



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

DAVID GOMES FERNANDES

**ANÁLISE DO IMPACTO DA CONDIÇÃO DE COURANT NO CÁLCULO DA
RUGOSIDADE EM REDES HIDRÁULICAS UTILIZANDO ALGORITMO
GENÉTICO (AG) E O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO (MTI)**

FORTALEZA

2021

DAVID GOMES FERNANDES

ANÁLISE DO IMPACTO DA CONDIÇÃO DE COURANT NO CÁLCULO DA
RUGOSIDADE EM REDES HIDRÁULICAS UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO
(AG) E O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO (MTI)

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

2021

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)

- F399a Fernandes, David Gomes.
Análise do impacto da condição de Courant no cálculo da rugosidade em redes hidráulicas utilizando algoritmo genético (AG) e o método transiente inverso (MTI) / David Gomes Fernandes. – 2021.
148 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.
1. Redes de distribuição. 2. Transiente hidráulico. 3. Algoritmo genético. 4. Condição de courant. 5. Método transiente inverso. I. Título.

CDD 627

DAVID GOMES FERNANDES

ANÁLISE DO IMPACTO DA CONDIÇÃO DE COURANT NO CÁLCULO DA
RUGOSIDADE EM REDES HIDRÁULICAS UTILIZANDO ALGORÍTMO GENÉTICO
(AG) E O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO (MTI)

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)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio durante toda a vida, se mostrarem sempre preocupados e dispostos a me ajudar e criarem condições para chegar até aqui.

Ao meu orientador Prof. Dr. Kenedy, por se mostrar prestativo e atencioso e ter me aceitado como orientando.

À minha namorada e melhor amiga Beatriz Maia pela companhia, descontrações e apoio de todas as horas.

Aos meus grandes amigos Márcio, Renê, Jânio, Henrique e Mika pela força e companhia durante os momentos difíceis de pandemia.

A todos companheiros que conheci durante a jornada do mestrado.

RESUMO

A condição de Courant é muito utilizada nos cálculos de transiente hidráulico para garantir estabilidade ao método de cálculo. Entretanto, para um cálculo implícito e iterativo, essa influência pode ser irrisória. Neste trabalho, calculou-se a rugosidade em duas redes de distribuição de água previamente estabelecida de duas maneiras: respeitando e não respeitando a condição de Courant, de forma a verificar seu impacto. Estas redes possuem características e tamanhos diferentes, de forma que possa se avaliar o impacto causado por essas mudanças no resultado final da simulação. Para isso utilizou-se um software de cálculo de transiente hidráulico utilizando Método Transiente Inverso em conjunto com Algoritmo Genético (AG) em sua configuração real para otimização. As características do algoritmo genético, como mutação, elitismo e cruzamento, são definidas através de testes em uma versão menor e com menos iterações do software utilizado para o cálculo final das rugosidades. O resultado do processo implícito é comparado com um valor observado de rugosidade, de forma a determinar a eficiência do método baseando-se na comparação da função objetivo. A rugosidade obtida também é utilizada para cálculos de novas cargas hidráulicas e vazões nos regimes permanente e transiente. Esses valores também são comparados a cargas e vazões anteriormente calculadas com os valores observados de rugosidade.

Palavras-chave: Redes de distribuição. Transiente hidráulico. Algoritmo genético. Condição de Courant. Rugosidade. Método Transiente Inverso.

ABSTRACT

The Courant condition is widely used in hydraulic transient calculations to guarantee stability to the calculation method. However, for an implicit and iterative calculation, this influence can be negligible. In this work, we calculated the roughness in two water distribution networks previously established in two ways: respecting and not respecting the Courant condition, in order to verify its impact. These networks have different characteristics and sizes so the impact caused by these changes in the final result of the simulation can be evaluated. For this, we use a hydraulic transient calculation software using Transient Inverse Method and Genetic Algorithm (AG) in its real configuration for optimization. The characteristics of the genetic algorithm, such as mutation, elitism and crossover, are defined through tests in a smaller version and with fewer iterations of the software used for the final roughness calculation. The result of the implicit process is compared with an observed roughness value, in order to determine the efficiency of the method based on the comparison of the objective function. The roughness obtained is also used for calculating new hydraulic heads and flow rates in both permanent and transient regimes. These values are also compared to heads and flows previously calculated with the observed values of roughness.

Keywords: Distribution networks. Hydraulic transient. Genetic Algorithm. Courant condition. Roughness. Transient Inverse Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linhas características no plano (x, t).....	28
Figura 2 - Sistema de tubos	28
Figura 3 - Perturbação com término a montante	29
Figura 4 - Perturbação a montante e a jusante.....	29
Figura 5 - Malha das linhas características.....	32
Figura 6 - Esquema de reservatório a montante	32
Figura 7 - Esquema de nó de consumo ou demanda	34
Figura 8 - Esquema de válvula a jusante	35
Figura 9 - Rede ramificada	40
Figura 10 - Rede malhada.....	40
Figura 11- Crossover em configuração binária	48
Figura 12 - Programa P1.....	57
Figura 13 - Programa P2.....	58
Figura 14 - Programa P3.....	59
Figura 15 - Rede 1	62
Figura 7 - Rede 2	62
Figura 17 - Evolução da função objetivo para os casos com celeridade fictícia na rede 1	69
Figura 18 - Rugosidades observadas e calculadas para celeridade fictícia na rede 1.....	69
Figura 19 - Erros relativos da rugosidade para celeridade fictícia na rede 1.....	70
Figura 20 – Novas cargas em regime permanente da celeridade fictícia na rede 1.....	71
Figura 21 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade fictícia da rede 1	72
Figura 22 – Novas cargas hidráulicas transiente no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 1	72
Figura 23 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 1	73
Figura 24 – Novas vazões em regime permanente da celeridade fictícia na rede 1	73
Figura 25 – Erro relativo das novas vazões permanentes da celeridade fictícia na rede 1	74
Figura 26 – Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade fictícia na rede 1	74
Figura 27 – Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade fictícia na rede 1.....	75
Figura 28 - Evolução da função objetivo para os casos de celeridade real na rede 1.....	77
Figura 29 - Rugosidades observadas e calculadas para celeridade real na rede 1.....	77

Figura 30 - Erros relativos da rugosidade para celeridade real na rede 1	78
Figura 31 – Novas cargas em regime permanente da celeridade real na rede 1	79
Figura 32 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade real da rede 1	80
Figura 33 – Novas cargas hidráulicas em regime transiente no nó monitorado para celeridade real na rede 1.....	80
Figura 34 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade real na rede 1.....	81
Figura 35 – Novas vazões em regime permanente da celeridade real na rede 1	81
Figura 36 - Erro relativo das novas vazões em regime permanente da celeridade real na rede 1	82
Figura 37 – Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade fictícia na rede 1	82
Figura 38 - Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade real na rede 1.....	83
Figura 39 - Evolução da função objetivo para os casos 3 e 6 da rede 1	85
Figura 40 - Rugosidade absoluta para os casos 3 e 6 da rede 1.....	85
Figura 41 - Erro relativo na rugosidade para os casos 3 e 6 na rede 1	86
Figura 42 - Erro relativo na carga em regime permanente na rede 1 para casos 3 e 6.....	87
Figura 43 - Erro relativo na vazão em regime permanente para casos 3 e 6 na rede 1	88
Figura 44 - Evolução da função objetivo para os casos com celeridade fictícia na rede 2	91
Figura 45 - Rugosidades observadas e calculadas para celeridade fictícia na rede 2.....	92
Figura 46 - Erros relativos na rugosidade para os casos de celeridade fictícia na rede 2.....	92
Figura 47 - Novas cargas em regime permanente da celeridade fictícia na rede 2	93
Figura 48 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade fictícia da rede 2	94
Figura 49 – Novas cargas hidráulicas transiente no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 2	94
Figura 50 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 2	95
Figura 51 – Novas vazões em regime permanente da celeridade fictícia na rede 2.....	95
Figura 52 – Erro relativo das novas vazões permanentes da celeridade fictícia na rede 2.....	96
Figura 53 – Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade fictícia na rede 2	96
Figura 54 – Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade fictícia na rede 2.....	97

Figura 55 - Evolução da função objetivo para os casos com celeridade real na rede 2	99
Figura 56 - Rugosidades observadas e calculadas para os casos de celeridade real na rede 2	100
Figura 57 - Erros relativos na rugosidade para os casos de celeridade real na rede 2.....	100
Figura 58 - Novas cargas em regime permanente da celeridade real na rede 2	101
Figura 59 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade real da rede 2	102
Figura 60 – Novas cargas hidráulicas transiente no nó monitorado para celeridade real na rede 2	102
Figura 61 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade real na rede 2.....	103
Figura 62 – Novas vazões em regime permanente da celeridade real na rede 2	103
Figura 63 – Erro relativo das novas vazões permanentes da celeridade real na rede 2.....	104
Figura 64 – Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade real na rede 2	104
Figura 65 – Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade real na rede 2.....	105
Figura 66 - Evolução da função objetivo para os casos 3 e 4 na rede 2	107
Figura 67 - Rugosidades observadas e calculadas para casos 3 e 4 da rede 2.....	108
Figura 68 - Erros relativos na rugosidade para casos 3 e 4 na rede 2.....	108
Figura 69 - Erro relativo na carga em regime permanente para casos 3 e 4 na rede 2	109
Figura 70 - Erro relativo na vazão em regime permanente para casos 3 e 4 na rede 2	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de mutação, elitismo e cruzamento.....	60
Tabela 2 - Dados do algoritmo	61
Tabela 3 - Nós monitorados e variações de vazão de demanda.....	63
Tabela 4 - Dados da rede 1	63
Tabela 5 - Dados da rede 2	63
Tabela 6 - Número de divisões dos tubos	64
Tabela 7 - Vazões e cargas permanentes da rede 1	65
Tabela 8 - Vazões e cargas permanentes da rede 2	65
Tabela 9 - Configurações do AG para rede 1.....	66
Tabela 10 - Configurações do AG para rede 2.....	66
Tabela 11 - Identificação das soluções	67
Tabela 12 - Rugosidades calculadas para celeridade fictícia da rede 1	68
Tabela 13 - Erros dos valores de rugosidade nos casos de celeridade fictícia na rede 1	68
Tabela 14 - Funções objetivo dos casos de celeridade fictícia da rede 1.....	68
Tabela 15 - Rugosidades calculadas para celeridade real na rede 1	76
Tabela 16 - Erros na rugosidade nos casos de celeridade real na rede 1	76
Tabela 17 - Funções objetivo dos casos de celeridade real na rede 1.....	76
Tabela 18 - Rugosidades da rede 1	84
Tabela 19 - Erro relativo da rugosidade na rede 1	84
Tabela 20 - Carga em regime permanente observados e estimados para os casos 3 e 6 na rede 1	86
Tabela 21 - Erro médio relativo da carga em regime transiente para casos 3 e 6 na rede 1	87
Tabela 22 - Vazões permanentes observadas e estimadas para casos 3 e 6 na rede 1	88
Tabela 23 - Erro médio relativo da vazão em regime transiente para casos 3 e 6 da rede 1	89
Tabela 24 - Tabela resumo para os casos 3 e 6 da rede 1	89
Tabela 25 - Rugosidades calculadas para celeridade fictícia na rede 2	90
Tabela 26 - Erros na rugosidade nos casos de celeridade fictícia na rede 2	90
Tabela 27 - Funções objetivo dos casos de celeridade fictícia na rede 2.....	91
Tabela 28 - Rugosidades calculadas para casos de celeridade real na rede 2.....	98
Tabela 29 - Erros das rugosidades nos casos de celeridade real na rede 2	98
Tabela 30 - Funções objetivo dos casos de celeridade real na rede 2.....	99
Tabela 31 - Rugosidades da rede 2	106
Tabela 32 - Erros relativos das rugosidades na rede 2.....	106

Tabela 33 - Valores de carga em regime permanente para casos 3 e 4 da rede 2	109
Tabela 34 – Erro médio relativo da carga transiente para casos 3 e 4 da rede 2	110
Tabela 35 - Valores de vazão em regime permanente para casos 3 e 4 da rede 2.....	110
Tabela 36 - Erro médio relativo da vazão em regime transiente nos casos 3 e 4 na rede 2....	111
Tabela 37 - Tabela resumo dos casos 3 e 4 na rede 2	112
Tabela 38 - Cargas e vazões transientes observadas para a rede 1	121
Tabela 39 - Cargas e vazões transientes observadas para a rede 2	129
Tabela 40 - Cargas transientes para as rugosidades calculadas na rede 1	131
Tabela 41 - Vazões transiente utilizando as rugosidades calculadas para a rede 1	138
Tabela 42 - Cargas transientes utilizando rugosidades calculadas para rede 2.....	145
Tabela 43 - Vazões transientes utilizando rugosidades calculadas para a rede 2.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
BLX	<i>Blend Crossover</i>
CFL	Courant – Friedrich – Lewy
EMR	Erro Médio Relativo
ER	Erro Relativo
FO	Função Objetivo
FORTTRAN	<i>IBM Mathematical Formula Translation System</i>
MIGHA	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo

LISTA DE VARIÁVEIS

[M]	Unidade de massa
[L]	Unidade de comprimento
[T]	Unidade de tempo
ν_p	Razão de poisson
a	Celeridade da onda, [LT ⁻¹]
a^*	Celeridade fictícia da onda, [LT ⁻¹]
A_v	Área aberta da válvula, [L ⁻²]
b_{10}	Cromossomo em base decimal fora do intervalo
c	Cromossomo do algoritmo genético dentro do intervalo
C_d	Coefficiente de descarga
C_N	Número de Courant
D	Diâmetro do tubo, [L]
e	Espessura do tubo, [L]
E	Módulo de elasticidade do tubo
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach
f_i	Aptidão do cromossomo
f_k	k-ésimo cromossomo em ordem decrescente de aptidão
F	Somatório das forças do sistema, [MLT ⁻²]
g	Aceleração da gravidade, [LT ⁻²]
H	Carga piezométrica, [L]
$H_{o_{i,N+1}}$	Carga a montante da válvula. [L]
$H_{i,m}$	Carga medida no tempo i
$H_{i,c}$	Carga calculada no tempo i
K	Módulo de elasticidade volumétrica do fluido, [MT ⁻² L ⁻¹]
l	Tamanho da cadeia de cromossomos
m_j	Número de bits necessários em um cromossomo
N	Tamanho de uma população do algoritmo genético
p	Pressão nos tubos, [ML ⁻¹ T ⁻²]
P_1	Cromossomo-pai
P_2	Cromossomo-pai
Q	Vazão volumétrica nos tubos, [L ³]

R_o	Raio externo do tubo, [L]
R_i	Raio interno do tubo, [L]
t	Tempo, [T]
TS	Tempo de duração do transiente
V	Velocidade média do escoamento, [LT ⁻¹]
x	Distância no tubo, [L]
Z	Cota da rede hidráulica
ε	Rugosidade
θ	Ângulo de inclinação dos tubos
φ	Parâmetro adimensional
\vec{A}	Área da seção transversal dos tubos, [L ²]
\forall	Volume do sistema, [L ³]
ρ	Massa específica do fluido, [ML ⁻³]
\vec{V}	Velocidade do escoamento, [LT ⁻¹]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Organização da dissertação	21
2	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivos gerais	22
2.2	Objetivos específicos	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	Escoamento transiente	23
3.2	Método Transiente Inverso	25
3.3	Método das características	26
3.3.1	<i>Condições de contorno</i>	31
3.3.1.1	<i>Reservatório a montante com nível constante</i>	32
3.3.1.2	<i>Nó de demanda</i>	33
3.3.1.3	<i>Válvula a jusante</i>	35
3.4	Celeridade	37
3.5	Estabilidade e a condição de Courant	38
3.6	Redes de distribuição	40
3.7	Calibração	41
3.8	Algoritmo genético	44
3.8.1	<i>Introdução</i>	44
3.8.1.1	<i>Representação binária</i>	45
3.8.1.2	<i>Representação real</i>	46
3.8.2	<i>Seleção</i>	46
3.8.3	<i>Crossover</i>	48
3.8.3.1	<i>Crossover de um corte</i>	48
3.8.3.2	<i>Crossover aritmético</i>	49
3.8.3.3	<i>Crossover BLX-α</i>	50
3.8.3.4	<i>Crossover média</i>	50
3.8.3.5	<i>Crossover heurístico</i>	50
3.8.4	<i>Mutação</i>	50
3.8.5	<i>Elitismo</i>	51
3.8.6	<i>Vantagens do algoritmo genético</i>	51

3.8.7	<i>População inicial</i>	52
3.8.8	<i>Função objetivo</i>	53
3.8.9	<i>Critérios de parada</i>	54
3.8.10	<i>Substituição geracional e Steady-State</i>	54
3.8.11	<i>Restrições</i>	54
3.8.12	<i>Problemas de convergência</i>	55
4	METODOLOGIA	56
4.1	Definição do problema	56
4.2	Resolução do problema	56
4.2.1	<i>Regime permanente</i>	56
4.2.2	<i>Regime transiente</i>	57
4.2.3	<i>Simulação da rugosidade</i>	58
4.3	Características do AG	60
4.4	Dados do problema	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1	Cálculo da rede na condição permanente	65
5.2	Cálculo da rede na condição transiente	66
5.3	Cálculo das características do AG	66
5.4	Cálculo das rugosidades	67
5.4.1	Rede 1	67
5.4.1.1	<i>Celeridade fictícia</i>	67
5.4.1.2	<i>Celeridade real</i>	75
5.4.1.3	<i>Menores funções objetivo</i>	84
5.4.2	Rede 2	89
5.4.2.1	<i>Celeridade fictícia</i>	89
5.4.2.2	<i>Celeridade real</i>	97
5.4.2.3	<i>Menores funções objetivo</i>	106
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
6.1	Cálculo dos regimes permanente e transiente	113
6.2	Características do Algoritmo Genético	113
6.3	Cálculo das rugosidades	114
6.3.1	Rede 1	114
6.3.1.1	<i>Celeridade fictícia</i>	114

6.3.1.2	<i>Celeridade real</i>	114
6.3.1.3	<i>Menores funções objetivo</i>	115
6.3.2	<i>Rede 2</i>	115
6.3.2.1	<i>Celeridade fictícia</i>	115
6.3.2.2	<i>Celeridade real</i>	116
6.3.2.3	<i>Menores funções objetivo</i>	116
6.4	Conclusão	116
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICE A	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A solução de problemas de redes de distribuição de água é de grande importância para a sociedade, por isso sempre têm despertado interesse nos pesquisadores e engenheiros. Se faz necessária a garantia de levar água suficiente para abastecer toda a população sem perder a qualidade e sem gastos desnecessários.

Uma rede de distribuição, que é responsável por esse fluxo de água, é formada por diversos tubos que levam água de um reservatório a vários pontos de demanda, onde parte dessa água é coletada. Nesse sistema estão presentes bombas, válvulas, nós (encontro de dois ou mais trechos de tubos) e outros obstáculos que podem afetar o fluxo, interferindo na vazão de água. Uma vez projetada a rede, de forma que atenda adequadamente à necessidade da população, é preciso pensar em como executar esse planejamento de forma mais econômica possível, evitando assim o desperdício de recursos, incluindo possíveis vazamentos de água, mas de forma que o sistema suporte altas e baixas pressões provenientes do escoamento transiente que se dá ao longo da rede.

O sistema, sem interferências, gera um escoamento permanente onde a vazão é constante e a resolução costuma ser mais simples, com estudos e métodos já bem consolidados sobre esse tema.

A ação de alguns elementos da rede, como válvula e bomba, pode causar um escoamento transiente dentro da rede de distribuição, modificando a vazão de água, causando sobrepressão e/ou subpressão nas tubulações de forma cíclica, o que pode ser considerado um fator crítico na hora do projeto. Segundo Araújo (2003), os pesquisadores se dedicaram muito tempo a desenvolver modelos hidráulicos que calculassem cargas e vazões, mas com o aumento populacional agora obrigava uma otimização dos sistemas. Por isso, essa situação deve ser incluída no cálculo da rede hidráulica de forma que não ocorra um acidente na rede, destruindo parte do projeto e inviabilizando o escoamento.

O escoamento transiente causa a formação de uma onda extremamente rápida dentro do tubo, responsável pela alta variação de pressão causada. Chama-se de celeridade a velocidade com que essa onda viaja dentro do tubo, e ela é utilizada para os cálculos do transiente.

A verificação constante das variáveis do sistema e seu comportamento ao longo do tempo, então, é imprescindível para o bom funcionamento da rede. Deve-se medir

constantemente seus parâmetros e refazer simulações com objetivo de comparação e identificar possíveis problemas que possam estar presentes, tais como o grande aumento na rugosidade, interferindo na vazão e entregando menos água que o previsto para a população; vazamentos; tubos destruídos, etc. Segundo Zahed (1990), identificação mais difícil para a reprodução do comportamento hidráulico das redes é a da rugosidade, pois ela tem uma característica dinâmica e exige levantamentos sobre toda a rede.

O cálculo das propriedades das redes hidráulicas como diâmetro, rugosidade, cota, etc. pode ser calculado utilizando os valores de carga ou vazão do sistema em um processo que se denomina cálculo inverso. Segundo Araújo (2003), no problema inverso os parâmetros são tratados como variáveis e são determinados estabelecendo-se especificações de vazão e/ou pressão. Araújo (2003) utilizou o Método Transiente Inverso (MTI) para realizar cálculos dessa natureza. Esse método faz uso do cálculo nas condições permanentes e transientes de um sistema, através de uma propriedade observada, neste caso a rugosidade. Após isso, os valores encontrados de carga são utilizados para calcular a propriedade que foi observada, buscando assim os valores mais próximos possíveis.

Utiliza-se geralmente métodos de otimização para alguns desses cálculos, onde é buscado o valor ótimo de uma função objetivo (FO), máximo ou mínimo, para obter o resultado da simulação como mais próximo possível da realidade, para que possa ser feita a análise correta da situação e se tome a decisão mais plausível. No caso deste trabalho, utilizou-se o método de algoritmo genético (AG).

Para o cálculo de transientes hidráulicos utiliza-se comumente o método das características. Nesse método os tubos são divididos em várias seções e, em cada passo de tempo, as variáveis de cada seção são calculadas levando em consideração as seções vizinhas do passo de tempo anterior, bem como condições de contorno como válvulas e reservatório. Assim é possível calcular as variáveis ao longo de um transiente em um tempo desejado.

Os métodos numéricos, porém, podem não fornecer a estabilidade necessária para o cálculo, dependendo das condições. Para garantir essa estabilidade, utiliza-se o cálculo do número de Courant - uma relação entre o tamanho de seção dos tubos e o passo de tempo da iteração, que será explanada no capítulo 3 - nos problemas de transiente hidráulico, que deve ter valor igual ou inferior a 1.

Quando a condição de Courant não ocorre no método das características de um transiente hidráulico, modifica-se os parâmetros para que essa condição seja respeitada, através do cálculo de uma celeridade fictícia.

É debatível, porém, o impacto dessa estabilidade em um problema de transiente

hidráulico em redes de distribuição. Então é preciso uma análise do verdadeiro impacto da condição de Courant nos resultados dos cálculos e a verificação do tamanho da diferença causada por utilizar ou não a celeridade fictícia nos cálculos de problemas hidráulicos em redes de distribuição, notadamente na identificação da rugosidade.

1.2 Organização da dissertação

No capítulo 1 está presente uma introdução ao tema do estudo, contendo contextualização, problematização e justificativa do tema.

O capítulo 2 mostra os objetivos gerais e específicos do trabalho.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica e equacionamentos sobre diversos temas relacionados ao trabalho, como escoamento transiente, Método Transiente Inverso, método das características, celeridade, estabilidade e condição de Courant, redes de distribuição, calibração e algoritmo genético e suas diversas características.

O capítulo 4 apresenta a metodologia do trabalho com suas principais ferramentas, características do problema, dados e decisões tomadas.

O capítulo 5 apresenta os resultados do trabalho organizados em tabelas e gráficos para as diferentes situações do problema.

No capítulo 6 estão as discussões e conclusões a respeito dos resultados do trabalho, bem como uma análise e sugestões para aperfeiçoamento em trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o verdadeiro impacto da condição de Courant, verificando as diferenças nos resultados de calibração de redes de distribuição de água com e sem a consideração de celeridade fictícia para os cálculos. Para isso, é utilizado um programa de cálculo implícito, ou de otimização, utilizando algoritmo genético na sua forma real, além do método transiente inverso.

A calibração é feita em cima da rugosidade do sistema tanto utilizando a celeridade fictícia, quanto ignorando a condição de Courant e utilizando a celeridade real. Ao fim, os valores obtidos de rugosidade são comparados para que seja feita a análise sobre a estabilidade do método: se a possível desobediência à condição de Courant foi impactante ou não.

Será feita, portanto, a verificação do impacto da não utilização da condição de Courant e, conseqüentemente, da celeridade fictícia no cálculo de calibração da rugosidade nos tubos de redes hidráulicas utilizando um software de otimização utilizando AG e os cálculos de transiente hidráulico, comparando com valores de rugosidade observados para definir o erro do método.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar o desempenho do método de otimização no cálculo da rugosidade em redes hidráulicas.
 - Calcular o regime permanente de uma rede de abastecimento.
 - Verificar o cálculo de cargas e vazões em transiente hidráulico em redes.
 - Avaliar as diferenças de resultado causada pelas celeridades.
 - Discutir os motivos pelos quais a condição de Courant poderia ser desrespeitada no cálculo de transiente em redes hidráulicas.
- Definir os melhores parâmetros a serem usados no método de otimização para cada caso.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Escoamento Transiente

Segundo Chaudhry (2014), escoamento transiente é um estágio intermediário de fluxo no qual as condições de fluxo mudam de um estágio estacionário para outro estágio estacionário, que são tipos de fluxo que não estão sujeitos a mudança de propriedades ao longo do tempo em um determinado ponto.

O estudo de escoamentos transientes em condutos fechados é importante devido ao risco que eles podem trazer às tubulações, podendo trazer danos às estruturas, impedindo o bom funcionamento do fluxo, e conseqüentemente levando prejuízo financeiro ao responsável pelos tubos.

O escoamento transiente é causado principalmente por mudanças nas condições do fluxo, como por exemplo:

- Paradas ou partidas de bombas;
- Abertura ou fechamento abrupto de válvulas;
- Paradas ou partidas em turbinas.
- Enchimento e esvaziamento de adutoras e linhas de recalque de água e esgoto

Esses eventos podem ocasionar um escoamento transiente, resultando em ondas de alta e baixa pressão ao longo dos tubos. Essas ondas, com velocidades de propagação extremamente altas, podem causar danos permanentes devido aos ciclos de altas e baixas pressões.

Segundo Chaudhry (2014), Newton, Lagrange e Euler, nos séculos XVII e XVIII já realizavam estudos a respeito da propagação de onda em canais de água. Em 1808, Young investigou a propagação de ondas de pressão em tubos.

Ainda de acordo com Chaudhry (2014), Weber, em 1866, conduziu experimentos para determinar a velocidade de ondas de pressão em um fluido incompressível em tubos elásticos. Michaud (1878) foi o primeiro a estudar o fenômeno de golpe de aríete, apresentando o uso de válvulas de segurança e câmaras de ar. Gromeka (1883), incluiu pela primeira vez perdas por atrito nas análises de escoamento transiente.

Ainda segundo Chaudhry (2014); Weston (1885) e Carpenter (1893-1894) tentaram, sem sucesso, estabelecer uma relação entre a redução de velocidade em escoamentos em tubos e o aumento de pressão.

Em 1897, Joukowski conduziu experimentos em tubos com 7,62 km de extensão e 50 mm de diâmetro; 305 m de extensão e 101,5 mm de diâmetro; e 305 m de extensão e 152,5 mm de diâmetro para desenvolver uma fórmula para a velocidade de onda, considerando a elasticidade tanto do fluido quanto das paredes do tubo.

Em 1930, métodos gráficos desenvolvidos por Schnyder-Bergeron permitiram considerar com mais confiabilidade as perdas de carga em problemas de escoamento transiente.

O fluxo transiente em condutos fechados é descrito por duas equações básicas: equação de conservação da massa 1 e momento 2, que são apresentadas em suas formas integrais:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot d\vec{A}) = 0 \quad (1)$$

$$F = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \vec{V} \rho dV + \int_{SC} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot d\vec{A}) \quad (2)$$

onde ρ [ML⁻³] é a massa específica do fluido, V [L³] é o volume do sistema, \vec{V} [LT⁻¹] é a velocidade do escoamento no tubo, \vec{A} [L²] é a seção transversal do tubo, t [T] é o tempo e F [MLT⁻²] é o somatório das forças do sistema.

Aplicadas em um conduto fechado, essas equações tornam-se, respectivamente, as equações diferenciais da continuidade 3 e do momento 4:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (4)$$

onde p [ML⁻¹T⁻²] é a pressão nos tubos, x [L] é a distância de um ponto a outro, a [LT⁻¹] é a celeridade (velocidade da onda de pressão), g [LT⁻²] é a aceleração da gravidade, D [L] é o diâmetro do tubo, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach e θ é o ângulo de inclinação dos tubos.

Aplicando as condições de que os termos $V \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)$ e $V \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)$ são muito menores que os demais termos, e que a inclinação θ do sistema é muito pequeno, obtém-se as equações 5 e 6 para a equação da continuidade e do momento, respectivamente.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (6)$$

onde H [L] é a carga piezométrica e Q [L^3T^{-1}] é a vazão volumétrica no tubo.

Por se tratarem de equações diferenciais parciais, as equações 5 e 6 encontradas para resolver um problema de escoamento transiente não podem ser facilmente resolvidas analiticamente. Para isso, é preciso utilizar algum método numérico para resolvê-las.

Segundo Wylie e Streeter (1993), diferentes métodos foram desenvolvidos para resolver as equações de transiente em tubos, cada um com seus meios e diferentes considerações teóricas. Alguns deles são: o método aritmético, método gráfico, método das características, algébrico, implícito, elementos finitos e análise linear.

Neste trabalho será utilizado o método das características para resolver as equações de transiente hidráulico em tubos.

3.2 Método Transiente Inverso

Os problemas em redes de distribuição podem ser de duas naturezas: diretos e inversos. Os problemas diretos utilizam as características e parâmetros das redes para o cálculo das cargas e vazões do sistema. Já nos problemas inversos, as cargas hidráulicas ou vazões são conhecidas, mas alguns parâmetros da rede são desconhecidos. Das informações de carga ou vazão é possível descobrir os parâmetros da rede, que neste caso são as variáveis.

De acordo com Araújo (2003), os métodos inversos indiretos utilizam um processo iterativo, onde os parâmetros variam e a simulação continua até que atinjam valores satisfatórios para o problema. Nessa etapa que entra o algoritmo genético, para o caso deste trabalho, definindo a forma com que os parâmetros irão variar. As soluções indiretas são as mais utilizadas devido a sua simplicidade e pelo fato de serem menos sensíveis aos erros de entrada (Araújo, 2003).

Ferreira (2016) utilizou o método transiente inverso para desenvolver um simulador para o golpe de aríete.

Já os métodos diretos, por sua vez, buscam resolver as equações diferenciais, considerando os parâmetros como variáveis dependentes.

No caso deste trabalho, com um método de solução indireto, as cargas em regime transiente de um dos pontos da rede são conhecidas e, através delas, são calculadas as rugosidades de todos os tubos da rede. Para isso, as cargas do problema vão ser calculadas com uma rugosidade conhecida através de um método direto. Esses valores, então, serão utilizados para estimar novas rugosidades que serão comparadas com os valores originais.

3.3 Método das Características

O método das características é um dos métodos numéricos mais utilizados para a solução de problemas que envolvem transientes hidráulicos, permitindo encontrar as soluções para as equações diferenciais parciais 5 e 6 através de uma transformação destas equações em equações diferenciais totais que podem ser integradas. O método das características permite conhecer os valores de vazão e de carga hidráulica ao longo de todo o trecho das tubulações em cada passo de tempo t definido.

Uma série de condições de contorno também se fazem necessária para finalizar a aplicação do método. Uma grande vantagem do método das características, ainda, é mostrar claramente o comportamento e as consequências causadas nas cargas hidráulicas pela onda de pressão no sistema, viajando com celeridade a ao longo dos trechos da tubulação em determinado tempo t . A demonstração das equações do método das características pode ser encontrada em referências como Chaudhry (2014) e Wylie e Streeter (1993).

Reescrevendo as equações 5 e 6, tem-se:

$$L_2 = gA \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (8)$$

Essas equações são combinadas linearmente através de um multiplicador desconhecido λ :

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (9)$$

Substituindo as equações L_1 e L_2 , tem-se:

$$L = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} + \lambda gA \frac{\partial H}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

Reorganizando:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (11)$$

Como a carga H e a vazão Q são funções da posição x e do tempo t , então pode-se escrever as derivadas totais dessas variáveis como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

e

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

Comparando os termos entre parênteses da equação 11 e as equações 12 e 13 pode-se verificar que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \quad (14)$$

Assim,

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (15)$$

Reescrevendo a equação 11 e utilizando as equações 12, 13, 14 e 15, obtém-se:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (16)$$

Para valores de $\frac{dx}{dt} = a$. (17)

De forma semelhante à equação 16, tem-se:

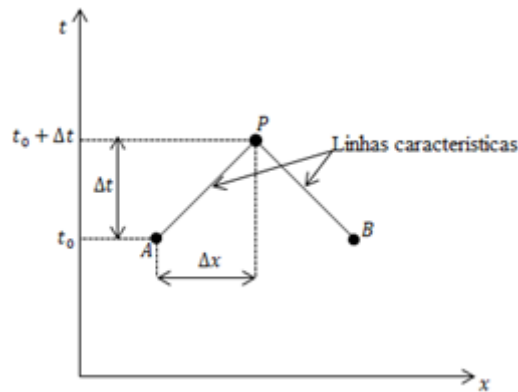
$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (18)$$

Para valores de $\frac{dx}{dt} = -a$ (19)

Nota-se que as equações diferenciais parciais 5 e 6 foram transformadas nas equações 16 e 18, obedecendo as suas respectivas condições 17 e 19, através da eliminação da variável independente x e obtendo equações diferenciais totais na variável independente t . Estas equações são válidas nas retas formadas pelas equações 17 e 19 no plano (x, t) .

As retas formadas pelas equações 17 e 19, com inclinações $\pm a$ são chamadas de linhas características, que mostram o caminho atravessado pela onda de pressão através dos tubos. Na Figura 1 a seguir, um distúrbio no ponto A no tempo t_0 viaja através da linha AP em um tempo Δt para chegar ao ponto P em um tempo $t = t_0 + \Delta t$.

Figura 1 – Linhas características no plano (x, t)



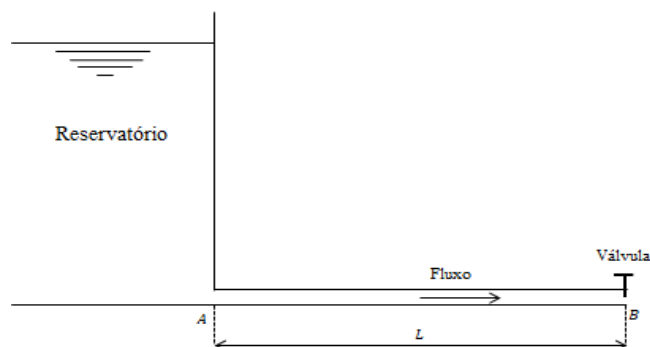
Fonte: Elaborado pelo autor.

As equações 16 e 18 representam a trajetória da onda para jusante e para montante, respectivamente. Elas podem ser retratadas nas retas da Figura 1. A trajetória de A a P corresponde à equação 16, enquanto a trajetória de P a B corresponde à equação 18.

Para entender o significado físico das equações 16 e 18, segundo Chaudhry (2014), considera-se um sistema de tubo com um reservatório a nível constante em $x = 0$ e uma válvula na posição $x = L$ que vai causar o escoamento transiente através do seu fechamento, como na Figura 2.

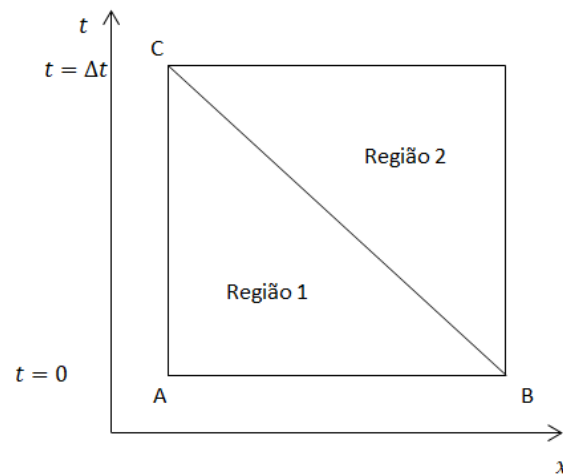
As equações 16 e 18 são válidas ao longo do tubo e é necessário estabelecer condições de contorno nas extremidades dos tubos. O começo do escoamento é estacionário, até que há um fechamento muito rápido da válvula localizada na tubulação, o que reduz o fluxo na válvula a zero, causando um grande aumento de pressão no local. Por causa da pressão maior na válvula do que no restante do tubo, uma onda de pressão viaja a montante pelo caminho formado pela linha BC na figura 3. As duas regiões formadas, acima e abaixo da reta, mostram duas regiões com soluções diferentes. Enquanto a região 1, abaixo da linha, depende apenas das condições iniciais pois ela ocorre em tempo e espaço onde ainda não foi percorrida a onda de pressão, a região 2 depende das condições de contorno causadas pelo fluxo da onda de pressão a montante.

Figura 2 - Sistema de tubos



Fonte: Elaborado pelo autor.

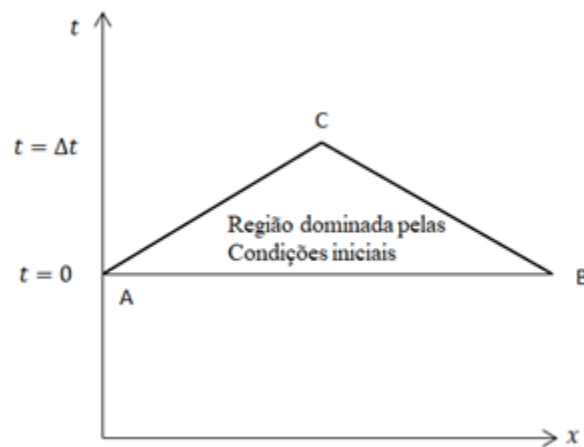
Figura 3 - Perturbação com término a montante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se uma perturbação também for imposta em um ponto A, a figura 4 mostra as novas regiões de soluções, separando as regiões influenciadas pelos escoamentos a jusante, a montante e a região influenciada pelas condições iniciais. Em resumo, as linhas características apresentam o trajeto das perturbações causadas em vários locais no sistema.

Figura 4 - Perturbação a montante e a jusante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na solução do problema, o tubo é dividido em N seções, cada uma com um tamanho Δx . O passo de tempo Δt foi determinado de acordo com as condições do problema, para manter o número de Courant próximo a 1. Com isso, o Δx pode ser determinado de acordo com a equação 20.

$$\Delta x = a\Delta t \quad (20)$$

Para o início dos cálculos é preciso saber as condições iniciais do problema. Na figura 1, esse momento inicial seria representado pelos pontos A e B, em um tempo t_0 . Nesses pontos são conhecidos tanto a vazão Q quanto a carga hidráulica H . Através dessas condições iniciais que é possível determinar estas mesmas variáveis para o ponto P em um tempo $t = t_0 + \Delta t$.

Para o cálculo, inicialmente multiplica-se as equações 16 por dt e aplica-se a integral. Conforme explicado, a equação 16 representa a trajetória de A para P, logo estes pontos são os limites de integração. Obtém-se a equação 21:

$$\frac{a}{gA} \int_A^P dQ + \int_A^P dH + R \int_A^P Q|Q|dt = 0 \quad (21)$$

Por não se conhecer como se dá a variação de Q em função de t , a terceira integral da equação 21, que é o termo do atrito, não é facilmente avaliada. Chaudhry (2014) utiliza uma aproximação de primeira ordem para a resolução da integral, expressa na equação 22, que considera que a vazão Q permanece constante no intervalo de A a P.

$$R \int_A^P Q|Q|dt \cong RQ_A|Q_A|(t_P - t_A) = RQ_A|Q_A| \quad (22)$$

Dessa forma, a equação 21 se torna:

$$B(Q_P - Q_A) + (H_P - H_A) + RQ_A|Q_A| = 0 \quad (23)$$

Onde

$$R = \frac{fa\Delta t}{2gDA^2} \quad (24)$$

Segundo Chaudhry (2014), o termo do atrito da equação 23 é o único termo não-exato, pois foi obtido através de uma aproximação de primeiro grau. Essa aproximação é satisfatória para a maioria dos casos de engenharia. Entretanto, quando o termo de atrito se torna muito grande, pode haver uma instabilidade nos resultados. Para contornar este problema, pode-se adotar menores valores de Δt ou utilizar aproximações de ordens maiores na resolução da integral.

Da mesma forma que foi feito para a equação 16, pode-se fazer para a equação 18. Neste caso, os limites das integrais se tornam B e P, já que esta equação representa o trajeto do ponto B ao ponto P na figura 1. Com a mesma aproximação de primeira ordem para o termo do atrito, obtém-se a equação 24, resolvendo a equação 18:

$$B(Q_P - Q_B) - (H_P - H_B) + RQ_B|Q_B| = 0 \quad (25)$$

As equações 23 e 25 são conhecidas também como C^+ e C^- , respectivamente. Estas equações são as equações características do escoamento transiente em tubos. Pode-se reescrevê-las ainda da seguinte forma:

$$C^+: H_P = C_P - BQ_P \quad (26)$$

$$C^-: H_P = C_A + BQ_P \quad (27)$$

Onde,

$$B = \frac{a}{gA} \quad (28)$$

$$C_P = H_A + BQ_A - R\Delta t Q_A|Q_A| \quad (29)$$

$$C_A = H_B - BQ_B - R\Delta t Q_B|Q_B| \quad (30)$$

Conhecendo C_P e C_A , que dependem dos dados iniciais do instante $t = t_0$ nos pontos A e B, pode-se resolver as equações 26 e 27 e encontrar os valores da carga hidráulica e da vazão presentes no ponto P no instante $t = t_0 + \Delta t$, encontrando os seguintes resultados:

$$H_P = \frac{C_P + C_A}{2} \quad (31)$$

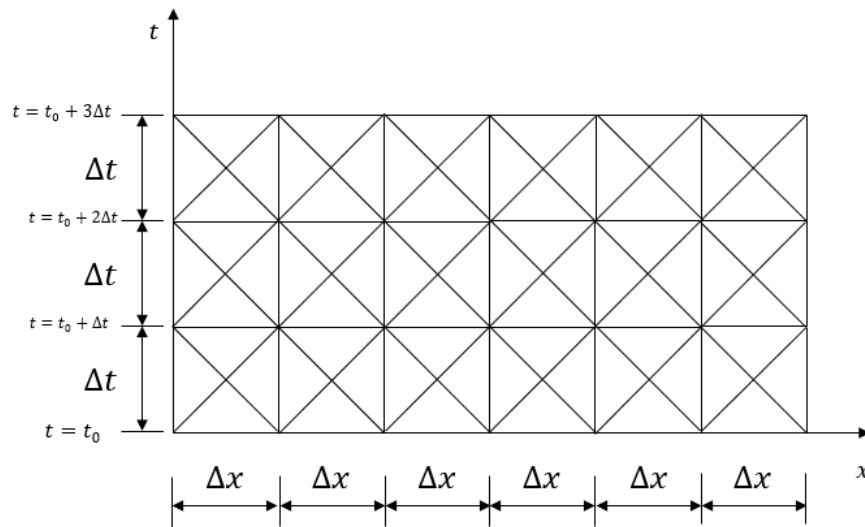
$$Q_P = \frac{C_P - C_A}{2B} \quad (32)$$

Dessa forma, faz-se os cálculos ao longo de todo o tubo em um instante inicial para encontrar os valores das variáveis no passo de tempo seguinte.

3.3.1 Condições de contorno

Como foi dito, são necessárias condições de contorno para possibilitar o cálculo das cargas e vazões nos limites de escoamentos transientes através das equações (29) e (30), já que, nos limites, há a presença apenas da equação C^- a montante e C^+ a jusante, conforme mostra a figura 5, sendo necessária uma segunda equação para resolver o sistema.

Figura 5 - Malha das linhas características



Fonte: Elaborado pelo autor.

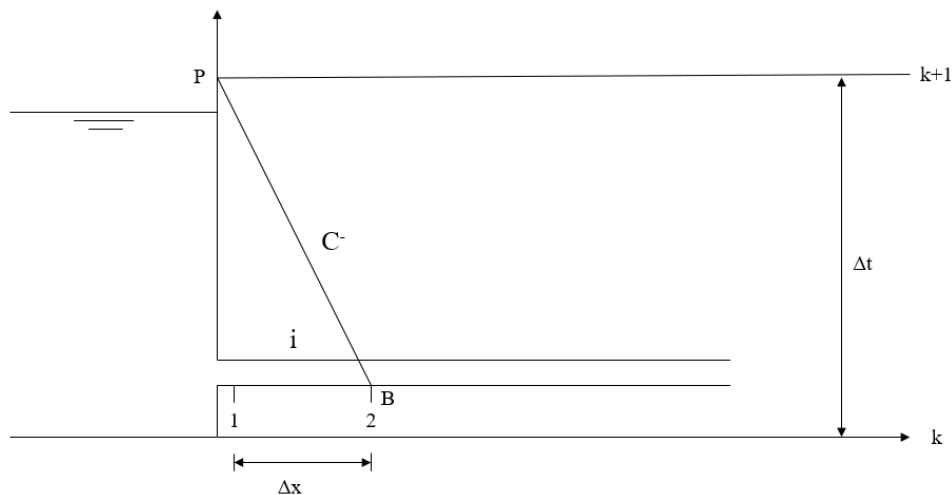
A seguir, são apresentadas as condições de contorno mais comuns em problemas de condutos fechados.

3.3.1.1 Reservatório a Montante com Nível Constante

Na nomenclatura, utiliza-se o índice k para indicar seções no tempo $t = t_0$ e $k + n$ para as seções no n -ésimo passo de tempo. Já os índices 1, 2, ..., n indicam a n -ésima seção do tubo i .

Considera-se o reservatório da figura 6 a seguir:

Figura 6 - Esquema de reservatório a montante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pontos P e B da equação 25 são, respectivamente, os pontos presentes em $(k + 1)_{i,1}$ e $(k)_{i,2}$. Como o nível do reservatório é constante, a carga nos pontos $(k + n)_{i,1}$ é sempre constante igual à carga do reservatório, como mostrado na equação 33.

$$H(k + 1)_{i,1} = H_1 = \text{Constante} \quad (33)$$

Como o ponto P é calculado apenas pela equação C⁻, como mostrado na figura 6, além da condição de contorno do reservatório, não será utilizada a C⁺.

Dessa forma, com os novos índices, a equação C⁻ se torna:

$$C^-: B_i [Q(k + 1)_{i,1} - Q(k)_{i,2}] - [H(k + 1)_{i,1} - H(k)_{i,2}] + R_i Q(k)_{i,2} |Q(k)_{i,2}| = 0 \quad (34)$$

Das equações 33 e 34, obtém-se:

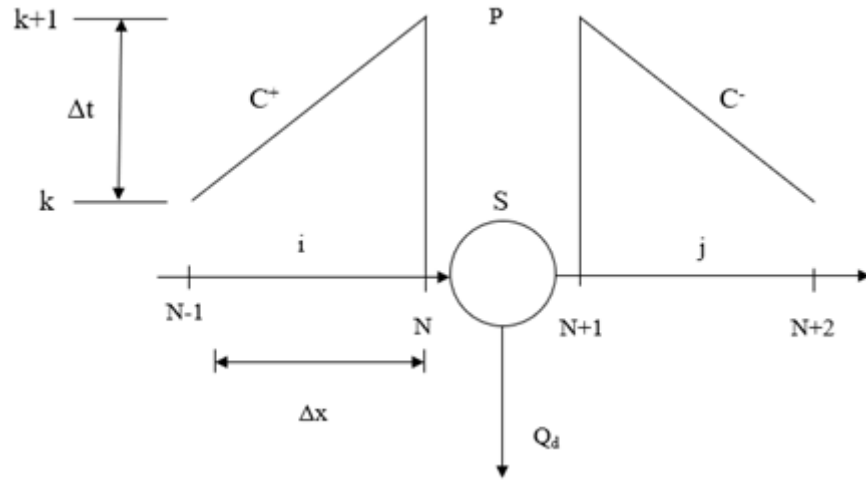
$$Q(k + 1)_{i,1} = \frac{H_1}{B_i} - \frac{H(k)_{i,2}}{B_i} + \frac{(B_i - R_i |Q(k)_{i,2}|)}{B_i} Q(k)_{i,2} \quad (35)$$

3.3.1.2 Nó de Demanda

Outra necessidade de condição de contorno aparece quando tem-se um nó de consumo ou demanda na tubulação. O nó significa uma mudança no sistema pois ele diminui a vazão que circula nos tubos, adicionando outra variável ao equacionamento.

Considerando um nó S, que demanda uma vazão Q_D e está entre duas tubulações representadas pelos índices i e j , que indicam as tubulações a montante e a jusante do nó, respectivamente. O sistema está retratado na figura a seguir, onde os índices $N - 1$ e N representam, respectivamente, os pontos da seção anterior à seção do nó e o ponto imediatamente anterior ao nó, na tubulação do índice i . Enquanto os índices $N + 1$ e $N + 2$ representam, respectivamente, os pontos imediatamente após o nó e um ponto da seção seguinte à seção do nó, na tubulação de índice j .

Figura 7 - Esquema de nó de consumo ou demanda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a equação C^+ (equação 23), reescrita como a equação 36 pode-se obter a característica do ponto P localizado em $(k + 1)_{i,N}$, através do ponto M presente em $(k)_{i,N-1}$. Assim, tem-se:

$$[H(k + 1)_{i,N} - H(k)_{i,N-1}] + B_i[Q(k + 1)_{i,N} - Q(k)_{i,N-1}] + R_i Q(k)_{j,N-1} |Q(k)_{j,N-1}| = 0 \quad (36)$$

Da mesma forma, para a equação C^- (equação 25), que será reescrita levando em conta os pontos P e J, respectivamente nas posições $(k + 1)_{j,N+1}$ e $(k)_{j,N+2}$, obtendo a equação 37 a seguir.

$$-[H(k + 1)_{j,N+1} - H(k)_{j,N+2}] + B_j[Q(k + 1)_{j,N+1} - Q(k)_{j,N+2}] + R_j Q(k)_{j,N+2} |Q(k)_{j,N+2}| = 0 \quad (37)$$

Pela equação da continuidade, a soma das vazões em um ponto deve se nula. Portanto, aplicada ao ponto de demanda S, tem-se:

$$\sum Q(k + 1)_{i,N} - \sum Q(k + 1)_{j,N+1} - Q_D = 0 \quad (38)$$

Já as cargas hidráulicas do ponto P imediatamente antes e depois do nó de demanda são consideradas iguais. Dessa forma:

$$H(k + 1)_{i,N} = H(k + 1)_{j,N+1} = H(k + 1)_m \quad (39)$$

Reorganizando as equações 36 e 37 tem-se, respectivamente:

$$Q(k + 1)_{i,N} = -\frac{H(k+1)_{i,N} + H(k)_{i,N-1} + [B_i - R_i |Q(k)_{i,N-1}|] Q(k)_{i,N-1}}{B_i} \quad (40)$$

$$Q(k+1)_{j,N+1} = \frac{H(k+1)_{j,N+1} + H(k)_{j,N+2} + [B_j - R_j | Q(k)_{j,N+2} |] Q(k)_{j,N+2}}{B_j} \quad (41)$$

Substituindo a equação 39 nas equações 40 e 41 e estas na equação 38, tem-se:

$$H(k+1)_M = B_M \left\{ \frac{\sum H(k)_{i,N-1} + \sum [B_i - R_i | Q(k)_{i,N-1} |] Q(k)_{i,N-1}}{B_i} \right\} + B_M \left\{ \frac{\sum H(k)_{j,N+2} - \sum [B_j - R_j | Q(k)_{j,N+2} |] Q(k)_{j,N+2}}{B_j} - Q_D \right\} \quad (42)$$

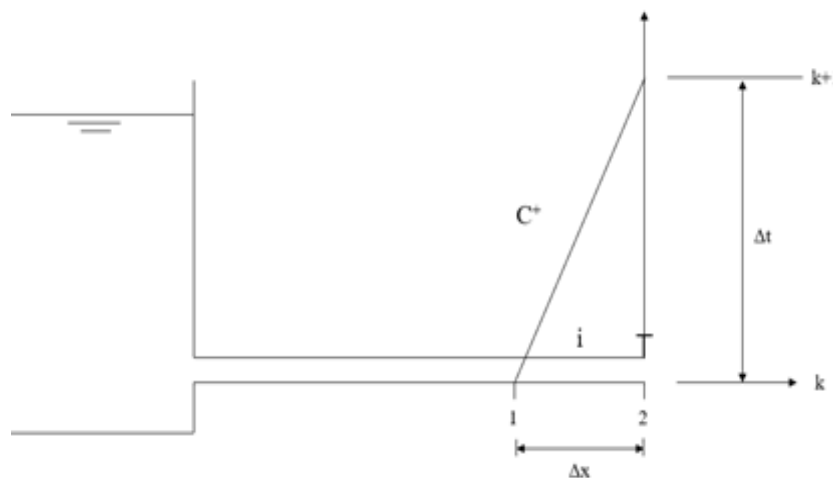
Onde:

$$B_M = \left[\sum \frac{1}{B_i} + \sum \frac{1}{B_j} \right]^{-1} \quad (43)$$

3.3.1.3 Válvula a jusante

A condição de contorno na válvula é uma relação entre a carga e a descarga através dela. Um esquema pode ser visto na figura 8 a seguir.

Figura 8 - Esquema de válvula a jusante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Chaudhry (2014), pode-se escrever, para um fluxo em estado estacionário, a equação 44 como a que descreve o fluxo através de uma válvula.

$$Q_{o,i,N} = (C_d A_v)_o \sqrt{2g H_{o,i,N}} \quad (44)$$

Em que o índice o representa os parâmetros em estado estacionário, C_d é o coeficiente de descarga, $H_{o,i,N+1}$ é a carga a montante da válvula e A_v é a área da válvula que se encontra aberta.

Reescrevendo a equação de forma similar para o estado transiente, tem-se:

$$Q(k+1)_{i,N} = (C_d A_v) \sqrt{2gH(k+1)_{i,N}} \quad (45)$$

Dividindo a equação 45 pela 44 e elevando ambos os lados ao quadrado, tem-se:

$$Q^2(k+1)_{i,N} = \frac{(Q_{o,i,N} \tau)^2}{H_{o,i,N}} H(k+1)_{i,N} \quad (46)$$

Onde:

$$\tau = \frac{(C_d A_v)}{(C_d A_v)_o} \quad (47)$$

Substituindo a equação 26 na equação 46, tem-se:

$$Q^2(k+1)_{i,N} + C_v Q(k+1)_{i,N} - C_{pi} C_v = 0 \quad (48)$$

Onde:

$$C_v = \frac{B(\tau Q_{o,i,N})^2}{(H_{o,i,N})} \quad (49)$$

$$C_{pi} = \frac{H(k)_{i,N-1}}{B_i} + Q(k)_{i,N-1} - \frac{R_i}{B_i} \Delta t Q(k)_{i,N-1} |Q(k)_{i,N-1}| \quad (50)$$

Reorganizando a equação 48:

$$Q(k+1)_{i,N} = 0.5(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{pi}C_v}) \quad (51)$$

Com essa equação, portanto, é possível calcular as incógnitas presentes na válvula. Muitas vezes, as válvulas apresentam uma lei de fechamento que nos permite calcular o valor de τ variando com o espaço de tempo.

Vale lembrar que existem muitas outras situações que pedem mais condições de contorno para que seja possível o cálculo no escoamento transiente. Estas apresentadas, entretanto, refletem nas situações que serão apresentadas aqui neste trabalho.

3.4 Celeridade

A celeridade corresponde à pressão com que a onda de água percorre todo o tubo em um determinado espaço de tempo. No cálculo da celeridade estão incluídas algumas propriedades da água e dos tubos, influenciando tanto o tipo de tubo quanto os tipos de ancoragem.

Halliwell apud Chaudhry (2014) apresentou a equação 52 como uma forma geral do cálculo da celeridade.

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho\left(1+\frac{K}{E}\varphi\right)}} \quad (52)$$

Em que K [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] é o módulo de compressibilidade do fluido; ρ [ML^{-3}] é a massa específica do fluido; E [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] é o módulo de elasticidade do tubo (módulo de Young); φ é um número adimensional cujo cálculo varia de acordo com as configurações e características do tubo.

O parâmetro φ pode ser calculado por expressões distintas. Para tubos considerados rígidos, por exemplo, seu valor é zero. Para tubos ancorados ao longo do seu comprimento com juntas de expansão, sua expressão é calculada pela equação 53.

$$\varphi = 2 \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \nu_p \right) \quad (53)$$

Onde R_o [L] é o raio externo do tubo; R_i [L] é o raio interno do tubo e ν_p é a razão de Poisson.

Neste trabalho, porém, serão utilizados tubos elásticos de paredes finas, onde a expressão para o cálculo do φ é a equação 54.

$$\varphi = 2 \frac{D}{e} (1 - \nu_p^2) \quad (54)$$

Onde e [L] é a espessura da parede do tubo.

A celeridade é usada em vários momentos no cálculo de um transiente hidráulico. Uma das importâncias de conhecer a celeridade, também, vem da determinação da quantidade de seções em que o tubo será dividido e/ou o passo de tempo que será escolhido para o processo iterativo. Na maioria dos casos, isso ocorre para satisfazer à condição de Courant, que supostamente garantiria uma estabilidade ao processo iterativo. É importante, portanto, entender sobre essa estabilidade do problema.

3.5 Estabilidade e a Condição de Courant

Smith, citado por Chaudhry (2014) afirma que para uma solução numérica precisa de uma equação diferencial parcial, a aproximação por diferenças finitas deve satisfazer condições de convergência e estabilidade.

Segundo Chaudhry (2014), diz-se que um esquema de diferenças finitas convergiu quando a solução das equações de diferenças finitas tende à solução exata das equações diferenciais parciais quando tanto Δt quanto Δx tendem a zero. Como não é possível estabelecer condições diretas de convergência, as equações diferenciais parciais devem ser investigadas baseadas nos conceitos de estabilidade e consistência. Diz-se, portanto, que um esquema de diferenças finitas converge quando ele é estável e consistente com a equação diferencial.

Segundo Chaudhry (2014), uma solução de diferenças finitas só possuiria uma solução semelhante às das equações diferenciais se os computadores trabalhassem com infinitas casas decimais. Como isso não ocorre, há sempre um erro inerente ao método numérico utilizado, que aumenta a cada iteração. Essa taxa de aumento de erro, em cada passo de tempo, pode sofrer um aumento, um decréscimo, ou permanecer constante.

Um método é dito estável quando a propagação do erro a cada passo permanece limitado quando o tempo de execução tende ao infinito. Já quando este erro está sempre crescente, chama-se o método de instável. Quando isto ocorre, o erro pode crescer rapidamente em poucos passos de tempo, retornando à solução errada do modelo, levando a conclusões falsas. Ainda segundo Chaudhry (2014), um método é dito incondicionalmente estável quando não existem condições de estabilidade que precisam ser atendidas por este método.

Não existem critérios de convergência e estabilidade para a solução numérica equações diferenciais parciais não lineares. O estudo da estabilidade, portanto, é determinado através da relação entre Δt e Δx na solução numérica da equação. Chaudhry (2014) diz que critérios de convergência e estabilidade são muito difíceis de serem determinados. Entretanto, é possível estabelecer alguns critérios linearizando ou ignorando os termos não-lineares. Essa técnica é razoável quando utilizada em sistemas onde os termos não-lineares são relativamente pequenos quando comparados aos termos lineares.

Segundo Santos (2000), os critérios de estabilidade tendem a reduzir o tamanho da malha definida por Δt e Δx , portanto deve-se ter o cuidado para que estes critérios não façam com que cresça muito o número de processos iterativos, o que acarretaria em um número maior de erros devido a truncamentos e aproximações.

Chaudhry (2014) apresenta um método desenvolvido por von Neumann para verificar a estabilidade de um método de diferenças finitas. O método é aplicável apenas para equações lineares. Nele, os erros na solução numérica são expressos como uma série de Fourier e é feita a determinação do comportamento do erro: crescente, decrescente ou estável. Quando os erros diminuem com o tempo, o método é dito estável. Já do contrário, ele é um método instável.

O'Brien et al. apud Chaudhry (2014) desenvolveu um processo que mostra que um processo de diferenças finitas é dito estável quando obedece à equação 55, que negligencia o termo de atrito das equações do escoamento:

$$\Delta x \geq a\Delta t \quad (55)$$

A equação 55 é conhecida como condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy (CFL), ou simplesmente condição de Courant. O número de Courant (C_N) é definido como na equação 56:

$$C_N = \frac{a\Delta t}{\Delta x} \quad (56)$$

Portanto, para um processo ser estável, com um passo de tempo Δt e divisões de tubos com tamanho Δx , deveria-se ter $C_N \leq 1$.

Como o método ignora o termo de atrito, pode haver uma instabilidade no método, mesmo que a condição de Courant seja obedecida, em casos onde este termo se torna grande demais.

Caso a condição de Courant não seja obedecida, deve-se ajustar os valores de Δt ou Δx para garantir a estabilidade do método. Isso nos faz usar um parâmetro denominado celeridade fictícia, dado pela equação 57:

$$a_f = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (57)$$

Para obter melhores precisões, é aconselhável sempre buscar deixar o número de Courant o mais próximo possível de 1, de acordo com Santos (2000). Para sistemas com mais de uma tubulação, mantém-se o passo de tempo igual para todos os tubos e ajusta-se o tamanho das seções em cada tubo para que seja satisfeita a condição de Courant.

O objetivo nesse trabalho é verificar o verdadeiro impacto da condição de estabilidade nos resultados de uma rede de distribuição de água, resolvendo um problema tanto fazendo seu uso quando negligenciando-a. Assim pode-se observar o erro causado pela desobediência na

condição de Courant, e se ela é verdadeiramente impactante a ponto de ser necessária a preocupação em obedecê-la.

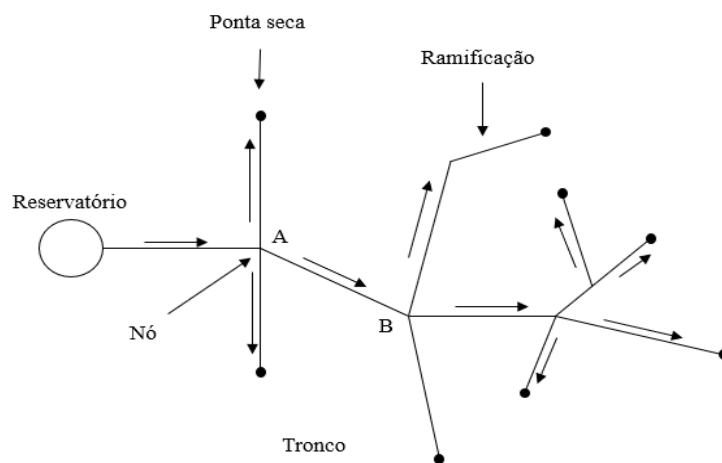
3.6 Redes de Distribuição

Segundo Araújo (2003), uma rede hidráulica é formada por tubos e é composta por alguns outros elementos hidráulicos, tais como bombas, válvulas, reservatórios, registros, etc.

As principais características de uma rede de distribuição de água são a presença dos nós, que são pontos de encontro entre mais de um trecho de tubulação, de onde se deriva a água de alguns trechos para os demais, podendo haver mudança de diâmetro; e os pontos de demanda, que são trechos onde é retirada uma vazão de água do sistema, podendo também ser um nó, e são os parâmetros que podem trazer mais incertezas que podem afetar a precisão de um modelo.

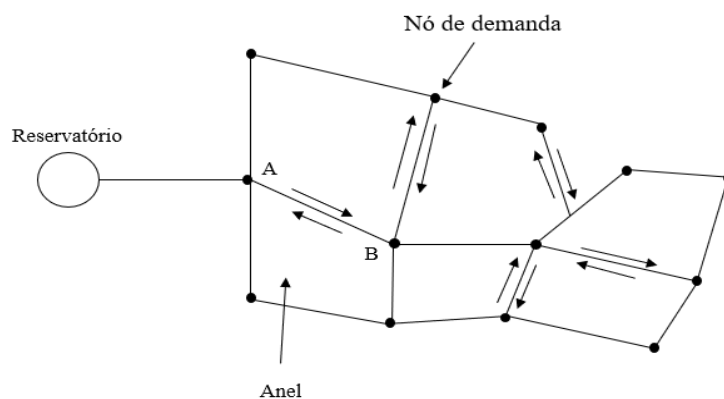
Pode haver dois tipos de redes: as ramificadas e as malhadas, mostradas nas figuras 9 e 10 a seguir.

Figura 9 - Rede ramificada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Rede malhada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na rede ramificada, uma tubulação principal, chamada tronco, é alimentada com água por um reservatório ou bombeamento. Nesta tubulação existem ramificações secundárias que levam água aos pontos de demanda. Nesse tipo de rede é intuitivo conhecer o sentido do escoamento.

Já nas redes malhadas existe um ou mais anel formado pelos tubos. O sentido da vazão neste caso pode variar, dependendo da demanda de água em cada nó de demanda, sendo menos intuitivo e necessário um cálculo para verificação.

Segundo Porto (2006), a topografia do terreno é muito importante para um cálculo em redes de distribuição. Isso pode afetar a disponibilidade de pressão em pontos muito baixos ou muito altos na rede, podendo causar vazões muito baixas em pontos mais altos ou pressões extremamente altas nos pontos mais baixos da rede.

Para a resolução de uma rede de distribuição, a equação da continuidade deve ser respeitada em cada um dos nós da rede, levando em consideração ainda a demanda de água do sistema.

Segundo Shamir e Howard (1977) o processo de calibração de redes de distribuição de água é um processo extremamente importante. Este processo é realizado em uma rede já existente onde, em um modelo de calibração, os valores obtidos pelos cálculos devem ser bem semelhantes aos valores observados. Isso dá um conhecimento de como está operando todo o sistema. Após isso, é possível uma tomada de decisão mais precisa em relação a operação e controle da rede.

3.7 Calibração

Uma técnica muito utilizada para resolução de problemas hidráulicos é a computacional. A resolução dos devidos problemas matemáticos serve como base para uma previsão do comportamento de um sistema de escoamento de água, assim permitindo fazer os ajustes necessários antes da execução do projeto a fim de obter a maior eficiência na sua execução, antecipando erros e possíveis desperdícios, bem como modelar uma rede existente para observar qual seria seu comportamento esperado, permitindo uma comparação com a operação atual da rede, percebendo possíveis problemas ou erros na rede.

Neste trabalho serão calibrados a rugosidade dos tubos, comparando os valores calibrados com valores observados, de forma que nosso objetivo é observar que esses valores devem ser os mais próximos possíveis. Essa calibração será otimizada com utilização de algoritmo genético.

Segundo Vasconcelos et al. (2015), a calibração é o primeiro passo ao estudar-se uma rede já existente, e consiste no processo de identificação de parâmetros físicos e operacionais que podem variar com o tempo, permitindo a identificação dos novos valores em momentos futuros.

Cunha et al. (2015) afirma ainda a importância da calibração para quantificação de perdas, para que os dados analisados sejam gerados com mais confiança por modelos de pressão versus vazamento.

Salvino et al. (2015) utilizou algoritmo genético multiobjetivo para uma calibração multivariada de redes de abastecimento de água, utilizando até sete variáveis: rugosidade, demanda, perda de carga singular, cota topográfica, vazamentos, diâmetros e válvulas.

Bhave (1988) afirma que a calibração de modelos de redes de distribuição de água é importante na previsão de seu comportamento em diferentes condições, além do planejamento de eventuais expansões.

Os métodos de calibração podem ser iterativos, explícitos e implícitos. Bhave (1988) utilizou método iterativo em seu trabalho, que consistia em um método de tentativa e erro para calibrar os coeficientes de resistência dos tubos e as demandas nos nós através da comparação da pressão dos nós observadas com as obtidas.

Boulos e Altman (1991), como alternativa ao método iterativo, que pode ser complicado e demorado na calibração utilizando muitas condições e parâmetros nos equacionamentos do problema, utilizaram um algoritmo explícito para calibração e otimização de uma rede de tubos que se baseia em resolver equações de uma rede em estado estacionário com as correspondentes condições de contorno em termos dos parâmetros do sistema, buscando satisfazer ao mesmo tempo as condições de contorno do problema e as leis de conservação. Segundo Silva (2006), método explícito é aquele onde os parâmetros dos modelos são determinados por meio de resolução de sistemas de equações não-lineares, exigindo o número de pressões e/ou vazões como sendo iguais ao número de parâmetros desconhecidos.

Araújo e Chaudhry (2004) utilizaram um método inverso, ou implícito, o Método transiente Inverso (MTI) na calibração de rugosidades em redes hidráulicas. Os métodos implícitos consistem na estimativa dos parâmetros desconhecidos, através de algum algoritmo de otimização, de forma que os valores estimados se aproximem cada vez mais dos valores reais.

Cunha et al. (2015) exemplifica o EPANET como um software que pode ser utilizado para diferentes aplicações em sistemas de distribuição de água, como simulação e calibração. Foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (EPA).

Campos (2018) utilizou o método iterativo de gradiente hidráulico, desenvolvido por Guo e Zhang (1994) para calibração de redes de abastecimento de água. O método utiliza uma estimativa inicial dos parâmetros e busca minimizar a diferença entre as cargas observadas e calculadas no método.

Segundo Andrade (2017), trabalhos como Silva (2003), Soares (2003) e Wu e Sage (2006) mostram que é completamente viável a utilização do algoritmo genético na otimização de modelos implícitos de calibração, com as vantagens de não ser necessária a compreensão do problema, tem uma aplicabilidade para problemas em geral e possui excelente desempenho nos resultados.

Araújo (2010) utilizou o algoritmo genético em conjunto com o método das características para otimizar a operação de redes de abastecimento de água e de estações de bombeamento.

Bezerra (2018) utilizou o algoritmo genético para modelagem numérica computacional através do desenvolvimento de novas equações para utilização do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) em redes de distribuição de água.

Neste trabalho será utilizado um método inverso de solução, que terá o auxílio do algoritmo genético, através da minimização de uma função objetiva, buscando prever valores de rugosidade bem próximos aos valores observados na rede de distribuição de água escolhida.

A rugosidade, notadamente, é um dos parâmetros mais complexos de se calibrar, ainda mais em uma rede. Isso ocorre porque se faz necessário um levantamento sobre todo o sistema de distribuição. Andrade (2017) diz que calcular rugosidade em redes de distribuição é bem mais complexo devido às incertezas nas demandas nos nós de consumo.

3.8 Algoritmo Genético

3.8.1 Introdução

Os algoritmos genéticos são um método de busca e otimização inspirados no princípio de seleção natural proposto por Charles Darwin (1859) em que afirma que o indivíduo mais adaptado ao ambiente terá uma chance maior de sobreviver e de dar prosseguimento às gerações futuras quando comparado aos indivíduos de mesma espécie menos adaptados.

Baseando-se nessa ideia, depois de anos de estudo e tentativa de desenvolver uma ideia baseada na seleção natural, foi proposto por Holland (1975) e divulgado por Goldberg (1989) um método de otimização em que uma população inicial poderia evoluir através de cruzamentos

e mutações genéticas para que, através de uma seleção natural, pudessem chegar a uma população final que apresenta o melhor resultado de adaptação, ou próximo disso, para o problema que se busca resolver, criando bases teóricas para o algoritmo genético. Inicialmente a ideia de Holland não era criar um algoritmo de cálculos computacionais de problemas específicos, mas sim estudar a adaptação que ocorre no meio ambiente.

Otimização é a procura pela melhor solução possível de um determinado problema, de forma que, de alguma forma, se encontram várias soluções e apenas a que mais satisfaz o problema é selecionada. O algoritmo genético busca esta otimização através de processos aleatórios, regras, operações e modificações que se baseiam nos princípios evolutivos de Darwin.

O parâmetro que determina o quão satisfatório ou não é um resultado de otimização é a função objetivo (FO). A FO consiste em uma avaliação dos resultados encontrados, que deve ser maximizada ou minimizada, a depender do tipo de FO que se está utilizando, para que se encontre a melhor solução para o problema. Além disso, como a otimização é uma busca, deve haver um espaço limitado onde essas buscas devem ocorrer, chamado de espaço de busca. Este é um intervalo entre dois números no qual todas as possíveis soluções devem estar compreendidas.

Segundo Lacerda e Carvalho (1999), as técnicas de otimização buscam um espaço onde estão as soluções dos problemas e uma função objetivo, que é utilizada para avaliar as soluções, definindo qual delas é a mais apta, através de sua maximização ou minimização, a depender do problema.

O início de um processo com Algoritmo Genético consiste em estabelecer uma população inicial de “cromossomos” para o problema. Esta população é um conjunto aleatório de possíveis soluções que atendam ao problema dentro do intervalo definido de soluções. Os “cromossomos” são cada possível solução que está presente dentro desta população. Cada um dos “cromossomos” possui “genes” que vão ser modificados ao longo de todo o processo de otimização. Estes genes são os valores presentes nas respectivas soluções (cromossomos).

Após escolher a população inicial, cada “cromossomo” vai passar por uma avaliação, baseada na função objetivo, para definir um ranque de adaptabilidade, atribuindo uma nota a cada um deles. Essas notas atribuídas aos cromossomos são chamadas de aptidão. Cromossomos mais aptos geralmente são selecionados para passarem adiante, enquanto os que possuem menor aptidão são deixados para trás, com o tempo. Assim, os cromossomos com as melhores notas são escolhidos. Caso nenhum deles consiga atingir os valores procurados da

função objetivo, são feitas modificações nos “genes” de cada “cromossomo” de forma a dar origem a uma nova população, que será novamente avaliada e ranqueada.

Essas operações de modificações dos “genes” fazem com que a nova população possua traços dos melhores “cromossomos” da população anterior. São feitas operações como cruzamento ou *crossover* das soluções selecionadas, que consiste em uma espécie de junção de duas soluções, e “mutações”, fazendo modificações aleatórias em “genes” aleatórios de uma determinada solução.

Até que se encontre uma solução em que satisfaça o valor da função objetivo, o processo é repetido. Isso faz com que se obtenham diversas populações com uma gama enorme de possíveis soluções.

Os cromossomos representam os diversos parâmetros do problema a serem otimizados. Cada parâmetro significa uma dimensão a mais no espaço de busca. Os cromossomos podem ser representados de duas formas: binária ou decimal.

3.8.1.1 Representação Binária

Tendo o conjunto V que varia no intervalo $\{0, 1, \dots, 2^l - 1\}$, pode-se codificá-lo utilizando a representação binária $e = [b_0, \dots, b_l]$, tendo l bits, onde $bin_i \in \{0, 1\}$ de tal forma que:

$$V = \sum_{i=1}^n bin_i 2^{i-1} \quad (58)$$

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

No algoritmo genético, Segundo Araújo (2003), o tamanho do cromossomo depende da precisão desejada no problema. Supondo uma variável x_j cujo domínio 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 com a equação 59:

$$2^{m_j} < (b_j - a_j) 10^5 \leq 2^{m_j - 1} - 1 \quad (59)$$

Onde m_j é o número de bits necessários num cromossomo.

Segundo Araújo (2003), a base binária é particularmente importante pois foi utilizada originalmente por Holland (1975) para seus estudos, mas, embora a base binária seja fácil de utilizar e manipular, para problemas que exigem melhor precisão uma cadeia longa de cromossomos deve ser armazenada e, com muitos parâmetros, pode fazer o algoritmo convergir vagarosamente. Para cromossomos que representem múltiplos parâmetros, estes são representados na mesma cadeia de bits, sendo que cada um deles ocupa uma posição específica do cromossomo.

3.8.1.2 Representação Real

Lacerda e Carvalho (1999) exemplificam um cromossomo s_1 com 22 bits de tamanho: 1000101110110101000111. Esse cromossomo, quando convertido para a base decimal, se torna o número 2288967.

No exemplo, este número deve ainda ser adaptado ao intervalo $[-1,0; 2,0]$ através da equação 60:

$$c = \min + (\max - \min) \frac{b_{10}}{2^l - 1} \quad (60)$$

Onde c é o cromossomo no intervalo do problema; \min é o limite inferior do intervalo; \max é o limite superior do intervalo; b_{10} é o cromossomo na base decimal fora do intervalo do problema. No exemplo, foi obtido $c = 0,637197$.

3.8.2 Seleção

A seleção de cromossomos consiste em, dentro de uma população, escolher, de alguma forma, aqueles que mais se adaptem a um critério. Assim, esses cromossomos mais adaptados poderão dar origem a outros cromossomos que, em teoria, serão mais semelhantes a seus “pais”. Dessa forma, supõe-se que estes cromossomos “filhos” serão mais adaptados ao critério de adaptação utilizado em comparação a supostos “filhos” de cromossomos que não estão adaptados.

No início de um problema com algoritmos genéticos, por exemplo, é gerada uma população inicial com N soluções. É avaliada, então, o valor da função objetivo escolhida para cada um desses cromossomos. Em seguida, atribui-se um valor de aptidão aos cromossomos, que pode ser numericamente igual à função objetivo.

No algoritmo genético, a função objetivo tem o papel do meio natural na evolução dos seres vivos. É ela quem vai definir se uma solução se adaptou ou não ao problema que está sendo resolvido.

Uma das formas de seleção é construir uma tabela ordenando cada um dos cromossomos de forma decrescente com relação à função objetivo, acrescentando uma coluna com os valores acumulados da aptidão. Então, gera-se um número aleatório no intervalo $[0; S]$, onde S é a soma total de todas as aptidões. O primeiro cromossomo selecionado será o primeiro cromossomo cuja aptidão acumulada é superior ao valor aleatório gerado. Este procedimento é repetido até que se tenha selecionado a quantidade desejada de cromossomos selecionados. Este método é conhecido como “Roda da Roleta”.

Lacerda e Carvalho (1999) ainda afirmam que escolher o valor da função objetivo como aptidão pode trazer problemas para o algoritmo. A função objetivo, por exemplo, pode assumir valores negativos, sendo que o método da Roda da Roleta não funciona com aptidões negativas (Galvão et al. 1999).

Foi apresentada, então, outra forma de cálculo de aptidão: os autores organizaram $N = 30$ cromossomos de uma população em ordem decrescente de função objetivo. Ao primeiro, foi atribuído um valor de aptidão igual a 2,0. Ao último cromossomo foi atribuído um valor de 0,0. Os cromossomos intermediários foram interpolados por uma reta, conforme a equação 61, por Whitley (1989).

$$f_i = \frac{2(N-i)}{N-1} \quad (61)$$

Onde f_i é a aptidão do cromossomo i .

Outras formas de seleção que podem ser adotadas são a Seleção por Torneio, onde são escolhidos n cromossomos e, dentre eles, seleciona-se o mais adaptado, repetindo o processo, e a seleção dos melhores pais para compor os descendentes.

Neste trabalho será utilizado o método do elitismo, desenvolvido por Dejong (1975). O elitismo é responsável por transferir os melhores cromossomos de uma geração a outra sem alterações, para que os cromossomos que possuem mais possibilidade de possuírem a solução do problema passem adiante sem que percam suas informações (Araújo, 2003).

Estes cromossomos selecionados darão origem a outra geração de cromossomos, através de operadores de cruzamento (“junção” de um par de cromossomos selecionados) e mutação (operação que muda um bit de um cromossomo aleatoriamente).

3.8.3 Crossover

O processo de reprodução é um dos momentos mais importantes para as espécies. Através da reprodução que é passado de uma geração para outra as informações genéticas, em combinação de genes de pai e mãe, que fizeram essa espécie em questão se adaptar ao ambiente em que ela se encontra.

No algoritmo genético existe esse processo, chamado de *crossover*, que recombina os genes das soluções.

O *crossover* é um mecanismo de busca dentro dos algoritmos genéticos. Esses operadores são um dos responsáveis de irem atrás das soluções mais adaptadas ao problema que se quer resolver, baseando-se nas soluções escolhidas previamente utilizando os operadores de seleção.

No *crossover*, um par de cromossomos é selecionado para serem os pais de dois novos cromossomos filhos, que serão novas possíveis soluções do problema.

O operador de *crossover* é aplicado sempre a uma dada probabilidade, que pode variar de problema a problema. Isso garante que parte das soluções vai gerar uma nova solução, aumentando a busca por soluções melhores, assim como parte das soluções vai permanecer igual, já que os cromossomos pais geram dois cromossomos filhos idênticos a eles nos casos onde não existe *crossover*.

3.8.3.1 Crossover de um corte

No cruzamento de um corte, após serem escolhidos os pares, cada cadeia de bits é cortada em uma posição semelhante, dividindo ambos em duas partes, chamadas de cabeça (primeira parte do cromossomo) e cauda (segunda parte do cromossomo).

Em seguida, troca-se, entre os pares, as duas caudas. Isso dá origem a dois novos cromossomos. A figura 11 mostra um exemplo de *crossover*.

Figura 11- Crossover em configuração binária

Pai ₁ :	0110010110	0101101011
Pai ₂ :	0001011110	0100110000
Filho ₁ :	0110010110	0100110000
Filho ₂ :	0001011110	0101101011

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ponto de corte de um *crossover* desse tipo também é escolhido de forma aleatória, não havendo necessidade de ser no ponto central do cromossomo. Ele apenas deve estar na mesma posição em ambos os pais, para que haja uma combinação de cabeças e caudas que gere cromossomos com o mesmo número de bits.

O *crossover* apresentado acima trata-se do tipo de corte de 1 ponto para a configuração binária, pois há apenas um ponto de corte em cada um dos pais, e é um dos cruzamentos mais básicos existentes para o AG com a configuração binária. Pode haver, ainda, *crossover* de n pontos, em que o número n de cortes pode variar de 1 a $(l-1)$, onde l é o tamanho da cadeia de cada pai. Esses tipos de cruzamentos são mais indicados para configurações binárias do algoritmo genético, já que para operações reais não existe efetivamente uma troca de informação de genes.

3.8.3.2 Crossover aritmético

Outra operação de cruzamento é o cruzamento aritmético, para configuração decimal, em que o filho resulta numa operação aritmética entre ambos os pais. Segundo Michalewicz (1994), este cruzamento é uma combinação linear entre dois vetores. Os pais, P_1 e P_2 , são representados pelas equações 62 e 63:

$$P_1 = (P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1l}) \quad (62)$$

$$P_2 = (P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2l}) \quad (63)$$

Assim, os cromossomos dos filhos c_1 e c_2 são determinados pelas equações 64 e 65.

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \quad (64)$$

$$c_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2 \quad (65)$$

Onde β é um número gerado aleatoriamente no intervalo $[0, 1]$.

3.8.3.3 Crossover BLX- α

Já no cruzamento de média, o filho gerado consiste no resultado do cálculo da média aritmética entre seus dois pais.

Segundo Goulart (2014), o cruzamento BLX- α estima o filho N a partir da equação 66, onde P_1 e P_2 são os pais e $\beta \in U(-\alpha, 1+\alpha)$, onde α é um valor que estende os limites para a definição do filho e U é a distribuição de probabilidade uniforme.

$$N = P_1 + \beta(P_2 - P_1) \quad (66)$$

3.8.3.4 Crossover Média

No cruzamento média, os filhos são simplesmente uma média aritmética dos pais. Ou seja, estes são somados e depois divide-se por dois, como na equação 67.

$$c = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (67)$$

3.9.3.5 Crossover Heurístico

No cruzamento do tipo heurístico, utilizado por Herrera (1998), o filho é gerado através da interpolação linear de seus pais. Isso se dá pela equação 68.

$$c = P_1 + \beta(P_2 - P_1) \quad (68)$$

Onde β pertence ao intervalo [0, 1].

Neste trabalho serão testados os cruzamentos heurístico, média, aritmético e BLX- α .

3.8.4 Mutação

O operador de mutação é aplicado após acontecer o cruzamento. Existe uma probabilidade de mutação para cada um dos genes dos cromossomos filhos de uma geração. De gene a gene, essa operação é aplicada e, caso a mutação ocorra, o gene que tinha um determinado valor passa a se tornar outro gene aleatório.

O objetivo da mutação é aumentar a diversidade de soluções, explorando novas possibilidades que não seriam exploradas apenas com os cruzamentos, já que os genes dos pais sempre se manteriam nos filhos.

Entretanto, segundo Araújo (2003), a mutação também pode ser responsável pela perda de informações. Para prevenir estes problemas, as chances de ocorrer devem ser pequenas,

mas suficiente para que ainda ocorram de forma a assegurar a diversidade de soluções. Geralmente essa probabilidade é de até 5%.

Um dos tipos de mutação é a uniforme, em que o gene escolhido é substituído por um número aleatório de uma distribuição uniforme, enquanto na mutação não-uniforme o gene é substituído por um número vindo de uma distribuição não-uniforme.

Estes são os dois tipos de mutação a serem utilizados neste trabalho.

3.8.5 Elitismo

Ao longo das gerações, as informações das melhores soluções até então podem ser perdidas no uso desses operadores, acarretando numa perda de informações valiosa de soluções.

É interessante, portanto, transferir a melhor solução de cada geração para a próxima sem que haja nenhuma alteração na sua estrutura, para garantir que as principais soluções, que podem gerar soluções ainda melhores, continuem no processo.

O elitismo é uma técnica de dar preferência às melhores soluções até então, para que elas possam passar para uma outra geração sem que haja alterações em seus genes, o que seria simplesmente descartar o melhor resultado obtido até o momento. Isso permite encontrar soluções melhores e mais rapidamente em processos de algoritmos genéticos.

Uma das formas de isso ocorrer é escolher aleatoriamente pais para estarem presentes na próxima geração passar pelos operadores do algoritmo, enquanto também podem ser escolhidos os melhores pais para que estes passem adiante sem modificações.

3.8.6 Vantagens do Algoritmo Genético

Mota (2007) cita algumas vantagens de se utilizar algoritmos genéticos na solução de problemas de otimização:

- Funcionam com parâmetros contínuos e discretos, ou combinação entre eles;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Não é necessário conhecimento matemático do problema;
- Otimizam muitas variáveis;

- Otimizam parâmetros de funções objetivo com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Adaptam-se bem a computadores paralelos;
- Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- São fáceis de serem implementados em computadores;
- São modulares e portáteis, no sentido que o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Ou seja, podem ser transferidos de um problema para o outro;
- São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- São facilmente hibridizados com outras técnicas e heurísticas.

Para muitos problemas, entretanto, os algoritmos genéticos não são muito eficientes, principalmente por serem lentos. Por isso, ele é indicado principalmente para problemas complexos, com múltiplos mínimos e máximos, segundo Lacerda e Carvalho (1999). É importante saber que o problema do ótimo local é recorrente em todo método de calibração e deve ser considerado nos problemas.

3.8.7 População inicial

A geração da população inicial pode se dar de diversas maneiras. Não é aconselhável gerá-la de forma aleatória pois isso pode fazer com que algumas regiões do espaço de busca não sejam abrangidas.

Uma forma de contornar este problema é gerando a população de maneira uniforme, ou seja, com pontos igualmente espaçados entre si, de forma a representar cada região do espaço de busca.

Lacerda e Carvalho (1999) também sugerem que metade da população pode ser gerada aleatoriamente, enquanto a outra metade pode ser gerada invertendo os bits da primeira metade. Isso garante que cada posição de bits tenha um representante com 0 e 1.

3.8.8 Função Objetivo

A função objetivo é a função que deve ser otimizada (maximizada ou minimizada) para que se teste se a solução encontrada pelo algoritmo genético corresponde à solução ideal do problema.

A função objetivo também é utilizada, em muitos casos, para gerar um valor de aptidão atribuído aos cromossomos de todas as gerações do algoritmo, definindo quais deles passarão adiante para as próximas gerações, quais deles ficarão para trás e quais deles deixarão ou não descendentes.

O valor da função objetivo não segue um padrão de crescimento ou decaimento. A depender da aleatoriedade, da natureza do problema ou do tipo de função objetivo que se utiliza, ela pode assumir valores superiores aos de gerações anteriores para depois voltar a decair. Isso acontece pelo fato de se procurar a solução em todo o espaço de busca, testando o maior número de possibilidades de soluções.

De acordo com Diskin e Simon (1977), a escolha da função objetivo pode ter uma grande influência sobre o resultado final da otimização. Dessa forma, os valores ótimos encontrados pelo algoritmo são ótimos apenas para a função objetivo utilizada.

Segundo Araújo (2003), para o Método Transiente Inverso em conjunto com algoritmo genético são necessárias medidas de cargas hidráulicas de um ou mais nós para o cálculo da função objetivo, para simplificar sua construção e justificar a eficiência dos métodos inversos de cálculo.

Cada tipo de problema exige sua própria função objetivo. Em alguns problemas essa função objetivo pode ser extremamente complexa, sendo necessário um altíssimo custo operacional. No caso do nosso problema, a função objetivo é dada pela equação 69 a seguir:

$$FO = \sum_{i=1}^{TS} \left(\frac{H_{i,m} - h_{i,c}}{H_{i,m}} \right)^2 \quad (69)$$

Onde TS é a duração do transiente, $H_{i,m}$ é a carga medida no tempo i , $h_{i,c}$ é a carga calculada no tempo i .

3.8.9 Critérios de Parada

Pode-se adotar diversos critérios de parada para os algoritmos genéticos. Entre eles: quando a função objetivo atinge um dado valor; quando o algoritmo genético produz um certo número de gerações; quando o cromossomo ótimo, após um certo número de gerações, não sofre melhora significativa na aptidão; quando a maior parte de uma população possui um mesmo valor para o gene.

No caso deste trabalho, o critério de parada utilizado é o do número de gerações obtidas pelo algoritmo genético. As iterações cessarão quando for atingido o número de 50 gerações.

3.8.10 Substituição Geracional e Steady-State

Existem dois tipos de substituição de cromossomos a cada geração: a geracional e a *steady-state*.

A substituição geracional consiste em gerar filhos a cada geração e estes filhos substituem os pais. Isso pode ocorrer de duas formas: cada par de cromossomos gera um par de filhos, que substituem seus respectivos pais; ou, quando há elitismo, os filhos que possuem menor aptidão que os respectivos pais não os substituem.

Na substituição por *steady-state*, são gerados um ou dois filhos apenas e estes substituem o pior ou os dois piores cromossomos da geração anterior ou substituem os cromossomos mais velhos da geração anterior, supondo que estes já tiveram tempo o bastante para transmitir suas informações genéticas para as outras gerações.

3.8.11 Restrições

Segundo Lacerda e Carvalho (1999), alguns problemas com algoritmos genéticos podem ser acompanhados por restrições aos valores de otimização.

Uma das soluções apresentadas pode ser atribuir a zero o valor da aptidão dos cromossomos que não atendem aos critérios de restrição do problema. Entretanto, a solução ideal seria penalizar a aptidão desses cromossomos em um dado valor, visto que eles, apesar de não atenderem restrições, podem carregar informações valiosas para que as próximas gerações passem a gerar filhos que atendam aos critérios.

3.8.12 Problemas de Convergência

Muitos algoritmos genéticos tendem a uma convergência prematura. Isso acontece quando os cromossomos gerados ao início do processo possuem um valor de aptidão muito alto, embora não sejam os valores ótimos do problema. Com isso, seus filhos acabam dominando as gerações seguintes, levando o problema a um resultado de mínimo ou máximo local, gerando uma solução errada para o problema.

Para solucionar esse tipo de problema mencionado pode-se adotar alguns artifícios como limitar o número de filhos por cromossomos; aumentar a taxa de mutação, o que gera mais diversidade; evitar filhos duplicados nas populações.

Outro problema ocorre quando os cromossomos gerados possuem funções objetivos muito próximos e os valores de aptidão são idênticos aos valores da função objetivo. Dessa forma, cada cromossomo teria praticamente a mesma probabilidade de seleção, independente da função objetivo máxima ou mínima da geração. Isso pode ser resolvido através de mapeamento da função objetivo, como o ordenamento linear para cálculo da aptidão, na equação 70, segundo Da Silva (2001).

$$f_k = Min + (Max - Min) \frac{N-k}{N-1} \quad (70)$$

Onde o k é o índice do cromossomo em ordem decrescente de valor de função objetivo e N é o tamanho da população.

4 METODOLOGIA

4.1 Definição do Problema

O problema a ser solucionado neste trabalho é um problema de natureza inversa, ou seja, a partir de valores de cargas e vazões calculados para situações permanente e transiente serão obtidos valores de outro parâmetro das redes, no caso a rugosidade. A ferramenta de otimização utilizada será o algoritmo genético cujas condições deverão ser testadas para que as três melhores sejam utilizadas na simulação problema, em conjunto com o método transiente inverso. O objetivo é discutir o impacto da utilização da celeridade real na simulação sem que se obedeça a condição de Courant. Portanto, as simulações deverão ser feitas sempre utilizando as duas formas de celeridade: real e fictícia. Cada solução gerada será classificada baseando-se pela função objetivo, de forma que sempre serão escolhidas as soluções com funções objetivo de menor valor.

4.2 Resolução do Problema

As rugosidades serão calibradas através da resolução das equações permanentes e transientes de dois sistemas de redes hidráulicas utilizando os dados dos problema, incluindo valores de rugosidade que serão chamados de observados, assim como as cargas e vazões derivadas dela, para que se conheçam as cargas e vazões dos tubos e, principalmente, dos nós que serão monitorados no escoamento transiente.

4.2.1 Regime Permanente

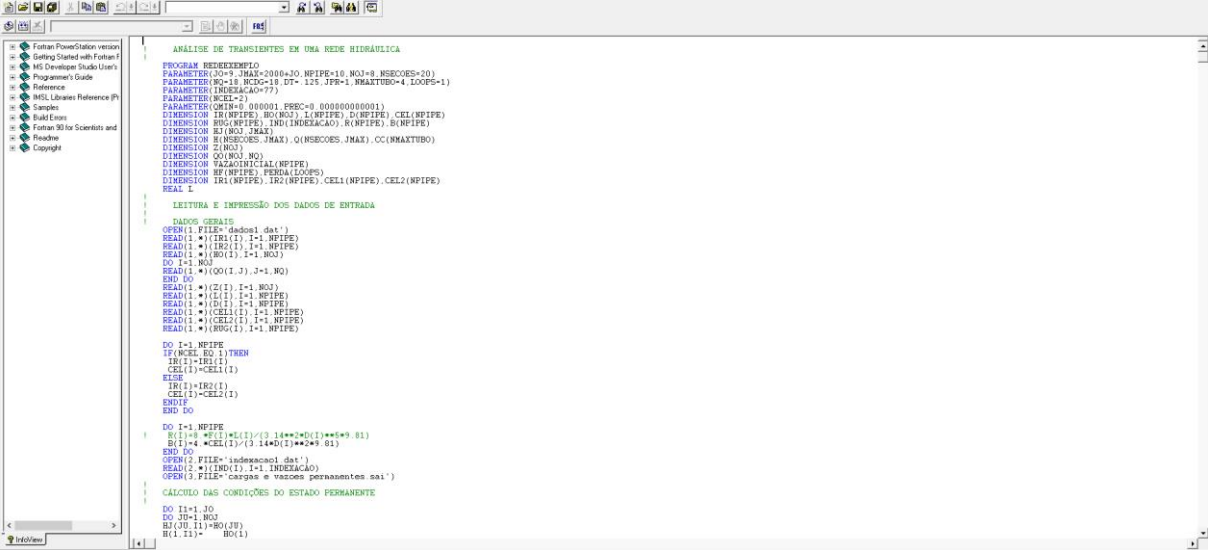
Para os cálculos do regime permanente será utilizado o programa chamado de P1, desenvolvido por Araújo (2003). Esses cálculos utilizarão as rugosidades observadas e, por isso, serão chamados de cargas e vazões permanentes observadas, embora tenham surgido de um cálculo de uma rede hipotética. O programa P1, mostrado na Figura 12, foi feito na linguagem FORTRAN e calcula o escoamento permanente através de diversas iterações (3500 para a rede 1 e 2000 para a rede 2), quando se considera que as cargas e vazões não deverão mudar e o regime permanente já foi atingido.

Para cada rede deve se inserir os dados necessários para seus respectivos cálculos.

Como dados de saída, o programa P1 gera as cargas e vazões permanentes, assim como

todas as cargas e vazões ao longo de toda a iteração.

Figura 12 - Programa P1



```

PROGRAM REDEEXEMPLO
PARAMETER(CO=9, JMAX=2000+10, NPIPE=10, NOJ=8, NSBCOES=20)
PARAMETER(NQ=18, NSDC=18, DT= 125, JPR=1, NMAXTUBO=4, LOOPS=1)
PARAMETER(INDELAÇO=77)
PARAMETER(NCEL=2)
PARAMETER(COIN=0, COFIN=0, FECC=0, COB=0, COB=0)
DIMENSION IR(NPIPE), RO(NQ), I(NPIPE), D(NPIPE), CEL(NPIPE)
DIMENSION RIG(NPIPE), IND(INDELAÇO), R(NPIPE), B(NPIPE)
DIMENSION RI(NQ, JPR)
DIMENSION R(NSBCOES, JMAX), Q(NSBCOES, JMAX), CC(NMAXTUBO)
DIMENSION L(NQ)
DIMENSION OI(NQ, NO)
DIMENSION WAZACINDICAL(NPIPE)
DIMENSION NP(NPIPE), PERM(LOOPS)
DIMENSION IRI(NPIPE), IRI(NPIPE), CELI(NPIPE), CEL2(NPIPE)
REAL L

*****
***** LEITURA E IMPRESSÃO DOS DADOS DE ENTRADA
*****
DADOS GERAIS
OPEN(1, FILE='dados1.dat')
READ(1, *) (IRI(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (IRI(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (RO(I), I=1, NQ)
DO I=1, NQ
  READ(1, *) (OO(I, J), J=1, NQ)
END DO
READ(1, *) (Z(I), I=1, NQ)
READ(1, *) (D(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (D(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (CEL(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (CEL2(I), I=1, NPIPE)
DO I=1, NPIPE
  IF (NCEL EQ 1) THEN
    CEL(I)=CEL1(I)
  ELSE
    IRI=IRI(I)
    CELI(I)=CEL2(I)
  END IF
END DO
DO I=1, NPIPE
  R(I)=8 *PI*I*E(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='indelaço1.dat')
READ(2, *) (IND(I), I=1, INDELAÇO)
OPEN(3, FILE='cargas e vazoes permanentes sai')
*****
***** CALCULO DAS CONDIÇÕES DO ESTADO PERMANENTE
*****
DO I=1, 10
  DO J=1, NQ
    R(OI(I, J))=RO(J)
    RI(I, J)= RI(J)
  
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resolvidos os problemas em suas formas permanentes, os dados de carga e vazão permanentes gerados serão utilizados para o cálculo dos transientes, tanto para os casos com celeridades reais quanto com as celeridades fictícias.

4.2.2 Regime Transiente

O regime transiente é calculado pelo programa P2, desenvolvido por Araújo (2003). Ele utiliza a mesma linguagem do P1 e pode ser visto na figura 13. O programa P2 utiliza o método das características para calcular as cargas e vazões no regime transiente no nó monitorado (aqueles onde ocorrerão a causa do transiente) de cada rede. Serão utilizados 300 passos de tempo para a rede 1 e 80 para a rede 2, onde, para cada passo, o programa irá gerar um valor de carga e de vazão até que se atinjam todos os passos.

Os arquivos gerados pelo P2 são os valores de carga e vazão ao longo de todo o cálculo, para todos os passos de tempo, para o nó monitorado em cada caso.

Os arquivos de saída de carga serão utilizados no programa final que utiliza o algoritmo genético para que sejam calculadas as funções objetivo baseadas nas cargas, servindo assim como dados de entrada.

Figura 14 - Programa P3

```

1  NPI-ALGORITMO GENÉTICO - REDE-EXEMPLO 1
2  IDENTIFICAÇÃO DO FATOR DE ATRITO
3  CATEGORIA: REAL E CONTÍNUA
4  USANDO CRUZAMENTO ARITMÉTICO E MUTAÇÃO UNIFORME
5  UTILIZA DADOS DE CÁRIDA NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO
6  PROGRAM REDEEXEMPLO
7  REAL CRUZADO, MUTADO
8  INTEGER FREQUENCY, DURATION
9  INTEGER GERACAO
10 REAL MINIMO
11 PARAMETER (NMAX=50, NC=100, NV=10)
12 PARAMETER (FC=0.8, FR=0.02, FILMOS=0.5, NPS=FILMOS*NC, NFF=NC*NPS)
13 PARAMETER (JMAX=JMAX*0.4+0.6, NPI=0, NCE=0, NPIPE=10, N03=0, DT=1.15, JPR=1)
14 PARAMETER (NOM=4)
15 PARAMETER (NCR=2, NMUT=2, NELIT=1)
16 PARAMETER (NCEL=2)
17 PARAMETER (JMAX=10+2*100)
18 PARAMETER (NRES=50, 00)
19 PARAMETER (NFE=1, 00)
20 PARAMETER (INDEXACO=77, NMAXTUBO=4, NMEM=1)
21 PARAMETER (NTEPO=JMAX+10, NSECCO=10, NTRAB=JMAX)
22 PARAMETER (FREQUENCY=4000, DURATION=1000)
23 DIMENSION I(NC, NV)
24 DIMENSION CRUZADO(NC, NV), MUTADO(NC, NV)
25 DIMENSION VAR(NC, NV)
26 DIMENSION AT(NC)
27 DIMENSION XX(NC, NV)
28 DIMENSION IMEDIOS(NTEPO, NMEM)
29 DIMENSION FATOR(NC, NV)
30 DIMENSION V(NC, NPIPE), Z(NC)
31 DIMENSION COMP(NPIPE), D(NPIPE), CEL(NPIPE), IND(INDEXACO), IND2(INDEXACO)
32 DIMENSION V(NC, NPIPE)
33 DIMENSION NONGERACAO(NC, NV)
34 DIMENSION VARIABEL(NV)
35 DIMENSION OO(N03, N03), DEN(N03, N03)
36 DIMENSION C03(1, N03), F03(N03, NV), F03S(NPS)
37 DIMENSION R03(NC, NV), R03S(OTIMA(NC, NV))
38 DIMENSION POPULACO(NC)
39 DIMENSION B1(NPIPE), B2(NPIPE), CEL1(NPIPE), CEL2(NPIPE)
40 DIMENSION B1(NTEPO), B2(NTEPO)
41 NPI=LIST(NC, NV)
42 NPS=INT(NC*NV)
43 NGENE=INT(NPS*FC)
44 NSECCO=100
45 ESSECCO=1000
46 NC=N-2
47 XMIN=-2.0
48 XMAX=1.0
49 Z1=10.0**NPI
50 Z2=10.0**NMAX
51
52 WRITE(*, 10)
53 FORMAT(1X, 'EXECUTANDO PROGRAMA - ESPERE')
54 OPEN(1, FILE='f1_a.sal')
55 OPEN(2, FILE='c03m03.dat')
56 READ(2, *) (B1(I), I=1, NPIPE)
57 READ(2, *) (B2(I), I=1, NPIPE)
58 DO I=1, N03

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizadas as simulações, serão tomados os resultados das gerações geradas no processamento, então, dentre elas, será separado o melhor resultado para cada uma das três configurações diferentes do algoritmo genético que foram utilizadas.

Após o cálculo, os resultados serão analisados graficamente, a fim de se observar o impacto de cada tipo de procedimento de cálculo através da análise do erro relativo e do erro médio relativo (EMR) com relação aos valores observados que pode ser visto na equação 71:

$$EMR = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{|\varepsilon_i^{real} - \varepsilon_i^{estimado}|}{\varepsilon_i^{real}} \times 100 \right] \quad (71)$$

Onde ε_i^{real} é a rugosidade observada para o tubo i , $\varepsilon_i^{estimado}$ é a rugosidade estimada através dos cálculos para o tubo i e n representa o número de tubos total da rede.

O algoritmo genético será utilizado como forma de otimização. Seus parâmetros serão definidos através de simulações menores com combinações de diferentes formas de mutação, elitismo e cruzamento, todos com porcentagem fixa. Serão utilizados vários tipos dessas características do algoritmo genético. Os testes serão feitos utilizando todos os tipos de características determinados, de todas as formas possíveis, de forma que todas as combinações sejam testadas. Dessa forma, o teste gera uma função objetivo para uma combinação e, em seguida, muda-se o tipo da característica a ser testada, até que todas as características (mutação, elitismo e cruzamento) tenham sido testadas.

Os três melhores resultados dessas simulações, para cada tipo de celeridade, serão

utilizados para as simulações principais, que determinarão as rugosidades calculadas.

Esta abordagem será utilizada para encontrar o valor da rugosidade para o cálculo utilizando tanto a celeridade fictícia quanto a celeridade real, para, ao fim do processo, ser feita a comparação entre os resultados a fim de detectar a presença de diferenças significantes entre os dois métodos.

Encontrados os valores de rugosidade, será feito o cálculo das cargas e vazões tanto para regime permanente quanto para o transiente para os dois tipos de celeridade, a fim de comparar também esses dados. Esse novo cálculo será feito utilizando os mesmos programas anteriores, P1 e P2.

4.3 Características do AG

As características do algoritmo genético, como tipos de mutação, elitismo e cruzamento, serão avaliadas e definidas por testes utilizando as próprias rede, mas com um número bem menor de gerações (4 gerações, com um tamanho populacional de 20), para cada uma das combinações de características. Os três melhores resultados das combinações para cada tipo de celeridade (real e fictícia) serão utilizados para o cálculo efetivo das rugosidades. Isso será utilizado para determinar a combinação mais efetiva destes parâmetros para cada caso.

As características que serão testadas estão presentes na tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de mutação, elitismo e cruzamento

CARACTERÍSTICA	IDENTIFICAÇÃO	TIPO	PORCENTAGEM (%)
CRUZAMENTO	1	ARITMÉTICO	80
	2	MÉDIA	
	3	BLX - α	
	4	HEURÍSTICO	
MUTAÇÃO	1	UNIFORME	2
	2	NÃO-UNIFORME	
	3	LIMITE	
ELITISMO	1	ALEATÓRIA	50
	2	MELHORES PAIS	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os números foram adotados baseados nos estudos de Dejong (1975) que mostrou valores máximos e mínimos ideais para cada uma das características. Então foi adotado um número médio dentro do intervalo para este estudo.

Utilizando as informações da tabela 1, portanto, serão feitas todas as combinações possíveis dentre as características apresentadas a fim de se determinar as três melhores combinações para o cálculo de cada celeridade. As melhores combinações serão definidas pelo cálculo da função objetivo para cada uma delas, onde os menores valores determinarão quais serão utilizadas.

Outras características já definidas do algoritmo genético definitivo da simulação principal estão na tabela 2.

Tabela 2 - Dados do algoritmo

CARACTERÍSTICA	VALOR/TIPO
Representação	Real
Número de gerações	50
Número da população	100
Número de simulações	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

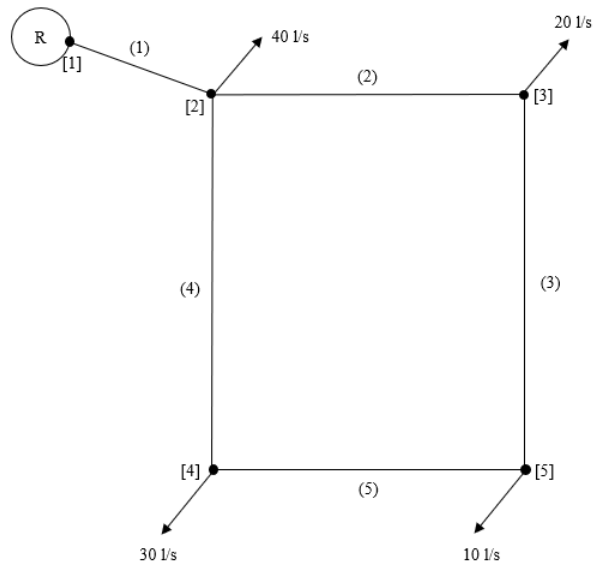
Portanto, o critério de parada do programa principal do algoritmo genético será quando o programa atingir as 50 gerações da simulação em sua atividade.

A melhor solução da simulação, ou seja, a que possuir menor função objetivo, será separada para as análises gráficas de comparação com as soluções observadas e com as soluções do outro tipo de celeridade.

4.4 Dados do Problema

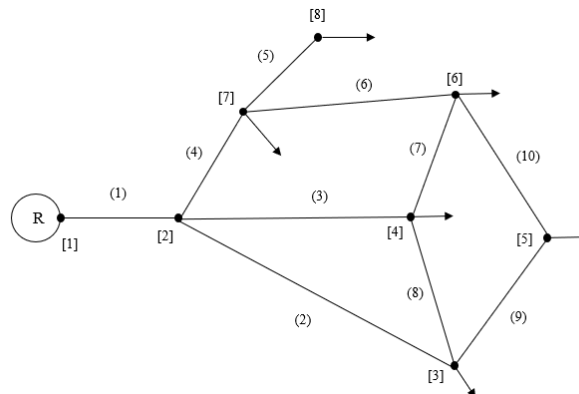
As rede utilizadas para o trabalho estão nas Figura 15 e 16 a seguir, nas quais os números que estão entre colchetes indicam a numeração dos nós e os números entre parênteses indicam a numeração dos tubos da rede. Nelas foram realizados os cálculos das cargas e vazões nos tubos no estado permanente e, em seguida, os cálculos para as cargas e vazões no estado transiente. Com estes dados em mãos, calculou-se as rugosidades conforme explicado anteriormente em um dos nós do sistema utilizando o método de transiente inverso otimizado com o algoritmo genético.

Figura 15 - Rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tudo isso foi realizado utilizando três programas desenvolvidos por Araújo (2003) que utilizam linguagem FORTRAN, onde um deles realiza o cálculo das condições permanentes, o segundo realiza o cálculo transiente e o terceiro aplica o método do transiente inverso para o cálculo das rugosidades que serão estimados em conjunto com o algoritmo genético.

O transiente na rede será causado por uma perturbação em nós do sistema, originadas por uma variação linear da vazão de demanda durante o tempo de 5 segundos. Os nós observados e os valores da variação de vazão se encontram na tabela 3. O critério de parada para a simulação transiente é quando a simulação atingir 30 segundos em 300 passos de tempo para a rede 1 e 10 segundos em 80 passos de tempo para a rede 2.

Tabela 3 - Nós monitorados e variações de vazão de demanda

REDE	NÓ MONITORADO	VARIAÇÃO DA VAZÃO
1	5	10 l/s a 0 l/s
2	4	125 l/s a 0 l/s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os demais dados do problema, como o diâmetro de cada tubo (D), comprimento do tubo (L), espessura do tubo (e), coeficiente de Poisson (ν), celeridade (a), celeridade fictícia (a^*), rugosidade (ε), passo de tempo (Δt), a cota (Z) e número de Courant (CN), estão presentes nas tabelas 4 e 5 a seguir. Cada tubo foi dividido em partes de, no máximo, 150 m para a rede 1 e 200 m para a rede 2. O material utilizado nos tubos possui módulo de elasticidade de 120 GPa, enquanto o módulo de compressibilidade da água foi considerado 2.19 GPa.

Tabela 4 - Dados da rede 1

TUBO	D (m)	L (m)	e (mm)	ν	a (m/s)	a^* (m/s)	ε (mm)	Δt (s)	CN	Z (m)
1	0.250	500.0	10	0.25	1251.7	1250.0	0.0500	0.10	1.001351	0.0
2	0.200	700.0	10	0.25	1289.0	1400.0	0.0500	0.10	0.920719	400.0
3	0.150	800.0	10	0.25	1329.9	1333.3	0.0500	0.10	0.997406	405.0
4	0.150	800.0	10	0.25	1329.9	1333.3	0.0500	0.10	0.997406	410.0
5	0.150	700.0	10	0.25	1329.9	1400.0	0.0500	0.10	0.949910	420.0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Dados da rede 2

TUBO	D (m)	L (m)	e (mm)	ν	a (m/s)	a^* (m/s)	ε (mm)	Δt (s)	CN	Z (m)
1	0.500	700.0	10	0.25	1104.1	1400.0	0.0500	0.125	0.788612	0.00
2	0.250	1800.0	10	0.25	1251.7	1600.0	0.0500	0.125	0.782306	0.00
3	0.400	1520.0	10	0.25	1156.6	1520.0	0.0500	0.125	0.760921	0.00
4	0.300	1220.0	10	0.25	1217.4	1394.3	0.0500	0.125	0.873161	0.00
5	0.300	600.0	10	0.25	1217.4	1600.0	0.0500	0.125	0.760897	0.00
6	0.200	1220.0	10	0.25	1289.0	1394.3	0.0500	0.125	0.924493	0.00
7	0.250	920.0	10	0.25	1251.7	1472.0	0.0500	0.125	0.850332	0.00
8	0.150	300.0	10	0.25	1329.9	1200.0	0.0500	0.125	1.108229	0.00
9	0.200	600.0	10	0.25	1289.0	1600.0	0.0500	0.125	0.805629	0.00
10	0.100	1220.0	10	0.25	1374.9	1394.3	0.0500	0.125	0.986091	0.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

As vazões e cargas hidráulicas nos tubos serão simuladas até que atinjam o estado permanente e, atingida essa condição, estes dados obtidos serão utilizados para os cálculos

subsequentes. A configuração permanente será considerada atingida após 3506 iterações para a rede 1 e para a rede 2, quando os valores de carga e vazão não deverão mudar significativamente.

Alguns tubos possuem comprimento maior que o Δx utilizado nos cálculos. Estes tubos deverão ser divididos em quantas seções sejam necessárias para que cada divisão possua, no máximo, o tamanho do Δx (no caso, 150 m para a rede 1 e 200 m para a rede 2). Assim, na tabela 6 tem-se o número de partes em que cada tubo foi dividido.

Essa configuração de divisões nos tubos será utilizada tanto para o caso da celeridade fictícia quanto para o da celeridade real.

Tabela 6 - Número de divisões dos tubos

TUBO	DIVISÕES NA REDE 1	DIVISÕES NA REDE 2
1	4	4
2	5	9
3	6	8
4	6	7
5	5	3
6	N/A	7
7	N/A	5
8	N/A	2
9	N/A	3
10	N/A	7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa configuração de divisões nos tubos será utilizada tanto para o caso da celeridade fictícia quanto para o da celeridade real.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cálculo da Rede na Condição Permanente

De posse dos dados presentes nas tabelas 4 e 5 foi possível calcular as condições permanentes do problema através de simulação utilizando o programa apropriado. Os resultados das vazões (Q) e cargas hidráulicas (H) na condição permanente da rede estão presentes na tabela 7 e 8. A carga inicial do reservatório na rede 1 foi determinada em 453 m, enquanto na rede 2 foi de 60 m.

Tabela 7 - Vazões e cargas permanentes da rede 1

TUBO	Q _{fictícia} (m ³ /s)	H _{fictícia} (m)	Q _{real} (m ³ /s)	H _{real} (m)
1	0.100001	453.00	0.100002	453.00
2	0.036110	446.45	0.036111	446.44
3	0.023890	442.39	0.023890	442.39
4	0.016110	437.52	0.016110	437.51
5	0.006110	438.14	0.006110	438.13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Vazões e cargas permanentes da rede 2

TUBO	Q _{fictícia} (m ³ /s)	H _{fictícia} (m)	Q _{real} (m ³ /s)	H _{real} (m)
1	0.414995	60.00	0.414993	60.00
2	0.056818	55.71	0.056818	55.70
3	0.209035	47.65	0.209033	47.65
4	0.149144	48.02	0.149148	48.02
5	0.075001	44.54	0.075000	44.54
6	0.014146	40.74	0.014146	40.72
7	0.076761	41.97	0.076759	41.96
8	0.007275	40.14	0.007275	40.13
9	0.034093	60.00	0.034094	60.00
10	0.004093	55.71	0.004094	55.70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ambas as redes, os resultados permanentes de carga e vazão foram muito próximos quando comparados os dois tipos de celeridades utilizadas no cálculo.

O cálculo dos dados no regime permanente dá a possibilidade de realizar o cálculo do problema na condição de escoamento transiente.

5.2 Cálculo da Rede na Condição Transiente

A partir do cálculo da condição permanente do escoamento, é feito o cálculo das vazões e cargas ao longo do regime transiente, que permitirá supor que os fatores de atrito são desconhecidos e, assim, simulá-los e otimizá-los através do algoritmo genético.

Dessa forma foram obtidos os dados de vazão e carga nos primeiros 30 segundos de escoamento transiente para o nó 5 da rede 1 e nos primeiros 10 segundos de escoamento para o nó 4 da rede 2, que sofreram as alterações bruscas de demanda nos problemas. Os valores podem ser encontrados no apêndice A.

5.3 Cálculo das Características do AG

As simulações das diversas configurações do algoritmo genético foram realizadas tanto para celeridade real quanto para celeridade fictícia. Para isso foi utilizado uma versão menor do programa de cálculo do algoritmo genético, com menos gerações, onde eram utilizadas as diferentes configurações do algoritmo. Nas tabelas 9 e 10 estão os resultados das três melhores configurações para celeridade fictícia e real das redes 1 e 2.

Tabela 9 - Configurações do AG para rede 1

	1ª SOLUÇÃO		2ª SOLUÇÃO		3ª SOLUÇÃO	
	Cel. Fic.	Cel. Real	Cel. Fic.	Cel. Real	Cel. Fic.	Cel. Real
MENOR FO ($\times 10^{-6}$)	0.10220	0.10130	0.10990	0.10600	0.12510	0.11950
TIPO DE CRUZAMENTO	2	2	2	2	1	1
TIPO DE MUTAÇÃO	3	3	1	1	2	2
TIPO DE ELITISMO	1	1	1	1	1	1

Tabela 10 - Configurações do AG para rede 2

	1ª SOLUÇÃO		2ª SOLUÇÃO		3ª SOLUÇÃO	
	Cel. Fic.	Cel. Real	Cel. Fic.	Cel. Real	Cel. Fic.	Cel. Real
MENOR FO ($\times 10^{-5}$)	0.04731	0.05219	0.07084	0.10087	0.03351	0.08391
TIPO DE CRUZAMENTO	2	2	2	1	1	2
TIPO DE MUTAÇÃO	1	2	3	1	3	2
TIPO DE ELITISMO	2	2	2	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que, para a rede 1, as melhores, segunda melhores e terceira melhores são iguais para ambos os tipos de celeridade. Além disso, os valores de função objetivo para os casos com celeridade real são sempre menores que as funções objetivo dos casos com celeridade fictícia. Desse resultado prévio, considerando ainda que as configurações dos algoritmos genéticos foram idênticas, pode-se ter uma noção inicial da qualidade dos resultados dos cálculos sem levar em conta a condição de Courant.

Já no caso da rede 2, as funções objetivo para os casos com celeridade fictícia são sempre menores que os casos com celeridade real. Não há uma uniformidade entre as configurações do AG.

De posse dessas configurações foi possível realizar as simulações para as rugosidades utilizando cada uma delas.

Para facilitar a identificação de cada solução para as celeridades, cada caso será identificado com um número. Os identificadores estão na tabela 11.

Tabela 11 - Identificação das soluções

CELERIDADE	SOLUÇÃO	CASO
FICTÍCIA	1ª SOLUÇÃO	1
	2ª SOLUÇÃO	2
	3ª SOLUÇÃO	3
REAL	1ª SOLUÇÃO	4
	2ª SOLUÇÃO	5
	3ª SOLUÇÃO	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Cálculo das Rugosidades

5.4.1 Rede 1

5.4.1.1 Celeridade Fictícia

Na tabela 12 a seguir tem-se o resultado das simulações de rugosidade para os 3 casos de configurações da celeridade fictícia na rede 2 em comparação com os valores reais de rugosidade, mostrando apenas as gerações que produziram a melhor função objetivo em cada um dos casos.

Tabela 12 - Rugosidades calculadas para celeridade fictícia da rede 1

TUBO	ϵ_{est} (mm) - CASO 1	ϵ_{est} (mm) - CASO 2	ϵ_{est} (mm) - CASO 3
1	0.0496	0.0515	0.0529
2	0.0574	0.0478	0.0391
3	0.0433	0.0464	0.0496
4	0.0617	0.0554	0.0523
5	0.0578	0.0552	0.0496

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 13 encontram-se os erros absolutos e relativos das rugosidades de cada caso para celeridade fictícia na rede 1.

Tabela 13 - Erros dos valores de rugosidade nos casos de celeridade fictícia na rede 1

TUBO	CASO 1		CASO 2		CASO 3	
	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO
1	0.0004	0.8 %	0.0015	3.0 %	0.0029	5.8 %
2	0.0074	14.8 %	0.0022	4.4 %	0.0109	21.8 %
3	0.0067	13.4 %	0.0036	7.2 %	0.0004	0.8 %
4	0.0117	23.4 %	0.0054	10.8 %	0.0023	4.6 %
5	0.0078	15.6 %	0.0052	10.4 %	0.0004	0.8 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na tabela 14 estão os valores das funções objetivo dos três casos analisados para celeridade fictícia.

Tabela 14 - Funções objetivo dos casos de celeridade fictícia da rede 1

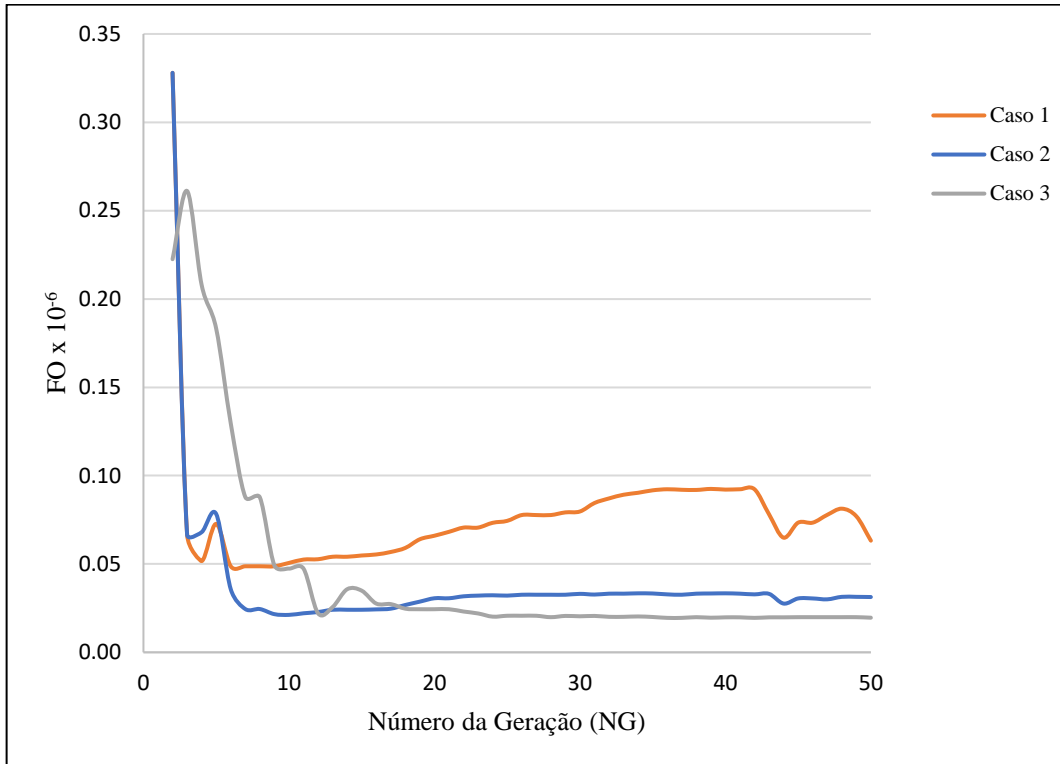
CASO	FUNÇÃO OBJETIVO
1	0.00000004870
2	0.00000002120
3	0.00000001950

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados para celeridade fictícia foram organizados no gráfico das figuras 17, 18 e 19 para comparação e análise da evolução dos valores de função objetivo ao longo das gerações, das rugosidades obtidas e do erro relativo (ER) da rugosidade em relação

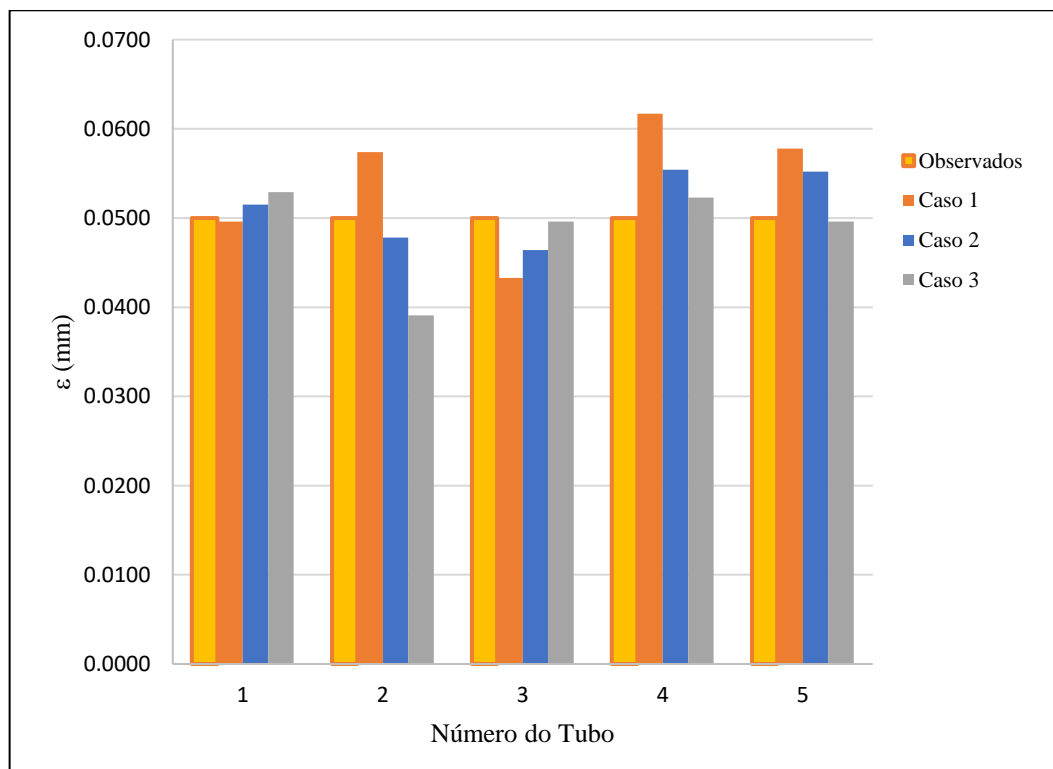
aos valores observados.

Figura 17 - Evolução da função objetivo para os casos com celeridade fictícia na rede 1



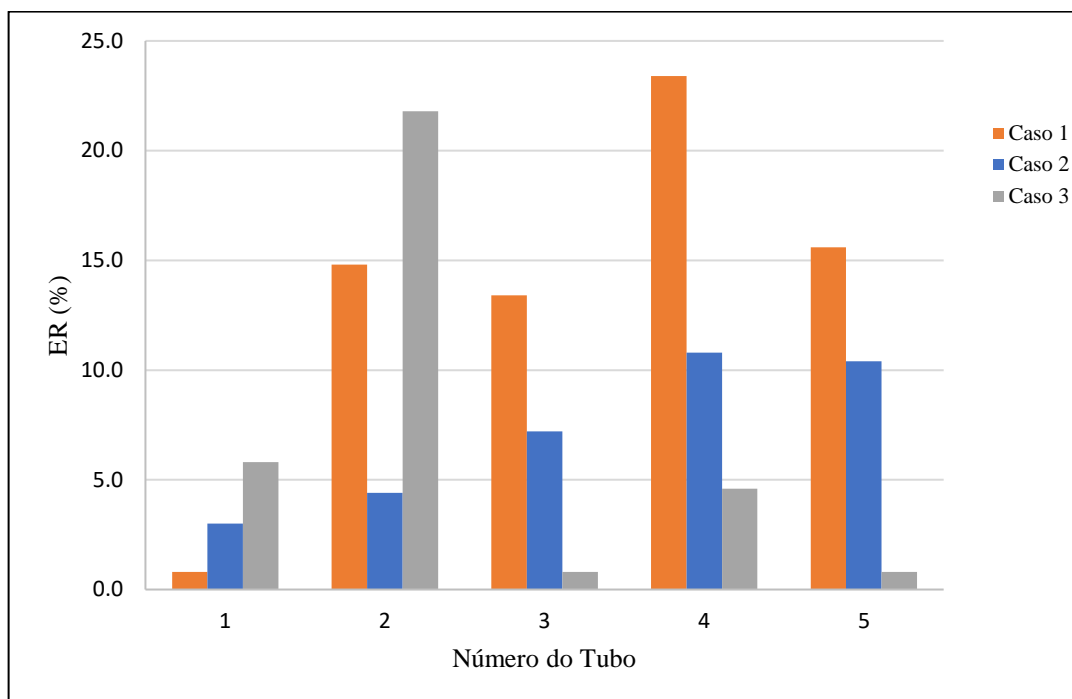
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Rugosidades observadas e calculadas para celeridade fictícia na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Erros relativos da rugosidade para celeridade fictícia na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a celeridade fictícia, conforme observado nas figuras 18 e 19, apoiadas pelas tabelas 12 e 13, o caso 1 de soluções, que foi o melhor caso no teste dos parâmetros do algoritmo genético, apresentou o pior valor dentre as três soluções. Apesar de apresentar um resultado muito satisfatório no tubo 1, nos demais tubos o caso 1 apresentou desvios muito grandes, com erros sempre acima de 13%, conforme a tabela 13, visto também na discrepância do gráfico da figura 15. Além disso, a figura 17 e a tabela 14 mostram uma função objetiva muito maior comparada às dos outros dois casos de celeridade fictícia. No gráfico da figura 19 percebe-se, também, que, com exceção do tubo 1, onde o caso 1 rendeu resultados satisfatórios, e do tubo 2, onde o caso 3 foi o pior - embora o caso 1 também tenha apresentado um resultado de simulação muito distante da rugosidade observada - o caso 1 sempre apresentou os maiores erros.

Já o caso 2 apresentou erros baixos, principalmente nos dois primeiros tubos, mas também erros altos (>10%) nos dois últimos tubos. No gráfico da figura 18, a barra do caso 2 se distancia da barra da rugosidade observada, mas não tanto quanto o caso 1 nos últimos tubos. Seu erro relativo, conforme visto na figura 19, também está sempre entre as outras duas soluções, com exceção do tubo 2, onde apresentou, de forma absoluta, o menor erro.

O caso 3, por fim, apresentou erros bem baixos, com exceção do tubo 2, onde apresentou o pior resultado, conforme a figura 19. Na tabela 13, pode se ver erros menores de 6%, com destaque para os tubos 3 e 5, onde os erros foram menores que 1%. Na figura 17, os

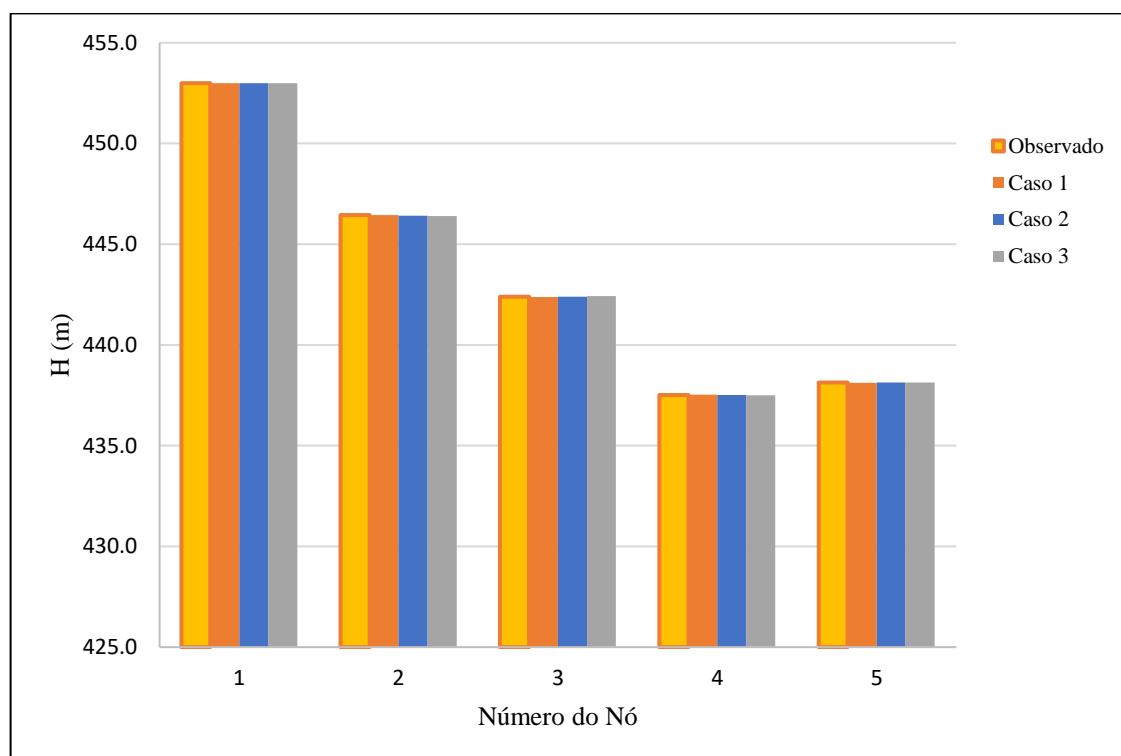
valores da função objetivo do caso 3 abaixam muito nas últimas simulações, enquanto os dos outros casos tendiam a aumentar.

Utilizando os valores de rugosidade simulados, foram recalculadas as cargas e vazões permanentes e transientes. Os resultados estão nos gráficos das figuras 20 a 27. Os valores de carga e vazão transientes se encontram no apêndice A.

A diferença nas rugosidades calculadas não refletiu no cálculo da nova carga permanente. Todos os valores de carga deram muito próximos à carga observada, que foi calculada anteriormente utilizando os valores reais de rugosidade, conforme a figura 20. O caso 2 apresentou, em geral, os menores erros para carga permanente, embora todos os casos tenham apresentados erros claramente desprezíveis ($<0.015\%$) de acordo com a figura 21

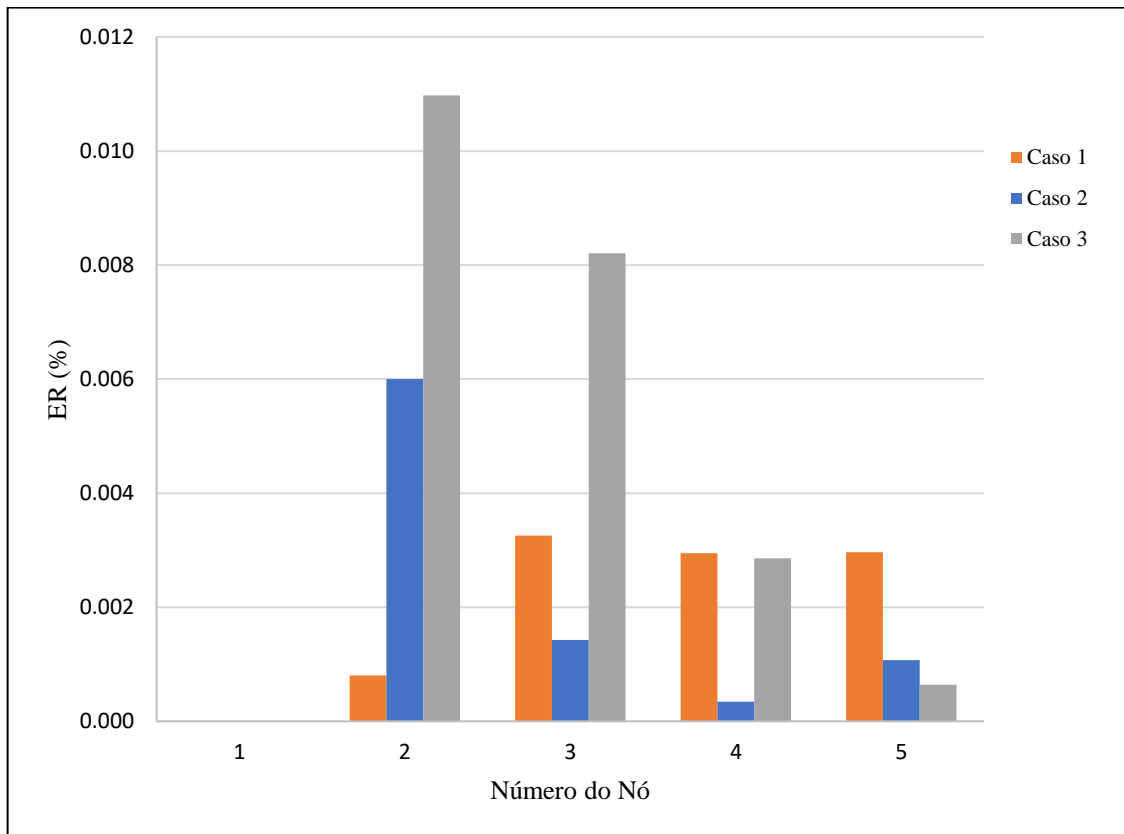
Os resultados das novas cargas permanentes também ecoaram nos resultados das cargas transientes. Na gráfico de carga ao longo do tempo para o nó monitorado (no caso, nó 5), na figura 22, as curvas dos 3 casos e da carga observada praticamente se sobrepõem. Na figura 23, observando o gráfico dos erros relativos para as novas cargas transientes, fica claro que o caso 1 tem os maiores erros em quase toda a simulação, enquanto os casos 2 e 3 quase sempre possuem erros parecidos, com alguns casos em que os erros do caso 2 são significativamente maiores. Ainda assim, os erros são irrisórios, sempre menores que 0.005% .

Figura 20 – Novas cargas em regime permanente da celeridade fictícia na rede 1



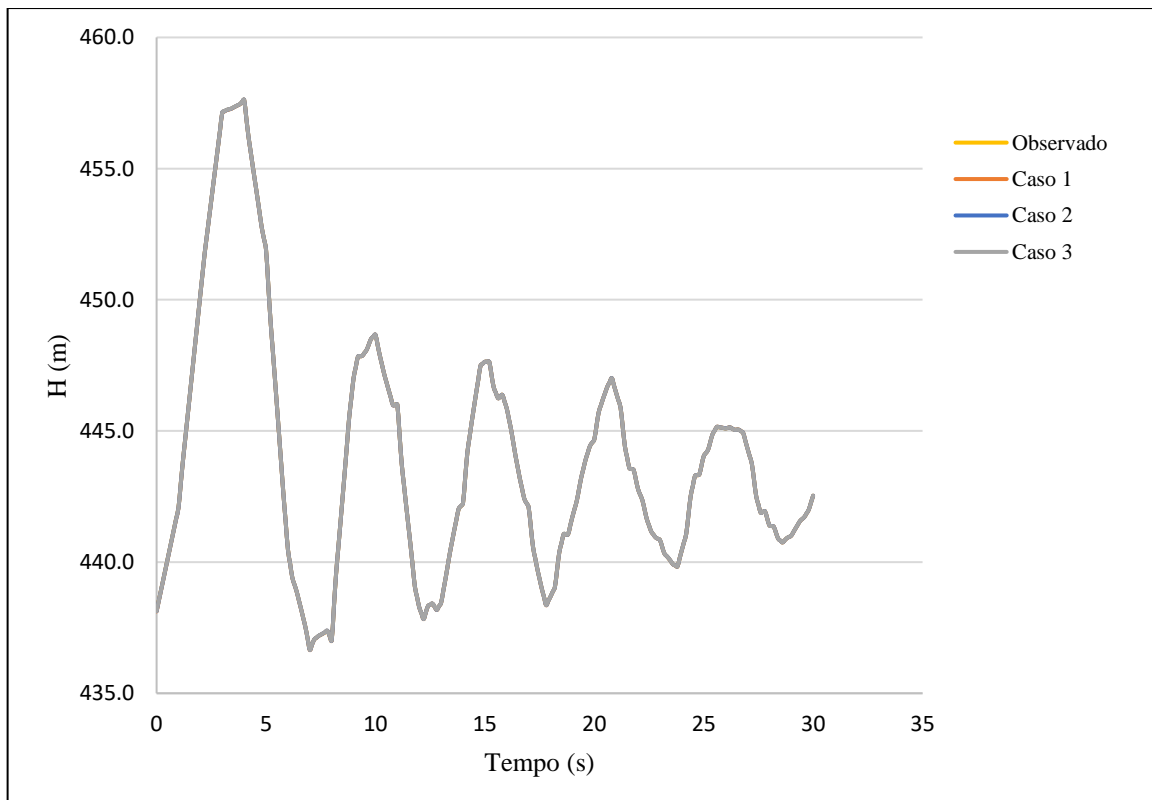
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade fictícia da rede 1



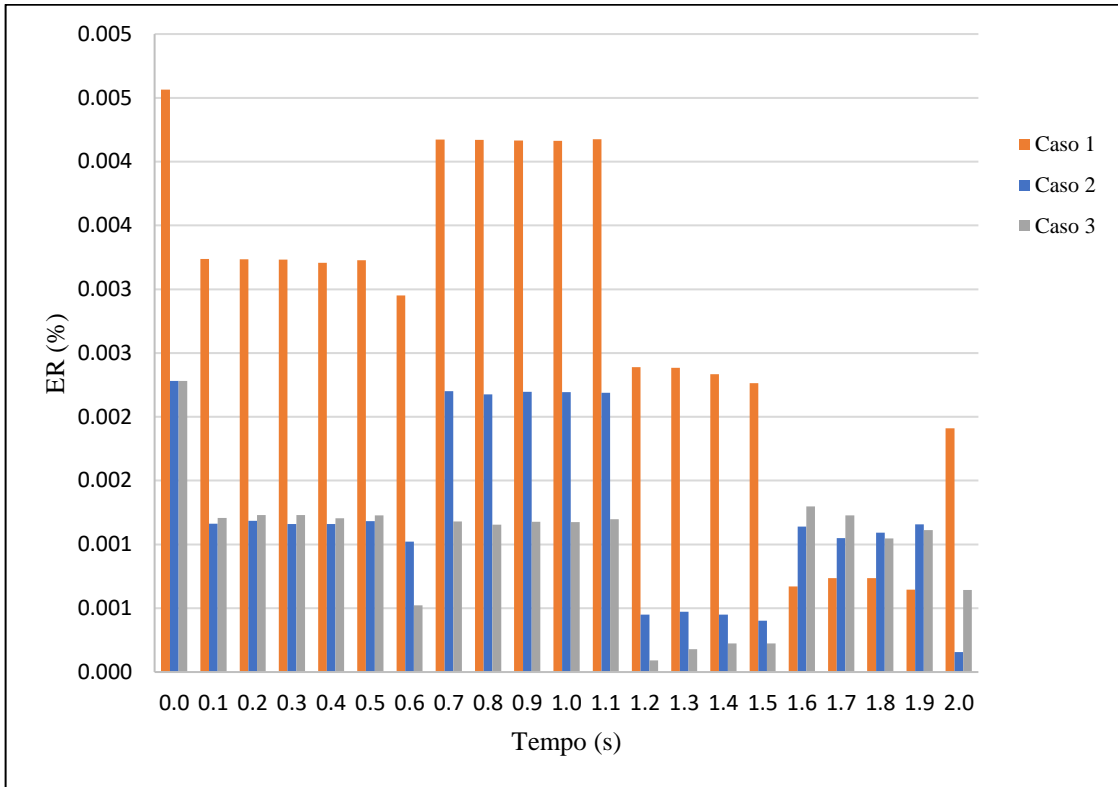
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Novas cargas hidráulicas transiente no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 1



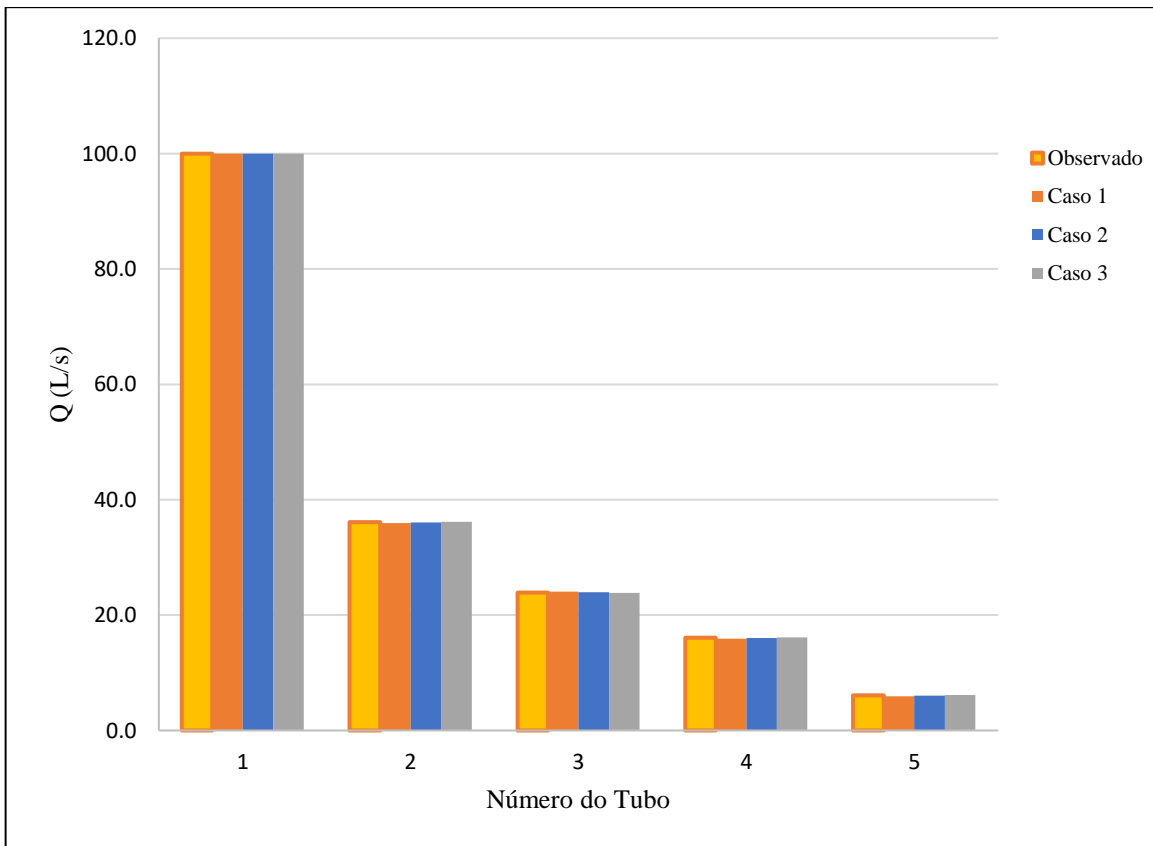
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 1



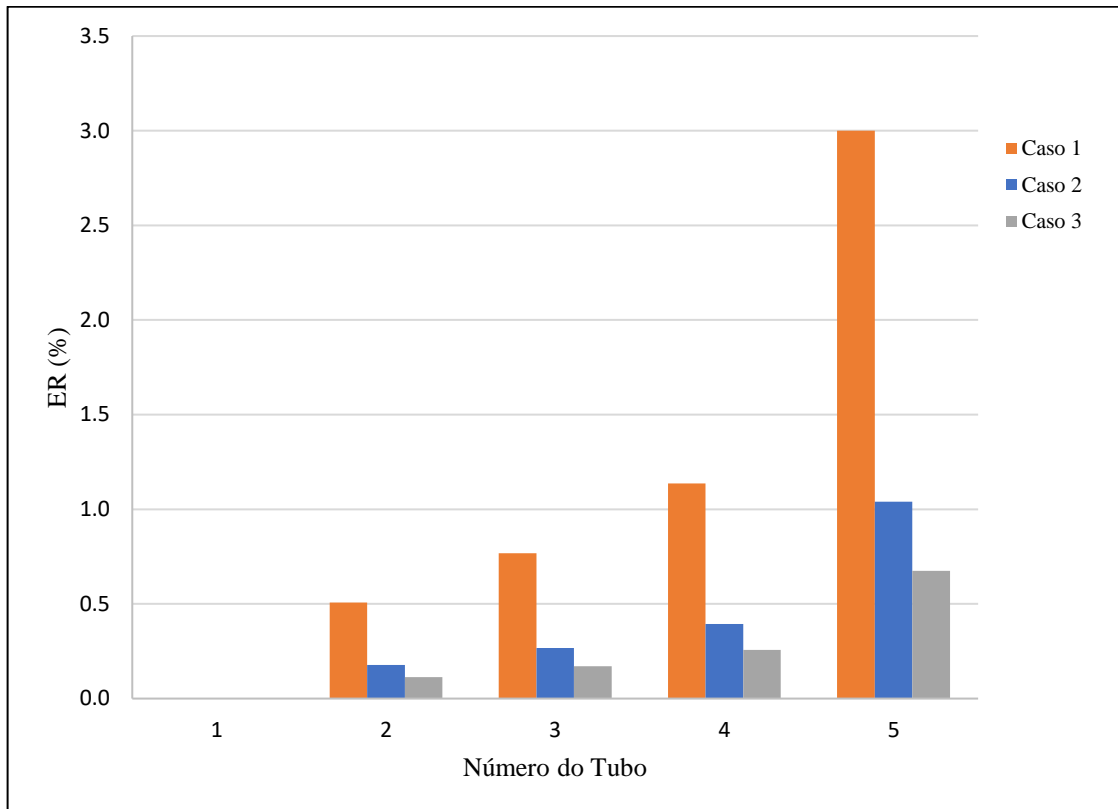
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Novas vazões em regime permanente da celeridade fictícia na rede 1



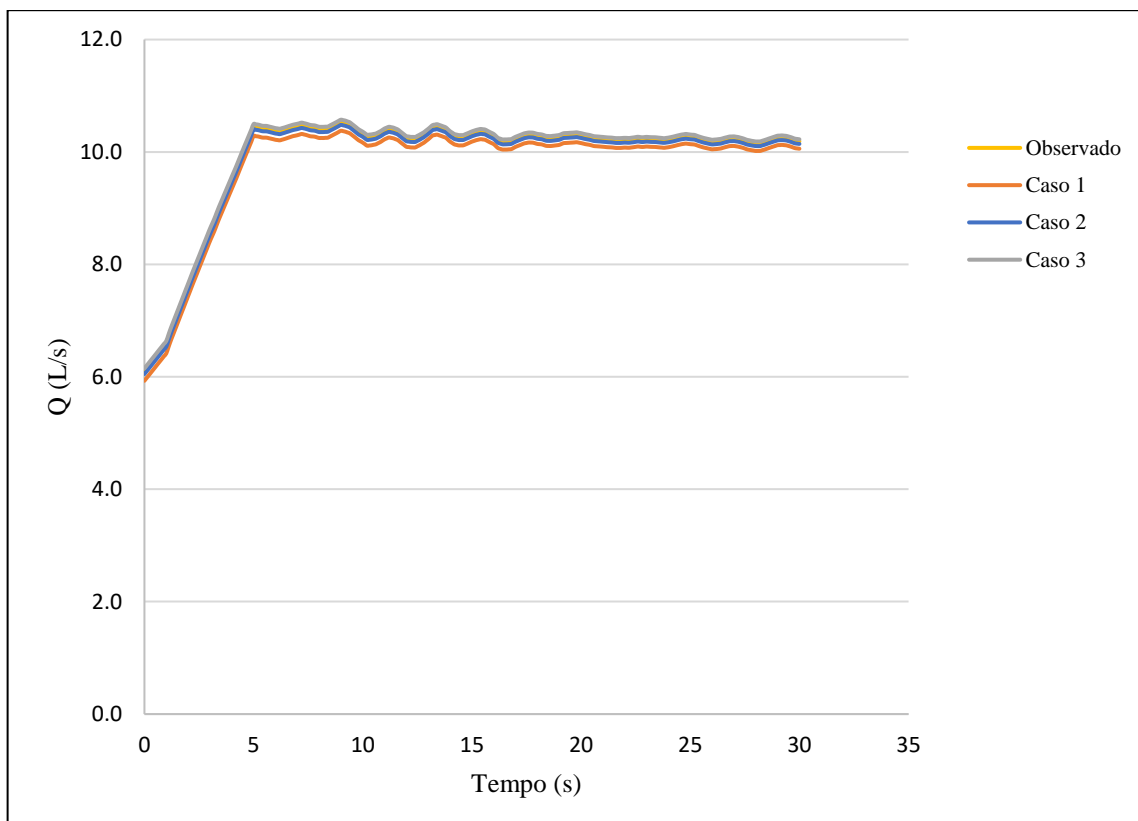
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Erro relativo das novas vazões permanentes da celeridade fictícia na rede 1



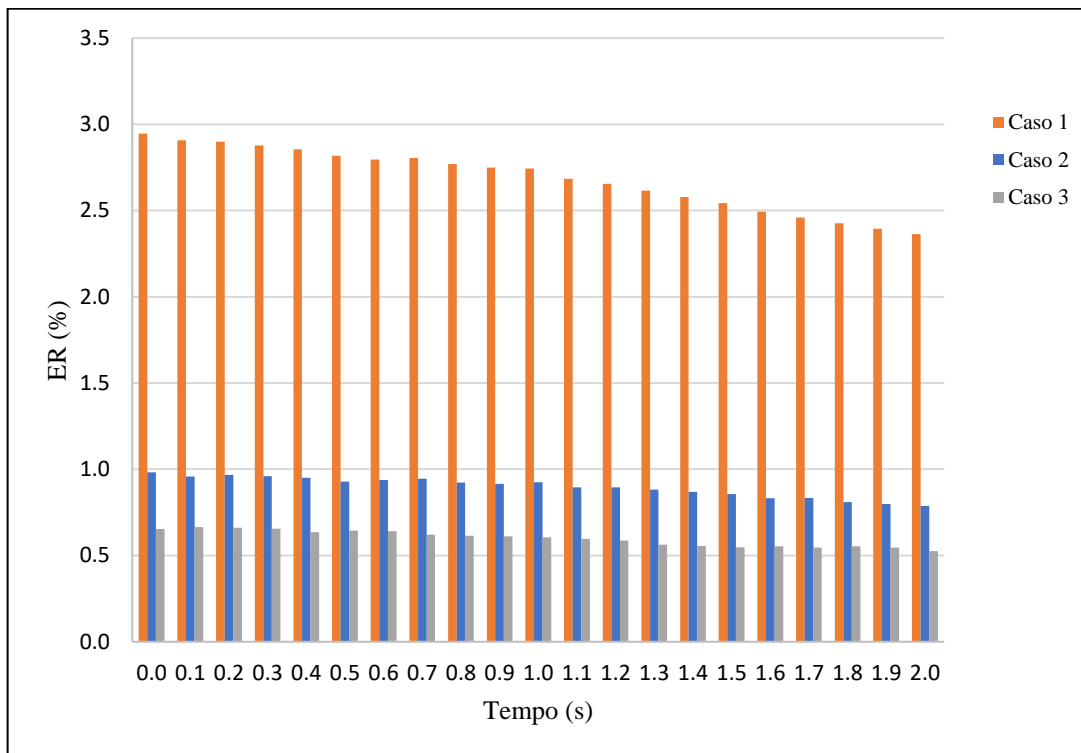
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade fictícia na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade fictícia na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo das novas vazões em regime permanente, realizado juntamente das cargas permanentes, o comportamento desta se mantém. Todos os casos praticamente atingem os mesmos valores da carga observada, conforme a figura 24. Quando se analisa os erros relativos, porém, encontra-se valores mais significantes. Analisando a tabela 25, curiosamente, o erro cresce com o aumento do número de identificação do tubo, quando as vazões vão diminuindo. Isso deve ocorrer porque quanto menor o valor total, maior o peso de um valor fixo de erro, ainda que pequeno. O caso 1 possui sempre os maiores erros relativos. Em seguida vem o caso 2 e depois o caso 3. No tubo 5, para o caso 1, o erro chega a 3%. Mesmos com erros maiores comparados às cargas em regime permanente, eles ainda são desprezíveis.

No cálculo da nova vazão transiente, mais uma vez observa-se diferenças mais significantes comparado ao cálculo das novas cargas transientes. Na figura 26, embora as curvas estejam bem próximas, elas não se sobrepõem como no outro caso. Na figura 27, os valores maiores de erro relativo se mantêm, sempre com o caso 1 com os maiores erros, seguido do caso 2. Ainda assim os erros, sempre menores que 3%, são muito pequenos.

5.4.1.2 Celeridade Real

Na tabela 15 encontram-se os resultados das simulações que possuem melhor função

objetivo para cada caso da celeridade real, levando em conta as melhores gerações de cada um dos processamentos.

Tabela 15 - Rugosidades calculadas para celeridade real na rede 1

TUBO	ϵ_{est} (mm) - CASO 4	ϵ_{est} (mm) - CASO 5	ϵ_{est} (mm) - CASO 6
1	0.0514	0.0518	0.0517
2	0.0550	0.0474	0.0435
3	0.0420	0.0473	0.0489
4	0.0586	0.0530	0.0537
5	0.0609	0.0578	0.0506

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 16 encontram-se os erros absolutos e relativos das rugosidades de cada caso para celeridade real e na 17 estão as funções objetivo para os três casos na celeridade real.

Tabela 16 - Erros na rugosidade nos casos de celeridade real na rede 1

TUBO	CASO 4		CASO 5		CASO 6	
	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO
1	0.0014	2.8 %	0.0018	3.6 %	0.0017	3.4 %
2	0.0050	10.0 %	0.0026	5.2 %	0.0065	13.0 %
3	0.0080	16.0 %	0.0027	5.4 %	0.0011	2.2 %
4	0.0086	17.2 %	0.0030	6.0 %	0.0037	7.4 %
5	0.0109	21.8 %	0.0078	15.6 %	0.0006	1.2 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

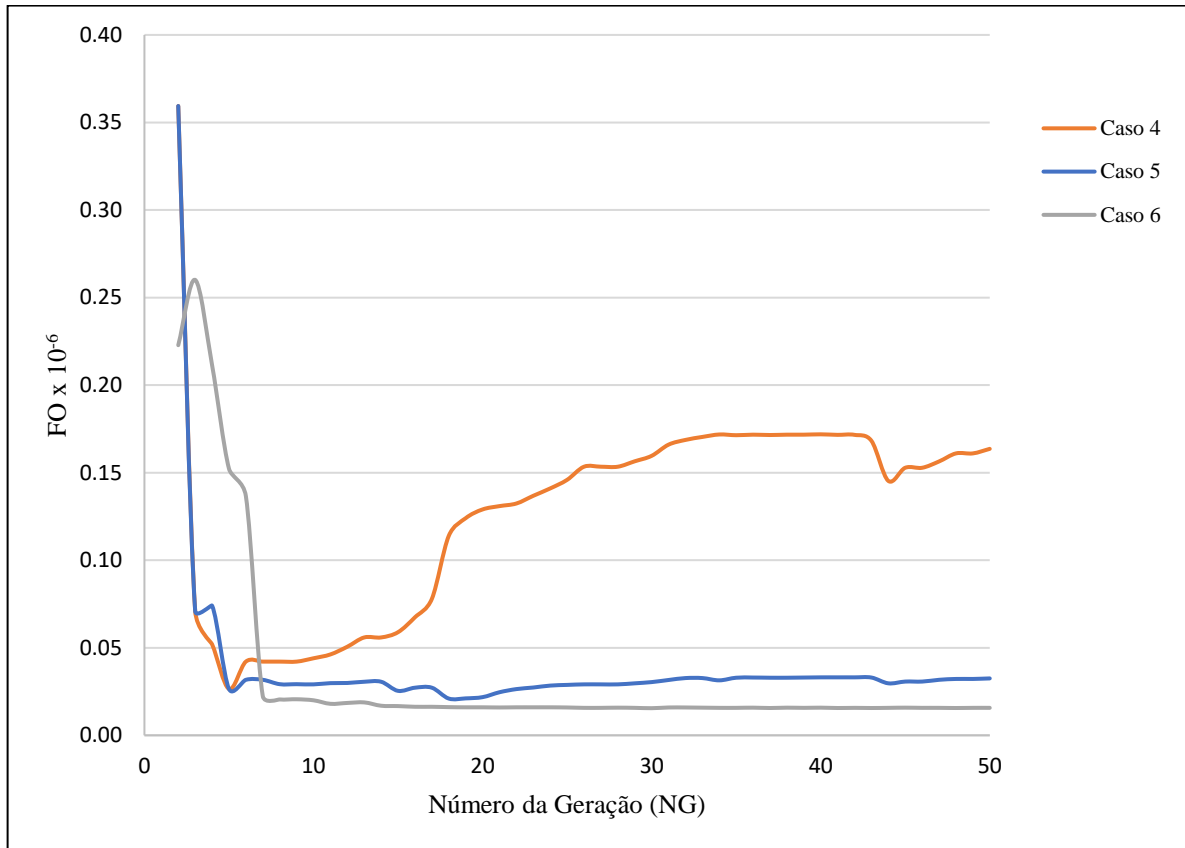
Tabela 17 - Funções objetivo dos casos de celeridade real na rede 1

CASO	FUNÇÃO OBJETIVO
4	0.00000002650
5	0.00000002100
6	0.00000001550

Fonte: Elaborado pelo autor.

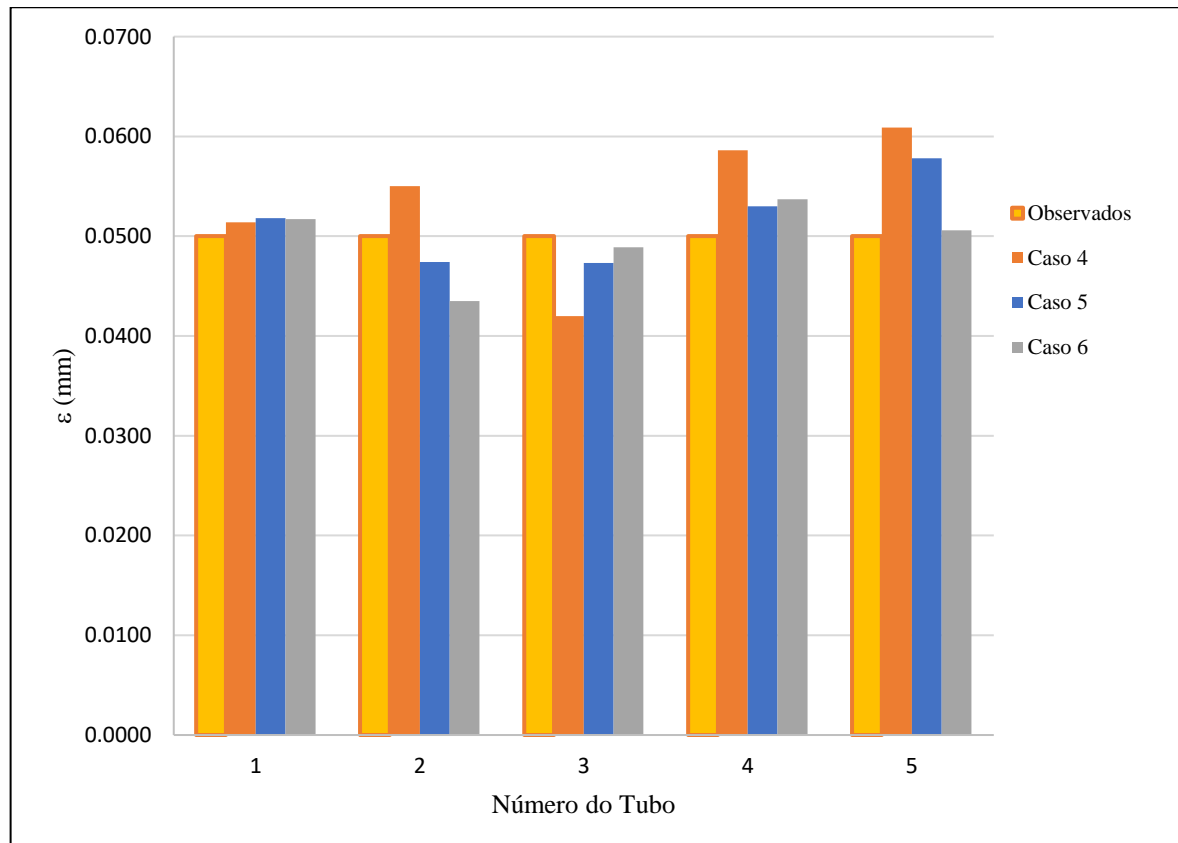
Com estes resultados apresentados para celeridade real, eles foram organizados no gráfico das figuras 28, 29 e 30.

Figura 28 - Evolução da função objetivo para os casos de celeridade real na rede 1



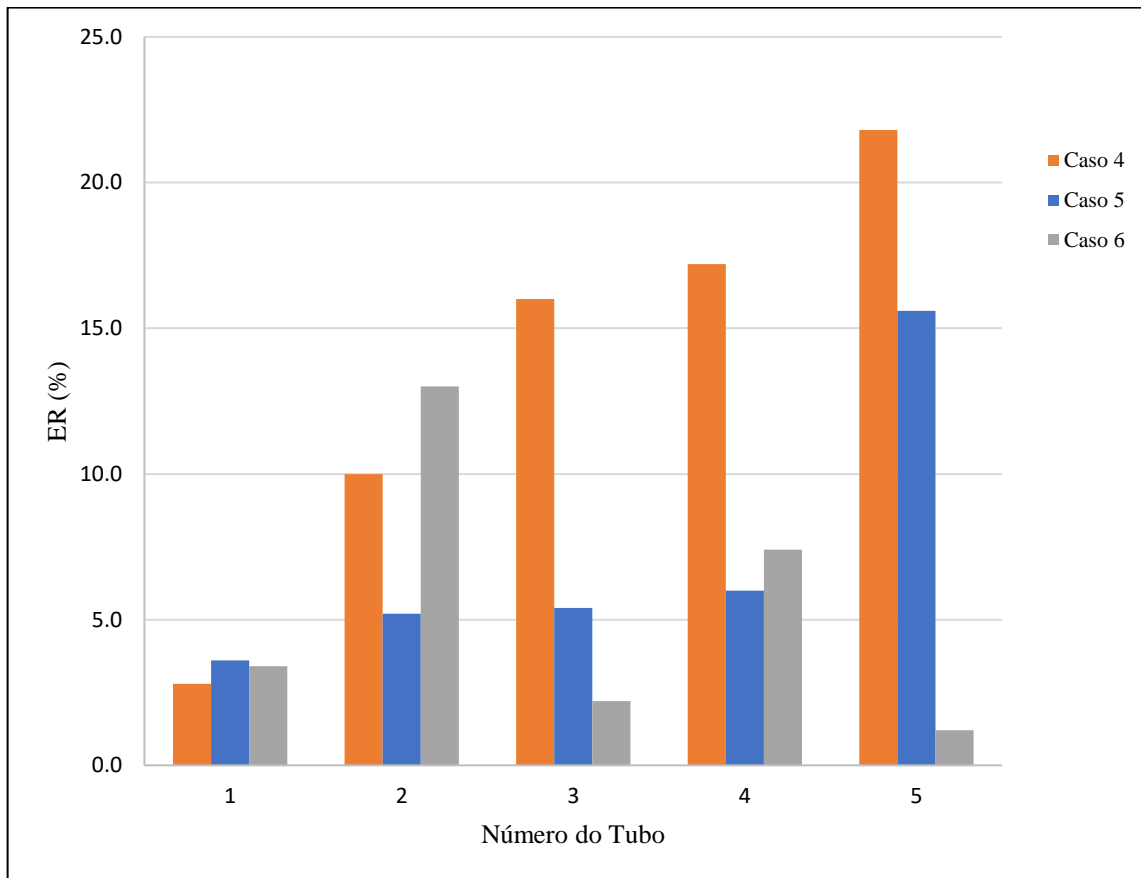
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Rugosidades observadas e calculadas para celeridade real na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Erros relativos da rugosidade para celeridade real na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste tipo de cálculo o caso 4 obtém resultados muito distantes dos valores observados, sendo possível perceber através das tabelas 15 e 16. Para a maioria dos tubos, os resultados do caso 4 apresentaram erros superiores ou iguais a 10%. A exceção foi o tubo 1, que apresentou um bom resultado. A função objetivo do caso 4 também foi superior à dos demais casos podendo ser observada pelo gráfico da figura 28, onde sua função objetivo tendeu a subir bastante com o passar das gerações. Pelos gráficos 29 e 30 percebe-se o quanto os resultados deste caso ficam distantes dos demais casos, exceto pelo tubo 1, onde todos os resultados foram bem próximos. No tubo 2, o caso 6 ainda gerou resultados com erros maiores que o caso 1.

O caso 5, por sua vez, gerou resultados, em geral, mais próximos das rugosidades observadas. Exceto pelo tubo 5, os erros foram de, no máximo, 6%. No tubo 5, ainda, embora o erro de 15% seja considerado acima da maioria dos resultados, ainda é um erro menor que o do caso 1 para o mesmo tubo. Observando a figura 29, a barra do caso 5 também se mostra bem mais próxima à dos valores observados. Pelo gráfico da figura 30, em alguns casos o erro do caso 5 é o menor dentre os três para este tipo de celeridade.

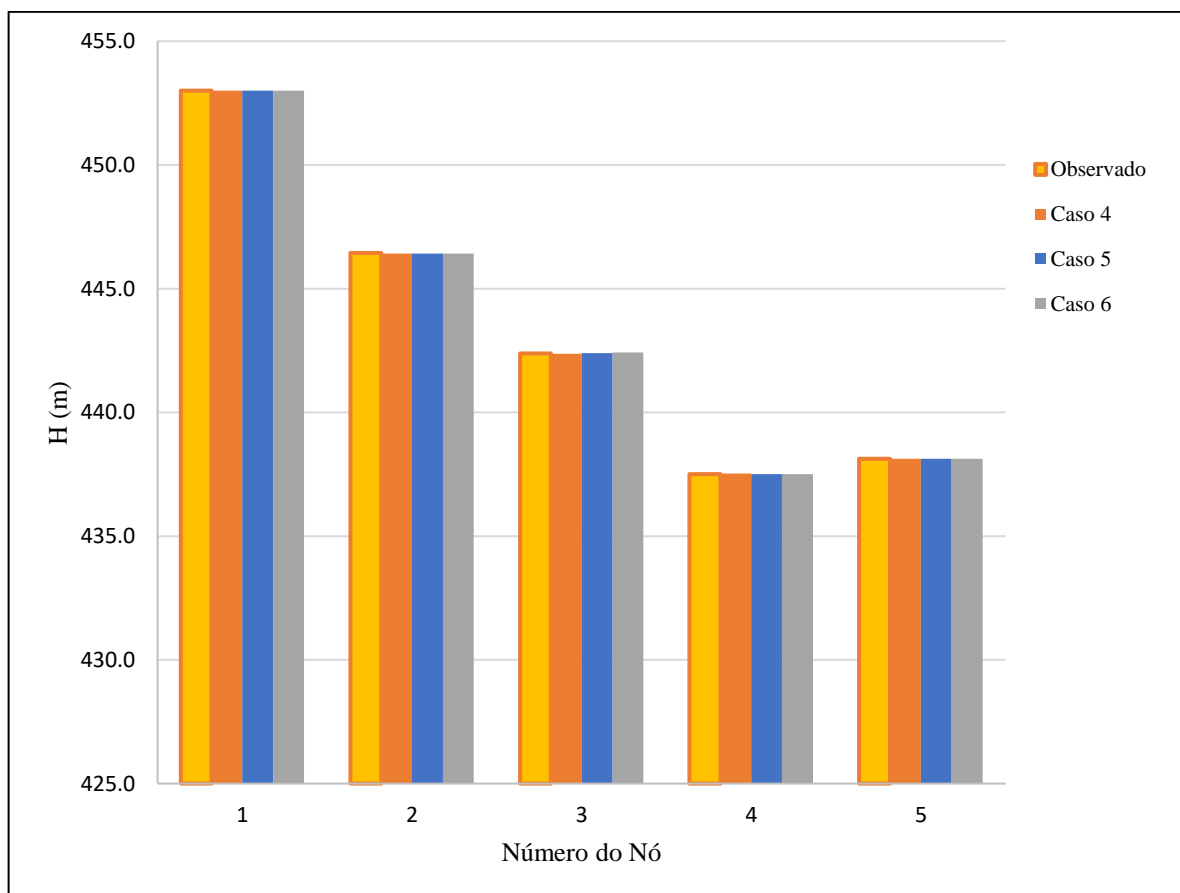
Por último, no caso 6 acontece semelhante ao caso 5. A maioria dos tubos gerou

resultados satisfatórios, com erros baixos, com exceção de um tubo. No caso 6 o resultado do tubo 2 gerou um erro acima dos demais, de 13%, como visto na tabela 16. Pela tabela 17, vê-se que a função objetivo deste caso foi bem menor que as demais, refletindo, possivelmente, uma melhor atuação do algoritmo. Na figura 29, vê-se que os resultados do caso 6 estão muito mais próximos dos observados para a maioria dos tubos. Nos tubos 3 e 5, os resultados são os mais próximos, enquanto nos tubos 1 e 4 eles estão próximos dos resultados do caso 5, que foi o melhor para estes tubos. A exceção é o tubo 2, onde ele apresentou o maior erro, visto a figura 30.

As rugosidades encontradas foram utilizadas para recalculer cargas e vazões nos regimes permanentes e transientes, assim como na celeridade fictícia. Os resultados estão presentes nas figuras 31 a 38. Cargas e vazões transientes estão no apêndice A.

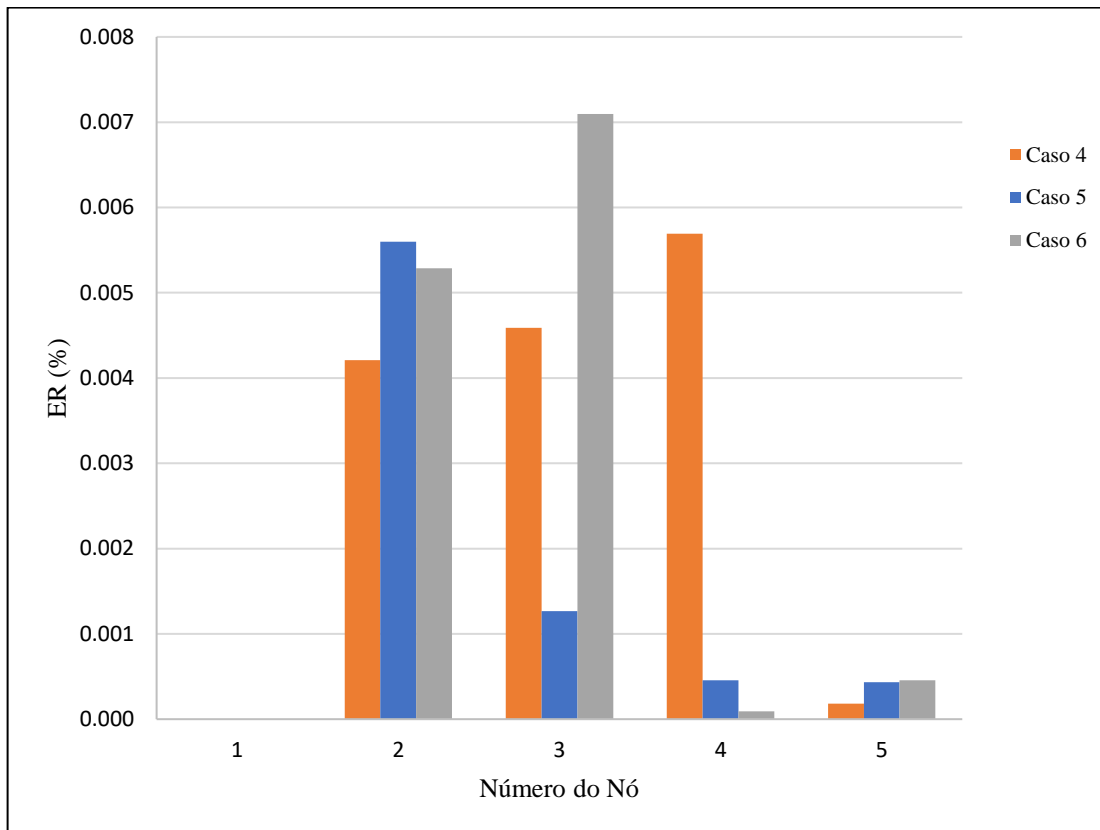
Pela figura 31, os valores recalculados de carga em regime permanente foram praticamente iguais em todos os casos. Pela figura 32, observa-se uma variabilidade nos erros, onde cada um deles gerou resultados com o maior erro nos tubos 2, 3 e 4. Ainda assim, os erros foram muito baixos ($<0.008\%$), menores ainda que os casos com celeridade fictícia.

Figura 31 – Novas cargas em regime permanente da celeridade real na rede 1



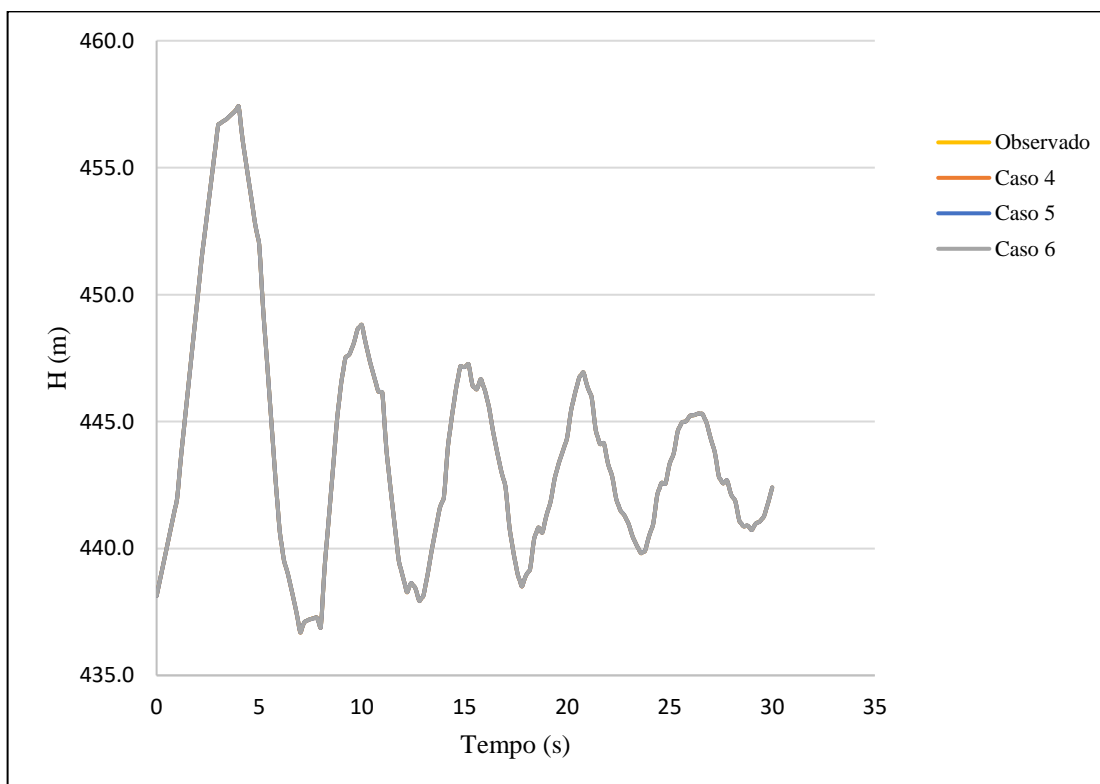
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade real da rede 1



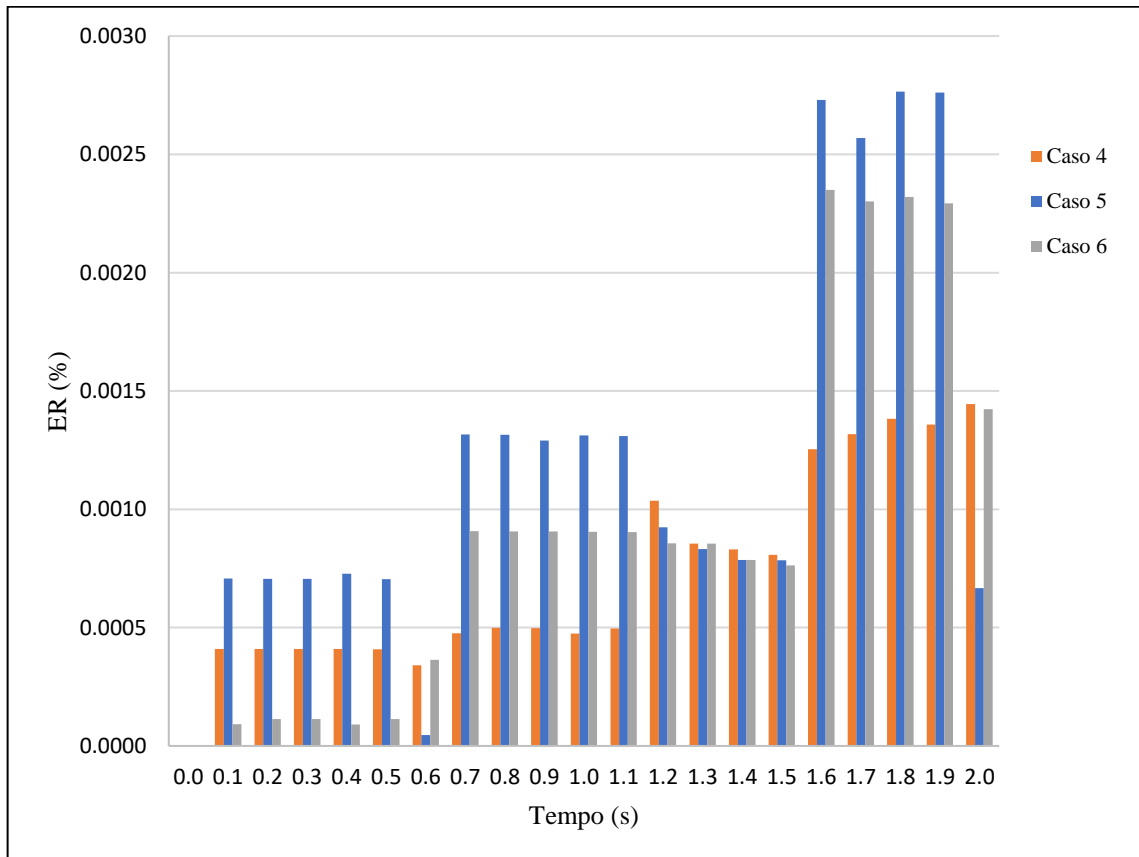
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Novas cargas hidráulicas em regime transiente no nó monitorado para celeridade real na rede 1



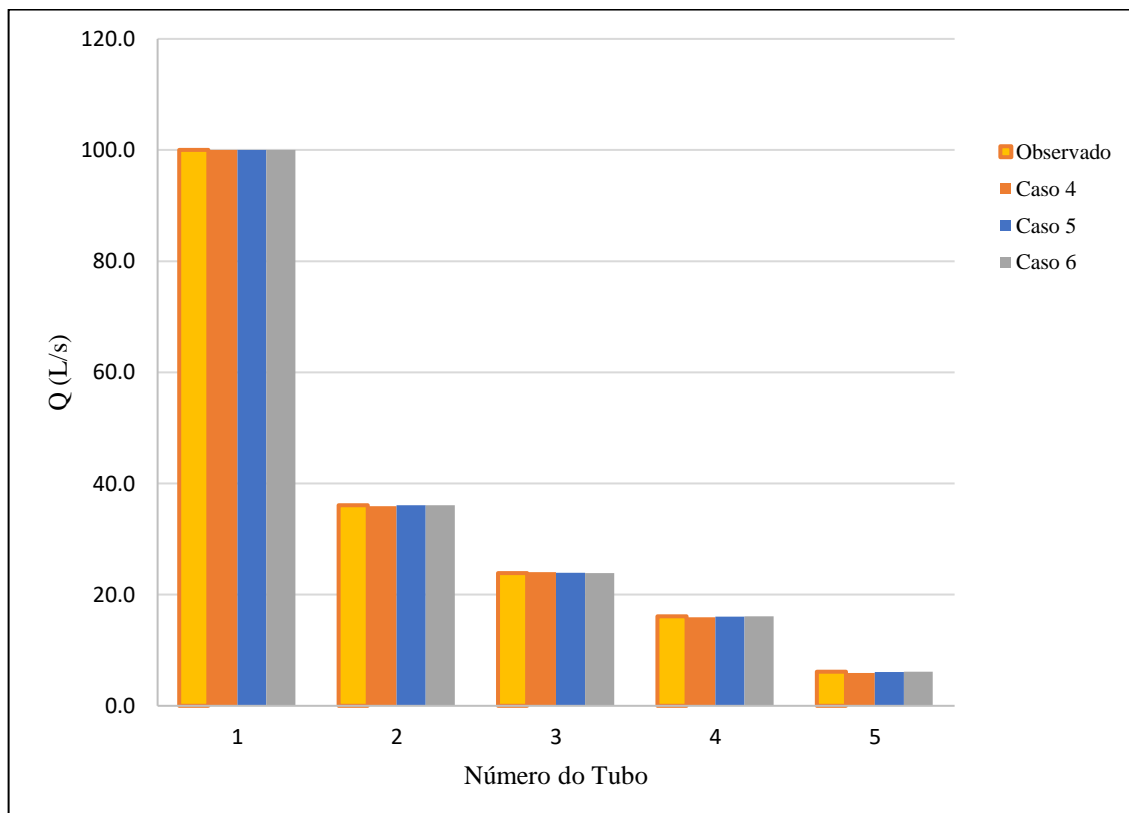
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade real na rede 1



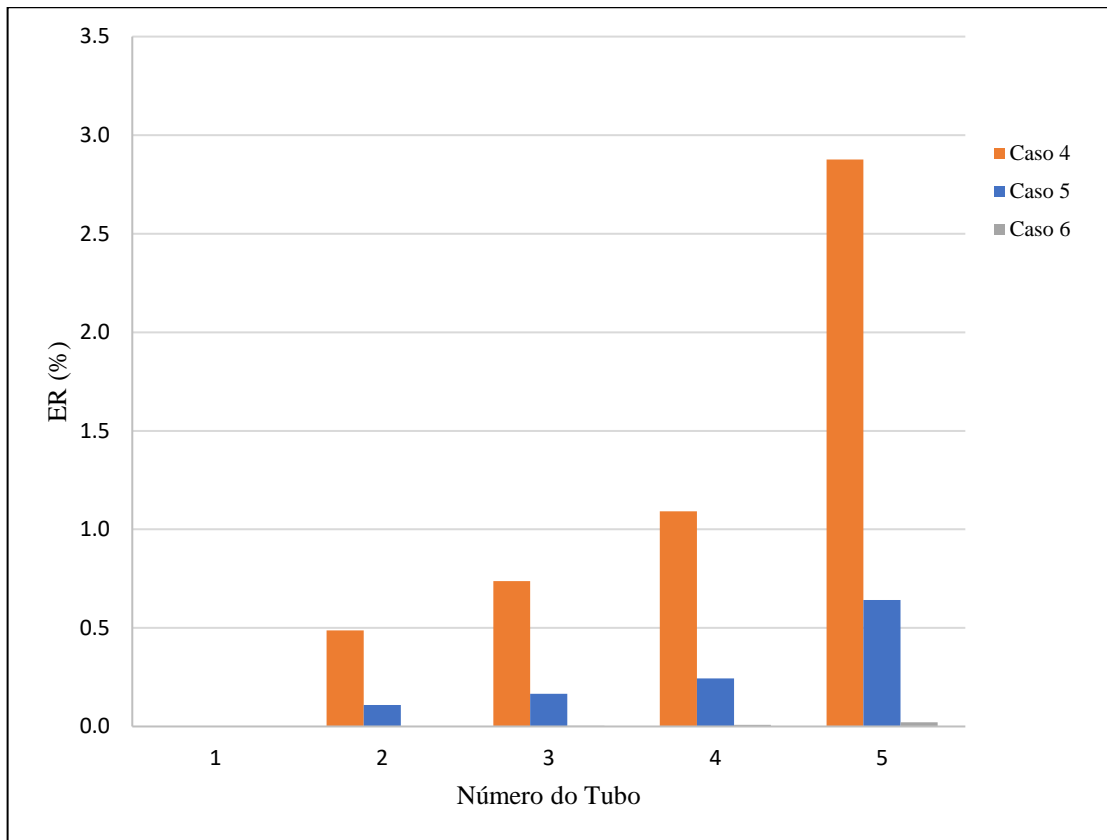
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Novas vazões em regime permanente da celeridade real na rede 1



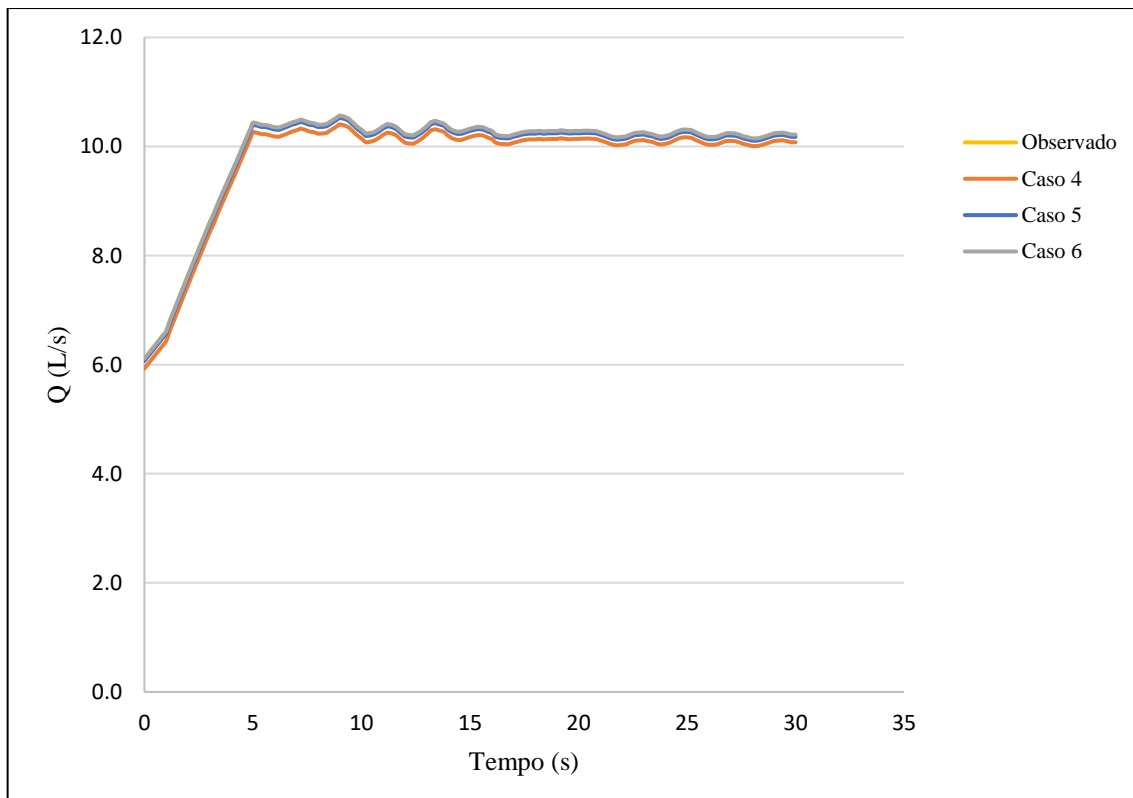
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Erro relativo das novas vazões em regime permanente da celeridade real na rede 1



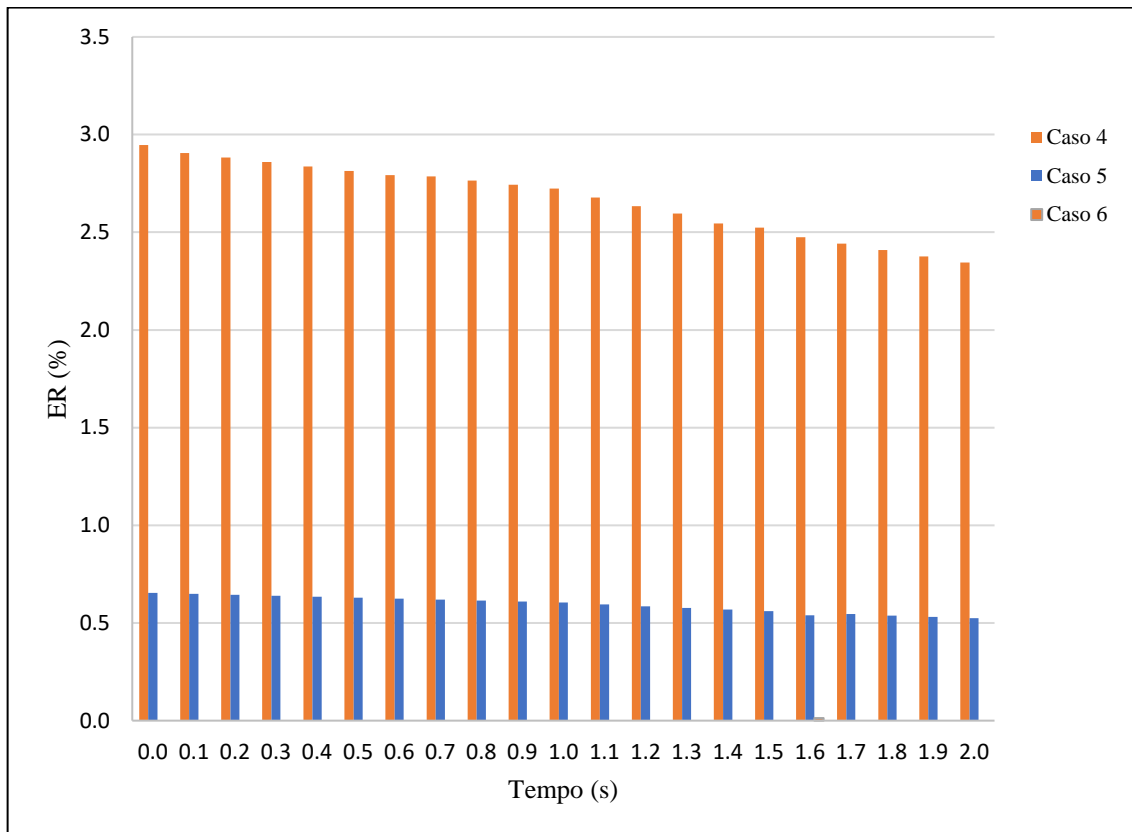
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade fictícia na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade real na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as cargas transientes, as curvas também foram quase sobrepostas, conforme a figura 33. Pela figura 34, em quase todos os momentos o caso 5 apresentou os maiores erros, com os segundos maiores erros sendo divididos entre os casos 4 e 6. Novamente os erros foram muito baixos, abaixo de 0.003%.

Pela figura 35, mesmo comportamento aconteceu para as vazões permanentes, onde os maiores erros, de acordo com a figura 36, foram sempre no caso 4, enquanto os menores estiveram sempre no caso 6. Neste caso os erros foram um pouco mais significantes, chegando próximos a 3%, mas ainda muito pequenos. O mesmo comportamento dos casos de celeridade fictícia pode ser observado, com o erro de cada caso sempre crescendo com o índice dos tubos.

Para a vazão em regime transiente, as curvas também ficaram bem próximas, de acordo com a figura 37. Pela figura 38, vê-se os maiores erros também sempre no caso 4 e os menores no caso 6.

Essas análises das várias soluções do problema permitem observar o impacto das mudanças de configuração do AG no resultado obtido, além das diferenças causadas pelas gerações do AG.

Para uma melhor visualização, nas tabelas 18 e 19 estão, respectivamente, os valores

das rugosidades e erro relativo da rugosidade.

Tabela 18 - Rugosidades da rede 1

TUBO	RUGOSIDADE (mm)					
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
1	0.0496	0.0515	0.0529	0.0514	0.0518	0.0517
2	0.0574	0.0478	0.0391	0.0550	0.0474	0.0435
3	0.0433	0.0464	0.0496	0.0420	0.0473	0.0489
4	0.0617	0.0554	0.0523	0.0586	0.0530	0.0537
5	0.0578	0.0552	0.0496	0.0609	0.0578	0.0506

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 - Erro relativo da rugosidade na rede 1

TUBO	ERRO RELATIVO					
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
1	0.8 %	3.0 %	5.8 %	2.8 %	3.6 %	3.4 %
2	14.8 %	4.4 %	21.8 %	10.0 %	5.2 %	13.0 %
3	13.4 %	7.2 %	0.8 %	16.0 %	5.4 %	2.2 %
4	23.4 %	10.8 %	4.6 %	17.2 %	6.0 %	7.4 %
5	15.6 %	10.4 %	0.8 %	21.8 %	15.6 %	12 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

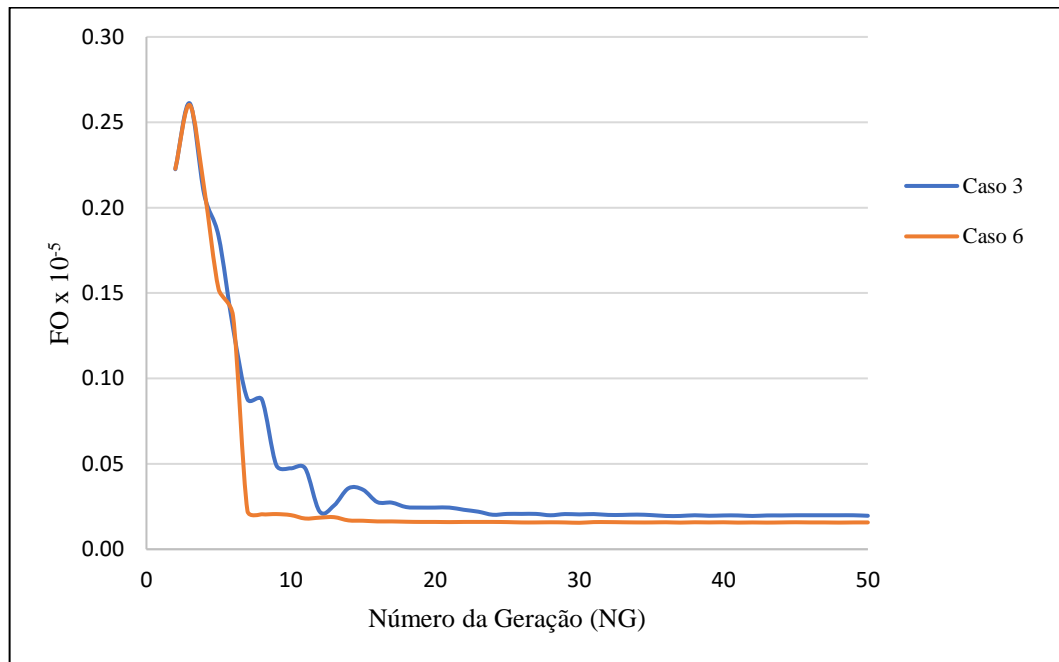
5.4.1.3 Menores Funções Objetivo

Feita a comparação dentro de cada tipo de celeridade, em seguida analisam-se e comparam-se os valores de função objetivo dentro de cada tipo para definir que solução vai caracterizar cada celeridade. Em seguida, os valores de rugosidade, carga e vazão serão comparados para que se possa observar o impacto causado devido ao tipo de cálculo utilizado.

Baseando-se nas tabelas 14 e 17, que contêm as funções objetivo de cada solução, observa-se que os casos 3 e 6 são os mais indicados para representarem, respectivamente, as celeridades fictícia e real por terem as menores funções objetivos.

A figura 39 contém a evolução da função objetivo ao longo das gerações para a melhor solução de cada tipo de celeridade (casos 3 e 6).

Figura 39 - Evolução da função objetivo para os casos 3 e 6 da rede 1

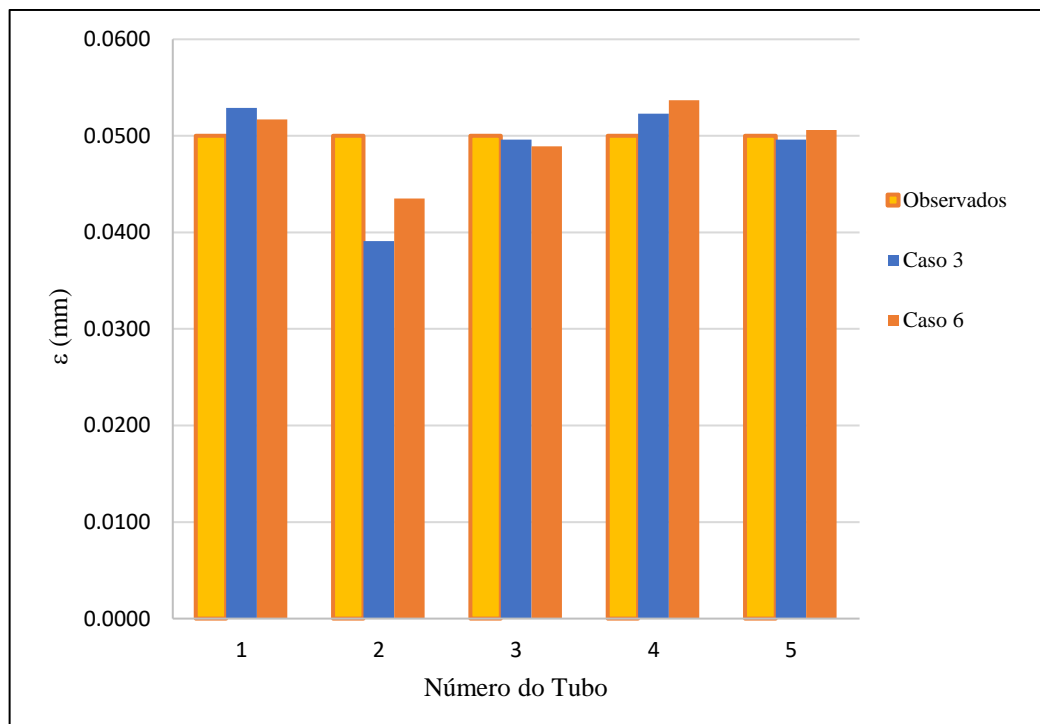


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 39, vê-se um comportamento semelhante entre as funções objetivo, tendo uma rápida queda nas primeiras gerações e quedas mais lentas nas últimas.

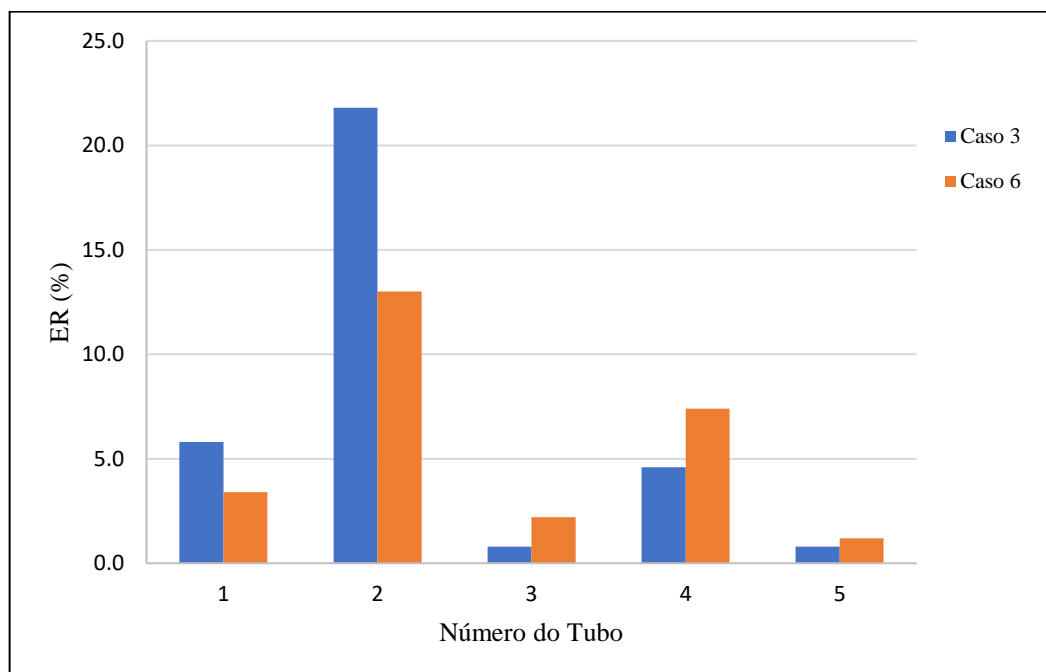
Na figura 40 encontra-se os valores de rugosidade para os casos 3 e 6 em comparação com valores observados. Através do gráfico, pode-se fazer as comparações de desempenho de ambos os casos. Na figura 41 está o gráfico com valores de erro relativo na rugosidade.

Figura 40 - Rugosidade absoluta para os casos 3 e 6 da rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Erro relativo na rugosidade para os casos 3 e 6 na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 40, um comportamento bem semelhante também é encontrado nos valores de rugosidade dos dois casos. Os maiores erros, sem dúvida, estão no tubo 2, como mostrado também na figura 41. Na maioria dos tubos, o caso 3 apresenta os menores erros. Contudo, no tubo 2 existe um erro muito maior para o caso 3. Em geral, porém, as rugosidades estão próximas.

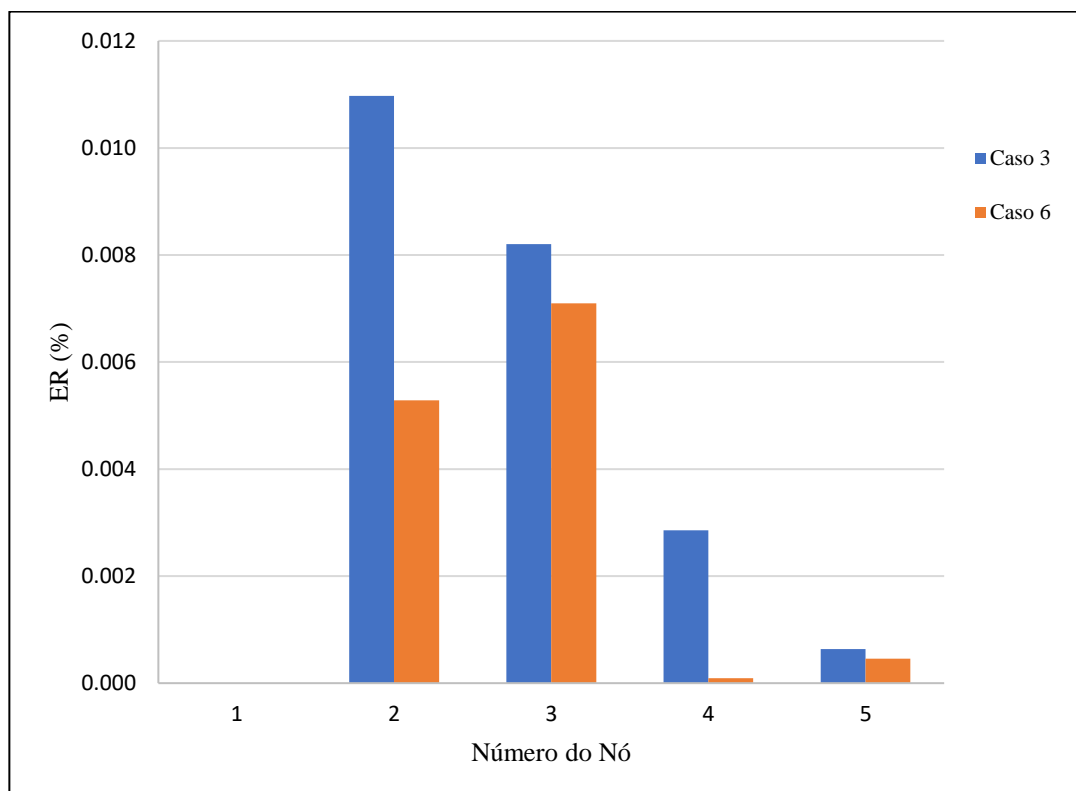
Foram realizados, também, novos cálculos para os valores de carga e vazão nos regimes permanente e transiente utilizando os casos 3 e 6, em comparação com os valores observados pelo cálculo utilizando suas respectivas celeridades. Na tabela 20 estão estes valores para carga em regime permanente, enquanto na figura 42 está o gráfico contendo os erros relativos em comparação com valores observados de carga em regime permanente.

Tabela 20 - Carga em regime permanente observados e estimados para os casos 3 e 6 na rede 1

NÓ	OBSERVADO (m)		ESTIMADO (m)		ERRO RELATIVO (%)	
	Cel. Fictícia	Cel. Real	Caso 3	Caso 6	Caso 3	Caso 6
1	453.00	453.00	453.00	453.00	0.0000	0.0000
2	446.45	446.42	446.44	446.41	0.0110	0.0053
3	442.39	442.42	442.39	442.39	0.0082	0.0071
4	437.52	437.51	437.51	437.50	0.0029	0.0001
5	438.14	438.13	438.13	438.14	0.0006	0.0005

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Erro relativo na carga em regime permanente na rede 1 para casos 3 e 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelos valores da tabela 20 e o gráfico da figura 42, observa-se valores praticamente idênticos dos dois casos com os observados em suas respectivas celeridades para a carga em regime permanente. Os erros das cargas, entretanto, são sempre maiores para o caso 3, embora sejam muito pequenos. Para as cargas em regime transiente, foi calculado o erro médio relativo dos valores ao longo de toda a simulação, cujo transiente já foi mostrado nos gráficos 22 e 33. Estes valores, entretanto, são muito pequenos e bem próximos, podendo ser desconsideradas suas diferenças.

Já na tabela 21 estão os valores de erro médio relativo para os casos 3 e 6 nos valores de carga hidráulica em regime transiente, levando em conta os 100 passos de tempo da simulação. Os valores de carga e vazão transientes se encontram no apêndice A.

Tabela 21 - Erro médio relativo da carga em regime transiente para casos 3 e 6 na rede 1

	CASO 3	CASO 6
EMR (%)	0.00060	0.00053

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores presentes na tabela 21 apontam um menor erro médio para carga em regime transiente para o caso 6.

Na tabela 22 estão os valores para vazão em regime permanente, enquanto na figura 43 está o gráfico com os erros relativos em comparação com a carga observada em regime permanente.

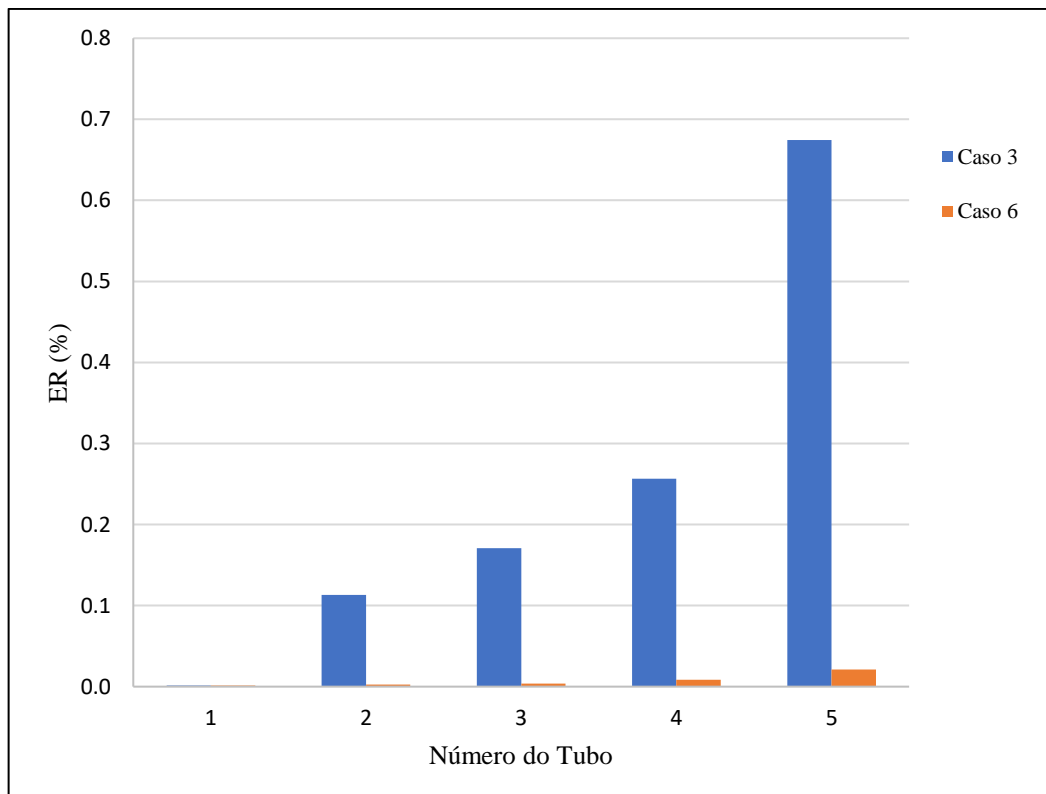
Tabela 22 – Vazões permanentes observadas e estimadas para casos 3 e 6 na rede 1

NÓ	OBSERVADO (l/s)		ESTIMADO (l/s)		ERRO RELATIVO (%)	
	Cel. Real	Cel. Fictícia	Caso 3	Caso 6	Caso 3	Caso 6
1	100.00	100.00	100.00	100.00	0.0012	0.0013
2	36.11	36.11	36.15	36.11	0.1133	0.0028
3	23.89	23.89	23.85	23.89	0.1708	0.0038
4	16.11	16.11	16.15	16.11	0.2564	0.0087
5	6.11	6.11	6.15	6.11	0.6743	0.0213

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mesmo comportamento dos novos valores de carga permanente pode ser observado para a vazão permanente, como mostrado na tabela 22. Os valores recalculados são próximos aos observados, com erros muito pequenos, mas sempre muito maiores para o caso 3.

Figura 43 - Erro relativo na vazão em regime permanente para casos 3 e 6 na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 43 observa-se os erros para a vazão permanente recalculada. Nela vê-se os erros muito maiores para o caso 3.

Por sua vez, na tabela 23 estão os valores de erro médio relativo para os casos 1 e 6 nos valores de vazão em regime transiente, levando em conta os 100 passos de tempo da simulação.

Tabela 23 - Erro médio relativo da vazão em regime transiente para casos 3 e 6 da rede 1

	CASO 3	CASO 6
EMR (%)	0.38847	0.04144

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mostrado na tabela 23, os erros relativos de vazão em regime permanente são menores para o caso 3, diferentemente dos erros de vazão em regime permanente, que são sempre muito maiores nesse caso.

Por fim, na tabela 24, encontram-se todos os valores relevantes para comparação entre os casos 3 e 6 que foram abordados, para melhor visualização

Tabela 24 - Tabela resumo para os casos 3 e 6 da rede 1

CASOS	EMR (%) DA RUGOSIDADE	EMR (%) DA CARGA PERMANENTE	EMR (%) DA CARGA TRANSIENTE	EMR (%) DA VAZÃO PERMANENTE	EMR (%) DA VAZÃO TRANSIENTE	FUNÇÃO OBJETIVO ($\times 10^{-6}$)
3	6.76	0.00454	0.00060	0.24318	0.38847	0.01950
6	5.44	0.00259	0.00053	0.00756	0.04144	0.01550

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mostrado na tabela 24 em muitas das análises os dois resultados são bem próximos, com alguns dos erros sendo maiores para o caso 3 e outros sendo maiores para o caso 4.

5.4.2 Rede 2

5.4.2.1 Celeridade Fictícia

Na tabela 25 estão os resultados da simulação das rugosidades para celeridade fictícia da rede 2.

Tabela 25 - Rugosidades calculadas para celeridade fictícia na rede 2

TUBO	ϵ_{est} (mm) - CASO 1	ϵ_{est} (mm) - CASO 2	ϵ_{est} (mm) - CASO 3
1	0.0562	0.0574	0.0553
2	0.0406	0.0439	0.0397
3	0.0479	0.0470	0.0493
4	0.0466	0.0447	0.0465
5	0.0361	0.0354	0.0326
6	0.0482	0.0366	0.0313
7	0.0509	0.0513	0.0510
8	0.0538	0.0484	0.0591
9	0.0516	0.0534	0.0763
10	0.0123	0.0413	0.0291

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 26 estão os erros nas rugosidades dos casos de celeridade fictícia na rede 2.

Tabela 26 - Erros na rugosidade nos casos de celeridade fictícia na rede 2

TUBO	CASO 1		CASO 2		CASO 3	
	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO (%)	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO (%)	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO (%)
1	0.0062	12.4	0.0074	14.8	0.0553	10.6
2	0.0094	18.8	0.0061	12.2	0.0397	20.6
3	0.0021	4.2	0.0030	6.0	0.0493	1.4
4	0.0034	6.8	0.0053	10.6	0.0465	7.0
5	0.0139	27.8	0.0146	29.2	0.0326	34.8
6	0.0018	3.6	0.0134	26.8	0.0313	37.4
7	0.0009	1.8	0.0013	2.6	0.0510	2.0
8	0.0038	7.6	0.0016	3.2	0.0591	18.2
9	0.0016	3.2	0.0034	6.8	0.0763	52.6
10	0.0377	75.4	0.0087	17.4	0.0291	41.8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na tabela 27 estão os valores das funções objetivo dos três casos analisados para celeridade fictícia.

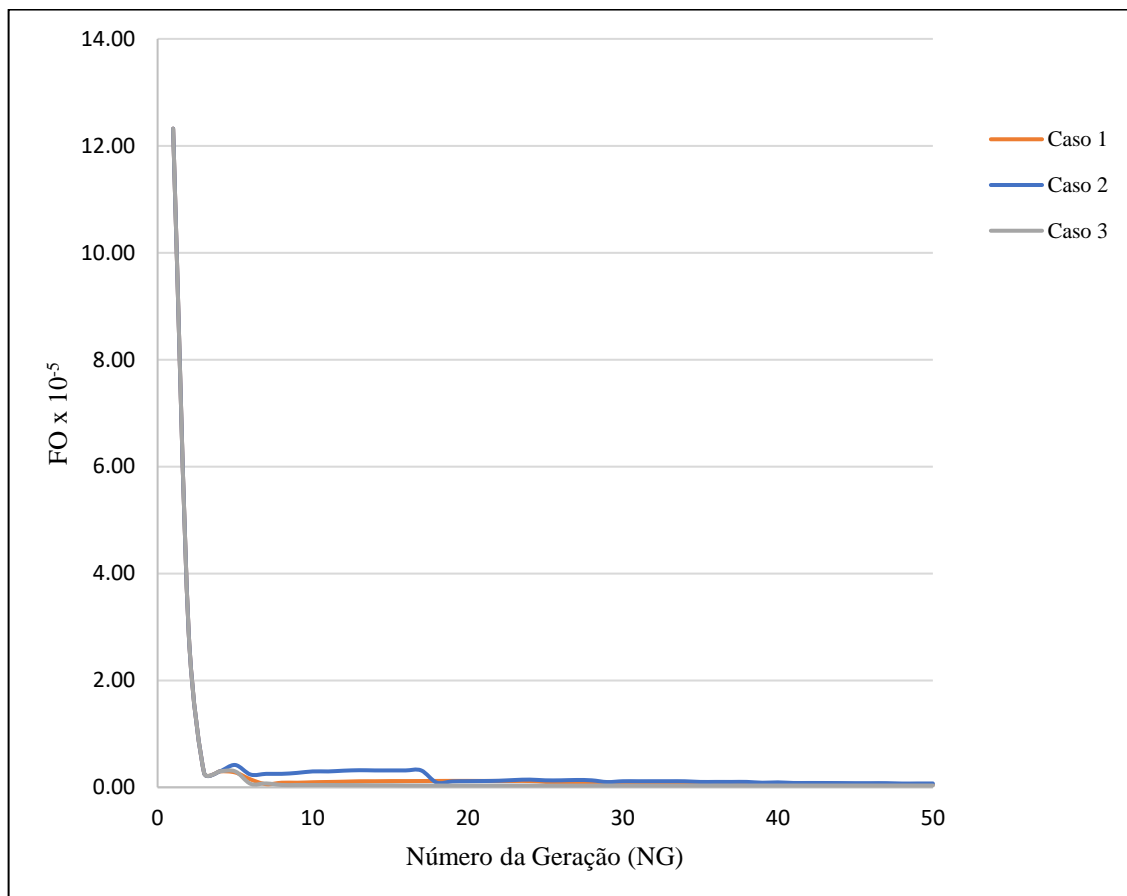
Tabela 27 - Funções objetivo dos casos de celeridade fictícia na rede 2

CASO	FUNÇÃO OBJETIVO
1	0.0000004731
2	0.0000007084
3	0.0000003351

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados para celeridade fictícia da rede 2 foram organizados nos gráficos das figuras 44, 45 e 46.

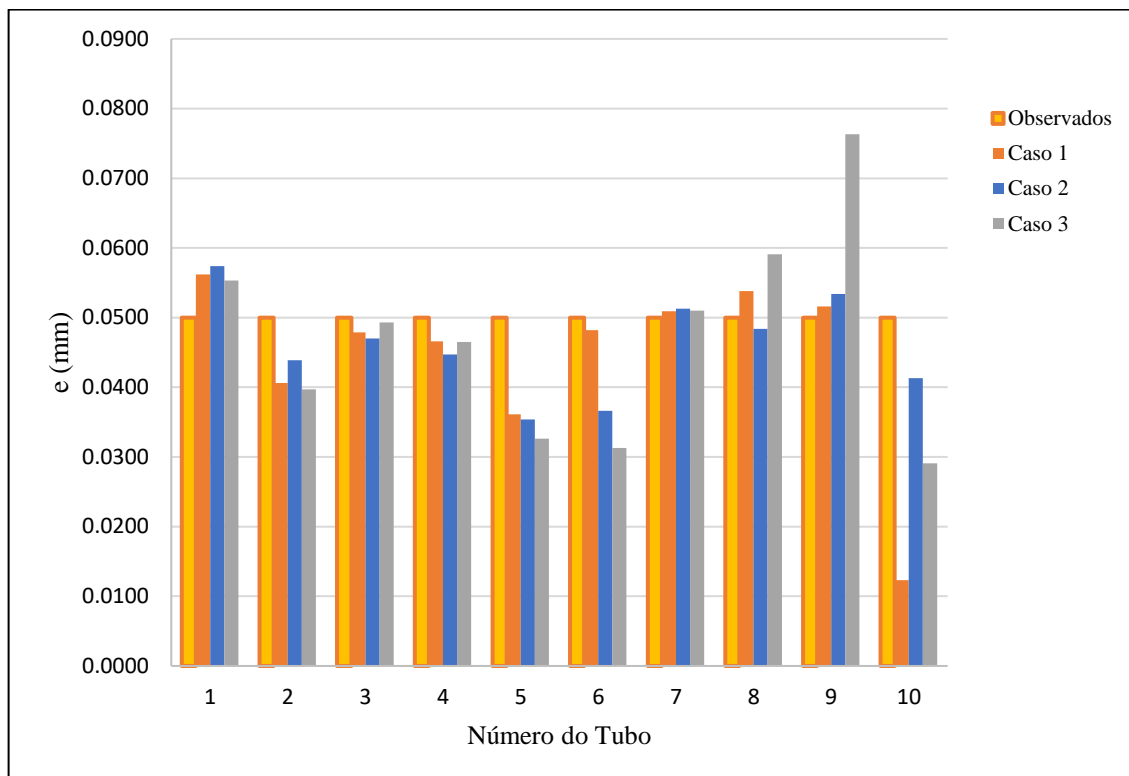
Figura 44 - Evolução da função objetivo para os casos com celeridade fictícia na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

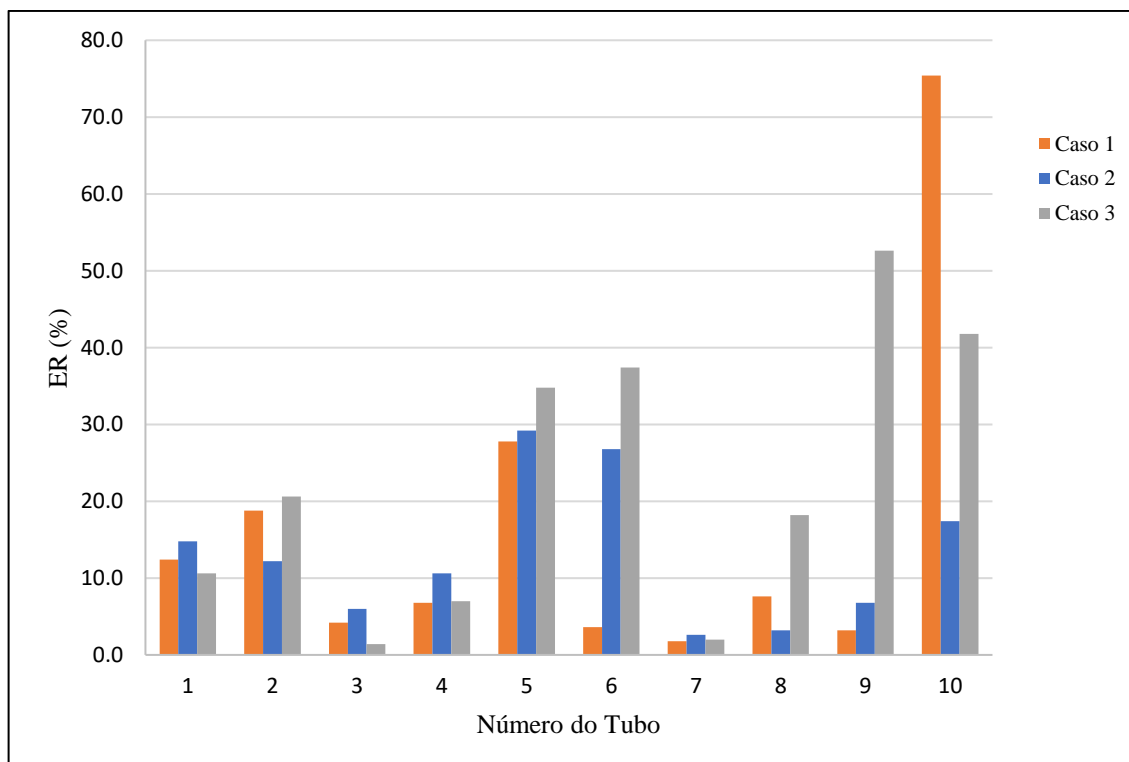
Como visto na figura 44 o comportamento da função objetivo ao longo das gerações é muito semelhante para os três casos de celeridade fictícia, com uma tendência geral a diminuir o valor das FO.

Figura 45 - Rugosidades observadas e calculadas para celeridade fictícia na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Erros relativos na rugosidade para os casos de celeridade fictícia na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em alguns tubos o caso 1 gera rugosidades bem próximas à rugosidade observada,

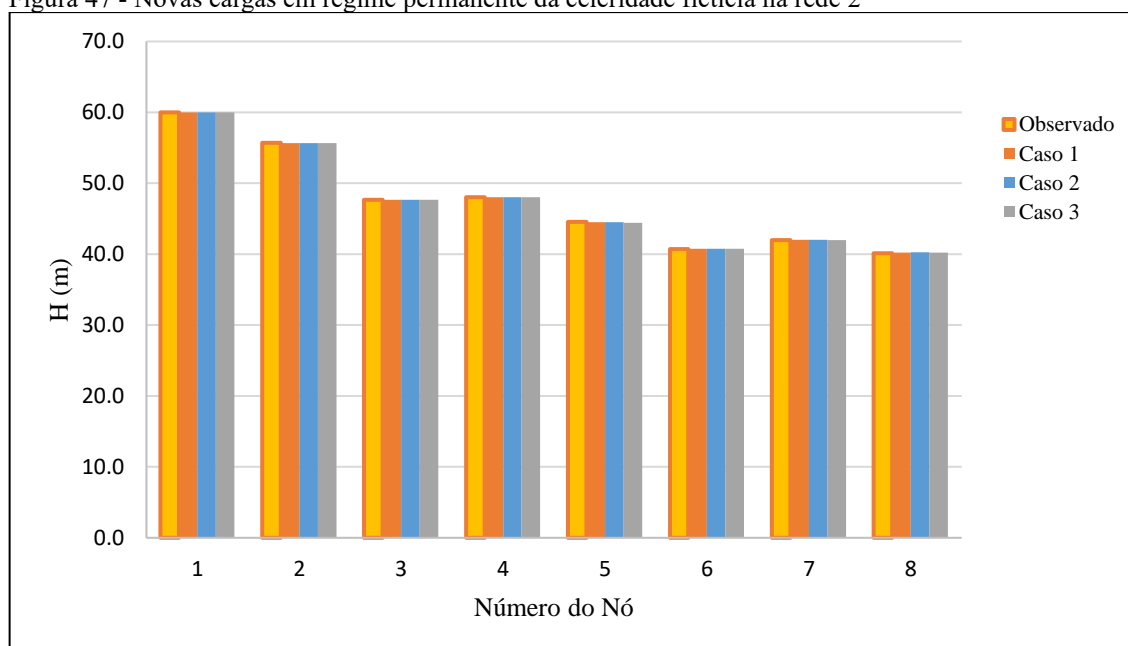
como nos tubos 7 e 8, como mostrado na figura 45. Nos tubos 5 e 10, porém, as rugosidades geradas estão muito abaixo do valor real. A tabela 26 mostra os erros relativos da rugosidade, que são comparados no gráfico da Figura 46. Os erros do caso 1, assim como os demais, oscila bastante com os tubos. Com isso, percebe-se que, com exceção do tubo 10, o erro relativo esteve sempre próximo aos demais, sempre como menor ou segundo menor. A Tabela 27 mostra ainda que o caso 1 possui a segunda menor FO para celeridade fictícia.

Para o caso 2, nota-se pela Tabela 25 e Figura 45 resultados de rugosidade algumas vezes pior que os outros casos concorrentes, como nos tubos 1 e 3. Nos tubos 2, 8 e 10, entretanto, esse caso se destaca dos demais, principalmente no último onde gera a única solução mais satisfatória. Como mostrado na Figura 46, o ER do caso 2 oscila muito entre os tubos, um pouco mais que o caso 1, mas com erros geralmente menores que o caso 3. Pela Tabela 27, vê-se que o caso 2 possui a maior função objetivo entre os três casos para celeridade fictícia.

O caso 3, por sua vez, pela Tabela 27, possui a menor função objetivo. Apesar disso, a Figura 45 e a Tabela 25 mostram valores de rugosidades muito afastados dos valores observados para alguns tubo, mostrando uma vantagem sobre os demais casos apenas nos tubos 1 e 3. Na Figura 46 e Tabela 26 vê-se erros absolutos e relativos muito altos, sendo na maioria dos tubos o maior entre todos os casos. Apesar disso, apenas no tubo 9 há um distanciamento maior no erro do caso 3 com relação aos outros casos.

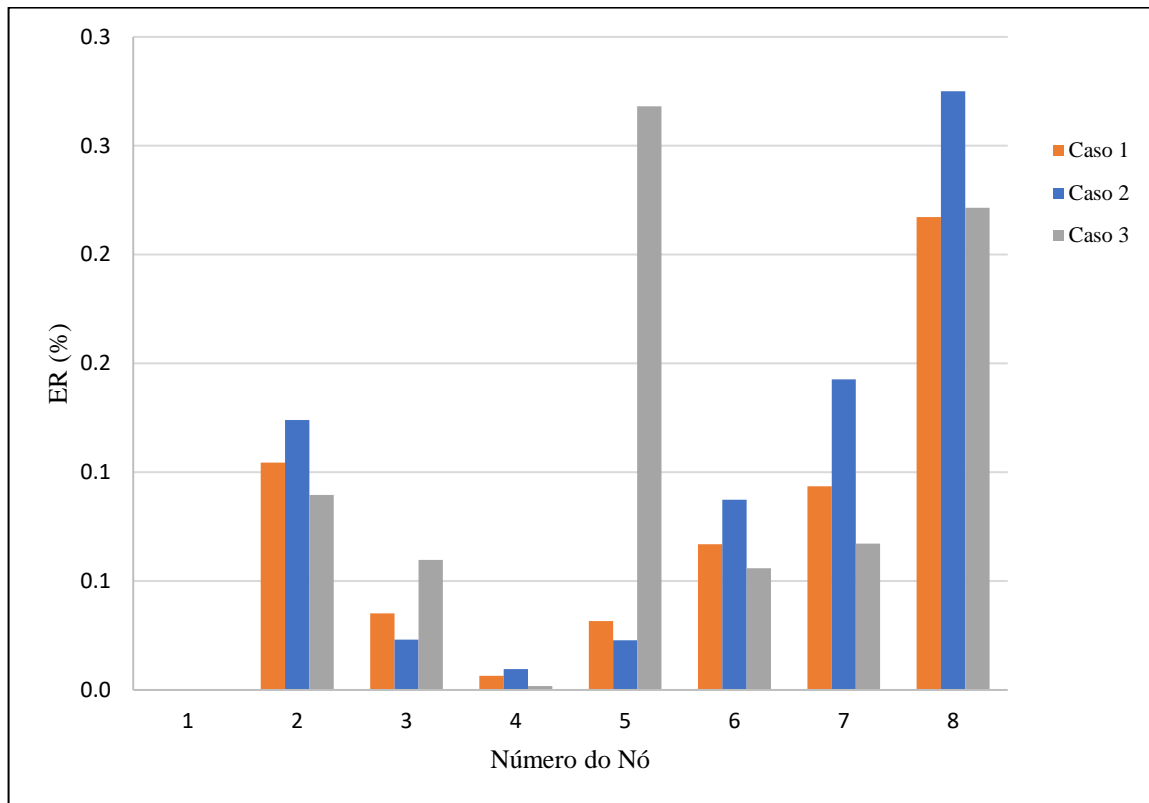
Utilizando as rugosidades calculadas, encontrou-se as cargas e vazões permanentes e transientes. Os resultados e erros relativos estão nas figuras 47 a 54. Os valores de carga e vazão transientes se encontram no apêndice A.

Figura 47 - Novas cargas em regime permanente da celeridade fictícia na rede 2



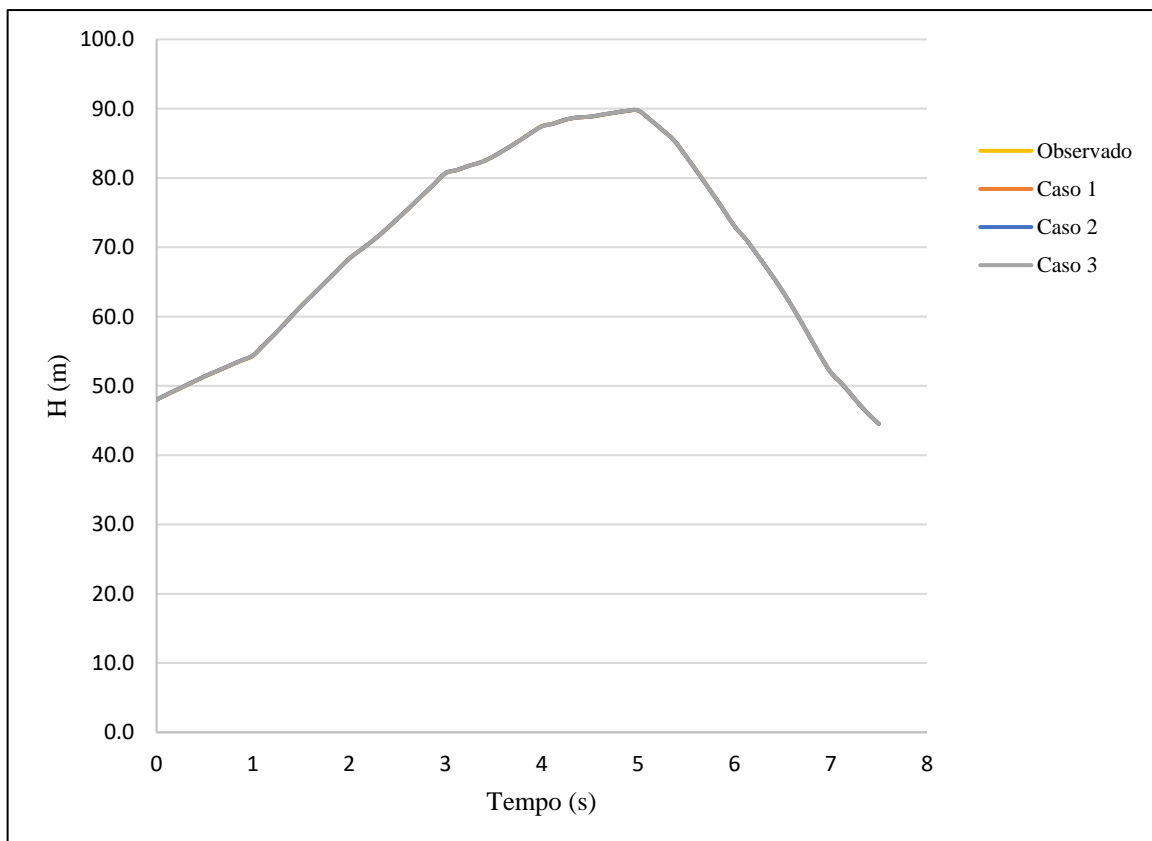
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade fictícia da rede 2



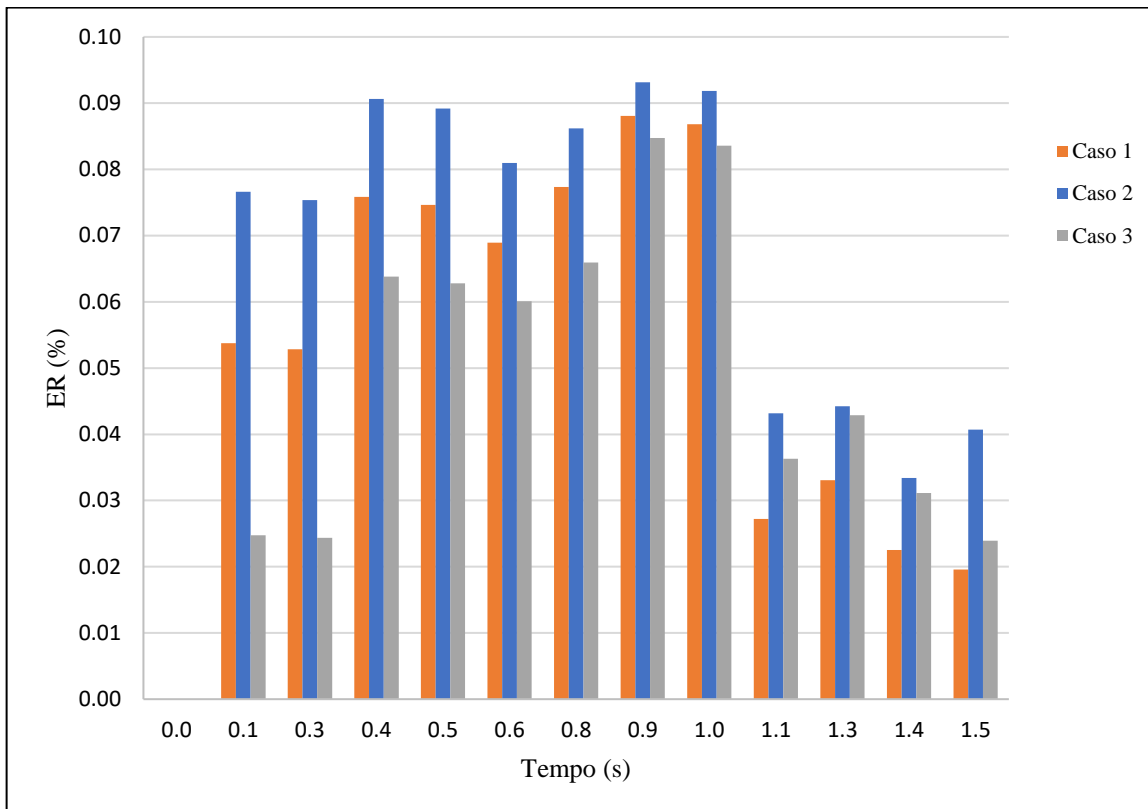
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 – Novas cargas hidráulicas transiente no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 2



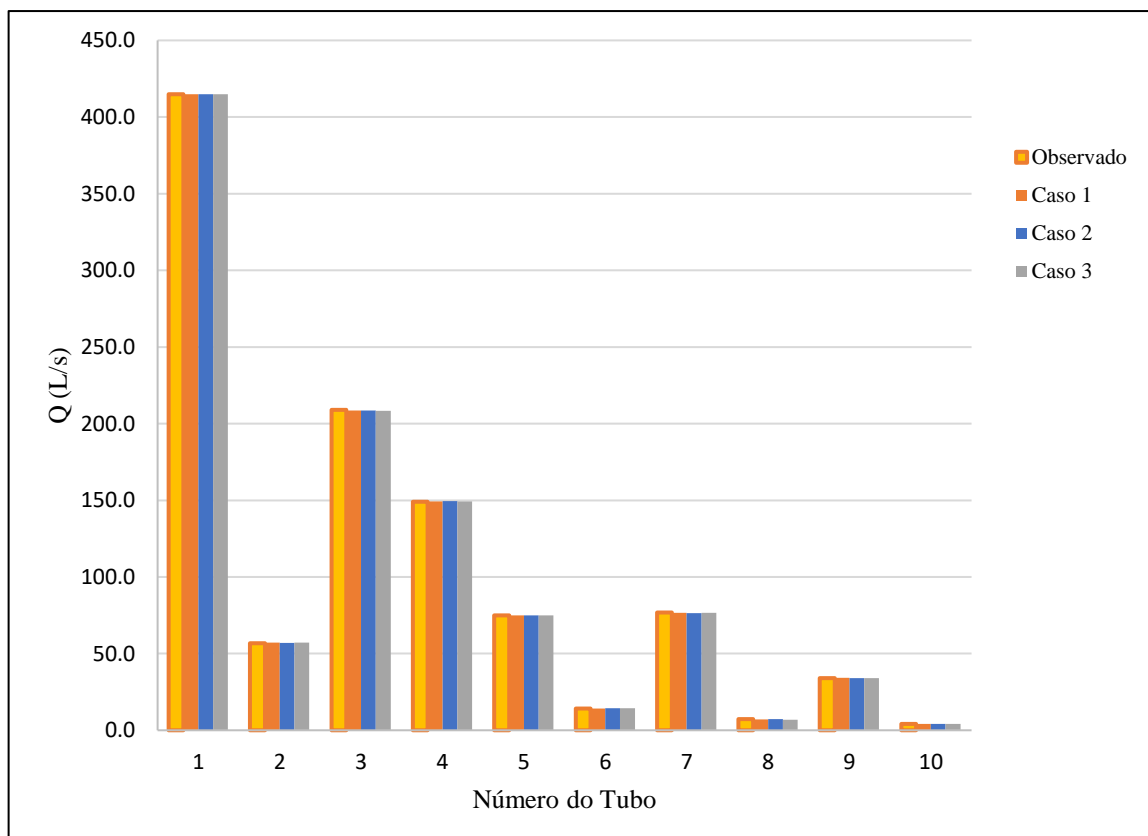
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade fictícia na rede 2



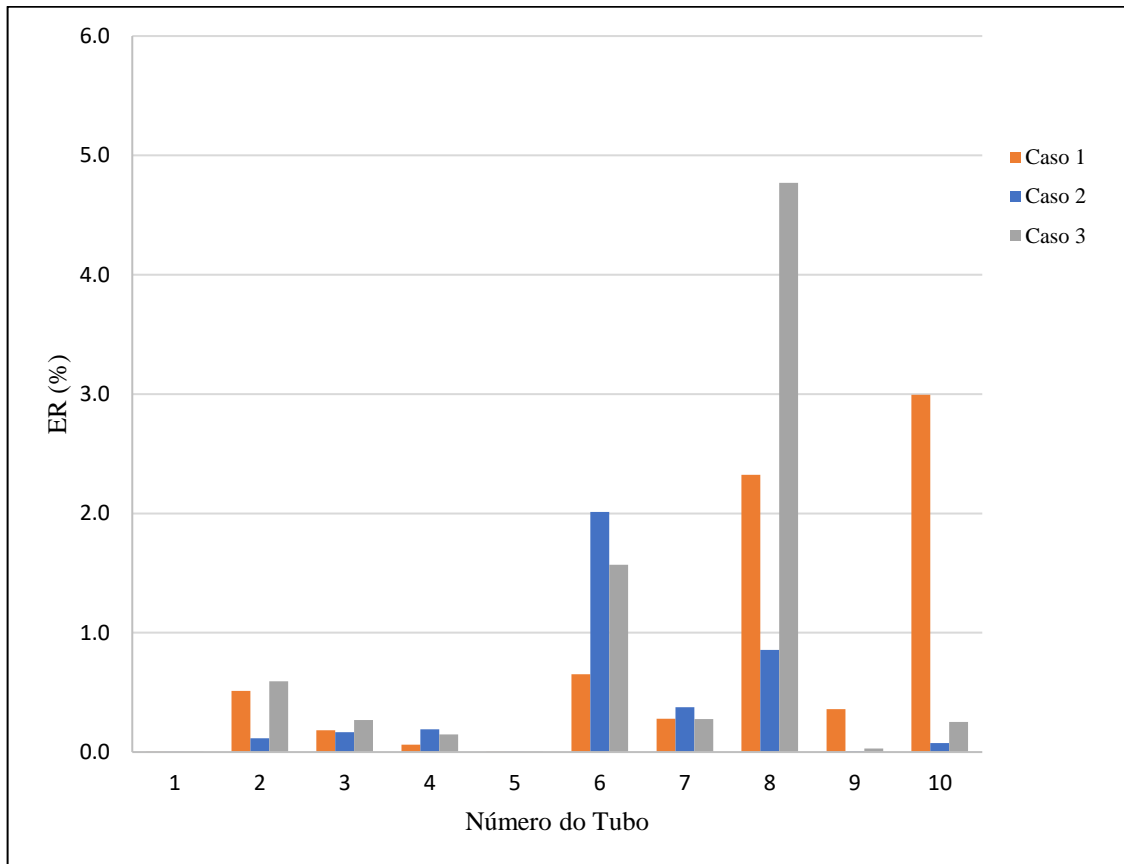
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 – Novas vazões em regime permanente da celeridade fictícia na rede 2



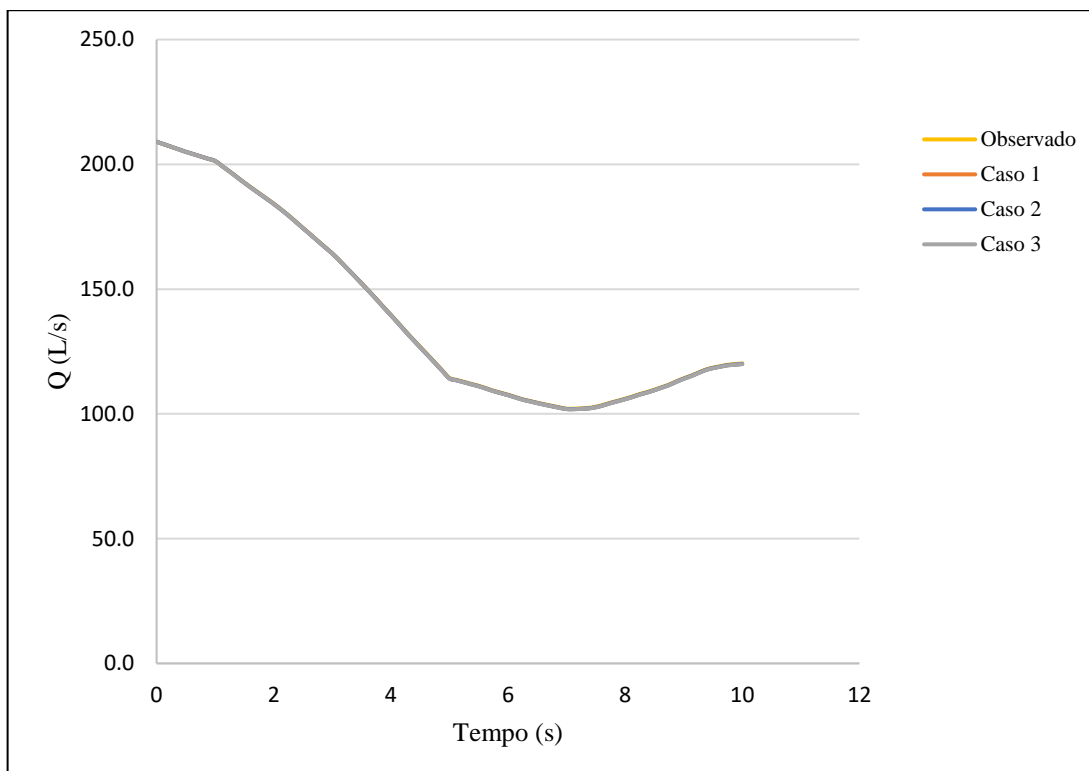
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 – Erro relativo das novas vazões permanentes da celeridade fictícia na rede 2



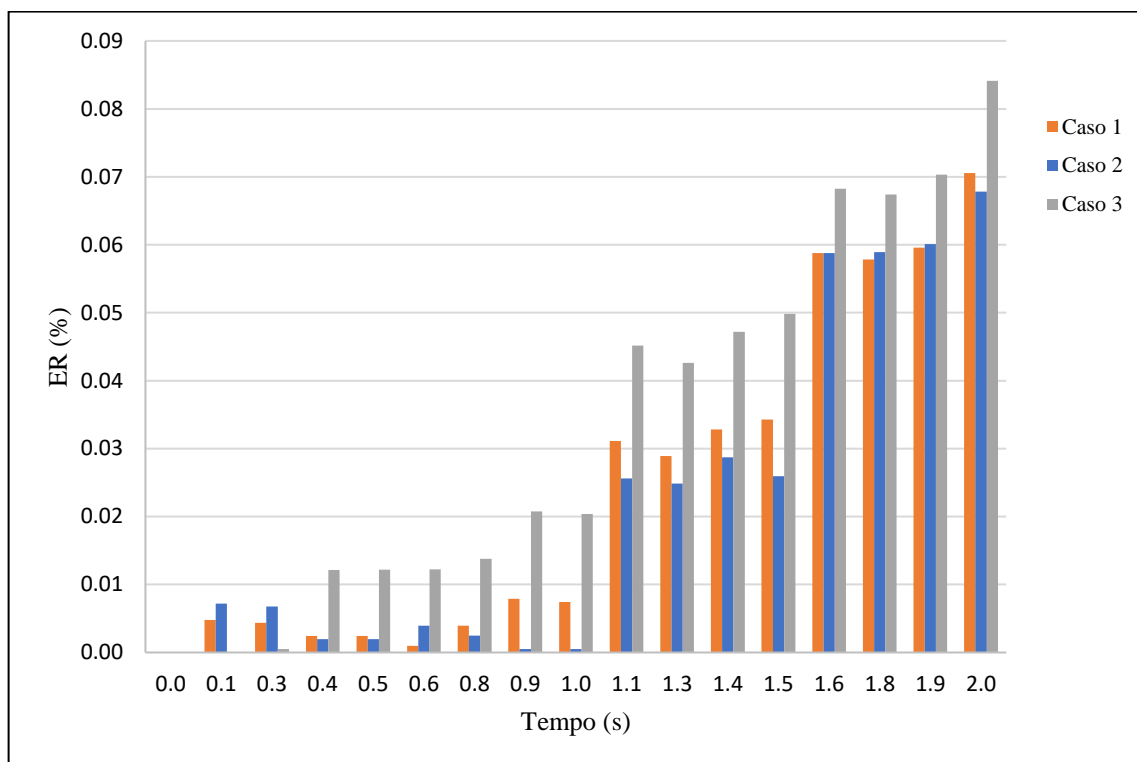
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53 – Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade fictícia na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 – Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade fictícia na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 47 mostra valores de carga permanente muito próximos aos valores observados. A Figura 48, por sua vez, nos permite ver que, apesar dos erros relativos sempre abaixo de 0.3%, os casos 2 e 3 quase sempre possuem. Mesmo sem ter o maior erro para nenhum dos nós, o caso 1 permanece sempre como segundo, quase sempre com valores bem próximos ao maior erro.

Na Figura 49 vê-se que as curvas das cargas transientes dos três casos praticamente se sobrepõem com as cargas observadas. Na Figura 50 é possível perceber que, apesar de valores muito baixos de erro, o caso 2 possui erros relativos sempre maiores para os primeiros 2 segundos de simulação, sendo o caso 3, na maioria dos casos, possuindo os menores erros.

Para as vazões permanentes, na Figura 51, vê-se comportamento semelhante ao das cargas permanentes, com os três casos assumindo valores próximos dos observados. Os erros relativos presentes na Figura 52 mostram erros pequenos para todos os casos, com uma grande variação em todos. O maior erro está no tubo 8 para o caso 3, com quase 5%.

Para as vazões transientes, as curvas também estão quase sobrepostas, assim como nas cargas, e os erros relativos são muito pequenos para serem levados em consideração, embora o caso 3 assuma quase sempre os maiores erros, conforme as Figura 53 e Figura 54.

5.4.2.2 Celeridade Real

Já na tabela 28 tem-se o resultado das simulações para cada caso da celeridade real na rede 2, levando em conta as melhores gerações de cada um dos processamentos.

Tabela 28 - Rugosidades calculadas para casos de celeridade real na rede 2

TUBO	ϵ_{est} (mm) - CASO 4	ϵ_{est} (mm) - CASO 5	ϵ_{est} (mm) – CASO 6
1	0.0550	0.0543	0.0547
2	0.0505	0.0512	0.0510
3	0.0470	0.0471	0.0470
4	0.0465	0.0476	0.0475
5	0.0337	0.0312	0.0320
6	0.0325	0.0359	0.0348
7	0.0502	0.0512	0.0507
8	0.0435	0.0434	0.0451
9	0.0449	0.0462	0.0459
10	0.0470	0.0469	0.0464

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 29 encontram-se os erros absolutos e relativos das rugosidades de cada caso para celeridade real na rede 2, já na tabela 30 estão os valores de função objetivo para os três casos na celeridade real.

Tabela 29 - Erros das rugosidades nos casos de celeridade real na rede 2

TUBO	CASO 4		CASO 5		CASO 6	
	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO	ERRO ABSOLUTO (mm)	ERRO RELATIVO
1	0.0029	5.8	0.0060	12.0	0.0050	10.0
2	0.0043	8.6	0.0061	12.2	0.0005	1.0
3	0.0034	6.8	0.0056	11.2	0.0030	6.0
4	0.0025	5.0	0.0047	9.4	0.0035	7.0
5	0.0043	8.6	0.0091	18.2	0.0163	32.6
6	0.0163	32.6	0.0118	23.6	0.0175	35.0
7	0.0056	11.2	0.0071	14.2	0.0002	0.4
8	0.0013	2.6	0.0009	1.8	0.0065	13.0
9	0.0060	12.0	0.0025	5.0	0.0051	10.2
10	0.0030	6.0	0.0400	80.0	0.0030	6.0

Fonte: Elaborado pelo autor.

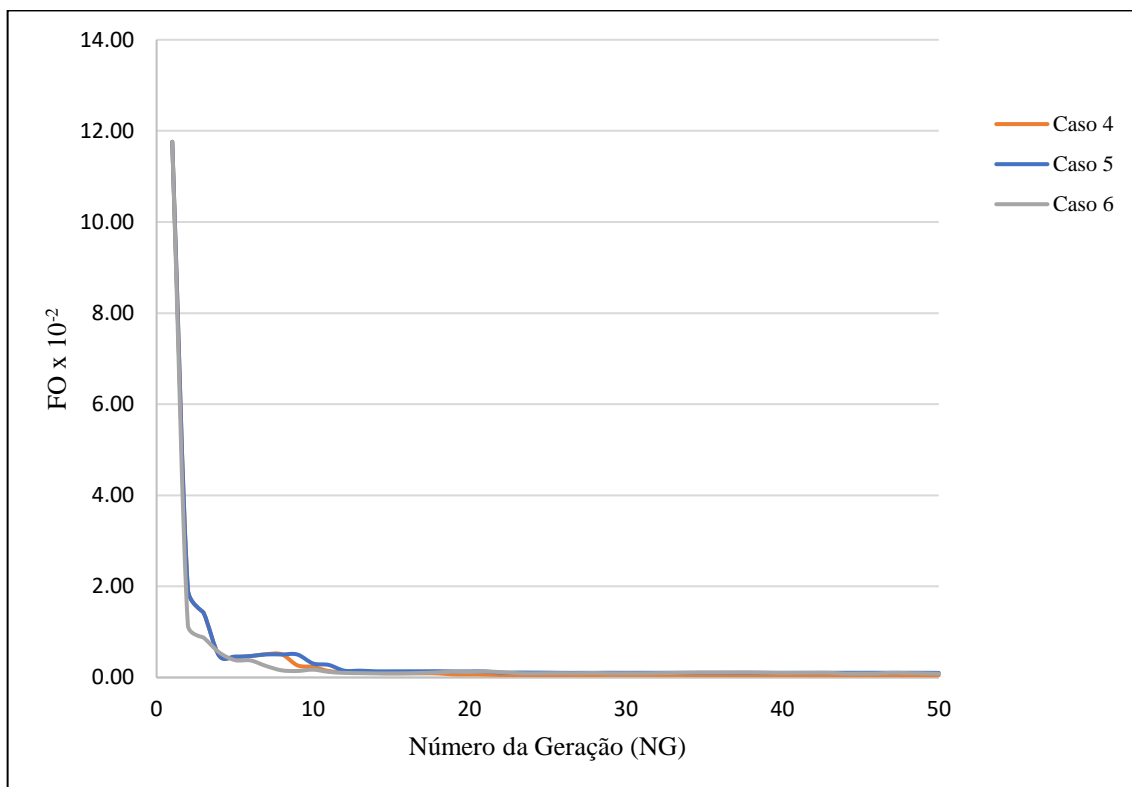
Tabela 30 - Funções objetivo dos casos de celeridade real na rede 2

CASO	FUNÇÃO OBJETIVO
4	0.0000005219
5	0.0000010087
6	0.0000008391

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes resultados apresentados para celeridade real na rede 2 foram organizados no gráfico das figuras 55, 56 e 57.

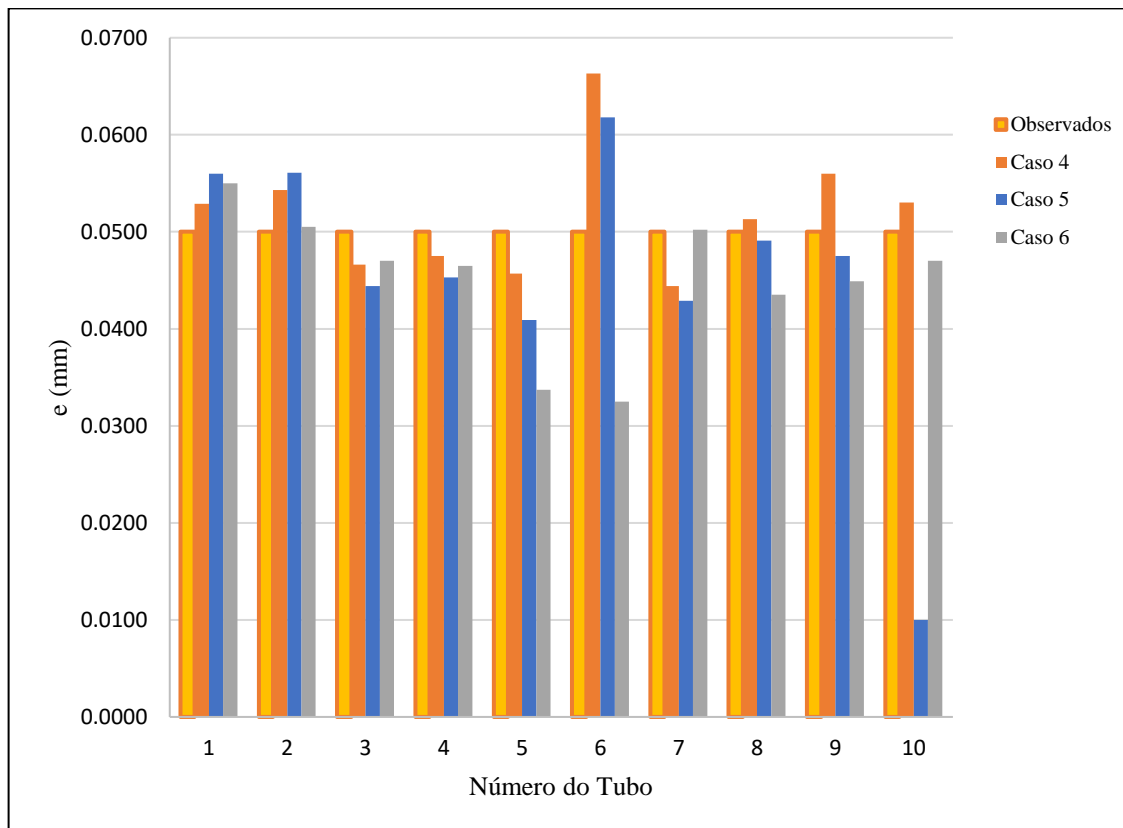
Figura 55 - Evolução da função objetivo para os casos com celeridade real na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

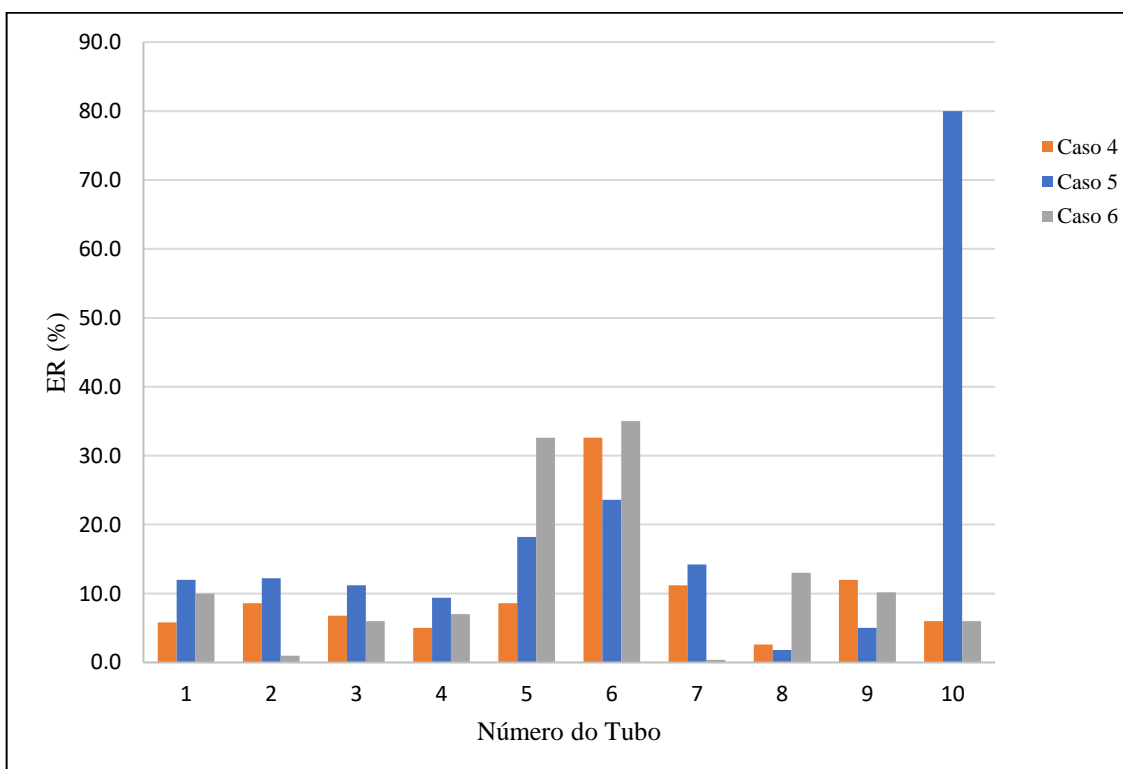
O caso 4 apresenta valores muito próximos aos valores observados na maioria dos tubos, sendo, na maioria deles, o caso que mais se aproxima. A Tabela 29 mostra erros baixos para o caso 4, sendo na maioria dos caso menores que 10%. Pela Figura 57 é possível ver que este caso assume os menores erros na maioria dos tubos, tendo o maior erro apenas no tubo 9, por uma diferença muito pequena. Pela Tabela 30 vê-se que o caso 4 possui a menor função objetivo.

Figura 56 - Rugosidades observadas e calculadas para os casos de celeridade real na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 - Erros relativos na rugosidade para os casos de celeridade real na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no caso 5, o que possui a maior função objetivo de acordo com a Tabela 30, apresenta valores de rugosidade muito distantes da rugosidade observada. Na Tabela 29 vemos erros quase sempre acima dos 10%, chegando até 80% de erro. A Figura 57 mostra este caso com os maiores erros relativos, principalmente no tubo 10, onde destoa muito dos demais.

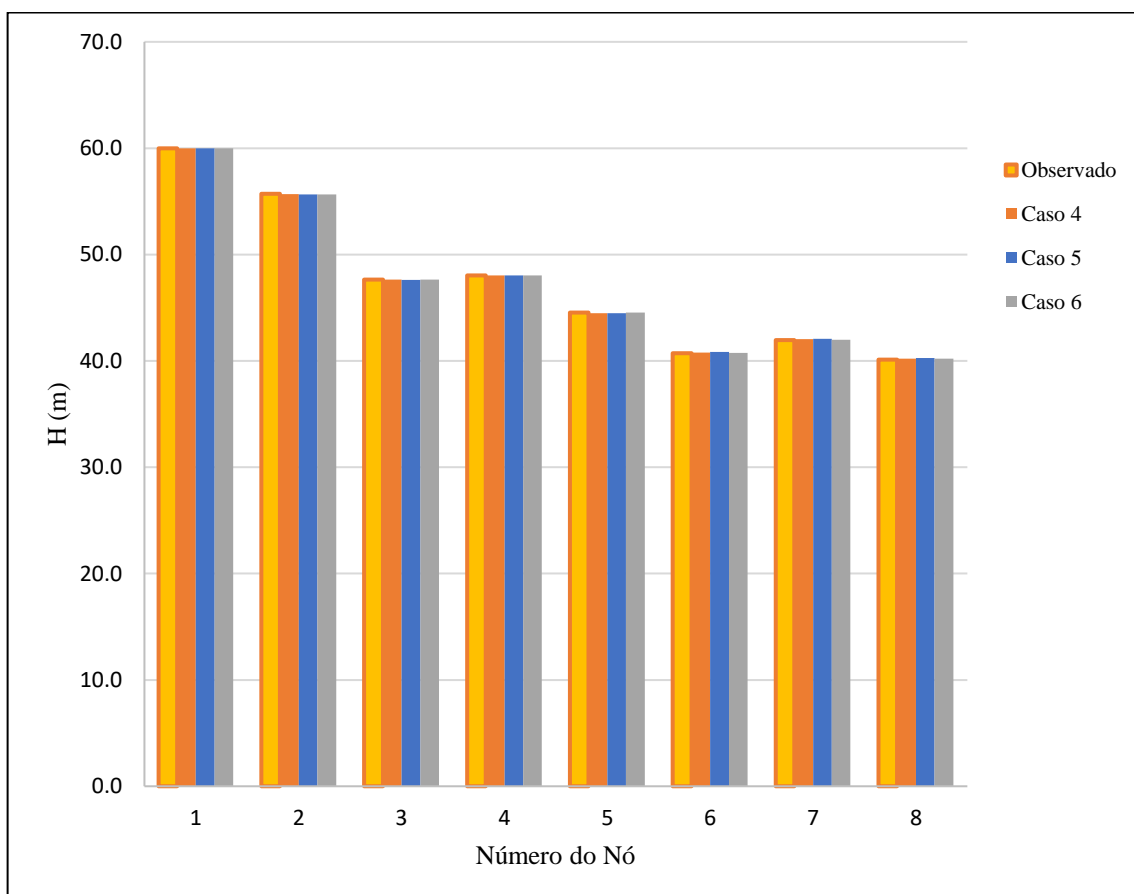
O caso 6 possui valor de função objetivo muito próximo do caso 5, como visto na Tabela 30, e, da mesma forma, apresenta alguns valores de rugosidade muito distantes dos observados. A Figura 57 mostra erros relativos maiores que os demais casos para os tubos 5, 6 e 8. Já a Tabela 29 mostra erros relativos nos tubos 5 e 6 de mais de 30%.

O comportamento da evolução da função objetivo para os três casos é bem semelhante, conforme a Figura 55.

Essas análises das várias soluções do problema permitem observar o impacto das diferenças de configuração do AG no resultado obtido, além das diferenças causadas pelas gerações.

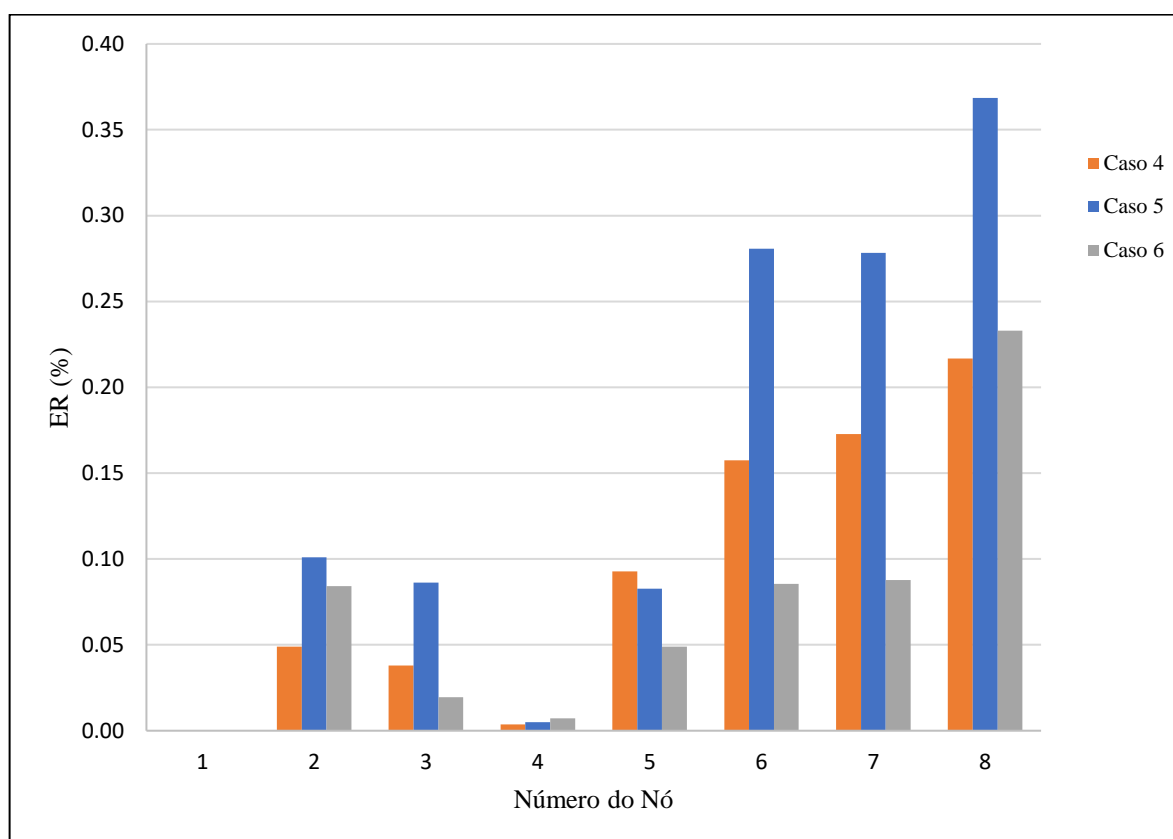
Novamente, cargas e vazões permanentes e transientes foram recalculadas. Resultados e erros relativos estão nas figuras 58 a 65. Cargas e vazões transientes estão no apêndice A.

Figura 58 - Novas cargas em regime permanente da celeridade real na rede 2



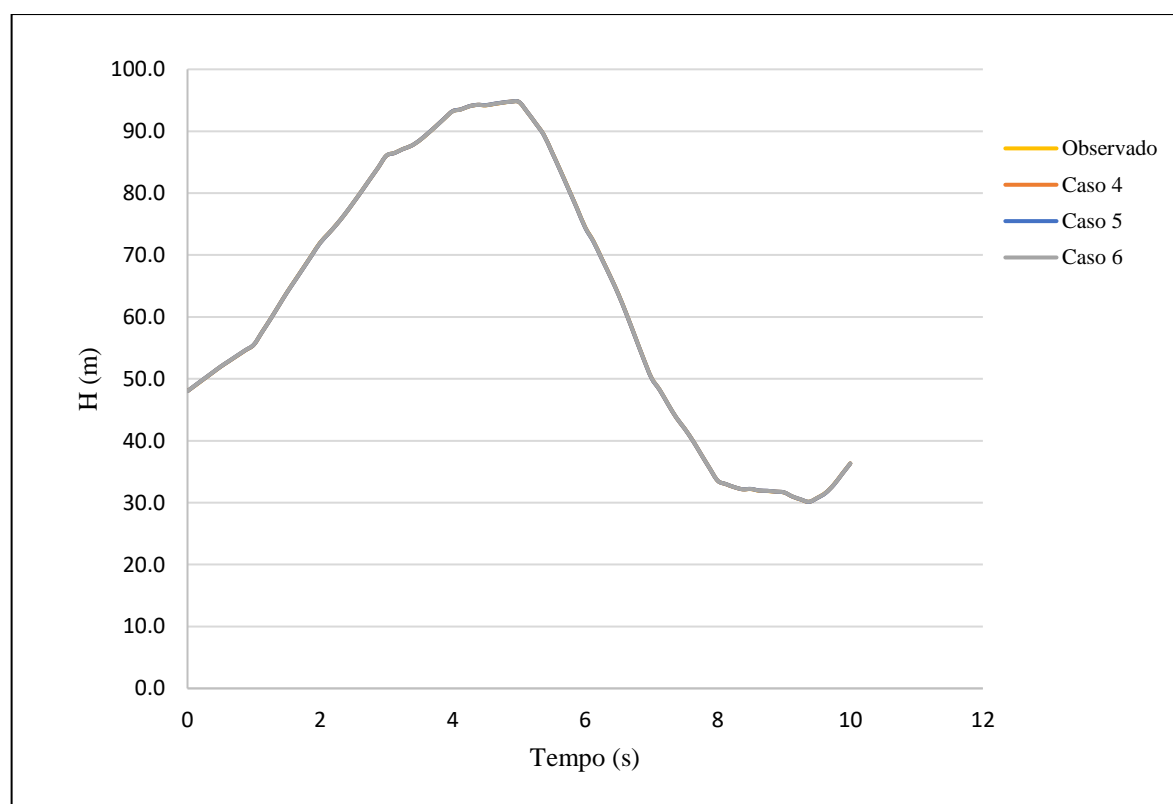
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 - Erro relativo nas novas cargas em regime permanente para celeridade real da rede 2



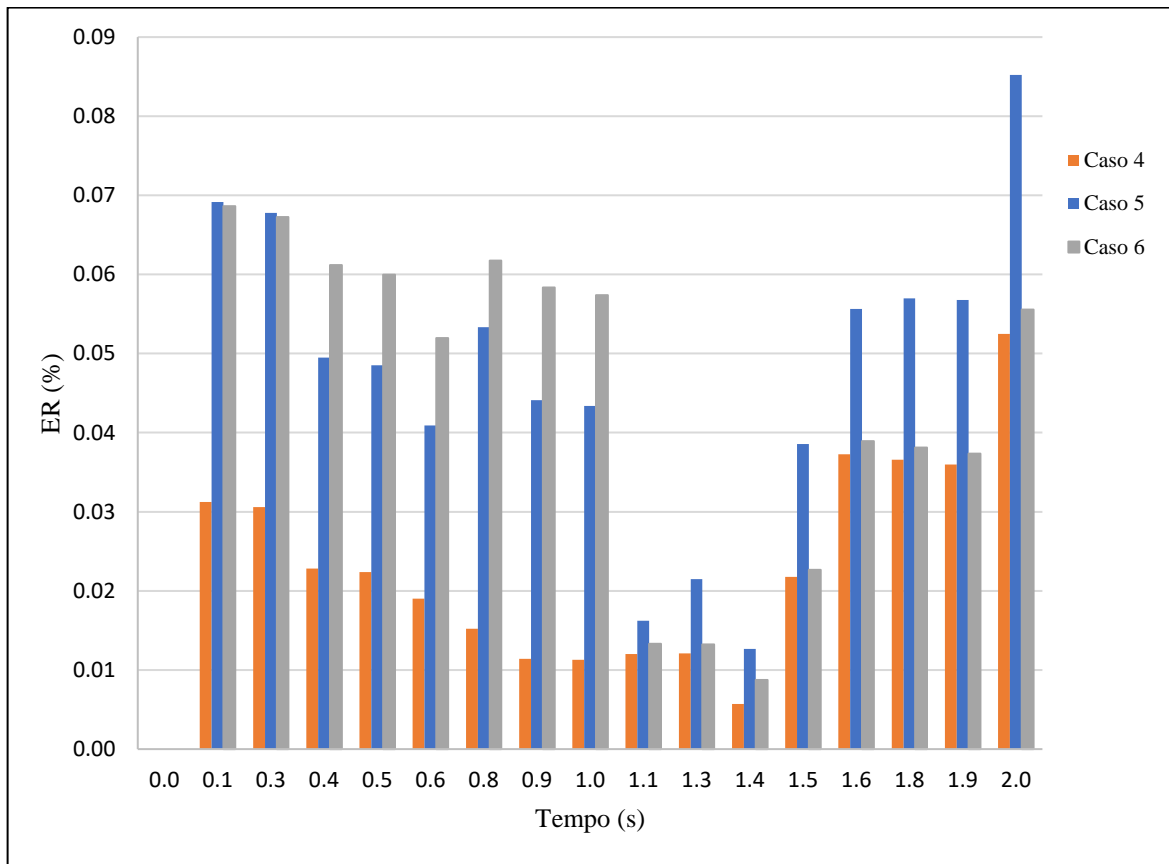
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60 – Novas cargas hidráulicas transiente no nó monitorado para celeridade real na rede 2



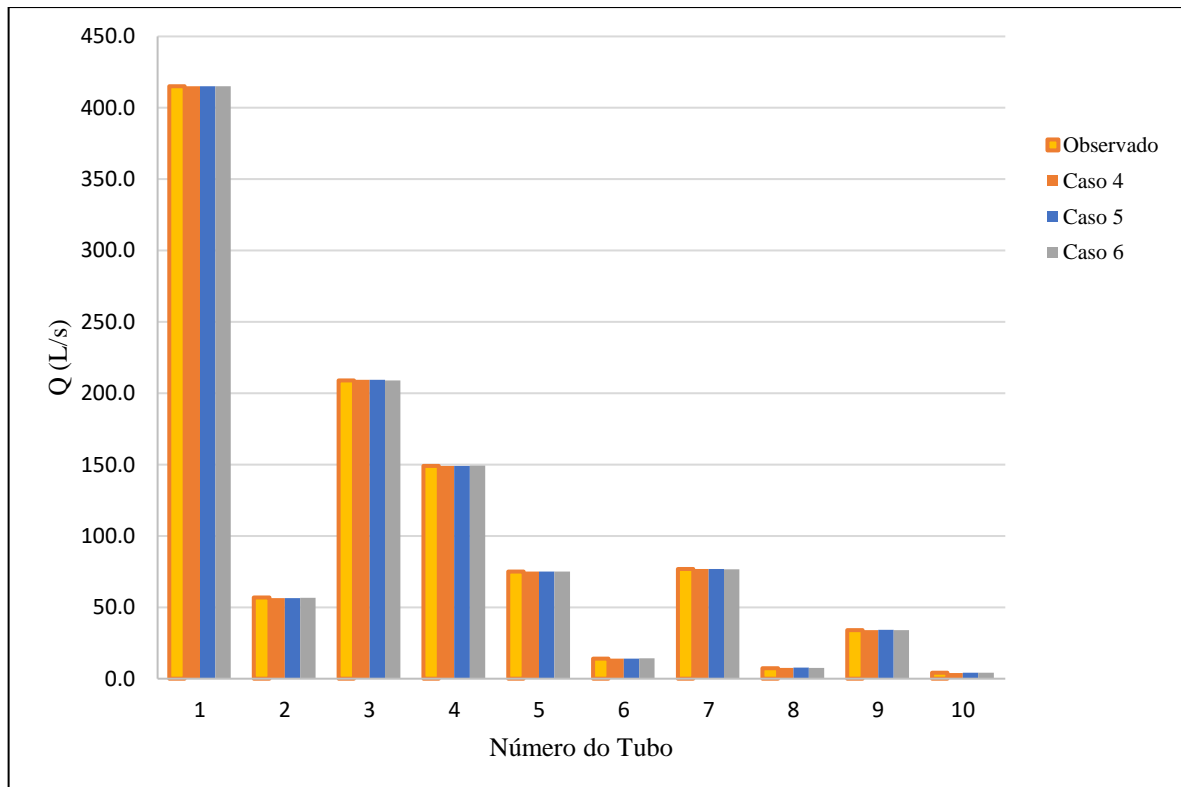
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 – Erro relativo das novas cargas transientes no nó monitorado para celeridade real na rede 2



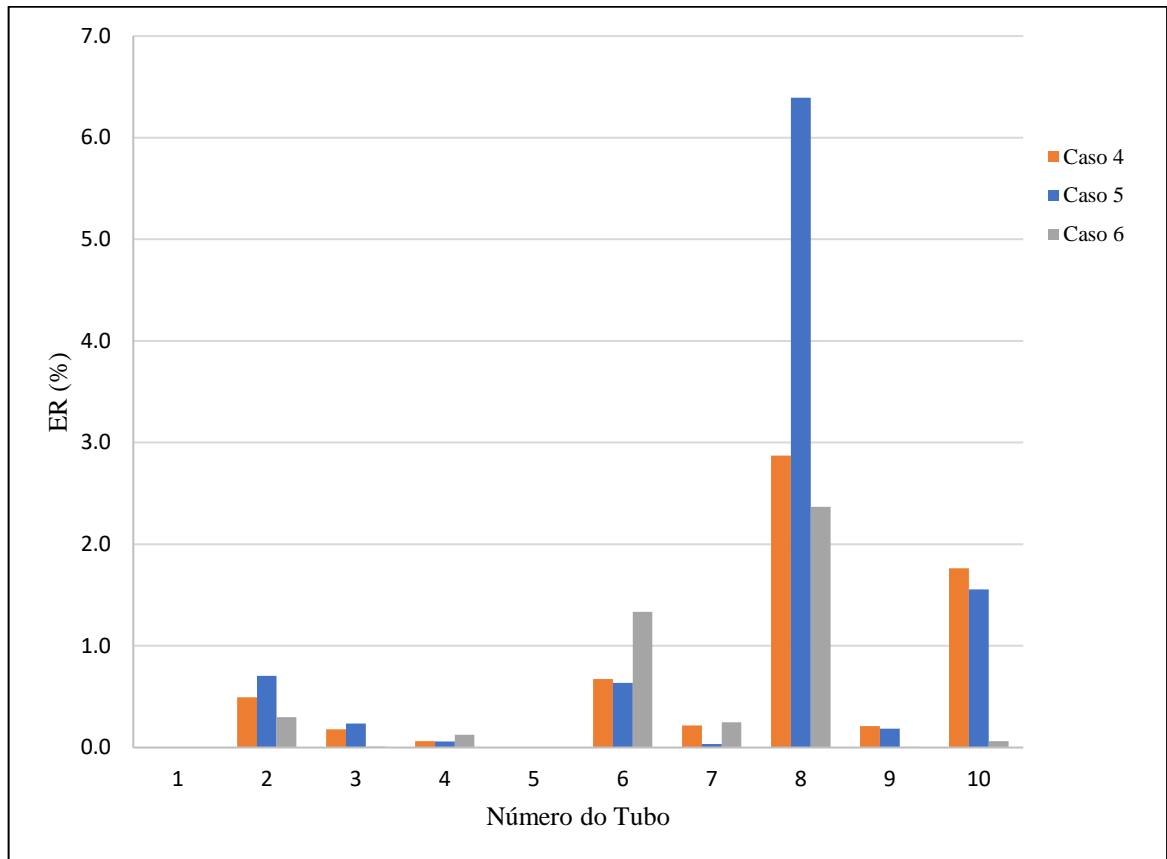
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 – Novas vazões em regime permanente da celeridade real na rede 2



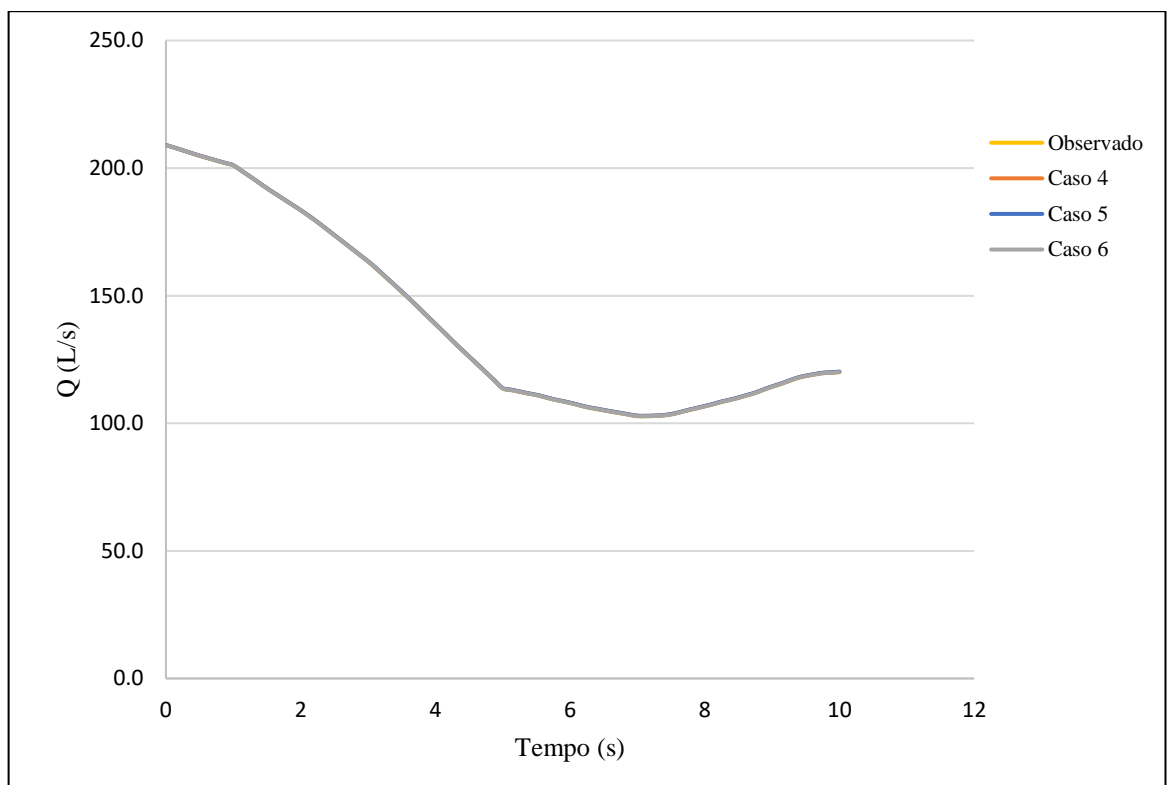
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 63 – Erro relativo das novas vazões permanentes da celeridade real na rede 2



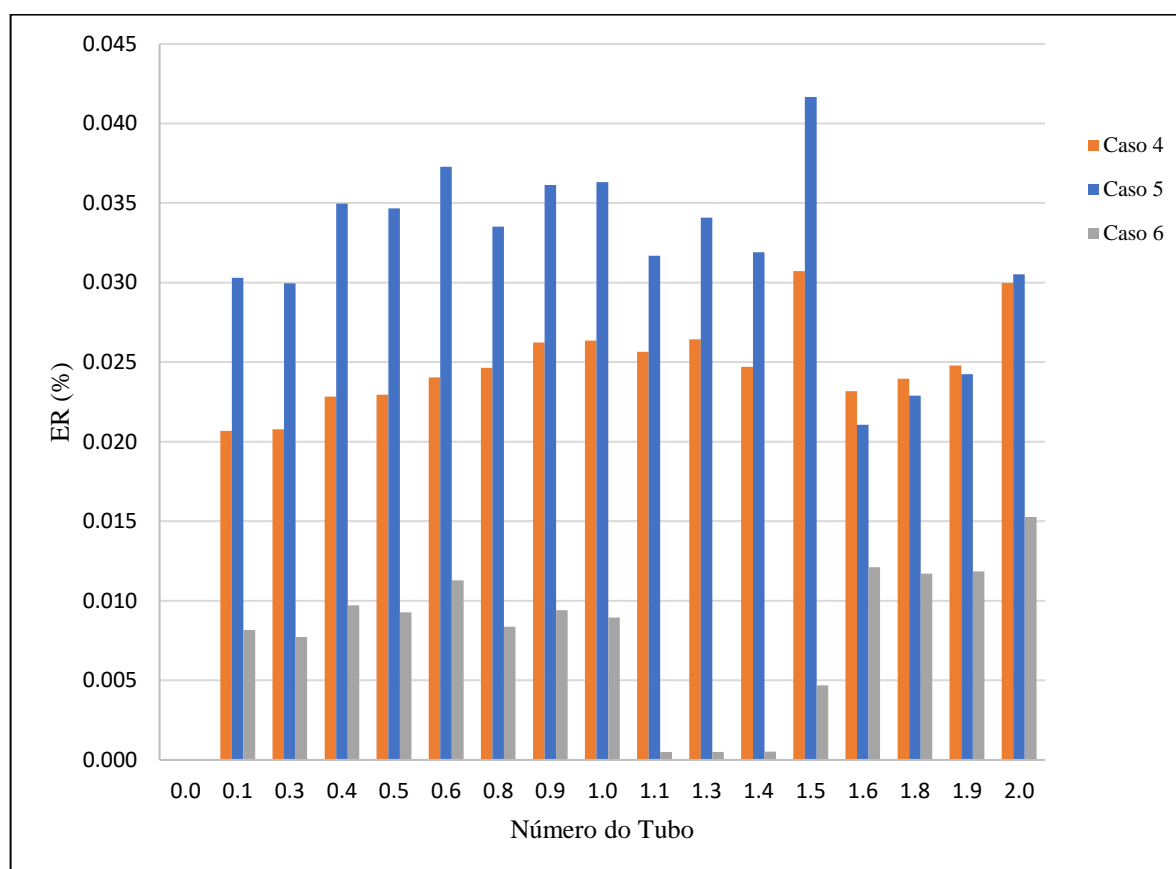
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64 – Novas vazões em regime transiente no tubo monitorado da celeridade real na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65 – Erro relativo das novas vazões transientes da celeridade real na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Semelhantes aos resultados para a celeridade fictícia também foram os resultados para as cargas e vazões permanentes, conforme as Figura 58 e Figura 62. As curvas das cargas e vazões transientes também foram muito semelhantes, praticamente sobrepostas, como mostram as Figura 60 e Figura 64.

Já os erros relativos da carga permanente, mostrados na Figura 59, mostram erros irrisórios, que não chegam a 0.5%. Os maiores erros, ainda assim, estão no caso 5. A Figura 61 mostra os erros relativos para os primeiros segundos de simulação transiente. Os erros são ainda menores que os erros para carga permanente, mas se concentram mais nos casos 5 e 6, sendo o caso 4 o que possui os menores erros.

Os erros para vazão permanente são um pouco maiores que os de carga. Na Figura 63 vê-se erros de mais de 6%, embora ainda sejam considerados erros baixos. Nesta comparação os erros variam muito entre os casos. Na Figura 65, observando os erros nos cálculos das novas vazões transientes, percebe-se erros maiores nos casos 4 e 5 mas, novamente, os erros são desprezíveis.

Nas tabelas Tabela 31 e Tabela 32 estão, respectivamente, os valores das rugosidades e erro relativo dos valores de rugosidade.

Tabela 31 - Rugosidades da rede 2

TUBO	RUGOSIDADE (mm)					
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
1	0.0562	0.0574	0.0553	0.0529	0.0560	0.0550
2	0.0406	0.0439	0.0397	0.0543	0.0561	0.0505
3	0.0479	0.0470	0.0493	0.0466	0.0444	0.0470
4	0.0466	0.0447	0.0465	0.0475	0.0453	0.0465
5	0.0361	0.0354	0.0326	0.0457	0.0409	0.0337
6	0.0482	0.0366	0.0313	0.0663	0.0618	0.0325
7	0.0509	0.0513	0.0510	0.0444	0.0429	0.0502
8	0.0538	0.0484	0.0591	0.0513	0.0491	0.0435
9	0.0516	0.0534	0.0763	0.0560	0.0475	0.0449
10	0.0123	0.0413	0.0291	0.0530	0.0100	0.0470

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32 - Erros relativos das rugosidades na rede 2

TUBO	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
1	12.4 %	14.8 %	10.6 %	5.8 %	12.0 %	10.0 %
2	18.8 %	12.2 %	20.6 %	8.6 %	12.2 %	1.0 %
3	4.2 %	6.0 %	1.4 %	6.8 %	11.2 %	6.0 %
4	6.8 %	10.6 %	7.0 %	5.0 %	9.4 %	7.0 %
5	27.8 %	29.2 %	34.8 %	8.6 %	18.2 %	32.6 %
6	3.6 %	26.8 %	37.4 %	32.6 %	23.6 %	35.0 %
7	1.8 %	2.6 %	2.0 %	11.2 %	14.2 %	0.4 %
8	7.6 %	3.2 %	18.2 %	2.6 %	1.8 %	13.0 %
9	3.2 %	6.8 %	52.6 %	12.0 %	5.0 %	10.2 %
10	75.4 %	17.4 %	41.8 %	6.0 %	80.0 %	6.0 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2.3 Menores Funções Objetivo

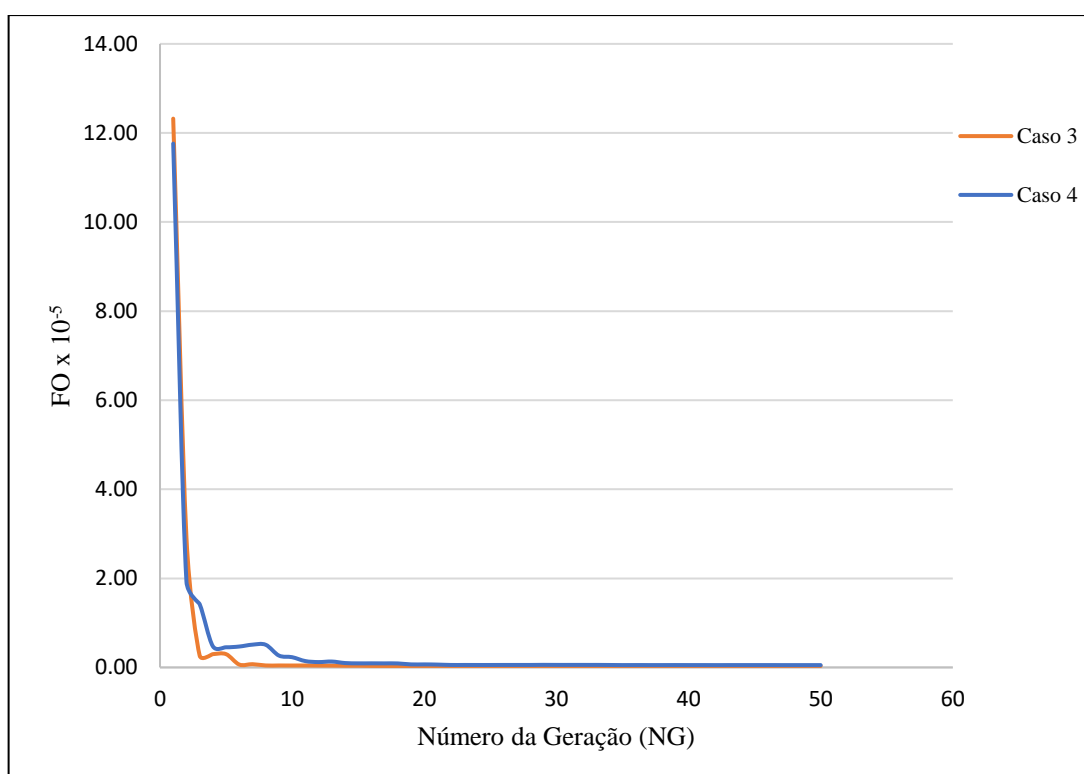
Feita a comparação entre as soluções de cada tipo de celeridade, novamente foram observados os valores de função objetivo, comparando-os dentro de cada tipo para que novamente se escolha as melhores soluções para cada tipo de cálculo. Em seguida, os valores de rugosidade, carga e vazão serão comparados para que se possa observar o impacto causado

devido ao tipo de cálculo utilizado.

Baseando-se pelas tabelas 27 e 30, que contêm as funções objetivo de cada solução, observa-se que os casos 3 e 4 são os mais indicados para representarem, respectivamente, as celeridades fictícia e real.

A figura 66 contém a evolução da função objetivo ao longo das gerações para a melhor solução de cada tipo de celeridade (casos 3 e 4).

Figura 66 - Evolução da função objetivo para os casos 3 e 4 na rede 2

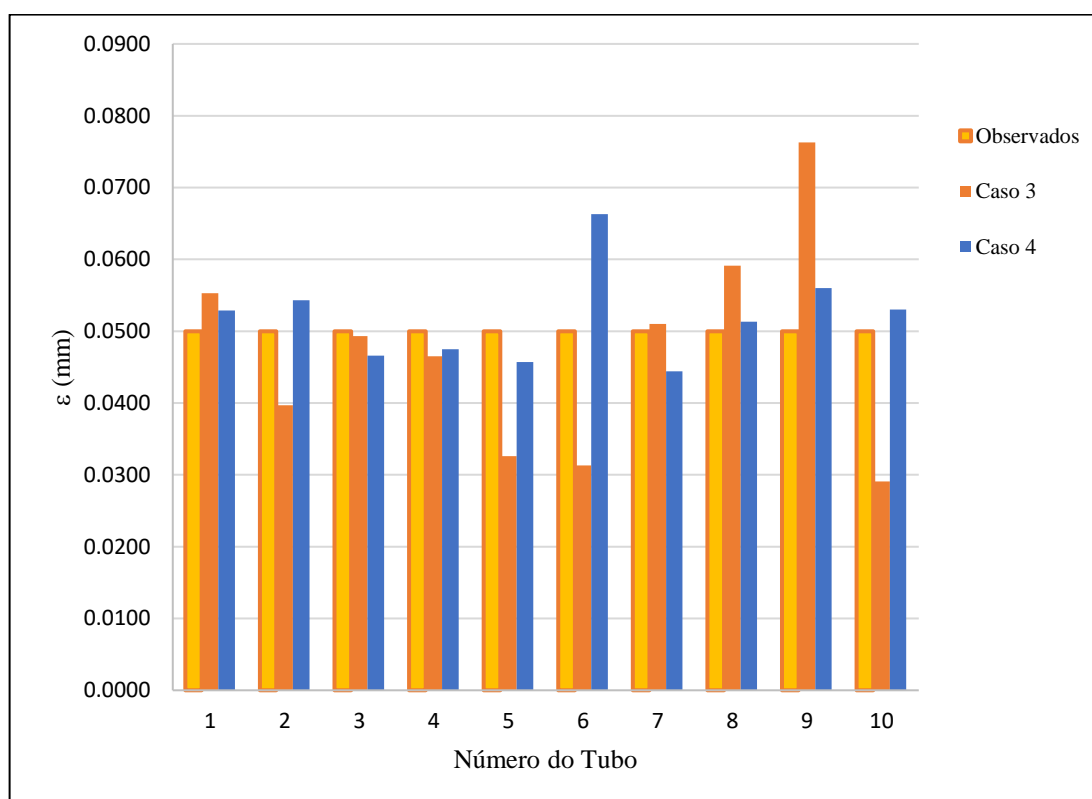


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 66 é possível ver um comportamento semelhante da função objetivo dos dois casos, tendendo sempre a diminuir com o passar das gerações.

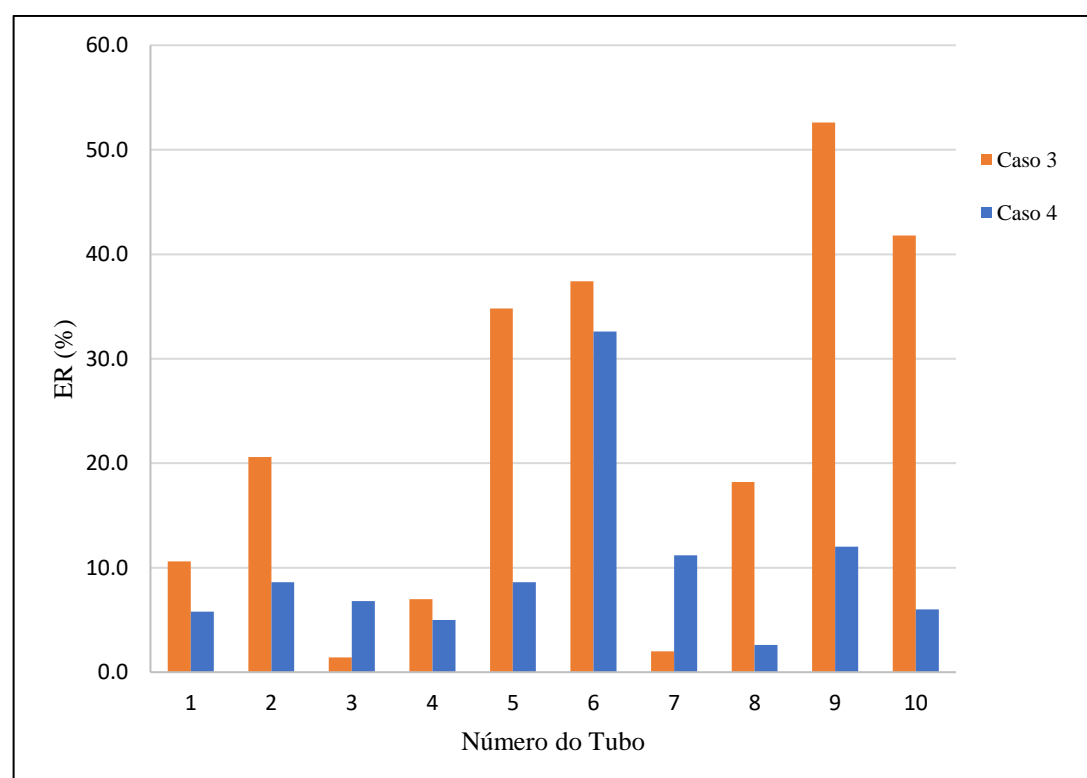
Na figura 67 encontra-se os valores de rugosidade para os casos 3 e 4 em comparação com os valores observados de rugosidade. Através do gráfico fazem-se comparações de desempenho dos casos. Enquanto isso, na figura 68, está o gráfico com os erros relativos na rugosidade.

Figura 67 - Rugosidades observadas e calculadas para casos 3 e 4 da rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 - Erros relativos na rugosidade para casos 3 e 4 na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 67 vê-se a diferença entre as rugosidades de cada tipo de celeridade

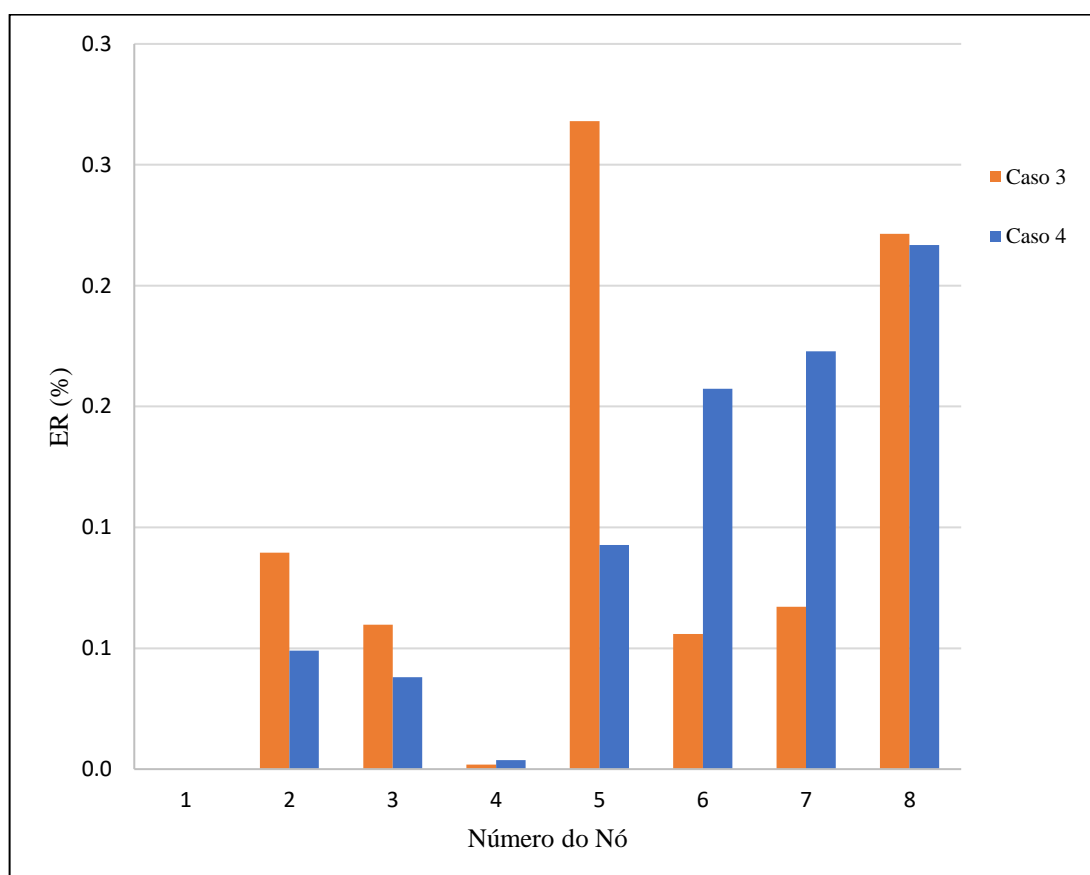
comparadas com a rugosidade observada. Na maioria dos tubos o caso 4 está mais próximo dos valores observados que o caso 3, o que mostra valores mais exatos para os cálculos com celeridade real. A Figura 68 mostra os erros relativos destes casos em relação à rugosidade observada, comprovando o fato que o caso 4 possui valores mais próximos dos reais.

Tabela 33 - Valores de carga em regime permanente para casos 3 e 4 da rede 2

NÓ	OBSERVADO (m)		ESTIMADO (m)		ERRO RELATIVO (%)	
	Cel. Fictícia	Cel. Real	Caso 3	Caso 4	Caso 3	Caso 4
1	60.00	60.00	60.00	60.00	0.00	0.00
2	55.71	55.70	55.66	55.67	0.09	0.05
3	47.65	47.65	47.68	47.63	0.06	0.04
4	48.02	48.02	48.02	48.03	0.00	0.00
5	44.54	44.54	44.42	44.49	0.27	0.09
6	40.74	40.72	40.76	40.79	0.06	0.16
7	41.97	41.96	42.00	42.03	0.07	0.17
8	40.14	40.13	40.23	40.22	0.22	0.22

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69 - Erro relativo na carga em regime permanente para casos 3 e 4 na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na tabela 34 estão os valores de erro médio relativo para os casos 3 e 4 nos valores de carga hidráulica em regime transiente, levando em conta os 100 passos de tempo da simulação. Os valores de carga e vazão transientes se encontram no apêndice A.

Tabela 34 – Erro médio relativo da carga transiente para casos 3 e 4 da rede 2

	CASO 3	CASO 4
EMR (%)	0.03678	0.02552

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela tabela 33, vê-se valores muito próximos para os dois tipos de cálculos, principalmente quando observado também o gráfico da Figura 69, mostrando baixos erros relativos, sem que um caso se sobressaia sobre o outro.

Para a carga transiente, calculou-se o erro médio relativo dos valores de carga ao longo de toda a simulação. Como visto na Tabela 34, o caso 4, da celeridade real, gerou valores mais próximos de carga transiente. Mesmo assim, os erros dos dois casos são bem pequenos.

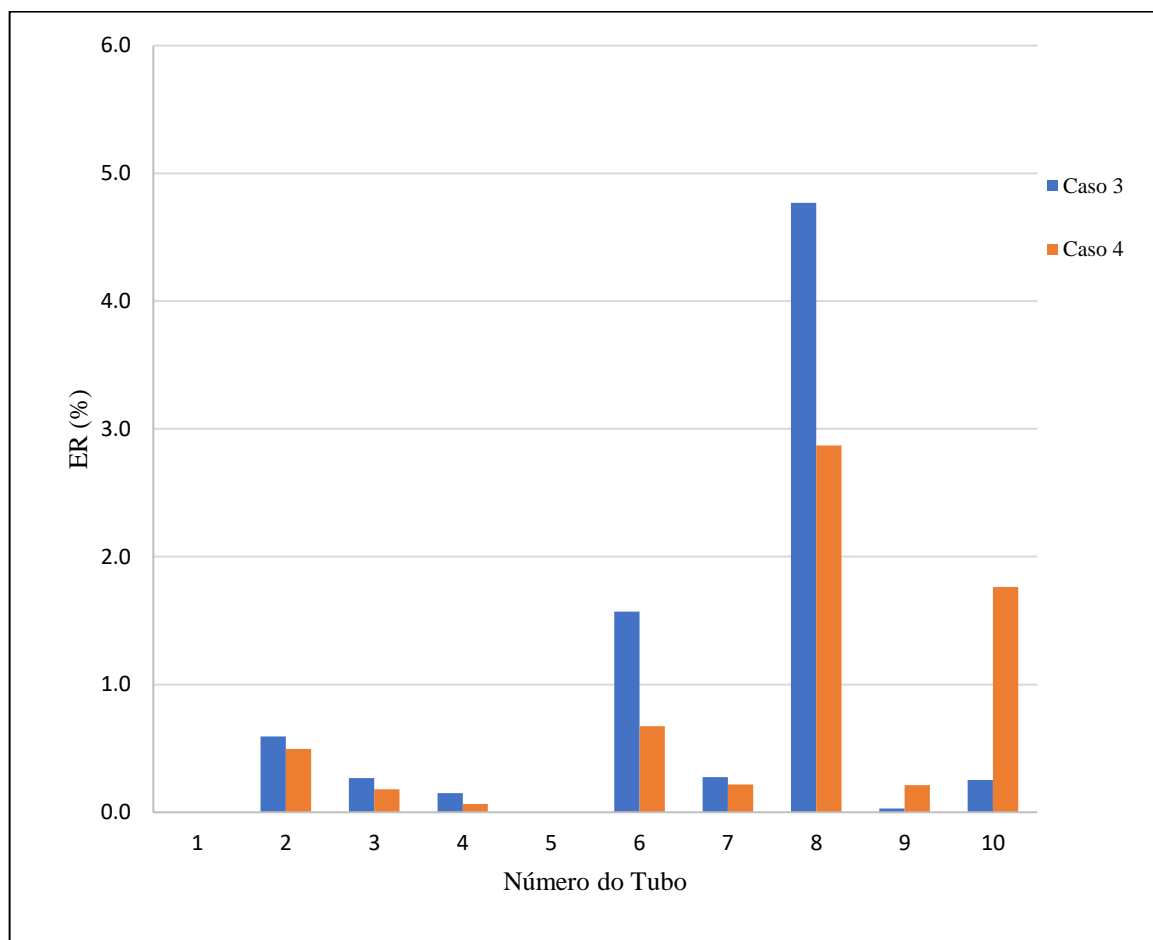
Na tabela 35 estão os valores para vazão em regime permanente, enquanto na figura 70 está o gráfico com os erros relativos em comparação com a carga observada em regime permanente.

Tabela 35 - Valores de vazão em regime permanente para casos 3 e 4 da rede 2

TUBO	OBSERVADO (l/s)		ESTIMADO (l/s)		ERRO RELATIVO (%)	
	Cel. Fictícia	Cel. Real	Caso 3	Caso 4	Caso 3	Caso 4
1	414.99	414.99	414.99	414.99	0.00	0.00
2	56.82	56.82	57.16	56.54	0.59	0.49
3	209.04	209.03	208.48	209.41	0.27	0.18
4	149.14	149.15	149.37	149.05	0.15	0.06
5	75.00	75.00	75.00	75.00	0.00	0.00
6	14.15	14.15	14.37	14.05	1.57	0.67
7	76.76	76.76	76.55	76.93	0.28	0.22
8	7.27	7.27	6.93	7.48	4.77	2.87
9	34.09	34.09	34.08	34.02	0.03	0.21
10	4.09	4.09	4.08	4.02	0.25	1.76

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70 - Erro relativo na vazão em regime permanente para casos 3 e 4 na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por sua vez, na tabela 36 estão os valores de erro médio relativo para os casos 3 e 4 nos valores de vazão em regime transiente, levando em conta os 100 passos de tempo da simulação.

Tabela 36 - Erro médio relativo da vazão em regime transiente nos casos 3 e 4 na rede 2

	CASO 3	CASO 4
EMR (%)	0.15177	0.08163

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma que as cargas permanentes, as vazões permanentes também foram organizadas, assim como seus erros relativos, na Tabela 35 e Figura 70, respectivamente. Nelas pode-se ver que os valores para ambos os tipos de cálculo estão bem próximos de seus respectivos valores observados e que o caso 3 teve erros relativos maiores na maioria dos tubos, sendo seus erros menores apenas nos tubos 9 e 10. Na Tabela 36 vê-se que o caso 4 teve erro médio relativo menor que o caso 3, com ambos os valores dos erros sendo muito pequenos.

Por fim, na Tabela 37 nota-se que o cálculo com celeridade real gerou erros médios

relativos menores em todas as situações analisadas, mesmo que apresente uma função objetivo maior que o caso 3, para celeridade fictícia.

Por fim, na tabela 37, encontram-se todos os valores relevantes para comparação entre os casos 3 e 4 que foram abordados, para melhor visualização

Tabela 37 - Tabela resumo dos casos 3 e 4 na rede 2

CASOS	EMR (%) DA RUGOSIDADE	EMR (%) DA CARGA PERMANENTE	EMR (%) DA CARGA TRANSIENTE	EMR (%) DA VAZÃO PERMANENTE	EMR (%) DA VAZÃO TRANSIENTE	FUNÇÃO OBJETIVO (x10⁻⁵)
3	22.64	0.09549	0.03678	0.79	0.15	0.02876
4	9.92	0.09131	0.02552	0.65	0.08	0.03435

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Cálculo dos regimes permanente e transiente

No problema apresentado foi discutida a possibilidade dos cálculos transientes sem o uso do artifício da celeridade fictícia, de modo que a condição de Courant não seja obedecida, e com o auxílio do algoritmo genético para a determinação dos valores de rugosidade desconhecidos de uma rede de distribuição.

Foi utilizado um programa para calcular o escoamento permanente acontecendo na rede antes de ocorrerem as causas do escoamento transiente, utilizando dados previamente estabelecidos, incluindo as rugosidades observadas, que posteriormente virão a servir de comparação com os resultados das simulações.

Em seguida, com auxílio de um segundo programa, foram calculadas as condições transientes e observados os comportamentos dos valores de carga e vazão para o nó 5 da rede 1 e para o nó 4 da rede. Foram nos nós 5 e 4 das redes 1 e 2, respectivamente, onde ocorreram os eventos que causaram o transiente, portanto estes foram os nós monitorados durante a simulação. Foram calculados os valores de transiente para 300 passos de tempo.

Da mesma forma como os valores em regime permanente, as cargas e vazões em regime transiente também foram muito próximas quando comparados os tipos de cálculo realizados, de acordo com os valores obtidos, presentes no apêndice A.

6.2 Características do Algoritmo Genético

É necessário se estabelecer as características do algoritmo genético para que, a partir disso, fosse utilizado para a otimização no cálculo da rugosidade, que foi suposta como sendo desconhecida.

Quatro tipos de cruzamento, três tipos de mutação e dois tipos de elitismo, todos com suas porcentagens predefinidas, foram simulados de forma a se avaliar todas as possibilidades de combinação entre eles. Estas características foram determinadas em uma versão menor do programa que seria utilizado na solução final do problema. A rugosidade foi estimada e o transiente calculado, então o algoritmo genético agia para otimizar uma nova rugosidade e o transiente era novamente calculado.

O programa de avaliação dos parâmetros do algoritmo genético foi executado até que se atingissem quatro gerações de soluções, cada uma com uma população de 10. As rugosidades

calculadas foram comparadas com as observadas e o programa gerou uma função objetivo, que foi utilizada para classificar os melhores conjuntos de parâmetros.

Determinados os parâmetros a serem utilizados, o programa principal calculou a verdadeira solução para o problema, utilizando os três melhores parâmetros encontrados na etapa anterior para cada tipo de celeridade que foram avaliados anteriormente.

6.3 Cálculo das rugosidades

O programa principal, que também consiste em uma solução de problema transiente acompanhado de um algoritmo genético para otimização, realizou os cálculos ao longo de 50 gerações, cada uma com uma população igual a 100.

Os valores de rugosidade foram comparados com os valores observados através do cálculo do erro relativo, considerando cada um dos tubos da rede, e do erro médio relativo, considerando uma rugosidade média. Essa comparação foi feita entre os resultados das rugosidades dentro de uma mesma celeridade, de forma que se determine a melhor solução para cada uma delas, além de ser feita também uma comparação entre as melhores soluções selecionadas do cálculo com celeridade fictícia e com celeridade real, observando assim o impacto na solução final do método de resolução que ignora completamente a obediência à condição de Courant.

6.3.1 Rede 1

6.3.1.1 Celeridade Fictícia

Neste tipo de cálculo, observou-se uma variabilidade entre as soluções, mas sempre em torno da rugosidade observada, apesar de uma das soluções apresentar erros quase sempre muito acima de outros.

Quando recalculadas as cargas e vazões permanentes e transientes, porém, notou-se erros muito baixos mesmo com as soluções que não apresentaram as rugosidades mais precisas. Esses resultados mostram que o cálculo das cargas e vazões pode ser bem sucedido independente das características do AG escolhidas pois o erro da rugosidade não impactou nesse resultado.

6.3.1.2 Celeridade Real

Os erros na rugosidade da rede 1 para os casos com celeridade real foram semelhantes aos com celeridade fictícia. Embora um dos casos apresentasse erros geralmente maiores, os resultados ainda eram satisfatórios.

Da mesma forma, quando foram calculadas as vazões e cargas permanentes e transientes não houveram erros significativos, mostrando a eficiência da simulação.

6.3.1.3 Menores Funções Objetivo

Após as simulações para as duas celeridades, as melhores simulações de cada solução foram separadas para comparação entre as celeridades. Foram separados os casos 3 e 6.

Os valores encontrados entre as diferentes celeridades foram muito próximos em todos os tubos, gerando erros, em maioria, muito pequenos.

Os erros de carga e vazão permanentes e transientes foram novamente pequenos para os dois casos.

A observação desses dados nos leva à conclusão que a desobediência na condição de Courant não leva necessariamente a uma solução pior e menos precisa do problema, pelo contrário. A desobediência à condição apresentou, no caso desta rede, melhores resultados com relação ao cálculo da rugosidade. Atenção deve ser dada, entretanto, a soluções não satisfatórias que podem apresentar erros consideravelmente mais altos. Outro fator a se observar, no caso da rede 1, é que as configurações de algoritmo genético que apresentaram as melhores funções objetivo no teste piloto não foram as funções que apresentaram um melhor resultado nas simulações finais.

6.3.2 Rede 2

6.3.2.1 Celeridade Fictícia

Nos cálculos com celeridade fictícia para a rede 2 as FO's encontradas apresentaram um comportamento bem semelhante ao longo das gerações. As rugosidades, em geral, apresentaram valores sempre em torno da rugosidade observada e com erros muito grandes em poucos tubos.

Mais uma vez as cargas e vazões recalculadas apresentaram erros desconsideráveis, tanto para regime permanente e regime transiente.

6.3.2.2 Celeridade Real

Para a celeridade real, com poucas exceções, os resultados também se mantiveram próximos da rugosidade observada, embora o tubo 6 tenha apresentado resultados com erros muito altos.

Da mesma forma como no cálculo com celeridades fictícias, as rugosidades calculadas foram utilizadas para novos cálculos de cargas e vazões permanentes e transientes. Os erros, mais uma vez, foram irrisórios para estas situações.

6.3.2.3 Menores Funções Objetivo

Observando os resultados para a escolha das melhores soluções, os casos escolhidos foram os casos 3 e 4, que apresentaram as menores funções objetivo nas simulações para a rede 2.

Os dois casos apresentaram resultados distintos na rugosidade, com um caso apresentando erros menores em alguns tubos, sendo que o caso 3 quase sempre apresentou os maiores erros. Quando a análise é levada ao cálculo das cargas e vazões, os erros obtidos mais uma vez foram muito pequenos para os dois casos, embora o caso 3 tenha apresentado alguns erros maiores.

Isso nos leva a observar que negligenciar a condição de Courant pode levar a resultados até mais satisfatórios que o cálculo com celeridade fictícia.

6.4 Conclusão

Pelos resultados deste trabalho conclui-se que a diferença de cálculo do método transiente inverso com auxílio do algoritmo genético utilizando celeridade real ou fictícia não é significativa. Analisando as duas redes, de diferentes tamanhos e características, encontrou-se resultados semelhantes na maioria das situações. A única situação de erros mais discrepante foi o erro médio relativo da rugosidade da rede 2. Neste caso, o erro médio relativo da celeridade fictícia foi muito maior que para celeridade real. A razão disso pode ter sido pelo fato do caso 3 não ter apresentado os melhores resultados de rugosidade da celeridade fictícia, embora tivesse a menor função objetivo. Isso nos permite observar que nem sempre a menor função objetivo gera os melhores resultados.

Os resultados deste trabalho mostram que a diferença e erro nos resultados gerados

pelo cálculo com celeridade real pode não ser tão grande quanto se imaginava, podendo ser, na verdade, ainda melhores que os resultados com celeridade fictícia.

Também se vê que as diferentes configurações de algoritmo genético podem mudar drasticamente os resultados, necessitando um cuidado maior ao escolhê-las.

Finalmente, percebe-se que a condição de Courant não é o único fator que define a estabilidade de um método, pelo fato de os resultados para ambos os tipos de celeridade serem bem semelhantes. Apesar de ser um fator importante para a maioria dos problemas hidráulicos, para redes ele não se mostrou ser um fator crítico.

Algumas melhorias neste estudo podem ser feitas, de forma a chegar em resultados de forma mais consistente. Algumas delas são: repetir o procedimento para redes de outros tamanhos, formatos e variações nos parâmetros; utilizar o algoritmo genético com as demais combinações possíveis de elitismo, cruzamento e mutação; um estudo que avalie a variação de mais de um parâmetro físico da rede; a comparação entre soluções que não geraram a melhor função objetivo; a utilização de diferentes cálculos de função objetivo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, P. N. de. **Estudo comparativo da calibração de rugosidades em redes de distribuição de água submetidas a regimes de escoamento transiente rápido e lento.** 2017. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- ARAÚJO, F. F. V. de. **Modelo hidráulico baseado no método das características e algoritmos genéticos para otimização da operação de redes de abastecimento de água e de estações de bombeamento,** 2010. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente.** 2003. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H. Calibração de Redes Hidráulicas com Dados Transientes de Precisão Variável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 55-66, 2004.
- BEZERRA, A. A. **Modelagem numérica computacional aplicada à calibração através de novas equações para o uso do método iterativo do gradiente hidráulico/concentração alternativo (MIGHA) em redes de distribuição de água.** 2018. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- BHAVE, P. R. Calibrating water distribution network models. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v.114, n. 1, p. 120-136, 1988.
- BOULOS, P.; ALTMAN, T. A graph-theoretic approach to explicit nonlinear pipe network optimization. **Applied mathematical modelling**, v. 15, n. 9, p. 459-466, 1991.
- CAMPOS, R. D. G. **Calibração de coeficientes de rugosidade em redes reais de abastecimento de água, usando o método iterativo do gradiente hidráulico alternativo-MIGHA.** 2018. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients.** Van Nostand Reinhold Company, 3ed, New York, 2014.
- 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**, v. 10, n. 1, 2015.
- DARWIN, C. **On the origin of species.** John Murray, London, 1859.
- DEJONG, K. **The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems.** 1975. Tese de Doutorado. University of Michigan, Ann Arbor, 1975.

DISKIN, M. H.; SIMON, E. A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. **Journal Of Hydrology**, v. 34, n. 1-2, p.129-149, 1997.

FERREIRA, F. E. F. R. **Simulação numérica e avaliação sistemática do atrito transiente em transientes gerados por falhas no conjunto moto-bomba em adutoras de recalque**. 2016. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

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

GOULART, T. D. de C. **Estudos de aprimoramento de algoritmo de calibração e aplicação em rede de distribuição de água de Cambuí (MG)**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

GUO, X.; ZHANG, C-M. Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions. **Ground Water**, v. 38, n. 6, p. 815-826, 2000.

HERRERA, F.; LOZANO, M.; VERDEGAY, J. L. Tackling real-coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis. **Artificial intelligence review**, v. 12, n. 4, p. 265-319, 1998.

HOLLAND, J. H. et al. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. MIT Press, Cambridge, 1992.

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: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. 1ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1999. p. 99-150.

MOTA, H. J. S. da. **Dimensionamento econômico de redes de distribuição de água aplicando algoritmo genético**. 2007. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 3ed Springer Science & Business Media, Berlin, 2013.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

SALVINO, M. M.; CARVALHO, P. S. O. de; GOMES, H. P. Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 503-512, 2015.

SANTOS, R. M. N. **Modelagem computacional do golpe de Aríete em adutoras**. 2000. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

SHAMIR, U.; HOWARD, C. D. D. Engineering Analysis of Water-Distribution Systems. **Journal American Water Works Association**, v. 69 n.9, p. 510-514, 1977.

SILVA, A. C. A. da. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos**. 2006. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SILVA, F. das G. B. da. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos**. 2003. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOARES, A. K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão**. 2003. Tese de Doutorado. U Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

WU, Z. Y.; SAGE, P. Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. In: **Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006**. 2008. p. 1-11.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L.; SUO, L. **Fluid transients in systems**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.

VASCONCELOS, G. C. M. P.; COSTA, B. C. A.; ARAÚJO, J. K. Identificação do fator de atrito em rede de distribuição de água por meio do Método do Transiente Inverso-Algoritmo Genético (MTI-AG) e Fórmula de Swamee. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 980-990, 2015.

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

ZAHED FILHO, K. **Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água**. 1990. 135 p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

APÊNDICE A – CARGAS TRANSIENTES

Tabela 38 - Cargas e vazões transientes observadas para a rede 1

TEMPO	H (m)		Q (m ³ /s)	
	Cel. Fictícia	Cel. Real	Cel. Fictícia	Cel. Real
0.000	438.14	438.13	0.00611	0.00611
0.100	438.53	438.52	0.00616	0.00616
0.200	438.93	438.90	0.00621	0.00621
0.300	439.32	439.28	0.00626	0.00626
0.400	439.71	439.67	0.00631	0.00631
0.500	440.11	440.05	0.00635	0.00636
0.600	440.50	440.44	0.00640	0.00641
0.700	440.90	440.82	0.00645	0.00646
0.800	441.29	441.20	0.00650	0.00651
0.900	441.69	441.59	0.00655	0.00656
1.000	442.08	441.97	0.00660	0.00661
1.100	442.97	442.84	0.00671	0.00672
1.200	443.84	443.71	0.00682	0.00683
1.300	444.64	444.48	0.00692	0.00693
1.400	445.43	445.26	0.00702	0.00703
1.500	446.23	446.03	0.00712	0.00713
1.600	447.02	446.81	0.00722	0.00723
1.700	447.82	447.58	0.00732	0.00733
1.800	448.62	448.36	0.00742	0.00743
1.900	449.41	449.13	0.00752	0.00753
2.000	450.22	449.90	0.00762	0.00763
2.100	451.01	450.68	0.00772	0.00773
2.200	451.80	451.47	0.00782	0.00783
2.300	452.47	452.12	0.00792	0.00793
2.400	453.14	452.77	0.00801	0.00802
2.500	453.80	453.42	0.00811	0.00812
2.600	454.47	454.08	0.00821	0.00821
2.700	455.14	454.73	0.00830	0.00831
2.800	455.80	455.38	0.00840	0.00841
2.900	456.47	456.03	0.00850	0.00850
3.000	457.14	456.69	0.00859	0.00860
3.100	457.19	456.75	0.00868	0.00868
3.200	457.23	456.81	0.00877	0.00877
3.300	457.26	456.86	0.00887	0.00887
3.400	457.28	456.91	0.00897	0.00897
3.500	457.33	456.99	0.00906	0.00906
3.600	457.37	457.06	0.00916	0.00915

3.700	457.41	457.14	0.00925	0.00924
3.800	457.45	457.22	0.00934	0.00933
3.900	457.53	457.31	0.00943	0.00942
4.000	457.62	457.41	0.00952	0.00951
4.100	456.91	456.73	0.00961	0.00960
4.200	456.21	456.04	0.00970	0.00969
4.300	455.64	455.50	0.00980	0.00978
4.400	455.06	454.95	0.00989	0.00988
4.500	454.50	454.42	0.00999	0.00997
4.600	453.94	453.88	0.01008	0.01006
4.700	453.36	453.33	0.01018	0.01016
4.800	452.78	452.78	0.01027	0.01025
4.900	452.35	452.37	0.01036	0.01034
5.000	451.91	451.96	0.01046	0.01043
5.100	450.59	450.64	0.01045	0.01043
5.200	449.26	449.31	0.01045	0.01042
5.300	448.16	448.23	0.01044	0.01041
5.400	447.06	447.14	0.01043	0.01040
5.500	445.94	446.02	0.01043	0.01039
5.600	444.82	444.90	0.01042	0.01039
5.700	443.68	443.78	0.01041	0.01038
5.800	442.54	442.65	0.01041	0.01037
5.900	441.51	441.66	0.01040	0.01036
6.000	440.48	440.67	0.01039	0.01035
6.100	439.95	440.11	0.01038	0.01035
6.200	439.41	439.55	0.01037	0.01035
6.300	439.15	439.27	0.01038	0.01036
6.400	438.88	438.99	0.01040	0.01037
6.500	438.55	438.63	0.01041	0.01039
6.600	438.22	438.28	0.01042	0.01040
6.700	437.87	437.91	0.01043	0.01042
6.800	437.52	437.54	0.01045	0.01044
6.900	437.09	437.12	0.01045	0.01045
7.000	436.66	436.69	0.01046	0.01046
7.100	436.85	436.90	0.01047	0.01047
7.200	437.05	437.10	0.01048	0.01049
7.300	437.12	437.15	0.01047	0.01048
7.400	437.19	437.19	0.01047	0.01047
7.500	437.23	437.22	0.01045	0.01045
7.600	437.27	437.25	0.01044	0.01044
7.700	437.32	437.26	0.01044	0.01043
7.800	437.38	437.28	0.01043	0.01042

7.900	437.19	437.09	0.01042	0.01041
8.000	437.01	436.89	0.01041	0.01040
8.100	438.28	438.14	0.01041	0.01040
8.200	439.54	439.39	0.01041	0.01040
8.300	440.52	440.33	0.01041	0.01040
8.400	441.50	441.28	0.01041	0.01041
8.500	442.48	442.23	0.01043	0.01044
8.600	443.47	443.19	0.01045	0.01046
8.700	444.49	444.17	0.01047	0.01049
8.800	445.52	445.15	0.01049	0.01051
8.900	446.27	445.85	0.01052	0.01054
9.000	447.01	446.55	0.01054	0.01056
9.100	447.43	447.03	0.01053	0.01055
9.200	447.83	447.51	0.01052	0.01055
9.300	447.85	447.58	0.01051	0.01053
9.400	447.87	447.65	0.01049	0.01051
9.500	447.98	447.86	0.01046	0.01047
9.600	448.09	448.06	0.01043	0.01044
9.700	448.30	448.36	0.01040	0.01040
9.800	448.51	448.65	0.01037	0.01036
9.900	448.59	448.73	0.01035	0.01033
10.000	448.66	448.80	0.01032	0.01030
10.100	448.27	448.42	0.01029	0.01027
10.200	447.87	448.04	0.01027	0.01023
10.300	447.52	447.69	0.01027	0.01024
10.400	447.17	447.34	0.01027	0.01024
10.500	446.87	447.05	0.01028	0.01025
10.600	446.57	446.76	0.01029	0.01026
10.700	446.28	446.47	0.01031	0.01029
10.800	445.99	446.19	0.01033	0.01031
10.900	446.00	446.16	0.01035	0.01034
11.000	446.00	446.13	0.01038	0.01037
11.100	444.88	445.00	0.01039	0.01039
11.200	443.75	443.87	0.01041	0.01041
11.300	442.96	443.12	0.01040	0.01040
11.400	442.18	442.36	0.01039	0.01039
11.500	441.42	441.64	0.01038	0.01037
11.600	440.67	440.92	0.01036	0.01036
11.700	439.87	440.22	0.01033	0.01032
11.800	439.07	439.52	0.01030	0.01029
11.900	438.68	439.20	0.01027	0.01025
12.000	438.28	438.88	0.01024	0.01022

12.100	438.05	438.58	0.01024	0.01021
12.200	437.83	438.28	0.01023	0.01020
12.300	438.08	438.46	0.01023	0.01020
12.400	438.32	438.64	0.01023	0.01020
12.500	438.37	438.54	0.01025	0.01022
12.600	438.42	438.45	0.01027	0.01025
12.700	438.30	438.19	0.01029	0.01027
12.800	438.18	437.93	0.01031	0.01030
12.900	438.32	438.04	0.01034	0.01033
13.000	438.45	438.14	0.01037	0.01037
13.100	438.91	438.54	0.01041	0.01040
13.200	439.36	438.95	0.01044	0.01044
13.300	439.85	439.43	0.01045	0.01045
13.400	440.35	439.90	0.01046	0.01047
13.500	440.78	440.33	0.01044	0.01045
13.600	441.21	440.76	0.01043	0.01044
13.700	441.61	441.18	0.01042	0.01043
13.800	442.02	441.59	0.01040	0.01041
13.900	442.13	441.81	0.01037	0.01038
14.000	442.24	442.02	0.01033	0.01034
14.100	443.21	443.03	0.01031	0.01032
14.200	444.17	444.04	0.01028	0.01029
14.300	444.76	444.65	0.01027	0.01028
14.400	445.35	445.26	0.01026	0.01027
14.500	445.89	445.80	0.01026	0.01027
14.600	446.44	446.34	0.01026	0.01027
14.700	446.96	446.76	0.01028	0.01028
14.800	447.49	447.17	0.01030	0.01029
14.900	447.56	447.16	0.01031	0.01031
15.000	447.64	447.15	0.01033	0.01032
15.100	447.64	447.20	0.01034	0.01033
15.200	447.63	447.26	0.01036	0.01034
15.300	447.15	446.83	0.01036	0.01035
15.400	446.67	446.41	0.01037	0.01036
15.500	446.46	446.34	0.01037	0.01035
15.600	446.25	446.27	0.01036	0.01035
15.700	446.31	446.47	0.01034	0.01033
15.800	446.37	446.67	0.01032	0.01031
15.900	446.11	446.45	0.01030	0.01030
16.000	445.85	446.22	0.01028	0.01028
16.100	445.45	445.89	0.01025	0.01025
16.200	445.04	445.55	0.01021	0.01021

16.300	444.55	445.07	0.01020	0.01020
16.400	444.05	444.59	0.01019	0.01019
16.500	443.61	444.18	0.01019	0.01019
16.600	443.18	443.77	0.01019	0.01019
16.700	442.80	443.40	0.01019	0.01019
16.800	442.42	443.03	0.01019	0.01019
16.900	442.26	442.73	0.01021	0.01020
17.000	442.09	442.44	0.01023	0.01021
17.100	441.33	441.62	0.01025	0.01022
17.200	440.57	440.80	0.01026	0.01023
17.300	440.15	440.30	0.01028	0.01024
17.400	439.72	439.79	0.01029	0.01026
17.500	439.36	439.38	0.01030	0.01026
17.600	438.99	438.97	0.01031	0.01027
17.700	438.67	438.73	0.01031	0.01027
17.800	438.36	438.50	0.01031	0.01027
17.900	438.53	438.72	0.01029	0.01027
18.000	438.69	438.94	0.01028	0.01027
18.100	438.87	439.06	0.01028	0.01028
18.200	439.05	439.18	0.01027	0.01028
18.300	439.71	439.79	0.01026	0.01028
18.400	440.37	440.40	0.01025	0.01027
18.500	440.72	440.61	0.01025	0.01027
18.600	441.06	440.82	0.01025	0.01028
18.700	441.06	440.73	0.01025	0.01028
18.800	441.05	440.63	0.01025	0.01028
18.900	441.39	440.97	0.01026	0.01028
19.000	441.73	441.31	0.01027	0.01028
19.100	442.03	441.58	0.01028	0.01029
19.200	442.34	441.85	0.01030	0.01029
19.300	442.77	442.31	0.01030	0.01029
19.400	443.21	442.77	0.01030	0.01028
19.500	443.55	443.07	0.01030	0.01028
19.600	443.90	443.37	0.01031	0.01027
19.700	444.16	443.61	0.01031	0.01028
19.800	444.42	443.85	0.01031	0.01028
19.900	444.55	444.09	0.01030	0.01028
20.000	444.67	444.34	0.01030	0.01028
20.100	445.19	444.89	0.01029	0.01028
20.200	445.71	445.45	0.01028	0.01028
20.300	445.97	445.80	0.01027	0.01028
20.400	446.23	446.15	0.01026	0.01029

20.500	446.46	446.45	0.01025	0.01028
20.600	446.69	446.74	0.01024	0.01028
20.700	446.85	446.84	0.01024	0.01028
20.800	447.01	446.93	0.01024	0.01028
20.900	446.73	446.65	0.01023	0.01027
21.000	446.44	446.36	0.01023	0.01025
21.100	446.17	446.16	0.01023	0.01024
21.200	445.89	445.96	0.01022	0.01023
21.300	445.15	445.30	0.01022	0.01021
21.400	444.40	444.65	0.01022	0.01020
21.500	444.00	444.38	0.01021	0.01018
21.600	443.59	444.12	0.01021	0.01017
21.700	443.55	444.13	0.01021	0.01017
21.800	443.51	444.14	0.01021	0.01016
21.900	443.14	443.74	0.01021	0.01017
22.000	442.78	443.33	0.01021	0.01017
22.100	442.56	443.08	0.01021	0.01018
22.200	442.35	442.84	0.01021	0.01018
22.300	441.99	442.39	0.01022	0.01020
22.400	441.64	441.94	0.01022	0.01021
22.500	441.40	441.72	0.01023	0.01023
22.600	441.17	441.50	0.01023	0.01024
22.700	441.06	441.40	0.01023	0.01025
22.800	440.94	441.30	0.01022	0.01025
22.900	440.89	441.13	0.01023	0.01025
23.000	440.84	440.97	0.01023	0.01026
23.100	440.59	440.72	0.01023	0.01025
23.200	440.33	440.46	0.01023	0.01024
23.300	440.24	440.29	0.01023	0.01023
23.400	440.14	440.11	0.01023	0.01022
23.500	440.03	439.97	0.01022	0.01021
23.600	439.91	439.82	0.01022	0.01019
23.700	439.87	439.86	0.01021	0.01018
23.800	439.84	439.90	0.01021	0.01017
23.900	440.15	440.19	0.01021	0.01018
24.000	440.46	440.49	0.01022	0.01019
24.100	440.76	440.73	0.01023	0.01020
24.200	441.07	440.96	0.01023	0.01021
24.300	441.79	441.55	0.01024	0.01023
24.400	442.50	442.13	0.01025	0.01025
24.500	442.89	442.35	0.01026	0.01026
24.600	443.28	442.58	0.01027	0.01028

24.700	443.31	442.57	0.01028	0.01029
24.800	443.34	442.56	0.01028	0.01030
24.900	443.69	442.95	0.01028	0.01030
25.000	444.04	443.34	0.01027	0.01030
25.100	444.16	443.54	0.01027	0.01030
25.200	444.29	443.74	0.01027	0.01029
25.300	444.58	444.19	0.01025	0.01028
25.400	444.86	444.64	0.01024	0.01026
25.500	445.01	444.80	0.01023	0.01024
25.600	445.15	444.96	0.01022	0.01022
25.700	445.14	444.99	0.01021	0.01020
25.800	445.13	445.01	0.01020	0.01019
25.900	445.11	445.12	0.01019	0.01018
26.000	445.10	445.23	0.01018	0.01017
26.100	445.12	445.24	0.01018	0.01017
26.200	445.14	445.25	0.01019	0.01017
26.300	445.09	445.28	0.01019	0.01017
26.400	445.05	445.31	0.01020	0.01018
26.500	445.05	445.30	0.01021	0.01019
26.600	445.05	445.30	0.01022	0.01021
26.700	444.99	445.13	0.01023	0.01022
26.800	444.93	444.95	0.01024	0.01024
26.900	444.63	444.65	0.01024	0.01024
27.000	444.33	444.34	0.01024	0.01024
27.100	444.04	444.07	0.01023	0.01024
27.200	443.74	443.80	0.01023	0.01023
27.300	443.12	443.31	0.01022	0.01022
27.400	442.50	442.83	0.01021	0.01021
27.500	442.19	442.70	0.01019	0.01020
27.600	441.89	442.56	0.01018	0.01018
27.700	441.91	442.62	0.01017	0.01017
27.800	441.94	442.68	0.01016	0.01016
27.900	441.67	442.40	0.01016	0.01015
28.000	441.40	442.12	0.01015	0.01014
28.100	441.37	441.99	0.01015	0.01014
28.200	441.35	441.87	0.01015	0.01014
28.300	441.12	441.47	0.01016	0.01015
28.400	440.90	441.08	0.01018	0.01016
28.500	440.82	440.97	0.01019	0.01017
28.600	440.75	440.87	0.01020	0.01018
28.700	440.83	440.88	0.01022	0.01019
28.800	440.91	440.90	0.01023	0.01021

28.900	440.96	440.81	0.01024	0.01022
29.000	441.01	440.73	0.01025	0.01023
29.100	441.15	440.86	0.01026	0.01024
29.200	441.29	440.98	0.01026	0.01024
29.300	441.43	441.03	0.01025	0.01025
29.400	441.56	441.07	0.01025	0.01025
29.500	441.64	441.17	0.01024	0.01024
29.600	441.72	441.27	0.01023	0.01023
29.700	441.86	441.53	0.01021	0.01022
29.800	442.00	441.79	0.01020	0.01021
29.900	442.26	442.10	0.01019	0.01021
30.000	442.53	442.40	0.01019	0.01021

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 39 - Cargas e vazões transientes observadas para a rede 2

Tempo (s)	HO (m) - transiente		Q (m ³ /s) - transiente	
	Cel. Fic.	Cel. Real	Cel. Fic.	Cel. Real
0.000	48.02	48.02	0.20904	0.20903
0.125	48.85	49.00	0.20803	0.20798
0.250	49.68	49.99	0.20702	0.20693
0.375	50.51	50.97	0.20601	0.20587
0.500	51.34	51.96	0.20500	0.20482
0.625	52.09	52.85	0.20409	0.20388
0.750	52.84	53.74	0.20318	0.20293
0.875	53.59	54.62	0.20226	0.20199
1.000	54.34	55.50	0.20135	0.20105
1.125	56.09	57.57	0.19923	0.19885
1.250	57.83	59.64	0.19710	0.19665
1.375	59.67	61.80	0.19487	0.19434
1.500	61.51	63.96	0.19263	0.19204
1.625	63.23	65.97	0.19054	0.18991
1.750	64.95	67.98	0.18845	0.18777
1.875	66.68	69.99	0.18635	0.18563
2.000	68.40	72.00	0.18426	0.18348
2.125	69.66	73.44	0.18198	0.18118
2.250	71.00	74.96	0.17960	0.17879
2.375	72.47	76.61	0.17708	0.17626
2.500	74.06	78.43	0.17452	0.17368
2.625	75.68	80.30	0.17199	0.17113
2.750	77.34	82.21	0.16941	0.16854
2.875	78.98	84.10	0.16686	0.16597
3.000	80.66	86.04	0.16433	0.16341
3.125	81.15	86.50	0.16144	0.16054
3.250	81.78	87.13	0.15840	0.15752
3.375	82.30	87.64	0.15541	0.15455
3.500	83.13	88.50	0.15235	0.15151
3.625	84.16	89.62	0.14926	0.14842
3.750	85.25	90.83	0.14609	0.14525
3.875	86.40	92.06	0.14285	0.14201
4.000	87.48	93.23	0.13968	0.13884
4.125	87.88	93.53	0.13646	0.13564
4.250	88.43	94.02	0.13317	0.13237
4.375	88.73	94.25	0.12998	0.12920
4.500	88.82	94.19	0.12687	0.12611
4.625	89.10	94.39	0.12380	0.12304
4.750	89.38	94.59	0.12066	0.11992
4.875	89.65	94.77	0.11750	0.11678

5.000	89.73	94.73	0.11439	0.11368
5.125	88.42	93.11	0.11361	0.11302
5.250	86.97	91.32	0.11283	0.11235
5.375	85.44	89.43	0.11202	0.11166
5.500	83.12	86.61	0.11126	0.11105
5.625	80.71	83.68	0.11031	0.11022
5.750	78.24	80.66	0.10932	0.10935
5.875	75.70	77.61	0.10851	0.10866
6.000	73.08	74.49	0.10769	0.10792
6.125	71.10	72.23	0.10677	0.10709
6.250	68.69	69.44	0.10585	0.10626
6.375	66.27	66.64	0.10518	0.10567
6.500	63.70	63.72	0.10450	0.10506
6.625	60.86	60.41	0.10384	0.10446
6.750	57.85	56.93	0.10325	0.10392
6.875	54.79	53.42	0.10264	0.10334
7.000	51.96	50.17	0.10209	0.10281
7.125	50.18	48.21	0.10209	0.10278
7.250	48.11	45.91	0.10220	0.10287
7.375	46.18	43.73	0.10240	0.10305
7.500	44.54	41.97	0.10287	0.10349
7.625	42.75	40.00	0.10363	0.10422
7.750	40.76	37.80	0.10451	0.10509
7.875	38.81	35.61	0.10528	0.10583
8.000	37.02	33.55	0.10610	0.10663
8.125	36.47	32.99	0.10697	0.10745
8.250	35.96	32.50	0.10796	0.10838
8.375	35.63	32.16	0.10877	0.10913
8.500	35.51	32.20	0.10971	0.10996
8.625	35.14	31.92	0.11073	0.11092
8.750	34.99	31.88	0.11175	0.11188
8.875	34.79	31.77	0.11306	0.11313
9.000	34.60	31.65	0.11426	0.11429
9.125	34.01	30.99	0.11532	0.11534
9.250	33.51	30.51	0.11655	0.11653
9.375	33.08	30.14	0.11774	0.11771
9.500	33.61	30.77	0.11854	0.11849
9.625	34.29	31.59	0.11911	0.11906
9.750	35.39	32.91	0.11969	0.11961
9.875	36.87	34.64	0.11994	0.11980
10.000	38.34	36.34	0.12023	0.12005

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 40 - Cargas transientes para as rugosidades calculadas na rede 1

t (s)	H (m) - regime transiente							
	Observado Cel. Ficticia	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Observado Cel. Real	Caso 4	Caso 5	Caso 6
0.000	438.14	438.12	438.13	438.13	438.13	438.13	438.13	438.13
0.100	438.53	438.52	438.53	438.53	438.52	438.52	438.51	438.52
0.200	438.93	438.91	438.92	438.92	438.90	438.90	438.90	438.90
0.300	439.32	439.31	439.32	439.32	439.28	439.28	439.28	439.29
0.400	439.71	439.70	439.71	439.71	439.67	439.67	439.67	439.67
0.500	440.11	440.09	440.10	440.10	440.05	440.05	440.05	440.05
0.600	440.50	440.49	440.50	440.50	440.44	440.43	440.44	440.44
0.700	440.90	440.88	440.89	440.90	440.82	440.82	440.82	440.82
0.800	441.29	441.28	441.29	441.29	441.20	441.20	441.21	441.21
0.900	441.69	441.67	441.68	441.68	441.59	441.58	441.59	441.59
1.000	442.08	442.06	442.07	442.08	441.97	441.97	441.97	441.97
1.100	442.97	442.95	442.96	442.96	442.84	442.83	442.84	442.84
1.200	443.84	443.83	443.84	443.84	443.71	443.71	443.71	443.71
1.300	444.64	444.63	444.63	444.64	444.48	444.48	444.48	444.48
1.400	445.43	445.42	445.43	445.44	445.26	445.25	445.25	445.25
1.500	446.23	446.22	446.23	446.23	446.03	446.03	446.03	446.03
1.600	447.02	447.02	447.03	447.03	446.81	446.81	446.80	446.80
1.700	447.82	447.82	447.82	447.83	447.58	447.58	447.57	447.57
1.800	448.62	448.61	448.62	448.62	448.36	448.35	448.35	448.35
1.900	449.41	449.41	449.42	449.42	449.13	449.13	449.12	449.12
2.000	450.22	450.21	450.22	450.22	449.90	449.90	449.90	449.90
2.100	451.01	451.00	451.01	451.01	450.68	450.68	450.68	450.68
2.200	451.80	451.79	451.80	451.80	451.47	451.46	451.46	451.46
2.300	452.47	452.46	452.47	452.47	452.12	452.11	452.11	452.11
2.400	453.14	453.13	453.13	453.14	452.77	452.76	452.77	452.76
2.500	453.80	453.80	453.80	453.81	453.42	453.42	453.42	453.42
2.600	454.47	454.47	454.47	454.47	454.08	454.07	454.07	454.07
2.700	455.14	455.13	455.14	455.14	454.73	454.72	454.72	454.73
2.800	455.80	455.80	455.81	455.81	455.38	455.38	455.38	455.38
2.900	456.47	456.47	456.47	456.48	456.03	456.03	456.03	456.03
3.000	457.14	457.14	457.14	457.14	456.69	456.68	456.68	456.68
3.100	457.19	457.18	457.19	457.19	456.75	456.74	456.74	456.74
3.200	457.23	457.23	457.23	457.24	456.81	456.80	456.81	456.80
3.300	457.26	457.25	457.26	457.26	456.86	456.85	456.86	456.86
3.400	457.28	457.28	457.28	457.29	456.91	456.90	456.91	456.91
3.500	457.33	457.32	457.33	457.33	456.99	456.98	456.99	456.98
3.600	457.37	457.36	457.37	457.37	457.06	457.06	457.06	457.06
3.700	457.41	457.41	457.41	457.41	457.14	457.14	457.13	457.14
3.800	457.45	457.45	457.45	457.45	457.22	457.21	457.21	457.21
3.900	457.53	457.53	457.54	457.54	457.31	457.31	457.31	457.31
4.000	457.62	457.62	457.62	457.62	457.41	457.41	457.41	457.41

4.100	456.91	456.91	456.92	456.91	456.73	456.72	456.72	456.73
4.200	456.21	456.20	456.21	456.21	456.04	456.04	456.04	456.04
4.300	455.64	455.63	455.63	455.63	455.50	455.49	455.50	455.50
4.400	455.06	455.05	455.05	455.05	454.95	454.94	454.95	454.95
4.500	454.50	454.49	454.49	454.49	454.42	454.41	454.42	454.42
4.600	453.94	453.92	453.93	453.93	453.88	453.88	453.89	453.89
4.700	453.36	453.35	453.35	453.35	453.33	453.33	453.34	453.34
4.800	452.78	452.77	452.77	452.77	452.78	452.78	452.79	452.79
4.900	452.35	452.34	452.34	452.34	452.37	452.37	452.38	452.38
5.000	451.91	451.91	451.91	451.91	451.96	451.96	451.96	451.96
5.100	450.59	450.58	450.59	450.58	450.64	450.63	450.64	450.64
5.200	449.26	449.25	449.26	449.26	449.31	449.31	449.31	449.32
5.300	448.16	448.15	448.16	448.16	448.23	448.22	448.23	448.23
5.400	447.06	447.05	447.06	447.06	447.14	447.14	447.14	447.14
5.500	445.94	445.93	445.94	445.93	446.02	446.02	446.02	446.02
5.600	444.82	444.81	444.81	444.81	444.90	444.90	444.91	444.91
5.700	443.68	443.67	443.67	443.67	443.78	443.78	443.78	443.78
5.800	442.54	442.53	442.53	442.53	442.65	442.65	442.66	442.66
5.900	441.51	441.50	441.51	441.51	441.66	441.66	441.67	441.67
6.000	440.48	440.48	440.48	440.48	440.67	440.67	440.68	440.67
6.100	439.95	439.94	439.95	439.95	440.11	440.11	440.11	440.11
6.200	439.41	439.41	439.41	439.41	439.55	439.54	439.55	439.55
6.300	439.15	439.14	439.14	439.14	439.27	439.26	439.27	439.27
6.400	438.88	438.87	438.88	438.88	438.99	438.98	438.99	438.99
6.500	438.55	438.54	438.55	438.54	438.63	438.63	438.63	438.63
6.600	438.22	438.21	438.22	438.22	438.28	438.27	438.28	438.28
6.700	437.87	437.86	437.87	437.87	437.91	437.90	437.91	437.91
6.800	437.52	437.51	437.52	437.52	437.54	437.53	437.54	437.54
6.900	437.09	437.08	437.09	437.09	437.12	437.11	437.12	437.12
7.000	436.66	436.65	436.65	436.66	436.69	436.69	436.70	436.69
7.100	436.85	436.85	436.85	436.85	436.90	436.89	436.90	436.89
7.200	437.05	437.04	437.05	437.05	437.10	437.09	437.10	437.09
7.300	437.12	437.11	437.12	437.12	437.15	437.14	437.14	437.14
7.400	437.19	437.18	437.19	437.19	437.19	437.19	437.19	437.19
7.500	437.23	437.23	437.23	437.24	437.22	437.21	437.21	437.21
7.600	437.27	437.28	437.28	437.28	437.25	437.24	437.24	437.24
7.700	437.32	437.33	437.33	437.33	437.26	437.26	437.26	437.26
7.800	437.38	437.38	437.39	437.39	437.28	437.28	437.28	437.28
7.900	437.19	437.20	437.20	437.20	437.09	437.09	437.08	437.08
8.000	437.01	437.01	437.01	437.02	436.89	436.89	436.90	436.89
8.100	438.28	438.28	438.28	438.28	438.14	438.14	438.14	438.14
8.200	439.54	439.54	439.55	439.55	439.39	439.39	439.39	439.39
8.300	440.52	440.52	440.52	440.52	440.33	440.33	440.33	440.33
8.400	441.50	441.49	441.50	441.50	441.28	441.27	441.28	441.28
8.500	442.48	442.48	442.48	442.49	442.23	442.23	442.23	442.23

8.600	443.47	443.47	443.47	443.47	443.19	443.19	443.19	443.19
8.700	444.49	444.49	444.50	444.50	444.17	444.16	444.17	444.17
8.800	445.52	445.52	445.52	445.52	445.15	445.14	445.14	445.15
8.900	446.27	446.26	446.27	446.27	445.85	445.84	445.84	445.85
9.000	447.01	447.01	447.02	447.02	446.55	446.55	446.55	446.55
9.100	447.43	447.42	447.42	447.43	447.03	447.03	447.03	447.03
9.200	447.83	447.83	447.83	447.83	447.51	447.51	447.51	447.51
9.300	447.85	447.85	447.85	447.85	447.58	447.58	447.58	447.58
9.400	447.87	447.86	447.86	447.87	447.65	447.65	447.66	447.66
9.500	447.98	447.98	447.98	447.98	447.86	447.86	447.86	447.86
9.600	448.09	448.09	448.09	448.09	448.06	448.06	448.06	448.06
9.700	448.30	448.30	448.30	448.30	448.36	448.36	448.36	448.36
9.800	448.51	448.51	448.51	448.51	448.65	448.65	448.65	448.65
9.900	448.59	448.59	448.59	448.59	448.73	448.73	448.72	448.73
10.000	448.66	448.66	448.66	448.66	448.80	448.80	448.80	448.80
10.100	448.27	448.27	448.27	448.27	448.42	448.42	448.42	448.42
10.200	447.87	447.87	447.87	447.87	448.04	448.04	448.04	448.04
10.300	447.52	447.52	447.52	447.52	447.69	447.69	447.70	447.70
10.400	447.17	447.16	447.16	447.16	447.34	447.35	447.35	447.35
10.500	446.87	446.86	446.86	446.86	447.05	447.05	447.06	447.06
10.600	446.57	446.56	446.56	446.56	446.76	446.75	446.76	446.76
10.700	446.28	446.27	446.27	446.27	446.47	446.47	446.48	446.48
10.800	445.99	445.98	445.98	445.98	446.19	446.19	446.19	446.19
10.900	446.00	445.99	445.99	445.99	446.16	446.16	446.17	446.17
11.000	446.00	446.00	446.00	446.00	446.13	446.13	446.14	446.14
11.100	444.88	444.87	444.87	444.87	445.00	445.00	445.00	445.01
11.200	443.75	443.74	443.74	443.74	443.87	443.87	443.87	443.87
11.300	442.96	442.96	442.96	442.96	443.12	443.11	443.12	443.12
11.400	442.18	442.18	442.18	442.18	442.36	442.36	442.36	442.36
11.500	441.42	441.42	441.42	441.42	441.64	441.64	441.64	441.64
11.600	440.67	440.66	440.67	440.67	440.92	440.92	440.93	440.92
11.700	439.87	439.87	439.87	439.87	440.22	440.22	440.23	440.22
11.800	439.07	439.07	439.07	439.07	439.52	439.52	439.52	439.52
11.900	438.68	438.67	438.68	438.68	439.20	439.20	439.21	439.20
12.000	438.28	438.28	438.28	438.28	438.88	438.88	438.89	438.88
12.100	438.05	438.05	438.05	438.05	438.58	438.58	438.58	438.58
12.200	437.83	437.82	437.83	437.83	438.28	438.28	438.28	438.28
12.300	438.08	438.07	438.08	438.08	438.46	438.45	438.46	438.46
12.400	438.32	438.32	438.33	438.32	438.64	438.63	438.64	438.63
12.500	438.37	438.37	438.37	438.37	438.54	438.54	438.54	438.54
12.600	438.42	438.42	438.42	438.42	438.45	438.45	438.45	438.45
12.700	438.30	438.30	438.30	438.30	438.19	438.19	438.20	438.19
12.800	438.18	438.17	438.18	438.18	437.93	437.93	437.94	437.93
12.900	438.32	438.31	438.31	438.32	438.04	438.03	438.04	438.03
13.000	438.45	438.45	438.45	438.45	438.14	438.13	438.14	438.14

13.100	438.91	438.90	438.91	438.91	438.54	438.54	438.54	438.54
13.200	439.36	439.36	439.36	439.36	438.95	438.94	438.95	438.94
13.300	439.85	439.85	439.85	439.86	439.43	439.42	439.42	439.42
13.400	440.35	440.34	440.35	440.35	439.90	439.90	439.90	439.90
13.500	440.78	440.78	440.78	440.78	440.33	440.33	440.33	440.33
13.600	441.21	441.21	441.22	441.22	440.76	440.76	440.76	440.76
13.700	441.61	441.62	441.62	441.62	441.18	441.17	441.17	441.17
13.800	442.02	442.02	442.03	442.03	441.59	441.59	441.59	441.59
13.900	442.13	442.13	442.14	442.14	441.81	441.80	441.80	441.80
14.000	442.24	442.24	442.25	442.25	442.02	442.01	442.02	442.02
14.100	443.21	443.21	443.21	443.21	443.03	443.03	443.03	443.03
14.200	444.17	444.18	444.18	444.18	444.04	444.04	444.04	444.04
14.300	444.76	444.76	444.76	444.76	444.65	444.65	444.65	444.65
14.400	445.35	445.35	445.35	445.35	445.26	445.26	445.26	445.26
14.500	445.89	445.89	445.89	445.89	445.80	445.80	445.80	445.80
14.600	446.44	446.44	446.44	446.44	446.34	446.34	446.34	446.34
14.700	446.96	446.96	446.96	446.96	446.76	446.76	446.75	446.76
14.800	447.49	447.49	447.49	447.49	447.17	447.17	447.17	447.17
14.900	447.56	447.56	447.56	447.56	447.16	447.16	447.16	447.16
15.000	447.64	447.64	447.64	447.64	447.15	447.15	447.15	447.15
15.100	447.64	447.63	447.64	447.64	447.20	447.20	447.20	447.20
15.200	447.63	447.63	447.64	447.63	447.26	447.26	447.25	447.26
15.300	447.15	447.15	447.15	447.15	446.83	446.83	446.83	446.84
15.400	446.67	446.67	446.67	446.67	446.41	446.41	446.41	446.41
15.500	446.46	446.46	446.46	446.46	446.34	446.34	446.34	446.34
15.600	446.25	446.25	446.25	446.25	446.27	446.27	446.27	446.27
15.700	446.31	446.31	446.31	446.31	446.47	446.47	446.47	446.47
15.800	446.37	446.37	446.37	446.37	446.67	446.67	446.67	446.67
15.900	446.11	446.11	446.11	446.11	446.45	446.44	446.44	446.45
16.000	445.85	445.85	445.86	445.85	446.22	446.22	446.22	446.22
16.100	445.45	445.45	445.45	445.45	445.89	445.89	445.89	445.89
16.200	445.04	445.04	445.04	445.04	445.55	445.55	445.55	445.56
16.300	444.55	444.55	444.55	444.54	445.07	445.07	445.08	445.08
16.400	444.05	444.05	444.05	444.05	444.59	444.59	444.60	444.59
16.500	443.61	443.61	443.61	443.61	444.18	444.18	444.19	444.19
16.600	443.18	443.17	443.17	443.17	443.77	443.78	443.78	443.78
16.700	442.80	442.79	442.80	442.79	443.40	443.40	443.41	443.40
16.800	442.42	442.42	442.42	442.42	443.03	443.03	443.03	443.03
16.900	442.26	442.25	442.25	442.25	442.73	442.73	442.74	442.73
17.000	442.09	442.09	442.09	442.09	442.44	442.44	442.44	442.44
17.100	441.33	441.33	441.33	441.33	441.62	441.62	441.62	441.62
17.200	440.57	440.57	440.57	440.57	440.80	440.80	440.80	440.80
17.300	440.15	440.15	440.15	440.15	440.30	440.29	440.29	440.29
17.400	439.72	439.72	439.73	439.73	439.79	439.79	439.79	439.79
17.500	439.36	439.35	439.36	439.36	439.38	439.38	439.38	439.38

17.600	438.99	438.98	438.99	438.99	438.97	438.96	438.97	438.97
17.700	438.67	438.67	438.68	438.68	438.73	438.73	438.74	438.73
17.800	438.36	438.36	438.36	438.36	438.50	438.50	438.51	438.50
17.900	438.53	438.52	438.52	438.53	438.72	438.72	438.73	438.72
18.000	438.69	438.68	438.69	438.69	438.94	438.93	438.94	438.94
18.100	438.87	438.87	438.87	438.87	439.06	439.06	439.06	439.06
18.200	439.05	439.05	439.05	439.05	439.18	439.18	439.19	439.18
18.300	439.71	439.71	439.71	439.71	439.79	439.79	439.79	439.79
18.400	440.37	440.37	440.37	440.37	440.40	440.39	440.39	440.39
18.500	440.72	440.72	440.72	440.72	440.61	440.61	440.61	440.61
18.600	441.06	441.06	441.07	441.07	440.82	440.82	440.82	440.82
18.700	441.06	441.06	441.06	441.06	440.73	440.72	440.73	440.72
18.800	441.05	441.05	441.05	441.06	440.63	440.63	440.63	440.63
18.900	441.39	441.39	441.39	441.39	440.97	440.97	440.97	440.97
19.000	441.73	441.72	441.73	441.73	441.31	441.31	441.31	441.31
19.100	442.03	442.03	442.03	442.03	441.58	441.57	441.58	441.58
19.200	442.34	442.33	442.34	442.34	441.85	441.84	441.85	441.84
19.300	442.77	442.77	442.77	442.78	442.31	442.30	442.30	442.30
19.400	443.21	443.21	443.21	443.21	442.77	442.76	442.76	442.76
19.500	443.55	443.55	443.56	443.56	443.07	443.06	443.06	443.06
19.600	443.90	443.90	443.90	443.90	443.37	443.36	443.36	443.36
19.700	444.16	444.16	444.16	444.16	443.61	443.60	443.60	443.61
19.800	444.42	444.42	444.42	444.42	443.85	443.85	443.85	443.85
19.900	444.55	444.55	444.55	444.55	444.09	444.09	444.09	444.09
20.000	444.67	444.67	444.68	444.67	444.34	444.34	444.34	444.34
20.100	445.19	445.19	445.19	445.19	444.89	444.89	444.89	444.89
20.200	445.71	445.71	445.71	445.71	445.45	445.44	445.45	445.45
20.300	445.97	445.97	445.97	445.97	445.80	445.80	445.80	445.80
20.400	446.23	446.23	446.23	446.23	446.15	446.15	446.15	446.15
20.500	446.46	446.46	446.46	446.46	446.45	446.45	446.45	446.45
20.600	446.69	446.70	446.69	446.69	446.74	446.74	446.74	446.75
20.700	446.85	446.86	446.85	446.85	446.84	446.84	446.84	446.84
20.800	447.01	447.02	447.01	447.01	446.93	446.93	446.93	446.94
20.900	446.73	446.73	446.73	446.73	446.65	446.65	446.65	446.65
21.000	446.44	446.45	446.45	446.44	446.36	446.36	446.36	446.37
21.100	446.17	446.17	446.17	446.17	446.16	446.16	446.16	446.16
21.200	445.89	445.89	445.89	445.89	445.96	445.96	445.96	445.96
21.300	445.15	445.15	445.15	445.14	445.30	445.30	445.31	445.31
21.400	444.40	444.40	444.40	444.40	444.65	444.65	444.66	444.65
21.500	444.00	444.00	444.00	443.99	444.38	444.39	444.39	444.39
21.600	443.59	443.59	443.59	443.58	444.12	444.12	444.12	444.12
21.700	443.55	443.55	443.55	443.55	444.13	444.13	444.13	444.13
21.800	443.51	443.51	443.51	443.51	444.14	444.14	444.14	444.14
21.900	443.14	443.15	443.14	443.14	443.74	443.74	443.74	443.74
22.000	442.78	442.78	442.78	442.77	443.33	443.33	443.33	443.33

22.100	442.56	442.56	442.56	442.56	443.08	443.08	443.09	443.09
22.200	442.35	442.35	442.35	442.35	442.84	442.84	442.84	442.84
22.300	441.99	441.99	441.99	441.99	442.39	442.39	442.39	442.39
22.400	441.64	441.63	441.64	441.63	441.94	441.94	441.94	441.94
22.500	441.40	441.40	441.40	441.40	441.72	441.72	441.72	441.72
22.600	441.17	441.16	441.17	441.17	441.50	441.50	441.50	441.50
22.700	441.06	441.05	441.05	441.05	441.40	441.40	441.40	441.40
22.800	440.94	440.94	440.94	440.94	441.30	441.29	441.30	441.29
22.900	440.89	440.89	440.89	440.89	441.13	441.13	441.13	441.13
23.000	440.84	440.84	440.84	440.84	440.97	440.97	440.97	440.97
23.100	440.59	440.59	440.59	440.59	440.72	440.71	440.72	440.71
23.200	440.33	440.33	440.33	440.33	440.46	440.46	440.46	440.46
23.300	440.24	440.24	440.24	440.24	440.29	440.28	440.29	440.29
23.400	440.14	440.14	440.14	440.14	440.11	440.11	440.11	440.11
23.500	440.03	440.02	440.03	440.03	439.97	439.96	439.97	439.96
23.600	439.91	439.91	439.91	439.92	439.82	439.82	439.82	439.82
23.700	439.87	439.87	439.88	439.88	439.86	439.86	439.86	439.86
23.800	439.84	439.83	439.84	439.84	439.90	439.90	439.90	439.90
23.900	440.15	440.14	440.15	440.15	440.19	440.19	440.20	440.19
24.000	440.46	440.46	440.46	440.46	440.49	440.49	440.49	440.49
24.100	440.76	440.76	440.77	440.77	440.73	440.73	440.73	440.73
24.200	441.07	441.07	441.07	441.07	440.96	440.96	440.97	440.96
24.300	441.79	441.78	441.79	441.79	441.55	441.55	441.55	441.55
24.400	442.50	442.50	442.50	442.50	442.13	442.13	442.13	442.13
24.500	442.89	442.89	442.90	442.89	442.35	442.35	442.35	442.35
24.600	443.28	443.28	443.29	443.29	442.58	442.58	442.58	442.58
24.700	443.31	443.31	443.32	443.32	442.57	442.57	442.57	442.57
24.800	443.34	443.34	443.34	443.34	442.56	442.55	442.56	442.56
24.900	443.69	443.69	443.69	443.69	442.95	442.94	442.95	442.95
25.000	444.04	444.04	444.04	444.04	443.34	443.33	443.33	443.34
25.100	444.16	444.16	444.16	444.16	443.54	443.54	443.54	443.54
25.200	444.29	444.28	444.28	444.29	443.74	443.74	443.74	443.75
25.300	444.58	444.57	444.58	444.58	444.19	444.19	444.19	444.19
25.400	444.86	444.87	444.87	444.87	444.64	444.64	444.63	444.64
25.500	445.01	445.01	445.01	445.01	444.80	444.80	444.80	444.80
25.600	445.15	445.15	445.15	445.15	444.96	444.97	444.96	444.97
25.700	445.14	445.14	445.14	445.14	444.99	444.99	444.99	444.99
25.800	445.13	445.13	445.13	445.13	445.01	445.01	445.01	445.01
25.900	445.11	445.12	445.11	445.11	445.12	445.12	445.12	445.12
26.000	445.10	445.10	445.10	445.09	445.23	445.23	445.23	445.23
26.100	445.12	445.12	445.12	445.11	445.24	445.24	445.24	445.24
26.200	445.14	445.14	445.14	445.13	445.25	445.25	445.26	445.26
26.300	445.09	445.09	445.09	445.09	445.28	445.28	445.29	445.28
26.400	445.05	445.05	445.05	445.04	445.31	445.31	445.31	445.31
26.500	445.05	445.05	445.05	445.04	445.30	445.31	445.31	445.31

26.600	445.05	445.05	445.05	445.04	445.30	445.30	445.30	445.30
26.700	444.99	444.99	444.99	444.99	445.13	445.13	445.12	445.13
26.800	444.93	444.93	444.93	444.93	444.95	444.95	444.95	444.96
26.900	444.63	444.63	444.63	444.63	444.65	444.64	444.64	444.65
27.000	444.33	444.33	444.33	444.33	444.34	444.34	444.34	444.34
27.100	444.04	444.04	444.04	444.04	444.07	444.06	444.07	444.07
27.200	443.74	443.74	443.74	443.74	443.80	443.79	443.80	443.80
27.300	443.12	443.12	443.12	443.12	443.31	443.31	443.31	443.31
27.400	442.50	442.50	442.50	442.50	442.83	442.83	442.83	442.83
27.500	442.19	442.19	442.19	442.19	442.70	442.70	442.70	442.70
27.600	441.89	441.89	441.89	441.89	442.56	442.56	442.57	442.56
27.700	441.91	441.91	441.91	441.91	442.62	442.62	442.62	442.62
27.800	441.94	441.94	441.94	441.93	442.68	442.68	442.68	442.68
27.900	441.67	441.67	441.67	441.67	442.40	442.40	442.40	442.40
28.000	441.40	441.40	441.40	441.40	442.12	442.12	442.12	442.12
28.100	441.37	441.38	441.38	441.37	441.99	441.99	441.99	441.99
28.200	441.35	441.35	441.35	441.35	441.87	441.87	441.87	441.87
28.300	441.12	441.12	441.12	441.12	441.47	441.47	441.48	441.47
28.400	440.90	440.89	440.90	440.90	441.08	441.08	441.09	441.08
28.500	440.82	440.82	440.82	440.82	440.97	440.98	440.98	440.98
28.600	440.75	440.75	440.75	440.75	440.87	440.87	440.87	440.87
28.700	440.83	440.83	440.83	440.83	440.88	440.88	440.89	440.88
28.800	440.91	440.91	440.91	440.91	440.90	440.90	440.90	440.90
28.900	440.96	440.96	440.96	440.96	440.81	440.81	440.81	440.81
29.000	441.01	441.00	441.01	441.01	440.73	440.72	440.73	440.73
29.100	441.15	441.15	441.15	441.15	440.86	440.85	440.85	440.85
29.200	441.29	441.29	441.29	441.29	440.98	440.98	440.98	440.98
29.300	441.43	441.43	441.43	441.43	441.03	441.02	441.02	441.02
29.400	441.56	441.56	441.57	441.57	441.07	441.06	441.07	441.07
29.500	441.64	441.64	441.64	441.65	441.17	441.16	441.17	441.17
29.600	441.72	441.72	441.72	441.72	441.27	441.26	441.27	441.27
29.700	441.86	441.86	441.86	441.86	441.53	441.53	441.53	441.53
29.800	442.00	442.00	442.00	442.00	441.79	441.79	441.80	441.80
29.900	442.26	442.26	442.27	442.27	442.10	442.10	442.10	442.10
30.000	442.53	442.53	442.53	442.53	442.40	442.40	442.40	442.40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 41 - Vazões transiente utilizando as rugosidades calculadas para a rede 1

t (s)	Q (l/s) - regime transiente							
	Observado Cel. Fictícia	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Observado Cel. Real	Caso 4	Caso 5	Caso 6
0.000	6.11	5.93	6.05	6.15	6.11	5.93	6.07	6.11
0.100	6.16	5.98	6.10	6.20	6.16	5.98	6.12	6.16
0.200	6.21	6.03	6.15	6.25	6.21	6.03	6.17	6.21
0.300	6.26	6.08	6.20	6.30	6.26	6.08	6.22	6.26
0.400	6.31	6.13	6.25	6.35	6.31	6.13	6.27	6.31
0.500	6.35	6.17	6.29	6.39	6.36	6.18	6.32	6.36
0.600	6.40	6.22	6.34	6.44	6.41	6.23	6.37	6.41
0.700	6.45	6.27	6.39	6.49	6.46	6.28	6.42	6.46
0.800	6.50	6.32	6.44	6.54	6.51	6.33	6.47	6.51
0.900	6.55	6.37	6.49	6.59	6.56	6.38	6.52	6.56
1.000	6.60	6.42	6.54	6.64	6.61	6.43	6.57	6.61
1.100	6.71	6.53	6.65	6.75	6.72	6.54	6.68	6.72
1.200	6.82	6.64	6.76	6.86	6.83	6.65	6.79	6.83
1.300	6.92	6.74	6.86	6.96	6.93	6.75	6.89	6.93
1.400	7.02	6.84	6.96	7.06	7.03	6.85	6.99	7.03
1.500	7.12	6.94	7.06	7.16	7.13	6.95	7.09	7.13
1.600	7.22	7.04	7.16	7.26	7.23	7.05	7.19	7.23
1.700	7.32	7.14	7.26	7.36	7.33	7.15	7.29	7.33
1.800	7.42	7.24	7.36	7.46	7.43	7.25	7.39	7.43
1.900	7.52	7.34	7.46	7.56	7.53	7.35	7.49	7.53
2.000	7.62	7.44	7.56	7.66	7.63	7.45	7.59	7.63
2.100	7.72	7.54	7.66	7.76	7.73	7.55	7.69	7.73
2.200	7.82	7.64	7.76	7.86	7.83	7.65	7.79	7.83
2.300	7.92	7.74	7.86	7.96	7.93	7.75	7.89	7.93
2.400	8.01	7.83	7.95	8.05	8.02	7.84	7.98	8.02
2.500	8.11	7.93	8.05	8.15	8.12	7.94	8.08	8.12
2.600	8.21	8.03	8.15	8.25	8.21	8.04	8.17	8.22
2.700	8.30	8.12	8.24	8.34	8.31	8.13	8.27	8.31
2.800	8.40	8.22	8.34	8.44	8.41	8.23	8.37	8.41
2.900	8.50	8.32	8.44	8.54	8.50	8.33	8.46	8.50
3.000	8.59	8.42	8.53	8.64	8.60	8.42	8.56	8.60
3.100	8.68	8.50	8.62	8.72	8.68	8.51	8.65	8.69
3.200	8.77	8.59	8.71	8.81	8.77	8.59	8.73	8.77
3.300	8.87	8.69	8.81	8.91	8.87	8.69	8.83	8.87
3.400	8.97	8.79	8.91	9.01	8.97	8.79	8.93	8.97
3.500	9.06	8.89	9.00	9.10	9.06	8.89	9.02	9.06
3.600	9.16	8.98	9.10	9.19	9.15	8.98	9.11	9.15
3.700	9.25	9.07	9.19	9.29	9.24	9.07	9.20	9.24
3.800	9.34	9.16	9.28	9.38	9.33	9.16	9.29	9.33
3.900	9.43	9.25	9.37	9.47	9.42	9.25	9.38	9.42
4.000	9.52	9.34	9.46	9.56	9.51	9.34	9.47	9.51

4.100	9.61	9.44	9.55	9.65	9.60	9.43	9.56	9.60
4.200	9.70	9.53	9.64	9.74	9.69	9.52	9.65	9.69
4.300	9.80	9.62	9.74	9.84	9.78	9.61	9.74	9.78
4.400	9.89	9.72	9.84	9.93	9.88	9.70	9.84	9.88
4.500	9.99	9.81	9.93	10.03	9.97	9.80	9.93	9.97
4.600	10.08	9.91	10.02	10.12	10.06	9.89	10.03	10.07
4.700	10.18	10.00	10.12	10.22	10.16	9.98	10.12	10.16
4.800	10.27	10.10	10.21	10.31	10.25	10.08	10.21	10.25
4.900	10.36	10.19	10.30	10.40	10.34	10.17	10.30	10.34
5.000	10.46	10.29	10.40	10.50	10.43	10.26	10.39	10.44
5.100	10.45	10.28	10.39	10.49	10.43	10.26	10.39	10.43
5.200	10.45	10.28	10.39	10.49	10.42	10.25	10.38	10.42
5.300	10.44	10.27	10.38	10.48	10.41	10.24	10.37	10.41
5.400	10.43	10.26	10.37	10.47	10.40	10.23	10.36	10.40
5.500	10.43	10.26	10.37	10.46	10.39	10.23	10.36	10.40
5.600	10.42	10.25	10.37	10.46	10.39	10.22	10.35	10.39
5.700	10.41	10.25	10.36	10.45	10.38	10.21	10.34	10.38
5.800	10.41	10.24	10.35	10.44	10.37	10.20	10.33	10.37
5.900	10.40	10.23	10.34	10.43	10.36	10.19	10.32	10.36
6.000	10.39	10.22	10.33	10.42	10.35	10.18	10.31	10.35
6.100	10.38	10.21	10.32	10.42	10.35	10.18	10.31	10.35
6.200	10.37	10.21	10.32	10.41	10.35	10.18	10.31	10.35
6.300	10.38	10.22	10.33	10.42	10.36	10.19	10.32	10.36
6.400	10.40	10.23	10.34	10.43	10.37	10.21	10.34	10.38
6.500	10.41	10.24	10.35	10.45	10.39	10.22	10.35	10.39
6.600	10.42	10.26	10.36	10.46	10.40	10.24	10.37	10.41
6.700	10.43	10.27	10.38	10.47	10.42	10.26	10.38	10.42
6.800	10.45	10.28	10.39	10.48	10.44	10.27	10.40	10.44
6.900	10.45	10.29	10.40	10.49	10.45	10.29	10.41	10.45
7.000	10.46	10.30	10.41	10.50	10.46	10.30	10.42	10.46
7.100	10.47	10.31	10.42	10.51	10.47	10.31	10.44	10.48
7.200	10.48	10.32	10.43	10.52	10.49	10.33	10.45	10.49
7.300	10.47	10.31	10.42	10.51	10.48	10.32	10.44	10.48
7.400	10.47	10.30	10.41	10.50	10.47	10.31	10.43	10.47
7.500	10.45	10.29	10.40	10.49	10.45	10.29	10.41	10.45
7.600	10.44	10.28	10.39	10.48	10.44	10.28	10.40	10.44
7.700	10.44	10.28	10.38	10.48	10.43	10.27	10.39	10.43
7.800	10.43	10.27	10.38	10.47	10.42	10.26	10.39	10.43
7.900	10.42	10.26	10.37	10.46	10.41	10.25	10.37	10.41
8.000	10.41	10.25	10.35	10.45	10.40	10.24	10.36	10.40
8.100	10.41	10.25	10.35	10.45	10.40	10.24	10.36	10.40
8.200	10.41	10.25	10.35	10.45	10.40	10.24	10.36	10.40
8.300	10.41	10.25	10.36	10.45	10.40	10.24	10.37	10.41
8.400	10.41	10.25	10.36	10.45	10.41	10.25	10.37	10.41
8.500	10.43	10.27	10.38	10.47	10.44	10.28	10.40	10.44

8.600	10.45	10.29	10.40	10.49	10.46	10.30	10.42	10.46
8.700	10.47	10.32	10.42	10.51	10.49	10.33	10.45	10.49
8.800	10.49	10.34	10.44	10.53	10.51	10.35	10.47	10.51
8.900	10.52	10.36	10.46	10.55	10.54	10.38	10.50	10.54
9.000	10.54	10.38	10.48	10.57	10.56	10.41	10.53	10.57
9.100	10.53	10.37	10.47	10.57	10.55	10.40	10.52	10.56
9.200	10.52	10.36	10.47	10.56	10.55	10.39	10.51	10.55
9.300	10.51	10.35	10.45	10.54	10.53	10.37	10.49	10.53
9.400	10.49	10.33	10.44	10.53	10.51	10.36	10.48	10.52
9.500	10.46	10.30	10.41	10.50	10.47	10.32	10.44	10.48
9.600	10.43	10.27	10.38	10.47	10.44	10.28	10.40	10.44
9.700	10.40	10.24	10.35	10.44	10.40	10.24	10.36	10.40
9.800	10.37	10.21	10.31	10.41	10.36	10.21	10.32	10.37
9.900	10.35	10.19	10.29	10.38	10.33	10.18	10.29	10.34
10.000	10.32	10.17	10.27	10.36	10.30	10.15	10.27	10.31
10.100	10.29	10.14	10.24	10.33	10.27	10.11	10.23	10.27
10.200	10.27	10.11	10.21	10.31	10.23	10.08	10.20	10.24
10.300	10.27	10.12	10.22	10.31	10.24	10.08	10.20	10.24
10.400	10.27	10.12	10.22	10.31	10.24	10.09	10.20	10.25
10.500	10.28	10.13	10.23	10.32	10.25	10.10	10.22	10.26
10.600	10.29	10.14	10.24	10.33	10.26	10.11	10.23	10.27
10.700	10.31	10.16	10.26	10.35	10.29	10.13	10.25	10.29
10.800	10.33	10.18	10.28	10.37	10.31	10.16	10.27	10.31
10.900	10.35	10.20	10.30	10.39	10.34	10.19	10.30	10.34
11.000	10.38	10.23	10.33	10.42	10.37	10.21	10.33	10.37
11.100	10.39	10.24	10.34	10.43	10.39	10.23	10.35	10.39
11.200	10.41	10.26	10.36	10.45	10.41	10.26	10.37	10.41
11.300	10.40	10.25	10.35	10.44	10.40	10.25	10.36	10.40
11.400	10.39	10.24	10.34	10.43	10.39	10.24	10.36	10.40
11.500	10.38	10.23	10.33	10.42	10.37	10.22	10.34	10.38
11.600	10.36	10.21	10.31	10.40	10.36	10.21	10.32	10.36
11.700	10.33	10.18	10.28	10.37	10.32	10.17	10.28	10.33
11.800	10.30	10.15	10.25	10.34	10.29	10.14	10.25	10.29
11.900	10.27	10.12	10.22	10.31	10.25	10.10	10.22	10.26
12.000	10.24	10.09	10.19	10.28	10.22	10.07	10.19	10.23
12.100	10.24	10.09	10.19	10.28	10.21	10.06	10.18	10.22
12.200	10.23	10.08	10.18	10.27	10.20	10.05	10.17	10.21
12.300	10.23	10.08	10.18	10.27	10.20	10.05	10.17	10.21
12.400	10.23	10.08	10.18	10.27	10.20	10.05	10.17	10.21
12.500	10.25	10.10	10.20	10.29	10.22	10.07	10.19	10.23
12.600	10.27	10.12	10.22	10.31	10.25	10.10	10.21	10.25
12.700	10.29	10.14	10.24	10.33	10.27	10.12	10.24	10.28
12.800	10.31	10.17	10.26	10.35	10.30	10.15	10.26	10.30
12.900	10.34	10.20	10.29	10.38	10.33	10.18	10.30	10.34
13.000	10.37	10.23	10.32	10.41	10.37	10.22	10.33	10.37

13.100	10.41	10.26	10.36	10.45	10.40	10.26	10.37	10.41
13.200	10.44	10.29	10.39	10.48	10.44	10.30	10.41	10.45
13.300	10.45	10.30	10.40	10.49	10.45	10.31	10.42	10.46
13.400	10.46	10.31	10.41	10.49	10.47	10.32	10.43	10.47
13.500	10.44	10.30	10.39	10.48	10.45	10.31	10.42	10.46
13.600	10.43	10.28	10.38	10.47	10.44	10.29	10.40	10.45
13.700	10.42	10.27	10.37	10.45	10.43	10.28	10.39	10.43
13.800	10.40	10.25	10.35	10.44	10.41	10.27	10.38	10.42
13.900	10.37	10.22	10.32	10.40	10.38	10.23	10.34	10.38
14.000	10.33	10.18	10.28	10.37	10.34	10.20	10.31	10.35
14.100	10.31	10.16	10.26	10.34	10.32	10.17	10.28	10.32
14.200	10.28	10.13	10.23	10.32	10.29	10.15	10.26	10.30
14.300	10.27	10.13	10.22	10.31	10.28	10.13	10.25	10.29
14.400	10.26	10.12	10.21	10.30	10.27	10.12	10.23	10.27
14.500	10.26	10.12	10.21	10.30	10.27	10.12	10.23	10.27
14.600	10.26	10.12	10.21	10.30	10.27	10.12	10.23	10.27
14.700	10.28	10.13	10.23	10.32	10.28	10.13	10.25	10.29
14.800	10.30	10.15	10.25	10.33	10.29	10.15	10.26	10.30
14.900	10.31	10.17	10.26	10.35	10.31	10.16	10.27	10.31
15.000	10.33	10.18	10.28	10.37	10.32	10.18	10.29	10.33
15.100	10.34	10.20	10.29	10.38	10.33	10.19	10.30	10.34
15.200	10.36	10.21	10.31	10.39	10.34	10.20	10.31	10.35
15.300	10.36	10.22	10.31	10.40	10.35	10.20	10.31	10.35
15.400	10.37	10.23	10.32	10.41	10.36	10.21	10.32	10.36
15.500	10.37	10.22	10.32	10.40	10.35	10.21	10.32	10.36
15.600	10.36	10.22	10.31	10.40	10.35	10.20	10.31	10.35
15.700	10.34	10.20	10.29	10.38	10.33	10.18	10.29	10.34
15.800	10.32	10.18	10.27	10.36	10.31	10.17	10.28	10.32
15.900	10.30	10.16	10.25	10.34	10.30	10.15	10.26	10.30
16.000	10.28	10.14	10.23	10.32	10.28	10.14	10.25	10.29
16.100	10.25	10.10	10.20	10.28	10.25	10.10	10.21	10.25
16.200	10.21	10.07	10.16	10.25	10.21	10.07	10.18	10.22
16.300	10.20	10.06	10.15	10.24	10.20	10.06	10.17	10.21
16.400	10.19	10.04	10.14	10.22	10.19	10.05	10.16	10.20
16.500	10.19	10.04	10.14	10.22	10.19	10.05	10.15	10.20
16.600	10.19	10.04	10.14	10.22	10.19	10.04	10.15	10.19
16.700	10.19	10.05	10.14	10.23	10.19	10.04	10.15	10.19
16.800	10.19	10.05	10.14	10.23	10.19	10.04	10.15	10.19
16.900	10.21	10.07	10.16	10.25	10.20	10.06	10.16	10.21
17.000	10.23	10.09	10.18	10.27	10.21	10.07	10.18	10.22
17.100	10.25	10.11	10.20	10.29	10.22	10.08	10.19	10.23
17.200	10.26	10.12	10.22	10.30	10.23	10.09	10.20	10.24
17.300	10.28	10.14	10.23	10.32	10.24	10.10	10.21	10.25
17.400	10.29	10.15	10.25	10.33	10.26	10.11	10.22	10.26
17.500	10.30	10.16	10.25	10.34	10.26	10.12	10.23	10.27

17.600	10.31	10.17	10.26	10.35	10.27	10.12	10.23	10.27
17.700	10.31	10.17	10.26	10.35	10.27	10.13	10.23	10.28
17.800	10.31	10.17	10.26	10.34	10.27	10.13	10.24	10.28
17.900	10.29	10.15	10.25	10.33	10.27	10.13	10.24	10.28
18.000	10.28	10.14	10.24	10.32	10.27	10.13	10.24	10.28
18.100	10.28	10.14	10.23	10.32	10.28	10.14	10.24	10.28
18.200	10.27	10.13	10.23	10.31	10.28	10.14	10.25	10.29
18.300	10.26	10.12	10.21	10.30	10.28	10.14	10.24	10.28
18.400	10.25	10.11	10.20	10.29	10.27	10.13	10.24	10.28
18.500	10.25	10.11	10.20	10.28	10.27	10.13	10.24	10.28
18.600	10.25	10.11	10.20	10.28	10.28	10.14	10.24	10.28
18.700	10.25	10.11	10.20	10.29	10.28	10.14	10.24	10.28
18.800	10.25	10.12	10.21	10.29	10.28	10.14	10.24	10.28
18.900	10.26	10.12	10.21	10.30	10.28	10.14	10.24	10.28
19.000	10.27	10.13	10.22	10.30	10.28	10.14	10.24	10.28
19.100	10.28	10.14	10.23	10.32	10.29	10.15	10.25	10.29
19.200	10.30	10.16	10.25	10.33	10.29	10.15	10.26	10.30
19.300	10.30	10.16	10.25	10.34	10.29	10.15	10.25	10.29
19.400	10.30	10.16	10.25	10.34	10.28	10.14	10.25	10.29
19.500	10.30	10.17	10.26	10.34	10.28	10.14	10.24	10.28
19.600	10.31	10.17	10.26	10.34	10.27	10.13	10.24	10.28
19.700	10.31	10.17	10.26	10.35	10.28	10.14	10.24	10.28
19.800	10.31	10.17	10.26	10.35	10.28	10.14	10.25	10.29
19.900	10.30	10.17	10.26	10.34	10.28	10.14	10.24	10.29
20.000	10.30	10.16	10.25	10.33	10.28	10.14	10.24	10.28
20.100	10.29	10.15	10.24	10.32	10.28	10.14	10.25	10.29
20.200	10.28	10.14	10.23	10.32	10.28	10.14	10.25	10.29
20.300	10.27	10.13	10.22	10.31	10.28	10.14	10.25	10.29
20.400	10.26	10.13	10.22	10.30	10.29	10.15	10.25	10.29
20.500	10.25	10.12	10.21	10.29	10.28	10.14	10.25	10.29
20.600	10.24	10.11	10.20	10.28	10.28	10.14	10.25	10.29
20.700	10.24	10.10	10.19	10.28	10.28	10.14	10.24	10.29
20.800	10.24	10.10	10.19	10.27	10.28	10.14	10.24	10.28
20.900	10.23	10.10	10.19	10.27	10.27	10.13	10.23	10.27
21.000	10.23	10.09	10.18	10.27	10.25	10.11	10.22	10.26
21.100	10.23	10.09	10.18	10.26	10.24	10.10	10.20	10.25
21.200	10.22	10.09	10.18	10.26	10.23	10.09	10.19	10.23
21.300	10.22	10.08	10.17	10.26	10.21	10.07	10.18	10.22
21.400	10.22	10.08	10.17	10.26	10.20	10.06	10.16	10.20
21.500	10.21	10.08	10.17	10.25	10.18	10.04	10.15	10.19
21.600	10.21	10.07	10.16	10.25	10.17	10.03	10.13	10.18
21.700	10.21	10.07	10.16	10.25	10.17	10.03	10.13	10.17
21.800	10.21	10.07	10.16	10.25	10.16	10.02	10.13	10.17
21.900	10.21	10.08	10.16	10.25	10.17	10.03	10.13	10.17
22.000	10.21	10.08	10.17	10.25	10.17	10.03	10.13	10.18

22.100	10.21	10.08	10.17	10.25	10.18	10.04	10.14	10.18
22.200	10.21	10.08	10.16	10.25	10.18	10.04	10.15	10.19
22.300	10.22	10.08	10.17	10.25	10.20	10.06	10.16	10.20
22.400	10.22	10.09	10.17	10.26	10.21	10.08	10.18	10.22
22.500	10.23	10.09	10.18	10.26	10.23	10.09	10.19	10.24
22.600	10.23	10.10	10.19	10.27	10.24	10.11	10.21	10.25
22.700	10.23	10.09	10.18	10.27	10.25	10.11	10.21	10.25
22.800	10.22	10.09	10.18	10.26	10.25	10.11	10.21	10.26
22.900	10.23	10.09	10.18	10.26	10.25	10.12	10.22	10.26
23.000	10.23	10.10	10.18	10.27	10.26	10.12	10.22	10.26
23.100	10.23	10.09	10.18	10.27	10.25	10.11	10.21	10.25
23.200	10.23	10.09	10.18	10.26	10.24	10.10	10.20	10.24
23.300	10.23	10.09	10.18	10.26	10.23	10.09	10.19	10.23
23.400	10.23	10.09	10.18	10.26	10.22	10.08	10.19	10.23
23.500	10.22	10.09	10.17	10.26	10.21	10.07	10.17	10.21
23.600	10.22	10.08	10.17	10.25	10.19	10.05	10.16	10.20
23.700	10.21	10.08	10.17	10.25	10.18	10.05	10.15	10.19
23.800	10.21	10.07	10.16	10.25	10.17	10.04	10.14	10.18
23.900	10.21	10.08	10.17	10.25	10.18	10.04	10.15	10.19
24.000	10.22	10.08	10.17	10.26	10.19	10.05	10.15	10.19
24.100	10.23	10.09	10.18	10.26	10.20	10.06	10.16	10.20
24.200	10.23	10.10	10.19	10.27	10.21	10.07	10.17	10.21
24.300	10.24	10.11	10.20	10.28	10.23	10.09	10.19	10.23
24.400	10.25	10.12	10.21	10.29	10.25	10.11	10.21	10.25
24.500	10.26	10.13	10.22	10.30	10.26	10.13	10.23	10.27
24.600	10.27	10.14	10.23	10.31	10.28	10.15	10.25	10.29
24.700	10.28	10.14	10.23	10.31	10.29	10.16	10.26	10.30
24.800	10.28	10.15	10.24	10.32	10.30	10.17	10.27	10.31
24.900	10.28	10.14	10.23	10.32	10.30	10.17	10.27	10.31
25.000	10.27	10.14	10.23	10.31	10.30	10.17	10.27	10.31
25.100	10.27	10.14	10.22	10.31	10.30	10.16	10.26	10.31b
25.200	10.27	10.13	10.22	10.30	10.29	10.16	10.26	10.30
25.300	10.25	10.12	10.21	10.29	10.28	10.14	10.24	10.28
25.400	10.24	10.11	10.19	10.28	10.26	10.12	10.22	10.26
25.500	10.23	10.09	10.18	10.26	10.24	10.10	10.20	10.25
25.600	10.22	10.08	10.17	10.25	10.22	10.09	10.19	10.23
25.700	10.21	10.07	10.16	10.24	10.20	10.07	10.17	10.21
25.800	10.20	10.06	10.15	10.23	10.19	10.05	10.15	10.19
25.900	10.19	10.06	10.14	10.23	10.18	10.04	10.14	10.18
26.000	10.18	10.05	10.13	10.22	10.17	10.03	10.13	10.17
26.100	10.18	10.05	10.14	10.22	10.17	10.03	10.13	10.17
26.200	10.19	10.05	10.14	10.22	10.17	10.03	10.13	10.18
26.300	10.19	10.06	10.15	10.23	10.17	10.04	10.14	10.18
26.400	10.20	10.06	10.15	10.23	10.18	10.04	10.14	10.18
26.500	10.21	10.07	10.16	10.24	10.19	10.06	10.16	10.20

26.600	10.22	10.09	10.17	10.26	10.21	10.07	10.17	10.21
26.700	10.23	10.10	10.18	10.26	10.22	10.09	10.19	10.23
26.800	10.24	10.10	10.19	10.27	10.24	10.10	10.20	10.24
26.900	10.24	10.11	10.19	10.28	10.24	10.10	10.20	10.24
27.000	10.24	10.11	10.19	10.28	10.24	10.10	10.20	10.25
27.100	10.23	10.10	10.19	10.27	10.24	10.10	10.20	10.24
27.200	10.23	10.10	10.18	10.27	10.23	10.10	10.20	10.24
27.300	10.22	10.09	10.17	10.25	10.22	10.09	10.19	10.23
27.400	10.21	10.08	10.16	10.24	10.21	10.08	10.18	10.22
27.500	10.19	10.06	10.15	10.23	10.20	10.06	10.16	10.20
27.600	10.18	10.05	10.13	10.22	10.18	10.05	10.15	10.19
27.700	10.17	10.04	10.13	10.21	10.17	10.04	10.14	10.18
27.800	10.16	10.03	10.12	10.20	10.16	10.03	10.13	10.17
27.900	10.16	10.03	10.11	10.19	10.15	10.02	10.12	10.16
28.000	10.15	10.02	10.11	10.19	10.14	10.01	10.11	10.15
28.100	10.15	10.02	10.11	10.19	10.14	10.01	10.11	10.15
28.200	10.15	10.02	10.11	10.19	10.14	10.01	10.11	10.15
28.300	10.16	10.03	10.12	10.20	10.15	10.02	10.11	10.16
28.400	10.18	10.04	10.13	10.21	10.16	10.02	10.12	10.16
28.500	10.19	10.06	10.14	10.22	10.17	10.03	10.13	10.18
28.600	10.20	10.07	10.16	10.24	10.18	10.05	10.15	10.19
28.700	10.22	10.08	10.17	10.25	10.19	10.06	10.16	10.20
28.800	10.23	10.10	10.18	10.26	10.21	10.07	10.17	10.21
28.900	10.24	10.11	10.19	10.28	10.22	10.09	10.19	10.23
29.000	10.25	10.12	10.21	10.29	10.23	10.10	10.20	10.24
29.100	10.26	10.12	10.21	10.29	10.24	10.10	10.20	10.25
29.200	10.26	10.13	10.21	10.29	10.24	10.11	10.21	10.25
29.300	10.25	10.12	10.21	10.29	10.25	10.11	10.21	10.25
29.400	10.25	10.12	10.20	10.29	10.25	10.11	10.21	10.26
29.500	10.24	10.11	10.19	10.28	10.24	10.11	10.21	10.25
29.600	10.23	10.10	10.18	10.26	10.23	10.10	10.20	10.24
29.700	10.21	10.08	10.17	10.25	10.22	10.09	10.19	10.23
29.800	10.20	10.07	10.15	10.24	10.21	10.08	10.18	10.22
29.900	10.19	10.06	10.15	10.23	10.21	10.08	10.18	10.22
30.000	10.19	10.06	10.14	10.23	10.21	10.08	10.18	10.22

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 42 - Cargas transientes utilizando rugosidades calculadas para rede 2

t (s)	H (m) - regime transiente							
	Observado Cel. Fictícia	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Observado Cel. Real	Caso 4	Caso 5	Caso 6
0.000	48.02	48.02	48.02	48.02	48.02	48.02	48.02	48.02
0.125	48.85	48.88	48.89	48.87	49.00	49.01	49.03	49.03
0.250	49.68	49.71	49.72	49.70	49.99	50.00	50.02	50.02
0.375	50.51	50.55	50.56	50.55	50.97	50.99	51.00	51.01
0.500	51.34	51.38	51.39	51.38	51.96	51.97	51.99	51.99
0.625	52.09	52.13	52.14	52.12	52.85	52.86	52.87	52.88
0.750	52.84	52.88	52.89	52.88	53.74	53.74	53.76	53.77
0.875	53.59	53.64	53.64	53.64	54.62	54.63	54.64	54.65
1.000	54.34	54.39	54.39	54.39	55.50	55.51	55.53	55.54
1.125	56.09	56.07	56.06	56.07	57.57	57.56	57.56	57.56
1.250	57.83	57.81	57.81	57.81	59.64	59.63	59.62	59.63
1.375	59.67	59.66	59.65	59.65	61.80	61.80	61.79	61.79
1.500	61.51	61.50	61.49	61.50	63.96	63.95	63.94	63.95
1.625	63.23	63.21	63.20	63.20	65.97	65.95	65.94	65.95
1.750	64.95	64.93	64.92	64.92	67.98	67.95	67.94	67.95
1.875	66.68	66.65	66.64	66.65	69.99	69.97	69.95	69.96
2.000	68.40	68.38	68.36	68.37	72.00	71.97	71.94	71.96
2.125	69.66	69.68	69.67	69.67	73.44	73.44	73.43	73.44
2.250	71.00	71.03	71.02	71.03	74.96	74.96	74.94	74.95
2.375	72.47	72.50	72.50	72.50	76.61	76.62	76.62	76.62
2.500	74.06	74.09	74.10	74.10	78.43	78.43	78.43	78.44
2.625	75.68	75.71	75.72	75.71	80.30	80.29	80.28	80.31
2.750	77.34	77.37	77.39	77.37	82.21	82.21	82.21	82.23
2.875	78.98	79.00	79.01	78.99	84.10	84.10	84.10	84.11
3.000	80.66	80.69	80.70	80.69	86.04	86.05	86.05	86.06
3.125	81.15	81.17	81.17	81.18	86.50	86.49	86.48	86.50
3.250	81.78	81.80	81.79	81.79	87.13	87.12	87.13	87.13
3.375	82.30	82.30	82.30	82.30	87.64	87.64	87.64	87.64
3.500	83.13	83.13	83.14	83.13	88.50	88.51	88.52	88.51
3.625	84.16	84.16	84.16	84.16	89.62	89.64	89.65	89.62
3.750	85.25	85.24	85.23	85.24	90.83	90.83	90.83	90.80
3.875	86.40	86.38	86.38	86.38	92.06	92.07	92.07	92.04
4.000	87.48	87.45	87.45	87.45	93.23	93.24	93.25	93.21
4.125	87.88	87.87	87.86	87.86	93.53	93.54	93.54	93.52
4.250	88.43	88.43	88.43	88.42	94.02	94.03	94.04	94.02
4.375	88.73	88.74	88.75	88.74	94.25	94.26	94.27	94.25
4.500	88.82	88.84	88.84	88.84	94.19	94.20	94.22	94.19
4.625	89.10	89.14	89.13	89.13	94.39	94.42	94.44	94.41
4.750	89.38	89.41	89.41	89.41	94.59	94.62	94.64	94.61
4.875	89.65	89.67	89.66	89.68	94.77	94.77	94.78	94.77
5.000	89.73	89.74	89.74	89.75	94.73	94.73	94.74	94.73

5.125	88.42	88.42	88.43	88.43	93.11	93.12	93.12	93.12
5.250	86.97	86.96	86.96	86.96	91.32	91.32	91.31	91.32
5.375	85.44	85.40	85.40	85.40	89.43	89.42	89.40	89.42
5.500	83.12	83.10	83.09	83.10	86.61	86.59	86.58	86.59
5.625	80.71	80.68	80.67	80.69	83.68	83.65	83.62	83.64
5.750	78.24	78.21	78.19	78.22	80.66	80.62	80.59	80.62
5.875	75.70	75.69	75.67	75.70	77.61	77.58	77.55	77.58
6.000	73.08	73.06	73.05	73.07	74.49	74.45	74.42	74.46
6.125	71.10	71.06	71.06	71.07	72.23	72.19	72.15	72.19
6.250	68.69	68.67	68.67	68.69	69.44	69.41	69.38	69.40
6.375	66.27	66.26	66.26	66.27	66.64	66.62	66.60	66.61
6.500	63.70	63.69	63.68	63.70	63.72	63.69	63.66	63.69
6.625	60.86	60.87	60.87	60.87	60.41	60.38	60.37	60.40
6.750	57.85	57.86	57.87	57.86	56.93	56.90	56.89	56.93
6.875	54.79	54.79	54.79	54.79	53.42	53.40	53.37	53.41
7.000	51.96	51.97	51.98	51.98	50.17	50.14	50.12	50.17
7.125	50.18	50.19	50.19	50.20	48.21	48.19	48.18	48.21
7.250	48.11	48.12	48.12	48.13	45.91	45.90	45.90	45.92
7.375	46.18	46.18	46.18	46.18	43.73	43.73	43.74	43.74
7.500	44.54	44.52	44.52	44.52	41.97	41.97	41.96	41.97
7.625	42.75	42.72	42.72	42.72	40.00	39.99	39.98	39.99
7.750	40.76	40.74	40.75	40.74	37.80	37.79	37.78	37.80
7.875	38.81	38.80	38.80	38.80	35.61	35.60	35.60	35.61
8.000	37.02	37.01	37.01	37.00	33.55	33.54	33.54	33.54
8.125	36.47	36.48	36.48	36.47	32.99	32.99	33.00	32.99
8.250	35.96	35.98	35.98	35.98	32.50	32.49	32.51	32.51
8.375	35.63	35.66	35.66	35.66	32.16	32.16	32.17	32.17
8.500	35.51	35.54	35.55	35.54	32.20	32.21	32.23	32.22
8.625	35.14	35.18	35.19	35.19	31.92	31.95	31.97	31.96
8.750	34.99	35.03	35.04	35.04	31.88	31.90	31.92	31.91
8.875	34.79	34.81	34.82	34.82	31.77	31.78	31.79	31.79
9.000	34.60	34.62	34.63	34.63	31.65	31.65	31.66	31.67
9.125	34.01	34.03	34.03	34.03	30.99	30.99	31.00	31.01
9.250	33.51	33.53	33.54	33.53	30.51	30.52	30.54	30.54
9.375	33.08	33.10	33.10	33.10	30.14	30.13	30.13	30.15
9.500	33.61	33.63	33.62	33.63	30.77	30.75	30.74	30.77
9.625	34.29	34.28	34.27	34.29	31.59	31.56	31.54	31.56
9.750	35.39	35.38	35.36	35.39	32.91	32.89	32.87	32.89
9.875	36.87	36.86	36.85	36.87	34.64	34.62	34.61	34.62
10.000	38.34	38.33	38.32	38.33	36.34	36.34	36.33	36.33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 43 - Vazões transientes utilizando rugosidades calculadas para a rede 2

t (s)	Q (l/s) - regime transiente							
	Observado Cel. Fictícia	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Observado Cel. Real	Caso 4	Caso 5	Caso 6
0.000	209.04	209.04	209.04	209.04	209.03	209.03	209.03	209.03
0.125	208.03	208.04	208.04	208.03	207.98	208.02	208.04	208.00
0.250	207.02	207.03	207.03	207.02	206.93	206.97	206.99	206.94
0.375	206.01	206.00	206.01	205.98	205.87	205.92	205.95	205.89
0.500	205.00	204.99	205.00	204.97	204.82	204.87	204.89	204.84
0.625	204.09	204.09	204.10	204.06	203.88	203.93	203.95	203.90
0.750	203.18	203.17	203.18	203.15	202.93	202.98	203.00	202.95
0.875	202.26	202.25	202.26	202.22	201.99	202.04	202.06	202.01
1.000	201.35	201.34	201.35	201.31	201.05	201.10	201.12	201.07
1.125	199.23	199.17	199.18	199.14	198.85	198.90	198.91	198.85
1.250	197.10	197.05	197.06	197.02	196.65	196.70	196.71	196.65
1.375	194.87	194.80	194.81	194.77	194.34	194.39	194.41	194.34
1.500	192.63	192.56	192.58	192.53	192.04	192.10	192.12	192.05
1.625	190.54	190.43	190.43	190.41	189.91	189.95	189.95	189.88
1.750	188.45	188.34	188.34	188.32	187.77	187.82	187.81	187.75
1.875	186.35	186.24	186.24	186.22	185.63	185.67	185.67	185.61
2.000	184.26	184.13	184.13	184.10	183.48	183.54	183.54	183.45
2.125	181.98	181.87	181.88	181.84	181.18	181.25	181.26	181.17
2.250	179.60	179.50	179.51	179.48	178.79	178.86	178.87	178.78
2.375	177.08	176.96	176.97	176.94	176.26	176.32	176.33	176.24
2.500	174.52	174.40	174.40	174.37	173.68	173.76	173.77	173.66
2.625	171.99	171.87	171.87	171.84	171.13	171.21	171.22	171.11
2.750	169.41	169.30	169.31	169.27	168.54	168.63	168.64	168.53
2.875	166.86	166.76	166.77	166.73	165.97	166.06	166.08	165.97
3.000	164.33	164.24	164.26	164.20	163.41	163.50	163.53	163.42
3.125	161.44	161.35	161.38	161.31	160.54	160.66	160.70	160.57
3.250	158.40	158.32	158.35	158.28	157.52	157.64	157.68	157.55
3.375	155.41	155.32	155.34	155.27	154.55	154.66	154.70	154.57
3.500	152.35	152.24	152.26	152.18	151.51	151.62	151.65	151.52
3.625	149.26	149.15	149.16	149.10	148.42	148.53	148.57	148.43
3.750	146.09	145.98	145.99	145.93	145.25	145.36	145.39	145.26
3.875	142.85	142.72	142.74	142.67	142.01	142.11	142.13	142.01
4.000	139.68	139.55	139.57	139.50	138.84	138.95	138.97	138.85
4.125	136.46	136.30	136.32	136.26	135.64	135.74	135.76	135.63
4.250	133.17	133.01	133.01	132.96	132.37	132.47	132.49	132.35
4.375	129.98	129.80	129.81	129.75	129.20	129.29	129.30	129.17
4.500	126.87	126.69	126.69	126.64	126.11	126.20	126.22	126.08
4.625	123.80	123.61	123.61	123.57	123.04	123.13	123.13	123.01
4.750	120.66	120.48	120.48	120.44	119.92	120.01	120.01	119.89
4.875	117.50	117.33	117.34	117.29	116.78	116.87	116.88	116.76
5.000	114.39	114.21	114.22	114.17	113.68	113.78	113.79	113.66

5.125	113.61	113.44	113.46	113.39	113.02	113.13	113.16	113.01
5.250	112.83	112.66	112.68	112.62	112.35	112.46	112.48	112.34
5.375	112.02	111.84	111.85	111.80	111.66	111.75	111.77	111.64
5.500	111.26	111.08	111.09	111.04	111.05	111.15	111.17	111.03
5.625	110.31	110.13	110.14	110.08	110.22	110.33	110.35	110.21
5.750	109.32	109.15	109.17	109.10	109.35	109.47	109.48	109.35
5.875	108.51	108.33	108.34	108.27	108.66	108.77	108.79	108.65
6.000	107.69	107.52	107.54	107.46	107.92	108.05	108.08	107.93
6.125	106.77	106.62	106.63	106.56	107.09	107.22	107.27	107.10
6.250	105.85	105.70	105.72	105.64	106.26	106.40	106.44	106.28
6.375	105.18	105.03	105.05	104.97	105.67	105.80	105.83	105.67
6.500	104.50	104.34	104.35	104.27	105.06	105.19	105.23	105.06
6.625	103.84	103.68	103.69	103.62	104.46	104.59	104.63	104.46
6.750	103.25	103.08	103.10	103.02	103.92	104.05	104.08	103.92
6.875	102.64	102.48	102.50	102.42	103.34	103.47	103.50	103.34
7.000	102.09	101.93	101.95	101.88	102.81	102.94	102.97	102.81
7.125	102.09	101.91	101.93	101.86	102.78	102.91	102.94	102.78
7.250	102.20	102.03	102.04	101.97	102.87	102.99	103.02	102.86
7.375	102.40	102.21	102.23	102.16	103.05	103.17	103.18	103.03
7.500	102.87	102.67	102.69	102.62	103.49	103.60	103.62	103.47
7.625	103.63	103.42	103.42	103.36	104.22	104.33	104.34	104.20
7.750	104.51	104.31	104.32	104.26	105.09	105.20	105.22	105.07
7.875	105.28	105.08	105.10	105.02	105.83	105.95	105.98	105.82
8.000	106.10	105.90	105.90	105.83	106.63	106.76	106.79	106.62
8.125	106.97	106.77	106.78	106.71	107.45	107.57	107.60	107.43
8.250	107.96	107.76	107.77	107.70	108.38	108.50	108.52	108.36
8.375	108.77	108.57	108.58	108.51	109.13	109.25	109.28	109.11
8.500	109.71	109.51	109.52	109.45	109.96	110.09	110.11	109.95
8.625	110.73	110.53	110.54	110.47	110.92	111.05	111.08	110.91
8.750	111.75	111.56	111.57	111.50	111.88	112.01	112.03	111.87
8.875	113.06	112.86	112.87	112.80	113.13	113.26	113.28	113.12
9.000	114.26	114.08	114.09	114.01	114.29	114.44	114.48	114.29
9.125	115.32	115.14	115.17	115.07	115.34	115.50	115.54	115.35
9.250	116.55	116.38	116.40	116.31	116.53	116.69	116.73	116.55
9.375	117.74	117.57	117.59	117.50	117.71	117.85	117.89	117.72
9.500	118.54	118.36	118.38	118.29	118.49	118.64	118.67	118.50
9.625	119.11	118.93	118.95	118.86	119.06	119.21	119.25	119.07
9.750	119.69	119.49	119.52	119.42	119.61	119.76	119.80	119.62
9.875	119.94	119.73	119.76	119.66	119.80	119.94	119.98	119.80
10.000	120.23	120.01	120.04	119.95	120.05	120.19	120.23	120.05

Fonte: Elaborado pelo autor.