0	0	0	1	0001	0,0250
2	0	0	1	0	0010	0,0400
3	0	1	0	0	0100	0,0500
4	1	0	0	0	1000	0,0700
*	*	*	*	*	*	*
11	1	1	1	0	1110	0,4000
12	1	1	0	1	1101	1,2500
13	1	0	1	1	1011	2,0000
14	0	1	1	1	0111	4,0000
15	1	1	1	1	1111	6,0000

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 15, a seguir, pode-se ver uma representação de um vetor solução em formato binário, com cada grupo de 4 posições no cromossomo representado um dos tubos da Rede 1, totalizando 40 posições.

Figura 15 - Exemplo de vetor solução para a Rede 1

Tubo 1				Tubo 2				Tubo 3				*	Tubo 9				Tubo 10			
Posições 1 a 4				Posições 5 a 8				Posições 9 a 12				*	Posições 33 a 36				Posições 37 a 40			
0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	*	0	0	0	0	1	0	1	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	*	33	34	35	36	37	38	39	40
Posições												Posições								

Fonte: Adaptado de Gambale (2000)

Já a Rede 2 totaliza 96 posições, por ter 16 tubos, cada um representado por 4 posições em sequência, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Exemplo de vetor solução para a Rede 2

Tubo 1				Tubo 2				Tubo 3				*	Tubo 15				Tubo 16			
Posições 1 a 6				Posições 7 a 12				Posições 13 a 18				*	Posições 57 a 60				Posições 61 a 64			
1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	*	0	0	1	0	1	1	1	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	*	57	58	59	60	61	62	63	64
Posições												Posições								

Fonte: Adaptado de Gambale (2000)

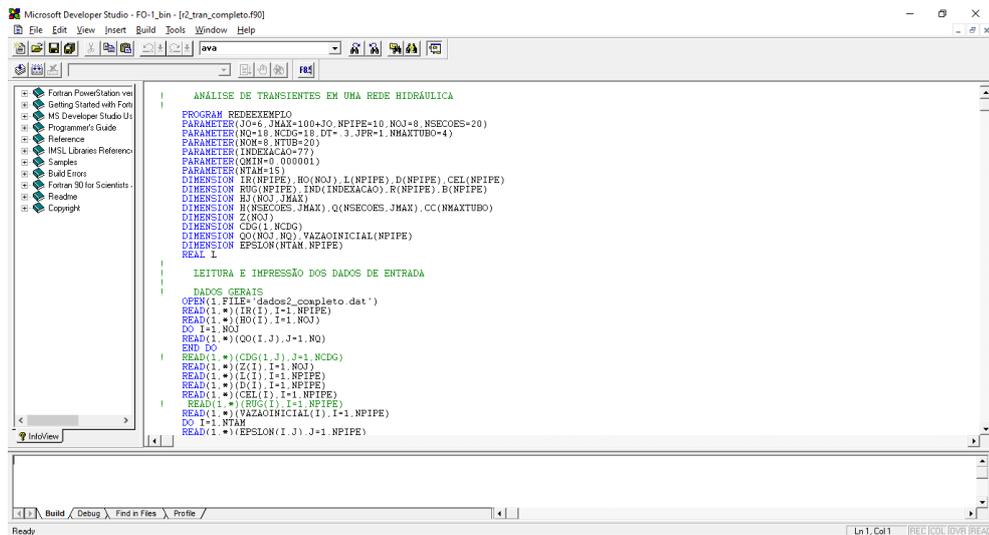
Na Tabela 21 tem-se um resumo dos parâmetros utilizados no algoritmo genético.

Tabela 23 - Parâmetros do algoritmo genético

Parâmetro	Valor adotado Rede 1	Valor adotado Rede 2
Cruzamento	1 ponto	1 ponto
Mutação	Simple	Simple
Representação	Binária	Binária
Codificação	Discreta	Discreta
Número de variáveis (NV)	10	16
Comprimento de cada variável (L1)	6	6
Comprimento do cromossomo (NB)	60	96
Taxa de elitismo (FILHOS)	50 %	50 %
Taxa de cruzamento (PC)	60 %	60 %
Taxa de mutação (PM)	0,10 %	0,10 %
Intervalo de tempo do transiente (Δt)	0,3 s	0,5 s
Tempo de transiente (NTEMPO)	30 s	30 s
Número de gerações (NG)	50	50
Tamanho da população (NC)	100	100

Fonte: Autor (2019)

Figura 19 - Captura de tela do programa R2_Completo

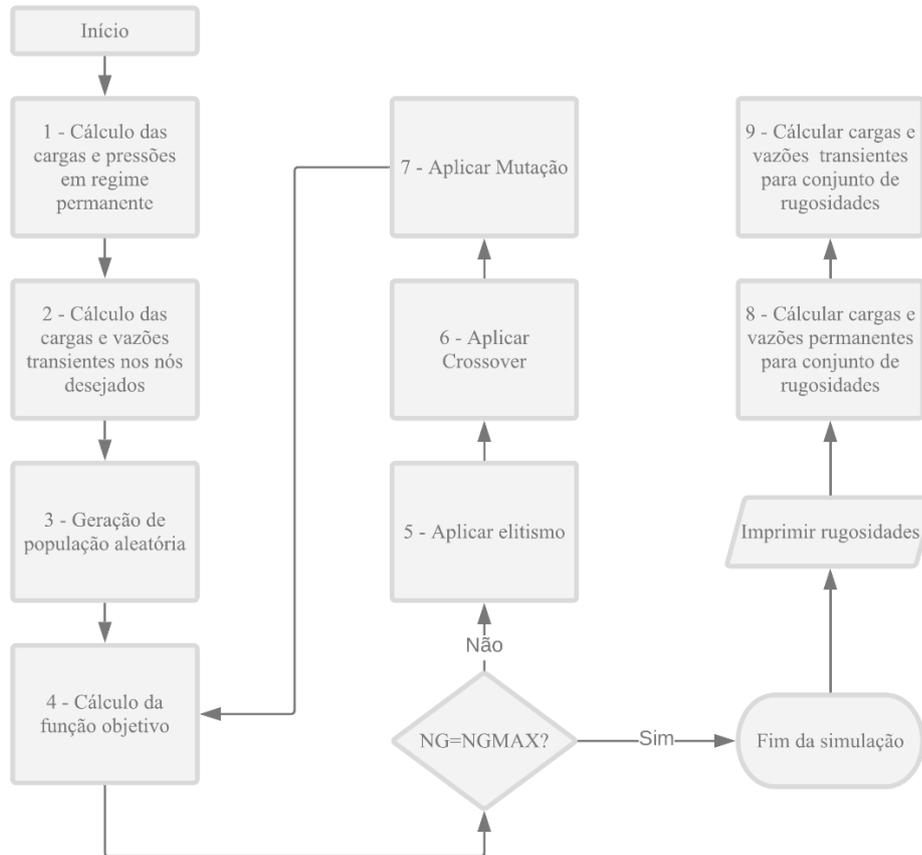


Fonte: Autor (2019)

5.12 Fluxograma de aplicação da metodologia

Na Figura 20 abaixo tem-se o fluxograma das etapas da metodologia proposta.

Figura 20 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor (2019)

Os passos 1 e 2 são realizados nos programas R1 e R2, respectivamente, como apresentado nas seções 5.4 e 5.5. A partir da etapa 3 os procedimentos acontecem no programa R3, para esta etapa tem-se como entrada o tamanho da população (NC) de 100 indivíduos em todas as simulações.

Para o passo 4 o valor da função objetivo de cada uma das soluções da população inicial é calculado, logo após é aplicada a condição de parada e caso a geração atual seja a geração máxima o programa acabará o processamento e os resultados são impressos de acordo com os comandos dados pela programação, caso contrário o processamento continua para as etapas seguintes.

Na etapa 5 o operador de elitismo (FILHOS) é aplicado, foi-se determinada uma taxa de 50% de chances de aplicação da mesma, após alguns pré-processamentos em que as simulações com 50% de elitismos se mostraram superiores àquelas com 0% e 100%, o que segue os resultados apresentados por Andrade (2017). As soluções são escolhidas aleatoriamente e de acordo com a *seleção proporcional à aptidão*, sendo assim caso ocorra a escolha de uma delas, a mesma não passará pelo próximo processo de crossover.

A etapa 6 representa o cruzamento das soluções, determinou-se como taxa de cruzamento (PC) um valor de 60%, seguindo o que foi proposto por Gambale (2000) quando afirmou que a mesma estava compreendida entre 50% e 80%. Para tanto as soluções, que estão ordenadas em ordem decrescente de 1 a NC em decorrência do elitismo aplicado anteriormente, são divididas em duplas e através de PC podem ou não se cruzar, sendo o cruzamento de 1 ponto a cadeia é dividida em dois em um determinado local, também escolhido aleatoriamente, e os valores a direita do ponto de cada solução são trocados.

O passo 7 representa a aplicação do operador de mutação, a taxa de mutação (PM) aplicada no nosso estudo é dada pela equação definida a seguir:

$$PM(\%) = \frac{1}{NC \times NB} \times 100 \quad (89)$$

Em que:

$PM(\%)$ é a probabilidade de mutação;

NC é o tamanho da população; e

NB é o comprimento do cromossomo.

A escolha do local de aplicação da mutação ocorre aleatoriamente entre todas as posições da solução, sendo assim a responsável pela troca do valor na posição determinada. Após a aplicação da mutação tem-se uma nova família de soluções que passará pelo processo de aplicação da função objetivo até que o número da geração seja o número máximo quando o

processo verá o seu fim, caso contrário os passos 5, 6 e 7 se repetirão. Logo, o critério de parada escolhido é o de número máximo de gerações.

Após a impressão dos resultados, que são as rugosidades simuladas, esse conjunto de respostas são utilizados nos programas R1_Completo e R2_Completo para o cálculo das cargas e vazões em regime permanente e transiente, respectivamente, conforme passos número 8 e 9.

5.13 Nós, seções e tubos estudados

Visando abranger diferentes pontos das redes, alguns nós e seções foram escolhidos para serem simulados. A escolha foi baseada em quatro critérios, a saber:

- Nó, com demanda individual, mais próximo do reservatório;
- Nó, com demanda individual, mais distante do reservatório;
- Nó com grande número de tubos ligados a ele; e
- Nó de extremidade da rede.

Assim, buscou-se observar as variações dos resultados apresentados de acordo com a posição do nó estudado e, conseqüentemente, do tubo a ele ligado, na calibração da rugosidade.

Na Figura 21, a seguir, tem-se uma representação da Rede 1 com o acréscimo das seções dos tubos, o que pode ser encontrado na Figura 22 para a Rede 2.

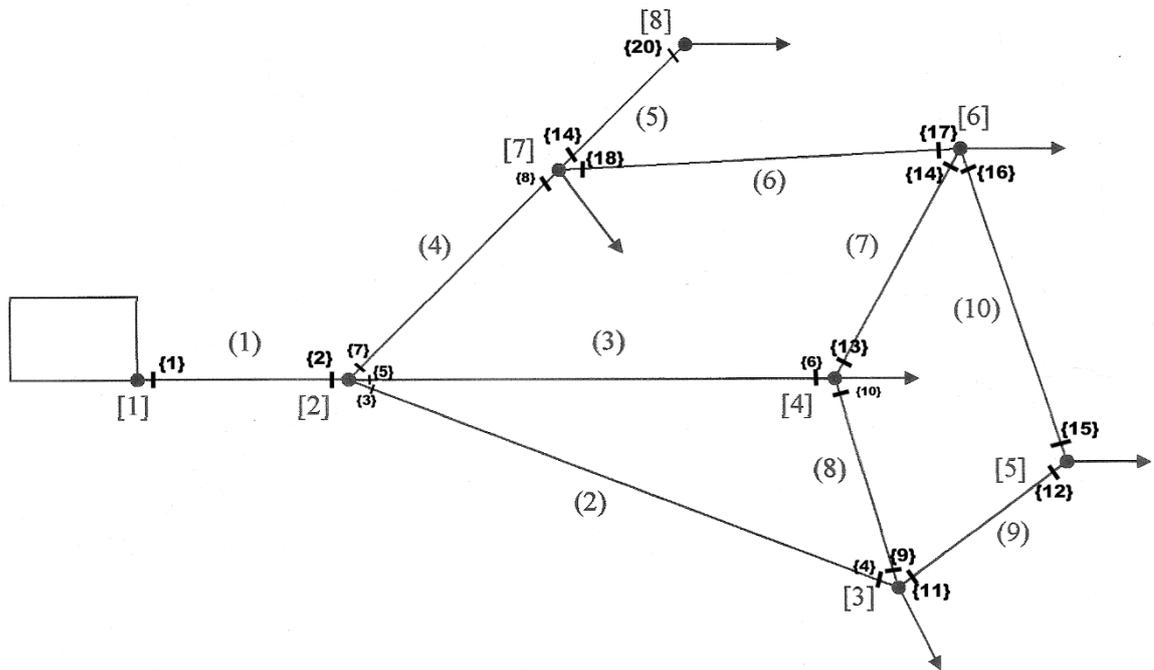
Na Tabela 24 estão mostrados os nós e seções escolhidos para serem simulados.

Tabela 24 - Resumo dos nós e seções simulados

Rede 1				
Mais próximo do reservatório	Nó	7	Seção	8
Mais distante do reservatório	Nó	6	Seção	14
Grande número de tubos ligados	Nó	3	Seção	4
Extremidade da rede	Nó	8	Seção	20
Rede 2				
Mais próximo do reservatório	Nó	3	Seção	4
Mais distante do reservatório	Nó	4	Seção	8
Maior número de tubos ligados	Nó	8	Seção	10
Extremidade da rede	Nó	13	Seção	32

Fonte: Autor (2019)

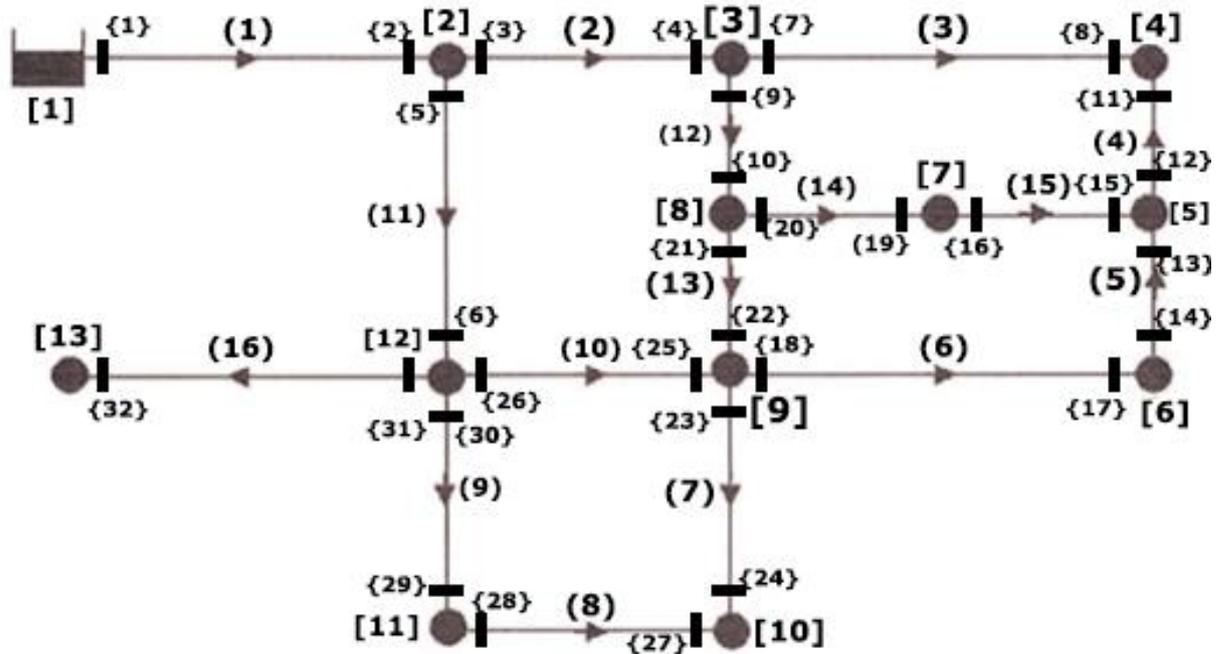
Figura 21 - Rede 1 com numeração de cada seção



Fonte: Adaptado de Gambale (2000)

Na Figura 21 a numeração dos trechos se encontra entre parênteses, a dos nós em colchetes e das seções dos tubos em chaves.

Figura 22 - Rede 2 com numeração de cada seção



Fonte: Adaptado de Tabesh, Jamasb e Moeini (2011)

Na Figura 22 a numeração dos trechos se encontra entre parênteses, a dos nós em colchetes e das seções dos tubos em chaves.

Para o estudo dos três melhores resultados apresentados pelas diferentes funções objetivo em um mesmo nó, especialmente na Rede 1, escolheu-se o nó com a seção apresentado na Tabela 25, a seguir.

Tabela 25 - Nó e seção selecionados na Rede 1

Nó	6	Seção	14
-----------	----------	--------------	-----------

Fonte: Autor (2019)

6 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados estão aqui apresentados divididos, primeiramente, entre as duas redes estudadas, em seguida entre a divisão de classificação do nó, que será explanada em cada tópico, e por fim aqueles referentes ao nó da Rede 2, para o estudo das seções de um mesmo nó.

Para cada simulação, será apresentada as características do AG e posteriormente os valores simulados das rugosidades em mm e o EMR apresentado. Os parâmetros do AG utilizados no R3 são apresentados na Tabela 26, a seguir.

Tabela 26 - Características do AG utilizadas no programa R3

Cruzamento:	1 ponto
Mutação:	Simple
Representação:	Binária
Codificação:	Discreta
Número de variáveis (NV):	16
Comprimento de cada variável (L1):	4
Comprimento do cromossomo (NB):	64
Taxa de Elitismo (FILHOS):	50 %
Taxa de cruzamento (PC):	60 %
Taxa de mutação (PM):	0,0625 %
Intervalo de tempo transiente (Dt):	0,3 s
Tempo transiente (NTEMPO):	30 s
Número de gerações (NG):	50
Número da população (NC):	100

Fonte: Autor (2019)

6.1 Rede 1

6.1.1 Função Objetivo 1

6.1.1.1 Nó 3 Seção 4

Para essa primeira simulação utilizou-se, na Rede 1, o nó 3 e a seção 4, como sendo o nó com um grande número de tubos ligados a ele, na Tabela 27, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 28 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 27 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 1 N3 Seção 4

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,0250	84,4
2	1,2500	4,0000	220,0
3	0,3000	0,2500	16,7
4	0,3000	0,3750	25,0
5	2,0000	0,2500	87,5
6	1,2500	0,0700	94,4
7	0,4000	0,0250	93,8
8	1,2500	0,0500	96,0
9	2,0000	2,0000	0,0
10	6,0000	4,0000	33,3
EMR (%)			75,10

Fonte: Autor (2019)

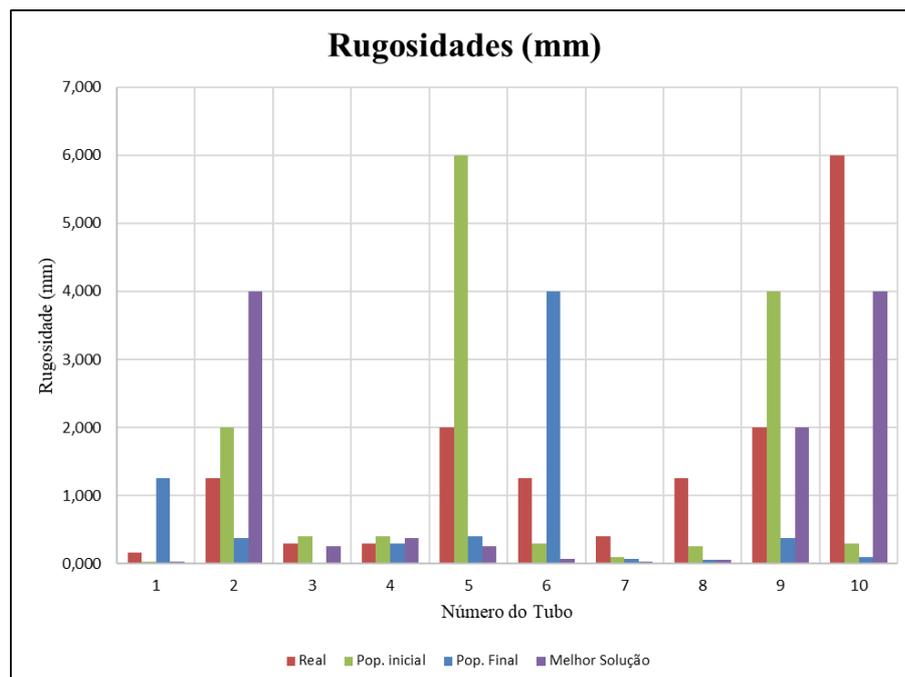
Tabela 28 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 1 N3 Seção 4

FO1	0,000067920
Nº Geração Ótima	4

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 1, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

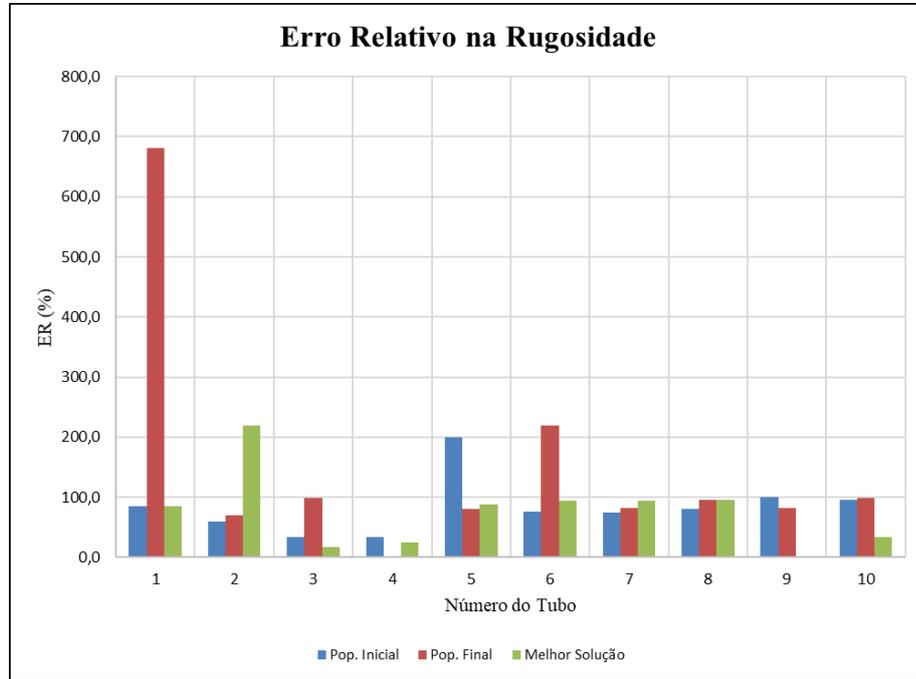
Gráfico 1 – Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 2, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa primeira simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

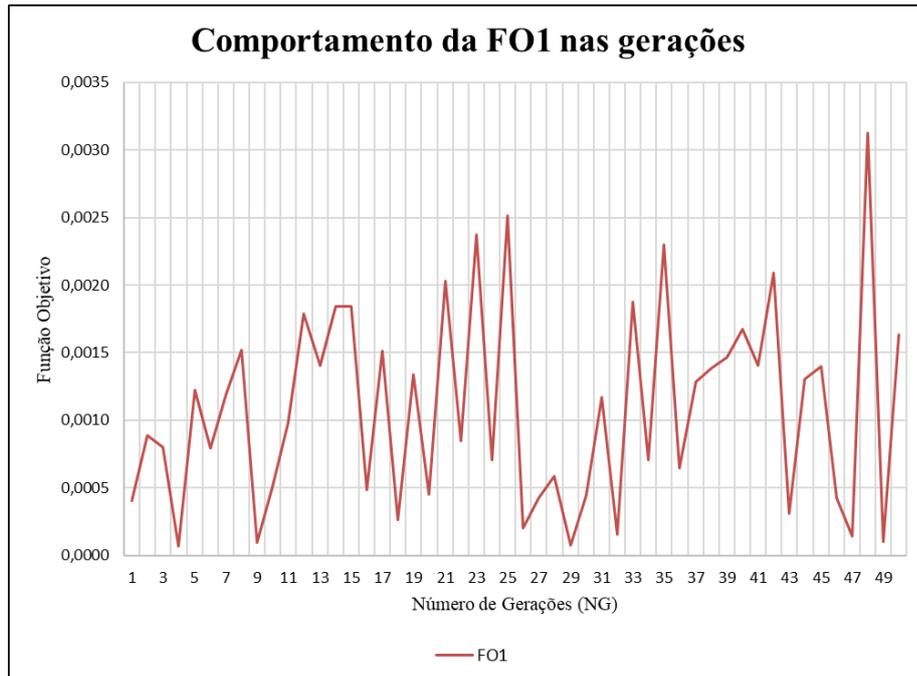
Gráfico 2 – Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 Nó 3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 3 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 3 – Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 4 Seção 3 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.1.2 Nó 6 Seção 14

Tem-se na Rede 1, o nó 6 e a seção 14, como sendo o nó com maior distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 29, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 30 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 29 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 1 Nó 6 Seção 14

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,4000	150,0
2	1,2500	0,1750	86,0
3	0,3000	0,1600	46,7
4	0,3000	0,3750	25,0
5	2,0000	0,0500	97,5
6	1,2500	0,4000	68,0
7	0,4000	0,4000	0,0
8	1,2500	0,0500	96,0
9	2,0000	0,0250	98,8
10	6,0000	2,0000	66,7
EMR (%)			73,46

Fonte: Autor (2019)

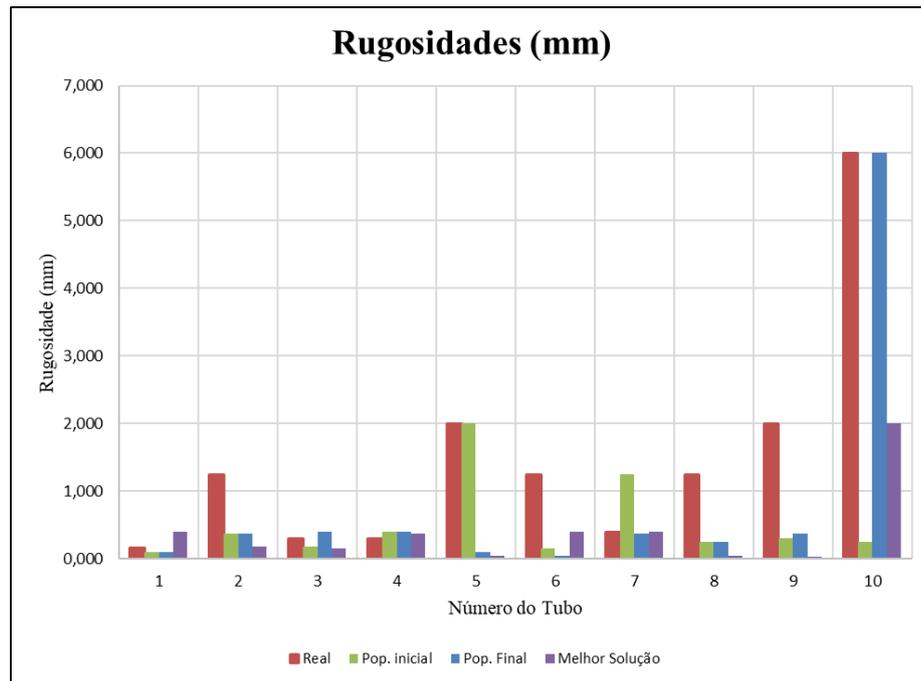
Tabela 30 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 1 Nó 6 Seção 14

FO1	0,000527980
Nº Geração Ótima	22

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 4, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

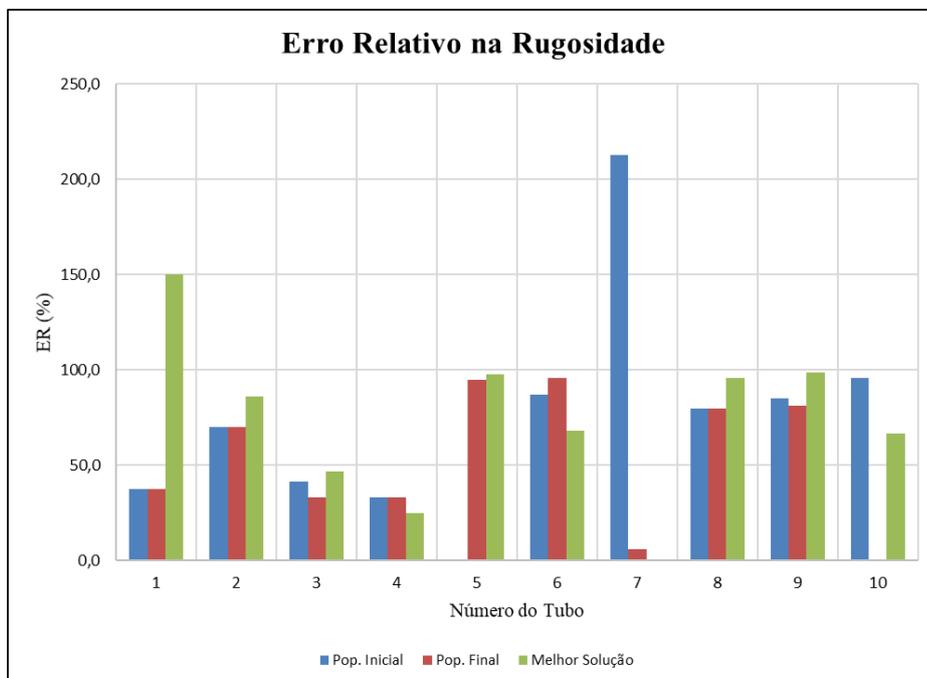
Gráfico 4 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 N6 Seção 14



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 5, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

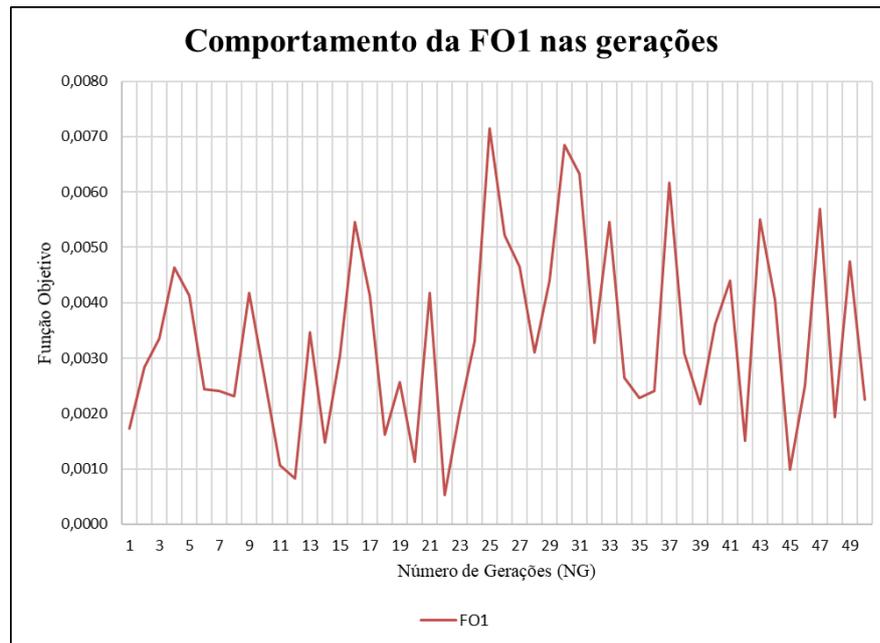
Gráfico 5 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 N6 Seção14



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 6 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 6 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 N6 6 Seção 14 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.1.3 Nó 7 Seção 8

Tem-se na Rede 1, o nó 7 e a seção 8, como sendo o nó com menor distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 31, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 32 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 31 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 N6 7 Seção 8

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,4000	150,0
2	1,2500	6,0000	380,0
3	0,3000	0,0250	91,7
4	0,3000	0,4000	33,3
5	2,0000	0,0400	98,0
6	1,2500	4,0000	220,0
7	0,4000	0,0700	82,5
8	1,2500	1,2500	0,0
9	2,0000	0,2500	87,5
10	6,0000	0,0700	98,8
EMR (%)			124,18

Fonte: Autor (2019)

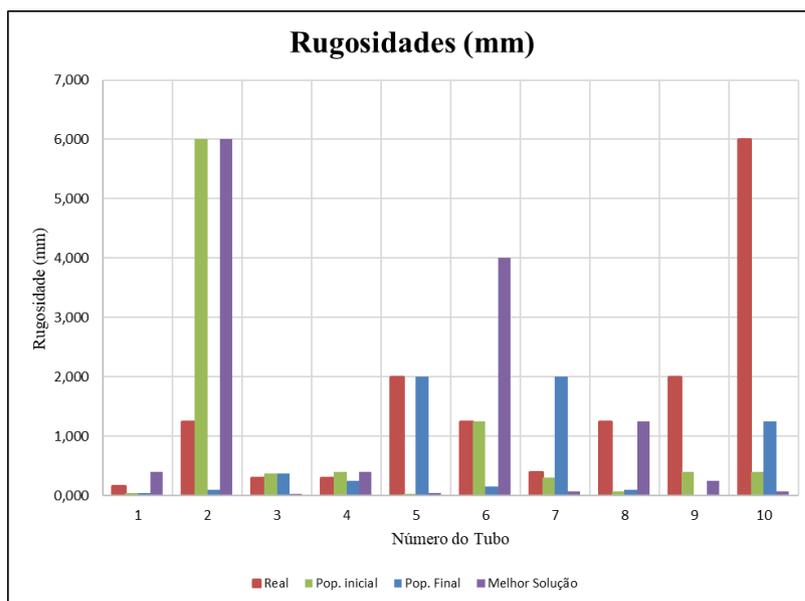
Tabela 32 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 N  7 Se  8

FO1	0,000445110
N� Gera� �tima	4

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 7, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da popula   o inicial e final, como também da melhor solu   o do processamento.

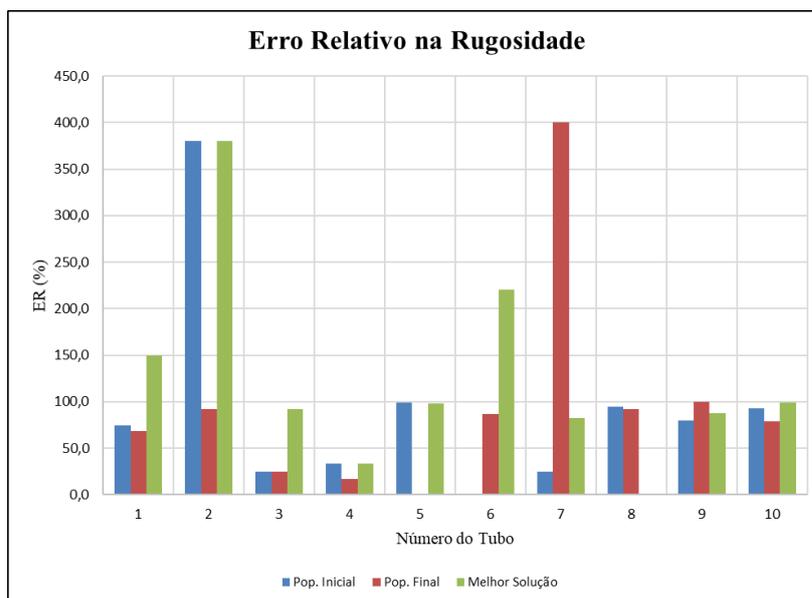
Gráfico 7 - Rugosidades reais, popula   o inicial e final e melhor solu   o FO1 Rede 1 N  7 Se  8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 8, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simula   o, também com os resultados apresentados para as condi  ões anteriores.

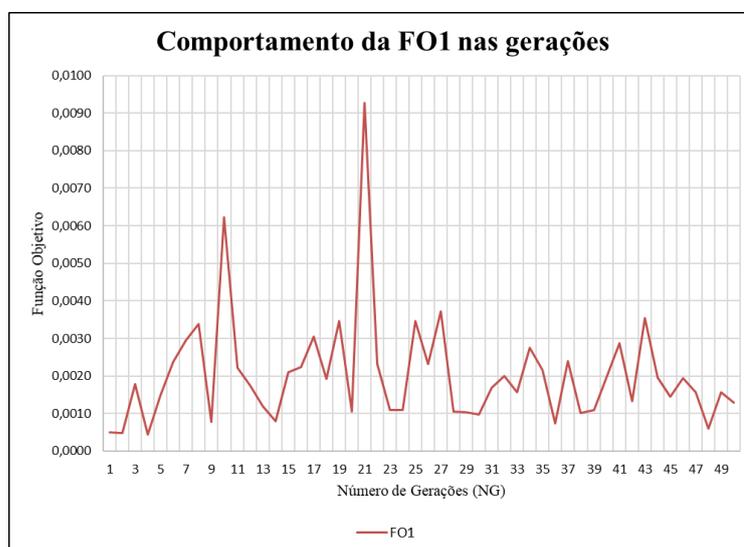
Gráfico 8 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 N  7 Se  8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 9 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 9 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 7 Seção 8 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.1.4 Nó 8 Seção 20

Tem-se na Rede 1, o nó 8 e a seção 20, como sendo o nó de extremidade da rede, na Tabela 33, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 34 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 33 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 1 Nó 8 Seção 20

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	134,4	134,4
2	1,2500	70,0	70,0
3	0,3000	83,3	83,3
4	0,3000	33,3	33,3
5	2,0000	37,5	37,5
6	1,2500	380,0	380,0
7	0,4000	56,3	56,3
8	1,2500	0,0	0,0
9	2,0000	100,0	100,0
10	6,0000	33,3	33,3
EMR (%)			92,81

Fonte: Autor (2019)

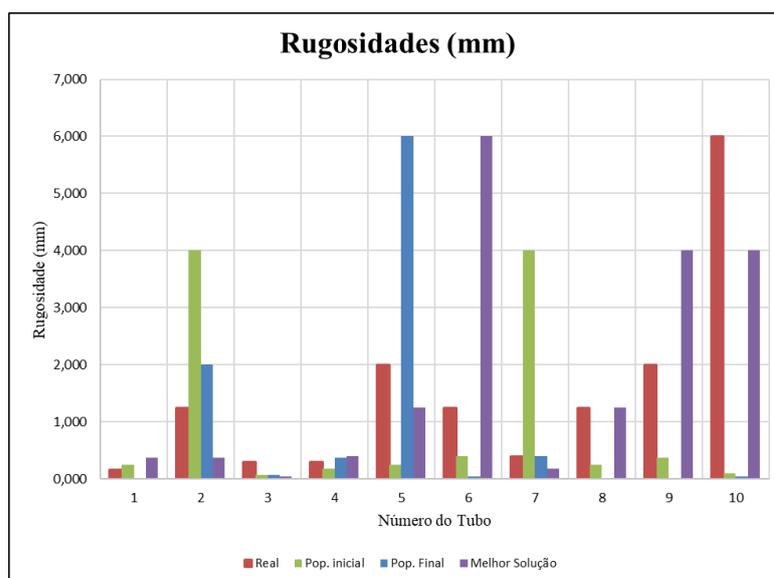
Tabela 34 - Valor da FO 3 e geração ótima para FO1 e Rede 1 N° 8 Seção 20

FO1	0,001073520
N° Geração Ótima	20

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 10, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

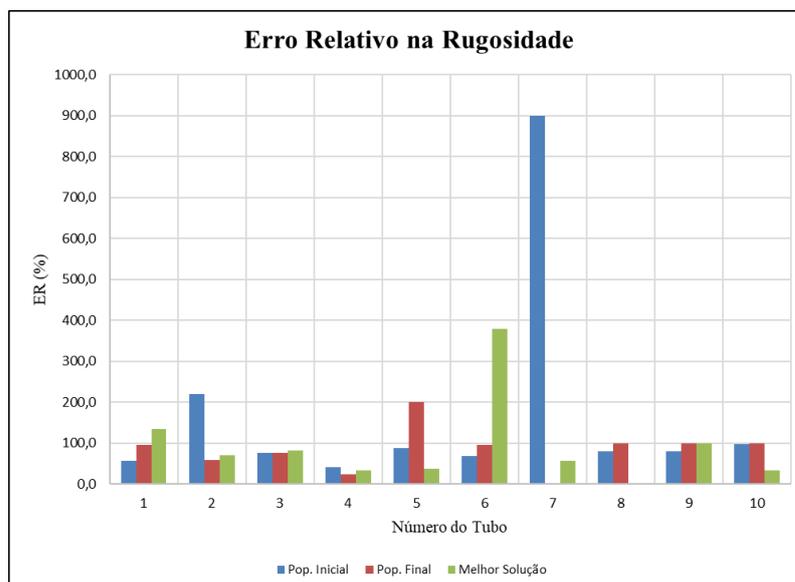
Gráfico 10 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 1 N° 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 11, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

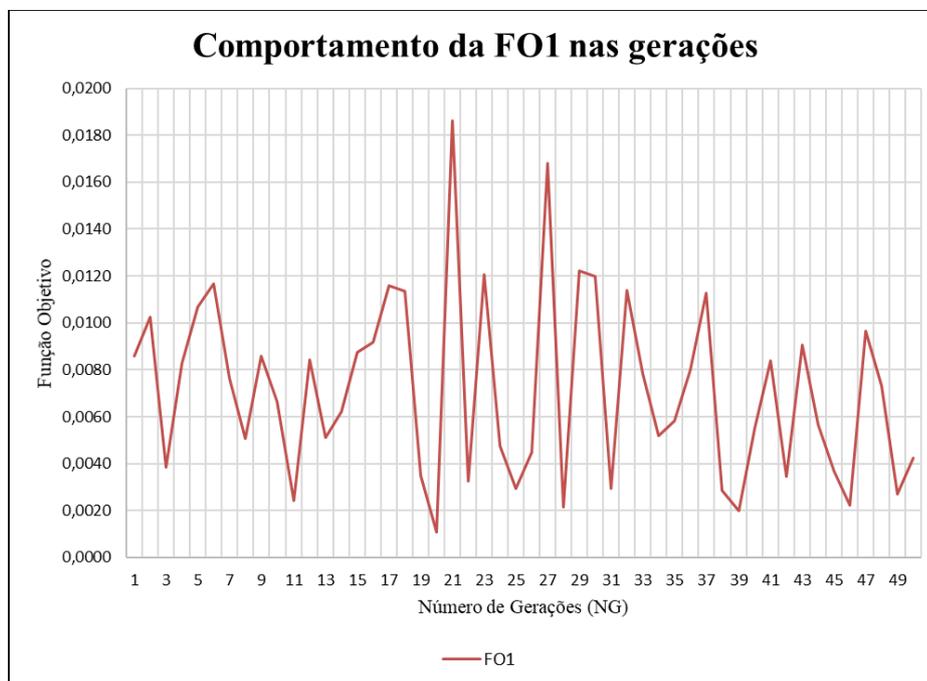
Gráfico 11 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 1 N° 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 12 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 12 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 8 Seção 20 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.2 Função Objetivo 2

6.1.2.1 Nó 3 Seção 4

Para essa simulação com a Função Objetivo 2 utilizou-se, na Rede 1, o nó 3 e a seção 4, na Tabela 35, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 36 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 35 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 3 Seção 4

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,0700	56,3
2	1,2500	0,3000	76,0
3	0,3000	0,0400	86,7
4	0,3000	0,0250	91,7
5	2,0000	0,3000	85,0
6	1,2500	0,3750	70,0
7	0,4000	0,4000	0,0

continua

continuação

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
8	1,2500	0,0058	99,5
9	2,0000	0,0500	97,5
10	6,0000	1,2500	79,2
EMR (%)			74,18

Fonte: Autor (2019)

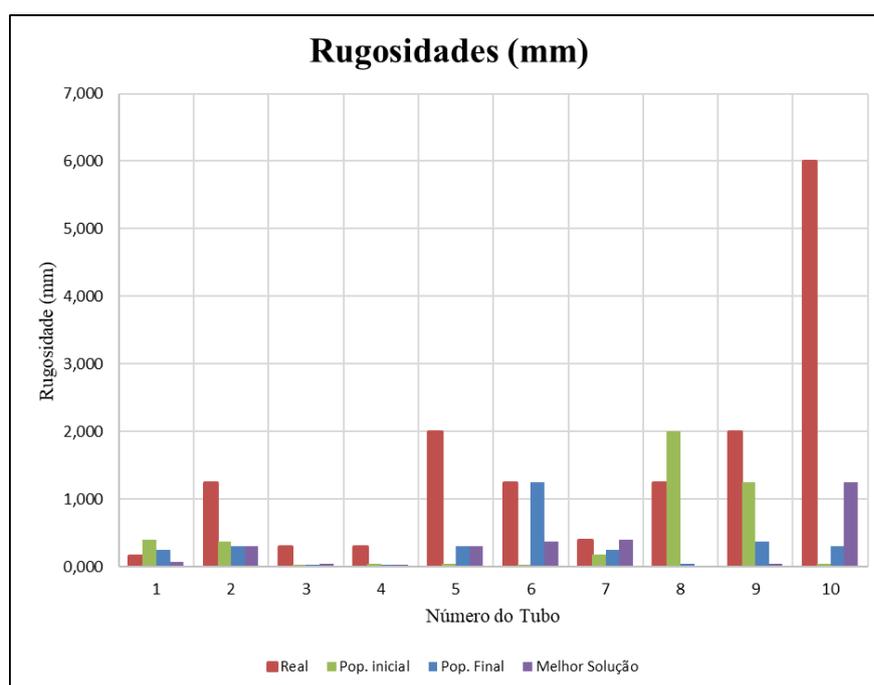
Tabela 36 - Valor da FO 1 e geração ótima para FO2 e Rede 1 Nó 3 Seção 4

FO2	0,000051510
Nº Geração Ótima	44

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 13, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

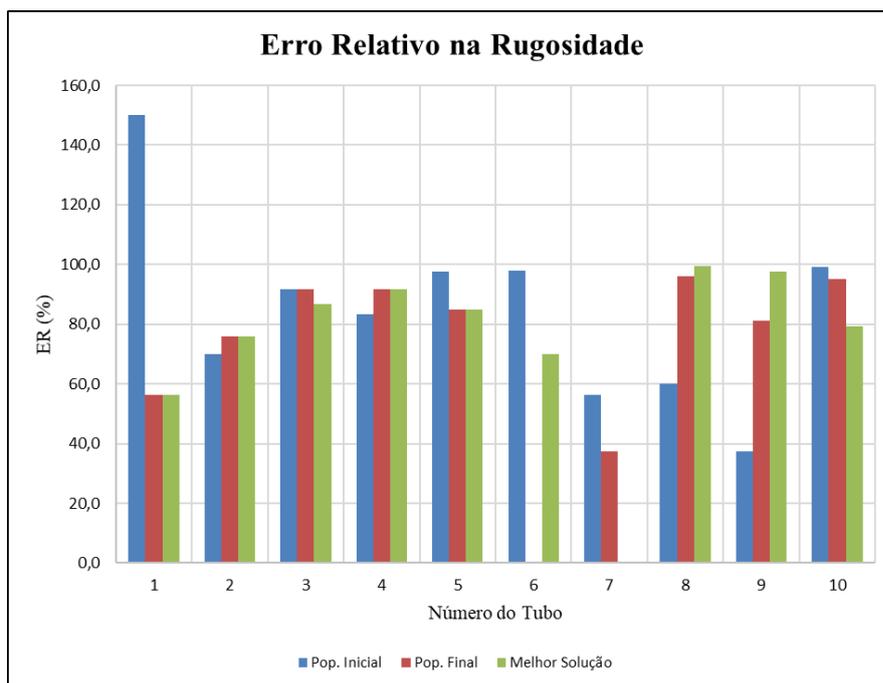
Gráfico 13 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 1 Nó 3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 14, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

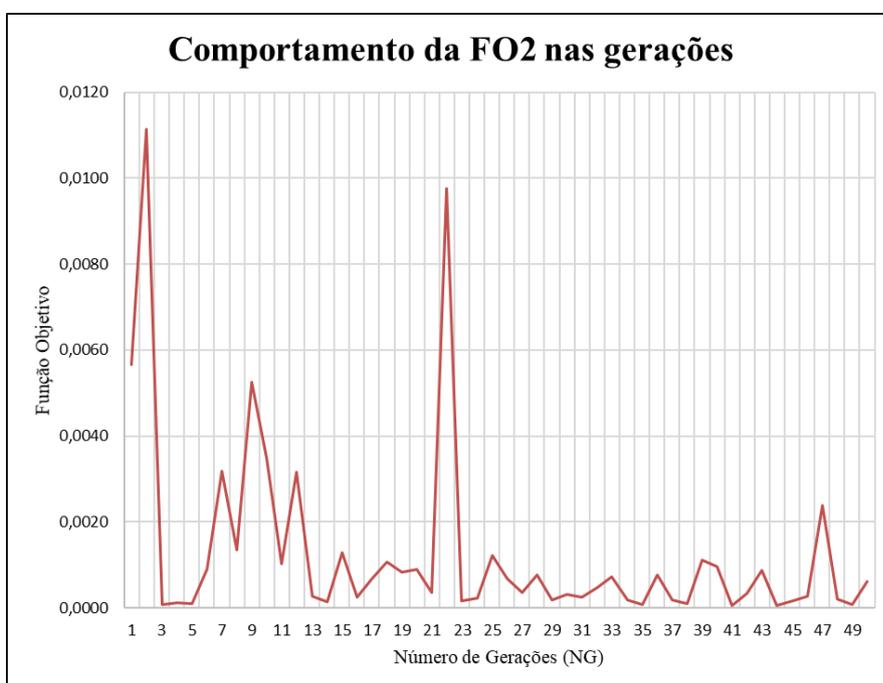
Gráfico 14 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 1 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 15 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 15 - Comportamento da FO2 nas gerações no N3 Seção 4 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.2.2 Nó 6 Seção 14

Tem-se na Rede 1, o nó 6 e a seção 14, como sendo o nó com maior distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 37, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 38 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 37 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 6 Seção 14

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,0400	75,0
2	1,2500	0,1750	86,0
3	0,3000	0,0500	83,3
4	0,3000	0,1000	66,7
5	2,0000	0,1000	95,0
6	1,2500	1,2500	0,0
7	0,4000	0,1750	56,3
8	1,2500	4,0000	220,0
9	2,0000	0,4000	80,0
10	6,0000	0,0400	99,3
EMR (%)			86,16

Fonte: Autor (2019)

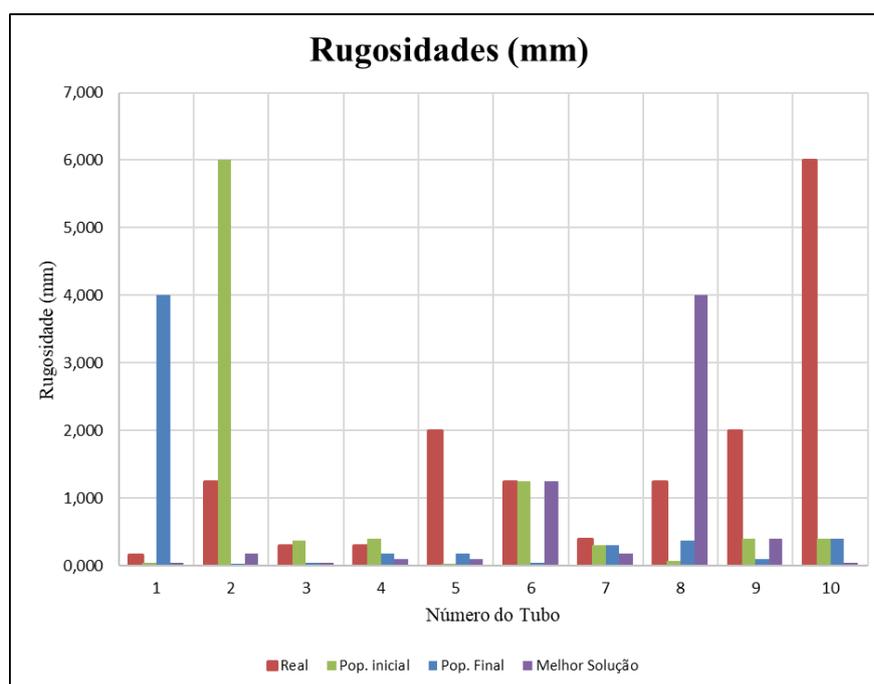
Tabela 38 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 1 Nó 6 Seção 14

FO2	0,00018943
Nº Geração Ótima	4

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 16, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

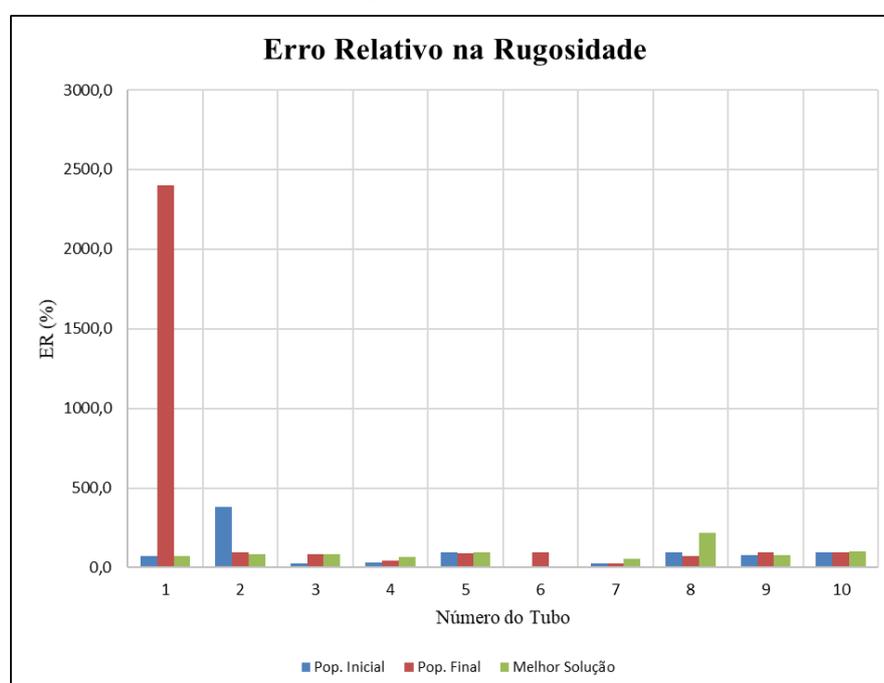
Gráfico 16 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 1 N6 Seção 14



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 17, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

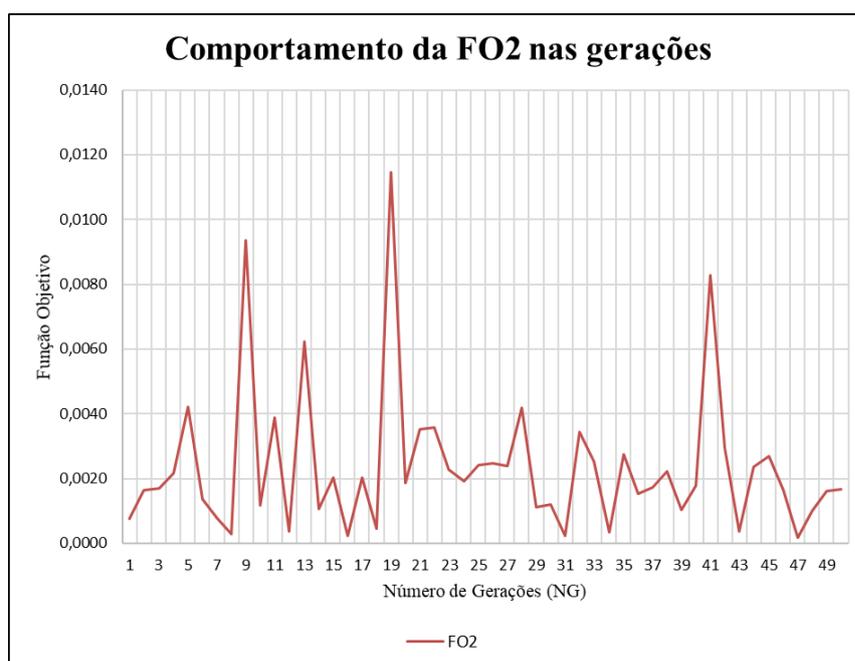
Gráfico 17 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO 2 Rede 1 N6 Seção 14



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 18 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 18 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 6 Seção 14 Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.2.3 Nó 7 Seção 8

Tem-se na Rede 1, o nó 7 e a seção 8, como sendo o nó com menor distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 39, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 40 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 39 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 7 Seção 8

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,4000	150,0
2	1,2500	0,1750	86,0
3	0,3000	0,0058	98,1
4	0,3000	0,0700	76,7
5	2,0000	0,0700	96,5
6	1,2500	0,3750	70,0
7	0,4000	0,2500	37,5
8	1,2500	0,4000	68,0
9	2,0000	0,3750	81,3
10	6,0000	1,2500	79,2
EMR (%)			84,32

Fonte: Autor (2019)

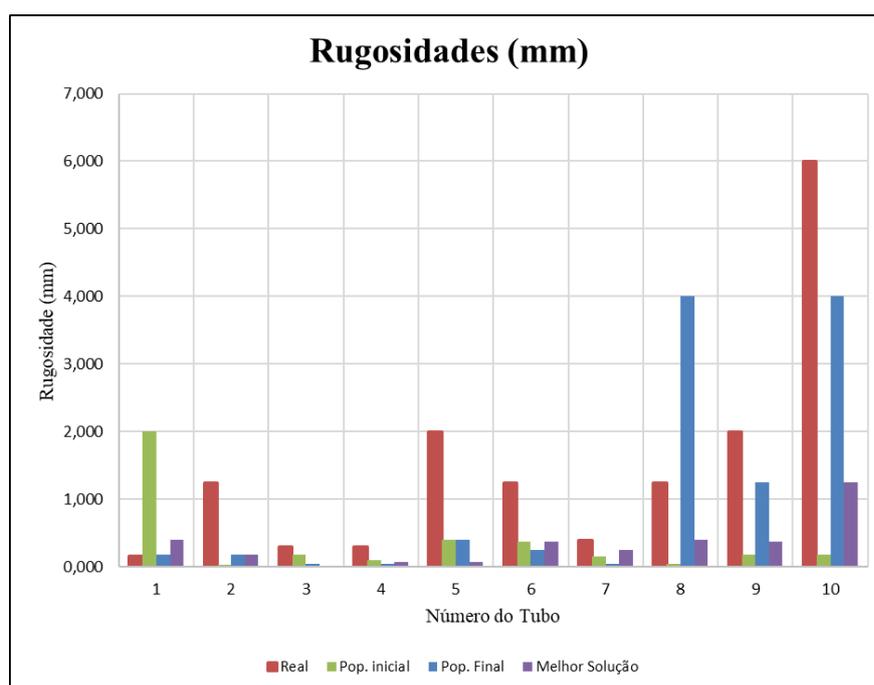
Tabela 40 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 1 N6 7 Seção 8

FO2	0,00009641
Nº Geração Ótima	41

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 19, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

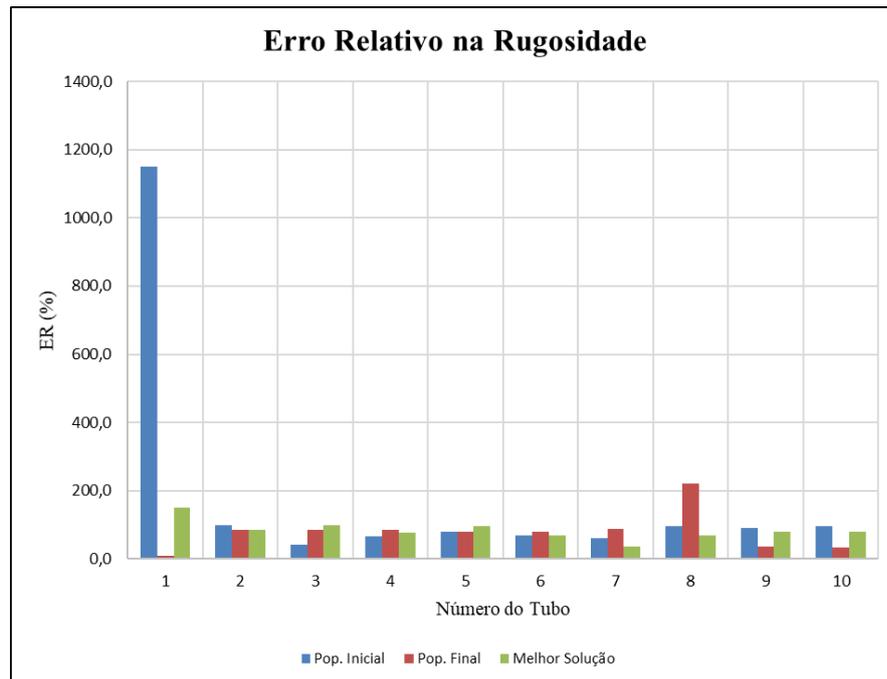
Gráfico 19 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 1 N6 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 20, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

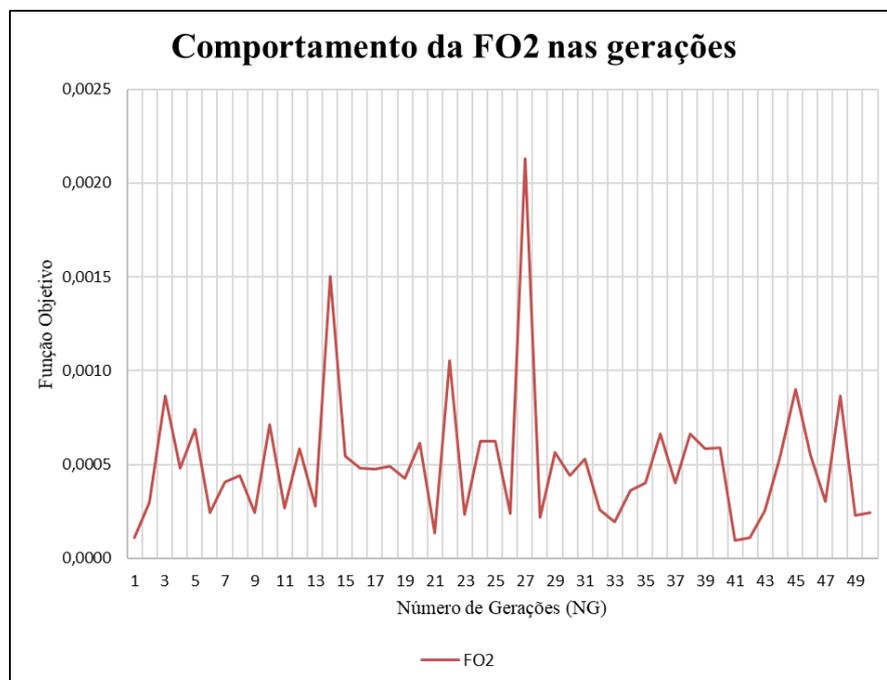
Gráfico 20 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 1 N6 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 21 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 21 - Comportamento da FO2 nas gerações no Rede 1 N6 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

6.1.2.4 Nó 8 Seção 20

Tem-se na Rede 1, o nó 8 e a seção 20, como sendo o nó de extremidade da rede, na Tabela 41, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 42 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 41 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 1 Nó 8 Seção 20

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	4,0000	2400,0
2	1,2500	0,2500	80,0
3	0,3000	0,0500	83,3
4	0,3000	4,0000	1233,3
5	2,0000	0,0400	98,0
6	1,2500	0,0500	96,0
7	0,4000	6,0000	1400,0
8	1,2500	0,0250	98,0
9	2,0000	0,0400	98,0
10	6,0000	0,0700	98,8
EMR (%)			568,65

Fonte: Autor (2019)

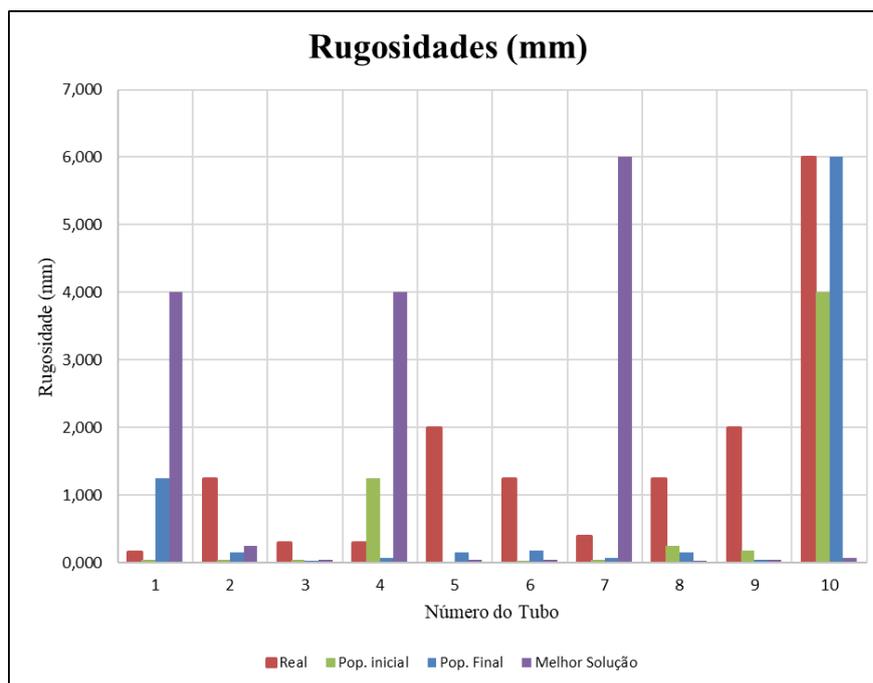
Tabela 42 - Valor da FO 2 e geração ótima para FO 2 e Rede 1 Nó 8 Seção 20

FO2	0,01846924
Nº Geração Ótima	26

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 22, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

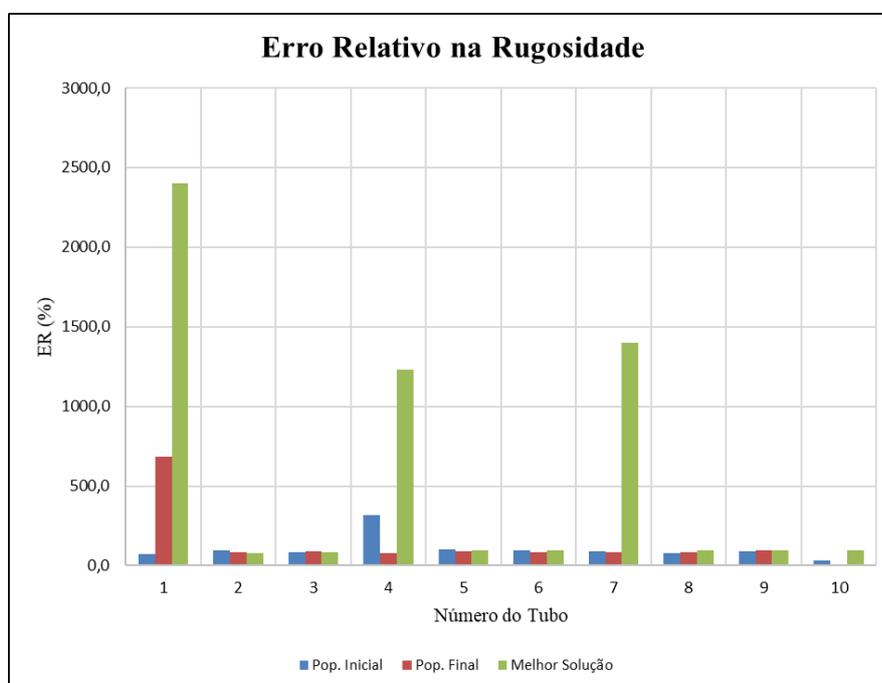
Gráfico 22 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 N° 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 23, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

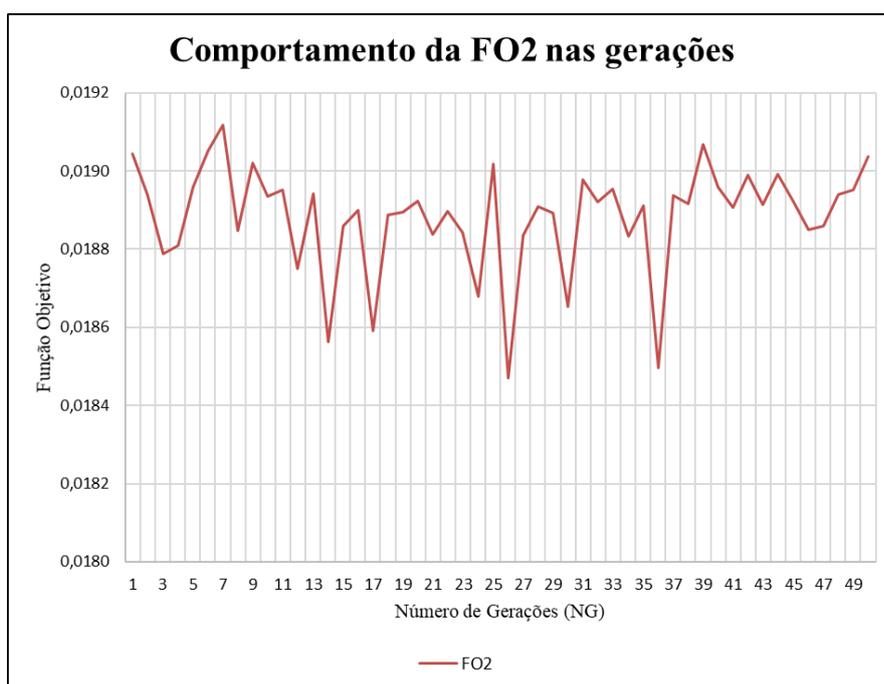
Gráfico 23 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 1 N° 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 24 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 24 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 8 Seção 20 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.3 Função Objetivo 3

6.1.3.1 Nó 3 Seção 4

Para essa simulação com a Função Objetivo 3 utilizou-se, na Rede 1, o nó 3 e a seção 4, na Tabela 43, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 44 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 43 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 3 Seção 4

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,1750	9,4
2	1,2500	1,2500	0,0
3	0,3000	0,1750	41,7
4	0,3000	0,3750	25,0
5	2,0000	0,1600	92,0
6	1,2500	1,2500	0,0
7	0,4000	0,0400	90,0
8	1,2500	1,2500	0,0
9	2,0000	0,1600	92,0

continua

continuação

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
10	6,0000	0,2500	95,8
EMR (%)			44,59

Fonte: Autor (2019)

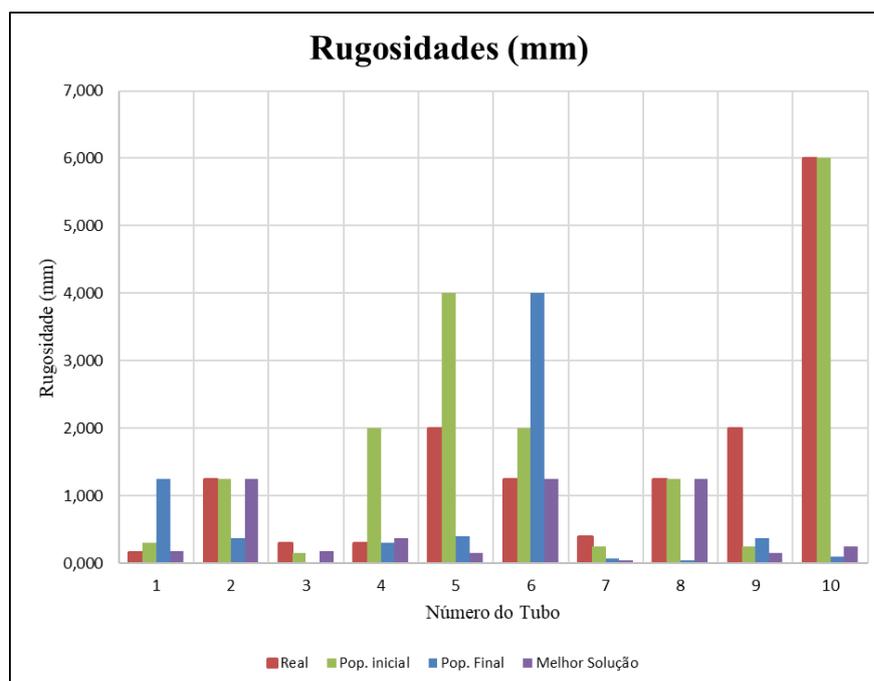
Tabela 44 - Valor da FO 3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 Nó 3 Seção 4

FO3	0,00051286
Nº Geração Ótima	32

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 25, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

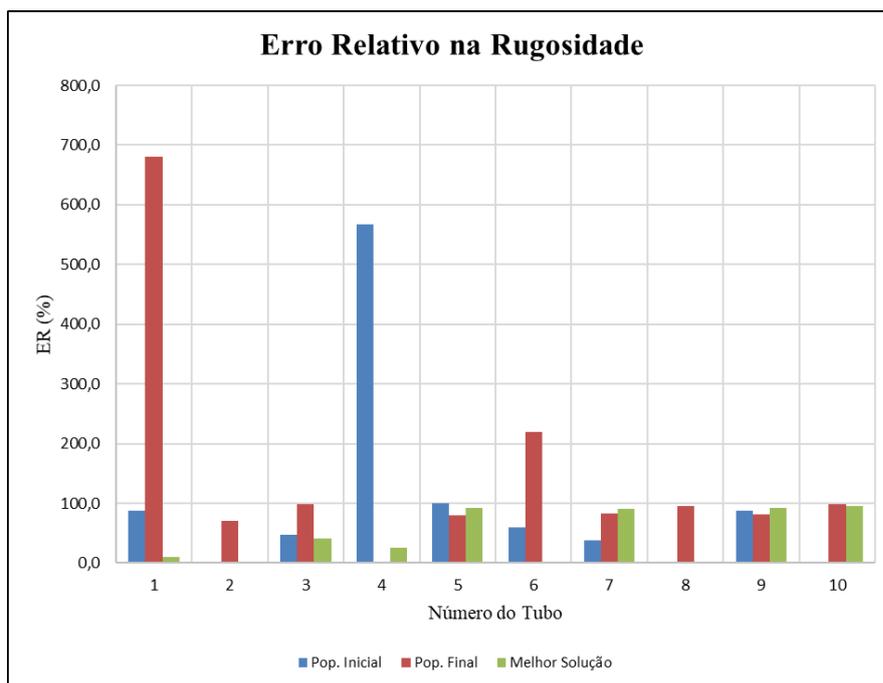
Gráfico 25 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 1 Nó 3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 26, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

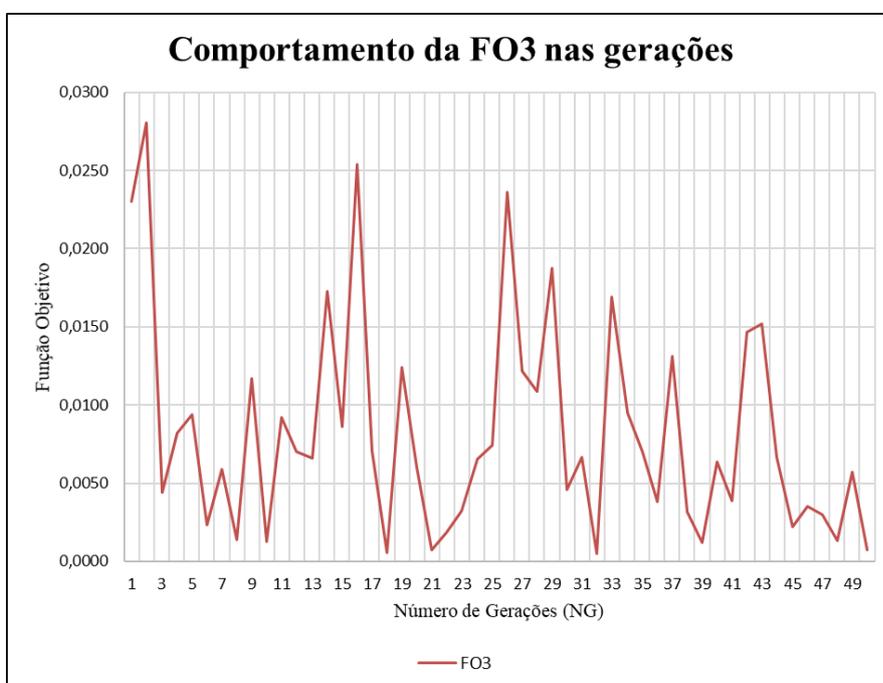
Gráfico 26 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 27 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gerações.

Gráfico 27 - Comportamento da FO3 nas gerações no N3 Seção 4 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.3.2 Nó 6 Seção 14

Tem-se na Rede 1, o nó 6 e a seção 14, como sendo o nó com maior distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 45, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 46 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 45 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 6 Seção 14

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,0400	75,0
2	1,2500	6,0000	380,0
3	0,3000	0,3750	25,0
4	0,3000	0,4000	33,3
5	2,0000	0,0250	98,8
6	1,2500	1,2500	0,0
7	0,4000	0,3000	25,0
8	1,2500	0,0700	94,4
9	2,0000	0,4000	80,0
10	6,0000	0,4000	93,3
EMR (%)			90,48

Fonte: Autor (2019)

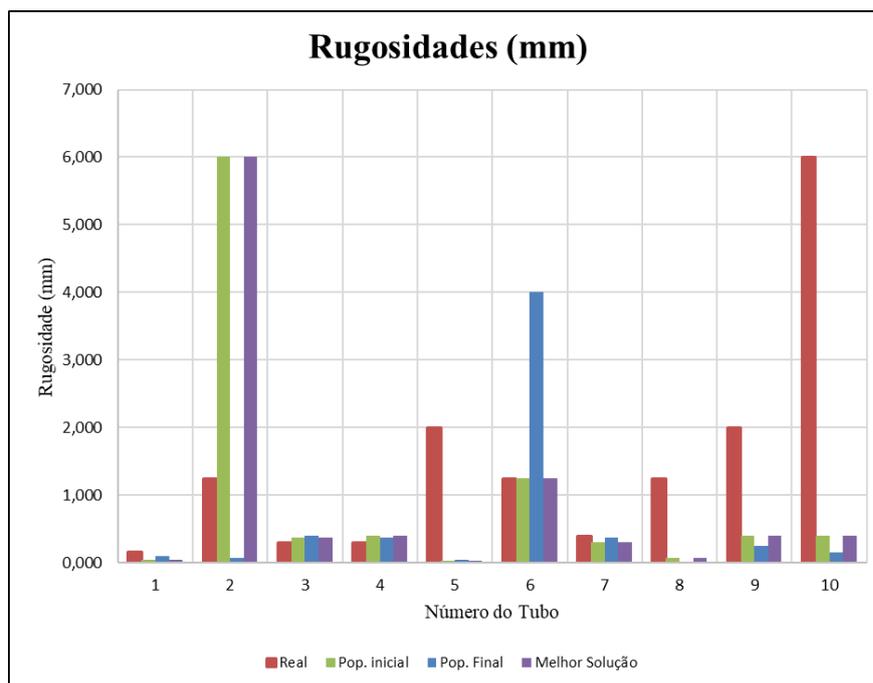
Tabela 46 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 Nó 6 Seção 14

FO3	0,00152415
Nº Geração Ótima	1

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 28, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

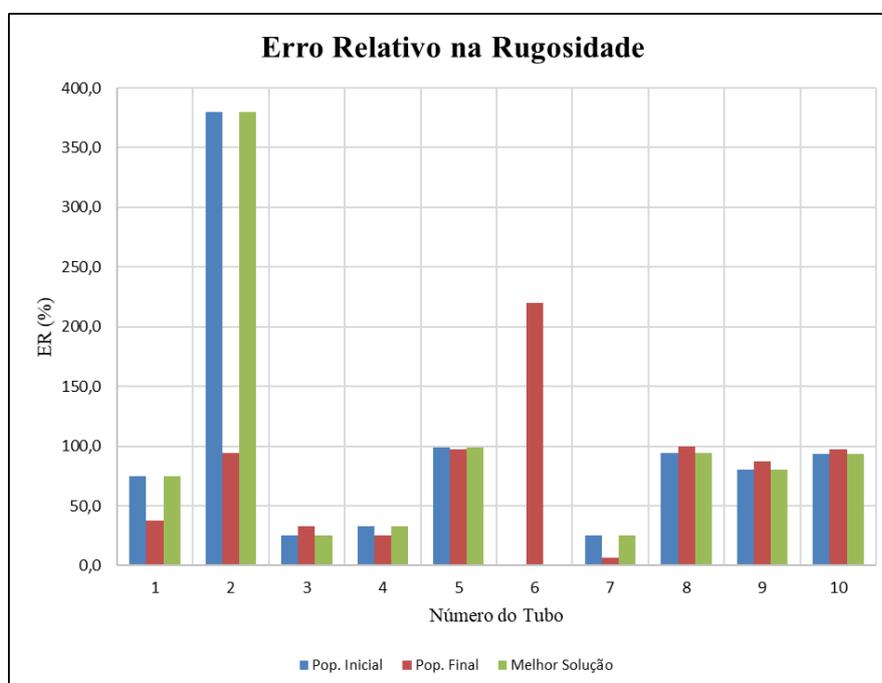
Gráfico 28 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 6 Seção 14 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 29, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

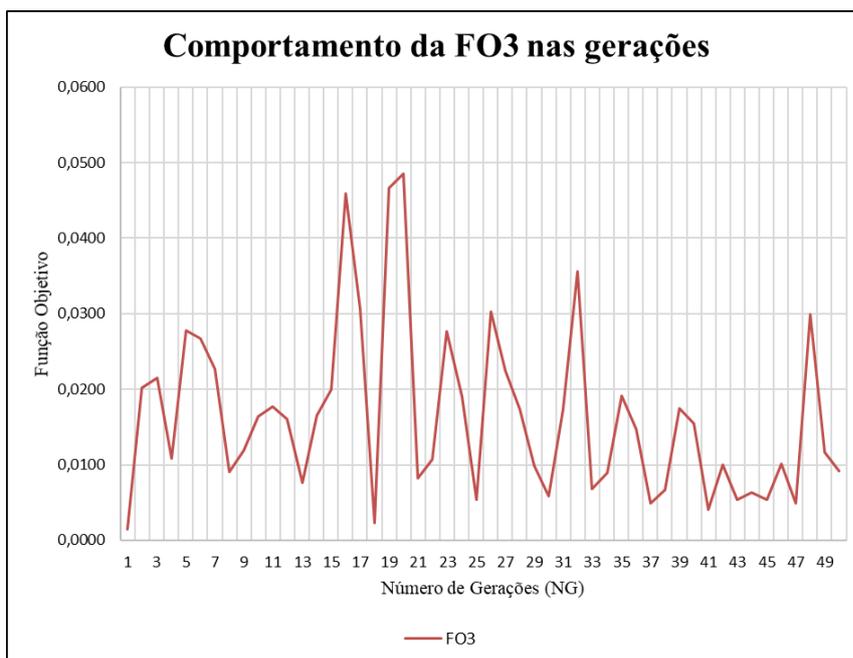
Gráfico 29 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 Nó 6 Seção 14



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 30 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gerações.

Gráfico 30 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 6 Seção 14 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.3.3 Nó 7 Seção 8

Tem-se na Rede 1, o nó 7 e a seção 8, como sendo o nó com menor distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 47, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 48 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 47 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 7 Seção 8

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,0250	84,4
2	1,2500	0,4000	68,0
3	0,3000	0,0500	83,3
4	0,3000	0,3750	25,0
5	2,0000	6,0000	200,0
6	1,2500	0,4000	68,0
7	0,4000	1,2500	212,5
8	1,2500	0,4000	68,0
9	2,0000	1,2500	37,5
10	6,0000	0,1750	97,1
EMR (%)			94,38

Fonte: Autor (2019)

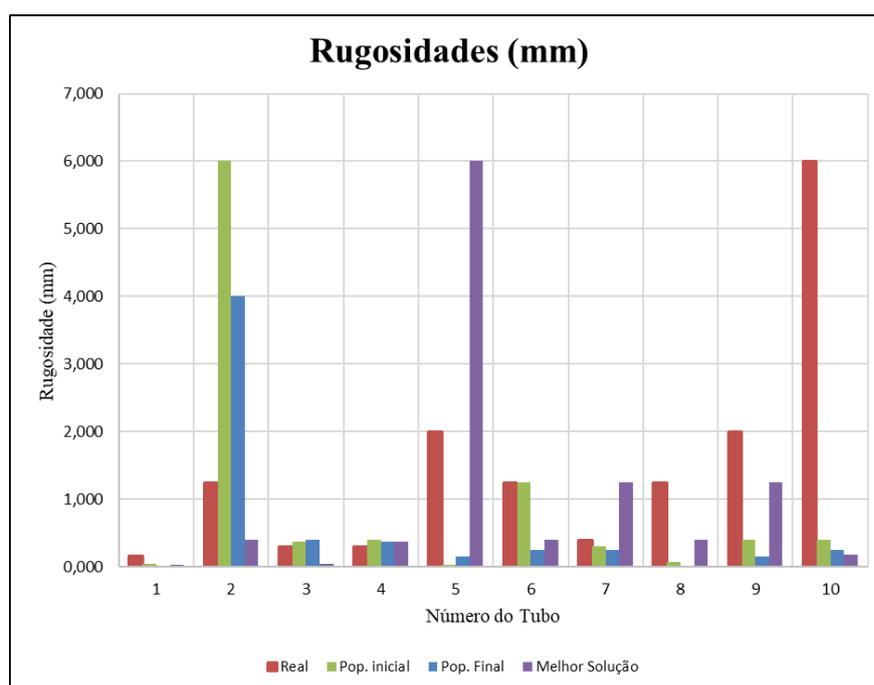
Tabela 48 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 N6 7 Seção 8

FO3	0,00067537
Nº Geração Ótima	4

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 31, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

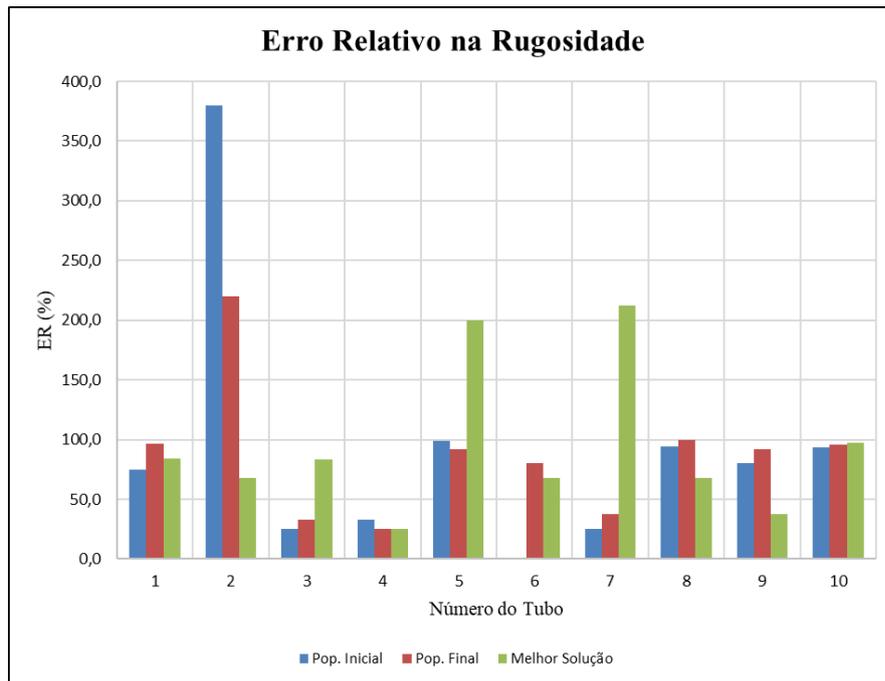
Gráfico 31 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 1 N6 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 32, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

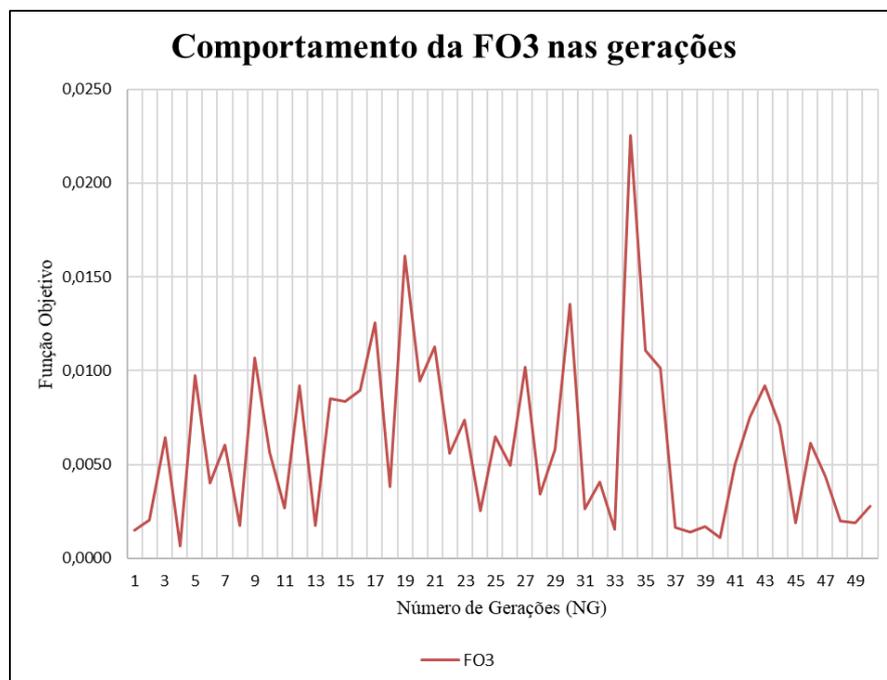
Gráfico 32 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 N6 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 33 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gerações.

Gráfico 33 - Comportamento da FO3 nas gerações no N6 7 Seção 8 da Rede 1



Fonte: Autor (2019)

6.1.3.4 Nó 8 Seção 20

Tem-se na Rede 1, o nó 8 e a seção 20, como sendo o nó de extremidade da rede, na Tabela 49, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 50 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 49 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 1 Nó 8 Seção 20

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	0,1600	0,3750	134,4
2	1,2500	0,3750	70,0
3	0,3000	0,0500	83,3
4	0,3000	0,4000	33,3
5	2,0000	1,2500	37,5
6	1,2500	6,0000	380,0
7	0,4000	0,1750	56,3
8	1,2500	1,2500	0,0
9	2,0000	4,0000	100,0
10	6,0000	4,0000	33,3
EMR (%)			92,81

Fonte: Autor (2019)

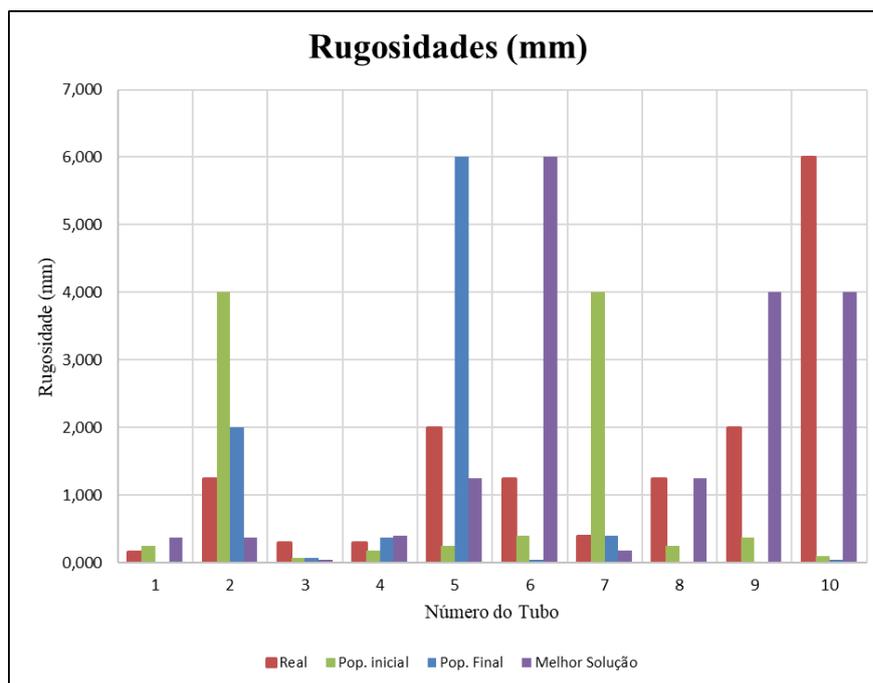
Tabela 50 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 1 Nó 8 Seção 20

FO3	0,00040098
Nº Geração Ótima	20

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 34, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

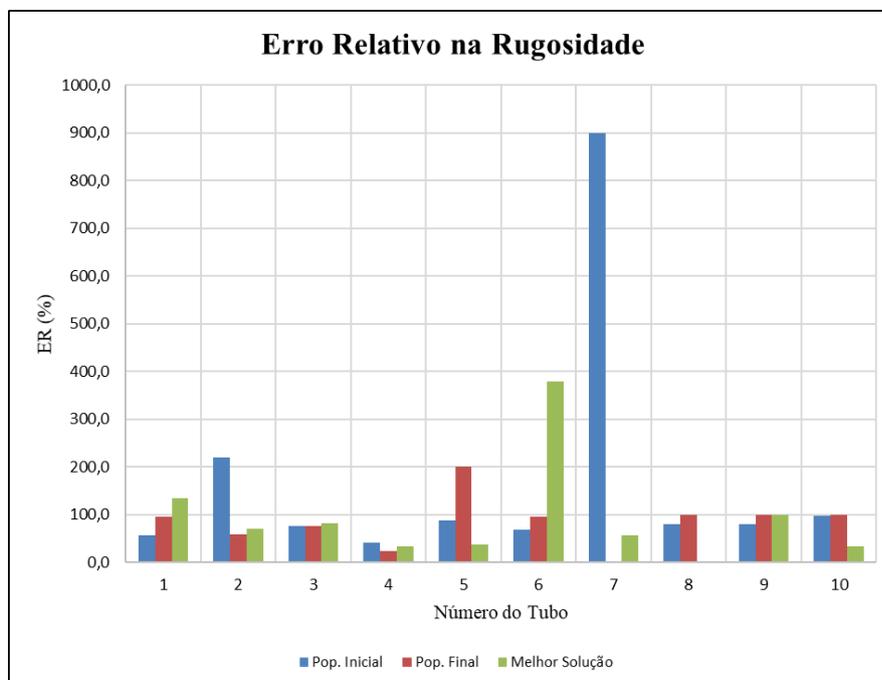
Gráfico 34 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 1 N6 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 35, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

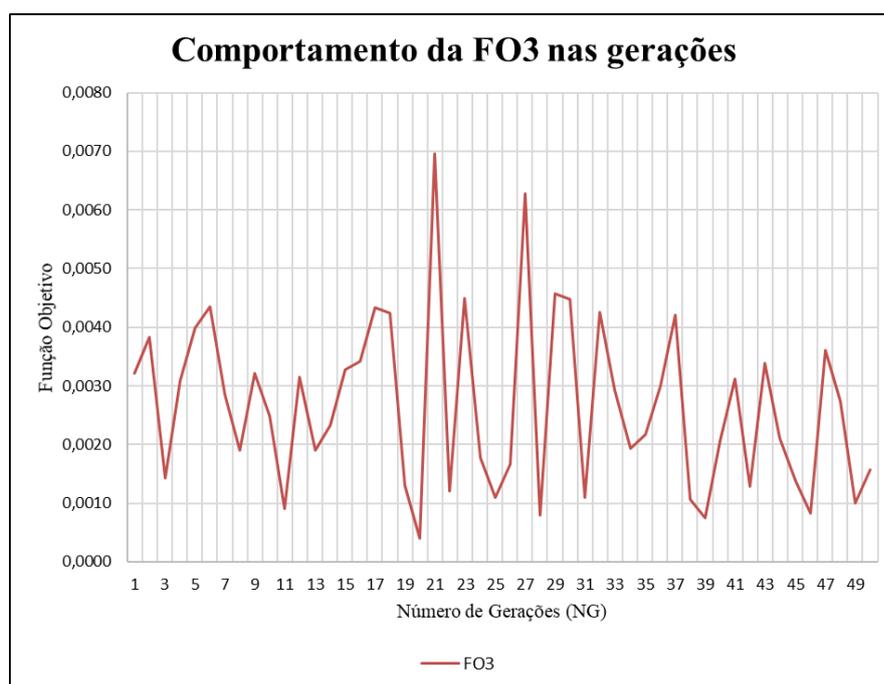
Gráfico 35 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 1 N6 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 36 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gerações.

Gráfico 36 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 8 Seção 20 da Rede 10



Fonte: Autor (2019)

6.2 Rede 2

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos após a simulações da Rede 2, primeiramente para os 4 tipos anteriormente comentados e após para o nó e as suas seções, para o estudo da seção de um mesmo nó.

6.2.1 Função Objetivo 1

6.2.1.1 Nó 8 Seção 10

Para essa simulação utilizou-se, na Rede 2, o nó 8 e a seção 10, como sendo o nó com um grande número de tubos ligados a ele, na Tabela 51, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 52 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 51 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 8 Seção 10

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	2,0000	0,0
2	2,0000	6,0000	200,0
3	1,2500	6,0000	380,0
4	1,2500	6,0000	380,0

continua

continuação

Tubo	ε real (mm)	ε estimado (mm)	ER (%)
5	0,1000	6,0000	5900,0
6	0,1000	0,0700	30,0
7	4,0000	0,4000	90,0
8	4,0000	6,0000	50,0
9	4,0000	0,1000	97,5
10	4,0000	6,0000	50,0
11	2,0000	0,0058	99,7
12	1,2500	0,1000	92,0
13	0,1000	0,1600	60,0
14	1,2500	1,2500	0,0
15	1,2500	0,0500	96,0
16	4,0000	0,0250	99,4
EMR (%)			476,54

Fonte: Autor (2019)

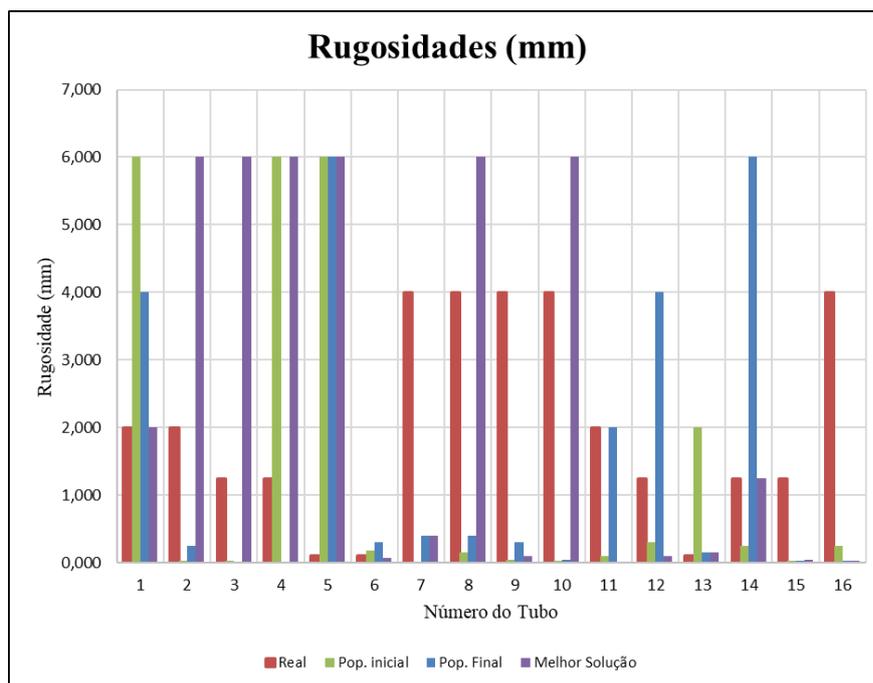
Tabela 52 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 N° 8 Seção 10

FO1	0,00000209
N° Geração Ótima	24

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 37, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

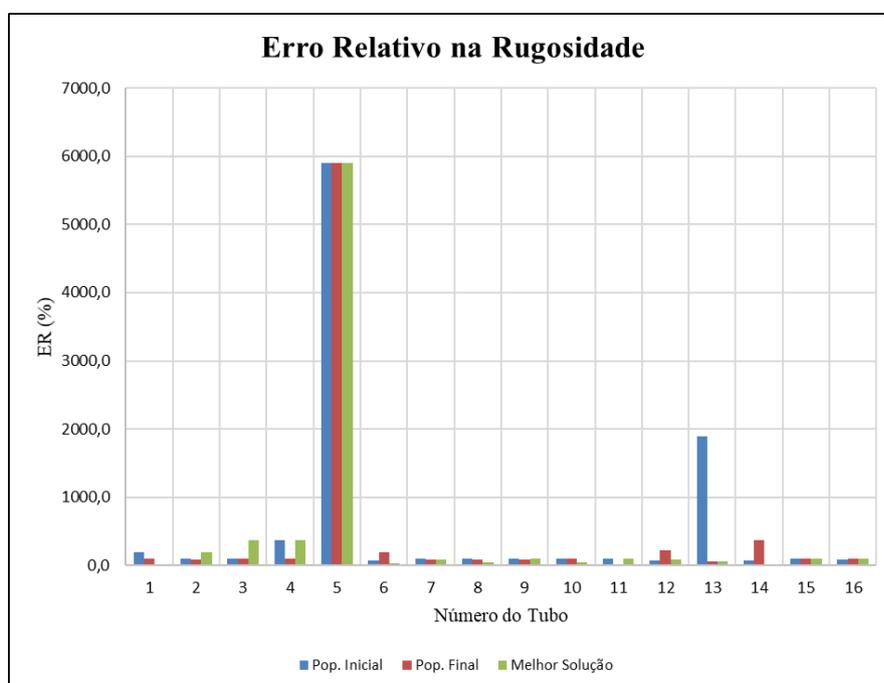
Gráfico 37- Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 N° 8 Seção 10



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 38, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

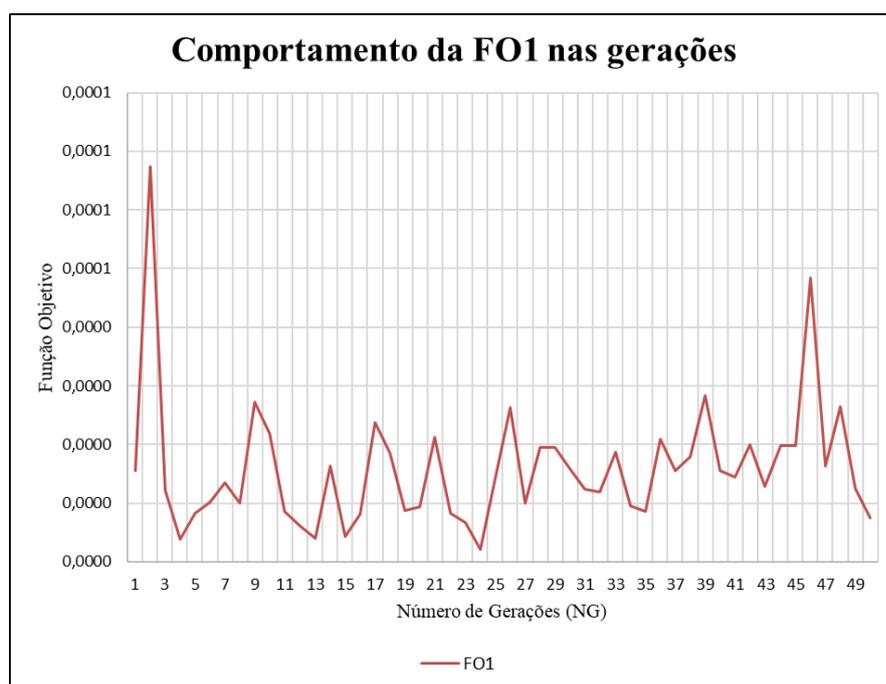
Gráfico 38 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 N° 8 Seção 10



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 39 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 39 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 8 Seção 10 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.1.2 Nó 4 Seção 8

Tem-se na Rede 2, o nó 4 e a seção 8, como sendo o nó com maior distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 53, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 54 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 53 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 4 Seção 8

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	2,0000	0,0
2	2,0000	2,0000	0,0
3	1,2500	1,2500	0,0
4	1,2500	1,2500	0,0
5	0,1000	0,0058	94,2
6	0,1000	0,1600	60,0
7	4,0000	0,0700	98,3
8	4,0000	4,0000	0,0
9	4,0000	0,2500	93,8
10	4,0000	0,0250	99,4

continua

continuação

Tubo	ε real (mm)	ε estimado (mm)	ER (%)
11	2,0000	4,0000	100,0
12	1,2500	0,3000	76,0
13	0,1000	0,0250	75,0
14	1,2500	4,0000	220,0
15	1,2500	0,0500	96,0
16	4,0000	0,1600	96,0
EMR (%)			69,29

Fonte: Autor (2019)

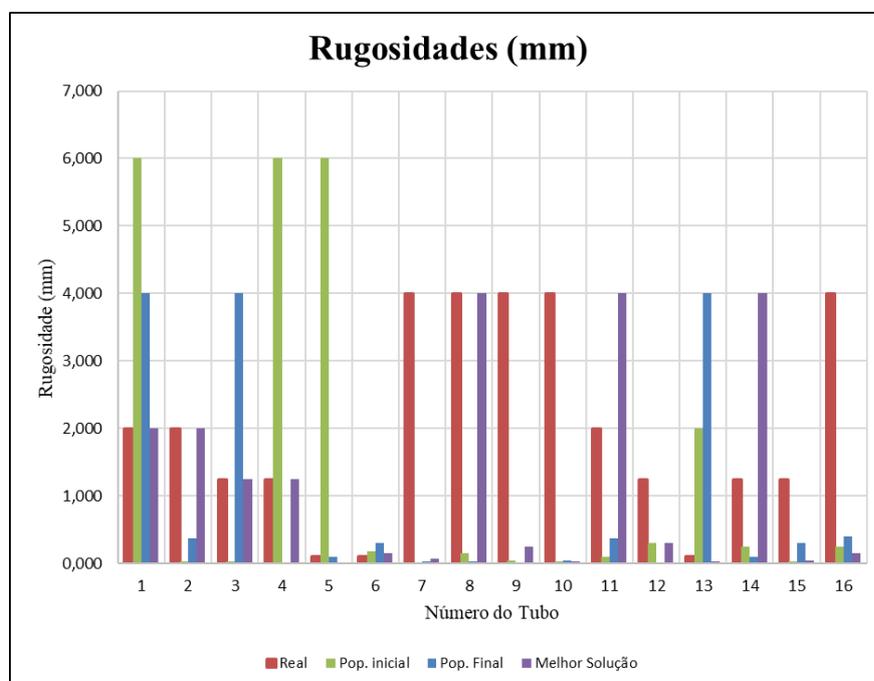
Tabela 54 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 N6 4 Seção 8

FO1	0,0000044
Nº Geração Ótima	34

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 40, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

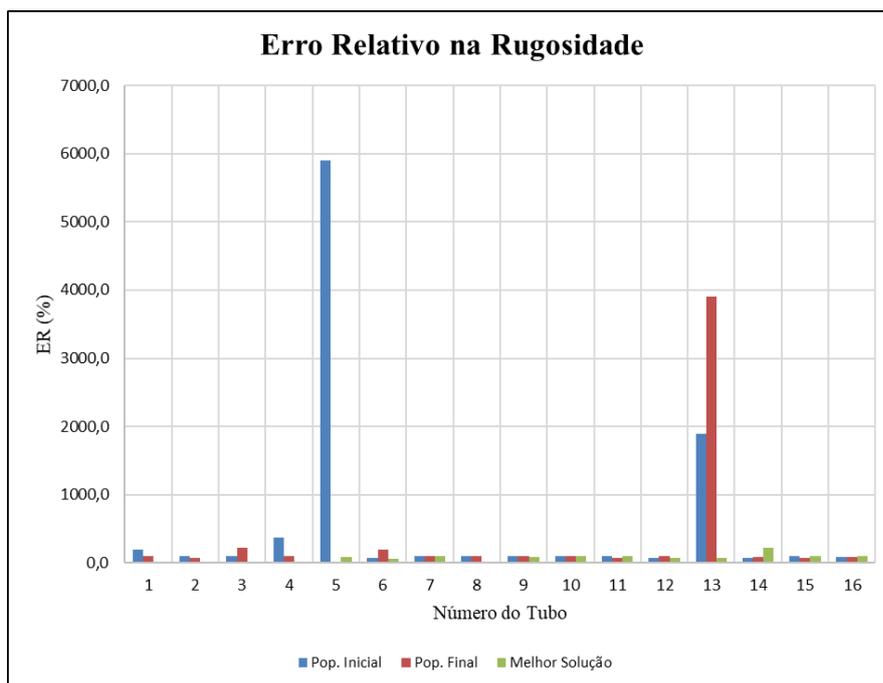
Gráfico 40 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 N6 4 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 41, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

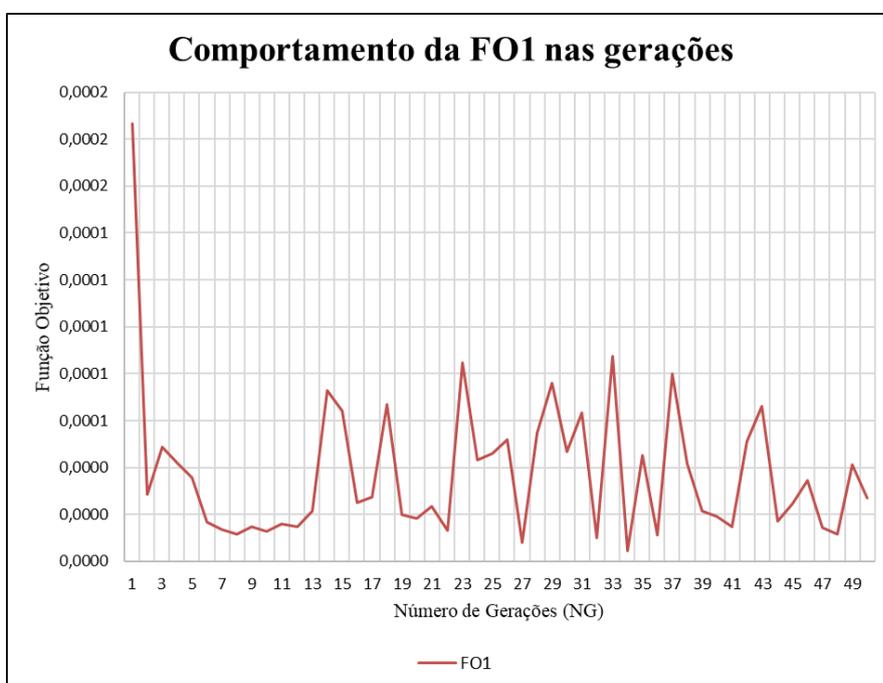
Gráfico 41 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 N  4 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 42 observa-se como se da o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 42 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 4 Seção 8 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.1.3 Nó 3 Seção 4

Tem-se na Rede 2, o nó 3 e a seção 4, como sendo o nó com menor distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 55, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 56 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 55 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 3 Seção 4

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	4,0000	100,0
2	2,0000	0,4000	80,0
3	1,2500	0,1600	87,2
4	1,2500	0,0058	99,5
5	0,1000	4,0000	3900,0
6	0,1000	0,1750	75,0
7	4,0000	0,3750	90,6
8	4,0000	2,0000	50,0
9	4,0000	0,0400	99,0
10	4,0000	2,0000	50,0
11	2,0000	0,2500	87,5
12	1,2500	4,0000	220,0
13	0,1000	0,1750	75,0
14	1,2500	0,3000	76,0
15	1,2500	0,1750	86,0
16	4,0000	0,4000	90,0
EMR (%)			329,12

Fonte: Autor (2019)

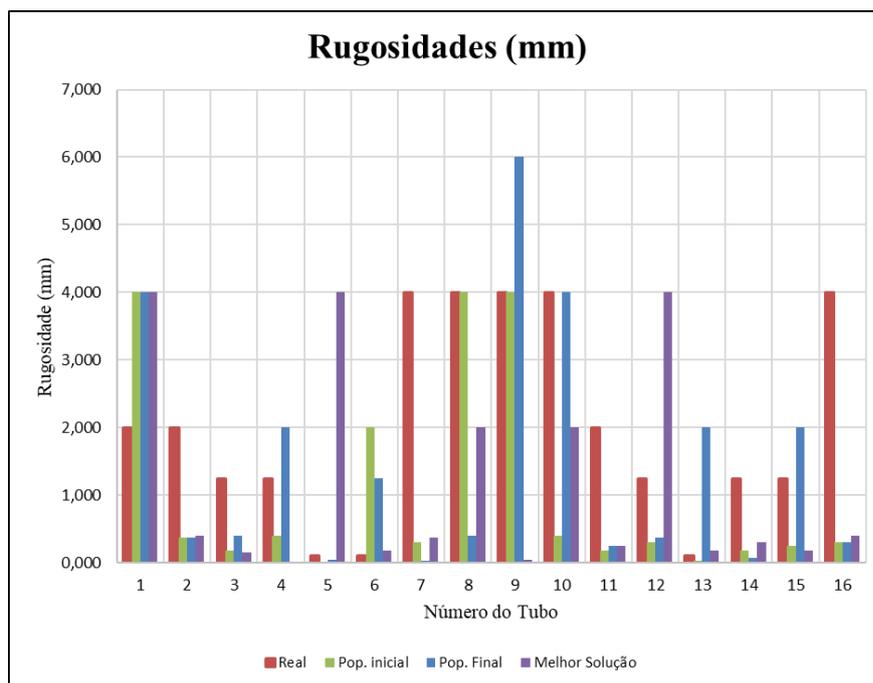
Tabela 56 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 Nó 3 Seção 4

FO1	0,0000093
Nº Geração Ótima	31

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 43, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

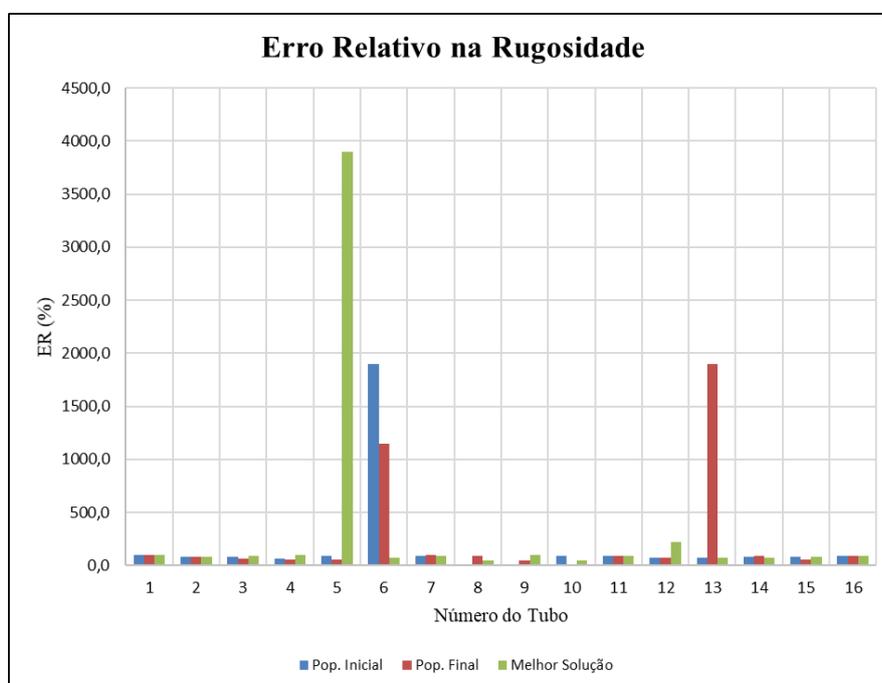
Gráfico 43 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 44, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

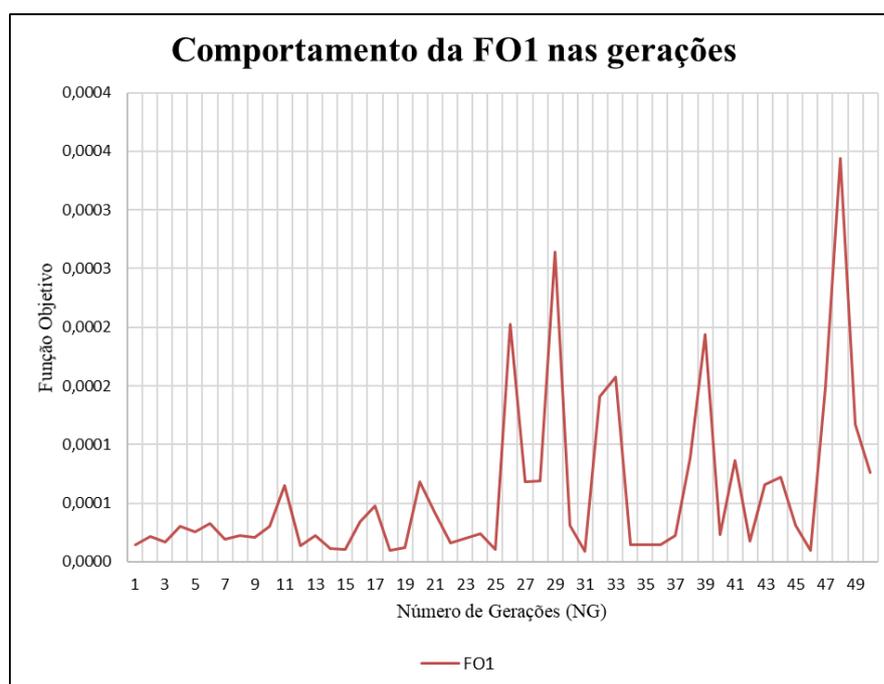
Gráfico 44 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 45 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 45 - Comportamento da FO1 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.1.4 Nó 13 Seção 32

Tem-se na Rede 2, o nó 13 e a seção 32, como sendo o nó de extremidade da rede, na Tabela 57, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 58 o valor da FO1 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 57 - Rugosidades simuladas e EMR para FO1 e Rede 2 Nó 13 Seção 32

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	2,0000	0,0
2	2,0000	1,2500	37,5
3	1,2500	2,0000	60,0
4	1,2500	0,4000	68,0
5	0,1000	0,0400	60,0
6	0,1000	0,3000	200,0
7	4,0000	4,0000	0,0
8	4,0000	0,0400	99,0
9	4,0000	0,0700	98,3
10	4,0000	0,3000	92,5

continua

continuação

Tubo	ε real (mm)	ε estimado (mm)	ER (%)
11	2,0000	2,0000	0,0
12	1,2500	0,1750	86,0
13	0,1000	0,0700	30,0
14	1,2500	0,0250	98,0
15	1,2500	0,0250	98,0
16	4,0000	0,2500	93,8
EMR (%)			70,06

Fonte: Autor (2019)

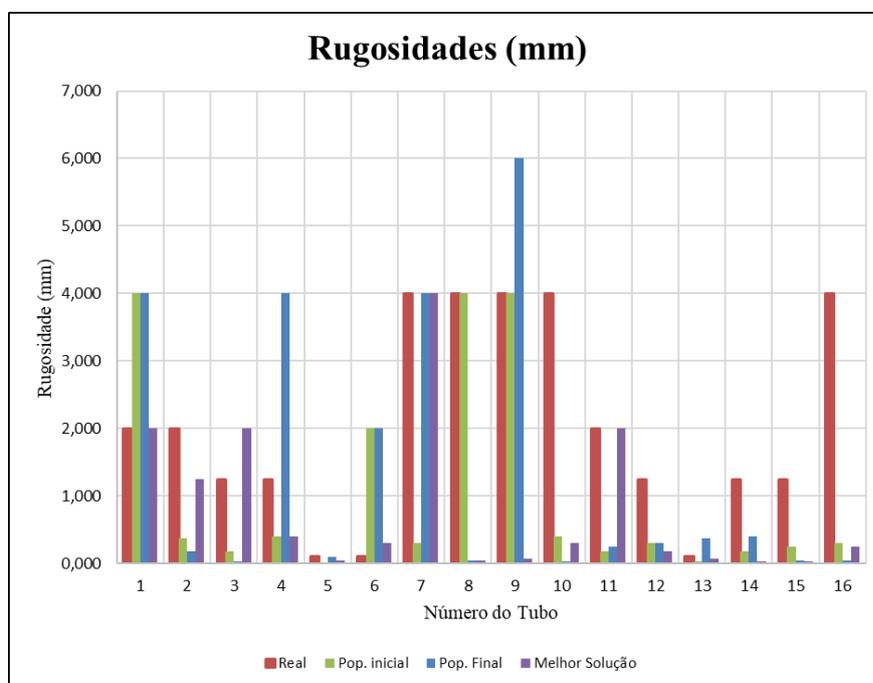
Tabela 58 - Valor da FO1 e geração ótima para FO1 e Rede 2 N° 13 Seção 32

FO1	0,00000718
N° Geração Ótima	2

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 46, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

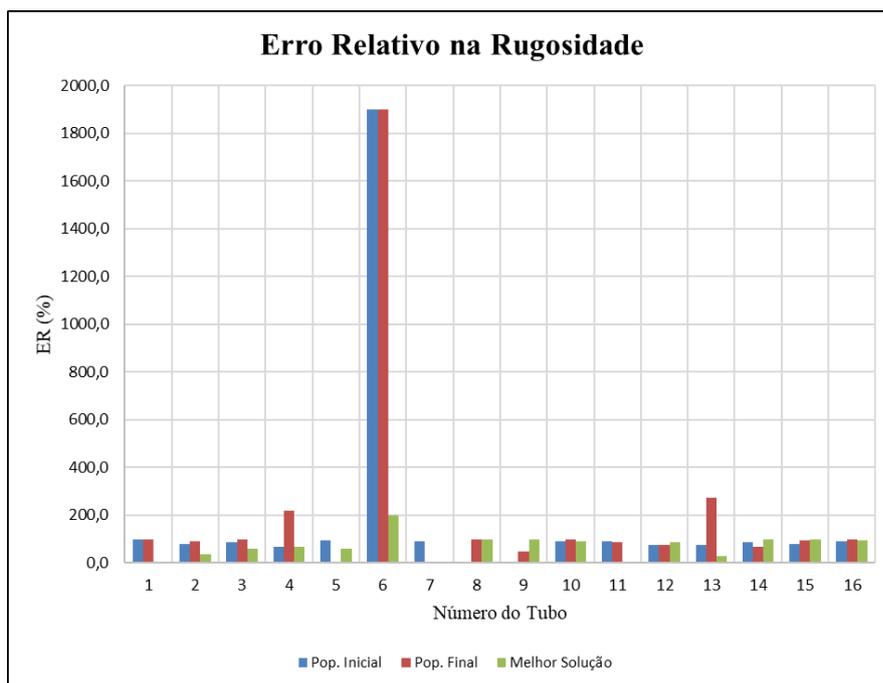
Gráfico 46 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO1 Rede 2 N° 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 47, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

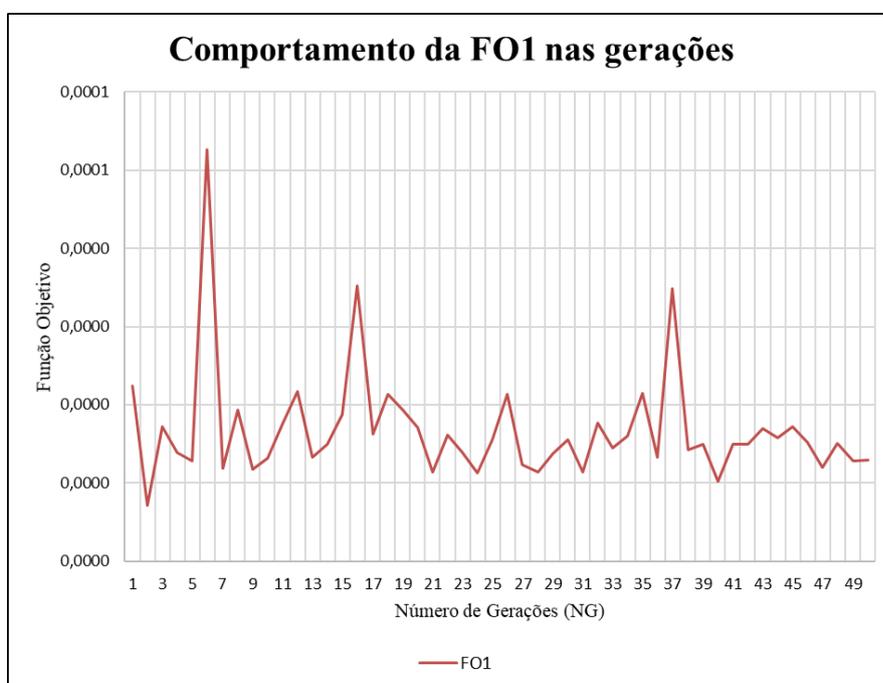
Gráfico 47 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO1 Rede 2 N6 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 48 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO1 com o decorrer das gerações.

Gráfico 48 - Comportamento da FO1 nas gerações no N6 13 Seção 32 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.2 Função Objetivo 2

6.2.2.1 Nó 8 Seção 10

Para essa simulação com a Função Objetivo 2 utilizou-se, na Rede 2, o nó 8 e a seção 10, na Tabela 59, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 60 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 59 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 8 Seção 10

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	0,3750	81,3
2	2,0000	0,0058	99,7
3	1,2500	4,0000	220,0
4	1,2500	0,0250	98,0
5	0,1000	0,1000	0,0
6	0,1000	0,3750	275,0
7	4,0000	0,3000	92,5
8	4,0000	0,1600	96,0
9	4,0000	2,0000	50,0
10	4,0000	0,1750	95,6
11	2,0000	0,1000	95,0
12	1,2500	2,0000	60,0
13	0,1000	0,3750	275,0
14	1,2500	1,2500	0,0
15	1,2500	0,1600	87,2
16	4,0000	0,1000	97,5
EMR (%)			107,67

Fonte: Autor (2019)

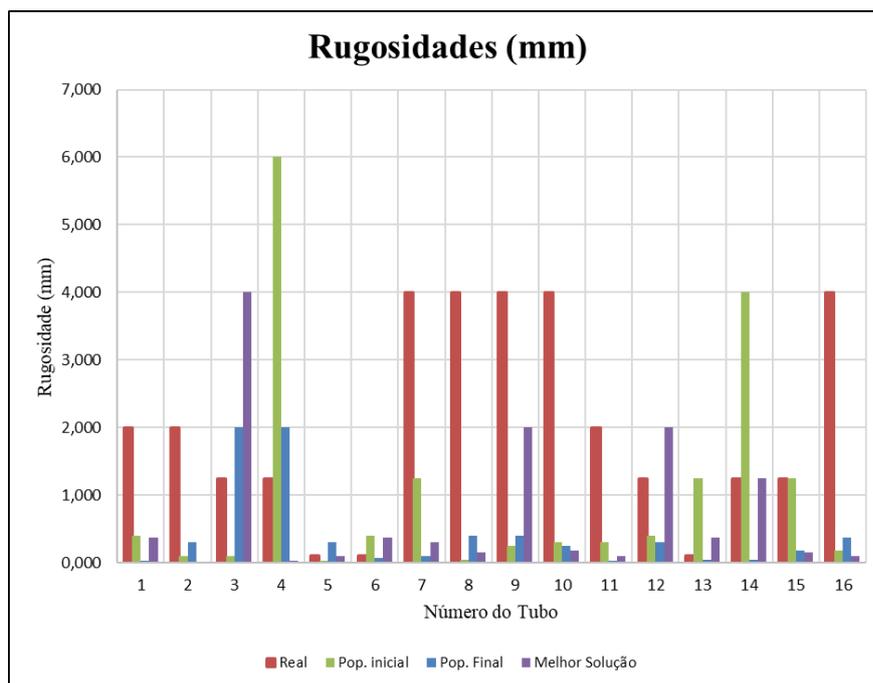
Tabela 60 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 Nó 8 Seção 10

FO2	0,00006
Nº Geração Ótima	3

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 49, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

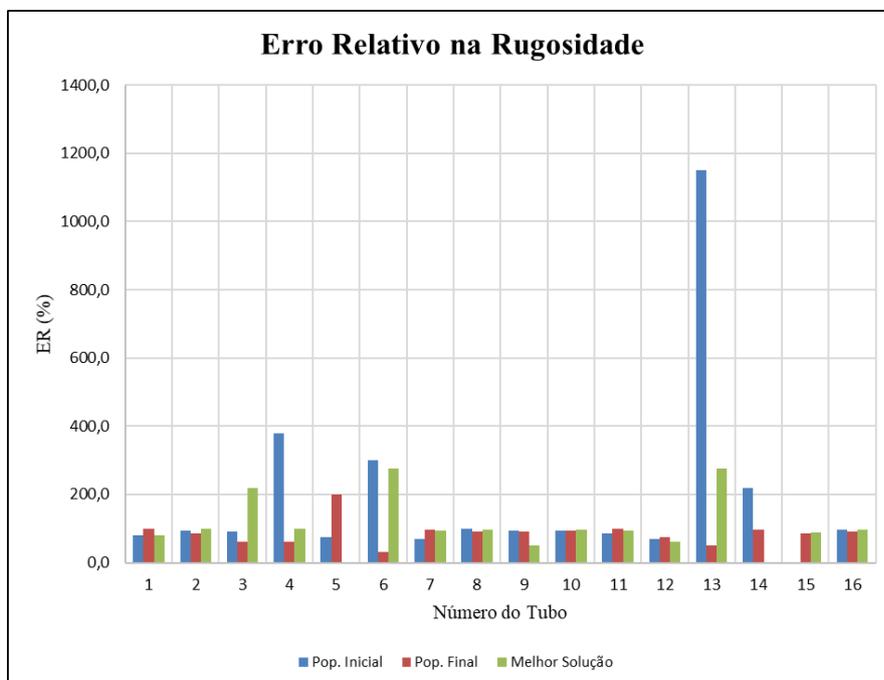
Gráfico 49 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 N6 8 Seção 10



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 50, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

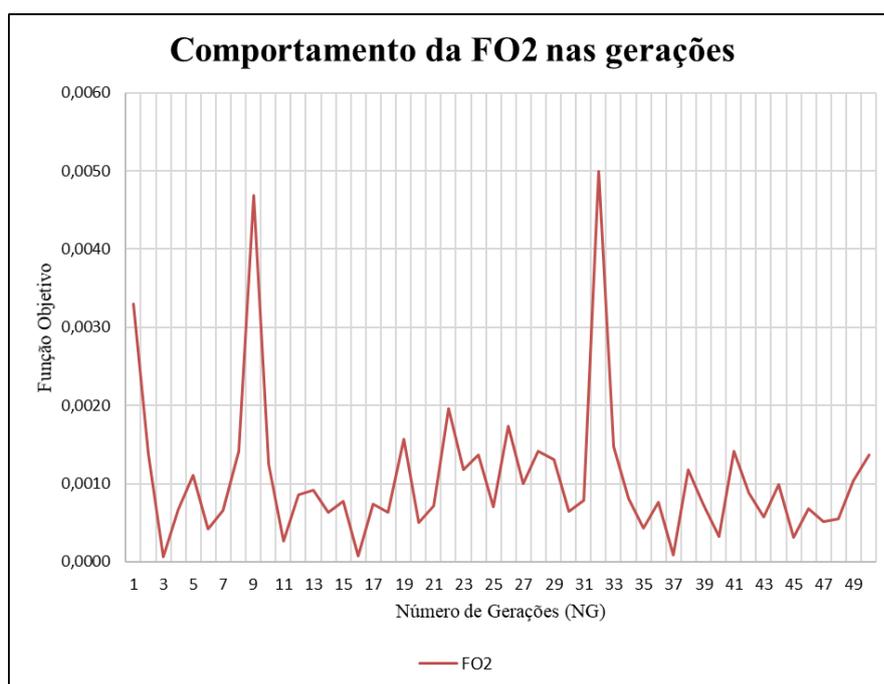
Gráfico 50 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 N6 8 Seção 10



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 51 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 51 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 8 Seção 10 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.2.2 Nó 4 Seção 8

Tem-se na Rede 2, o nó 4 e a seção 8, como sendo o nó com maior distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 61, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 62 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 61 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 4 Seção 8

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	0,0700	96,5
2	2,0000	6,0000	200,0
3	1,2500	0,4000	68,0
4	1,2500	0,0700	94,4
5	0,1000	6,0000	5900,0
6	0,1000	2,0000	1900,0
7	4,0000	0,1750	95,6
8	4,0000	0,0058	99,9
9	4,0000	0,0400	99,0
10	4,0000	0,1750	95,6

continua

continuação

Tubo	ε real (mm)	ε estimado (mm)	ER (%)
11	2,0000	2,0000	0,0
12	1,2500	4,0000	220,0
13	0,1000	0,0700	30,0
14	1,2500	0,0700	94,4
15	1,2500	0,0700	94,4
16	4,0000	2,0000	50,0
EMR (%)			571,11

Fonte: Autor (2019)

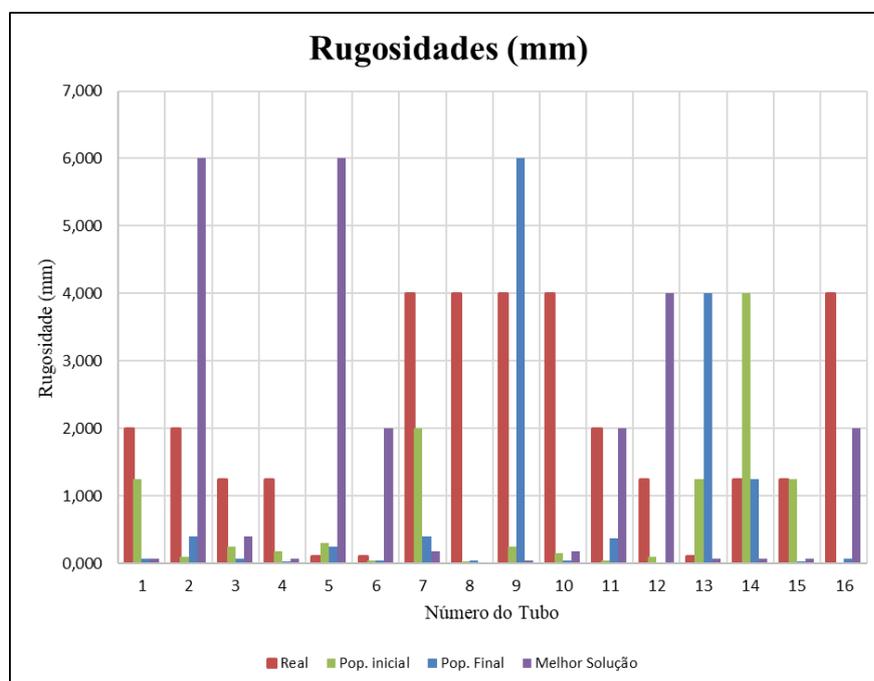
Tabela 62 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 N6 4 Seção 8

FO2	0,000039
Nº Geração Ótima	19

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 52, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

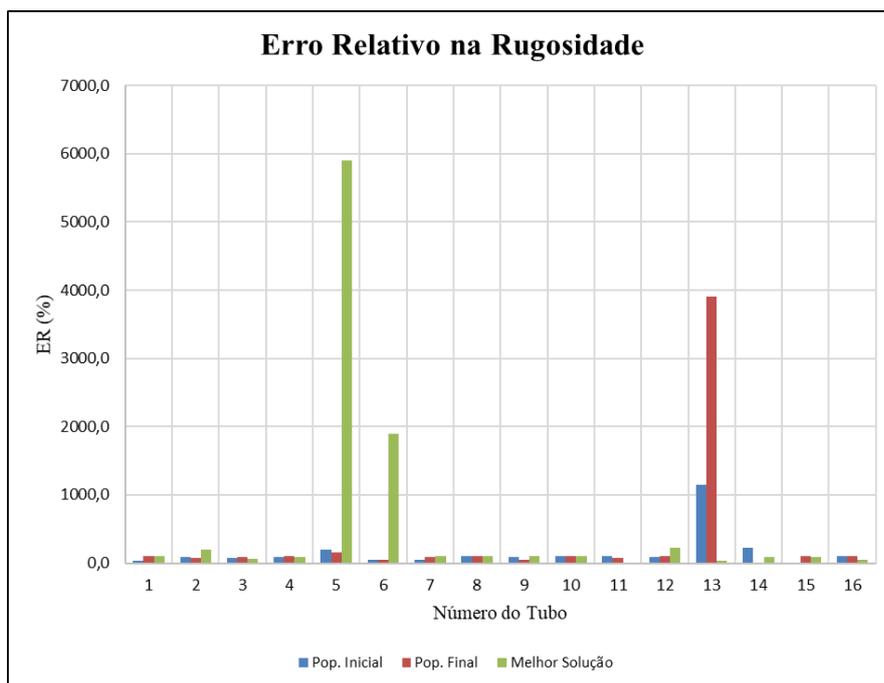
Gráfico 52 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 N6 4 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 53, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

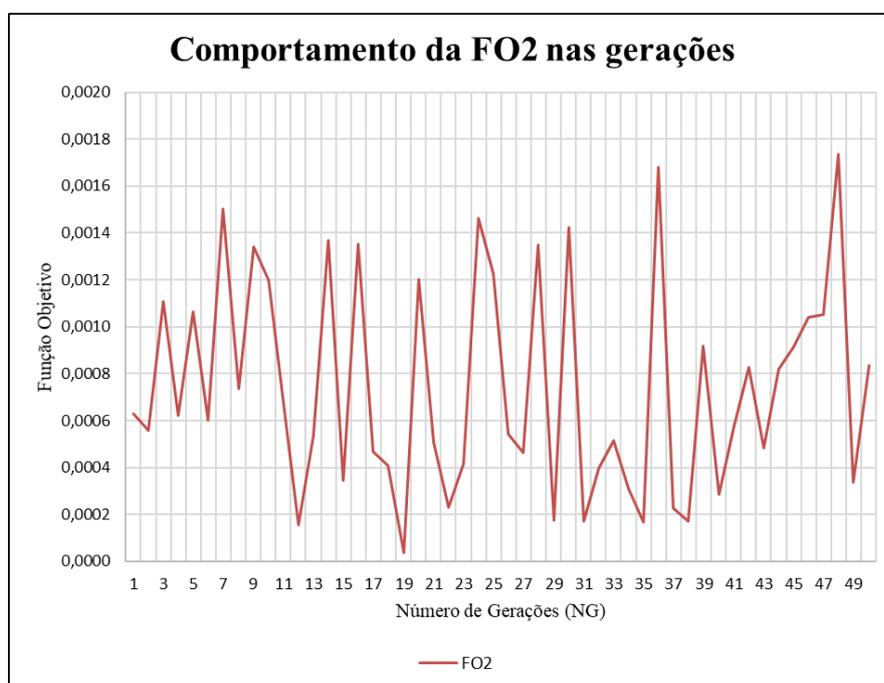
Gráfico 53 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 N4 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 54 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 54 - Comportamento da FO2 nas gerações no N4 Seção 8 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.2.3 Nó 3 Seção 4

Tem-se na Rede 2, o nó 3 e a seção 4, como sendo o nó com menor distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 63, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 64 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 63 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 3 Seção 4

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	0,2500	87,5
2	2,0000	2,0000	0,0
3	1,2500	1,2500	0,0
4	1,2500	0,0500	96,0
5	0,1000	0,0500	50,0
6	0,1000	1,2500	1150,0
7	4,0000	0,3750	90,6
8	4,0000	0,3000	92,5
9	4,0000	0,1000	97,5
10	4,0000	4,0000	0,0
11	2,0000	1,2500	37,5
12	1,2500	0,0700	94,4
13	0,1000	2,0000	1900,0
14	1,2500	0,0500	96,0
15	1,2500	1,2500	0,0
16	4,0000	4,0000	0,0
EMR (%)			237,00

Fonte: Autor (2019)

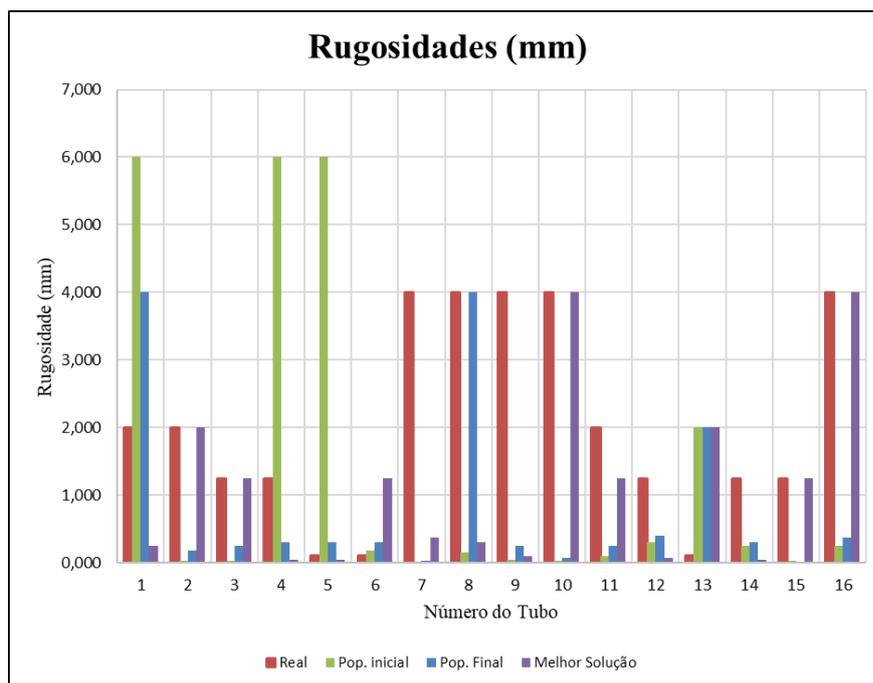
Tabela 64 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 Nó 3 Seção 4

FO2	0,000098
Nº Geração Ótima	31

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 55, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

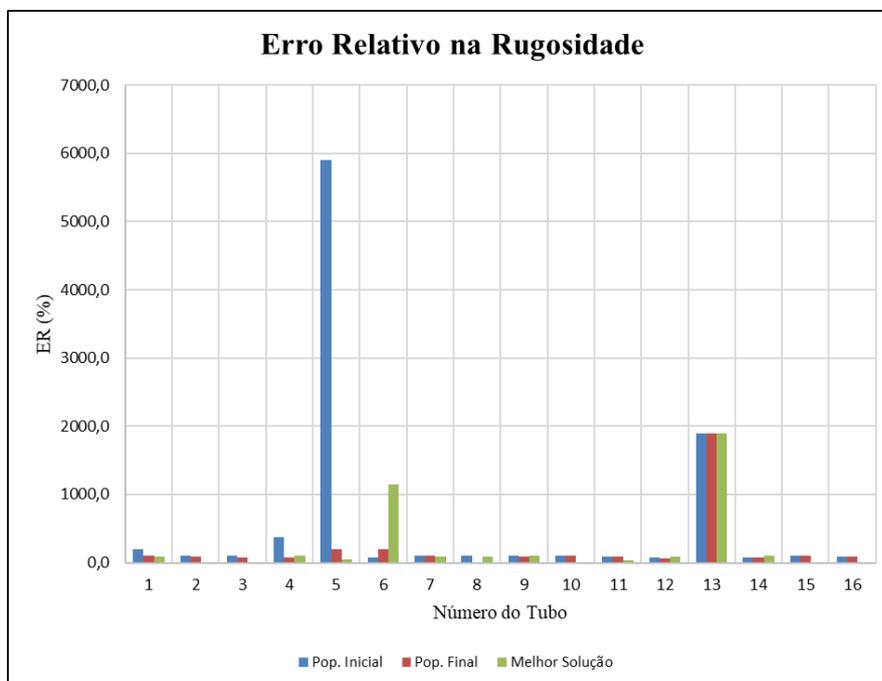
Gráfico 55 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 56, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

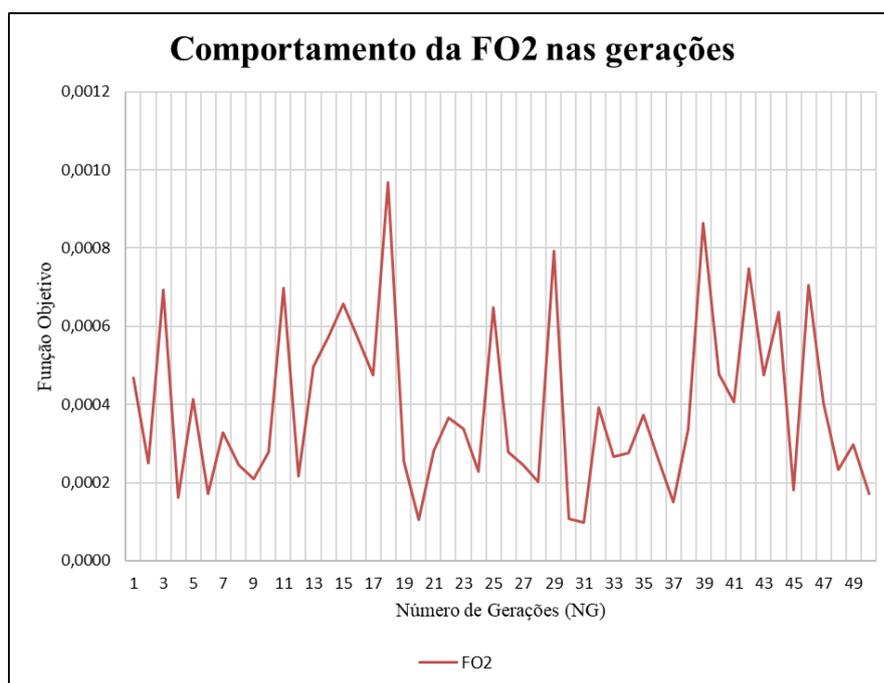
Gráfico 56 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 57 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 57 - Comportamento da FO2 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.2.4 Nó 13 Seção 32

Tem-se na Rede 2, o nó 13 e a seção 32, como sendo o nó de extremidade da rede, na Tabela 65, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 66 o valor da FO2 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 65 - Rugosidades simuladas e EMR para FO2 e Rede 2 Nó 13 Seção 32

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	6,0000	200,0
2	2,0000	4,0000	100,0
3	1,2500	0,1000	92,0
4	1,2500	0,1600	87,2
5	0,1000	0,1600	60,0
6	0,1000	0,3000	200,0
7	4,0000	1,2500	68,8
8	4,0000	0,4000	90,0
9	4,0000	6,0000	50,0
10	4,0000	0,0700	98,3

continua

continuação

Tubo	ε real (mm)	ε estimado (mm)	ER (%)
11	2,0000	4,0000	100,0
12	1,2500	0,0250	98,0
13	0,1000	6,0000	5900,0
14	1,2500	0,1000	92,0
15	1,2500	0,0250	98,0
16	4,0000	0,2500	93,8
EMR (%)			464,25

Fonte: Autor (2019)

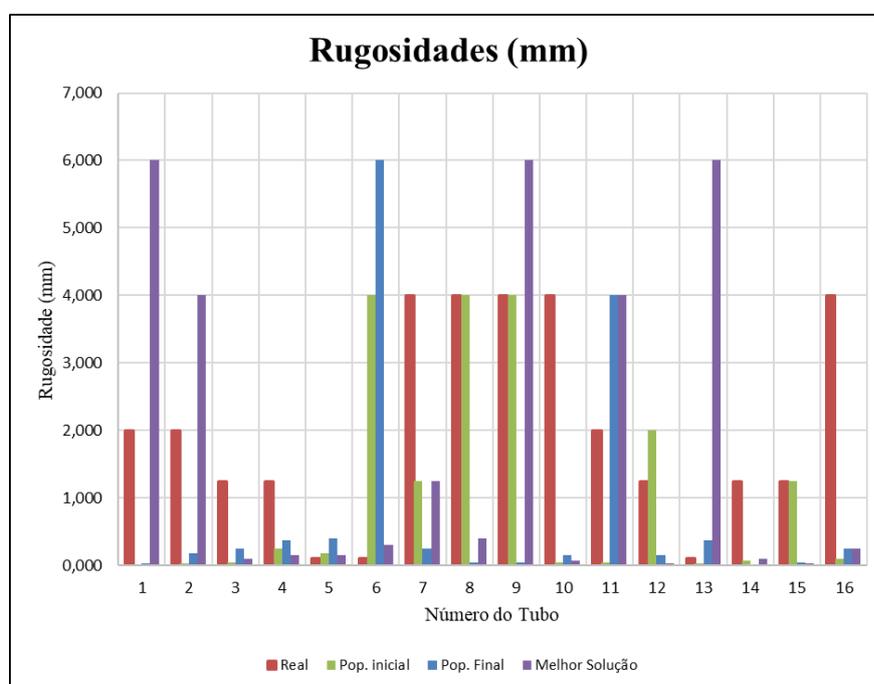
Tabela 66 - Valor da FO2 e geração ótima para FO2 e Rede 2 N° 13 Seção 32

FO2	0,013152
N° Geração Ótima	47

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 58, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

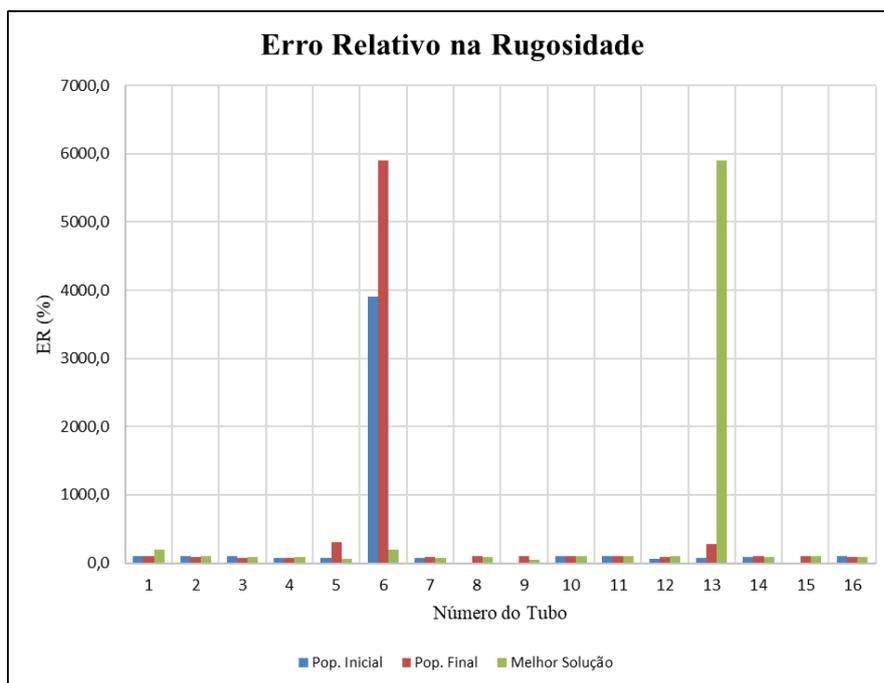
Gráfico 58 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO2 Rede 2 N° 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 59, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

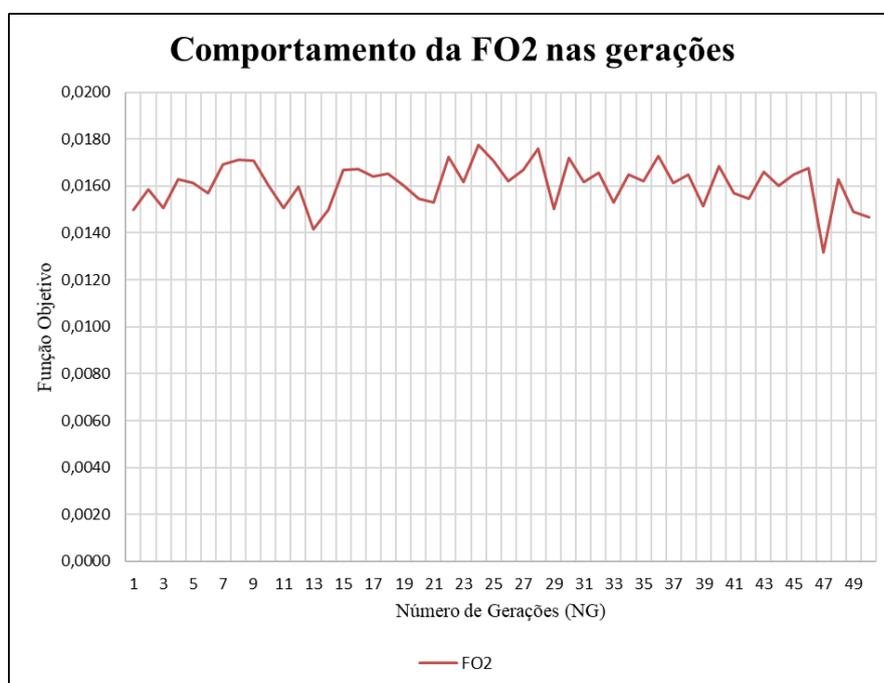
Gráfico 59 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO2 Rede 2 N6 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 60 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO2 com o decorrer das gerações.

Gráfico 60 - Comportamento da FO2 nas gerações no N6 13 Seção 32 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.3 Função Objetivo 3

6.2.3.1 Nó 8 Seção 10

Para essa simulação com a Função Objetivo 3 utilizou-se, na Rede 2, o nó 8 e a seção 10, na Tabela 67, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 68 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 67 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 Nó 3 Seção 12

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	6,0000	200,0
2	2,0000	0,0700	96,5
3	1,2500	0,0700	94,4
4	1,2500	4,0000	220,0
5	0,1000	0,1000	0,0
6	0,1000	0,1000	0,0
7	4,0000	0,3000	92,5
8	4,0000	0,3000	92,5
9	4,0000	0,4000	90,0
10	4,0000	0,4000	90,0
11	2,0000	0,0400	98,0
12	1,2500	0,2500	80,0
13	0,1000	0,3750	275,0
14	1,2500	0,2500	80,0
15	1,2500	0,0058	99,5
16	4,0000	2,0000	50,0
EMR (%)			103,65

Fonte: Autor (2019)

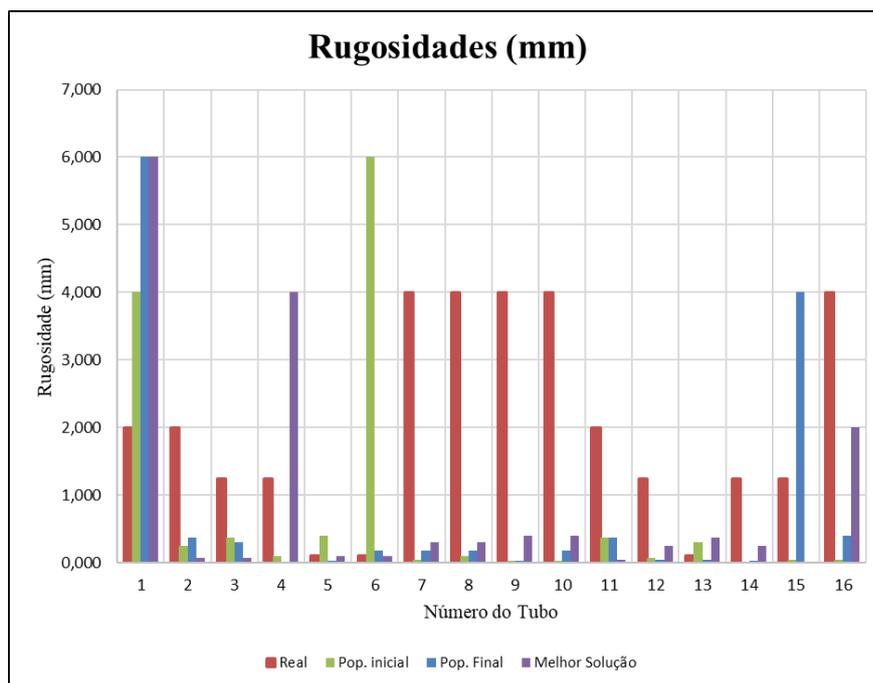
Tabela 68 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 Nó 3 Seção 12

FO3	0,0004111
Nº Geração Ótima	15

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 61, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

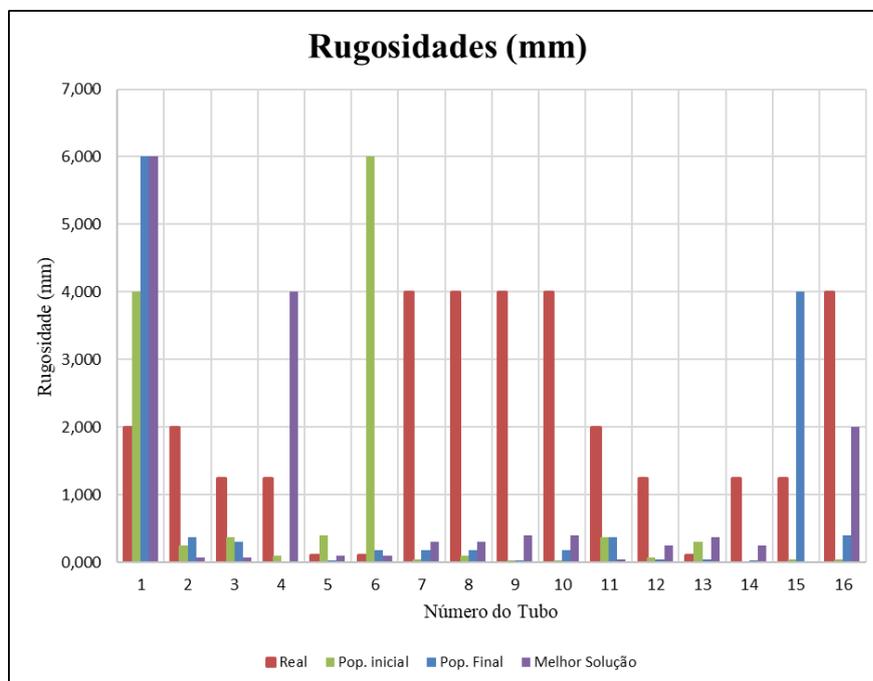
Gráfico 61 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 N3 Seção 12



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 62, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

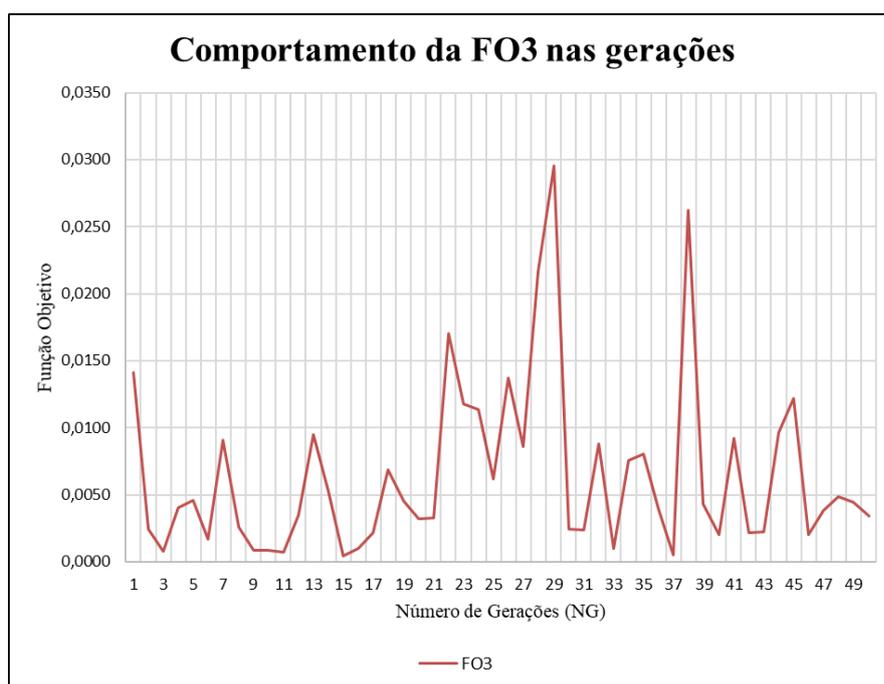
Gráfico 62 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 N3 Seção 12



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 63 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gerações.

Gráfico 63 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 13 Seção 3 da Rede 12



Fonte: Autor (2019)

6.2.3.2 Nó 4 Seção 8

Tem-se na Rede 2, o nó 4 e a seção 8, como sendo o nó com maior distância em relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 69, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 70 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 69 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 Nó 4 Seção 8

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	4,0000	100,0
2	2,0000	0,3000	85,0
3	1,2500	2,0000	60,0
4	1,2500	0,0500	96,0
5	0,1000	0,0500	50,0
6	0,1000	2,0000	1900,0
7	4,0000	0,1750	95,6
8	4,0000	1,2500	68,8
9	4,0000	6,0000	50,0
10	4,0000	2,0000	50,0

continua

continuação

Tubo	ε real (mm)	ε estimado (mm)	ER (%)
11	2,0000	0,4000	80,0
12	1,2500	0,4000	68,0
13	0,1000	0,2500	150,0
14	1,2500	0,2500	80,0
15	1,2500	6,0000	380,0
16	4,0000	0,1600	96,0
EMR (%)			213,09

Fonte: Autor (2019)

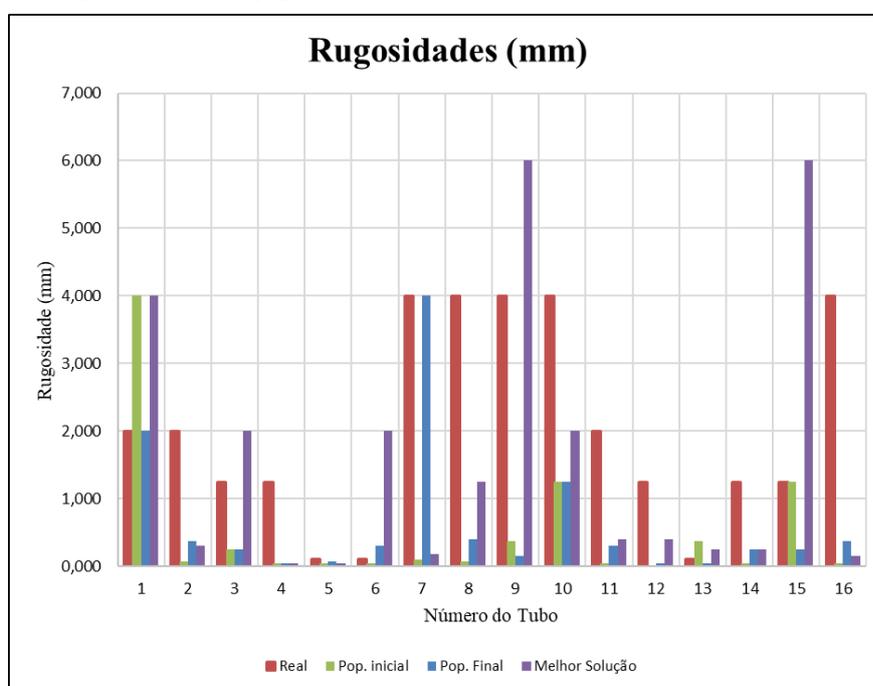
Tabela 70 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 N6 4 Seção 8

FO3	0,0001456
Nº Geração Ótima	18

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 64, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

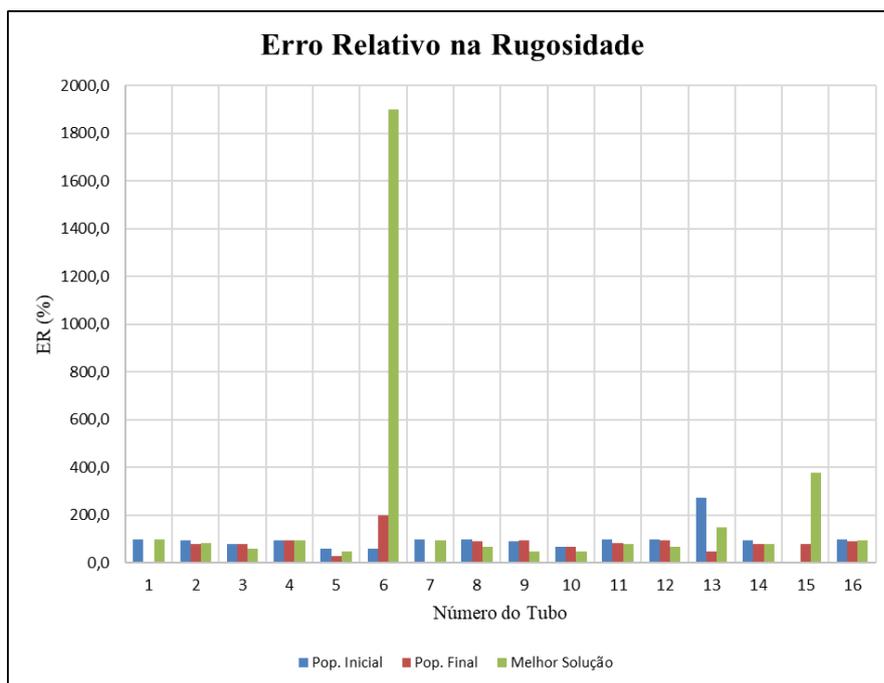
Gráfico 64 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 N6 4 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 65, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

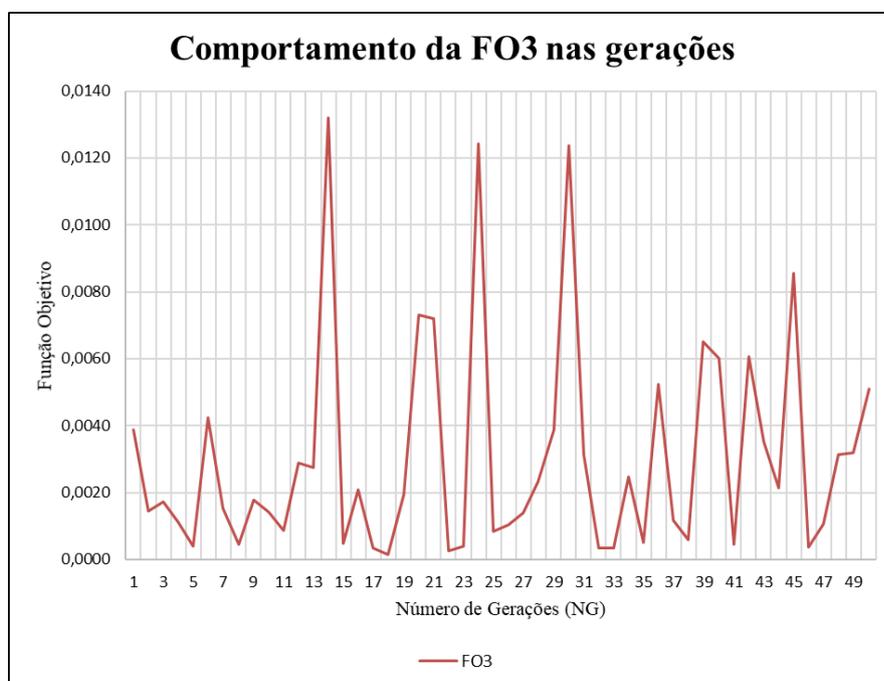
Gráfico 65 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 N  4 Se 8



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 66 observa-se como se d o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gera es.

Gráfico 66 - Comportamento da FO3 nas gera es no Nó 4 Se 8 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.3.3 N  3 Se 4

Tem-se na Rede 2, o nó 3 e a se 4, como sendo o nó com menor dist ncia em

relação ao reservatório de abastecimento, na Tabela 71, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 72 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 71 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 N° 3 Seção 4

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	4,0000	100,0
2	2,0000	0,4000	80,0
3	1,2500	0,0500	96,0
4	1,2500	0,3750	70,0
5	0,1000	0,0700	30,0
6	0,1000	2,0000	1900,0
7	4,0000	0,0058	99,9
8	4,0000	0,1000	97,5
9	4,0000	0,3750	90,6
10	4,0000	0,1600	96,0
11	2,0000	0,3750	81,3
12	1,2500	0,3000	76,0
13	0,1000	0,4000	300,0
14	1,2500	1,2500	0,0
15	1,2500	0,0500	96,0
16	4,0000	0,4000	90,0
EMR (%)			206,45

Fonte: Autor (2019)

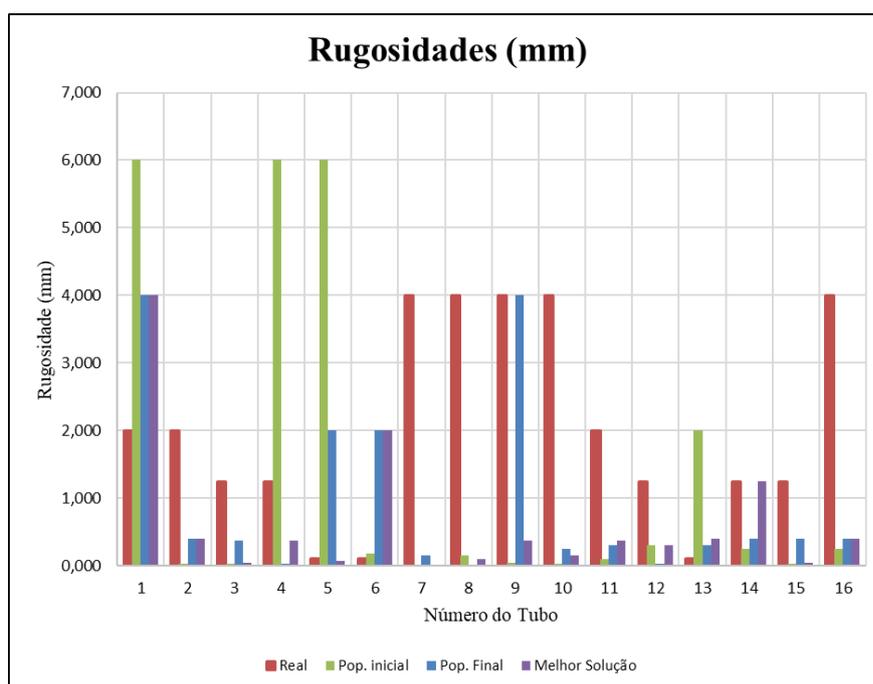
Tabela 72 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 N° 3 Seção 4

FO3	0,0000483
N° Geração Ótima	20

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 67, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

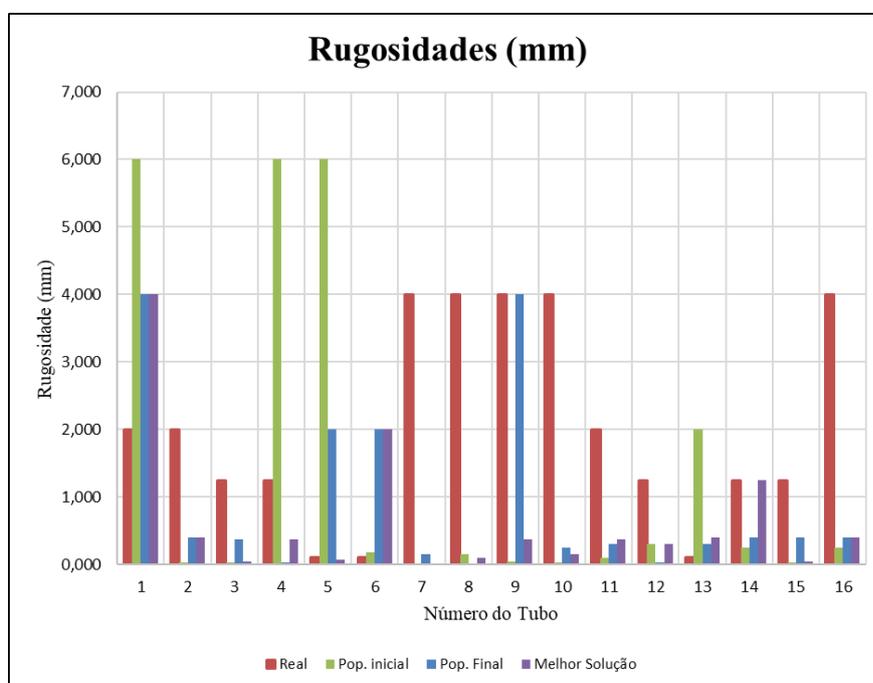
Gráfico 67 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 68, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

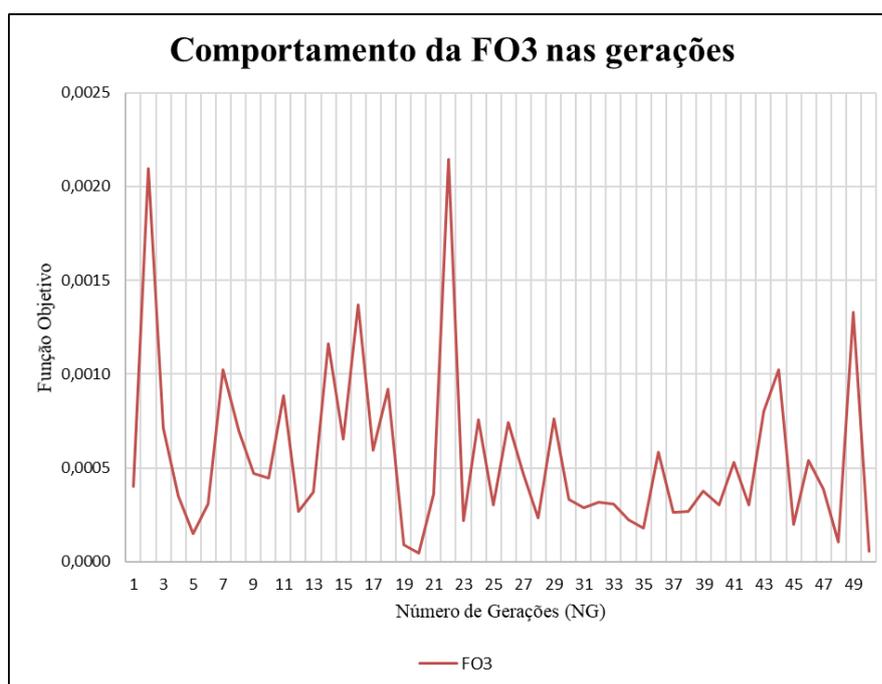
Gráfico 68 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 N3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 69 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gerações.

Gráfico 69 - Comportamento da FO3 nas gerações no Nó 3 Seção 4 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

6.2.3.4 Nó 13 Seção 32

Tem-se na Rede 2, o nó 13 e a seção 32, como sendo o nó de extremidade da rede, na Tabela 73, a seguir, tem-se os valores das rugosidades reais, simuladas e o EMR, para a melhor solução desse caso. E na Tabela 74 o valor da FO3 dessa solução e o número da geração ótima.

Tabela 73 - Rugosidades simuladas e EMR para FO3 e Rede 2 Nó 13 Seção 32

Tubo	ϵ real (mm)	ϵ estimado (mm)	ER (%)
1	2,0000	2,0000	0,0
2	2,0000	1,2500	37,5
3	1,2500	2,0000	60,0
4	1,2500	0,4000	68,0
5	0,1000	0,0400	60,0
6	0,1000	0,3000	200,0
7	4,0000	4,0000	0,0
8	4,0000	0,0400	99,0
9	4,0000	0,0700	98,3
10	4,0000	0,3000	92,5

continua

continuação

Tubo	ε real (mm)	ε estimado (mm)	ER (%)
11	2,0000	2,0000	0,0
12	1,2500	0,1750	86,0
13	0,1000	0,0700	30,0
14	1,2500	0,0250	98,0
15	1,2500	0,0250	98,0
16	4,0000	0,2500	93,8
EMR (%)			70,06

Fonte: Autor (2019)

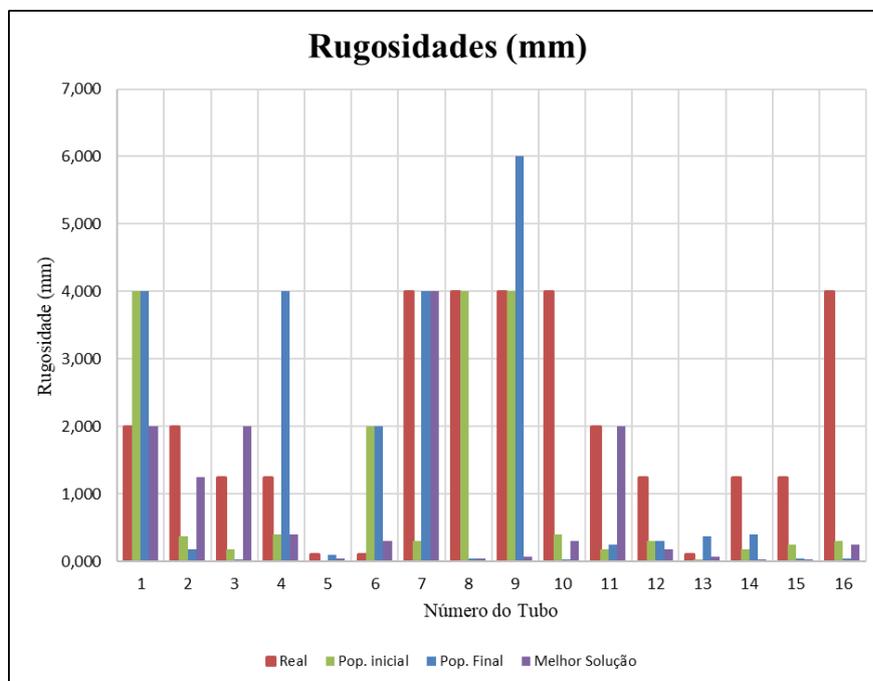
Tabela 74 - Valor da FO3 e geração ótima para FO3 e Rede 2 N° 13 Seção 32

FO3	0,0000044
N° Geração Ótima	2

Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 70, a seguir, tem-se os valores de rugosidades reais, da população inicial e final, como também da melhor solução do processamento.

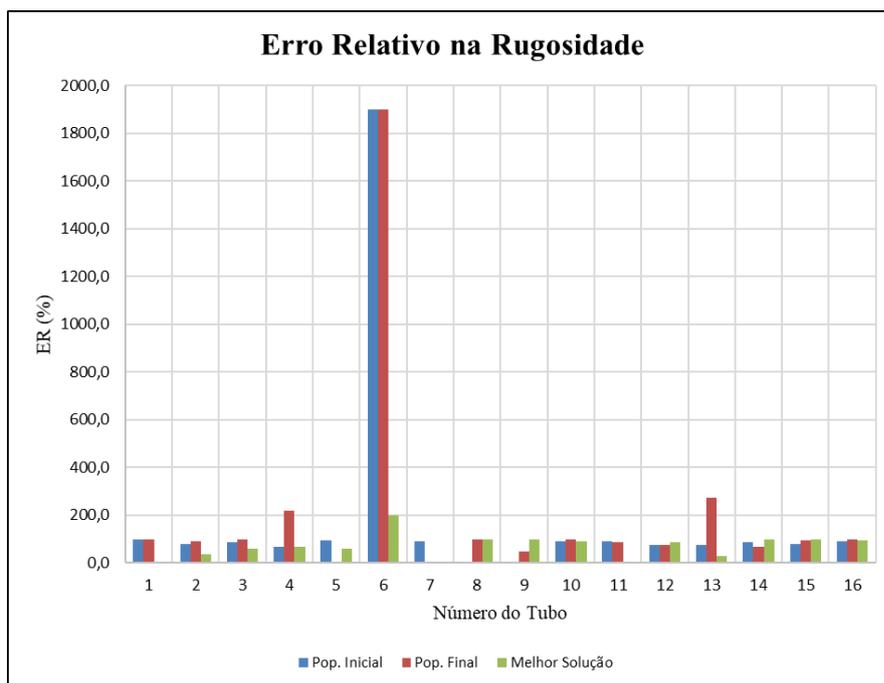
Gráfico 70 - Rugosidades reais, população inicial e final e melhor solução FO3 Rede 2 N° 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 71, abaixo, tem-se o erro relativo em cada tubo para essa simulação, também com os resultados apresentados para as condições anteriores.

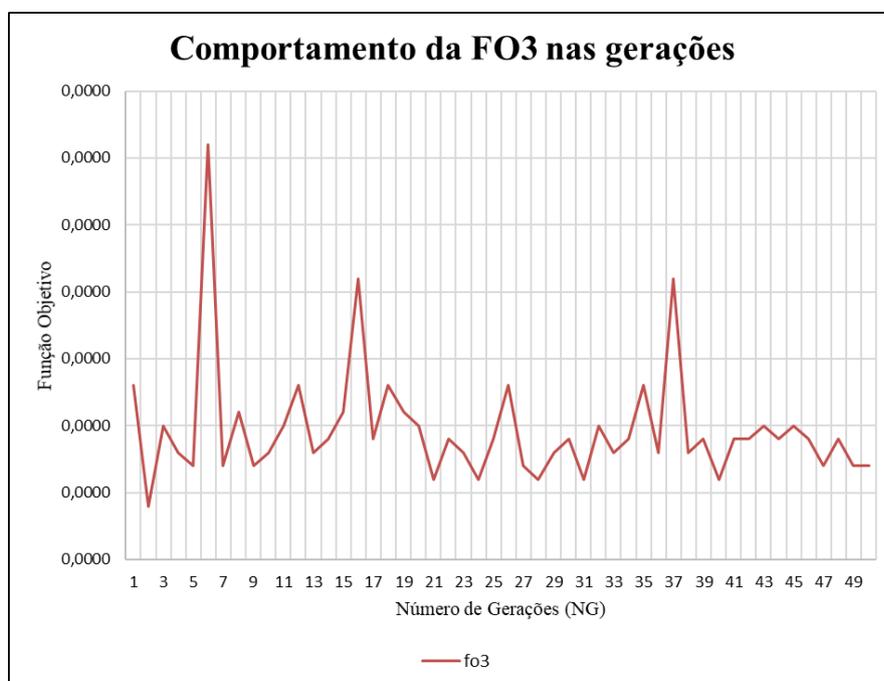
Gráfico 71 - Erro relativo nas rugosidades simuladas FO3 Rede 2 N6 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

No Gráfico 72 observa-se como se dá o comportamento do valor da FO3 com o decorrer das gerações.

Gráfico 72 - Comportamento da FO3 nas gerações no N6 13 Seção 32 da Rede 2



Fonte: Autor (2019)

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

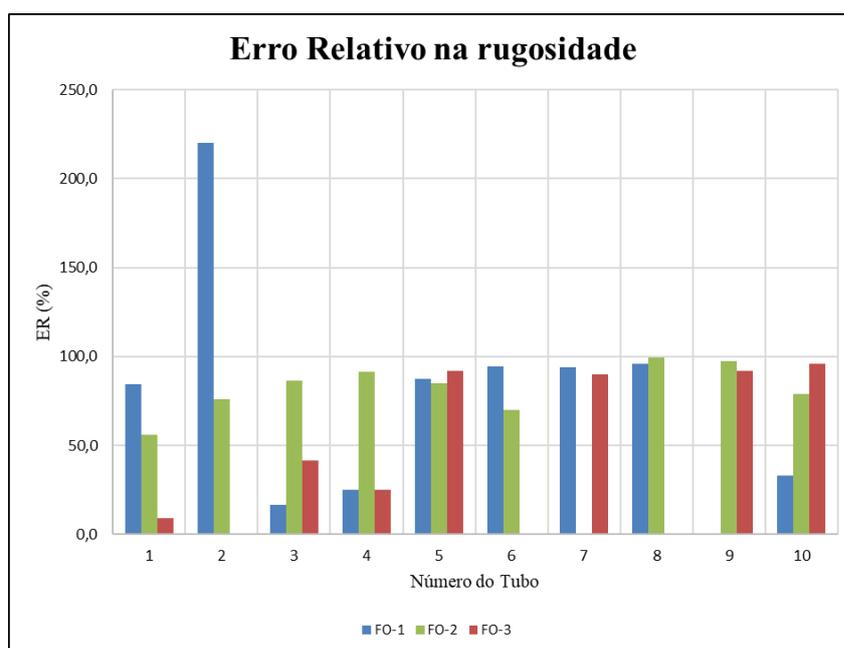
Aqui se fez uma análise dos resultados anteriormente apresentados, tendo como base as rugosidades calibradas, além de suas derivações, como o EMR e as cargas e vazões na rede. Sendo assim, dividiu-se os resultados em 4 grupos, como a seguir:

- Grupo 1: são os resultados dos nós, nas duas redes que possuem uma grande quantidade de tubos a eles ligados, por consequência tem-se o Nó 3 Seção 4 da Rede 1 e o Nó 8 Seção 10 da Rede 2, visando assim avaliar o comportamento das diferentes funções objetivo com a grande quantidade de tubos que se ligam a um mesmo nó da rede;
- Grupo 2: aqui tem-se os resultados apresentados para os nós estudados que se encontram mais distantes do reservatório de abastecimento da rede, que são, para a Rede 1 o Nó 6 Seção 14 e para a Rede 2 o Nó 4 Seção 8, para que se possa analisar como se porta as funções objetivo escolhidas com essa característica de um nó da rede;
- Grupo 3: resultados que estão relacionados aos nós que estejam mais próximos do reservatório de abastecimento da rede, respectivamente para as Redes 1 e 2, Nó 7 Seção 8 e Nó 3 Seção 4, sendo assim se visa observar a como se portam as funções objetivo em nós que possuam esse atributo; e
- Grupo 4: tem-se, nesse caso, os resultados apresentados para o Nó 8 Seção 20 e Nó 13 Seção 32, da Rede 1 e 2, respectivamente, e aqui existe a forte propriedade de serem nós considerados de extremidade da rede, logo visa-se observar o desempenho das funções objetivo com esses nós.

7.1 Grupo 1

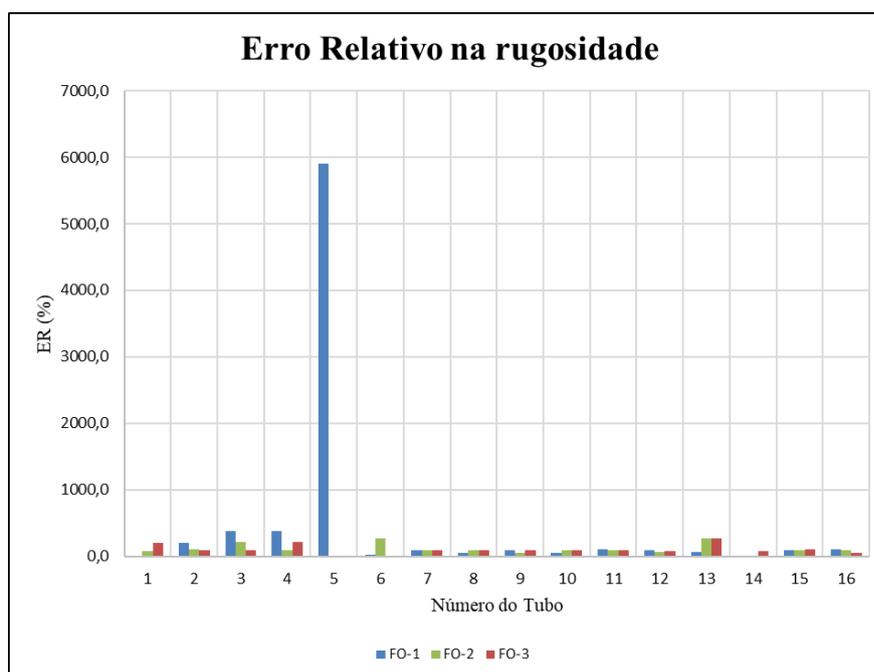
Em se falando de Erro Relativo em relação aos valores calibrados de rugosidade, percebe-se que a FO3 apresenta melhores resultados individuais, quando comparada às demais, tendo obtido as melhores respostas em 5 dos 10 tubos da Rede 1, porém quando se observa a Rede 2 tem-se que a FO2 apresenta uma quantidade maior de êxito em minimizar o erro, quando apresenta melhores valores em 7 dos 16 tubos. Os Gráficos 73 e 74, abaixo, demonstram tais observações.

Gráfico 73 – ER na rugosidade na calibração Rede 1 Nó 3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 74 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10

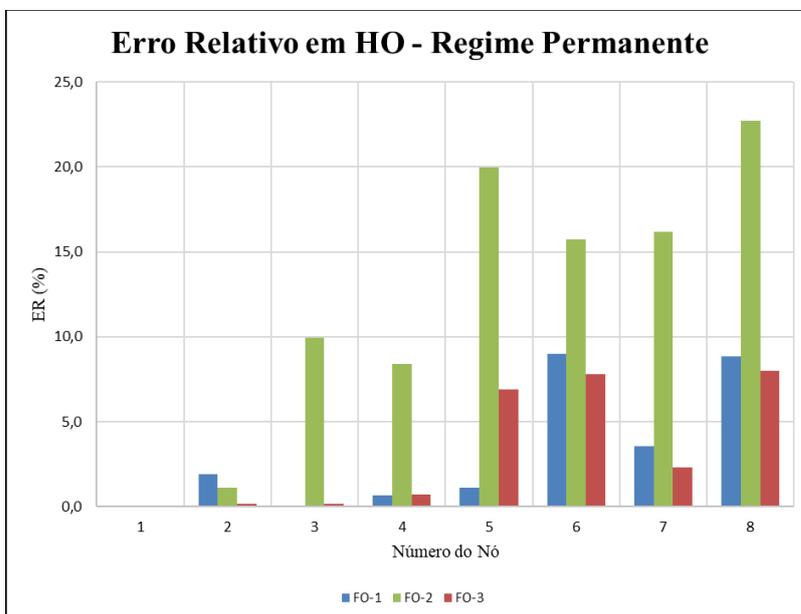


Fonte: Autor (2019)

No que se relaciona ao ER quanto à carga no nó calculada com as rugosidades simuladas em relação à carga real a FO3 apresentou melhores resultados em 4 dos 7 nós da Rede 1, e na Rede 2, essa mesma função foi a de desempenho mais forte em 11 dos 12 nós,

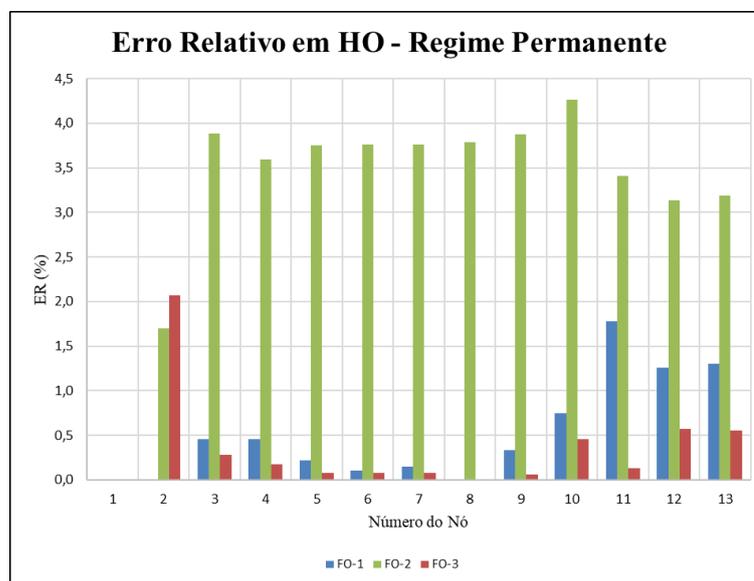
lembrando que os nós 1 e 13 são os reservatórios nas Redes 1 e 2, respectivamente, logo não variáveis. O que pode ser constatado nos Gráficos 75 e 76 a seguir.

Gráfico 75 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 76 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10

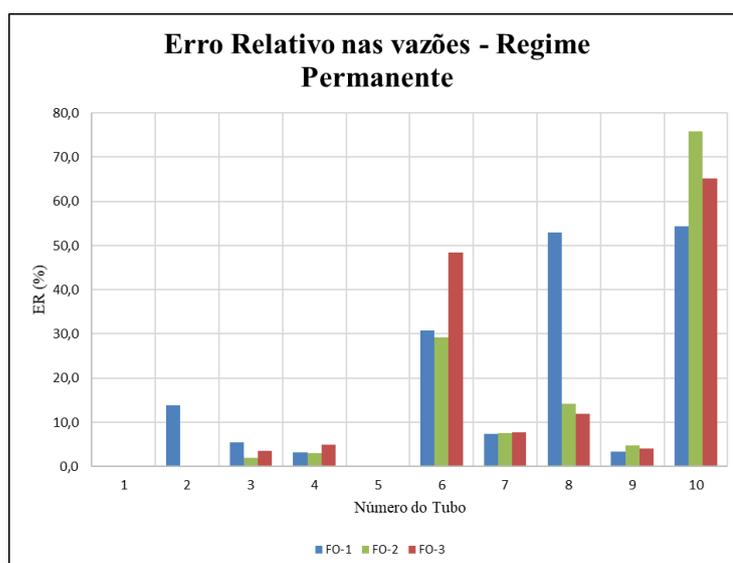


Fonte: Autor (2019)

Quando as rugosidades calibradas são utilizadas para se calcular as vazões nos tubos das redes, na Rede 1 a FO1 obteve o melhor desempenho melhor em 50% dos tubos, já na Rede 2 a FO2 obteve 56,25%¹ de melhor resposta nos tubos, porém a FO1 conseguiu 50%, um bom resultado. Nos Gráficos 77 e 78 pode-se observar esses desempenhos.

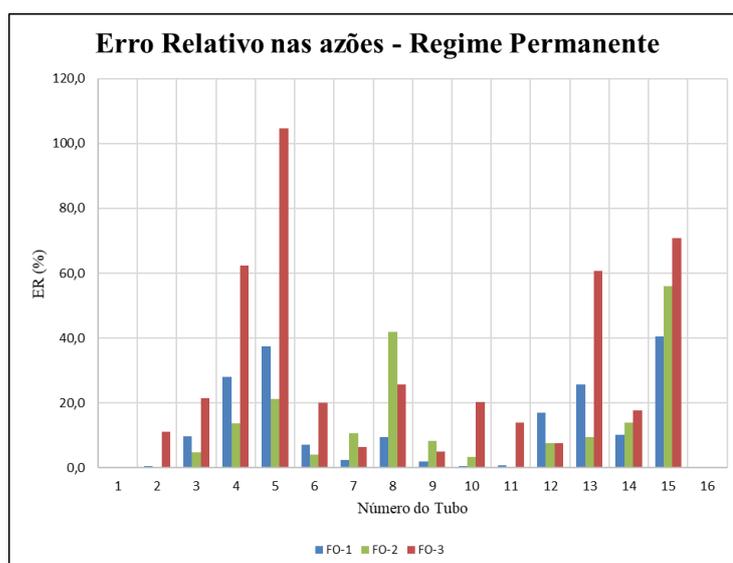
¹ O somatório das porcentagens ultrapassa os 100% aqui porquê, em alguns casos, duas ou as três funções obtêm

Gráfico 77 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 78 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10

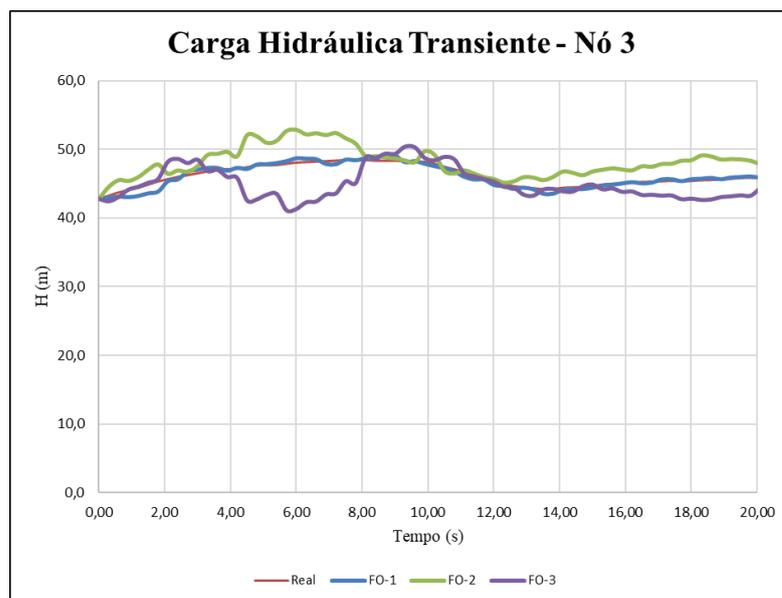


Fonte: Autor (2019)

A carga hidráulica transiente, no nó monitorado (Nó 3) da Rede 1, calculada com as rugosidades simuladas utilizando a FO1 apresentaram um comportamento muito semelhante ao real da rede e bem melhor do que as demais funções, o que pode ser, também, observado na Rede 2 (Nó 8), porém com um desempenho mais equilibrado entre a FO1 e a FO3, como pode ser visto nos Gráficos 79 e 80.

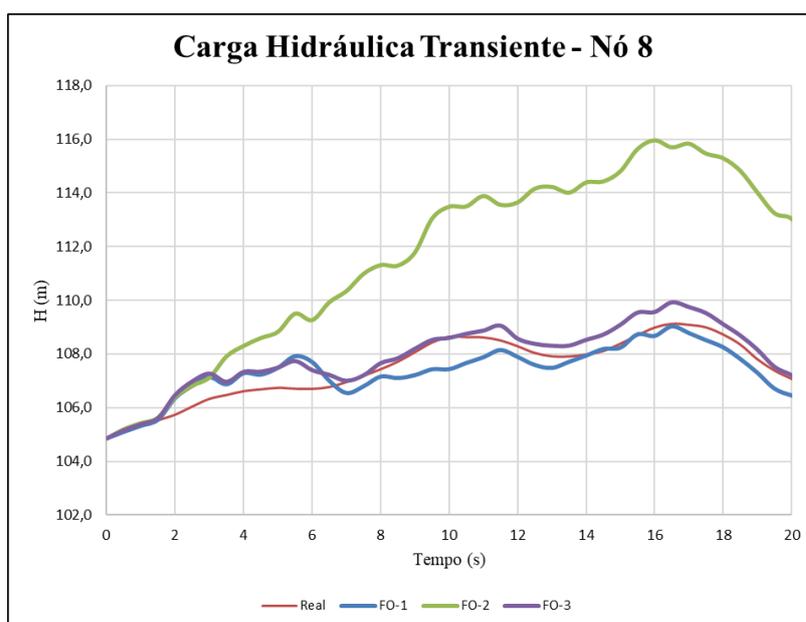
o mesmo valor de ER contabilizando, então, um melhor resultado para cada uma.

Gráfico 79 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas N° 3 Rede 1



Fonte: Autor (2019)

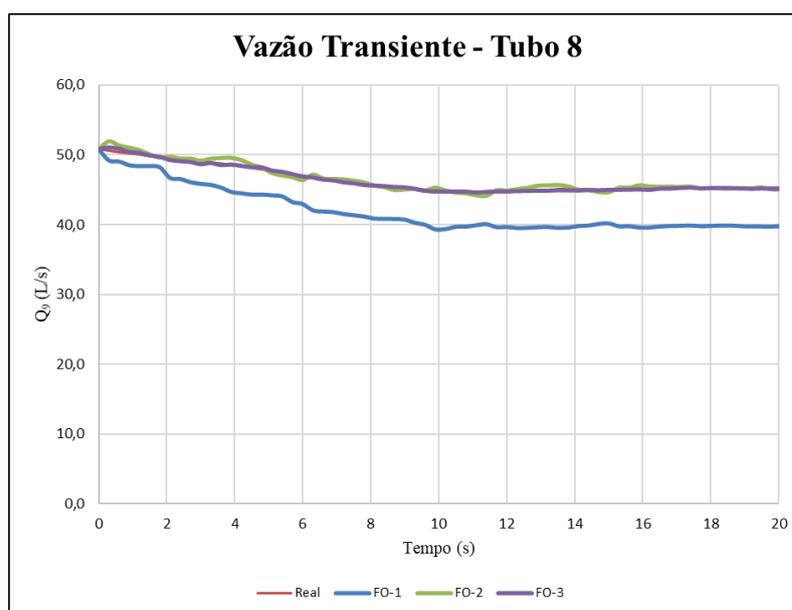
Gráfico 80 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas N° 8 Rede 2



Fonte: Autor (2019)

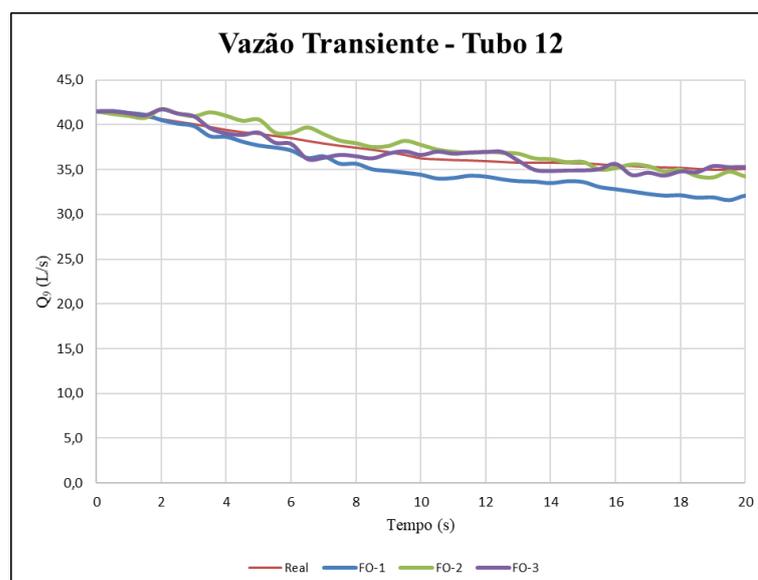
Já as vazões de regime transiente calculadas com as rugosidades simuladas apresentam um desempenho praticamente igual para FO2 e FO3, com comportamento relativamente similar ao real no Tubo 12 da Rede 2, já na Rede 1 Tubo 8 a FO3 apresenta um desempenho melhor, relativamente superior ao da FO2, como pode ser visto nos Gráficos 81 e 82.

Gráfico 81 - Vazão transiente no Tubo 8 da Rede 1 calculada com rugosidades simuladas



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 82 - Vazão transiente no Tubo 12 da Rede 2 calculada com rugosidades simuladas



Fonte: Autor (2019)

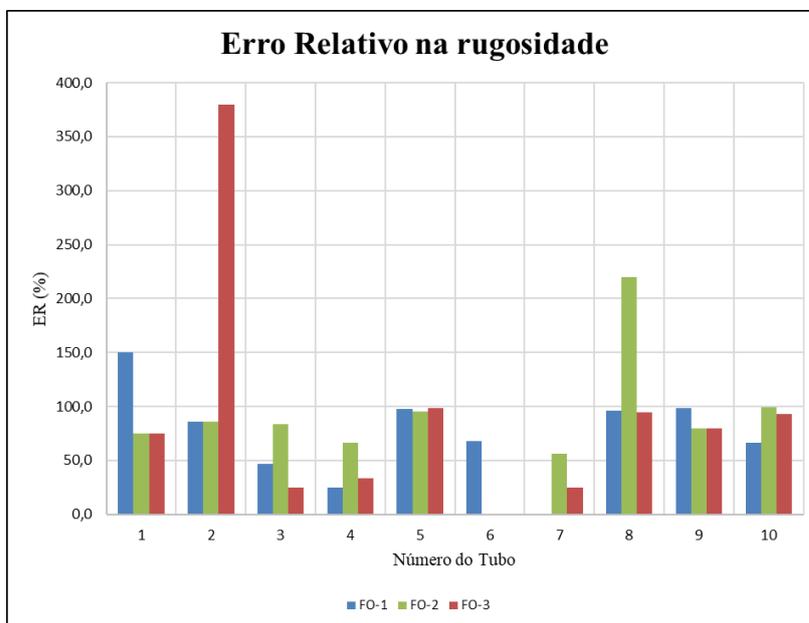
Ao se utilizar um nó com uma grande quantidade de tubos a ele ligado e as três funções objetivo aqui relacionadas, tendo como parâmetro as características apresentadas nesse tópico, percebe-se que a FO3 possui um desempenho superior as demais funções, apresentando resultados melhores em mais oportunidades.

7.2 Grupo 2

No Erro Relativo em relação aos valores calibrados de rugosidade, as FO2 e FO3 apresentam resultados individuais melhores e iguais, levemente superiores à FO1 na Rede 1,

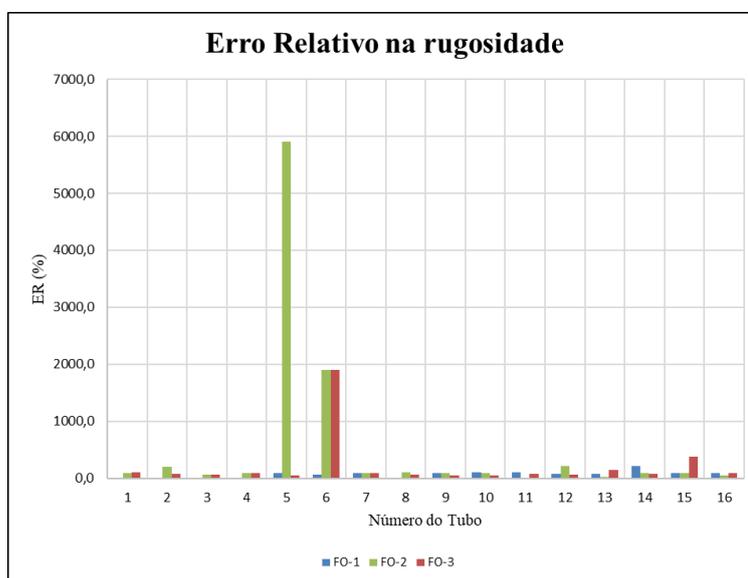
porém quando se observa a Rede 2 tem-se que FO1 e FO3 que apresentam resultados bastante similares. Os Gráficos 83 e 84, abaixo, demonstram tais observações.

Gráfico 83 - ER na rugosidade na calibração Rede 1 Nó 6 Seção 14



Fonte: Autor (2019)

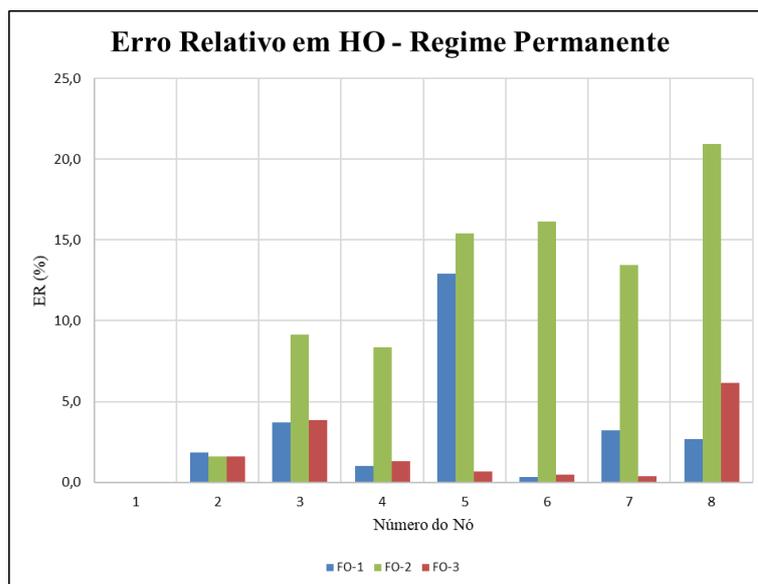
Gráfico 84 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 Nó 4 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

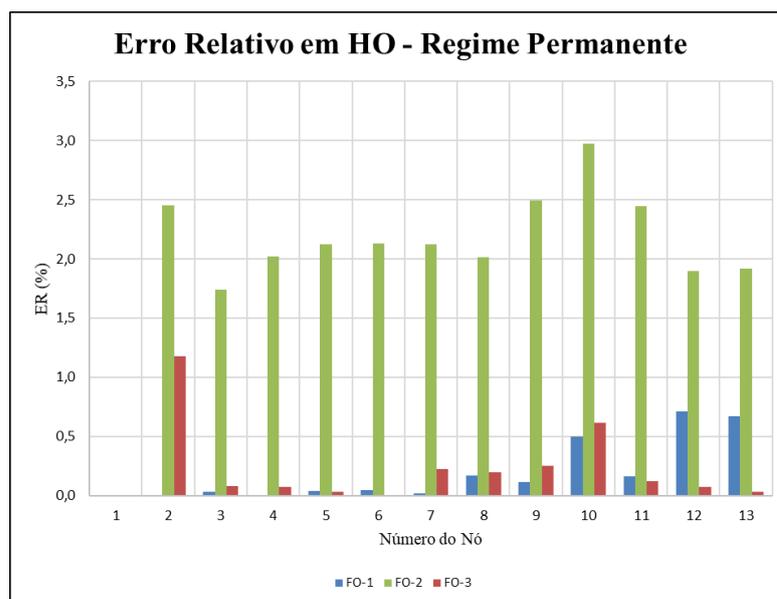
No que se relaciona ao ER quanto à carga no nó calculada com as rugosidades simuladas em relação à carga real a FO1 apresentou melhores resultados em 4 dos 7 nós da Rede 1, e na Rede 2, essa mesma função foi a de desempenho mais forte em 7 dos 12 nós, lembrando que os nós 1 e 13 são os reservatórios nas Redes 1 e 2, respectivamente, logo não variáveis. O que pode ser constatado nos Gráficos 85 e 86 a seguir.

Gráfico 85 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 6 Seção 14



Fonte: Autor (2019)

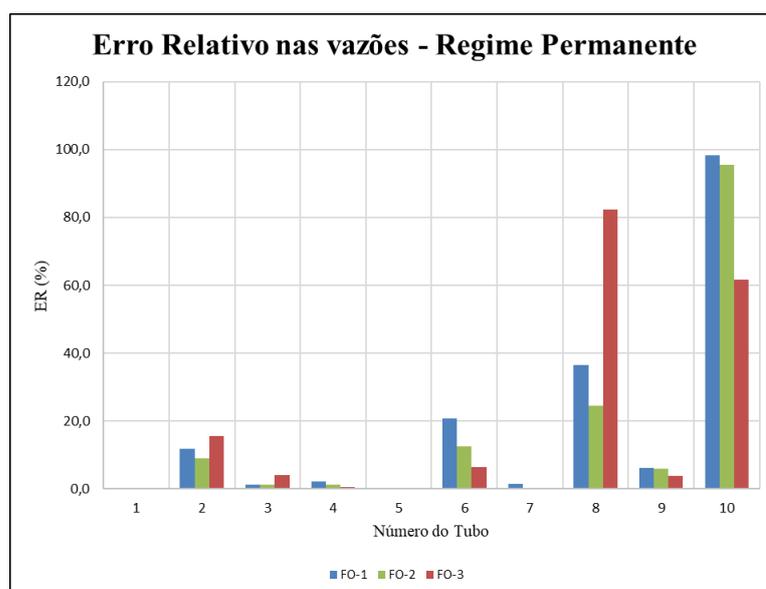
Gráfico 86 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 4 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

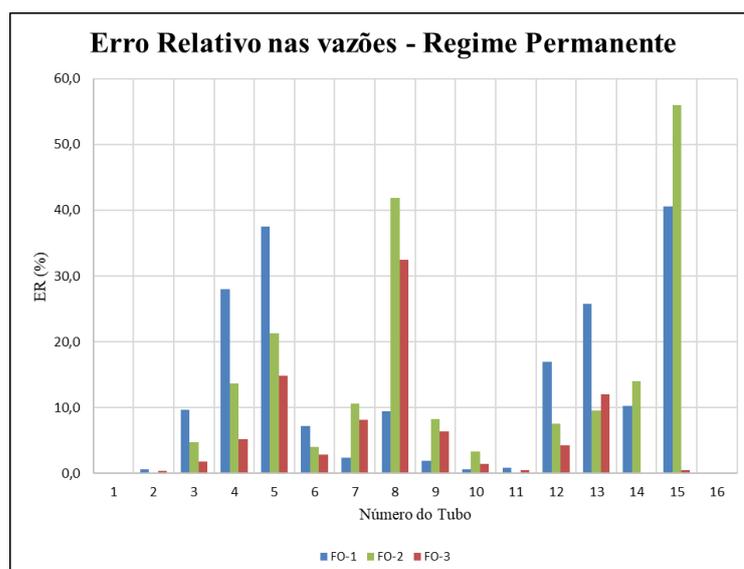
Quando as rugosidades calibradas são utilizadas para se calcular as vazões nos tubos das redes, na Rede 1 a FO3 obteve o melhor desempenho em 50% dos tubos, mesmo resultado observado na Rede 2. Nos Gráficos 87 e 88 pode-se observar esses desempenhos.

Gráfico 87 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 6 Seção 14



Fonte: Autor (2019)

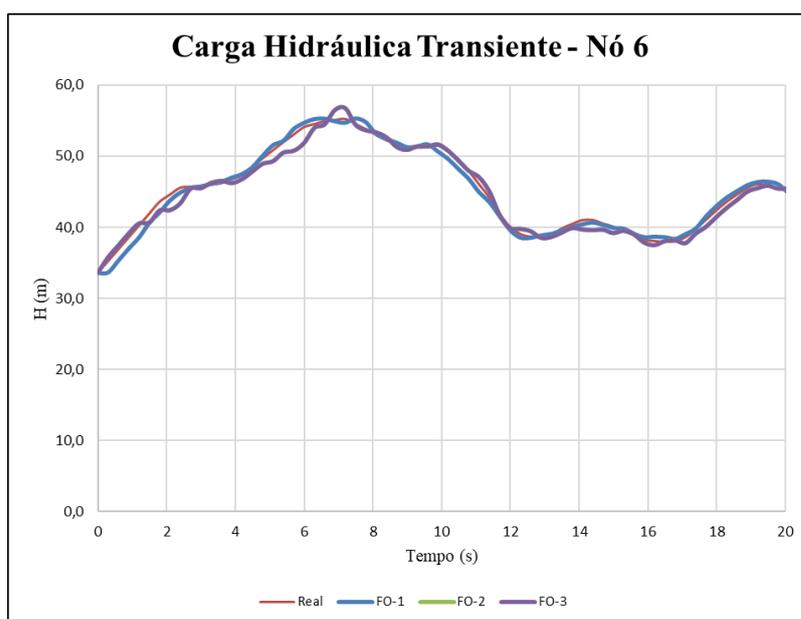
Gráfico 88 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 8 Seção 10



Fonte: Autor (2019)

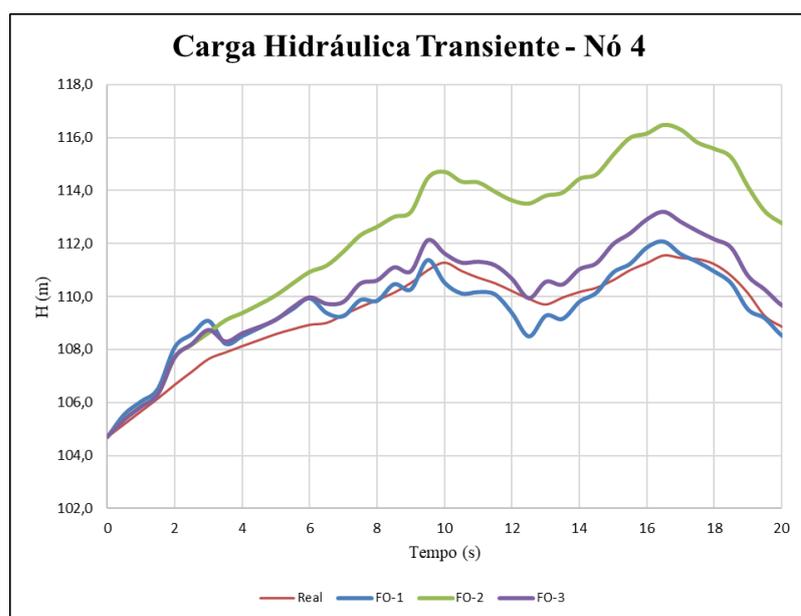
A carga hidráulica transiente, no nó monitorado (Nó 6) da Rede 1, calculada com as rugosidades simuladas utilizando a FO1 apresentaram um comportamento muito semelhante ao real da rede, apesar das demais funções também terem comportamento semelhante, o que pode ser, também, observado na Rede 2 (Nó 4), porém com um desempenho mais importante dessa função comentada, como pode ser visto nos Gráficos 89 e 90.

Gráfico 89 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas N6 Rede 1



Fonte: Autor (2019)

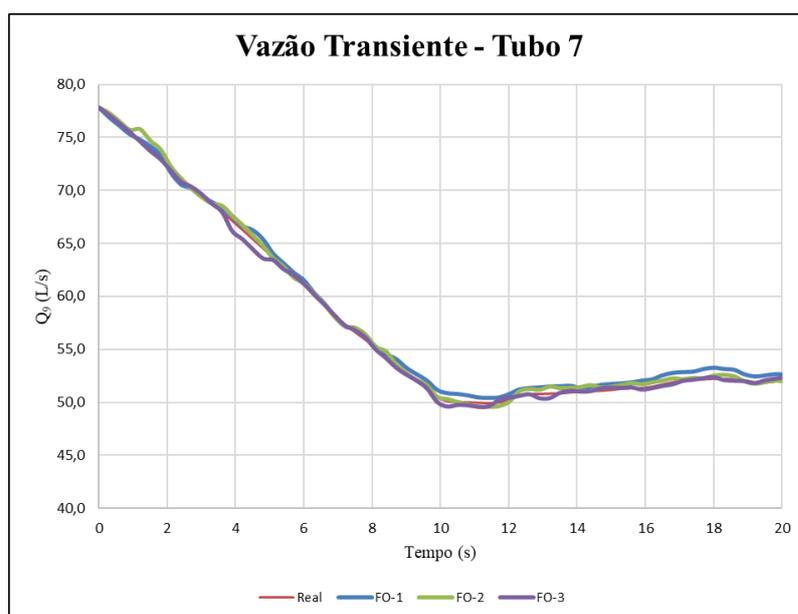
Gráfico 90 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas N6 Rede 2



Fonte: Autor (2019)

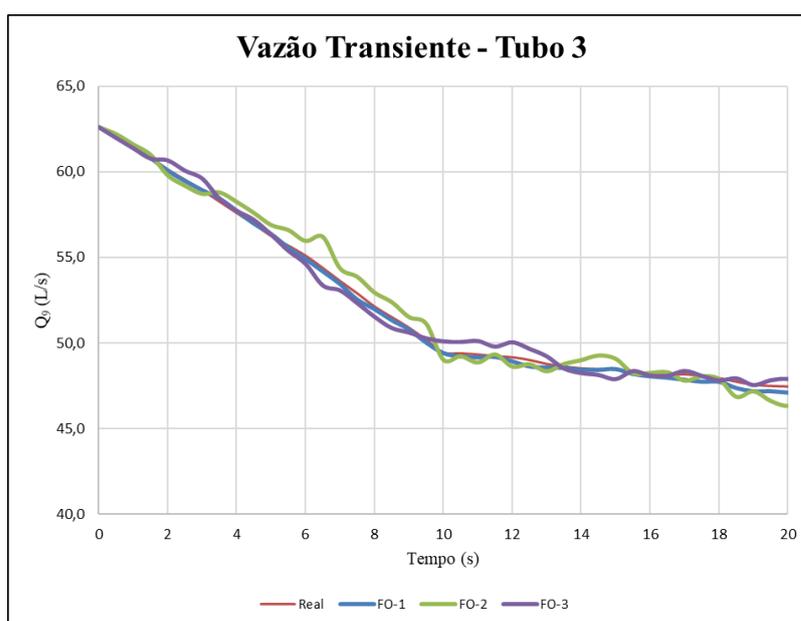
Já as vazões em regime transiente calculadas com as rugosidades simuladas apresentam um desempenho praticamente igual para FO2 e FO3, com comportamento relativamente similar ao real no Tubo 7 da Rede 1, já na Rede 2 Tubo 3 a FO1 apresenta um desempenho melhor como pode ser visto nos Gráficos 91 e 92.

Gráfico 91 - Vazão transiente no Tubo 7 da Rede 1 calculada com rugosidades simuladas



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 92 - Vazão transiente no Tubo 3 da Rede 2 calculada com rugosidades simuladas



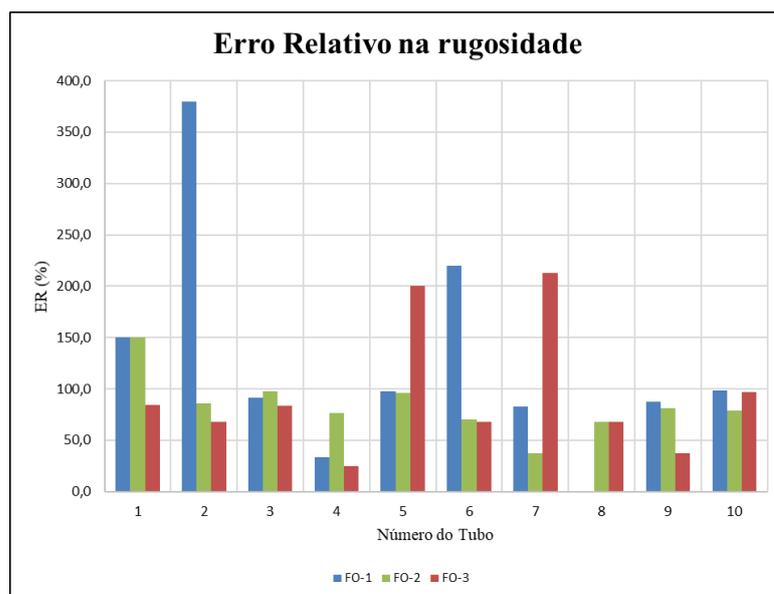
Fonte: Autor (2019)

Quando se tem um nó mais distante do reservatório de abastecimento o desempenho apresentado pela FO1 se mostra maior em relação às demais, tendo como parâmetro as características apresentadas nesse tópico, apresentando resultados melhores em mais oportunidades.

7.3 Grupo 3

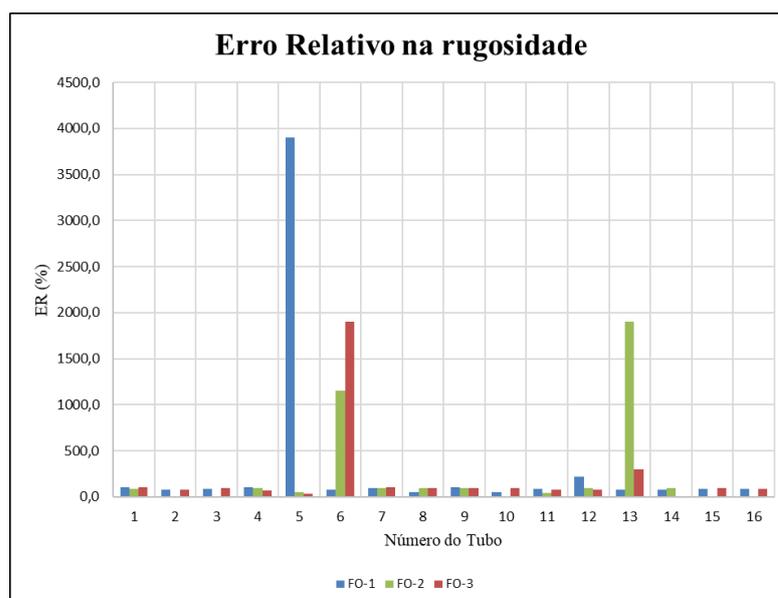
No Erro Relativo em relação aos valores calibrados de rugosidade, a FO1 apresenta resultados individuais melhores na Rede 1, porém quando se observa a Rede 2 tem-se que FO2 que apresenta resultados superiores em relação às demais. Os Gráficos 93 e 94, abaixo, demonstram tais observações.

Gráfico 93 - ER na rugosidade na calibração Rede 1 Nó 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 94 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 Nó 3 Seção 4

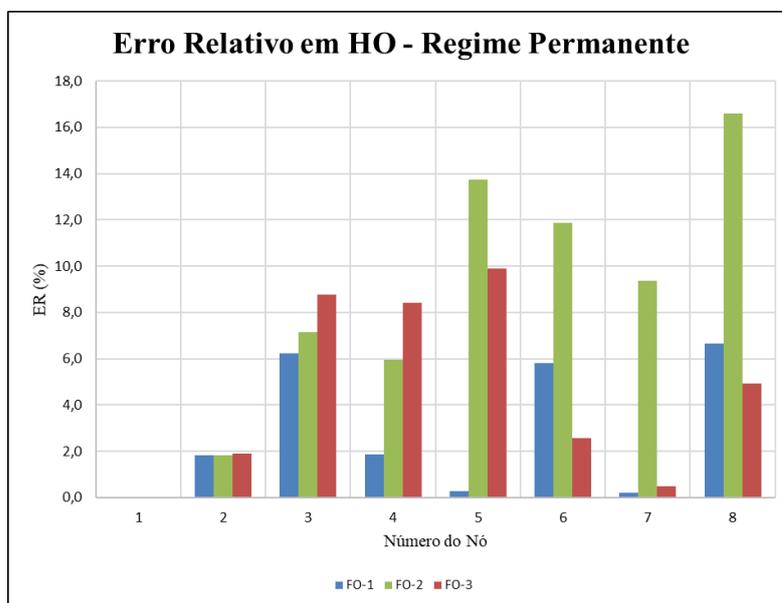


Fonte: Autor (2019)

Quanto ao ER da carga no nó calculada, com as rugosidades simuladas, em relação à carga real a FO1 apresentou melhores resultados em 4 dos 7 nós da Rede 1, e na Rede 2, essa

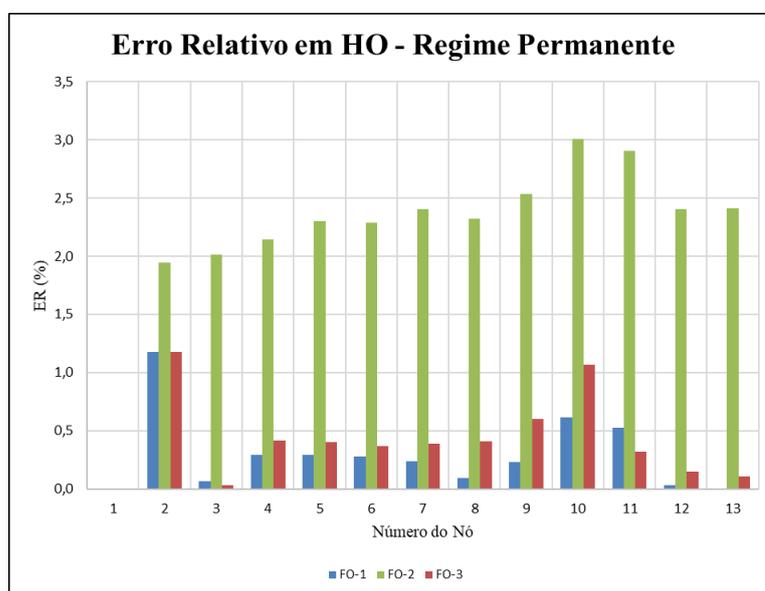
mesma função foi a de desempenho mais forte em 10 dos 12 nós, lembrando que os nós 1 e 13 são os reservatórios nas Redes 1 e 2, respectivamente, logo não variáveis. O que pode ser constatado nos Gráficos 95 e 96 a seguir.

Gráfico 95 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 96 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 3 Seção 4

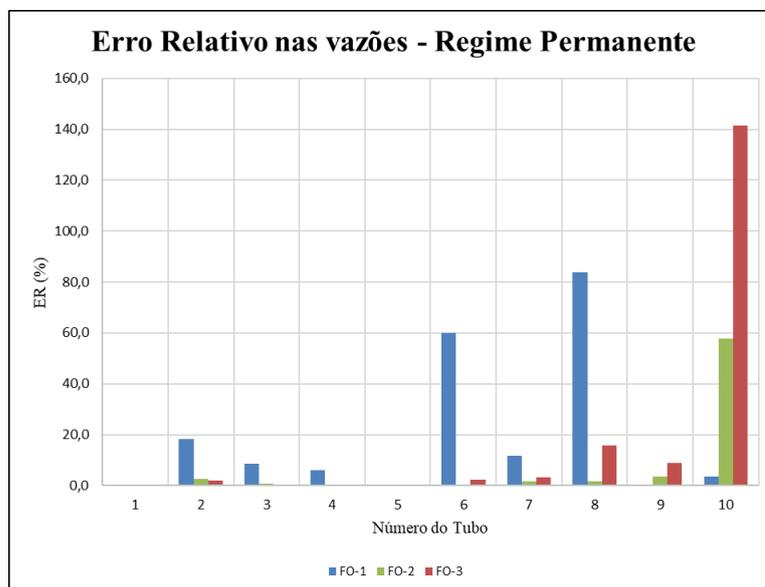


Fonte: Autor (2019)

Quando as rugosidades calibradas são utilizadas para se calcular as vazões nos tubos das redes, na Rede 1 FO1 e FO2 obtiveram o melhor desempenho em 40% dos tubos, cada, praticamente o mesmo resultado observado na Rede 2, onde a FO2 apresentou um

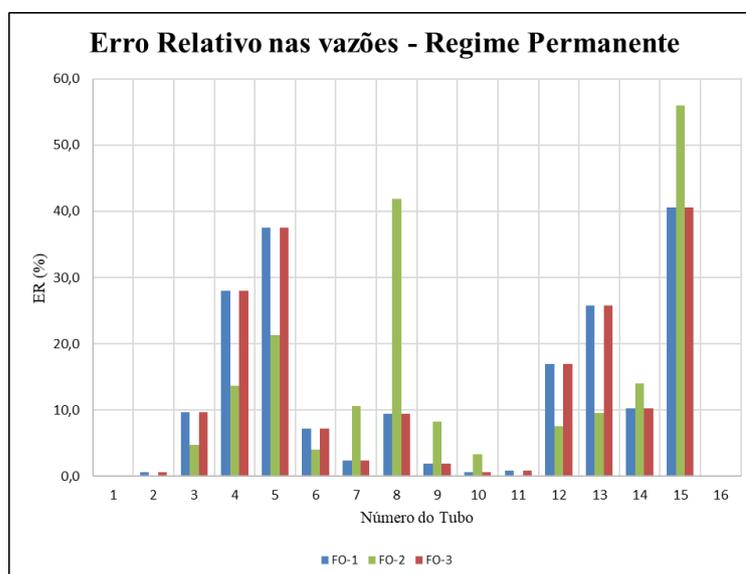
resultado um pouco acima da FO1, porém ainda bastante semelhantes. Nos Gráficos 97 e 98 pode-se observar esses desempenhos.

Gráfico 97 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 7 Seção 8



Fonte: Autor (2019)

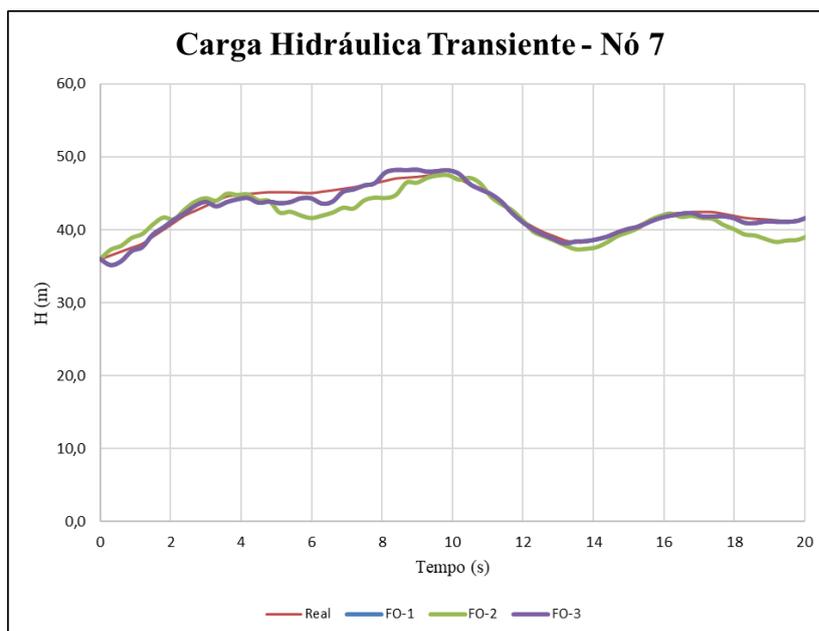
Gráfico 98 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 3 Seção 4



Fonte: Autor (2019)

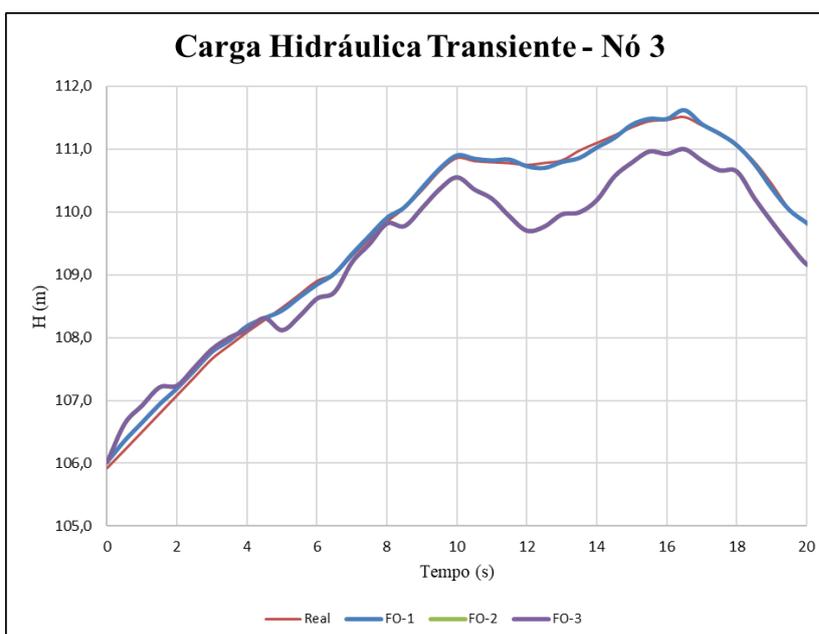
A carga hidráulica em regime transiente, no nó monitorado (Nó 7) da Rede 1, calculada com as rugosidades simuladas utilizando a FO1 e a FO3 apresentaram um comportamento mais semelhante ao real da rede e exatamente igual, já na Rede 2 (nó monitorado 3), a FO1 tem um desempenho bastante superior aos demais, que não estão tão pertos de representar a real situação, como pode ser visto nos Gráficos 99 e 100.

Gráfico 99 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas N° 7 Rede 1



Fonte: Autor (2019)

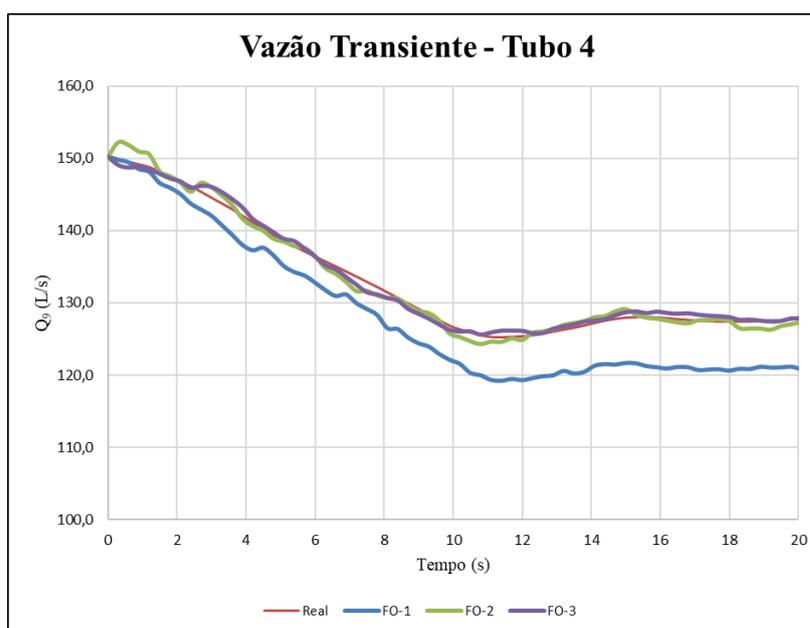
Gráfico 100 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas N° 3 Rede 2



Fonte: Autor (2019)

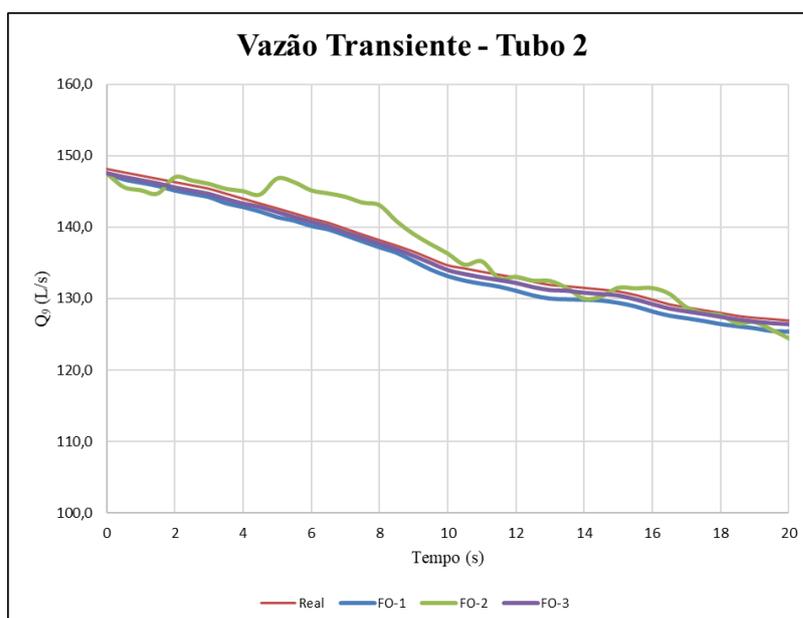
As vazões transientes calculadas com as rugosidades simuladas apresentam um desempenho praticamente igual para FO2 e FO3, com comportamento relativamente similar ao real no Tubo 4 da Rede 1, já na Rede 2 Tubo 2 a FO3 apresenta um desempenho bem superior, como pode ser visto nos Gráficos 101 e 102.

Gráfico 101 - Vazão transiente no Tubo 4 da Rede 1 calculada com rugosidades simuladas



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 102 - Vazão transiente no Tubo 2 da Rede 2 calculada com rugosidades simuladas



Fonte: Autor (2019)

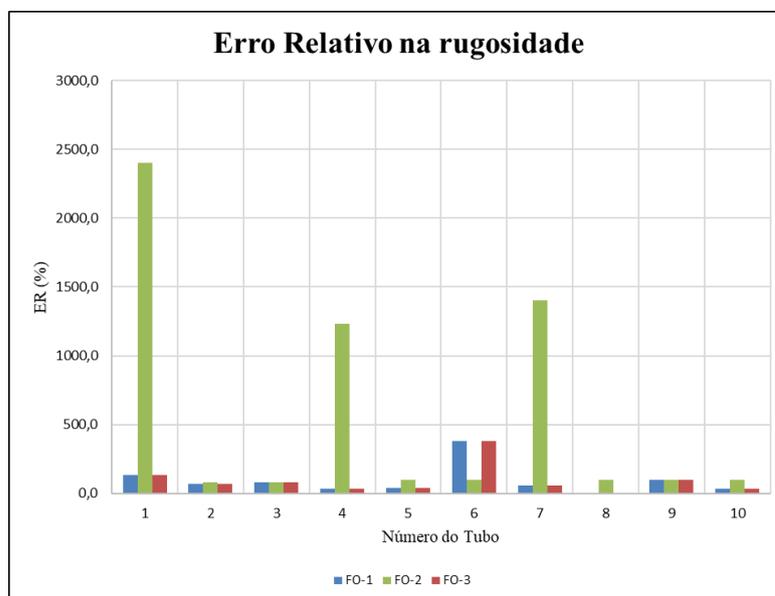
Um nó que esteja mais perto do reservatório apresenta melhores resultados quando utilizada a FO1, ao se analisar os pontos abordados nesse tópico, assim apresentando melhores resultados em mais momentos do que as demais funções.

7.4 Grupo 4

No ER em relação aos valores calibrados de rugosidade, FO1 e FO3 apresentam resultados individuais melhores na Rede 1, exatamente o mesmo valor em 8 dos 10 tubos, o

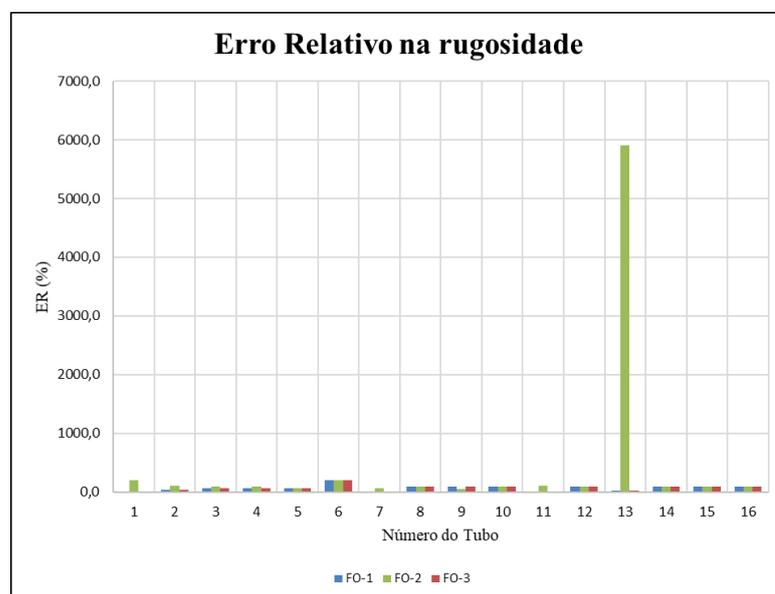
mesmo que se observa na Rede 2 quando tem-se que FO1 e FO3 apresentam resultados idênticos e superiores em 13 dos 16 tubos. Os Gráficos 103 e 104, abaixo, demonstram tais observações.

Gráfico 103 - ER na rugosidade na calibração Rede 1 N6 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

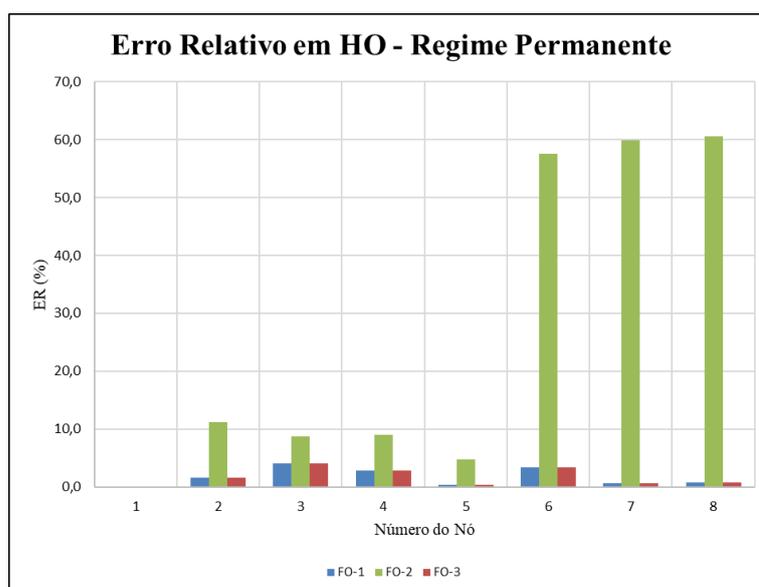
Gráfico 104 - ER na rugosidade na calibração Rede 2 N6 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

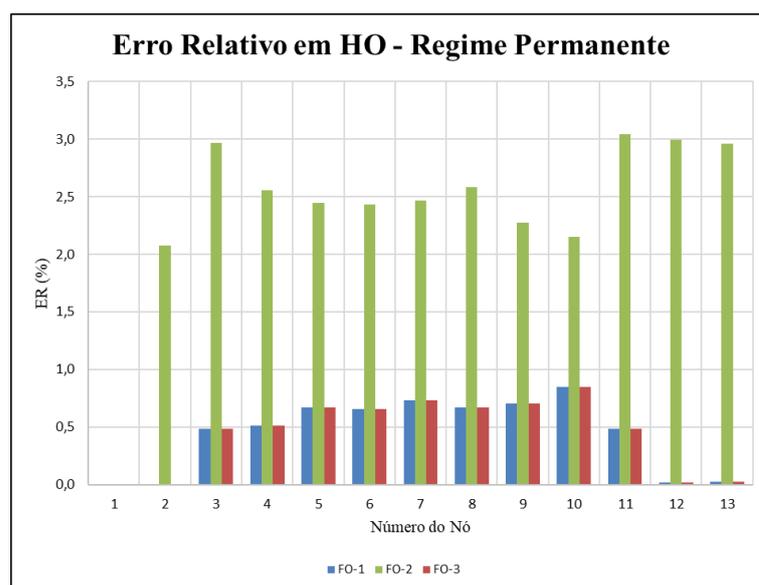
Quanto ao ER da carga no nó calculada, com as rugosidades simuladas, em relação à carga real FO1 e FO3 apresentaram melhores resultados, com uma leve vantagem para a FO3 na Rede 1, e na Rede 2, esse mesmo comportamento é observado com as mesmas funções anteriores. O que pode ser constatado nos Gráficos 105 e 106 a seguir.

Gráfico 105 – ER na carga permanente na calibração Rede 1 Nó 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

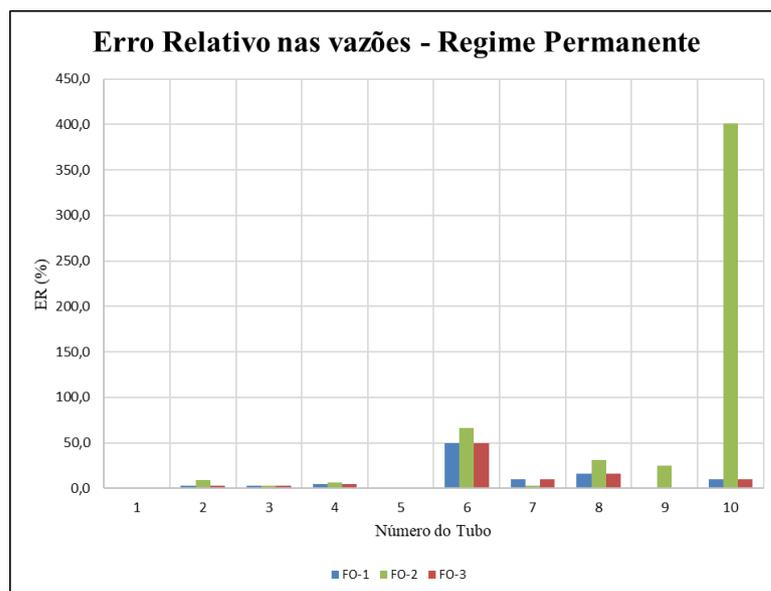
Gráfico 106 - ER na carga permanente na calibração Rede 2 Nó 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

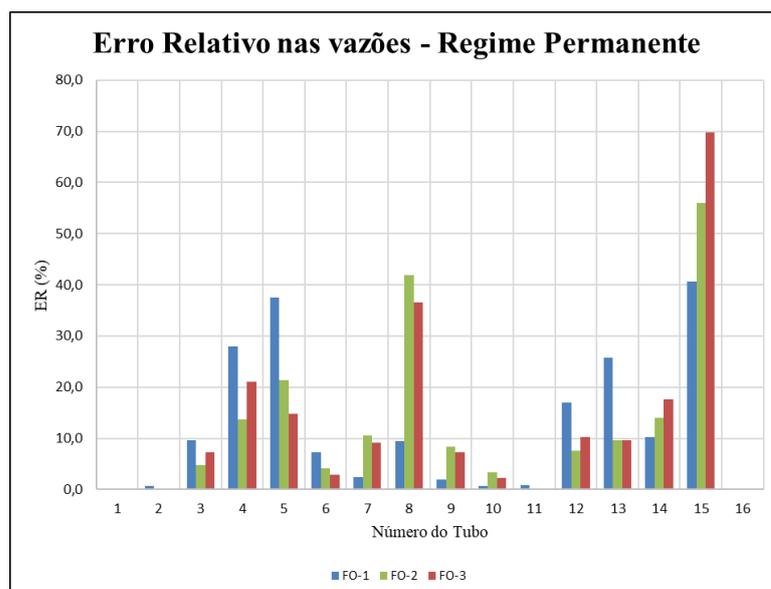
Quando as rugosidades calibradas são utilizadas para se calcular as vazões nos tubos das redes, na Rede 1 FO3 obteve um desempenho levemente superior àquele da FO1, enquanto na Rede 2, FO1 tem um desempenho muito semelhante à FO2. Nos Gráficos 107 e 108 pode-se observar esses desempenhos.

Gráfico 107 - ER na vazão permanente na calibração Rede 1 Nó 8 Seção 20



Fonte: Autor (2019)

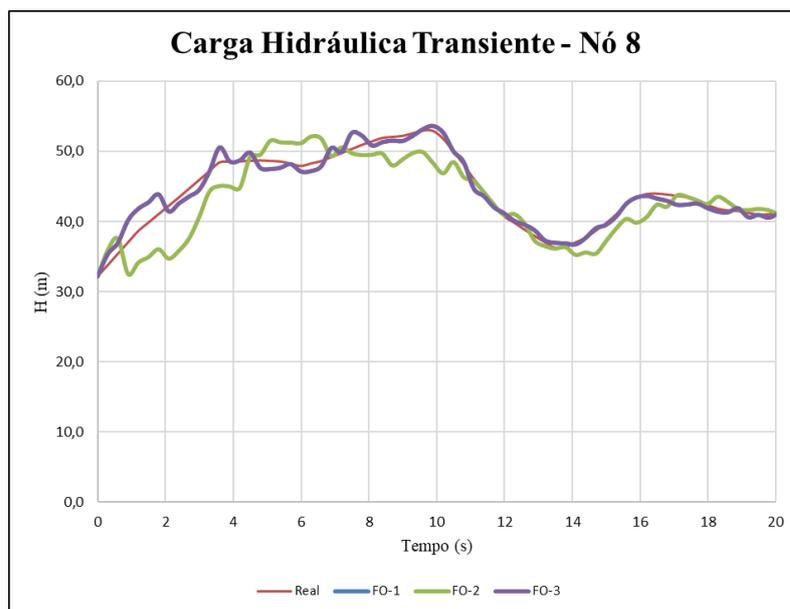
Gráfico 108 - ER na vazão permanente na calibração Rede 2 Nó 13 Seção 32



Fonte: Autor (2019)

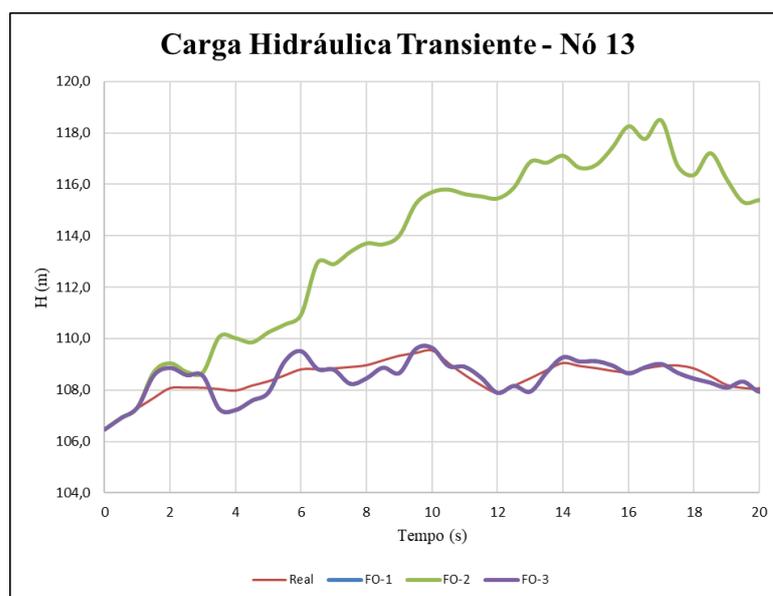
A carga hidráulica em regime transiente, no nó monitorado (Nó 8) da Rede 1, calculada com as rugosidades simuladas utilizando a FO1 e a FO3 apresentaram um comportamento mais semelhante ao real da rede e exatamente igual, já na Rede 2 (Nó 13), a FO3 tem um desempenho praticamente igual à FO1, como pode ser visto nos Gráficos 109 e 110.

Gráfico 109 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 8 Rede 1



Fonte: Autor (2019)

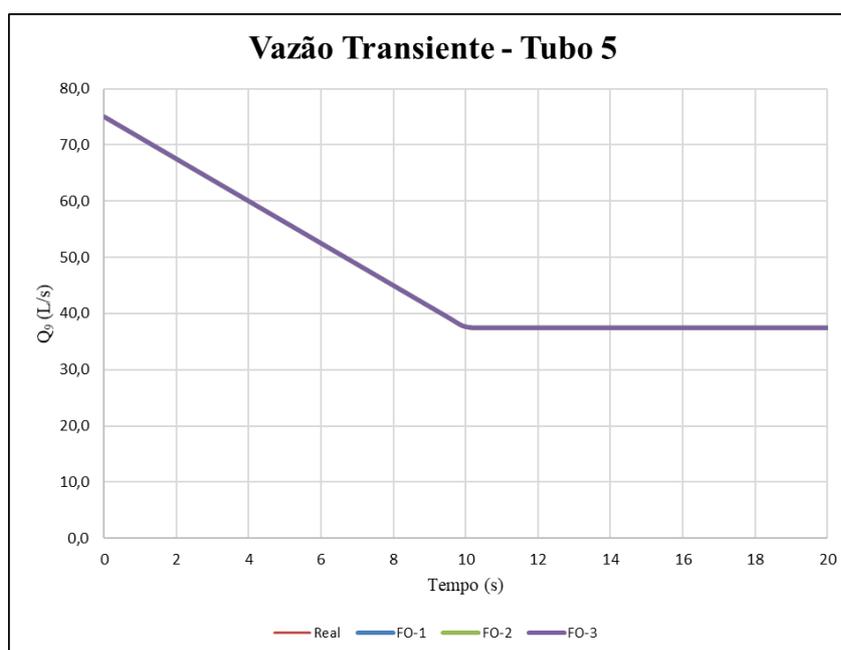
Gráfico 110 - Carga hidráulica transiente para rugosidades calibradas Nó 13 Rede 2



Fonte: Autor (2019)

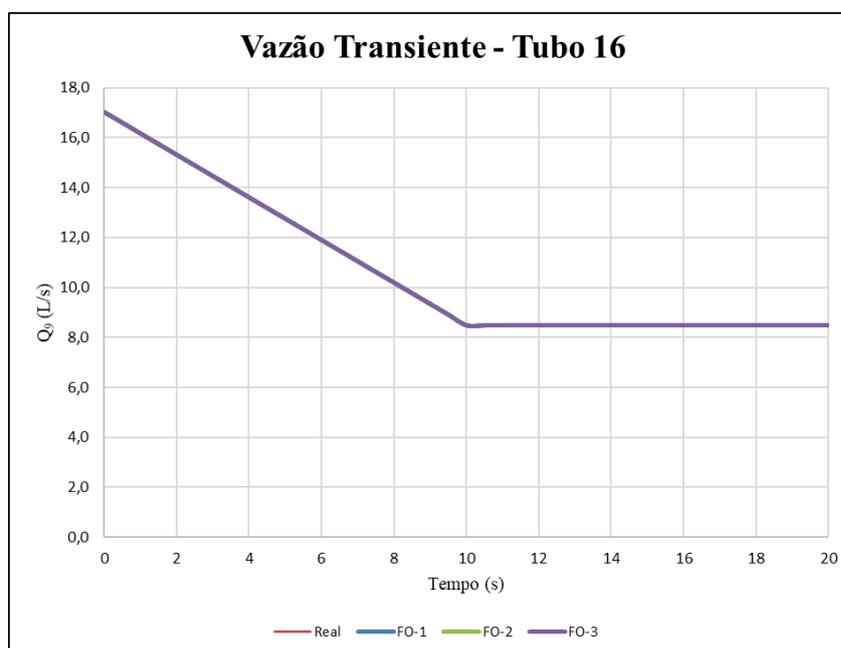
As vazões transientes calculadas com as rugosidades simuladas são uma peculiaridade, já que os resultados de todas as funções nas duas redes obtiveram com sucesso as vazões reais, como pode ser visto nos Gráficos 111 e 112.

Gráfico 111 - Vazão transiente no Tubo 5 da Rede 1 calculada com rugosidades simuladas



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 112 - Vazão transiente no Tubo 16 da Rede 2 calculada com rugosidades simuladas



Fonte: Autor (2019)

Dos nós separados para estudo esses são os que apresentam uma particularidade maior, pois são as extremidades da rede, onde toda a água que chega a esse ponto é consumida pela demanda pontual, aqui as funções FO1 e FO3 apresentaram um comportamento muito semelhante, com leve vantagem para a FO1.

7.5 Comparação das três melhores gerações

Para a comparação dos resultados obtidos pelas simulações no Nó 6 Seção 14 da Rede 1, são apresentados abaixo as Tabelas 75 e 76 para aqueles obtidos com a FO1.

Tabela 75 – Três melhores valores de FO1 e seus EMRs em rugosidade e carga e vazão permanente

NG	FO1	EMR ϵ (%)	EMR H Perm (%)	EMR Q Perm (%)
22	0,00052798	73,46	3,22	17,85
12	0,00082052	88,22	3,43	25,94
45	0,00098804	139,34	3,42	8,81

Fonte: Autor (2019)

Tabela 76 – Três melhores valores de EMR na rugosidade e valor da FO1 correspondente

NG	FO1	EMR ϵ (%)
27	0,00464416	49,93
18	0,00162323	50,72
43	0,00550840	52,48

Fonte: Autor (2019)

Nas Tabelas 77 e 78, abaixo, se tem os mesmos resultados dos mesmos parâmetros anteriores, mas obtidos com a utilização da FO2.

Tabela 77 – Três melhores valores de FO2 e seus EMRs em rugosidade e carga e vazão permanente

NG	FO2	EMR ϵ (%)	EMR H Perm (%)	EMR Q Perm (%)
47	0,00018943	86,16	10,63	15,04
31	0,00022733	76,98	10,43	8,81
16	0,00023076	312,17	5,95	25,19

Fonte: Autor (2019)

Tabela 78 – Três melhores valores de EMR na rugosidade e valor da FO2 correspondente

NG	FO2	EMR ϵ (%)
7	0,00079869	57,27
18	0,00046292	68,48
38	0,00223171	69,84

Fonte: Autor (2019)

Já nas Tabelas 79 e 80, aqueles resultados alcançados com a FO3.

Tabela 79 – Três melhores valores de FO3 e seus EMRs em rugosidade e carga e vazão permanente

NG	FO3	EMR ε (%)	EMR H Perm (%)	EMR Q Perm (%)
1	0,00152415	90,48	1,81	17,48
18	0,00226634	50,72	2,36	10,29
41	0,00408679	60,31	3,28	22,56

Fonte: Autor (2019)

Tabela 80 – Três melhores valores de EMR na rugosidade e valor da FO3 correspondente

NG	FO3	EMR ε (%)
18	0,00226634	50,72
39	0,01747415	54,13
45	0,00543523	57,00

Fonte: Autor (2019)

É comum aos três casos se observar que a produção de um grupo de cromossomos (respostas) que se traduz em um menor valor de função objetivo, qualquer que ela seja no nosso estudo, não se mostra como um resultado que traz consigo menores erros relativos médios em relação à rugosidade dos tubos.

Em relação à carga hidráulica permanente nos nós ocorrem comportamentos diferenciados de cada uma das funções, como a FO1 e a FO3 que não mostram muita diferença quando se passa de um valor de função objetivo menor para um maior, estando sempre dentro da vizinhança. Já na FO2 percebe-se que uma pequena variação de aumento de valor da função provoca uma diminuição do erro médio relativo na carga.

Quando se olha para a vazão percebe-se que as variações no valor do erro com o aumento da resposta da função são bastante aleatórias, ou seja, não se mostram muito dependentes da função.

Pode-se notar, então, que, um valor menor de função objetivo, nesse caso, não está se traduzindo em melhores respostas em relação ao erro.

7.6 Avaliação da integração entre as funções objetivo e os parâmetros estudados da rede

Após todas as análises aqui aplicadas é notório que as diferentes funções objetivo provocam diferentes respostas no momento da calibração da rugosidade em redes de distribuição de água.

Dos 4 grupos apresentados as FO1 se mostrou a que produziu melhores resultados em 3 deles (grupos 2, 3 e 4) e a FO3 em um dos grupos (grupo 1), quando se olha separadamente

para cada característica do grupo e da função objetivo que apresentou melhor resultado se percebe que no primeiro caso em que um nó com diversos tubos a ele ligado é mais influenciado por uma função que apresenta dependência tanto da carga hidráulica como da vazão.

Nos demais casos a FO1 se mostrou mais interessante de ser usada, não importando a distância do nó para o reservatório de abastecimento do sistema ou se ele é um nó de extremidade, assim a carga hidráulica, único parâmetro utilizado na FO1, se mostra mais influente nesse processo.

Nota-se que no grupo em que a FO3, que depende tanto da vazão como da carga, além dos pesos de cada um, a quantidade de tubos e as vazões que por ele percorrem podem ser importantes para o sucesso da calibração, uma vez que a função que melhor o representou apresenta características intimamente ligadas aos tubos, porém a carga no nó ainda seria importante, afinal está presente na FO3 e o resultado foi melhor apresentado do que aquele da FO2, que tem como parâmetro somente a vazão.

É importante ressaltar, também, que ao se comparar o EMR das rugosidades com aqueles apresentados pelas cargas hidráulicas, por exemplo, o primeiro é sempre bem superior ao segundo, fato observado não só nessa pesquisa mas em outras como em Gambale (2000), em que o autor comenta que essa diferença pode advir das distribuições de vazão e dos diâmetros dos tubos que os tornam pouco sensíveis à rugosidade, ou seja, quando ocorrem grandes variações na rugosidade a sentida na perda de carga é menor e, conseqüentemente, na carga hidráulica também o é.

O EMR médio dos 4 grupos da Rede 1 é de 83,49%, enquanto para a Rede 2 é de 162,13%, praticamente o dobro. Para se avaliar a afirmação do parágrafo anterior pode-se notar que dos quatro tubos calibrados na Rede 1 a média dos diâmetros é de 275 mm, sendo o maior calibrado de 300 mm e de toda a rede de 500 mm, enquanto na Rede 2 a média dos 4 tubos é de 406,85 mm, com o maior calibrado tendo 457 mm de diâmetro e o maior da rede de 610 mm.

Logo, pode-se notar que a grande variação dos valores de rugosidade dos tubos de maior diâmetro não interfere muito em valores de perda de carga e assim de pressão, logo quando as funções objetivos têm esse parâmetro como fator decisivo, elas produzirão melhores resultados mesmo que aqueles apresentados pela rugosidade não sejam os melhores, como pode ser visto na Rede 2 que possui maiores diâmetros e produziu maiores erros na rugosidade.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesse trabalho apresentou-se um estudo comparativo da aplicação de diversas funções objetivo na calibração de rugosidade de duas redes de distribuição de água hipotéticas submetidas a um transiente hidráulico provocado pela variação da demanda, utilizando a ferramenta de algoritmos genéticos.

O seguimento da metodologia proposta, de utilização de programações em FORTRAN para os cálculos dos parâmetros necessários para a posterior simulação das rugosidades e avaliação dos resultados encontrados, se mostrou bastante oportuno e satisfatório, uma vez que forneceu os dados necessários para a continuação do trabalho.

Apesar de não ter explorado a fundo as possibilidades que o AG proporciona quanto a sua versatilidade e modificação simples de parâmetros a ele relacionados, por não serem eles o foco principal do estudo, confirmou-se que a sua ampla variedade de possibilidades é muito importante e abre sempre novas possibilidades de estudos, como será comentar no momento das proposições de estudos.

O sucesso ao atingir os objetivos propostos nessa dissertação, também, é bem representante da importância que tais técnicas têm na formação e propagação de conhecimentos na área de hidráulica e recursos hídricos.

Ao se aplicar as três funções objetivos propostas dentro das duas redes nos quatro nós selecionados pelas suas características observou-se uma predominância de melhores resultados com uma delas a, aqui chamada, FO1.

A FO1 é uma função que representa o quadrado da diferença entre o valor real da carga hidráulica e o valor simulado dividido pelo valor real, enquanto a segunda (FO2) faz o mesmo, porém utilizando a vazão no tubo e a terceira (FO3) apresenta as duas parcelas anteriores somadas e cada uma com um peso diferente.

Percebe-se que, pelo melhor resultado apresentado pela FO1 em 3 dos 4 grupos, a carga hidráulica teria um peso mais forte nas características desse grupo, que seriam a distância do nó ao reservatório de abastecimento da rede e o nó ser um de extremidade.

Ao contrário, no caso do nó que possui diversos tubos ligados a ele, a FO3 se mostrou melhor, assim, pode-se notar que a carga e a vazão, em conjunto, conseguem ser mais influentes e darem resultados melhores quando assim implementadas.

Ao se analisar as três melhores respostas de cada uma das funções pode-se notar que não existe uma uniformidade de respostas e que um menor valor de função objetivo não necessariamente produz um menor Erro Médio Relativo nas rugosidades da rede, sendo assim

não se vê, a princípio, uma ligação direta ou inversa entre esses dois fatores. Pode-se inferir previamente, nesse caso, que a função objetivo tem um papel importante nas calibrações, mas sozinha ela não consegue traduzir as melhores respostas.

É de se ressaltar, também, que o EMR apresentado para as rugosidades se encontra bem superior aos erros dos demais parâmetros, calculados a partir da rugosidade (cargas e vazões permanentes e transientes), principalmente em relação às cargas hidráulicas permanentes, onde os erros são bem menores.

Assim, pode ressaltar que variações maiores nos valores da rugosidade não produzem grandes variações nesses outros parâmetros, principalmente nos transientes onde se percebeu sempre resultados mais próximos dos reais, excetuando-se um caso ou outro.

Novas ideias surgem ao decorrer do trabalho, que têm sempre intenções de melhorar a qualidade dos resultados obtidos e de aperfeiçoar o processo, sendo assim algumas proposições de futuros trabalhos se mostram necessárias para que ocorra o desenvolvimento do tema.

Nesse trabalho se estudou a influência que a posição do nó na rede teria juntamente com a função objetivo de calibração na obtenção de resultados mais próximos aos reais, porém algo se notou, que um nó possui mais de uma seção, logo seria interessante que ocorresse um estudo para ver se as diversas seções de um mesmo nó produzem diferentes soluções e como essas diferenças podem ser usadas para a melhoria do conhecimento no assunto.

No tocante ao algoritmo genético em si, propõe-se a utilização de uma população inicial com mais indivíduos, além de mais gerações que possam permitir uma busca de respostas em um banco maior de possibilidades, como também um estudo dos próprios parâmetros do AG.

Aqui se utilizou três diferentes funções objetivo, porém sabe-se que o universo de funções é superamplo e que as que aqui foram estudadas não representam todo esse universo, sendo assim sugere-se a investigação de novas funções, podendo-se até partir da que apresentou melhores resultados nesse trabalho, a FO1.

Em relação às redes utilizadas, as duas são redes hipotéticas que tentam representar redes reais, porém sabe-se que existe uma limitação nessa representação, importante, claro, para a simplificação do estudo, porém se faz, já, necessário um estudo mais completo utilizando redes reais e todas as particularidades que as acompanham.

Viu-se aqui que grandes variações de valores de rugosidade, que produzem erros médios relativos significantes quando comparados aos reais, em muitos dos casos não se transmitem em erros de grande importância nos parâmetros com eles calculados, logo se faz

necessário aplicar estudos semelhantes utilizando tanto outros parâmetros a serem calculados, como também a serem relacionados com aqueles calculados, visando abranger o universo de possibilidades e oportunidades que uma rede de distribuição oferece.

Indica-se, também, a utilização de outros nós nas redes para se verificar o comportamento em outras condições da calibração e se ocorrem resultados parecidos com os aqui encontrados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A B. **Regimes Hidráulicos Transitórios em Conduitas Elevatórias**. 1981. Tese (Doutorado), IST, Lisboa, 1981.
- ANDRADE, Paula Nobre de. **Estudo comparativo da calibração de rugosidades em redes de distribuição de água submetidas a regimes de escoamento transiente rápido e lento**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**. 2003. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - procedimentos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 23 p.
- AWAD, H. KAWAMURA, A. JINNO, K. *Implicit calibration of water distribution networks using SCE-UA*. Fukuoka: [s. n.], [20--].
- BARBOSA, M. P. R. **Modelagem Computacional de Chaminés de Equilíbrio e Tanques de Alimentação Unidirecional Como Dispositivos Atenuadores do Golpe de Aríete em Adutoras**. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 431 p.
- CHAUDHRY, M. H. - *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 2ª edição, 1987.
- CHAUDHRY, M. H. *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostand Reinhold Company, 3ª Edição, New York, 2014.
- CIENIAWSKI, S. E., EHEART, J. W., RANJITHAN, S. – *Using genetic algorithms to solve a multiobjective groundwater monitoring problem*. **Water Resources Research**, v. 31, n.2, p. 399-409, 1995.
- COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. **Sanit. Ambient.** [online]. 2010, vol.15, n.2, pp.187-196. ISSN 1413-4152.
- COVAS, D; RAMOS, H. *Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis*. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, [s. L.], v. 136, n. 2, p.248-257, mar. 2010.
- CUNHA, A P da et al. CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDRÁULICO DE REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA VIA MODELO INVERSO. **Reec - Revista Eletrônica de**

Engenharia Civil, [S.l.], v. 10, n. 1, p.36-49, 25 jul. 2015. Universidade Federal de Goiás.
<http://dx.doi.org/10.5216/reec.v10i1.33076>.

DISKIN, M H; SIMON, E. *A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models*. **Journal Of Hydrology**, Amsterdam, v. 34, n. 1-2, p.129-149, jul. 1997.

DO, N C. et al. *Calibration of Water Demand Multipliers in Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms*. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, [S.l.], v. 142, n. 11, p.1-13, nov. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE).
[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000691](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000691).

FERREIRA, I R D. **Calibração De Rugosidade De Tubos De Redes Hidráulicas Com Variação De Demanda Utilizando Algoritmos Genéticos E Dados De Regime Transiente**. 2016. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

FUENTES, D A; GALVIS, L F C; VALDERRAMA, J G S. *Hydraulic transients with genetic algorithms used for leakage detection in real water distribution networks*. In: **PIPELINES 2006: SERVICE TO THE OWNER**, 2006, Chicago. **Proceedings...** . Chicago: Asce, 2006. p. 1 - 9.

GALVÃO, C. O. et al. **Sistemas inteligentes - aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Volume 7, Porto Alegre, 1999.

GAMBALE, S R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água**. Dissertação (Mestrado). – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GOKTAS, R K; A AKSOY,. *The impact of objectif function formulations on the optimal calibration of QUAL2E*. In: **IMPACTS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE**, 2005, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.]: Ewri, 2005.

GOKTAS, R K; A AKSOY. *Calibration and verification of QUAL2E using genetic algorithms optimization*. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, [S. l.], v. 133, n. 2, p.126-136, mar. 2007.

GOULART, T. D. de C. **Estudos de aprimoramento de algoritmo de calibração e aplicação em rede de distribuição de água de Cambuí (MG)**. 2015. 197 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, 2015.

HALLIWELL, A. R.. *Velocity of a Water-Hammer Wave in an Elastic Pipe*. **Journal Of The Hydraulics Division**, [s.l.], v. 89, n. 4, p.1-21, 1963.

HIDRÁULICA aplicada. [20--], 38 p. Disponível em:
<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAQMYAH/apost-hidraulica-final> Acesso em: 04 abril 2019.

KADU, M S; GUPTA, R; BHAVE, P B. *Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space*. **Journal Of Water Resources Planning And**

Management, [S. l.], v. 134, n. 2, p.147-160, mar. 2008.

KOELLE, E. **Transientes hidráulicos em instalações de condutos forçados, aplicações em Engenharia**. Apostila da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1983.

KONDAGESKI, J H. **Calibração de modelo de qualidade da água para rio utilizando algoritmo genético**. Dissertação (Mestrado). – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

KOPPEL, T; A VASSILJEV,. *Calibration of water distribution network for BWCN*. In: *WATER DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS 2010*, Tucson. **Proceedings...** . Tucson: Asce, 2012. p. 1599 - 1609.

LACERDA, E G M; CARVALHO, A C P L F e. Introdução aos algoritmos genéticos. In: GALVÃO, C de O; VALENÇA, M J S (Org.). **Sistemas Inteligentes**. Porto Alegre: ABRH, 1999. p. 99-150.

LANSEY, K E; BASNET, C. *Parameter estimation for water distribution networks*. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, [S.l.], v. 117, n. 1, p.126-144, fev. 1991.

LANSEY, K E et al. Calibration assessment and data collection for water distribution networks. *Journal Of Hydraulic Engineering*, [S. l.], v. 127, n. 4, p.270-279, abr. 2001.

LESSA, R. C. **Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Água**. 1984. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1984.

LIONG, S; CHAN, W T; SHREERAM, J. *Peak-flow forecasting with genetic algorithm and SWMM*. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [S. l.], v. 121, n. 8, p.613-617, ago. 1995.

MAIER, H R et al. *Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Current status, research challenges and future directions*. **Environmental Modelling & Software**, [S. l.], v. 62, n. 1, p.271-299, dez. 2014.

MARCHI, A et al. *Methodology for Comparing Evolutionary Algorithms for Optimization of Water Distribution Systems*. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, [S.l.], v. 140, n. 1, p.22-31, jan. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000321](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000321).

MARTIN, D. W.; PETERS, G. *The application of Newton's method to network analysis by digital computer*. **Journal of Institute of Water Engineers**, v17, n,2, p. 115-129, 1963.

MOTA, H J S da. **Dimensionamento econômico de redes de distribuição de água aplicando algoritmo genético**. 2007. 267 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

NASIRIAN, A; MAGHREBI, M F.; YAZDANI, S. *Leakage Detection in Water Distribution Network Based on a New Heuristic Genetic Algorithm Model*. **Journal Of Water Resource And Protection**, [S.l.], v. 05, n. 03, p.294-303, 2013. Scientific Research Publishing, Inc.,

<http://dx.doi.org/10.4236/jwarmp.2013.53030>

NEVES, C.L. **Calibração de parâmetros de modelos hidráulicos de redes de distribuição de água para estudos de operação de rede.** 2007. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília. Brasília, 2007.

ORMSBEE, L E. *Implicit network calibration.* **Journal Of Water Resources Planning And Management**, [S. l.], v. 115, n. 2, p.243-257, mar. 1989.

ORMSBEE, L E; LINGIREDDY, S. *Calibration of hydraulic network models.* **Journal Of The American Water Works Association**, [S. l.], v. 89, n. 2, p.42-50, fev. 1997.

PARK, S. Y.; CHOI, J. H.; WANG, S.; Park, S. S. *Design of a water quality monitoring network in a large river system using the genetic algorithm.* **Ecological Modelling**, v. 199, n. 3, p. 289 - 297, dez. 2006.almei

PORTO, R de M. **Hidráulica Básica.** 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519 p.

ROCHA, V. A. G. M. **Avaliação de calibração de redes hidráulicas usando o método interativo do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA) aplicado a escoamento transiente.** Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RITZEL, B. J., EHEART, J. W., RANJITHAN, S. – *Using genetic algorithms to solve a multibjective groundwater pollution containment problem.* **Water Resources Research**, v. 30, n. 5, p. 1589-603,1994.

SALVINO, M M; CARVALHO, Paulo Sergio Oliveira de; GOMES, Heber Pimentel. Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.l.], v. 20, n. 3, p.503-512, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522015020000099484>.

SANTOS, A. C. N. **Estudo de calibração de uma rede de distribuição de água de Itajubá-MG utilizando Algoritmos Genéticos.** 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010.

SANTOS, R. M. N. **Modelagem Computacional do Golpe de Ariete em Adutoras.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

SAVIC, D. A., WALTERS, G.A. *Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks.* **Journal of Waters Resources Planning and Management**, v. 123, n. 2, p. 67-77, Mar/Apr, 1997.

CHAUDHRY, M. Hanif. - Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 2ª edição,1987.

SHINMA, T A; REIS, L F R. *Multiobjective automatic calibration of the Storm Water Management Model (SWMM) using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II).* In: **WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2011: BEARING**

KNOWLEDGE FOR SUSTAINABILITY, -, 2011, Palm Springs. **Proceedings...** [S. l.]: Asce, 2011. p. 598 - 607.

SILVA, A. C. A. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos**. 2006. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

SIMPSON, A. R., DANDY, G. C., MURPHY, L. J. – *Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization*. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 4, p. 423-443, 1994.

SIMPSON, A., VÍTKOVSKY, J., LAMBERT, M. – *Transients for calibration of pipe roughnesses using genetic algorithms*. *8th International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems*. BHR Groups. **Publications** n. 39, p. 587-597, 2000.

SCHAETZEN, W B F de. **Optimal Calibration and Sampling Design for Hydraulic Network Models**. 2000. 276 f. Tese (Doutorado) - PhD, i, Exeter, 2000.

SOARES, A K; COVAS, D I C; REIS, L F R. *Leak detection by inverse transient analysis in an experimental PVC pipe system*. **Journal Of Hydroinformatics**, [S. l.], v. 13, n. 2, p.153-166, 2011.

STREETER, V L., WYLIE, E B **Fluid Transients**. McGrawHill Editora, 1978.

SWAMEE, P K. *Design of submarine oil pipeline*. **Journal of transportation Engineering**, New York, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

TABESH, M.; JAMASB, M.; MOEINI, R.. Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses. **Urban Water Journal**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.93-102, abr. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062x.2010.548525>.

VIEIRA, P C dos S; SILVA, G N. Algoritmos genéticos para otimização de custos de redes de distribuição de águas com critérios de projeto e o método de newton para as equações de fluxo. **Ciência & Engenharia**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.69-79, 12 jan. 2018. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/19834071.v26.n1.2017.38999>.

VITKOVSKÝ, J P; SIMPSON, A R; LAMBERT, M F. *Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms*. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, [S. l.], v. 126, n. 4, p.262-265, ago. 2000.

WALSKI, T. M.. technique for calibrating network models. **Journal of Water Resources planning and Management**, v. 109, n. 4, p. 306-372, Oct. 1983.

WOOD, D. J.; CHARLES, C. O. A. Hydraulic network analysis using linear theory. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 98, n.HY7, p.1157-1170, Julho, 1972.

WU, Z Y *et al.* *Calibrating water distribution model via genetic algorithms*. In: AWWA IMTECH CONFERENCE, -, 2002, Kansas City. **Proceedings...** . Kansas City: 2002.

ZAHED FILHO, K. **Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água**. São Paulo. 135p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil, 1990.