



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GABRIELA CELSO MELO PINHEIRO DE VASCONCELOS

**ESTUDO DA CONVENIÊNCIA DA IDENTIFICAÇÃO DO FATOR DE ATRITO E  
DA RUGOSIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO  
MÉTODO TRANSIENTE INVERSO COM ALGORITMO GENÉTICO**

FORTALEZA

2014

GABRIELA CELSO MELO PINHEIRO DE VASCONCELOS

**ESTUDO DA CONVENIÊNCIA DA IDENTIFICAÇÃO DO FATOR DE ATRITO E  
DA RUGOSIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO  
MÉTODO TRANSIENTE INVERSO COM ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia - Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- V45e Vasconcelos, Gabriela Celso Melo Pinheiro de.  
Estudo da conveniência da identificação do fator de atrito e da rugosidade em redes de distribuição de água através do método transiente inverso com algoritmo genético / Gabriela Celso Melo Pinheiro de Vasconcelos. – 2014.  
116 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2014.  
Área de Concentração: Recursos Hídricos.  
Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.
1. Recursos hídricos. 2. Calibração. I. Título.

GABRIELA CELSO MELO PINHEIRO DE VASCONCELOS

**ESTUDO DA CONVENIÊNCIA DA IDENTIFICAÇÃO DO FATOR DE ATRITO E  
DA RUGOSIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO  
MÉTODO TRANSIENTE INVERSO COM ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia - Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

Aprovada em: 10 / 11 / 2014.

BANCA EXAMINADORA



---

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



---

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



---

Prof. Dr. Luís Henrique Magalhães Costa  
Universidade Estadual do Vale do Acaraú (UVA-CE)

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha querida mãe Teresa Marly pelo exemplo de amor e dedicação e ao meu marido Lucas Soares pelo apoio, incentivo e compreensão.

## AGRADECIMENTOS

À Deus pelas oportunidades que essa vida tão maravilhosa me oferece.

Aos meus pais, Ildemar Vasconcelos e Teresa Marly, pelo amor e incentivo.

Ao meu marido e grande amigo Lucas Soares pelo amor, dedicação, carinho e por me proporcionar tantos momentos de felicidade.

Às minhas irmãs Carolina Celso e Juliana Celso pelo companheirismo.

À Bárbara, grande amiga, pelo apoio no início, meio e fim desse trabalho.

Aos meus amigos da UFPI Maria José, Marcos Vinícius, Mendonça e José de Arimatéia por apoiar e compreender a minha ausência durante essa jornada.

Ao meu querido orientador John Kenedy Araújo pela colaboração, ensinamentos e por ter acreditado que seríamos capazes.

Aos colegas Joãosué e Francisco Viana pela colaboração.

A todos os professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFC pelos ensinamentos.

Aos amigos Aécio Carvalho, Dayane Soares, Ocimara Oliveira, Suely Feitosa e todos os demais pela compreensão e incentivo à conclusão desse trabalho.

Finalmente, a todos que de alguma forma colaboraram e me incentivaram na realização desse sonho.

## RESUMO

A água é um recurso natural essencial para todas as formas de vida e a sua distribuição deve ser realizada com qualidade e sem desperdícios. Um dos métodos de otimização dos sistemas de distribuição de água é baseado na simulação (modelagem) de redes hidráulicas reais através de modelos computacionais capazes de prever o seu comportamento nas situações diversas ao longo da sua vida útil. As principais etapas desse método são calibração; operação e controle; projeto e otimização; e traçado de redes. A ideia deste trabalho é aprimorar uma dessas técnicas, a de calibração, processo de identificação dos parâmetros das tubulações (fator de atrito, rugosidade, diâmetros e outros) em redes existentes, na qual os mesmos são considerados desconhecidos. A metodologia adotada é o Método Transiente Inverso (MTI) com otimização da técnica de seleção da solução através do algoritmo Genético (AG). O objetivo principal é calibrar os principais parâmetros (fator de atrito e rugosidade) a fim de analisar a conveniência de duas técnicas: cálculo do fator de atrito pelo método pelo MTI-AG e a partir da rugosidade (com uso da fórmula de Swamee, 1993). O estudo é realizado para duas redes sintéticas tiradas da literatura, mas que representam sistemas reais. As condições impostas para a análise são: duas manobras de válvulas (lenta e brusca) responsáveis pelo evento transiente, o monitoramento de cargas transientes em somente 20% dos nós das redes e a utilização de dois tipos de seleção de solução do algoritmo genético (com elitismo e sem elitismo). Os experimentos são realizados a partir de três programas: o primeiro calcula as condições permanentes, o segundo fornece cargas transientes por meio do Método das Características (MOC) na busca das soluções das equações de movimento no escoamento transiente e o terceiro, que trabalha de forma conjugada com os demais, seleciona os melhores resultados através de iterações realizadas conforme o algoritmo genético, técnica inspirada nos mecanismos de evolução dos seres vivos. Os resultados encontrados indicam que independente das condições impostas inicialmente é mais eficiente identificar o fator de atrito a partir das rugosidades absolutas do que calibrar esse fator pelo MTI-AG devido a grande variabilidade dos fatores de atrito durante a ocorrência do evento transiente.

**Palavras-chave:** redes hidráulicas, calibração, método implícito, regime transiente, método das características, elitismo.

## ABSTRACT

Water is an essential natural resource for all life forms and their distribution should be performed with quality and without waste. One of the methods of optimization for water distribution systems is based on the simulation (modeling) for real water networks using computational models able to predict their behavior in different situations during their lifespan. The main steps of this method are calibration; operation and control; design and optimization; and networks layout. The idea of this work is to improve the calibration step with the identification of pipe parameters (friction, roughness, diameter, etc.) into existing networks in which they are considered unknown. The methodology adopted is the Transient Inverse Method (MTI) optimizing the selection technique of the solution through the Genetic Algorithm (GA). The main objective is to calibrate friction and roughness in order to analyze the convenience of two techniques: calculation of the friction factor method by MTI-AG and from the roughness (using the formula Swamee, 1993). The study was conducted in two synthetic networks taken from the literature, but representing real systems. Conditions required for the analysis are: two valve maneuvers (slow and abrupt) responsible for transient event, the monitoring of transient loads in only 20% of the network nodes and the use of two types of solution selection of genetic algorithm (with elitism and without elitism). Experiments are conducted from three programs: the first calculates the permanent conditions, the second provides transient loads through the Method of Characteristics (MOC) in search of solutions to the equations of motion in the transient flow and the third, who works in combination with the two previously describe method, selects the best results through iterations performed according to the genetic algorithm, a technique inspired by the mechanisms of evolution of living organisms. The results indicate that, regardless of the conditions originally imposed, the identification of the friction factor from the absolute roughness is more efficient than calibrate this factor by MTI-AG due to the great variability of friction factors through the occurrence of the transient event.

**Keywords:** hydraulic networks, calibration, implicit method, transient, method of characteristics, elitism.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Linhas Característica no plano x-t .....                                | 26 |
| Figura 2 - Definição da malha de discretização do método das características ..... | 27 |
| Figura 3 - Malha de cálculo .....  | 29 |
| Figura 4 - Crossover de um ponto .....   | 40 |
| Figura 5 - Mutação simples para codificação binária .....                          | 41 |
| Figura 6 - Fluxograma da Solução Indireta .....                                    | 45 |
| Figura 7 - Fluxograma do procedimento de calibração com auto correção .....        | 47 |
| Figura 8 - Rede A .....  | 49 |
| Figura 9 - Rede B .....  | 51 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 - Exemplo de abertura e fechamento de válvula .....  | 30 |
| Gráfico 2 - Manobra nº01 da válvula .....  | 53 |
| Gráfico 3 - Manobra nº 02 da válvula .....   | 53 |
| Gráfico 4 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 05 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação da rugosidade - Rede A .....      | 61 |
| Gráfico 5 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 05 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação do fator de atrito - Rede A.....  | 61 |
| Gráfico 6 - Rugosidades calibradas na Rede A considerando o tipo de seleção com elitismo   | 63 |
| Gráfico 7 - Rugosidades calibradas na Rede A considerando o tipo de seleção sem elitismo.  | 63 |
| Gráfico 8 - Fatores de atrito equivalentes na Rede A considerando o tipo de seleção com elitismo .....   | 65 |
| Gráfico 9 - Fatores de atrito equivalentes na Rede A considerando o tipo de seleção sem elitismo .....   | 65 |
| Gráfico 10 - Fatores de atrito calibrados na Rede A considerando o tipo de seleção com elitismo .....  | 66 |
| Gráfico 11 - Fatores de atrito calibrados na Rede A considerando o tipo de seleção sem elitismo .....  | 67 |
| Gráfico 12 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 04 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação da rugosidade - Rede B .....     | 70 |
| Gráfico 13 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 07 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação da rugosidade - Rede B .....     | 70 |
| Gráfico 14 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 04 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação do fator de atrito - Rede B..... | 71 |
| Gráfico 15 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 07 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação do fator de atrito - Rede B..... | 71 |
| Gráfico 16 - Rugosidades calibradas para a manobra 1 com elitismo na rede B .....  | 73 |
| Gráfico 17 - Rugosidades calibradas para a manobra 1 sem elitismo na rede B.....   | 73 |
| Gráfico 18 - Rugosidades calibradas para a manobra 2 com elitismo na rede B .....  | 74 |
| Gráfico 19 - Rugosidades calibradas para a manobra 2 sem elitismo na rede B.....   | 75 |
| Gráfico 20 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 1 com elitismo da rede B .....  | 77 |
| Gráfico 21 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 1 sem elitismo da rede B.....   | 78 |
| Gráfico 22 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 2 com elitismo da rede B .....  | 79 |
| Gráfico 23 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 2 sem elitismo da rede B.....   | 79 |
| Gráfico 24 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 1 com elitismo da rede B.....   | 80 |
| Gráfico 25 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 1 sem elitismo da rede B .....  | 81 |
| Gráfico 26 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 2 com elitismo da rede B .....  | 82 |
| Gráfico 27 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 2 sem elitismo da rede B .....  | 82 |
| Gráfico 28 - Análise do EMR (%) na identificação do fator de atrito para as condições impostas para a Rede A .....                                     | 88 |
| Gráfico 29 - Análise do EMR (%) na identificação do fator de atrito para as condições impostas para a Rede B .....                                     | 88 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores da rugosidade absoluta.....   | 31 |
| Tabela 2 - Comparação entre termos utilizados nos AGs e seu correspondente conceito na genética.....   | 35 |
| Tabela 3 - Comparação das propriedades dos Métodos Tradicionais e Algoritmos Genéticos   | 36 |
| Tabela 4 - Características físicas dos trechos da Rede A .....   | 49 |
| Tabela 5 - Características físicas dos trechos da rede B.....  | 51 |
| Tabela 6 - Valores reais adotados das rugosidades para inicialização do .....  | 55 |
| Tabela 7 - Valores reais adotados das rugosidades para inicialização do processo de calibração para Rede B .....   | 55 |
| Tabela 8 - Codificação dos valores médios da rugosidade absoluta .....   | 56 |
| Tabela 9 - Valores dos fatores de atrito equivalentes às rugosidades ( $\epsilon$ ) adotadas para a Rede A considerando as condições permanentes iniciais.....   | 57 |
| Tabela 10 - Valores dos fatores de atrito equivalentes às rugosidades ( $\epsilon$ ) adotadas para a Rede B considerando as condições permanentes iniciais ..... | 57 |
| Tabela 11 - Vazões iniciais no regime permanente dos trechos da Rede A.....  | 60 |
| Tabela 12 - Cargas hidráulicas no regime permanente nos nós da Rede A na calibração da rugosidade e fator de atrito .....  | 60 |
| Tabela 13 - Rugosidades calibradas via MTI-AG da rede A .....  | 62 |
| Tabela 14 - Valores de vazão para as novas condições permanentes da rede A .....   | 64 |
| Tabela 15 - Cálculo dos fatores de atrito equivalentes da rede A .....   | 64 |
| Tabela 16 - Fatores de atrito calibrados via MTI-AG da rede A.....   | 66 |
| Tabela 17 - Análise da conveniência entre <i>f<sub>equivalente</sub></i> e <i>f<sub>calibrado</sub></i> para a manobra 1 da rede A .....                         | 68 |
| Tabela 18 - Análise da conveniência entre <i>f<sub>equivalente</sub></i> e <i>f<sub>calibrado</sub></i> para a manobra 2 da rede A .....                         | 68 |
| Tabela 19 - Vazões iniciais no regime permanente dos trechos da Rede B .....   | 69 |
| Tabela 20 - Cargas hidráulicas no regime permanente nos nós da Rede B na calibração da rugosidade e fator de atrito .....  | 69 |
| Tabela 21 - Calibração da rugosidade via MTI-AG para a manobra 1 da rede B.....  | 72 |
| Tabela 22 - Calibração da rugosidade via MTI-AG para a manobra 2 da rede B.....  | 74 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 23 - Valores de vazão para as novas condições permanentes para a Manobra 1 da rede B .....                                       | 75 |
| Tabela 24 - Valores de vazão para as novas condições permanentes para a Manobra 2 na rede B .....                                       | 76 |
| Tabela 25 - Cálculo dos fatores de atrito equivalentes para a Manobra 1 da rede B .....   | 77 |
| Tabela 26 - Cálculo dos fatores de atrito equivalentes para a Manobra 2 da rede B .....   | 78 |
| Tabela 27 - Fatores de atrito calibrados via MTI-AG para a manobra 1 da rede B .....  | 80 |
| Tabela 28 - Fatores de atrito calibrados via MTI-AG para a manobra 2 da rede B .....  | 81 |
| Tabela 29 - Análise da conveniência entre <i>f<sub>equivalente</sub></i> e <i>f<sub>calibrado</sub></i> para a manobra 1 na rede B..... | 84 |
| Tabela 30 - Análise da conveniência entre <i>f<sub>equivalente</sub></i> e <i>f<sub>calibrado</sub></i> para a manobra 2 na rede B..... | 87 |
| Tabela 31 - Valores de fatores de atrito equivalente e calibrados para as situações impostas  | 89 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

H - carga piezométrica

Q - vazão volumétrica

A - área da seção transversal da tubulação

a - celeridade (velocidade) da onda de pressão

$a^*$  - celeridade corrigida

D - diâmetro interno da tubulação

$f$  - fator de atrito de Darcy-Weisbach

g - aceleração da gravidade

x - distância

t - tempo

$\Psi$  - parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto

$e'$  = espessura da parede da tubulação

$\nu'$  = razão de Poisson

E - módulo de elasticidade de Young da parede do conduto

K - módulo de elasticidade do fluido

$\rho$  - massa específica do fluido

$\tau$  - lei de fechamento da válvula

N - número de seções do tubo

n - número de tubos

$\varepsilon$  - rugosidade absoluta do material da tubulação

Re - número de Reynolds

$\nu$  - viscosidade cinemática do fluido

$m$  - número de bits necessários para a representação binária de um cromossomo;

$n'$  - quantidade de casas decimais para a precisão exigida;

$g_{max}$  e  $g_{min}$  - limite superior e inferior do intervalo de domínio.

## SUMÁRIO

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                              | 16 |
| <b>1.1</b>     | <b>Objetivo</b> .....                                | 17 |
| <b>2</b>       | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....                   | 18 |
| <b>2.1</b>     | <b>Modelos de calibração</b> .....                   | 18 |
| <b>2.1.1</b>   | <i>Método Iterativo</i> .....                        | 19 |
| <b>2.1.2</b>   | <i>Método Explícito</i> .....                        | 19 |
| <b>2.1.3</b>   | <i>Método Implícito</i> .....                        | 20 |
| <b>2.2</b>     | <b>Escoamento transiente em tubulações</b> .....     | 23 |
| <b>2.2.1</b>   | <i>Equações Características do Transiente</i> .....  | 27 |
| <b>2.2.1.1</b> | <i>Condições de Contorno</i> .....                   | 30 |
| <b>2.3</b>     | <b>Rugosidade</b> .....                              | 30 |
| <b>2.4</b>     | <b>Fator de atrito</b> .....                         | 31 |
| <b>2.5</b>     | <b>Algoritmo genético</b> .....                      | 33 |
| <b>2.5.1</b>   | <i>Introdução</i> .....                              | 33 |
| <b>2.5.2</b>   | <i>Terminologia</i> .....                            | 35 |
| <b>2.5.3</b>   | <i>Vantagens e desvantagens do uso de AGs</i> .....  | 36 |
| <b>2.5.4</b>   | <i>Representação dos parâmetros</i> .....            | 36 |
| <b>2.5.4.1</b> | <i>Representação binária</i> .....                   | 37 |
| <b>2.5.4.2</b> | <i>Representação real</i> .....                      | 38 |
| <b>2.5.5</b>   | <i>Seleção</i> .....                                 | 38 |
| <b>2.5.6</b>   | <i>Recombinação ou Crossover</i> .....               | 39 |
| <b>2.5.6.1</b> | <i>Crossover de um ponto</i> .....                   | 39 |
| <b>2.5.6.2</b> | <i>Crossover aritmético</i> .....                    | 40 |
| <b>2.5.7</b>   | <i>Mutação</i> .....                                 | 41 |
| <b>2.5.7.1</b> | <i>Simples</i> .....                                 | 41 |
| <b>2.5.7.2</b> | <i>Uniforme</i> .....                                | 41 |
| <b>2.5.8</b>   | <i>Função objetivo</i> .....                         | 42 |
| <b>3</b>       | <b>PROBLEMÁTICA E METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO</b> ..... | 44 |
| <b>3.1</b>     | <b>Problema Inverso e Método Indireto</b> .....      | 44 |
| <b>3.1.1</b>   | <i>Solução Indireta</i> .....                        | 45 |
| <b>3.2</b>     | <b>Formulação e metodologia de resolução</b> .....   | 46 |
| <b>3.2.1</b>   | <i>Redes de Distribuição</i> .....                   | 48 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.2.1.1 | <i>Rede A</i> .....  | 48 |
| 3.2.1.2 | <i>Rede B</i> .....  | 50 |
| 3.2.2   | <b><i>Manobras de válvulas</i></b> .....   | 52 |
| 3.2.2.1 | <i>Manobra 01</i> .....  | 52 |
| 3.2.2.2 | <i>Manobra 02</i> .....  | 53 |
| 3.2.3   | <b><i>Parâmetros adotados no Algoritmo genético</i></b> .....  | 53 |
| 3.2.4   | <b><i>Estudos de caso</i></b> .....  | 54 |
| 3.2.4.1 | <i>Identificação da rugosidade absoluta, <math>\epsilon</math></i> .....   | 54 |
| 3.2.4.2 | <i>Identificação dos fatores de atrito, <math>f</math></i> .....   | 56 |
| 3.2.4.3 | <i>Estudo da conveniência da calibração do fator de atrito equivalente com o fator de atrito calibrado diretamente</i> ..... | 57 |
| 3.2.5   | <b><i>Indicadores de eficiência</i></b> .....  | 58 |
| 3.2.5.1 | <i>Erro Médio Relativo (EMR)</i> .....   | 58 |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | 59 |
| 4.1     | <b>Rede A</b> .....  | 60 |
| 4.1.1   | <b><i>Cálculo das condições iniciais de vazão e carga hidráulica nos tubos e nós</i></b> .....                               | 60 |
| 4.1.2   | <b><i>Monitoramento do evento transiente para a rugosidade e fator de atrito</i></b> .....                                   | 61 |
| 4.1.3   | <b><i>Calibração da rugosidade real via MTI-AG</i></b> .....   | 62 |
| 4.1.4   | <b><i>Cálculo das novas condições do sistema diante os novos valores encontrados de rugosidade na calibração</i></b> .....   | 63 |
| 4.1.5   | <b><i>Cálculo dos fatores de atrito equivalentes pela fórmula de Swamee</i></b> .....  | 64 |
| 4.1.6   | <b><i>Calibração do parâmetro fator de atrito via MTI-AG</i></b> .....   | 65 |
| 4.1.7   | <b><i>Análise da conveniência dos valores de fatores de atrito calibrados e calculados pela fórmula de Swamee</i></b> .....  | 67 |
| 4.2     | <b>Rede B</b> .....  | 69 |
| 4.2.1   | <b><i>Cálculo das condições iniciais de vazão e carga hidráulica nos tubos e nós</i></b> .....                               | 69 |
| 4.2.2   | <b><i>Monitoramento do evento transiente para a rugosidade e fator de atrito</i></b> .....                                   | 70 |
| 4.2.3   | <b><i>Calibração da rugosidade real via MTI-AG</i></b> .....   | 72 |
| 4.2.4   | <b><i>Calculo das novas condições do sistema diante os novos valores encontrados de rugosidade na calibração</i></b> .....   | 75 |
| 4.2.5   | <b><i>Cálculo dos fatores de atrito equivalentes pela fórmula de Swamee</i></b> .....  | 76 |
| 4.2.6   | <b><i>Calibração do parâmetro fator de atrito via MTI e AG</i></b> .....   | 79 |
| 4.2.7   | <b><i>Análise da conveniência dos valores de fatores de atrito calibrados e calculados pela fórmula de Swamee</i></b> .....  | 83 |
| 4.3     | <b>Resumo dos resultados</b> .....   | 88 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....                  | 90  |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> ..... | 92  |
|          | <b>APÊNDICE A</b> .....                 | 96  |
|          | <b>APÊNDICE B</b> .....                 | 100 |
|          | <b>ANEXO A</b> .....                    | 111 |

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento populacional e industrial avançam demasiadamente sem planejamento e adoção de políticas socioambientais provocando a escassez de produtos naturais essenciais a todas as formas de vida, entre os principais: a água. A existência de defasadas políticas públicas e falta de investimento em pesquisas e fornecedores agravam a situação e ocasionam déficits na distribuição desse recurso, tornando a demanda maior do que se pode atender com qualidade.

Os estudiosos perceberam então a necessidade de se aprofundar no assunto a fim de modernizar e otimizar os sistemas de distribuição de água, possibilitando sua operação de forma eficiente através de todos os seus componentes: trechos de tubulações, válvulas, registros, conexões, bombas, reservatórios e outros.

Uma das ferramentas adotadas para estudar esses tipos de sistema é a simulação dos mesmos através de modelos computacionais que possibilitem prever seus comportamentos em situações diversas antes e depois do início de seu funcionamento. A importância desse estudo se deve às alterações que ocorrem ao longo do tempo nas propriedades e parâmetros (rugosidade absoluta, fator de atrito, diâmetros internos, componentes hidráulicos, cotas topográficas, demandas e outros) de uma rede de distribuição de água. Tais modificações podem chegar a afetar significativamente o mecanismo de distribuição de água ocasionando perdas de pressões internas, perda de capacidade de transporte de fluidos e vazamentos (ARAÚJO, 2003).

Para Shamir e Howard (1977) os principais pontos a serem investigados na criação desses modelos são: calibração; operação e controle; projeto e otimização; esqueletização de redes. A calibração é o primeiro passo no estudo de uma rede já existente e pode ser interpretada como parte do processo de modelagem. Completado o processo de calibração, deve-se partir para a possibilidade de operar e controlar o sistema estudando opções de funcionamento e carregamento da rede através de processamento computacional.

A calibração é a etapa enfatizada nesse trabalho e compreende o processo de identificação de parâmetros físicos e operacionais que foram alterados com o tempo possibilitando um mapeamento verdadeiro da rede e a criação de estratégias de decisões das concessionárias evitando gastos desnecessários e perdas de água.

A técnica de calibração é julgada por muitos pesquisadores como a mais apropriada para resolver problemas complexos nos sistemas de distribuição de água, principalmente por utilizar de técnicas de otimização para o ajuste dos parâmetros (VIEIRA,

2008). O presente estudo utiliza o artifício de calibração baseada em dados observados em regime transiente e a técnica de otimização de algoritmo genético para ajustar os parâmetros de rugosidade e fator de atrito de uma rede.

## 1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é a aplicação do Método Transiente Inverso (MTI) e algoritmo genético (AG) para realizar a calibração e analisar a conveniência entre os parâmetros a serem ajustados: rugosidade absoluta,  $\varepsilon$ , e fator de atrito,  $f$ , das tubulações de duas redes exemplos. Algumas condições são criadas a fim de se encontrar valores mais realistas, portanto os objetivos específicos são:

- a) avaliar a influência do tipo de manobra de válvula de controle;
- b) avaliar a influência do tipo de mecanismo de substituição do algoritmo genético: com elitismo e sem elitismo;
- c) avaliar a influência do tamanho da rede;
- d) avaliar a influência do número de nós monitorados.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Modelos de calibração

Segundo Shamir e Howard (1977) a análise de sistemas de distribuição de água é constituída de várias etapas: calibração, operação e controle, design, e otimização (do projeto e operação).

A calibração é a etapa de identificação dos parâmetros hidráulicos da rede que deve ser realizada periodicamente devido a constantes alterações dos mesmos. Um exemplo é a rugosidade absoluta do material utilizado em sistemas de condução, que pode sofrer alteração ainda no processo de produção industrial, no grau de acabamento da superfície, e com o passar dos anos.

Porto (2006) trata da importância da calibração da rugosidade quando relata que a especificação da rugosidade da tubulação e a previsão de sua modificação com o tempo, devido à alteração da superfície da parede, muitas vezes causada pela própria qualidade da água, coloca o projetista diante do problema difícil de determinar os fatores de atrito das tubulações.

A identificação direta dessas constantes mudanças pode ser realizada com análise de medidas "in loco", mas pode se tornar uma tarefa difícil e ineficiente. Por isso realiza-se e adota-se a técnica de calibração que tem como objetivo identificar os parâmetros reais através de medidas de cargas nos nós e vazões nos trechos, modelando indiretamente a rede de distribuição, inclusive determinando os coeficientes de perda de carga.

A reprodução desses parâmetros possibilita conhecer previamente qualquer alteração no modelo de simulação hidráulica, mesmo que rara ou nunca ocorrida, permitindo antecipar reações e solucionar pendências de forma bem sucedida, tornando a representação mais real possível.

As etapas citadas inicialmente que permitem estudar uma rede de distribuição podem ser abordadas através da modelagem e prática computacional, que produzem resultados semelhantes aos reais e ajudam a prever como um sistema responderá a condições adversas. O processo é realizado através da identificação de vazões e cargas hidráulicas, modelos hidráulicos e de sistemas de equações.

Segundo Vieira (2008) os métodos de calibração mais utilizados são: Método iterativo (WALSKI, 1983; BHAVE, 1988), Método explícito (ORMSBEE e WOOD, 1986a e 1986b; BOULOS e WOOD, 1990) e o Método implícito.

### **2.1.1 Método Iterativo**

No método iterativo, mais conhecido como método da tentativa e erro, os parâmetros são ajustados a cada iteração a partir de comparações entre pressões e vazões medidas e simuladas (SANTOS, 2010). Alguns autores adotaram o método em suas publicações.

Rahal *et al* (1980) aplicam o método iterativo de calibração no ajuste do coeficiente de atrito.

Walski (1983 e 1986) determina os parâmetros de rugosidade e demandas a partir de equações analíticas que requeriam informações de campo. Bhave (1988) modifica a aplicação de Walski (1983) ajustando simultaneamente as demandas nos nós e os coeficientes de resistência dos tubos por meio do processo iterativo da calibração. Na técnica de Bhave (1988) a vazão de entrada no nó de origem pode ser medida e permanecer fixa durante a calibração, na proposta de Walski (1983) as demandas nos nós e as vazões de entrada nos nós de origem crescem ou decrescem dependendo do valor do fator de ajuste da demanda.

Cheung *et al.* (2000 apud VIEIRA, 2008) comparam as técnicas desenvolvidas por Walski (1983) e Bhave (1988), e concluem que o método de Walski (1983) apresenta menores desvios das demandas no nós e dos coeficientes de rugosidade dos tubos, ainda que o método de Bhave (1988) permita a divisão da rede em um número maior de zonas, o que provavelmente possibilitaria o aumento da eficiência deste método.

### **2.1.2 Método Explícito**

No método explícito, conhecido também por método direto ou analítico, os parâmetros a serem calibrados podem ser identificados a partir da resolução analítica do sistema de equações não lineares (VIEIRA, 2008). Este método exige que o número de medidas de pressões ou vazões sejam em mesmo número dos parâmetros desconhecidos.

Ormsbee e Wood (1986) a fim de melhorar a viabilidade de modelos de redes hidráulicas bem como eliminar a necessidade de métodos de calibração de tentativa e erro, propõe um algoritmo de calibração explícito. As equações básicas de rede são resolvidas explicitamente para ajustes de perda de carga para atender exatamente uma ou mais medidas das condições de pressão ou fluxo para um dado carregamento da rede e as condições de funcionamento. Os ajustes determinados desta maneira são usados para revisar rugosidades dos tubos definindo (menor) perdas de satisfazer as condições de medição.

Boulos e Wood (1990) apresentam um algoritmo explícito baseado em equações não-lineares com a utilização do método de Newton - Raphson como o processo de solução básica. Um espaço de variáveis contínuas assumem os valores ótimos dos parâmetros, para satisfazer exatamente os requisitos de pressão e fluxo declarados em pontos críticos e nas tubulações ao longo dos sistemas de dutos para uma série de condições de funcionamento. Esta abordagem oferece uma base para determinar os valores ótimos para as etapas de projeto, operação e calibração de forma que os parâmetros podem ser calculados para atender exatamente a pressão especificada e as restrições de fluxo.

Cheung (2001) analisa as técnicas de calibração explícitas propostas por Walski (1983), Bhave (1988) e Boulos e Wood (1990); e sugere como melhoria o uso do simulador hidráulico desenvolvido por Souza (1994) e a generalização da metodologia para maior número de redes, visto que se referia somente a uma rede, o que implicaria em limitações.

Silva (2003) salienta que algumas das limitações dos procedimentos de calibração explícitos se deve ao fato de não ser avaliado a confiabilidade dos parâmetros e ser necessário um número de parâmetros estimados igual ao número de medidas.

### ***2.1.3 Método Implícito***

O método implícito, também denominado de método inverso, é apresentado por Vieira (2008) como o método mais empregado para a calibração de redes, por utilizar de técnicas de otimização para alcançar ajustes mais reais entre os valores medidos e calculados de pressão e/ou vazão. O modelo é baseado na minimização da diferença entre esses valores e é aplicado para determinação de variáveis do sistemas, tais como rugosidades, fatores de atrito, diâmetros, demandas etc..

O método ocorre da seguinte forma: para inicializar o processo deve-se medir cargas hidráulicas nos nós. Em seguida estima-se os parâmetros que se pretende calibrar e calcula-se as condições permanentes. A cada iteração é encontrado um conjunto de parâmetros que representam o sistema no modelo. A partir dessas variáveis, são encontrados como resposta, valores para vazões nos trechos e pressões nos nós. Esses valores encontrados são comparados com os valores medidos através de uma função objetivo. Caso a diferença entre os valores simulados e os obtidos no campo seja maior do que o pré-estabelecido, os parâmetros devem ser modificados até que a condição seja atendida. O modelo pode ser considerado calibrado quando for atingido um dos critérios de parada: a aptidão satisfatória, número de gerações do otimizador ou a critério do pesquisador (VIEIRA, 2008).

O método inverso pode ser utilizado para redes em regime permanente e em regime transiente. A seguir algumas dessas utilizações.

Ormsbee (1989) desenvolve um modelo implícito matemático de calibração que utiliza uma técnica de otimização não linear tanto para condições permanentes como para condições dinâmicas. Os parâmetros adotados em seu método foram a rugosidade da tubulação, cargas e demandas nos nós.

Ormsbee & Wood (1986a) e Bhave (1988) adotam o problema para análise de redes nas fases de operação do sistema e calibração dos parâmetros; e Pudar & Ligget (1992) na identificação de vazamentos na tubulação.

Também com auxílio de uma técnica de programação não linear Lancey e Basnet (1991) calibram coeficientes de rugosidade, abertura de válvulas e demandas nodais de uma rede hidráulica. Realizam um estudo comparativo através da minimização de duas funções objetivas, na qual o erro quadrático apresenta maior velocidade de convergência que o erro absoluto. No entanto os parâmetros estimados nem sempre eram verdadeiros o que apontou necessidade de se coletar valores mais próximos da realidade.

Datta e Sridharan (1994) utilizam a técnica de minimização da soma dos quadrados dos desvios entre os valores calculados e observados considerando diferentes condições de carregamento hidráulico. Com o estudo eles analisam as incertezas dos valores estimados.

A técnica de minimização de *Gaus-Newton* foi proposta por Reddy, Sridharan e Rao (1996) que utilizam uma sistemática de adoção de pesos na função objetivo, que variam ao longo do processo de otimização.

Em 1997 foi proposta a técnica estocástica dos algoritmos genéticos, baseada no processo de seleção natural de Darwin, por Savic e Walters (1997). O modelo foi utilizado para calibração de rugosidades em redes mais complexas e apresentou melhores resultados que o método de tentativa e erro. A aplicação de algoritmo genético como técnica de otimização também é utilizada pelos autores Reis, Porto e Chaudhry (1997) para localização ótima de válvulas de controle de pressão e obtiveram melhores resultados no controle de vazamentos situando poucas válvulas em pontos ótimos.

Gambale (2000) utiliza o simulador hidráulico EPANET 1.1 e o modelo otimizador desenvolvido por ele para calibrar o coeficiente de *Hazen-Williams* através do método dos algoritmos genéticos. Em seu trabalho observa que o tamanho da população de soluções influencia na qualidade dos resultados obtidos e que não é necessário efetuar o monitoramento de todos os nós da rede para calibrá-la.

Outros estudos, utilizando algoritmo genético, foram realizados por De Schaetzen *et al.* (2000) na tentativa de calibrar rugosidades absolutas, diâmetros e demandas nos nós. Lingireddy e Ormsbee (2002) utilizaram o mesmo artifício somente para determinação de rugosidades e demandas.

Soares (2003) desenvolveu um programa vinculado ao simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000) com o objetivo de realizar o estudo da calibração de rugosidades absolutas, demandas, diâmetros das tubulações, cotas topográficas, parâmetros dos modelos de vazamento e a localização de componentes da rede. O método utilizado considera o modelo inverso com uso de algoritmos genéticos e hibridismo entre algoritmos genéticos e o método simplex, proposto por Nelder e Mead (1965 apud SOARES, 2003).

Silva (2006) desenvolve uma rotina computacional para calibração da rugosidade absoluta utilizando o método dos algoritmos genéticos. O modelo proposto permite a escolha de parâmetros e operadores genéticos, bem como a avaliação da influência da quantidade de indivíduos da população inicial na qualidade de soluções encontradas. Conclui que os resultados encontrados na calibração se aproximam da realidade à medida em que o escoamento é mais turbulento. A pesquisa amplia os conhecimentos sobre a técnica tornando-a mais eficiente.

Santos (2010) realiza a calibração da rugosidade de uma rede de distribuição de água da cidade de Itajubá-MG utilizando o modelo proposto por Silva (2003) através do método implícito.

Vieira (2008) desenvolve uma técnica de calibração inversa baseada nos algoritmos genéticos para ajustar os parâmetros de rugosidade e perdas por vazamento. Para tal fez uso de objetivos múltiplos de vazão e pressão e encontra resultados satisfatórios.

Recentemente alguns autores adotaram o problema inverso no regime transiente, entre eles Araújo (2003), Silva (2006), Soares (2007), Vieira (2008) e Galiza (2009).

A proposta de Kapelan, Savic e Walters (2002) é a aplicação de um método híbrido em regime transiente para identificação das rugosidades absolutas e detecção de vazamentos. Os resultados sugerem a diminuição do tempo de processamento computacional e a obtenção de resultados melhores.

Para Araújo (2003) o objetivo principal é a aplicação do Método Transiente Inverso com algoritmo genético para calibração de fatores de atrito, rugosidades, diâmetros e ainda estabelecer procedimentos de identificação e quantificação de vazamentos. Como objetivos específicos apresentava: avaliar a influência do desconhecimento das condições iniciais de regime permanente; a conveniência da calibração das rugosidades em relação à

identificação dos fatores de atrito; a influência do tipo de manobra de válvula de controle; a influência de erros provocados na leitura dos dados observados e a influência da utilização das codificações binária e real na representação dos parâmetros no AG. Em seus estudos conclui que o método utilizado se mostrou viável para seus objetivos ainda que as condições iniciais do estado permanente fosse desconhecidas e os dados observados sejam em números insuficiente.

Soares (2007) aprofunda seus estudos e desenvolve um modelo para a calibração de sistemas hidráulicos, localização e quantificação de vazamentos. O modelo é baseado na minimização da diferença de pressão e vazão simulados e observados mistura as técnicas de otimização de AG e busca local Levenberg - Marquart e método Simplex (Nelder e Mead, 1965).

Galiza (2009) propõe a calibração da rugosidade de uma rede de distribuição via método transiente inverso com aplicação de algoritmo genético. O método permite a alteração dos operadores genéticos. O estudo apresenta a influência da escolha da quantidade da população, do número de gerações, do número de nós monitorados, do tempo do transiente e do tipo de manobra (suave ou brusca) na qualidade das soluções encontradas.

## 2.2 Escoamento transiente em tubulações

O escoamento transiente em tubulações se dá quando ocorre alteração no fluxo, antes em estado permanente. Nos casos mais comuns a alteração é transitória e o sistema volta as condições iniciais em determinado tempo. O fenômeno pode ocorrer em condutos fechados (tubulações) ou em condutos abertos (rios e canais). Para os primeiros, os fatores responsáveis podem ser: abertura e fechamento de válvulas de pressão, ligação ou interrupções de bombas, variação na demandas ou consumos, vazamentos, alteração no nível dos reservatórios etc.

O estudo do fenômeno transiente em tubulações pode ser descrito matematicamente pelas equações de continuidade e de conservação de quantidade de movimento. Essas equações são denominadas diferenciais parciais e possuem em seus termos elementos não lineares, impossibilitando a existência de uma solução analítica explícita.

Equação da conservação de massa (equação 2.1):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

Equação da conservação de quantidade de movimento (equação 2.2):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.2)$$

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

Dessa forma, essas equações podem ser analisadas por meio de dois modelos:

- a) modelo da coluna rígida;
- b) modelo da Coluna Elástica.

O modelo da coluna rígida não leva em consideração a elasticidade da água e da tubulação, sendo mais utilizado para descrever a oscilação de massa. O modelo da coluna elástica considera relevante a propriedade de elasticidade do fluido e do material. Assim, como no transiente a variação de pressão é alta, ocorrendo a propagação de ondas de sobrepressão e subpressão, e a água é um fluido ligeiramente compressível o modelo mais viável é o da coluna elástica.

Araújo (2003) afirma que o emprego da coluna rígida justifica-se quando as mudanças no fluxo são graduais, tal que os desequilíbrios de energia e massa nas tubulações sejam pequenos. No entanto, rápidas mudanças, causadas por operações planejadas ou acidentais, podem criar grandes pulsos de pressão capazes de romper ou prejudicar as linhas de tubulações. Neste caso, o modelo elástico é mais apropriado.

Por ser as equações apresentadas parciais e não apresentarem resultados analíticos as mesmas devem ser discretizadas e linearizadas através do Método das Características - MOC, artifício utilizado a partir das condições de contorno do sistema.

Chaudhry (1982 apud AMORIM, 2005) aponta o MOC como método mais utilizado na resolução de escoamentos transientes. Uma vez que as características representam seu curso de ondas ou perturbações que se deslocam e esse é o método mais apropriado para analisar sistemas hiperbólicos. Segundo Wiley et al. (1993 apud AMORIM, 2005) o método abordado tem uma série de vantagens sobre os demais para resolução de problemas de golpe de aríete, tais como um critério de estabilidade bem definido, solução explícita e procedimento por aproximação relativamente simples.

Araújo (2003) afirma ainda que outra justificativa pela preferência do uso do MOC para resolução do sistema de equações diferenciais parciais é que o fenômeno transitório segue uma lei de propagação de ondas que associa o tempo  $t$  com a abscissa  $x$  definida ao longo da canalização através da celeridade  $a$ .

Logo as equações (2.1) e (2.2) podem ser expressadas em função da vazão  $Q$  e da carga piezométrica  $H$ , conforme abaixo:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.3)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

A combinação linear das equações (2.3) e (2.4) é descrita da seguinte forma:

$$L = L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (2.5)$$

Assim:

$$L = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

ou

$$\left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left( \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2.7)$$

Se  $H = H(x, t)$  e  $Q = Q(x, t)$  são funções da posição  $x$  e do tempo  $t$ , então as derivadas totais podem ser escritas como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.8)$$

e

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.9)$$

Seja o multiplicador  $\lambda$ :

$$\lambda a^2 = \frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

e utilizando as equações (2.8), (2.9) e (2.10), as equações características tornam-se:

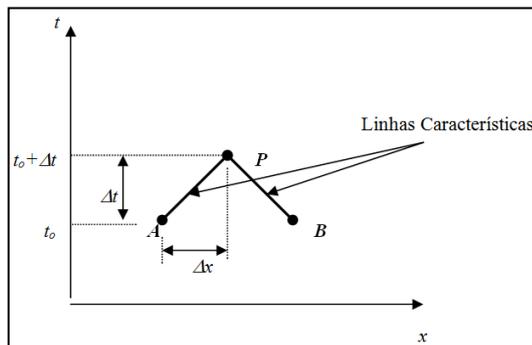
$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = a \quad (2.11)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (2.12)$$

Transformando as equações diferenciais parciais (2.1) e (2.2) em equações diferenciais ordinárias na variável independente  $t$  (2.11) e (2.12) e representando-as em um plano *espaço x tempo*, as mesmas seriam simuladas por duas linhas características retas nas quais suas inclinações seriam  $\pm \frac{1}{a}$ . Essas linhas dividem o plano  $x-t$  em duas regiões, ver figura 1.

Um exemplo seria considerar um distúrbio que ocorre no ponto  $A$  no instante zero  $t_0$ , que alcançaria o ponto  $P$  depois de um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Assim, pode ser dito que as linhas características no plano  $x-t$  representam o caminho de propagação das perturbações em vários pontos no sistema (GALIZA, 2009).

Figura 1 - Linhas Característica no plano x-t

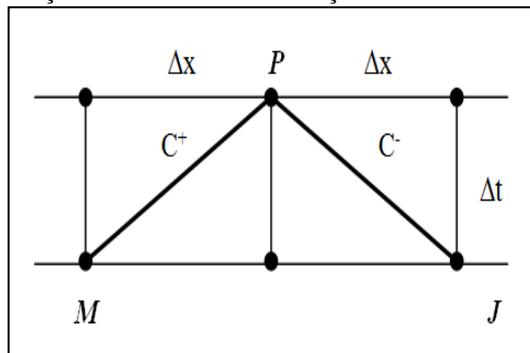


Fonte: Araújo, 2003.

### 2.2.1 Equações Características do Transiente

Considerando a resolução numérica das equações (2.11) e (2.12) obtidas a partir da discretização do domínio e o tempo em intervalos  $\Delta x$  e  $\Delta t$ , respectivamente, obtêm-se os valores discretos de  $x$ , que indicam as seções consideradas:  $x_0 = 0, x_1 = 1\Delta x, x_2 = 2\Delta x, \dots, x_N = N\Delta x$ . Para o tempo  $t$ , tem-se:  $t_0 = 0, t_1 = 1\Delta t, t_2 = 2\Delta t, \dots, t_M = M\Delta t$ . Por imposição do Método das Características, tem-se que  $\Delta x = a\Delta t$ . A discretização pode ser observada na figura 2:

Figura 2 - Definição da malha de discretização do método das características



Fonte: Araújo, 2003.

Os pontos M, J, e P correspondem, respectivamente, aos pontos de coordenadas  $(x_{i-1}, t_j), (x_{i+1}, t_j), (x_i, t_{j+1})$ . A equação (2.11) é utilizada para relacionar os valores de carga e vazão do ponto P com valores de carga e vazão no ponto M, e a equação (2.12) para relacionar os valores de carga e vazão do ponto P com os respectivos valores do ponto J. Reorganizando as equações (2.11) e (2.12), as equações características tornam-se:

$$C^+: dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = a \quad (2.13)$$

$$C^-: -dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (2.14)$$

Onde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad (2.15)$$

$$R = \frac{fa}{2gDA^2} \quad (2.16)$$

Integrando as equações (2.13) e (2.14) ao longo de  $MP$  e  $JP$  respectivamente:

$$C^+: \int_M^P dH + B \int_M^P dQ + R \int_M^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.17)$$

$$C^-: - \int_J^P dH + B \int_J^P dQ + R \int_J^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.18)$$

Wylie e Streeter (1978) sugerem uma técnica de primeira ordem para a resolução das equações considerando pequenos intervalos de tempo, transformando as equações (2.17) e (2.18):

$$C^+: (H_P - H_M) + B(Q_P - Q_M) + R\Delta t Q_M|Q_M| = 0 \quad (2.19)$$

$$C^-: (H_P - H_J) + B(Q_P - Q_J) + R\Delta t Q_J|Q_J| = 0 \quad (2.20)$$

com a aproximação do termo do atrito:

$$\int_M^P Q_M|Q_M| dt \cong Q_M|Q_M|\Delta t \quad \text{para } C^+ \quad (2.21)$$

$$\int_J^P Q_J|Q_J| dt \cong Q_J|Q_J|\Delta t \quad \text{para } C^- \quad (2.22)$$

Araújo (2003) ressalta que a aproximação de primeira ordem pode ocasionar em resultados instáveis se o termo do fator de atrito se tornar muito grande. Caso ocorra deve ser utilizado um método predictor-corrector ou uma aproximação de segunda ordem para evitar a instabilidade. O autor relata também que o teoria apresenta melhores resultados quando o evento transientes não se prolonga demasiadamente.

A celeridade, velocidade da onda, pode ser apresentada de acordo com a expressão de Halliwell apud Chaudhry (1987):

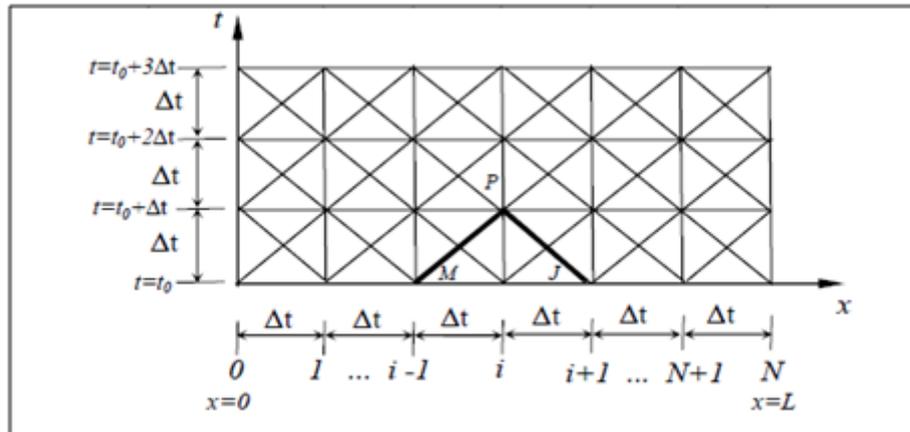
$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1+(K/E)\Psi]}} \quad (2.23)$$

Onde:

$\Psi$  - parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto, sendo  $\Psi = \frac{D}{e} (1 - 0,5\nu')$  para condutos elásticos e paredes finas;  $D$  = diâmetro do conduto [L];  $e'$  = espessura da parede [L] e  $\nu'$  = razão de Poisson [adimensional];  
 $E$  - módulo de elasticidade de Young da parede do conduto [ $FL^{-2}$ ];  
 $K$  - módulo de elasticidade do fluido [ $FL^{-2}$ ]; e  
 $\rho$  - massa específica do fluido [ $ML^{-3}$ ].

A figura 3 apresenta um exemplo de fácil compreensão do cálculo das condições transientes, utilizando o MOC, em espaços de tempo  $\Delta t$  ao longo de uma tubulação, onde as equações de condições de contorno possibilitam a identificação de cargas e vazões no instante do transiente na seção onde se desejar a partir do cálculo das informações das condições permanentes (instante  $\Delta t = 0$ ).

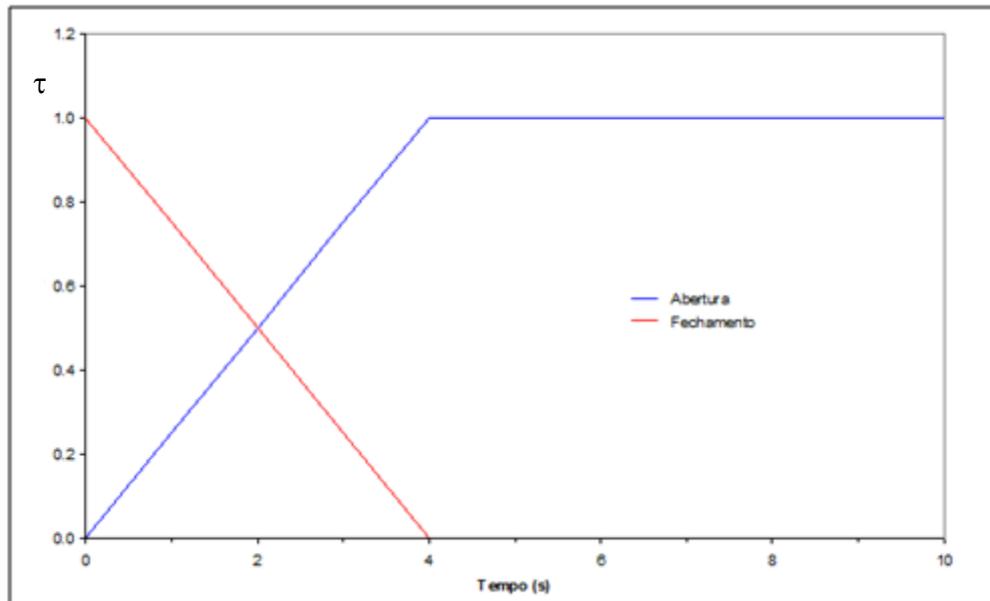
Figura 3 - Malha de cálculo



Fonte: Adaptado de Camargo (1991 apud GALIZA, 2009).

Segundo Araújo (2003) quando as condições transientes forem provocadas por abertura ou fechamento de válvula, deve-se ter a relação entre  $\tau$  e  $t$ . Usualmente essa relação apresenta-se através de gráficos, nos quais a válvula encontra-se totalmente aberta quando  $\tau = 0$  e totalmente fechada quando  $\tau = 1$ , ver gráfico 1 abaixo:

Gráfico 1 - Exemplo de abertura e fechamento de válvula



Fonte: Araújo, 2003.

### 2.2.1.1 Condições de Contorno

As condições de contorno (Anexo A), necessárias para discretização das equações características, se individualizam pela localização da seção da tubulação que será analisada. Para facilitar essa localização cada trecho é dividido em  $N$  seções,  $N - 1$  segmentos de comprimento denominado  $\Delta x$ . A primeira e última seção estão localizados no início e final de cada trecho respectivamente e as demais internamente, nós interiores, ( $1 < i < N$ ), nos quais as duas equações características são empregadas.

## 2.3 Rugosidade

A rugosidade absoluta ( $\epsilon$ ) das tubulações é uma característica em função do material das quais são feitas, o acabamento geométrico e o tempo de uso. Os valores podem ser determinados tanto em medições em laboratórios como "in loco". O monitoramento da alteração desse parâmetro é crucial para se analisar o desempenho de uma rede de distribuição de água durante sua vida útil.

A literatura apresenta valores de rugosidade para diferentes materiais com variações em faixas largas, além de valores diferente para o mesmo material, por isso os dados mencionados neste trabalho deverão ser considerados valores médios indicativos das

rugosidades equivalentes. A Tabela 1 apresenta valores de rugosidade absoluta equivalente para os principais materiais utilizados em projetos de redes de distribuição de água.

Tabela 1 - Valores da rugosidade absoluta

| <b>Material</b>   | <b>Rugosidade absoluta <math>\epsilon</math> (mm)</b> |
|---|---|
| Aço comercial novo  | 0.045   |
| Aço laminado novo   | 0.04 a 0.10   |
| Aço soldado novo  | 0.05 a 0.10   |
| Aço soldado limpo, usado  | 0.15 a 0.20   |
| Aço soldado moderadamente oxidado   | 0.40  |
| Aço soldado revestido de cimento centrifugado                                   | 0.10  |
| Aço laminado revestido de asfalto   | 0.05  |
| Aço rebitado novo   | 1 a 3   |
| Aço rebitado em uso   | 6   |
| Aço galvanizado, com costura  | 0.15 a 0.20   |
| Aço galvanizado, sem costura  | 0.06 a 0.15   |
| Ferro forjado   | 0.05  |
| Ferro fundido novo  | 0.25 a 0.50   |
| Ferro fundido com leve oxidação   | 0.30  |
| Ferro fundido velho   | 3 a 5   |
| Ferro fundido centrifugado  | 0.05  |
| Ferro fundido em uso com cimento centrifugado                                   | 0.10  |
| Ferro fundido com revestimento asfáltico  | 0.12 a 0.20   |
| Ferro fundido oxidado   | 1.0 a 1.5   |
| Cimento amianto novo  | 0.025   |
| Concreto centrifugado novo  | 0.16  |
| Concreto armado liso, vários anos de uso  | 0.20 a 0.30   |
| Concreto com acabamento normal  | 1 a 3   |
| Concreto protendido Freyssinet  | 0.04  |
| Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados | 0.0015 a 0.010  |

Fonte: Porto, 2006.

Há também a rugosidade relativa que pode ser expressa pelo quociente entre o diâmetro da tubulação e a rugosidade absoluta ( $\epsilon/D$ ).

## 2.4 Fator de atrito

O fator de atrito de Darcy-Weisbach,  $f$ , é um parâmetro adimensional determinado em função do número de Reynolds ( $Re$ ), do escoamento e da rugosidade relativa da tubulação ( $\epsilon/D$ ):

$$f = \phi\left(Re; \frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (2.24)$$

onde:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2.25)$$

onde:  $\varepsilon$  = rugosidade absoluta [L];  $D$  = diâmetro do tubo [L];  $Re$  = número de Reynolds  $\left[\frac{4Q}{\pi D v}\right]$ ; e  $\nu$  = viscosidade cinemática do fluido  $[FL^{-2}T]$ .

O fator de atrito depende diretamente da vazão e conseqüentemente do número de Reynolds. Para escoamento laminar,  $Re \leq 2000$ , o fator de atrito não depende da rugosidade da parede interna do tubo, e é calculado pela fórmula de *Hagen-Poiseuille* (BHAVE, 1991):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.26)$$

Nos casos de escoamento turbulento, em que  $Re \geq 4000$ , utiliza-se a fórmula de Swamee (1993):

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re}\right)^8 + 9,5 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re}\right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2.27)$$

Onde:

$Re$  = número de Reynolds =  $\left[\frac{4Q}{\pi D v}\right]$  [adimensional];

$Q$  = vazão  $[LT^{-3}]$ ;

$D$  = diâmetro [L];

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido  $[FL^{-2}T]$ ;

$\varepsilon$  = rugosidade absoluta [L].

Para escoamento de transição, onde  $2000 < Re < 4000$ , utiliza-se o ábaco de Moody (1944, apud PORTO, 2006).

No cálculo, o fator de atrito de Darcy-Weisbach é geralmente considerado como um parâmetro constante. No entanto, quando se trata de regime não permanente, no qual as vazões variam com o tempo, o fator de atrito tende a sofrer alterações.

Logo a cada valor de vazão será obtido um número de Reynolds e consequentemente um novo fator de atrito.

## **2.5 Algoritmo genético**

### **2.5.1 Introdução**

Lacerda e Carvalho (1999) descrevem os algoritmos Genéticos (AGs) como técnicas de programação evolucionária inspiradas nos mecanismos de evolução dos seres vivos, seleção natural e sobrevivência do mais apto, ideias enfatizadas pelo naturalista e fisiologista Charles Darwin em 1859 em seu livro "A origem das espécies".

Darwin (2002), em seu livro descreve:

"... a evolução compreende, com efeito, a conservação de um grande número de indivíduos, variando mais ou menos numa direção favorável, e a destruição de um grande número dos que variam de uma forma contrária".

O mecanismo responsável por essa evolução seria a seleção natural.

Darwin (2007) descreve a seleção natural: "...a natureza "seleciona" os membros de uma espécie que sejam mais capazes para enfrentar os rigores da vida. De acordo com a mudança no ambiente, a seleção natural faz com que algumas características de uma população casualmente variada sejam favorecidas".

No entanto os estudos de Darwin apontavam inconsistências. Segundo Ridley (2006) essa falha se devia à falta de uma teoria de hereditariedade consistente, pois na época foi comprovado que a seleção natural não funcionaria se as características pessoais fossem transmitidas dos pais para sua prole em medidas iguais, através de misturas como os biólogos da época imaginavam.

A solução para o problema foi proposta por cientistas como John B. S. Haldane, Ronald Fisher e Sewall Wright, que uniram as teorias de Darwin com as ideias de hereditariedade propostas por Gregor Mendel, conhecido como o "Pai da genética". Ridley (2006) aborda que a teoria de hereditariedade de Mendel preencheu uma lacuna importante na teoria original de Darwin, e as ideias de ambas se fundiram dando origem à teoria sintética da evolução ou neodarwinismo, que defende que diferentes genes são preservados ao longo das gerações enquanto outros são perdidos, permitindo a operação da seleção natural e, portanto, a evolução das espécies.

Os cientistas começaram a introduzir os sistemas evolucionários com a ideia de que os mecanismos naturais de evolução pudessem servir de base para uma nova ferramenta de otimização nos problemas de engenharia, surgindo assim os algoritmos genéticos (ARAÚJO, 2003).

Os algoritmos genéticos foram desenvolvidos na Alemanha por Rechenberg (1973) e por Holland (1975) e difundido por Goldberg (1989) (SANTOS, 2010). Sua técnica de busca estocástica visa escolher a melhor solução para um dado problema, retirada de um espaço de busca, no caso um conjunto de seres mais aptos, no qual estão todas as possíveis soluções iterativamente melhoradas. A escolha da resposta ideal é feita a través de uma função objetivo ou função de aptidão que analisa as soluções, associando a cada uma delas uma nota.

Alguns termos biológicos se confundem no Algoritmo genético, portanto, biologicamente a população é formada por um conjunto de indivíduos ou de soluções de problemas e um indivíduo é constituído de um conjunto de cromossomos, onde cada cromossomo representam as variáveis possíveis do problema.

A geração de uma algoritmo típico obedece aos seguintes passos (Adaptado de SILVA, 2006):

- a) geração de população inicial aleatória, conjunto de cromossomos, na qual cada cromossomo representa uma possível solução do problema;
- b) a partir de uma função objetivo, a população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota, que representa sua aptidão e mede o seu grau de sucesso;
- c) os indivíduos considerados menos aptos são descartados e os mais aptos são selecionados para transmitir suas características e gerar uma nova população;
- d) aplica-se os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação nos membros selecionados gerando descendentes para a próxima geração;
- e) verifica-se aptidão de cada cromossomo;
- f) procura-se soluções ótimas até critério de parada (limite máximo de gerações ou quando a taxa de aptidão for estabelecida através da função objetivo).

Lacerda e Carvalho (1999) apresentam uma rotina de algoritmo genético simples, sendo  $S(t)$  a população de cromossomos na geração ( $t$ ):

$t \leftarrow 0$

*inicializar*  $S(t)$

*avaliar*  $S(t)$

*enquanto o critério de parada não for satisfeito faça*

$t \leftarrow t + 1$   
*selecionar  $S(t)$  a partir de  $S(t - 1)$*   
*aplicar crossover sobre  $S(t)$*   
*aplicar mutação sobre  $S(t)$*   
*avaliar  $S(t)$*   
*fim enquanto*

### 2.5.2 Terminologia

Santos (2010) apresenta a Tabela 2 de comparação entre os termos utilizados nos AGs, oriundos da genética e seu correspondente conceito na genética. A relação é feita segundo a literatura revisada de Goldberg (1989), Lacerda e Carvalho (1999) e Silva (2006).

Tabela 2 - Comparação entre termos utilizados nos AGs e seu correspondente conceito na genética

| Descrição   | Algoritmo genético  | Genética   |
|---|---|--|
| Gene: unidade genética que determina as características de um indivíduo                   | Um elemento do vetor que representa o cromossomo  | Informação genética  |
| Alelo: valores que o gene pode assumir  | Representação binária: 0 e 1<br>Representação decimal: 0 a 9                                    | Variações nas sequências de bases nucleicas: Adenosina (A), Citosina (C), Timina (T) e Guanina (G) |
| Cromossomo: unidade onde são armazenadas as informações genéticas                         | Uma possível solução para um problema, ou seja, um vetor no espaço de busca                     | Unidade fisiológica que contém o código genético   |
| Genótipo: informação contida no cromossomo  | Cromossomo codificado, ou seja, os parâmetros representados por cada vetor no espaço de busca   | Constituição genética de um indivíduo  |
| Fenótipo: objeto, estrutura ou organismo constituído a partir das informações do genótipo | Cromossomo decodificado, ou seja, as características de cada vetor no contexto do problema real | Características de um indivíduo determinada pelo genótipo e pelas condições ambientais             |
| Indivíduo: cada membro da população   | Representado pelo cromossomo e sua aptidão  | Exemplar de uma espécie.   |
| População: conjunto de indivíduos   | Matriz formada por vetores contidos no espaço de busca e respectivas aptidões                   | Conjunto de indivíduos da mesma espécie, que vivem em uma região                                   |

Fonte: Modificado de Santos, 2010.

### 2.5.3 Vantagens e desvantagens do uso de AGs

Os AGs geralmente são empregados em problemas complexos, de otimização complexa e vem apresentando eficiência e inúmeras vantagens. Araújo (2003) e Soares (2003) citaram algumas delas: funcionam para parâmetros contínuos e discretos ou uma combinação deles; realizam pesquisas simultâneas em várias regiões do espaço de busca; otimizam grande número de variáveis; trabalham com uma codificação de parâmetros e não com os próprios parâmetros; ao invés de uma solução fornecem uma lista das melhores soluções; utilizam dados sintéticos e são tolerantes a ruídos e dados incompletos; otimiza múltiplas funções com objetivos conflitantes; podem ser hibridizados com outras técnicas heurísticas; usam apenas informações da função objetivo; não é necessário conhecimento matemático complexo; adaptam-se bem a técnicas de computação paralelas e outras.

A grande aceitabilidade da aplicação de algoritmos genéticos como mecanismo de otimização nas análises de calibração permitiu que Galiza (2009) realizasse quadro comparativo de algumas propriedades dos métodos de otimização tradicionais com o método dos algoritmos genéticos (Tabela 3).

Tabela 3 - Comparação das propriedades dos Métodos Tradicionais e Algoritmos Genéticos

| <i>Propriedade</i>      | <i>Métodos Tradicionais</i>   | <i>Algoritmos Genéticos</i> |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Velocidade              | Alta (dependendo do problema) | Baixa a média               |
| Performance             | Depende do problema           | Excelente                   |
| Compreensão do problema | Necessária                    | Não necessária              |
| Aplicabilidade          | Baixa (Problema específico)   | Geral                       |

Fonte: Galiza (2009).

Entre todas as vantagens apresentadas o uso de AG tem como limitação o tempo de trabalho, considerado lento a avaliação do espaço de soluções.

### 2.5.4 Representação dos parâmetros

O algoritmo genético é capaz de produzir um conjunto de soluções a serem otimizadas e cada uma delas é representada geneticamente por um cromossomo. Um cromossomo é constituído por um conjunto de parâmetros, geralmente codificados, que podem ter dois tipos de representação que facilitem seu manuseio pelos operadores genéticos: representação binária e representação real.

A representação binária é mais tradicional e tem sua importância devido ao seu uso em trabalhos pioneiros de Holland (1975 apud LACERDA e CARVALHO, 1999), é de fácil utilização, manuseio e análise, sendo mais utilizada para intervalo de valores discretos, ou seja, com menor número de casas decimais. Em casos de problemas com parâmetros contínuos que exige maior precisão decimal, ou melhor, as variáveis são transformadas em longas cadeias de bits (cada casa decimal acrescida na precisão é necessário adicionar 3,3 bits na cadeia), é necessário maior tempo de processamento e se utiliza a representação real.

Silva (2006) afirma que na representação real, além da facilidade de compreensão dos parâmetros, os cromossomos gerados armazenam uma pequena quantidade de genes, mesmo no caso de funções contínuas onde se necessita maior exatidão nos cálculos e ressalta que o emprego de parâmetros reais possibilita a utilização de funções matemáticas para a criação de novos operadores genéticos (*crossover* e mutação), proporcionando assim, uma maior diversidade de opções para otimização do problema. Uma discussão acerca do uso de representação binária e real foi proposta por Michalewicz (1994), que obteve resultados mais satisfatórios com a representação real.

#### 2.5.4.1 Representação binária

A quantidade de bits necessários para uma variável é calculada da seguinte forma:

$$2^m = (g_{máx} - g_{mín})10^{n'} + 1 \quad (2.28)$$

$$m = \log_2[(g_{máx} - g_{mín})10^{n'} + 1] \quad (2.29)$$

Onde:

$m$  - número de bits necessários para a representação binária de um cromossomo;

$n'$  - quantidade de casas decimais para a precisão exigida;

$g_{máx}$  e  $g_{mín}$  - limite superior e inferior do intervalo de domínio.

Gambale (2000) demonstra:

Se  $V$  é um conjunto de inteiros que varia no intervalo de  $\{0, 1, \dots, 2^l - 1\}$  então pode-se codificá-lo usando a representação binária,  $e = [b_0, \dots, b_1]$ , com  $l$  "bits", onde  $bin_i \in \{0, 1\}$  de tal forma que:

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (2.30)$$

Se  $V \in \{m, m + 1, \dots, m + 2^l - 1\}$  então pode-se codificar a variável  $V - m$  da mesma forma. As operações com números binários podem ser um de número decimal na base dois ou a conversão de um decimal em binário.

#### 2.5.4.2 Representação real

A representação real é mais utilizada para a otimização de parâmetros contínuos, que apresentem casas decimais e números inteiros por escalonamento ou quantificação. De acordo com Araújo (2003) se  $V \in \{V_{máx}, V_{mín}\}$  então  $e$  é a representação binária da parte inteira de:

$$\frac{(2^l - 1)V}{V_{máx} - V_{mín}} \quad (2.31)$$

Araújo (2003) cita algumas vantagens apresentadas por esse tipo de representação: gera cromossomos menores, pode ser entendida mais facilmente do que uma cadeia de bits e facilita a criação de novos operadores.

#### 2.5.5 Seleção

O mecanismo de seleção dos algoritmos genéticos é a reprodução sintética da ideia de seleção natural defendida por Darwin, na qual os indivíduos mais aptos sobrevivem e tem maior possibilidade de transferir as características vantajosas para os próximos descendentes, enquanto os seres menos aptos tem menor potencial de sobrevivência. Sob esse aspecto, com o passar do tempo, populações constituídas por indivíduos cada vez mais adaptados (“melhorados”) são alcançadas.

A maneira como são selecionados os seres mais aptos (cromossomos) no algoritmo genético ocorre através da definição de uma função objetivo, que avalia e dá notas às soluções. Caso estas tenham valores inferiores à função objetivo, são descartadas, enquanto as soluções com notas superiores a esta função são selecionadas para gerar uma nova população. Os tipos de seleção mais usuais são Roda da Roleta, Ordenamento, Torneio,

Uniforme, Amostragem estocástica, Amostragem Determinística e *Stochastic Remainder Sampling* (SRS).

O artifício adotado nesse trabalho para escolha desses cromossomos será a seleção proporcional à aptidão, baseada na ideia do Elitismo. Conforme Lacerda e Carvalho (1999) essa estratégia, proposta inicialmente por DeJong (1975 apud LACERDA e CARVALHO), transfere o melhor cromossomo de uma geração para outra sem alterações, para que a melhor solução não se perca durante os processos de recombinação e mutação.

Segundo Silva (2006) a aplicação do elitismo garante que os  $k$  melhores indivíduos da geração anterior nunca serão substituídos por filhos piores. Dessa forma o AG com elitismo encontra a solução mais rapidamente que o AG sem elitismo, ressaltando que o AG ocasionalmente encontra máximos locais (SOARES,2003).

Em nível de pesquisa os processamentos serão realizados com elitismo e sem elitismo. A taxa de elitismo adotada nesse trabalho será de 50%, assim serão transferidos 50% dos melhores cromossomos para a geração seguinte sem qualquer alteração.

### **2.5.6 Recombinação ou Crossover**

De acordo com Lacerda e Carvalho (1999) o operador genético de *crossover* é o principal mecanismo de busca de soluções, pois alcançam as regiões desconhecidas do espaço de busca. Esses operadores são utilizados para simular a combinação de informações genéticas entre dois indivíduos.

Existem vários tipos de *crossover* que consideram a representação binária, entre eles *crossover* de um ponto, *crossover* de dois pontos, *crossover* uniforme; para a representação real os mais utilizados são: média (DAVIS, 1991), mistura BLX- $\alpha$  (ESHELMAN e SHAFFER, 1993), aritmético (MICHALEWICZ, 1994), heurístico (MICHALEWICZ, 1994) e simples (MICHALEWICZ, 1994). Os tipos adotados serão *crossover* de um ponto, quando do uso da codificação binária e *crossover* aritmético, caso o uso da codificação real.

#### **2.5.6.1 Crossover de um ponto**

O *crossover* em um ponto é utilizado a cada par de cromossomos pais gerando dois cromossomos filhos com uma probabilidade  $p_c$  que será de 100%. Como cada um dos cromossomos pais tem sua cadeia de bits cortada em uma posição aleatória. As partes serão

trocadas gerando dois novos cromossomos. Pode-se verificar o comportamento deste operador na Figura 4.

Figura 4 - Crossover de um ponto

|         |   |
|---------|---|
| pai 1   | (0 0 1 0 1   0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0)   |
| pai 2   | (0 0 1 1 1   1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 0)   |
| filho 1 | (0 0 1 0 1   1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 0)   |
| filho 2 | (0 0 1 1 1   0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0) |

Fonte: Adaptado de Lacerda e Carvalho (1999).

Os autores afirmam ainda que na prática, esta probabilidade, denominada de *crossover* varia entre 60% e 90%. Na não ocorrência desse operador os filhos serão iguais ao pais.

#### 2.5.6.2 Crossover aritmético

Segundo Araújo (2003) o *crossover* aritmético realiza algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais que são representados por vetores.. O cruzamento foi proposto por Michalewicz (1994) e pode ser representado da seguinte maneira, onde os  $p_1$  e  $p_2$  simulam os pais:

$$pai_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l}) \quad (2.32)$$

$$pai_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2l}) \quad (2.33)$$

onde:

$$pai_{ij} \in R$$

Assim, os cromossomos filhos  $f_1$  e  $f_2$  serão:

$$f_1 = \beta pai_1 + (1 - \beta) pai_2 \quad (2.34)$$

$$f_2 = (1 - \beta) pai_1 + \beta pai_2 \quad (2.35)$$

onde:

$f_i \in R$  e  $\beta$  é um número aleatoriamente gerado no intervalo  $[0,1]$ .

## 2.5.7 Mutação

### 2.5.7.1 Simples

O operador da mutação ocorre logo após a recombinação e envolve, no caso de representação binária, a alteração de bits com dada probabilidade, invertendo seus valores, ou seja, altera o valor de um dado bit de 1 para 0 ou vice-versa. Conforme os estudos de Lacerda e Carvalho (1999) a operação é importante porque melhora a diversidade dos cromossomos na população, porém acaba por eliminar informações contidas no cromossomo. Por isso a taxa de mutação utilizada deve ser pequena, variando entre 0,1% a 5%, mas suficiente para garantir a diversidade.

A Figura 5 apresenta a ocorrência da mutação em dois filhos. No filho nº 01 foram alterados dois bits e no filho nº 02 foi alterado 01 bit.

Figura 5 - Mutação simples para codificação binária

|                    |   |
|--------------------|---|
| Antes da mutação:  |   |
| filho 1            | (0 0 1 <u>0</u> 1 0 1 0 1 1 1 0 0 0 <u>0</u> 0 1 1 1 0 0 0) |
| filho 2            | (0 0 1 1 1 1 1 1 1 <u>1</u> 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 0)        |
| Depois da mutação: |   |
| filho 1            | (0 0 1 <u>1</u> 1 0 1 0 1 1 1 0 0 0 <u>1</u> 0 1 1 1 0 0 0) |
| filho 2            | (0 0 1 1 1 1 1 1 1 <u>0</u> 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 0)        |

Fonte: Lacerda e Carvalho (1999)

### 2.5.7.2 Uniforme

No caso de cromossomos simulados pela representação real pode-se utilizar a mutação uniforme, que trata da simples substituição de um gene individual por um número aleatório. Ou seja, dado um cromossomo  $p$  com o  $j$  –ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo  $c$  da seguinte forma (LACERDA E CARVALHO, 1999):

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ p_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.36)$$

Onde  $a_i$  e  $b_i$  representam os limites do intervalo permitido para o gene  $c_i$ ;

Outros tipos de mutação utilizados para a representação real são: gaussiana, limite, não uniforme e não uniforme múltipla.

### 2.5.8 Função objetivo

A função objetivo é a metodologia adotada para ajustar os valores calculados aos valores medidos melhorando a precisão da solução, através da avaliação da aptidão de cada cromossomo ou possível solução.

Para a metodologia abordada nesse trabalho, Método Transiente Inverso com otimização do Algoritmo Genético, serão utilizadas medidas de cargas hidráulicas em um ou mais nós, adquiridas através da manobra de válvulas durante um certo intervalo de tempo. Araújo (2003) defende "que a ideia de trabalhar somente com cargas hidráulicas tem o objetivo de justificar a eficiência dos processos inversos ao mesmo tempo em que simplifica a construção da função objetivo.

As calibrações dos parâmetros de fator de atrito e rugosidade são baseadas na minimização da soma dos desvios absolutos. A função aptidão sendo expressa por  $F$ :

$$\text{aptidão} = F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} |H_{i,j}^m - H_{i,j}^c| \quad (2.37)$$

Onde:

$TS$  = duração do transiente [T]

$NL$  = número de locais de medida na rede [adimensional]

$H_{i,j}^m$  = carga medida [L]

$H_{i,j}^c$  = carga calculada [L]

$i = 1, 2, \dots, NL$

$j = 1, 2, \dots, TS$

Assim, pode-se definir a função objetivo como o negativo da soma dos desvios absolutos, o que demonstra que durante a identificação dos parâmetros, de rugosidade e fator de atrito, a otimização compreende maximizar a função objetivo:

$$F_{obj} = -F \quad (2.38)$$

Segundo Silva (2006) existem casos em que não é possível utilizar o valor da função objetivo como valor de aptidão, sendo utilizados outros métodos para a conversão: ordenamento e escalonamento.

### 3 PROBLEMÁTICA E METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

#### 3.1 Problema Inverso e Método Indireto

A análise e estudo de redes de distribuição de água pode ser abordada em duas situações: o estudo de redes hidráulicas ainda em fase de elaboração de projeto e a necessidade de análise de redes existentes. Na primeira situação, conhecida como problema direto, é comum se conhecer as necessidades e as demais características físicas do sistema desejando-se calcular as cargas hidráulicas nos nós e as vazões nos tubos de forma a atender a demanda da população. A segunda situação, conhecida como problema inverso, trata-se de análise de redes existentes nas quais geralmente são conhecidas somente as características físicas (quantidade e comprimento dos tubos, posicionamento dos nós e em alguns casos os diâmetros) e alguns dados disponíveis de cargas hidráulicas que podem ser medidas com ajuda de aparelhos "in loco". No problema inverso pretende-se identificar os parâmetros reais (fator de atrito, rugosidade, diâmetros, vazamentos, demandas e outros) para que se possa conhecer as reais condições do sistema existente após anos de funcionamento e analisar o comportamento do mesmo diante às circunstâncias diversas: vazamentos, ligações clandestinas, eventos transientes, ampliação da rede e outros.

Os problemas inversos podem ser resolvidos através de métodos diretos e indiretos. O método direto é baseado no uso de sistemas de equações diferenciais que consideram os parâmetros a serem calibrados como variáveis dependentes. No método indireto esses mesmos parâmetros são identificados por meio de processos iterativos, nos quais esses variam e as simulações de iteração são repetidas até a obtenção da melhor resposta para o sistema através de condição imposta inicialmente. Os métodos indiretos são mais utilizados devido à simplicidade matemática e por ser menos sensível a erros nos dados de entrada.

Segundo Araújo (2003), a instabilidade é o sintoma mais comum na solução do problema inverso, pois gera oscilação dos resultados quando existirem variações, mesmo que pequenas, nos dados de entradas (parâmetros físicos, variáveis de controle, condições iniciais). No entanto, Carrera e Neuman (1986a) abordam que o método indireto conduz a melhores soluções do problema inverso, visto que se utilizam do método de mínimos quadrados ou similares para filtrar parte dos erros nos dados de entrada de carga hidráulica.

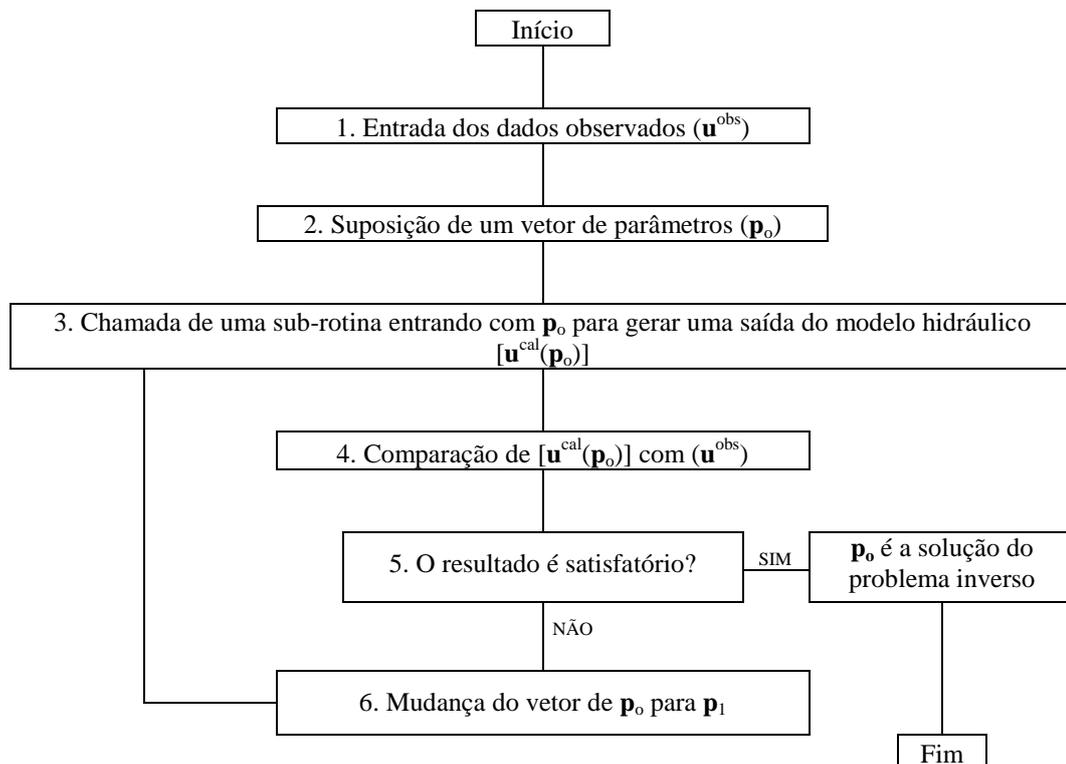
### 3.1.1 Solução Indireta

Khan (1985, apud VIEIRA, 2008) relata que a abordagem indireta é essencialmente um produto do método de tentativa e erro diferindo somente na seleção das soluções, que é feita através do uso do algoritmo e de ajuste das mesmas a uma função objetivo. Sun (1994 apud ARAÚJO, 2003) salienta que o método indireto minimiza a participação humana na escolha do resultado final transformando-o em menos tendencioso.

O processo da solução indireta inicia-se a partir da identificação de vazões estabelecidas e demandas da rede; é necessário a estimar os parâmetros (fator de atrito ou rugosidade considerados desconhecidos), inicialmente adotando-os como reais, e da medição de cargas hidráulicas em alguns pontos. Em seguida calcula-se as características para as informações coletadas. É adotado uma função objetivo que compara os resultados observados de carg com os resultados calculados, quanto menor a diferença desses valores mais satisfatória será o resultado. Se as condições encontradas atender a função objetivo o processo chega ao fim, caso contrário a rotina é executada novamente até que se chegue em resultados ótimos.

O fluxograma da solução Indireta (figura 6) descreve os seguintes passos:

Figura 6 - Fluxograma da Solução Indireta



Fonte: SUN (1994 apud Araújo, 2003).

Uma das vantagens dessa solução pode ser apontada por Neuman (1973) que observa em seus trabalhos melhores resultados do problema inverso, visto que a solução indireta minimiza parte dos ruídos dos dados de carga hidráulica devido ao uso de mínimos quadrados.

### **3.2 Formulação e metodologia de resolução**

A problemática é analisada para duas redes distribuição de água sintéticas de tamanhos diferentes. Em ambas as situações se conhecem as características físicas do sistema (quantidade, extensão e diâmetros dos trechos), vazões e demandas estabelecidas; e pretende-se identificar os parâmetros de rugosidade e fator de atrito dos trechos e analisar a sua conveniência.

O método proposto utilizado para calibração dos parâmetros é o Método Transiente Inverso com seleção de solução otimizada pelo algoritmo genético (MTI-AG) baseado na utilização de dados de cargas hidráulicas provenientes da ocorrência de um evento transiente (fechamento de válvulas da rede).

Para a metodologia adotada é necessário conhecer as condições de vazões e cargas no regime permanente. Para tal estima-se inicialmente um conjunto de parâmetros objetos da calibração para a aplicação de um modelo hidráulico permanente a fim de se conhecer as condições iniciais.

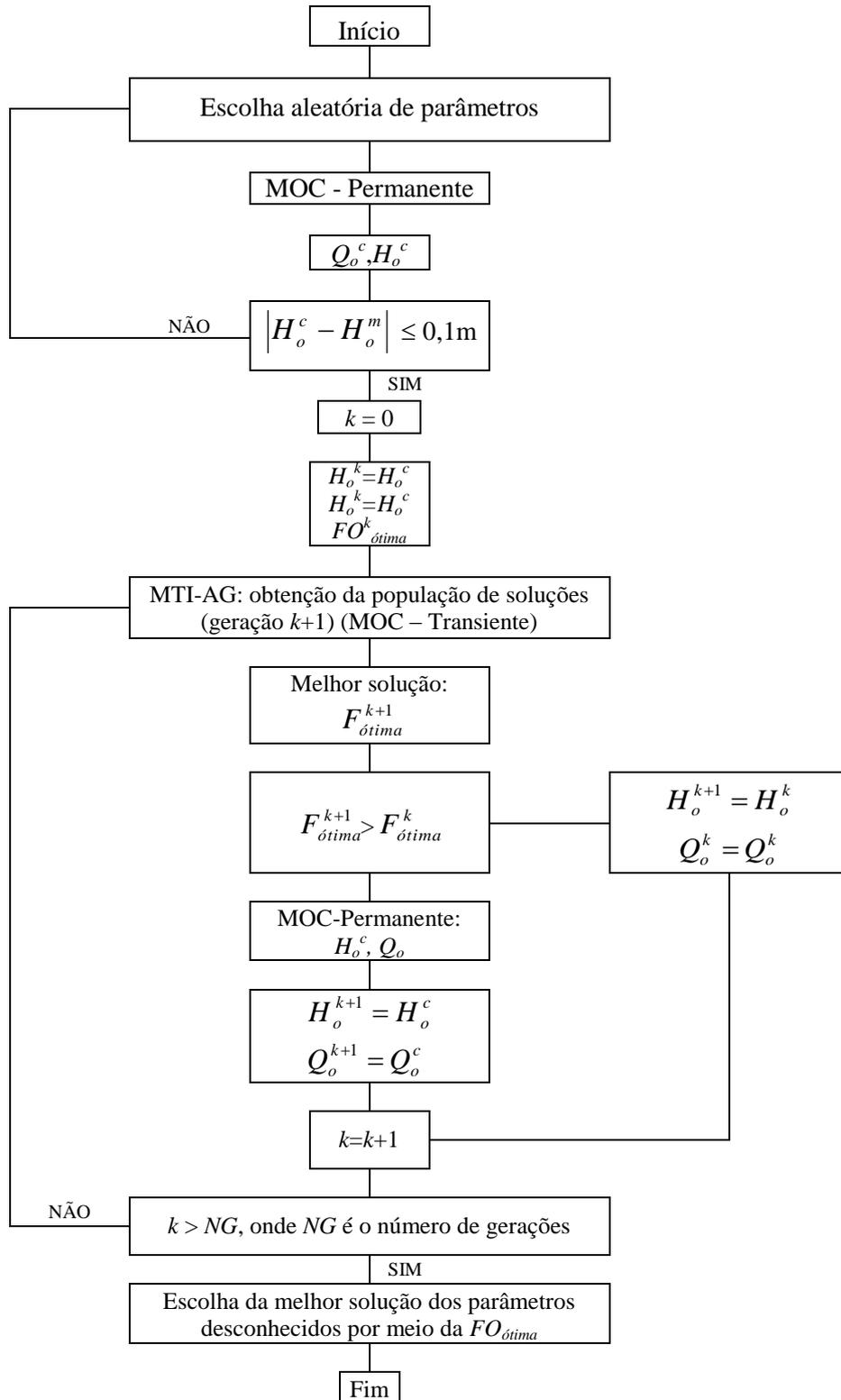
A ocorrência de um evento transiente será responsável pela produção de cargas sintéticas, que simularão as cargas medidas no campo, em um ou mais nós, monitorados em um intervalo de tempo de 80 segundos. Considerando que o registro de cargas ocorrerá a cada espaço de tempo de 0,1 segundos, totalizam-se 800 valores de cargas "medidas" no(s) referido(s) nó(s).

As cargas denominadas transientes são comparadas com as cargas permanentes calculadas inicialmente através de uma função objetivo repentinamente. O critério de parada das simulações e comparações pode ser: o alcance da função objetivo ou do número máximo de gerações adotadas. A relação mais satisfatória fornece valores para o cálculo dos parâmetros de rugosidade e fator de atrito.

A descrição formal da minimização da diferença entre as cargas medidas e calculadas se iguala a função objetiva (aptidão) adotada e pode ser posta conforme a equação (2.67).

Araújo (2003) apresenta um fluxograma capaz de representar a metodologia aplicada, ver figura 7.

Figura 7 - Fluxograma do procedimento de calibração com auto correção



Os eventos transientes serão ocasionados pelas manobras realizadas na rede, no caso fechamento de válvulas existentes e serão de dois tipos: uma efetivamente brusca e outra considerada lenta. Para o processo iterativo de seleção da solução serão fixados alguns parâmetros do Algoritmo Genético. Os resultados das simulações serão analisados conforme o método indireto do problema inverso.

Os resultados permitem o estudo de conveniência da calibração do fator de atrito com os valores calculados através da fórmula de Swamee (1993), que requer a identificação da rugosidade inicialmente. Os problemas abordados serão:

- a) calibração da rugosidade absoluta,  $\varepsilon$ ;
- b) calibração do fator de atrito,  $f$ ;
- c) estudo da conveniência da calibração do fator de atrito diretamente com o cálculo do mesmo através da rugosidade absoluta.

O estudo possibilita também analisar a influência do tamanho da rede, do número de nós monitorados nos quais se conhecem as cargas hidráulicas transientes, do tipo de manobra adotada na calibração e do uso do método de seleção adotado: com elitismo e sem elitismo; dentro do estudo da conveniência.

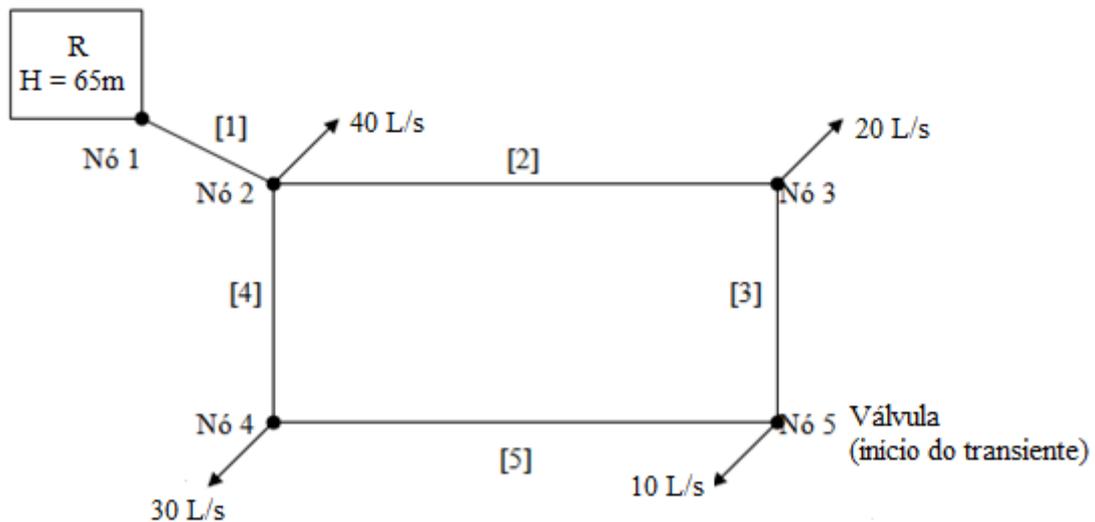
### ***3.2.1 Redes de Distribuição***

Segundo Araújo (2003) a aplicação do procedimento MTI-AG não impõe restrição na dimensão do sistema, assim serão propostas duas redes de tamanhos diferentes que conforme os autores representam modelos reais.

#### ***3.2.1.1 Rede A***

A primeira rede, denominada REDE A, foi adaptada da literatura Porto (2006) e pode ser considerada pequena por possuir somente um anel. O sistema é constituído por 05 tubos abastecidos por 01 reservatório (nó 1), 04 nós de demanda constante (nó 2, nó 3, nó 4 e nó 5) e 01 válvula de controle (nó 5) no qual será medido a carga hidráulica transiente. A carga do reservatório é de 65,00 m. O material da rede adotado é ferro fundido e as cotas forma consideradas no mesmo nível por simplificação. A rede A é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Rede A



Fonte: Adaptada de Porto, 2006.

Legenda:

[ ] – Numeração dos trechos

A Tabela 4 abaixo apresenta as características físicas do sistema hidráulico:

Tabela 4 - Características físicas dos trechos da Rede A

| REDE A |       |       |           |         |         |         |                                |         |          |
|--------|-------|-------|-----------|---------|---------|---------|--------------------------------|---------|----------|
| Tubo   | L (m) | D (m) | Esp. (mm) | Poisson | E (GPa) | K (GPa) | Densidade (Kg/m <sup>3</sup> ) | a (m/s) | a* (m/s) |
| (1)    | (2)   | (3)   | (4)       | (5)     | (6)     | (7)     | (8)                            | (9)     | (10)     |
| 1      | 300   | 0.4   | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1156.6  | 1500     |
| 2      | 305   | 0.1   | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1374.9  | 1525     |
| 3      | 215   | 0.3   | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1217.4  | 2150     |
| 4      | 215   | 0.1   | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1374.9  | 2150     |
| 5      | 215   | 0.25  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1251.7  | 2150     |

Coluna (1) – Numeração dos trechos conforme a rede apresentada [adimensional].

Coluna (2) - Comprimento do trecho [L].

Coluna (3) - Diâmetro [L].

Coluna (4) - Espessura da parede do tubo [L].

Coluna (5) - Razão de Poisson [adimensional] .

Coluna (6) - Módulo de Elasticidade do tubo [ $FL^{-2}$ ].

Coluna (7) - Módulo de Elasticidade da água [ $FL^{-2}$ ].

Coluna (8) - Massa específica da água [ $ML^{-3}$ ] .

Coluna (9) - Valor inicial da celeridade no tubo [ $LT^{-1}$ ].

Coluna (10) - Valor corrigido da celeridade no tubo [ $LT^{-1}$ ].

O estudo propõe também a análise da influência dos número de nós monitorados, ou seja, a influência do conhecimento de cargas hidráulicas inicial da rede. Para tal adotam-se como monitorados 20% dos números de nós da rede. Como a Rede A é constituída por 05 nós, monitora-se 01 nó somente. Portanto as cargas transientes oriundas do fechamento da

válvula serão registradas no nó 05 e seu quantitativo vai depender do espaço de tempo ( $\Delta t=0,1s$ ) adotado e do tempo de observação do evento de 80 segundos. Segundo Chaudhry (1987) sistemas de redes constituídos por mais de 02 trechos devem possuir mesmo intervalo de tempo em todos os trechos possibilitando assim o uso das condições de contorno nas conexões. O cálculo desse intervalo de tempo deve obedecer à condição de estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy ( $\Delta x > a\Delta t$ ), a fim de se evitar interpolações no valor de  $\Delta t$  utiliza-se a seguinte equação (CHAUDHRY, 1987):

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i N_i} \quad (1 \text{ até } n) \quad (3.1)$$

Onde:

$L_i$  – Comprimento do i-ésimo conduto [L];

$a_i$  - Celeridade do i-ésimo conduto [ $LT^{-1}$ ];

$N_i$  - número inteiro e igual ao número de trechos no qual o i-ésimo conduto é dividido [adimensional];

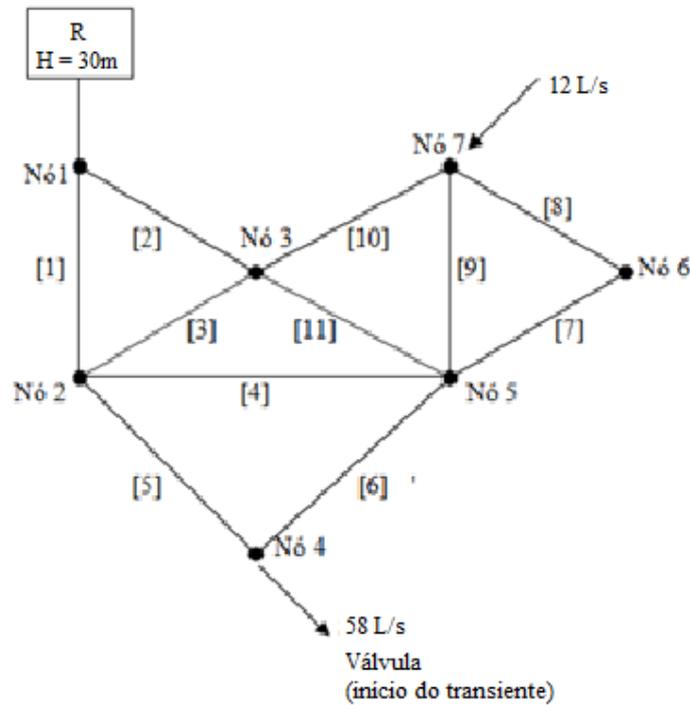
$n$  – é o número de tubos no sistema [adimensional].

Os tubos foram discretizados em 7 trechos com cerca de 150 m de comprimento cada um

### 3.2.1.2 Rede B

A segunda rede (Figura 9), denominada REDE B, foi adaptada da literatura de Liggett e Chen (1994) e é utilizada por outros autores. O sistema é constituído por 05 anéis, 01 reservatório de carga constante (nó 1) vazão constante de 46 L/s , 11 tubos, 02 nós de demanda (nó 4 e nó 7), 04 nós comuns e uma válvula de controle (nó 4), no qual ocorrerá o fenômeno transiente. O material adotado é ferro fundido e as cotas foram consideradas constantes.

Figura 9 - Rede B



Fonte: Adaptada de Liggett e Chen, 1994.

Legenda:

[ ] – Numeração dos trechos.

A Tabela 5 abaixo apresenta as características físicas da rede hidráulica B:

Tabela 5 - Características físicas dos trechos da rede B

| REDE B |       |       |           |         |         |         |                                |         |          |
|--------|-------|-------|-----------|---------|---------|---------|--------------------------------|---------|----------|
| Tubo   | L (m) | D (m) | Esp. (mm) | Poisson | E (GPa) | K (GPa) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | a (m/s) | a* (m/s) |
| (1)    | (2)   | (3)   | (4)       | (5)     | (6)     | (7)     | (8)                            | (9)     | (10)     |
| 1      | 305   | 0.25  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1251.7  | 1525     |
| 2      | 215   | 0.25  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1251.7  | 2150     |
| 3      | 215   | 0.2   | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1289    | 2150     |
| 4      | 305   | 0.2   | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1289    | 1525     |
| 5      | 215   | 0.25  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1251.7  | 2150     |
| 6      | 215   | 0.25  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1251.7  | 2150     |
| 7      | 215   | 0.2   | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1289    | 2150     |
| 8      | 215   | 0.15  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1329.9  | 2150     |
| 9      | 305   | 0.25  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1251.7  | 1525     |
| 10     | 215   | 0.15  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1329.9  | 2150     |
| 11     | 215   | 0.25  | 10        | 0.25    | 120     | 2.19    | 999                            | 1251.7  | 2150     |

Coluna (1) – Numeração dos trechos conforme a rede apresentada [adimensional].

Coluna (2) - Comprimento do trecho [L].

Coluna (3) - Diâmetro [L].

Coluna (4) - Espessura da parede do tubo [L].

Coluna (5) - Razão de Poisson [adimensional].

- Coluna (6) - Módulo de Elasticidade do tubo [ $FL^{-2}$ ].  
 Coluna (7) - Módulo de Elasticidade da água [ $FL^{-2}$ ].  
 Coluna (8) - Massa específica da água [ $ML^{-3}$ ].  
 Coluna (9) - Valor inicial da celeridade no tubo [ $LT^{-1}$ ].  
 Coluna (10) - Valor corrigido da celeridade no tubo [ $LT^{-1}$ ].

A proposta de monitorar somente 20% dos nós da rede implica em dizer que são conhecidas cargas transientes em 02 nós do sistema apenas no total de 7 nós. Os nós escolhidos são o nó da válvula (Nó 04) e o nó de demanda constante de 12 L/s (Nó 07). O estudo possibilita ainda comparar a influência desse conhecimento na própria Rede B quando se calibra os parâmetros desconhecidos para as duas situações: considerando 01 e 02 nós monitorados.

O espaço de tempo adotado para medição das cargas ( $\Delta t=0,1s$ ) permite a anotação de 800 cargas para cada nó dentro do tempo de observação do evento transiente de 80 segundos. O espaço de tempo é calculado conforme os conhecimentos de Chaudhry (1987) igualmente ao procedimento adotado na Rede A. Os tubos são discretizados em 14 trechos com cerca de 150 m de comprimento cada um.

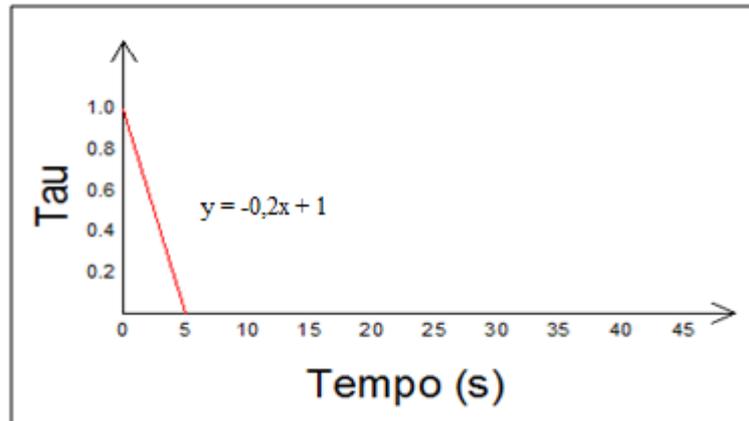
### **3.2.2 Manobras de válvulas**

Com o intuito de analisar a influência do tipo da manobra das válvulas de retenção foram adotadas duas manobras, a primeira com fechamento brusco (Manobra 01) e a segunda com fechamento lento (Manobra 02). Para caracteriza-las será apresentado gráficos que descrevem a relação entre o coeficiente de abertura ou fechamento relativo da válvula,  $\tau$  (tau), em função do tempo  $t$ . A abertura máxima é apresentada quando  $\tau = 1$  e o fechamento total acontece quando  $\tau = 0$ .

#### **3.2.2.1 Manobra 01**

A manobra nº01 encontra-se inicialmente ( $t=0$ ) totalmente aberta. Em seguida o operador inicia o fechamento da válvula que se completa em 5 segundos de forma linear. A válvula permanece fechada, ver Gráfico 2.

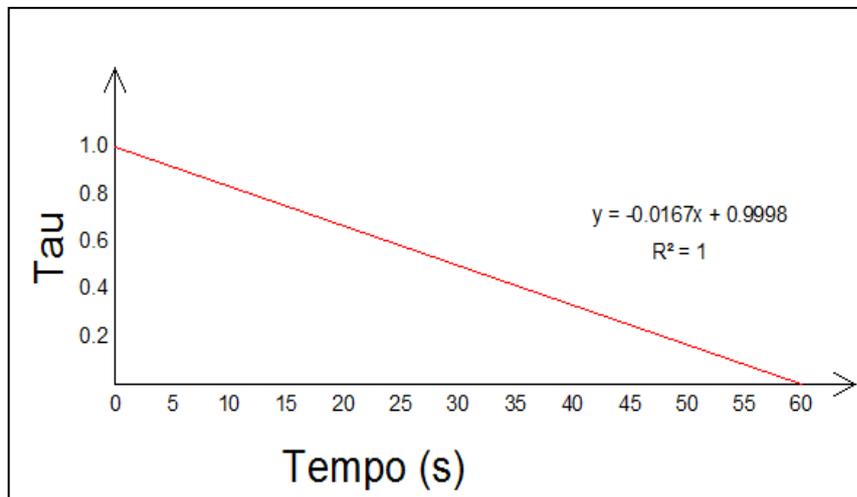
Gráfico 2 - Manobra nº01 da válvula



### 3.2.2.2 Manobra 02

A manobra nº 02 encontra-se inicialmente ( $t=0$ ) totalmente aberta. Em seguida o operador inicia o fechamento da válvula que se completa em 60 segundos de forma linear e a mesma permanece fechada, ver gráfico 3.

Gráfico 3 - Manobra nº 02 da válvula



### 3.2.3 Parâmetros adotados no Algoritmo genético

Os parâmetros utilizados para o procedimento do algoritmo genético são:

- Representação de parâmetros: binária
- População de soluções (número de cromossomos): 50
- Número de gerações: 50

- d) Tipo de cruzamento: de um ponto
- e) Probabilidade de cruzamento: 100%
- f) Tipo de mutação: simples
- g) Probabilidade de mutação: 0,50 %
- h) Taxa de elitismo: 0% e 50%
- i) Taxa de sucessão: 50%

As escolhas dos parâmetros de número de gerações (NG) e número de cromossomos (NC) foram realizadas de acordo com algumas simulações (expressas no apêndice A) realizadas para diversos NG's e NC's. Os processamentos permitiram identificar quais parâmetros, entre os utilizados, apresentaram resultados mais satisfatórios, ou seja, apresentam menores funções objetivo e erros médio relativos menores. O tipo de parâmetro a ser calibrado e o tempo de processamento também foram levados em consideração, pois os processamentos para calibração de fatores de atrito possuem duração menor que os processamentos para rugosidade, da mesma forma que as simulações para a Rede A, considerada menor, possui tempo de processamento inferior à rede B.

As calibrações realizadas são resultados da média de 10 processamentos de AG (ver Anexo C).

### **3.2.4 Estudos de caso**

#### *3.2.4.1 Identificação da rugosidade absoluta, $\varepsilon$*

Será realizada a calibração da rugosidade absoluta a fim de que seja feita:

- Comparação entre os valores reais adotados e valores calibrados;
- Utilização dos valores calibrados para cálculo das novas condições permanentes e posterior cálculo dos fatores de atrito através da fórmula de Swamee.

O uso da fórmula de Swamee (1993) para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach se deve a variação desse parâmetro com o tempo em escoamentos não permanentes, situação abordada nesse trabalho.

### Grau de conhecimento do material da tubulação

No processo de calibração é comum não se conhecer o material da tubulação existente ou suas condições. Dessa forma o grau de conhecimento do material da tubulação é adotado a partir dos estudos realizados por Araújo (2003), nos quais apresentaram erro médio relativo menor para o caso que adota o material dos tubos pertencente à uma só categoria do que quando se considera o material da tubulação totalmente desconhecido. A conclusão apresentada por este autor verifica ainda que a adoção inicial de rugosidades reais constantes (iguais) para todos os tubos resulta também em menor erro relativo em relação à adoção desses parâmetros variados dentro da mesma categoria.

Para esse trabalho, adota-se que o material dos tubos pertence à categoria ferro fundido, não são do mesmo material e não possuem a mesma rugosidade. Os valores iniciais, considerados reais, de rugosidades dos tubos na Rede A e Rede B podem ser verificados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Valores reais adotados das rugosidades para inicialização do processo de calibração para Rede A

| Tubo /rugosidade absoluta $\epsilon$ (mm) |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Tubos                                     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $\epsilon$ (mm)                           | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

Tabela 7 - Valores reais adotados das rugosidades para inicialização do processo de calibração para Rede B

| Tubo /rugosidade absoluta $\epsilon$ (mm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Tubos                                     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
| $\epsilon$ (mm)                           | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

A escolha das rugosidades está sujeita a um intervalo de valores discretos correspondentes ao tipo de material da tubulação conforme Porto (2006). Portanto, para a identificação desse parâmetro adota-se a codificação discreta (Ver Tabela 8).

Tabela 8 - Codificação dos valores médios da rugosidade absoluta

| <b>Material</b>   | <b><math>\epsilon</math> (mm)</b> | <b>Código</b> |
|---|-----------------------------------|---------------|
| Cobre, latão, aço revestido de epóxi; PVC, plásticos em geral, tubos extrudados     | 0.00575                           | 1             |
| Cimento amianto novo  | 0.025                             | 2             |
| Concreto protendido Freyssinet  | 0.04                              | 3             |
| Aço comercial novo  | 0.045                             | 4             |
| Aço laminado revestido de asfalto, ferro forjado, ferro fundido centrifugado        | 0.05                              | 5             |
| Aço laminado novo   | 0.07                              | 6             |
| Aço soldado novo  | 0.075                             | 7             |
| Aço soldado revestido de cimento centrifugado, fofo em uso com cimento centrifugado | 0.1                               | 8             |
| Aço galvanizado, sem costura  | 0.105                             | 9             |
| Ferro fundido com revestimento asfáltico, concreto centrifugado novo                | 0.16                              | 10            |
| Aço soldado limpo, usado; aço galvanizado, com costura                              | 0.175                             | 11            |
| Concreto armado liso, vários anos de uso  | 0.25                              | 12            |
| Ferro fundido com leve oxidação   | 0.3                               | 13            |
| Ferro fundido novo  | 0.375                             | 14            |
| Aço soldado moderadamente oxidado   | 0.4                               | 15            |
| Ferro fundido oxidado   | 1.25                              | 16            |
| Aço rebitado novo, concreto com acabamento normal                                   | 2                                 | 17            |
| Ferro fundido velho   | 4                                 | 18            |
| Aço rebitado em uso   | 6                                 | 19            |

Fonte: Adaptado de Porto (2006).

Os valores de fator de atrito  $f$  obtidos posteriormente a calibração da rugosidade através da fórmula de SWAMEE serão denominados "fatores de atrito equivalentes", ou seja, obtidos através de rugosidades calibradas; e serão comparados com os fatores de atrito calibrados pelo MTI-AG conforme próximo item. Para o cálculo desses parâmetros equivalentes serão analisadas novas condições de vazões e cargas do estado permanente.

### 3.2.4.2 Identificação dos fatores de atrito, $f$

Neste estudo de caso o esquema de codificação discreta é utilizado para representar os coeficientes de atrito de Darcy-Weisbach através de uma gama de fatores de atrito entre 0.010 e 0.050, com um intervalo de 0.001, permitindo a existência 41 valores possíveis para cada tubo. O esquema de codificação discreta para os fatores de atrito em tubos dentro da rede usa pontos flutuante como bits no cromossomo.

Por outro lado, se o esquema de codificação destes bits fosse contínua (representação real) os valores variariam entre 0.010 e 0.050, mas poderiam assumir qualquer número contínuo entre eles. Por esta razão, o tamanho do espaço de busca não poderia ser quantificado, devido às infinitas possibilidades para cada bit em um cromossomo (SIMPSON, VITKOVSKÝ, LAMBERT; 2000).

Para a calibração do fator de atrito pelo MTI-AG os valores iniciais adotados, são os fatores equivalentes às rugosidades reais adotadas inicialmente, calculados através da fórmula de Swamee. Ver Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Valores dos fatores de atrito equivalentes às rugosidades ( $\epsilon$ ) adotadas para a Rede A considerando as condições permanentes iniciais

| Tubo / fator de atrito equivalente à $\epsilon_{(mm)} = 0,3$ mm |         |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| Tubos   | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       |
| $f_{equivalente}$   | 0.01957 | 0.02668 | 0.02594 | 0.02660 | 0.03088 |

Tabela 10 - Valores dos fatores de atrito equivalentes às rugosidades ( $\epsilon$ ) adotadas para a Rede B considerando as condições permanentes iniciais

| Tubo / fator de atrito equivalente à $\epsilon_{(mm)} = 0,3$ mm |         |         |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Tubos   | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
| $f_{equiv.}$  | 0.02273 | 0.02270 | 0.02563 | 0.03503 | 0.02233 | 0.02234 |
| tubos   | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      | -       |
| $f_{equiv.}$  | 0.02958 | 0.02918 | 0.02452 | 0.03281 | 0.02372 |         |

#### 3.2.4.3 Estudo da conveniência da calibração do fator de atrito equivalente com o fator de atrito calibrado diretamente

Como ferramenta de análise da viabilidade e conveniência da identificação das rugosidades em relação ao fator de atrito, propõe-se a comparação entre os fatores de atritos equivalentes (obtidos com as rugosidades calibradas) com os fatores calibrados diretamente pelo MTI-AG.

### 3.2.5 Indicadores de eficiência

#### 3.2.5.1 Erro Médio Relativo (EMR)

Para se comparar a eficiência da calibração dos parâmetros citados será aplicado a análise através do Erro Médio Relativo (EMR), ver equação (3.4).

$$EMR(\%) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(w_i^{real} - w_i^{estimado})}{w_i^{real}} \times 100 \right] \quad (3.2)$$

Onde:

$w$  - representa os parâmetros a serem calibrados  $f$  e  $\varepsilon$ ;

$i$  - número do tubo;

$n$  - número total de tubos na rede.

O análise feita pela comparação do Erro médio relativo implica em quão distante, em %, estão os valores estimados dos valores calibrados.

A função objetivo também é utilizada como indicador de eficiência, pois trabalha como um ponto de parada do Algoritmo genético. Quanto menor o valor da função alcançada, ou seja, quanto maior a nota de aptidão mais próximos estarão os valores calibrados dos valores reais adotados inicialmente. Os resultados obtidos nessa pesquisa serão avaliados também através das  $FO_{ÓTIMA}$ , que representa o melhor resultado dos dez processamentos de algoritmo genético realizado para cada calibração.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados da metodologia aplicada para realizar a análise da conveniência da calibração do fator de atrito e da rugosidade. Serão divididos nos seguintes passos:

1. Identificação das características físicas das redes de distribuição (apresentado no capítulo 3 através das Tabelas 4 e 5);
2. Adoção de parâmetros de rugosidade estimados para as tubulações (apresentado no capítulo 3 através das Tabelas 6 e 7);
3. Cálculo das condições iniciais de vazão e carga hidráulica nos tubos e nós respectivamente;
4. Cálculo dos fatores de atrito reais, equivalentes às rugosidades constantes;
5. Simulação do evento transiente e monitoramentos de cargas em 20% dos nós das redes;
6. Calibração da rugosidade através do MTI-AG;
7. Cálculo das novas condições de pressão e vazão do sistema diante os novos valores encontrados de rugosidade na calibração e seus respectivos valores de fatores de atrito equivalentes pela fórmula de Swamee;
8. Calibração do parâmetro fator de atrito através do MTI-AG utilizando os dados do passo 4 como dados reais;
9. Análise da conveniência dos valores de fatores de atrito apontados pela calibração e pela fórmula de Swamee.

De acordo com a metodologia apresentada, na análise dos resultados, também serão levados em consideração a influência dos seguintes fatores:

- a) tamanho da rede;
- b) número de nós monitorados nos quais se conhecem as cargas hidráulicas transientes (20% do total da rede);
- c) tipo de manobra adotada na calibração;
- d) mecanismo de Seleção do algoritmo genético: com elitismo e sem elitismo.

Os resultados encontrados serão comparados a partir dos indicadores de eficiência do procedimento de calibração: Erro Médio Relativo (EMR) e Função Objetivo ( $FO_{ótima}$ ).

## 4.1 Rede A

### 4.1.1 Cálculo das condições iniciais de vazão e carga hidráulica nos tubos e nós

As condições iniciais da rede foram encontradas com o auxílio de programa MOC - Permanente produzido por Araújo(2003). O programa calcula as condições iniciais desconhecidas de vazão e pressão na rede para regime permanente a partir dos valores estimados de rugosidades (Tabela 6) e dos valores de fatores de atrito (Tabela 9).

As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados obtidos para vazão e carga hidráulica.

Tabela 11 - Vazões iniciais no regime permanente dos trechos da Rede A

| Trecho | $\epsilon_{\text{real}}$ (mm) | $Q_{\text{inicial}}$ (L/s) |
|--------|-------------------------------|----------------------------|
| 1      | 0.30000                       | 100.000                    |
| 2      | 0.30000                       | 27.360                     |
| 3      | 0.30000                       | 7.360                      |
| 4      | 0.30000                       | 32.640                     |
| 5      | 0.30000                       | 2.640                      |

Tabela 12 - Cargas hidráulicas no regime permanente nos nós da Rede A na calibração da rugosidade e fator de atrito

| Nó | HO(m)      |                 |
|----|------------|-----------------|
|    | Rugosidade | Fator de atrito |
| 1  | 65.0000    | 65.0000         |
| 2  | 64.5260    | 64.5258         |
| 3  | 14.1368    | 14.1403         |
| 4  | 14.1304    | 14.1339         |
| 5  | 14.1265    | 14.1300         |

Considerando as condições calculadas de vazão e pressão calculadas encontra-se, através da fórmula de Swamee, os fatores de atrito reais equivalentes às rugosidades reais adotadas na Tabela 6.

#### 4.1.2 Monitoramento do evento transiente para a rugosidade e fator de atrito

Em seguida realizou-se a simulação do evento transiente, considerando as duas manobras apresentadas. O espaço de tempo de observação de 0,1s permitiu ao final de 80s o monitoramento de 800 cargas sintéticas no nó 05. O tipo da manobra influencia na geração das cargas transientes conforme gráfico 4 e 5.

Gráfico 4 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 05 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação da rugosidade - Rede A

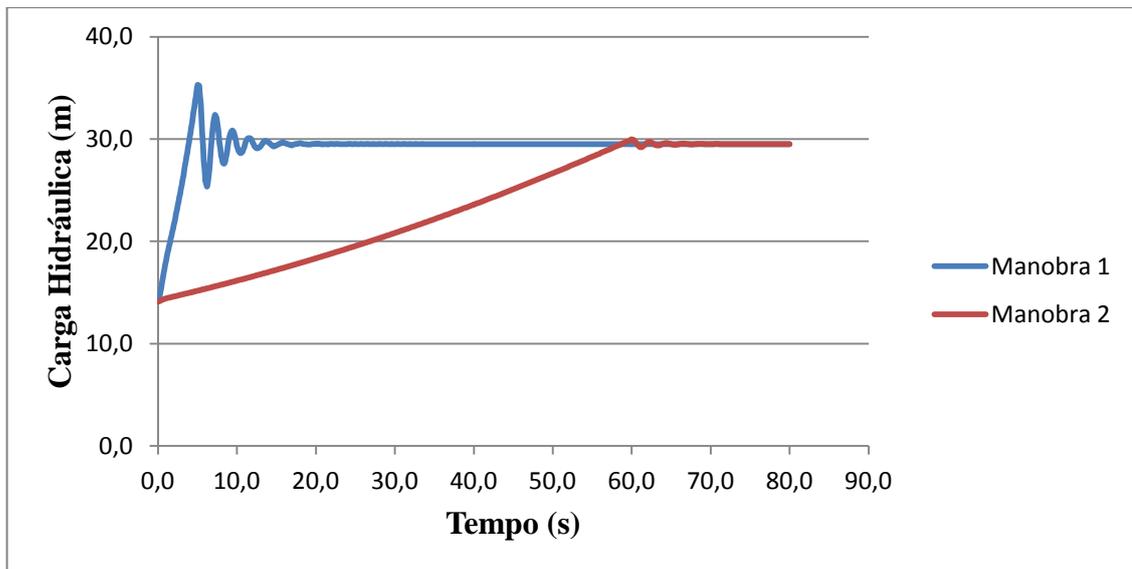
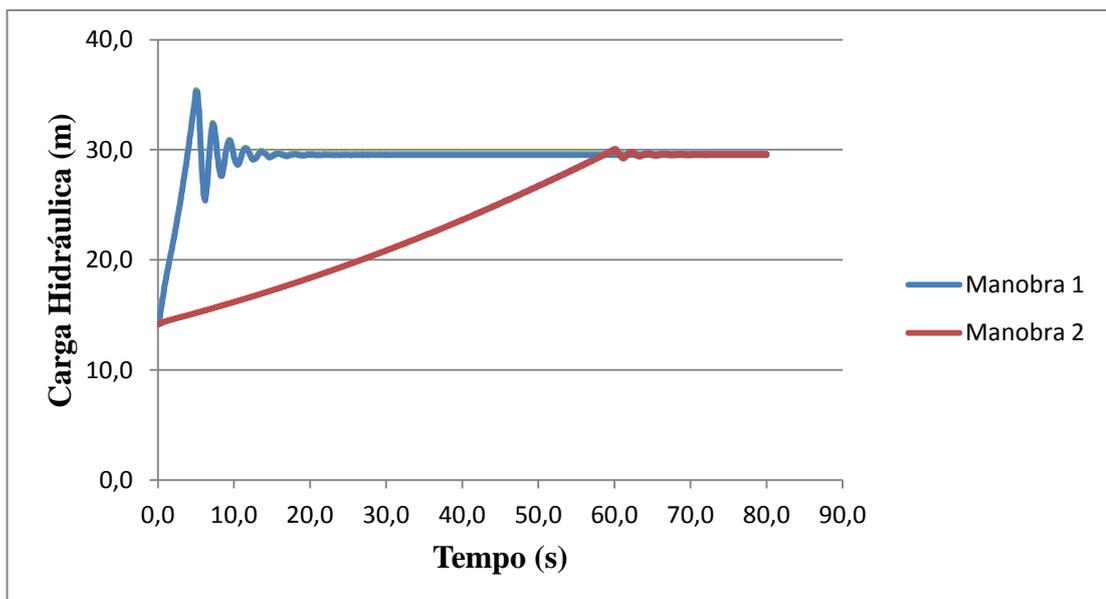


Gráfico 5 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 05 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação do fator de atrito - Rede A



### 4.1.3 Calibração da rugosidade real via MTI-AG

A calibração da rugosidade absoluta realizada pelo programa proposto por Araújo (2003) permite analisar através do EMR(%) quão diferentes estão os valores reais adotados inicialmente dos valores calibrados.

A Tabela 13 apresenta os valores de rugosidades absoluta encontradas considerando as manobras brusca (01) e suave (02); e o tipo de seleção adotada no algoritmo genético: com elitismo e sem elitismo. Verifica-se que, embora a estimação das rugosidades absolutas obtidas para a manobra suave, de maneira geral, é melhor do que a obtida com a manobra brusca, o tipo de manobra interfere muito pouco no processo de calibração. No entanto, o tipo de seleção do AG sem elitismo proporciona uma tendência de erros menores apresentando valores menos dispersos aos adotados. Verifica-se que o EMR:

- diminui de 27.07% para 12.60% na manobra 1;
- diminui de 26.07% para 8.40% na manobra 2;

Tabela 13 - Rugosidades calibradas via MTI-AG da rede A

| 'Trecho | $\epsilon_{\text{real}}$ (mm) | Manobra 1                                       |   | Manobra 2                                       |   |
|---------|-------------------------------|---|---|---|---|
|         |                               | $\epsilon_{\text{calib.}}$ (mm)<br>Com elitismo | $\epsilon_{\text{calib.}}$ (mm)<br>Sem elitismo | $\epsilon_{\text{calib.}}$ (mm)<br>Com elitismo | $\epsilon_{\text{calib.}}$ (mm)<br>Sem elitismo |
| 1       | 0.3000                        | 0.37600   | 0.28600   | 0.3530  | 0.2680  |
| 2       | 0.3000                        | 0.30200   | 0.28300   | 0.2960  | 0.3070  |
| 3       | 0.3000                        | 0.43700   | 0.36000   | 0.4410  | 0.3150  |
| 4       | 0.3000                        | 0.36200   | 0.33900   | 0.3640  | 0.3220  |
| 5       | 0.3000                        | 0.42900   | 0.35900   | 0.4290  | 0.3500  |
| EMR (%) |                               | 27.07   | 12.60   | 26.07   | 8.40  |

Os trechos 3 e 5, próximos da válvula, apresentaram maior dispersão nos valores de rugosidade calibrada em relação aos demais trechos. Os gráficos 6 e 7 apresentam melhor os valores das rugosidades calibradas comparando a rugosidade real adotada (0.30 mm) com as demais, analisando a influência do tipo de manobra e seleção adotados.

Gráfico 6 - Rugosidades calibradas na Rede A considerando o tipo de seleção com elitismo

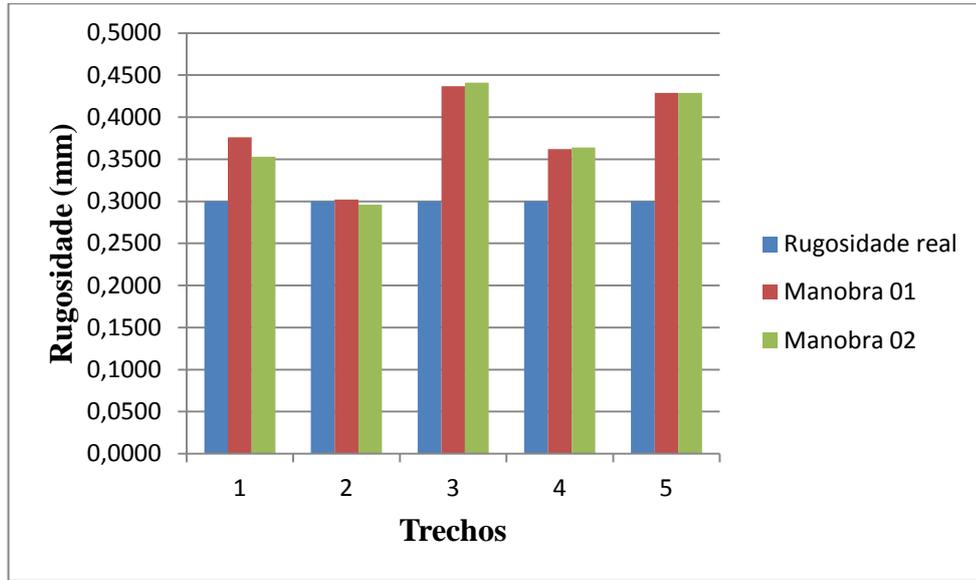
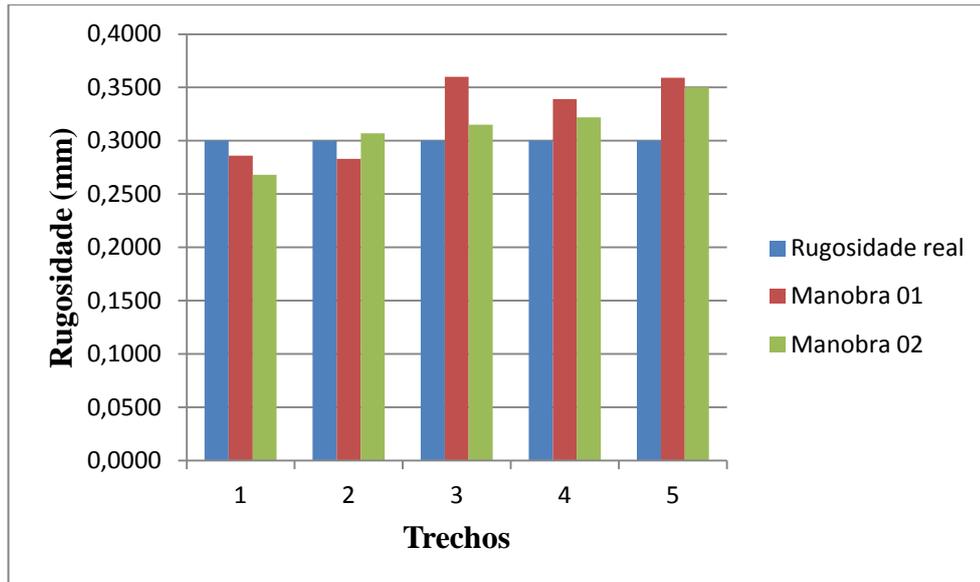


Gráfico 7 - Rugosidades calibradas na Rede A considerando o tipo de seleção sem elitismo



#### 4.1.4 Cálculo das novas condições do sistema diante os novos valores encontrados de rugosidade na calibração

A partir da calibração das rugosidades absolutas para situações diversas calculam-se novas condições permanentes adotando as rugosidades calibradas como as rugosidades reais dos problemas, ver Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de vazão para as novas condições permanentes da rede A

| Trecho | $\varepsilon$ real (mm) | Manobra 1          |             |                    |             | Manobra 2          |             |                    |             |
|--------|-------------------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|        |                         | Com elitismo       |             | Sem elitismo       |             | Com elitismo       |             | Sem elitismo       |             |
|        |                         | $\varepsilon$ (mm) | Vazão (L/s) |
| 1      | 0.30                    | 0.3760             | 99.9999     | 0.2860             | 100.0000    | 0.3530             | 100.0000    | 0.2680             | 100.0001    |
| 2      | 0.30                    | 0.3020             | 27.7316     | 0.2830             | 27.7248     | 0.2960             | 27.7829     | 0.3070             | 27.4587     |
| 3      | 0.30                    | 0.4370             | 7.7316      | 0.3600             | 7.7248      | 0.4410             | 7.7829      | 0.3150             | 7.4587      |
| 4      | 0.30                    | 0.3620             | 32.2684     | 0.3390             | 32.2752     | 0.3640             | 32.2171     | 0.3220             | 32.5413     |
| 5      | 0.30                    | 0.4290             | 2.2684      | 0.3590             | 2.2752      | 0.4290             | 2.2171      | 0.3500             | 002.5413    |

#### 4.1.5 Cálculo dos fatores de atrito equivalentes pela fórmula de Swamee

A calibração das rugosidades para as situações apresentadas e de suas respectivas condições permanentes de vazão possibilita o cálculo dos fatores de atrito através da fórmula de Swamee conforme Tabela 15 apresentada. Os gráficos 8 e 9 permitem comparar os resultados quanto ao tipo de seleção.

Os resultados mostram que o tipo de manobra adotado pouco influencia no cálculo do fator de atrito equivalente, variando levemente o erro de 3.88% (manobra 1 com elitismo) para 3.80% (manobra 2 com elitismo); e de 2.29% (manobra 1 sem elitismo) para 1.35% (manobra 2 sem elitismo). O tipo de seleção do AG sem elitismo encontra valores de EMR menores para as duas situações (manobra 1 e manobra 2), mas apresenta melhor resultado para a calibração com a manobra suave.

Tabela 15 - Cálculo dos fatores de atrito equivalentes da rede A

| Trecho  | $\varepsilon_{\text{real}}$ (mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 1                          |                     |                                    |                     | Manobra 2                          |                     |                                    |                     |
|---------|----------------------------------|-------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|
|         |                                  |                   | Com elitismo                       |                     | Sem elitismo                       |                     | Com elitismo                       |                     | Sem elitismo                       |                     |
|         |                                  |                   | $\varepsilon_{\text{calib.}}$ (mm) | $f_{\text{equiv.}}$ |
| 1       | 0.30                             | 0.01957           | 0.3760                             | 0.0204              | 0.2860                             | 0.0194              | 0.3530                             | 0.0202              | 0.2680                             | 0.0192              |
| 2       | 0.30                             | 0.02668           | 0.3020                             | 0.0267              | 0.2830                             | 0.0263              | 0.2960                             | 0.0266              | 0.3070                             | 0.0268              |
| 3       | 0.30                             | 0.02594           | 0.4370                             | 0.0268              | 0.3600                             | 0.0262              | 0.4410                             | 0.0268              | 0.3150                             | 0.0260              |
| 4       | 0.30                             | 0.02660           | 0.3620                             | 0.0280              | 0.3390                             | 0.0275              | 0.3640                             | 0.0280              | 0.3220                             | 0.0271              |
| 5       | 0.30                             | 0.03088           | 0.4290                             | 0.0328              | 0.3590                             | 0.0323              | 0.4290                             | 0.0329              | 0.3500                             | 0.0315              |
| EMR (%) |                                  |                   |                                    | 3.88                |                                    | 2.29                |                                    | 3.80                |                                    | 1.35                |

Gráfico 8 - Fatores de atrito equivalentes na Rede A considerando o tipo de seleção com elitismo

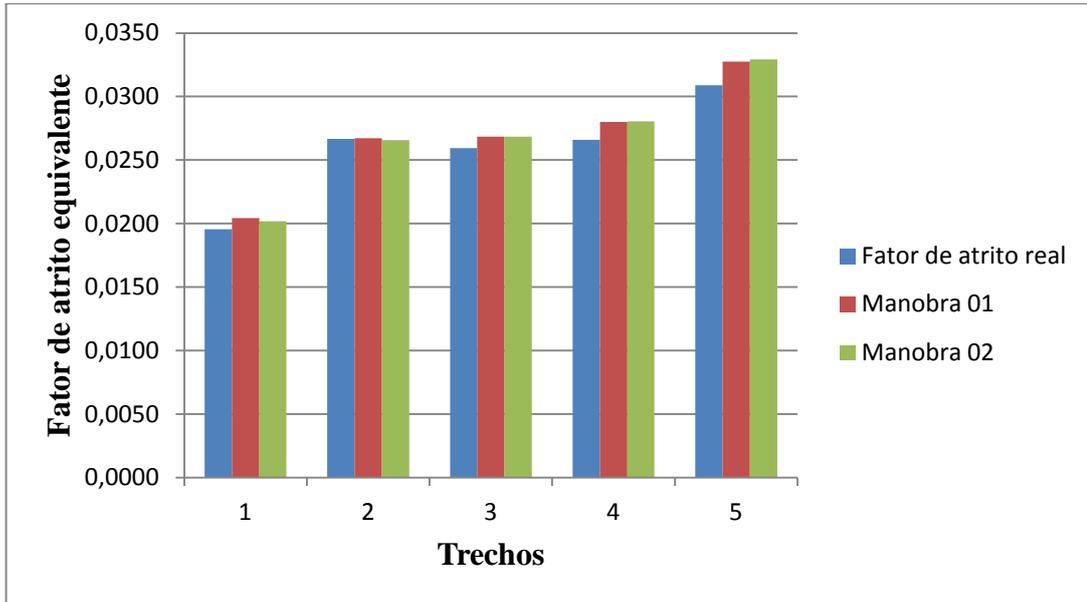
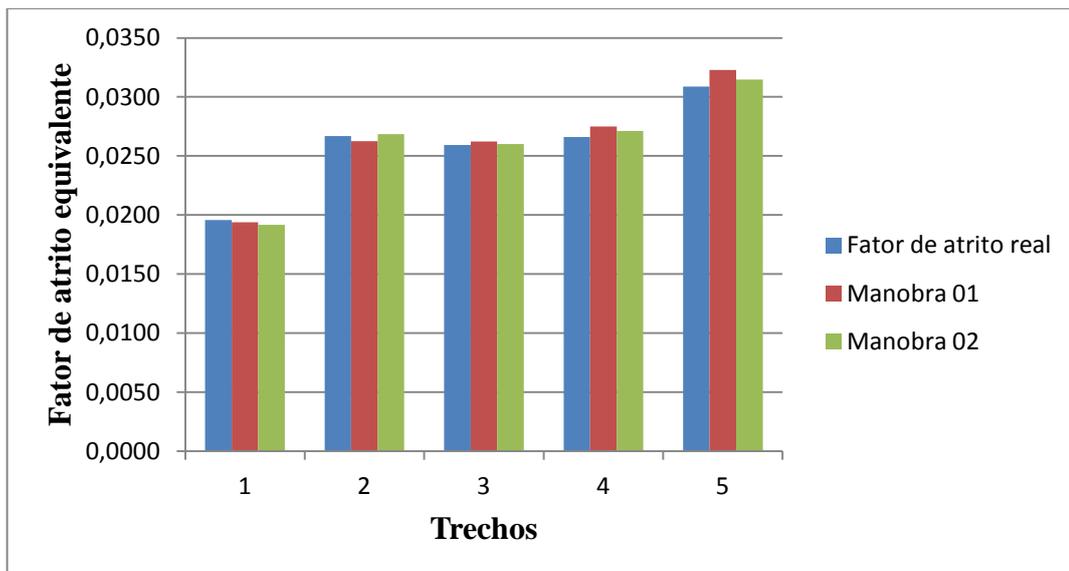


Gráfico 9 - Fatores de atrito equivalentes na Rede A considerando o tipo de seleção sem elitismo



#### 4.1.6 Calibração do parâmetro fator de atrito via MTI-AG

A calibração do fator de atrito se inicia a partir dos dados adotados na Tabela 9, do cálculo das condições iniciais e das cargas transientes geradas pelas manobras conforme gráfico 5.

Os valores encontrados para as situações propostas são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Fatores de atrito calibrados via MTI-AG da rede A

| Trecho  | $\epsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 1              |                        | Manobra 2              |                        |
|---------|----------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|         |                                  |                   | Com<br>elitismo        | Sem<br>elitismo        | Com<br>elitismo        | Sem<br>elitismo        |
|         |                                  |                   | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| 1       | 0.30                             | 0.01957           | 0.03030                | 0.03860                | 0.02700                | 0.03220                |
| 2       | 0.30                             | 0.02668           | 0.02940                | 0.03260                | 0.02970                | 0.03390                |
| 3       | 0.30                             | 0.02594           | 0.03480                | 0.04390                | 0.03440                | 0.03800                |
| 4       | 0.30                             | 0.02660           | 0.02950                | 0.02530                | 0.02850                | 0.02460                |
| 5       | 0.30                             | 0.03088           | 0.02810                | 0.03730                | 0.03330                | 0.03750                |
| EMR (%) |                                  |                   | 23.82                  | 42.88                  | 19.38                  | 33.42                  |

Observa-se que os valores encontrados apresentam pouca interferência do tipo de manobra, variando de 23.82% na manobra 1 com elitismo para 19.38% na manobra 2 com elitismo; e de 42.88% na manobra 1 sem elitismo para 33.42% na manobra 2 sem elitismo. No entanto os resultados apontam a calibração mais favorável para a manobra 2 com elitismo.

Os valores podem ser melhores analisados nos gráficos 10 e 11. Na análise dos gráficos os valores calibrados sem elitismo apresentam mais dispersos aos valores reais.

Gráfico 10 - Fatores de atrito calibrados na Rede A considerando o tipo de seleção com elitismo

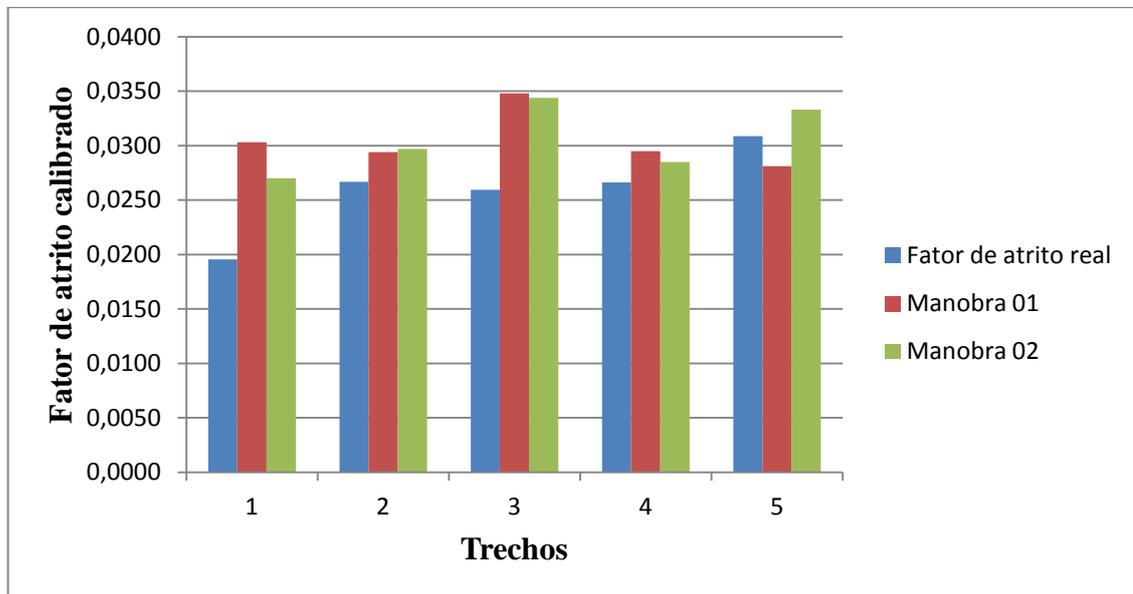
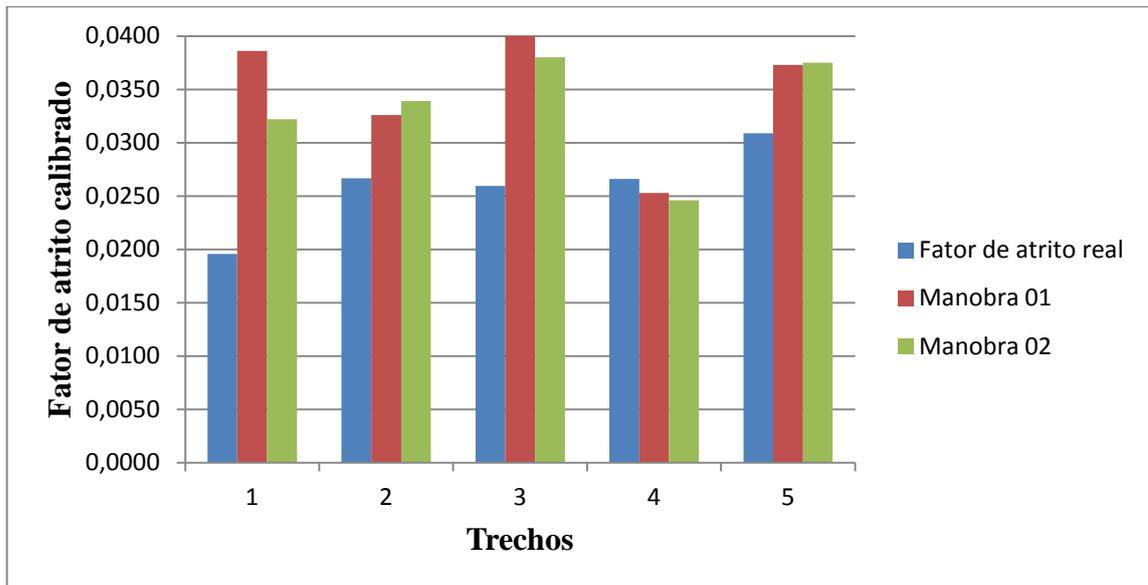


Gráfico 11 - Fatores de atrito calibrados na Rede A considerando o tipo de seleção sem elitismo



#### 4.1.7 Análise da conveniência dos valores de fatores de atrito calibrados e calculados pela fórmula de Swamee

As etapas realizadas possibilitaram comparar os valores de fator de atrito calibrados pelo MTI -AG com os valores de fator de atrito calculado diretamente pela fórmula de Swamee através da calibração da rugosidade. Os resultados encontrados apresentaram erros relativos médio menores (ERM) para o cálculo do fator de atrito a partir da rugosidade calibrada do que para a calibração o fator de atrito pelo MTI-AG em todas as circunstâncias, assim como Araújo (2003) havia concluído em sua análise.

A Tabela 17 compara as diversas situações propostas para a manobra 1 na qual observou-se:

- Os EMR's apresentaram-se menores quando os fatores de atrito são calculados a partir das rugosidades calibradas (3.88% com elitismo e 2.29% sem elitismo) do que quando calibrado diretamente pelo MTI-AG (23.82% com elitismo e 42.88% sem elitismo).
- Analisando isoladamente o cálculo do fator de atrito equivalente para as duas situações: com elitismo e sem elitismo, verificou-se EMR menor para a segunda situação, considerando o índice de Acerto (IMA) de 97.71% em relação aos valores adotados inicialmente.

Tabela 17 - Análise da conveniência entre  $f_{\text{equivalente}}$  e  $f_{\text{calibrado}}$  para a manobra 1 da rede A

| Trecho                  | $\epsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 1                    |                     |                        |                              |                     |                        |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|
|                         |                                  |                   | Com elitismo                 |                     |                        | Sem elitismo                 |                     |                        |
|                         |                                  |                   | $\epsilon_{\text{est}}$ (mm) | $f_{\text{equiv.}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $\epsilon_{\text{est}}$ (mm) | $f_{\text{equiv.}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| 1                       | 0.30                             | 0.01957           | 0.37600                      | 0.02043             | 0.03030                | 0.28600                      | 0.01939             | 0.03860                |
| 2                       | 0.30                             | 0.02668           | 0.30200                      | 0.02672             | 0.02940                | 0.28300                      | 0.02627             | 0.03260                |
| 3                       | 0.30                             | 0.02594           | 0.43700                      | 0.02684             | 0.03480                | 0.36000                      | 0.02623             | 0.04390                |
| 4                       | 0.30                             | 0.02660           | 0.36200                      | 0.02800             | 0.02950                | 0.33900                      | 0.02750             | 0.02530                |
| 5                       | 0.30                             | 0.03088           | 0.42900                      | 0.03276             | 0.02810                | 0.35900                      | 0.03228             | 0.03730                |
| EMR (%)                 |                                  |                   | 27.07                        | 3.88                | 23.82                  | 12.60                        | 2.29                | 42.88                  |
| $FO_{\text{ótima}}$ (m) |                                  |                   | -1.43                        |                     | -3.23                  | -0.07                        |                     | -5.82                  |

A Tabela 18 compara as diversas situações propostas para a manobra 2, na qual observou-se que:

- Os EMR's apresentaram-se menores quando os fatores de atrito são calculados a partir das rugosidades calibradas (3.80% com elitismo e 1.35% sem elitismo) do que quando calibrado diretamente pelo MTI-AG (19.38% com elitismo e 33.42% sem elitismo).
- Analisando isoladamente o cálculo do fator de atrito equivalente para as duas situações: com elitismo e sem elitismo, verificou-se EMR menor para a segunda situação, considerando o índice de Acerto (IMA) de 98.65% em relação aos valores adotados inicialmente.

Tabela 18 - Análise da conveniência entre  $f_{\text{equivalente}}$  e  $f_{\text{calibrado}}$  para a manobra 2 da rede A

| Trecho                  | $\epsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 2                    |                     |                        |                              |                     |                        |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|
|                         |                                  |                   | Com elitismo                 |                     |                        | Sem elitismo                 |                     |                        |
|                         |                                  |                   | $\epsilon_{\text{est}}$ (mm) | $f_{\text{equiv.}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $\epsilon_{\text{est}}$ (mm) | $f_{\text{equiv.}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| 1                       | 0.30                             | 0.01957           | 0.35300                      | 0.02018             | 0.02700                | 0.26800                      | 0.01917             | 0.03220                |
| 2                       | 0.30                             | 0.02668           | 0.29600                      | 0.02658             | 0.02970                | 0.30700                      | 0.02684             | 0.03390                |
| 3                       | 0.30                             | 0.02594           | 0.44100                      | 0.02685             | 0.03440                | 0.31500                      | 0.02601             | 0.03800                |
| 4                       | 0.30                             | 0.02660           | 0.36400                      | 0.02804             | 0.02850                | 0.32200                      | 0.02712             | 0.02460                |
| 5                       | 0.30                             | 0.03088           | 0.42900                      | 0.03292             | 0.03330                | 0.35000                      | 0.03148             | 0.03750                |
| EMR (%)                 |                                  |                   | 26.07                        | 3.80                | 19.38                  | 8.40                         | 1.35                | 33.42                  |
| $FO_{\text{ótima}}$ (m) |                                  |                   | -0.63                        |                     | -9.03                  | -0.04                        |                     | -4.91                  |

Analisando a conveniência para as duas manobras percebe-se que os resultados são sensivelmente melhores tanto para a calibração do fator de atrito direto como para o equivalente na manobra lenta (manobra 2).

## 4.2 Rede B

### 4.2.1 Cálculo das condições iniciais de vazão e carga hidráulica nos tubos e nós

As condições iniciais de vazão e pressão para regime permanente da rede são encontradas com o auxílio de programa produzido por Araújo (2003) a partir dos valores adotados das rugosidades apresentados na Tabela 7 e dos valores de fatores de atrito na Tabela 10 do capítulo 03.

As Tabelas 19 e 20 apresentam os resultados obtidos para vazão e carga hidráulica.

Tabela 19 - Vazões iniciais no regime permanente dos trechos da Rede B

| Trecho | $\varepsilon_{\text{real}}$ (mm) | $Q_{\text{inicial}}$ (L/s) |
|--------|----------------------------------|----------------------------|
| 1      | 0.3000                           | 22.79                      |
| 2      | 0.3000                           | 23.21                      |
| 3      | 0.3000                           | 7.60                       |
| 4      | 0.3000                           | 1.28                       |
| 5      | 0.3000                           | 29.10                      |
| 6      | 0.3000                           | 28.90                      |
| 7      | 0.3000                           | 2.89                       |
| 8      | 0.3000                           | 2.89                       |
| 9      | 0.3000                           | 10.56                      |
| 10     | 0.3000                           | 1.45                       |
| 11     | 0.3000                           | 14.17                      |

Tabela 20 - Cargas hidráulicas no regime permanente nos nós da Rede B na calibração da rugosidade e fator de atrito

| Nó | HO(m)      |                 |
|----|------------|-----------------|
|    | Rugosidade | Fator de atrito |
| 1  | 30.0000    | 30.0000         |
| 2  | 29.6952    | 29.6951         |
| 3  | 29.7774    | 29.7773         |
| 4  | 29.3508    | 29.3509         |
| 5  | 29.6906    | 29.6905         |
| 6  | 29.7043    | 29.7042         |
| 7  | 29.7612    | 29.7612         |

Considerando as condições calculadas de vazão e pressão encontram-se, através da fórmula de Swamee, os fatores de atrito equivalentes às rugosidades adotadas na Tabela 7.

#### 4.2.2 Monitoramento do evento transiente para a rugosidade e fator de atrito

A simulação do evento transiente, considerando as duas manobras apresentadas, possibilita no espaço de tempo de observação de 0.1s o monitoramento de 800 cargas sintéticas nos nós escolhidos 04 e 07. O tipo da manobra influenciou na geração das cargas transientes conforme os gráficos 12, 13, 14 e 15.

Gráfico 12 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 04 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação da rugosidade - Rede B

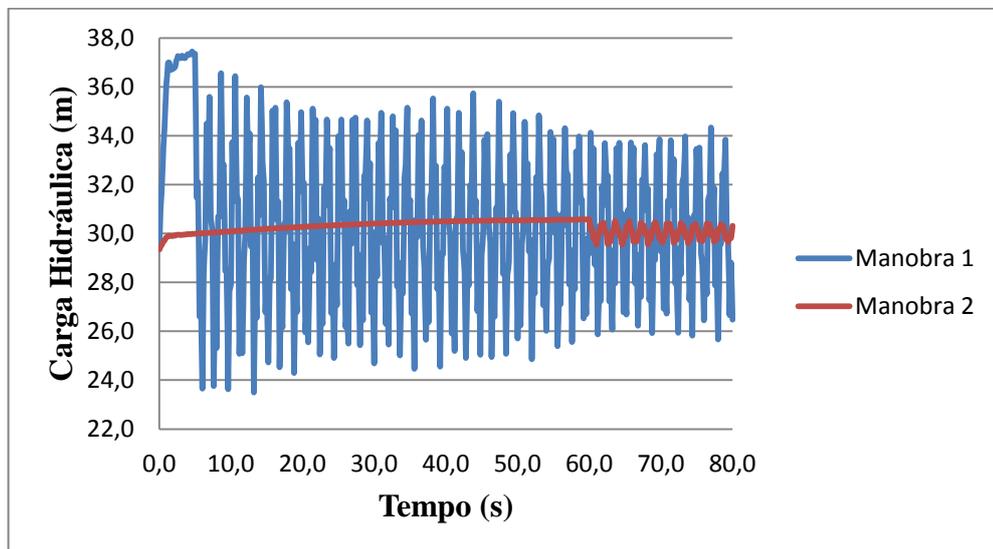


Gráfico 13 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 07 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação da rugosidade - Rede B

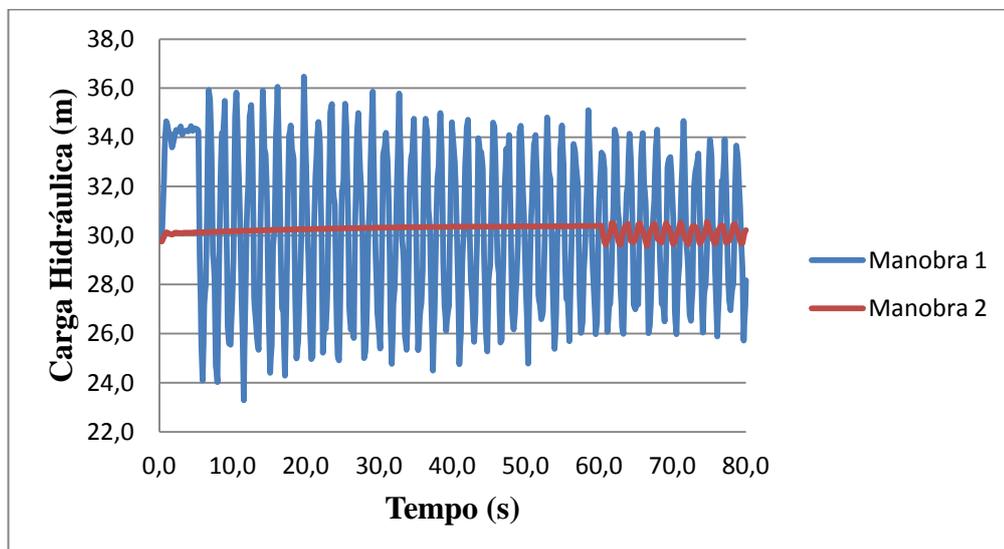


Gráfico 14 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 04 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação do fator de atrito - Rede B

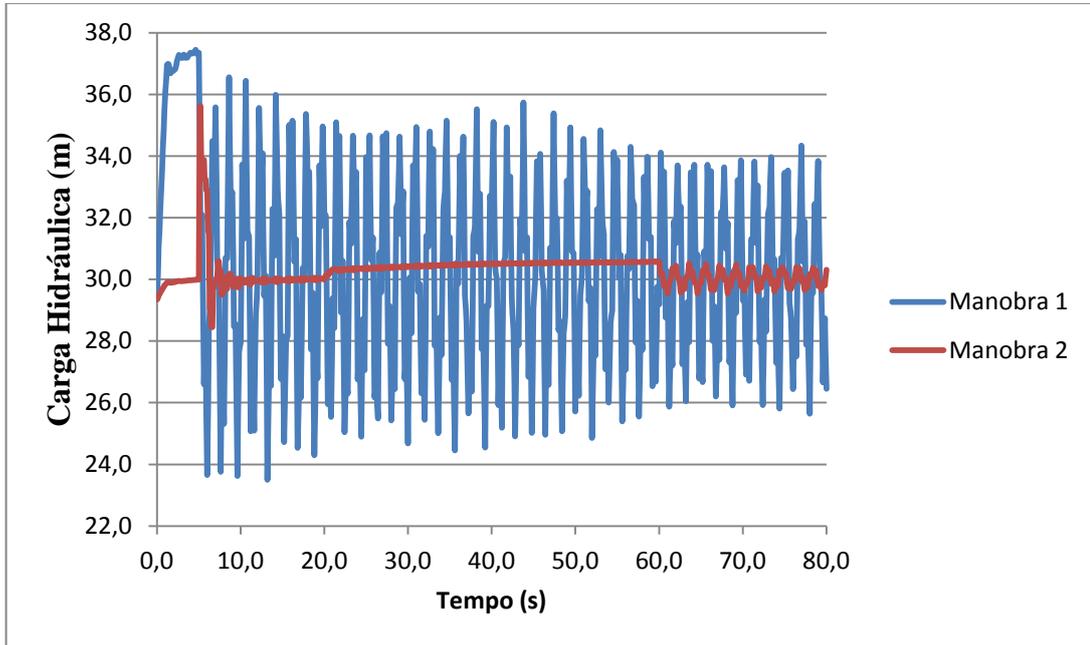
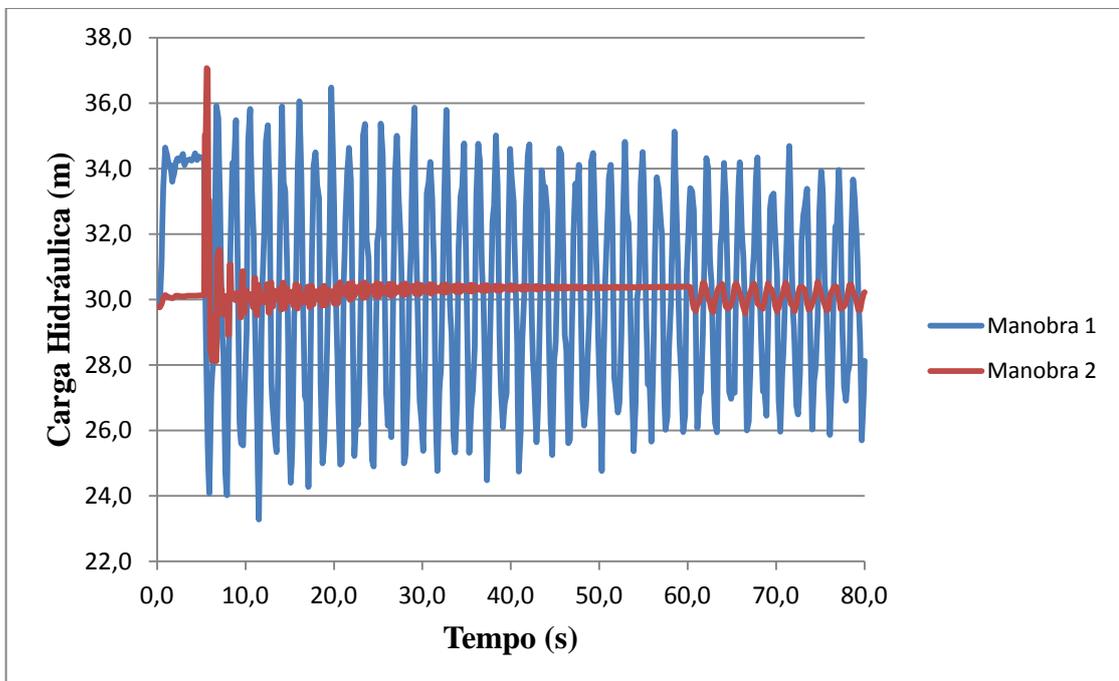


Gráfico 15 - Cargas hidráulicas transientes "simuladas" no nó 07 para as manobras 01 e 02, referentes à identificação do fator de atrito - Rede B



### 4.2.3 Calibração da rugosidade real via MTI-AG

A calibração da rugosidade feita pelo programa proposto por Araújo (2003) nos permite analisar através do EMR(%) quão diferentes estão os valores reais adotados inicialmente dos valores calibrados.

As Tabela 21 e 22 apresentam os valores de rugosidades absoluta encontradas considerando as manobras brusca (01) e suave (02); os tipos de seleção adotados no algoritmo genético: com elitismo e sem elitismo; e o número de nós monitorados da rede. Observa-se que o número de nós monitorados influencia muito pouco na calibração desse parâmetro. No entanto, o tipo de seleção do AG, proporciona tendências diferentes para as manobras apresentando melhores resultados para a manobra 01 com elitismo e para a manobra 2 sem elitismo:

- manobra 1: 01 nó monitorado - 13.13% (com elitismo) e 20.63% (sem elitismo);
- manobra 1: 02 nós monitorados - 13.61% (com elitismo) e 21.45% (sem elitismo);
- manobra 2: 01 nó monitorado - 17.10% (com elitismo) e 18.66% (sem elitismo);
- manobra 2: 02 nós monitorados - 16.38% (com elitismo) e 7.11% (sem elitismo);

Tabela 21 - Calibração da rugosidade via MTI-AG para a manobra 1 da rede B

| Trecho  | $\varepsilon_{\text{real}}$ (mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 1          |                    |                    |                    |
|---------|----------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|         |                                  |                   | 01 nó monitorado   |                    | 02 nós monitorados |                    |
|         |                                  |                   | Com elitismo       | Sem elitismo       | Com elitismo       | Sem elitismo       |
|         |                                  |                   | $\varepsilon$ (mm) | $\varepsilon$ (mm) | $\varepsilon$ (mm) | $\varepsilon$ (mm) |
| 1       | 0.3000                           | 0.02273           | 0.3330             | 0.3590             | 0.3330             | 0.3450             |
| 2       | 0.3000                           | 0.02270           | 0.2740             | 0.2890             | 0.2750             | 0.2920             |
| 3       | 0.3000                           | 0.02563           | 0.3035             | 0.3260             | 0.2805             | 0.3870             |
| 4       | 0.3000                           | 0.03503           | 0.3700             | 0.2070             | 0.3450             | 0.2510             |
| 5       | 0.3000                           | 0.02233           | 0.3040             | 0.3190             | 0.2880             | 0.3830             |
| 6       | 0.3000                           | 0.02234           | 0.2890             | 0.2750             | 0.2830             | 0.2630             |
| 7       | 0.3000                           | 0.02958           | 0.4100             | 0.4890             | 0.4100             | 0.4520             |
| 8       | 0.3000                           | 0.02918           | 0.3120             | 0.1657             | 0.2950             | 0.1787             |
| 9       | 0.3000                           | 0.02452           | 0.3520             | 0.3740             | 0.3440             | 0.3530             |
| 10      | 0.3000                           | 0.03281           | 0.2822             | 0.3070             | 0.2695             | 0.3230             |
| 11      | 0.3000                           | 0.02372           | 0.3940             | 0.2565             | 0.4080             | 0.2505             |
| EMR (%) |                                  |                   | 13.13              | 20.63              | 13.61              | 21.45              |

Os gráficos 16 e 17 comparam melhor os valores das rugosidades calibradas para a manobra 1. Para a manobra 1 os valores de rugosidades com elitismo apresentaram dispersão menor em relação aos valores adotados.

Gráfico 16 - Rugosidades calibradas para a manobra 1 com elitismo na rede B

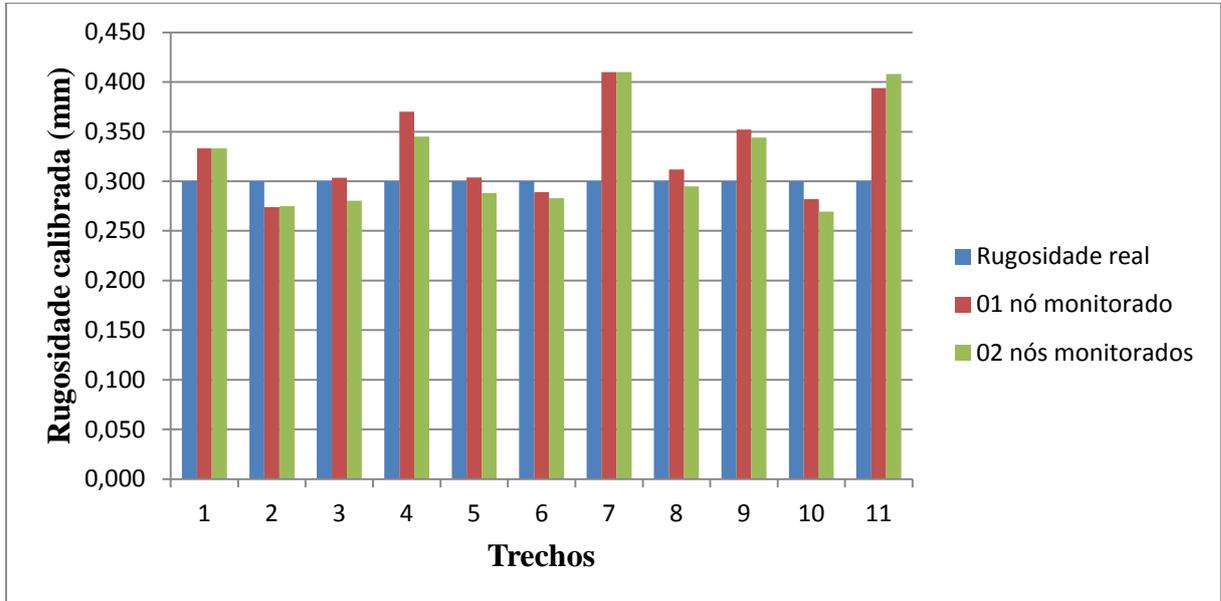
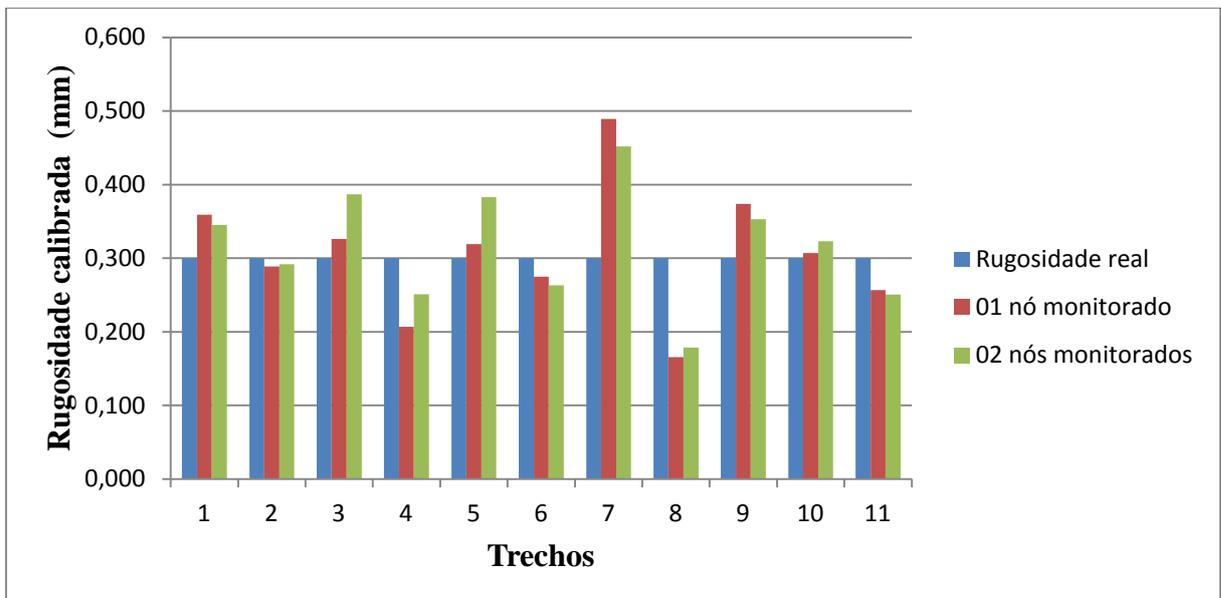


Gráfico 17 - Rugosidades calibradas para a manobra 1 sem elitismo na rede B



Para a manobra 2 os valores de rugosidades sem elitismo apresentaram dispersão menor em relação aos valores adotados.

Tabela 22 - Calibração da rugosidade via MTI-AG para a manobra 2 da rede B

| Trecho  | $\epsilon_{\text{real}}$ (mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 2        |                 |                    |                 |
|---------|-------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
|         |                               |                   | 01 nó monitorado |                 | 02 nós monitorados |                 |
|         |                               |                   | Com elitismo     | Sem elitismo    | Com elitismo       | Sem elitismo    |
|         |                               |                   | $\epsilon$ (mm)  | $\epsilon$ (mm) | $\epsilon$ (mm)    | $\epsilon$ (mm) |
| 1       | 0.3000                        | 0.02273           | 0.3560           | 0.2580          | 0.3580             | 0.3130          |
| 2       | 0.3000                        | 0.02270           | 0.2810           | 0.3380          | 0.2790             | 0.3070          |
| 3       | 0.3000                        | 0.02563           | 0.3270           | 0.3255          | 0.2870             | 0.2810          |
| 4       | 0.3000                        | 0.03503           | 0.3450           | 0.3890          | 0.3740             | 0.3800          |
| 5       | 0.3000                        | 0.02233           | 0.3330           | 0.3340          | 0.4040             | 0.3350          |
| 6       | 0.3000                        | 0.02234           | 0.2740           | 0.2980          | 0.2350             | 0.2950          |
| 7       | 0.3000                        | 0.02958           | 0.4090           | 0.5170          | 0.3520             | 0.3390          |
| 8       | 0.3000                        | 0.02918           | 0.3510           | 0.3980          | 0.3570             | 0.3060          |
| 9       | 0.3000                        | 0.02452           | 0.3700           | 0.2600          | 0.3470             | 0.2970          |
| 10      | 0.3000                        | 0.03281           | 0.3522           | 0.2805          | 0.2583             | 0.3150          |
| 11      | 0.3000                        | 0.02372           | 0.3760           | 0.2825          | 0.3080             | 0.2875          |
| EMR (%) |                               |                   | 17.10            | 18.86           | 16.38              | 7.11            |

Os gráficos 18 e 19 comparam melhor os valores das rugosidades calibradas para a manobra 2.

Gráfico 18 - Rugosidades calibradas para a manobra 2 com elitismo na rede B

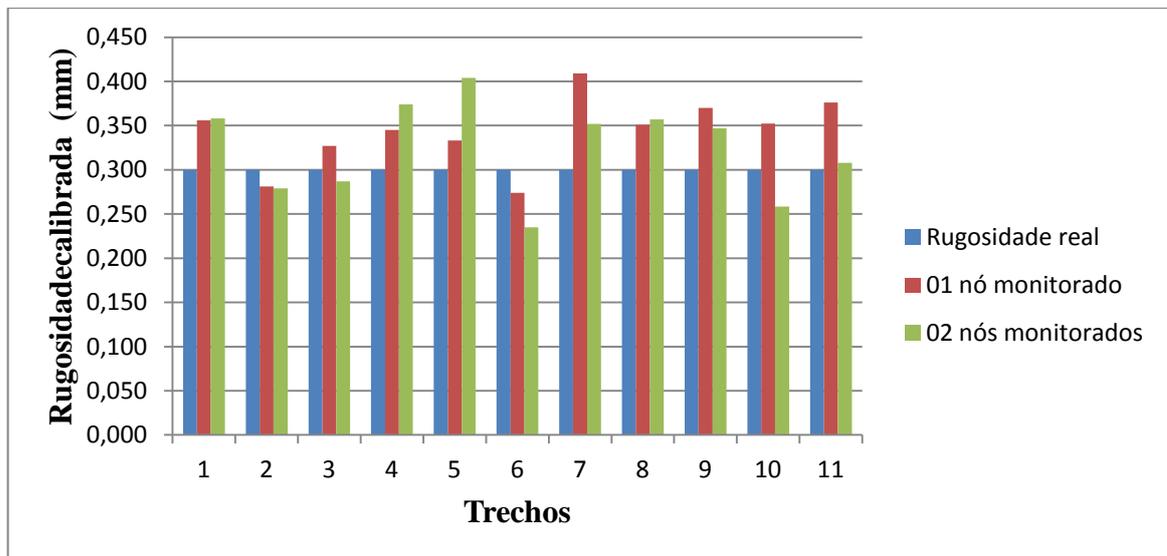
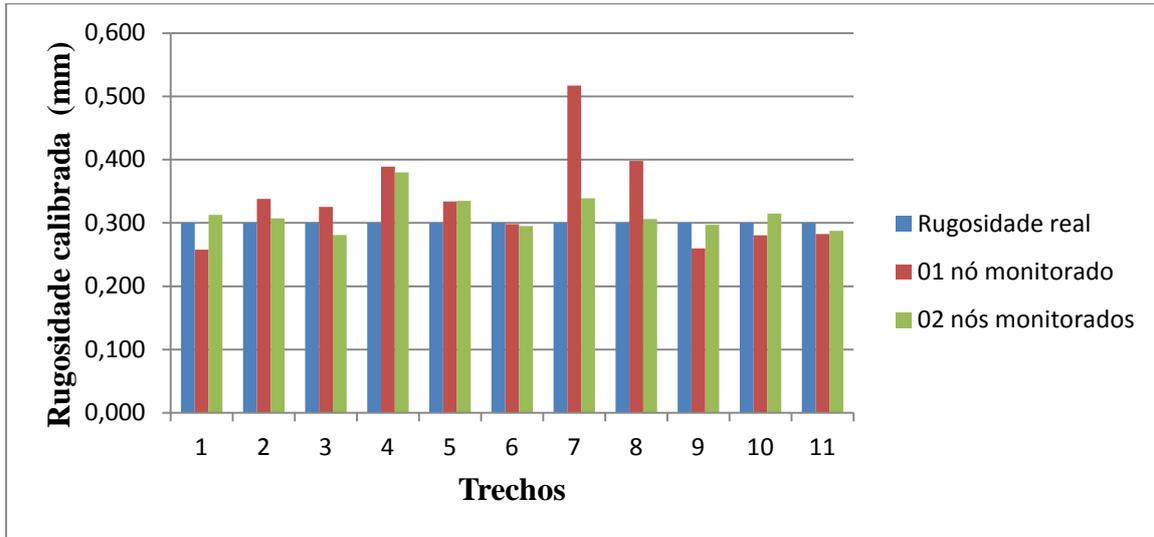


Gráfico 19 - Rugosidades calibradas para a manobra 2 sem elitismo na rede B



#### 4.2.4 Calculo das novas condições do sistema diante os novos valores encontrados de rugosidade na calibração

A partir da calibração das rugosidades para situações diversas calculou-se novas condições permanentes adotando as rugosidades calibradas como as rugosidades reais dos problemas, ver Tabela 23 e 24.

Tabela 23 - Valores de vazão para as novas condições permanentes para a Manobra 1 da rede B

| Trecho | $\epsilon_{\text{real}}$ (mm) | Manobra 1        |             |                 |             |                    |             |                 |             |
|--------|-------------------------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|--------------------|-------------|-----------------|-------------|
|        |                               | 01 nó monitorado |             |                 |             | 02 nós monitorados |             |                 |             |
|        |                               | Com elitismo     |             | Sem elitismo    |             | Com elitismo       |             | Sem elitismo    |             |
|        |                               | $\epsilon$ (mm)  | vazão (L/s) | $\epsilon$ (mm) | vazão (L/s) | $\epsilon$ (mm)    | vazão (L/s) | $\epsilon$ (mm) | vazão (L/s) |
| 1      | 0.30                          | 0.3330           | 22.644      | 0.3590          | 22.553      | 0.3330             | 22.646      | 0.3450          | 22.596      |
| 2      | 0.30                          | 0.2740           | 23.356      | 0.2890          | 23.447      | 0.2750             | 23.355      | 0.2920          | 23.404      |
| 3      | 0.30                          | 0.3035           | 7.729       | 0.3260          | 7.596       | 0.2805             | 7.773       | 0.3870          | 7.448       |
| 4      | 0.30                          | 0.3700           | 1.335       | 0.2070          | 1.260       | 0.3450             | 1.334       | 0.2510          | 1.458       |
| 5      | 0.30                          | 0.3040           | 29.038      | 0.3190          | 28.888      | 0.2880             | 29.085      | 0.3830          | 28.587      |
| 6      | 0.30                          | 0.2890           | 28.962      | 0.2750          | 29.112      | 0.2830             | 28.915      | 0.2630          | 29.414      |
| 7      | 0.30                          | 0.4100           | 2.915       | 0.4890          | 2.976       | 0.4100             | 2.920       | 0.4520          | 2.968       |
| 8      | 0.30                          | 0.3120           | 2.915       | 0.1657          | 2.976       | 0.2950             | 2.920       | 0.1787          | 2.968       |
| 9      | 0.30                          | 0.3520           | 10.596      | 0.3740          | 10.460      | 0.3440             | 10.599      | 0.3530          | 10.499      |
| 10     | 0.30                          | 0.2822           | 1.511       | 0.3070          | 1.436       | 0.2695             | 1.520       | 0.3230          | 1.466       |
| 11     | 0.30                          | 0.3940           | 14.116      | 0.2565          | 14.415      | 0.4080             | 14.062      | 0.2505          | 14.489      |

Tabela 24 - Valores de vazão para as novas condições permanentes para a Manobra 2 na rede B

| Trecho | $\epsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | Manobra 2        |                |                 |                |                    |                |                 |                |
|--------|----------------------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------|
|        |                                  | 01 nó monitorado |                |                 |                | 02 nós monitorados |                |                 |                |
|        |                                  | Com elitismo     |                | Sem elitismo    |                | Com elitismo       |                | Sem elitismo    |                |
|        |                                  | $\epsilon$ (mm)  | vazão<br>(L/s) | $\epsilon$ (mm) | vazão<br>(L/s) | $\epsilon$ (mm)    | vazão<br>(L/s) | $\epsilon$ (mm) | vazão<br>(L/s) |
| 1      | 0.30                             | 0.3560           | 22.583         | 0.2580          | 23.017         | 0.3580             | 22.498         | 0.3130          | 22.738         |
| 2      | 0.30                             | 0.2810           | 23.417         | 0.3380          | 22.983         | 0.2790             | 23.502         | 0.3070          | 23.262         |
| 3      | 0.30                             | 0.3270           | 7.687          | 0.3255          | 7.422          | 0.2870             | 7.612          | 0.2810          | 7.595          |
| 4      | 0.30                             | 0.3450           | 1.423          | 0.3890          | 1.473          | 0.3740             | 1.707          | 0.3800          | 1.397          |
| 5      | 0.30                             | 0.3330           | 28.847         | 0.3340          | 28.966         | 0.4040             | 28.403         | 0.3350          | 28.936         |
| 6      | 0.30                             | 0.2740           | 29.153         | 0.2980          | 29.034         | 0.2350             | 29.597         | 0.2950          | 29.064         |
| 7      | 0.30                             | 0.4090           | 2.905          | 0.5170          | 2.804          | 0.3520             | 2.896          | 0.3390          | 2.879          |
| 8      | 0.30                             | 0.3510           | 2.905          | 0.3980          | 2.804          | 0.3570             | 2.895          | 0.3060          | 2.879          |
| 9      | 0.30                             | 0.3700           | 10.594         | 0.2600          | 10.621         | 0.3470             | 10.606         | 0.2970          | 10.567         |
| 10     | 0.30                             | 0.3522           | 1.499          | 0.2805          | 1.424          | 0.2583             | 1.501          | 0.3150          | 1.446          |
| 11     | 0.30                             | 0.3760           | 14.231         | 0.2825          | 14.137         | 0.3080             | 14.389         | 0.2875          | 14.221         |

#### 4.2.5 Cálculo dos fatores de atrito equivalentes pela fórmula de Swamee

O cálculo dos fatores de atrito equivalentes através da fórmula de Swamee é possível após a calibração de rugosidades para as situações apresentadas e de suas respectivas condições permanentes de vazão, conforme Tabelas 25 e 26 e gráficos 20, 21, 22 e 23 apresentados.

Nos resultados da manobra 1 verificou-se pouca influência do número de nós monitorado, encontrando erro de 1.55% para 01 nó monitorado com elitismo e 1.76% para 02 nós monitorados com elitismo; e 2.57% para 01 nó monitorado sem elitismo e 3.21 % para 02 nós monitorados sem elitismo. Os valores apesar de estarem na mesma ordem de grandeza apresentam valores melhores para 01 nó monitorado.

Para a manobra 2 verificou-se influência significativa do número de nós monitorados, encontrando erro de 5.14% para 01 nó monitorado com elitismo e 2.64% para 02 nós monitorados com elitismo; e 2.25% para 01 nó monitorado sem elitismo e 0.71 % para 02 nós monitorados sem elitismo. O melhor resultado pode ser encontrado para o fator de atrito equivalente das rugosidades calibrada com 02 nós monitorados sem elitismo.

Tabela 25 - Cálculo dos fatores de atrito equivalentes para a Manobra 1 da rede B

| Trecho  | $\varepsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 1          |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
|---------|-------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|         |                                     |                   | 01 nó monitorado   |                     |                    |                     | 02 nós monitorados |                     |                    |                     |
|         |                                     |                   | Com elitismo       |                     | Sem elitismo       |                     | Com elitismo       |                     | Sem elitismo       |                     |
|         |                                     |                   | $\varepsilon$ (mm) | $f_{\text{equiv.}}$ |
| 1       | 0.30                                | 0.0227            | 0.3330             | 0.0232              | 0.3590             | 0.0235              | 0.3330             | 0.0232              | 0.3450             | 0.0233              |
| 2       | 0.30                                | 0.0227            | 0.2740             | 0.0223              | 0.2890             | 0.0225              | 0.2750             | 0.0223              | 0.2920             | 0.0226              |
| 3       | 0.30                                | 0.0256            | 0.3035             | 0.0256              | 0.3260             | 0.0260              | 0.2805             | 0.0253              | 0.3870             | 0.0268              |
| 4       | 0.30                                | 0.0350            | 0.3700             | 0.0352              | 0.2070             | 0.0345              | 0.3450             | 0.0350              | 0.2510             | 0.0336              |
| 5       | 0.30                                | 0.0223            | 0.3040             | 0.0224              | 0.3190             | 0.0226              | 0.2880             | 0.0222              | 0.3830             | 0.0234              |
| 6       | 0.30                                | 0.0223            | 0.2890             | 0.0222              | 0.2750             | 0.0220              | 0.2830             | 0.0221              | 0.2630             | 0.0218              |
| 7       | 0.30                                | 0.0296            | 0.4100             | 0.0306              | 0.4890             | 0.0312              | 0.4100             | 0.0305              | 0.4520             | 0.0308              |
| 8       | 0.30                                | 0.0292            | 0.3120             | 0.0293              | 0.1657             | 0.0271              | 0.2950             | 0.0291              | 0.1787             | 0.0274              |
| 9       | 0.30                                | 0.0245            | 0.3520             | 0.0251              | 0.3740             | 0.0253              | 0.3440             | 0.0250              | 0.3530             | 0.0251              |
| 10      | 0.30                                | 0.0328            | 0.2822             | 0.0323              | 0.3070             | 0.0329              | 0.2695             | 0.0322              | 0.3230             | 0.0330              |
| 11      | 0.30                                | 0.0237            | 0.3940             | 0.0248              | 0.2565             | 0.0231              | 0.4080             | 0.0250              | 0.2505             | 0.0230              |
| EMR (%) |                                     |                   |                    | 1.55                |                    | 2.57                |                    | 1.76                |                    | 3.21                |

Gráfico 20 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 1 com elitismo da rede B

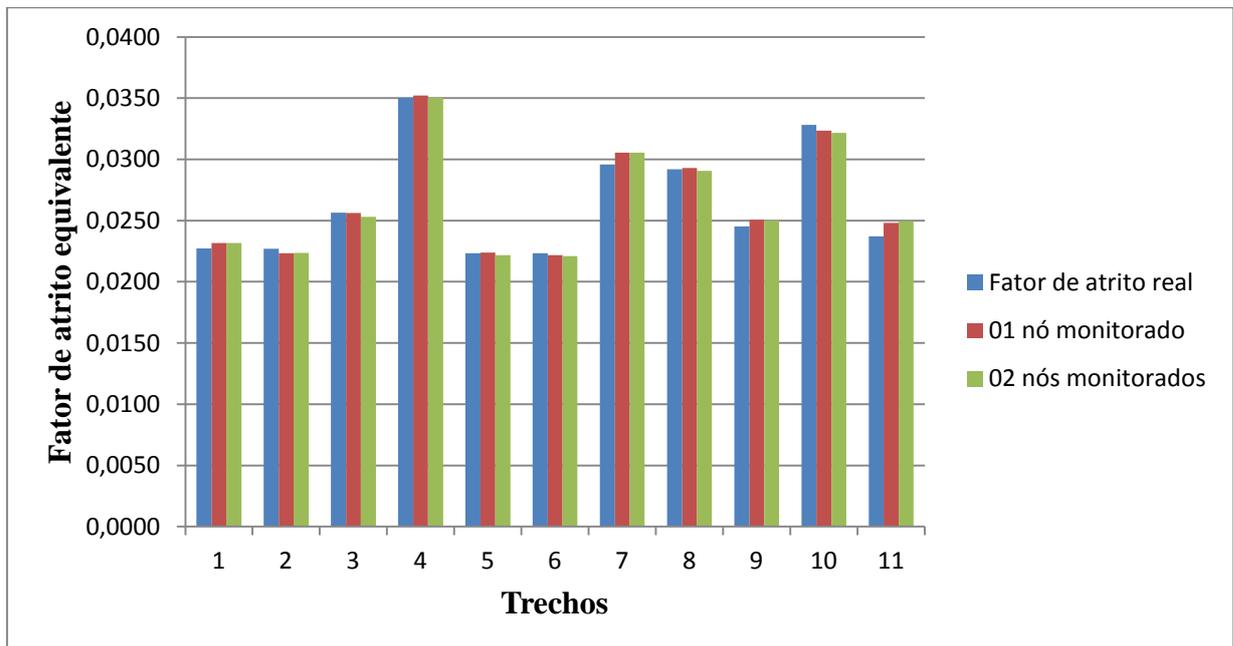


Gráfico 21 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 1 sem elitismo da rede B

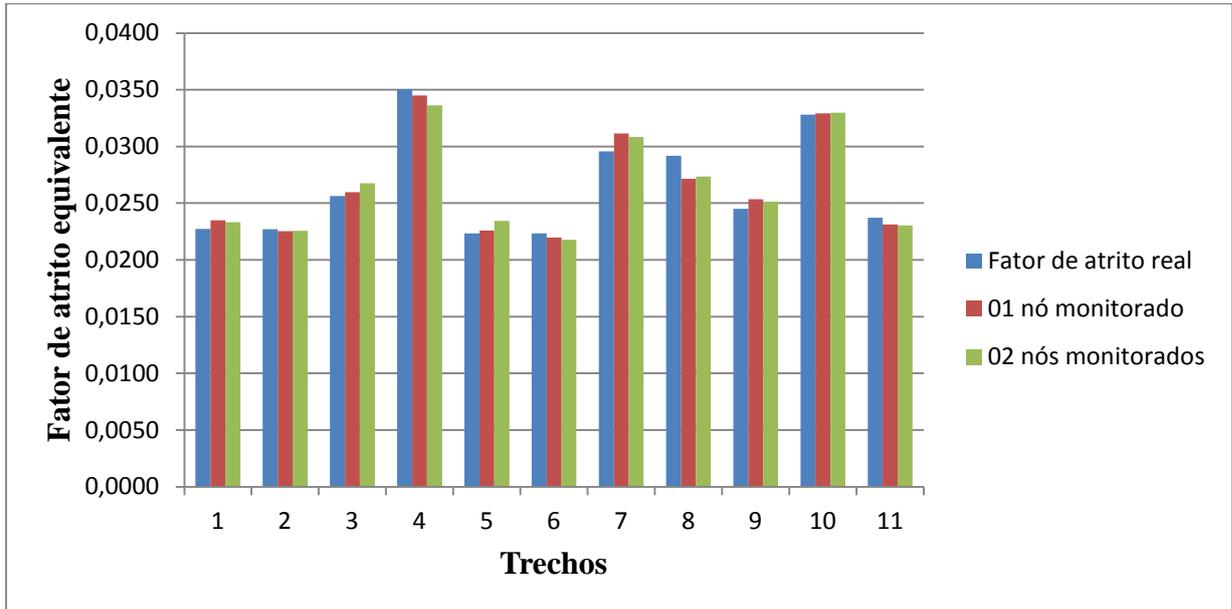


Tabela 26 - Cálculo dos fatores de atrito equivalentes para a Manobra 2 da rede B

| Trecho  | $\varepsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 2          |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
|---------|-------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|         |                                     |                   | 01 nó monitorado   |                     |                    |                     | 02 nós monitorados |                     |                    |                     |
|         |                                     |                   | Com elitismo       |                     | Sem elitismo       |                     | Com elitismo       |                     | Sem elitismo       |                     |
|         |                                     |                   | $\varepsilon$ (mm) | $f_{\text{equiv.}}$ |
| 1       | 0.30                                | 0.0227            | 0.3560             | 0.0231              | 0.2580             | 0.0221              | 0.3580             | 0.0235              | 0.3130             | 0.0229              |
| 2       | 0.30                                | 0.0227            | 0.2810             | 0.0233              | 0.3380             | 0.0232              | 0.2790             | 0.0224              | 0.3070             | 0.0228              |
| 3       | 0.30                                | 0.0256            | 0.3270             | 0.0260              | 0.3255             | 0.0260              | 0.2870             | 0.0255              | 0.2810             | 0.0254              |
| 4       | 0.30                                | 0.0350            | 0.3450             | 0.0340              | 0.3890             | 0.0346              | 0.3740             | 0.0334              | 0.3800             | 0.0349              |
| 5       | 0.30                                | 0.0223            | 0.3330             | 0.0238              | 0.3340             | 0.0228              | 0.4040             | 0.0237              | 0.3350             | 0.0228              |
| 6       | 0.30                                | 0.0223            | 0.2740             | 0.0230              | 0.2980             | 0.0223              | 0.2350             | 0.0214              | 0.2950             | 0.0223              |
| 7       | 0.30                                | 0.0296            | 0.4090             | 0.0302              | 0.5170             | 0.0317              | 0.3520             | 0.0301              | 0.3390             | 0.0300              |
| 8       | 0.30                                | 0.0292            | 0.3510             | 0.0298              | 0.3980             | 0.0305              | 0.3570             | 0.0299              | 0.3060             | 0.0293              |
| 9       | 0.30                                | 0.0245            | 0.3700             | 0.0253              | 0.2600             | 0.0240              | 0.3470             | 0.0250              | 0.2970             | 0.0245              |
| 10      | 0.30                                | 0.0328            | 0.3522             | 0.0290              | 0.2805             | 0.0327              | 0.2583             | 0.0321              | 0.3150             | 0.0330              |
| 11      | 0.30                                | 0.0237            | 0.3760             | 0.0191              | 0.2825             | 0.0235              | 0.3080             | 0.0238              | 0.2875             | 0.0236              |
| EMR (%) |                                     |                   |                    | 5.14                |                    | 2.25                |                    | 2.64                |                    | 0.71                |

Gráfico 22 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 2 com elitismo da rede B

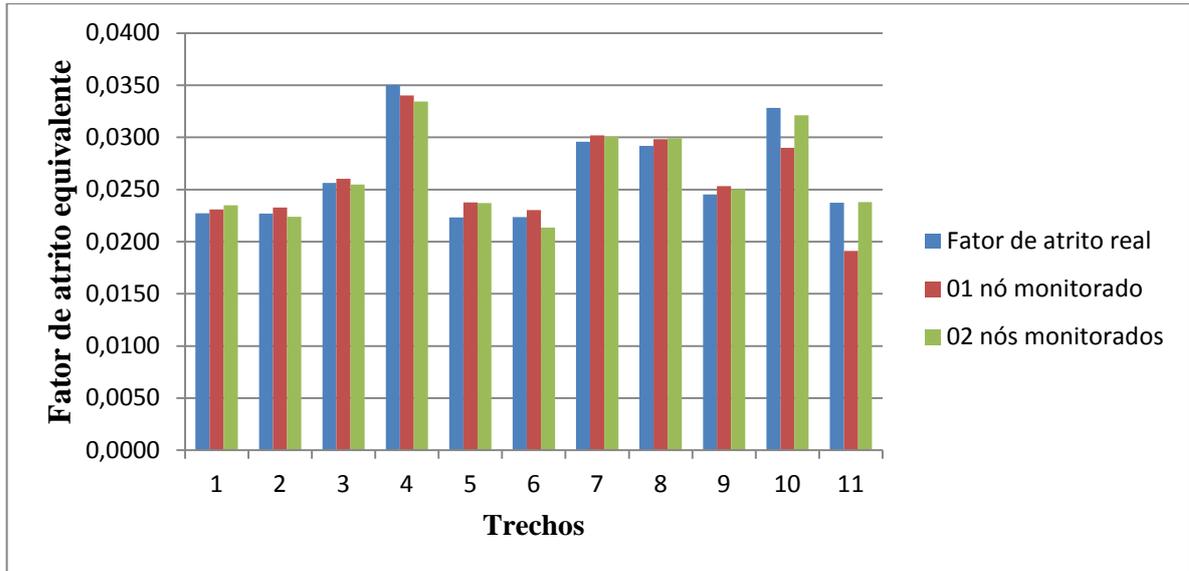
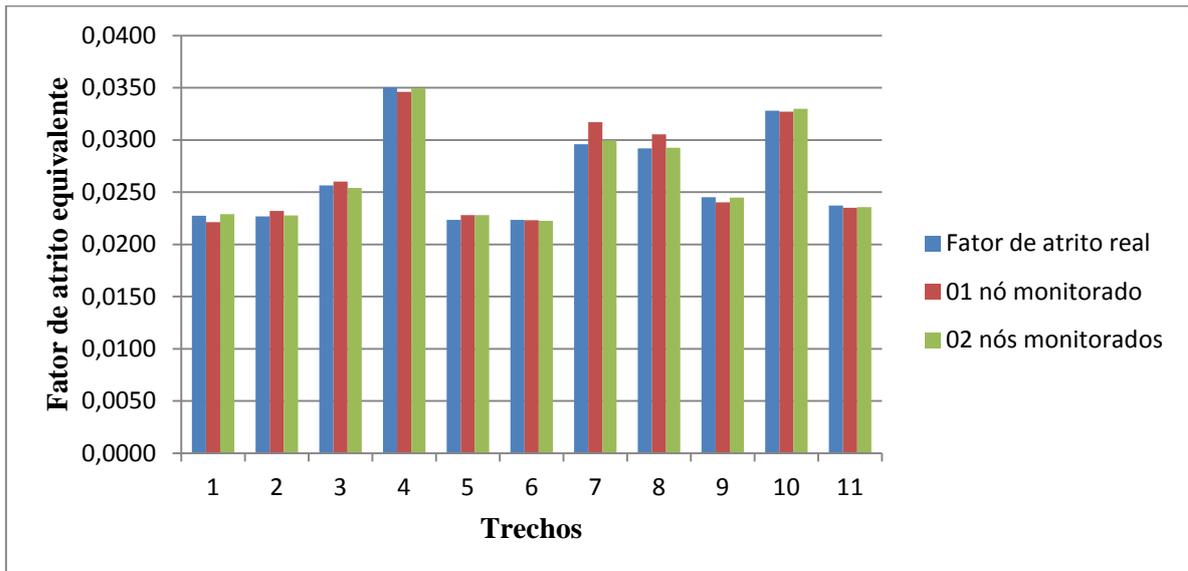


Gráfico 23 - Fatores de atrito equivalentes para a Manobra 2 sem elitismo da rede B



#### 4.2.6 Calibração do parâmetro fator de atrito via MTI e AG

A calibração do fator de atrito se inicia a partir dos dados adotados na Tabela 10 e do cálculo das condições iniciais e das cargas transientes geradas pelas manobras conforme gráfico 14 e 15.

Os resultados apresentam que na calibração da manobra 1 a quantidade de número de nós monitorados não influenciam de forma significativa variando o erro médio de 13.37% para 01 nó monitorado com elitismo e 15.38% para dois nós monitorados com elitismo; e

22.01% para 01 nó monitorado sem elitismo e 20.15% para 02 nós monitorados sem elitismo. Os valores encontrados para as situações propostas são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Fatores de atrito calibrados via MTI-AG para a manobra 1 da rede B

| Trecho  | $\varepsilon_{\text{real}}$ (mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 1              |                        |                        |                        |
|---------|----------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|         |                                  |                   | 01 nó monitorado       |                        | 02 nós monitorados     |                        |
|         |                                  |                   | Com elitismo           | Sem elitismo           | Com elitismo           | Sem elitismo           |
|         |                                  |                   | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| 1       | 0.30                             | 0.02273           | 0.0216                 | 0.0222                 | 0.0210                 | 0.0221                 |
| 2       | 0.30                             | 0.02270           | 0.0220                 | 0.0185                 | 0.0216                 | 0.0196                 |
| 3       | 0.30                             | 0.02563           | 0.0344                 | 0.0348                 | 0.0350                 | 0.0356                 |
| 4       | 0.30                             | 0.03503           | 0.0330                 | 0.0307                 | 0.0282                 | 0.0293                 |
| 5       | 0.30                             | 0.02233           | 0.0307                 | 0.0328                 | 0.0311                 | 0.0337                 |
| 6       | 0.30                             | 0.02234           | 0.0236                 | 0.0255                 | 0.0262                 | 0.0240                 |
| 7       | 0.30                             | 0.02958           | 0.0294                 | 0.0282                 | 0.0300                 | 0.0339                 |
| 8       | 0.30                             | 0.02918           | 0.0352                 | 0.0317                 | 0.0300                 | 0.0290                 |
| 9       | 0.30                             | 0.02452           | 0.0219                 | 0.0216                 | 0.0248                 | 0.0218                 |
| 10      | 0.30                             | 0.03281           | 0.0330                 | 0.0416                 | 0.0331                 | 0.0388                 |
| 11      | 0.30                             | 0.02372           | 0.0293                 | 0.0380                 | 0.0327                 | 0.0349                 |
| EMR (%) |                                  |                   | 13.37                  | 22.01                  | 15.38                  | 20.15                  |

Os valores podem ser melhores analisados nos gráficos 24 e 25.

Gráfico 24 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 1 com elitismo da rede B

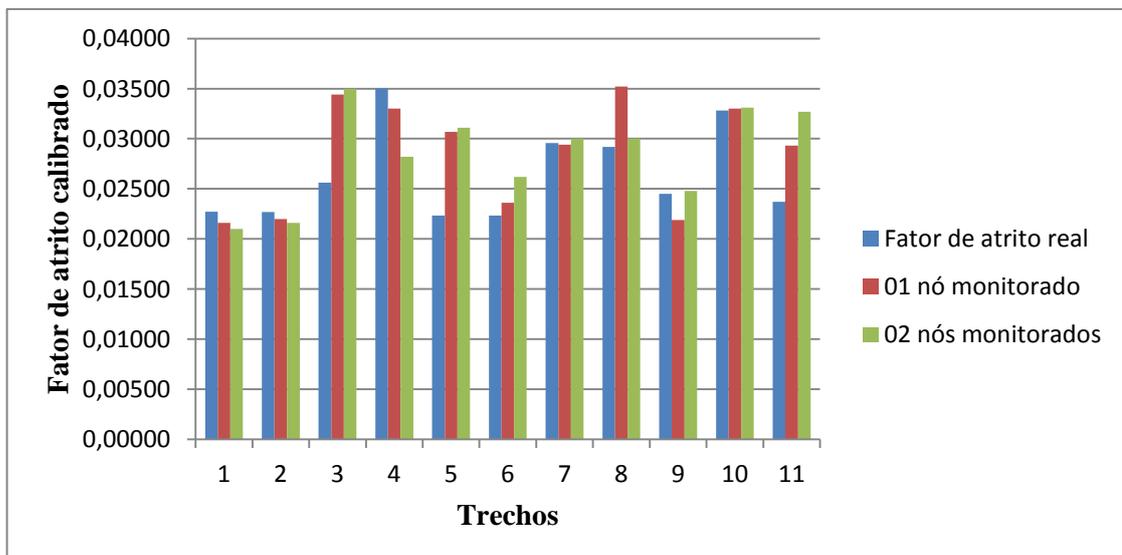
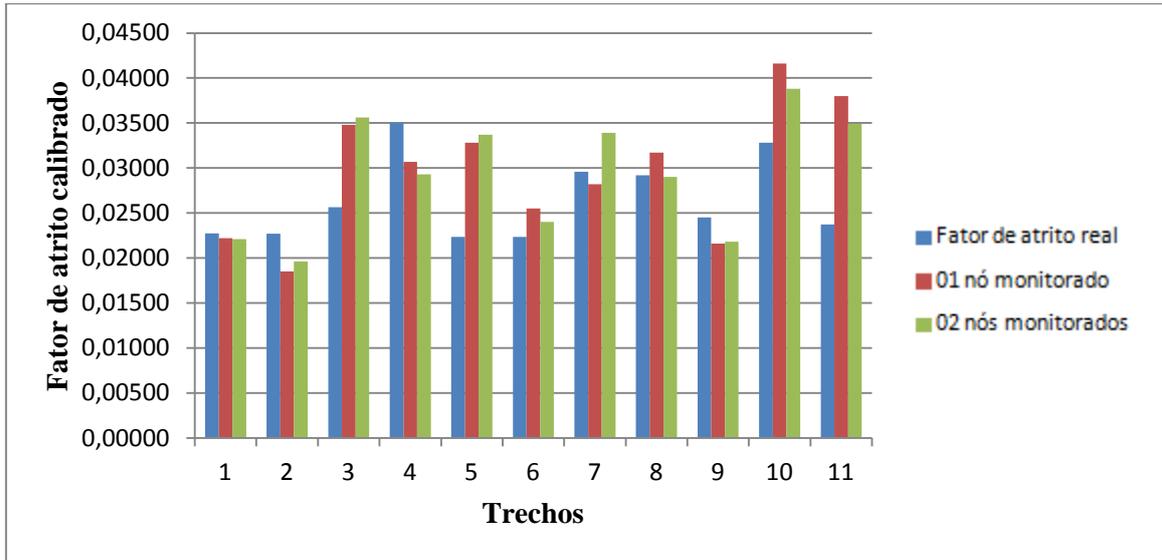


Gráfico 25 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 1 sem elitismo da rede B



Os resultados apresentam que na calibração da manobra 2 a quantidade de número de nós monitorados não influenciam de forma significativa variando o erro médio de 25.0

5% para 01 nó monitorado com elitismo e 21.72% para dois nós monitorados com elitismo; e 14.39% para 01 nó monitorado sem elitismo e 14.41% para 02 nós monitorados sem elitismo. Os valores encontrados para as situações propostas são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Fatores de atrito calibrados via MTI-AG para a manobra 2 da rede B

| Trecho  | $\epsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 2              |                        |                        |                        |
|---------|----------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|         |                                  |                   | 01 nó monitorado       |                        | 02 nós monitorados     |                        |
|         |                                  |                   | Com elitismo           | Sem elitismo           | Com elitismo           | Sem elitismo           |
|         |                                  |                   | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| 1       | 0.30                             | 0.02273           | 0.0206                 | 0.0217                 | 0.0215                 | 0.0209                 |
| 2       | 0.30                             | 0.02270           | 0.0202                 | 0.0223                 | 0.0226                 | 0.0243                 |
| 3       | 0.30                             | 0.02563           | 0.0331                 | 0.0299                 | 0.0291                 | 0.0338                 |
| 4       | 0.30                             | 0.03503           | 0.0397                 | 0.0412                 | 0.0375                 | 0.0436                 |
| 5       | 0.30                             | 0.02233           | 0.0312                 | 0.0259                 | 0.0341                 | 0.0283                 |
| 6       | 0.30                             | 0.02234           | 0.0292                 | 0.0286                 | 0.0236                 | 0.0247                 |
| 7       | 0.30                             | 0.02958           | 0.0461                 | 0.0355                 | 0.0402                 | 0.0346                 |
| 8       | 0.30                             | 0.02918           | 0.0357                 | 0.0287                 | 0.0357                 | 0.0277                 |
| 9       | 0.30                             | 0.02452           | 0.0306                 | 0.0321                 | 0.0309                 | 0.0245                 |
| 10      | 0.30                             | 0.03281           | 0.0359                 | 0.0326                 | 0.0270                 | 0.0379                 |
| 11      | 0.30                             | 0.02372           | 0.0308                 | 0.0286                 | 0.0361                 | 0.0266                 |
| EMR (%) |                                  |                   | 25.05                  | 14.39                  | 21.72                  | 14.41                  |

Os valores podem ser melhores analisados nos gráficos 26 e 27.

Gráfico 26 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 2 com elitismo da rede B

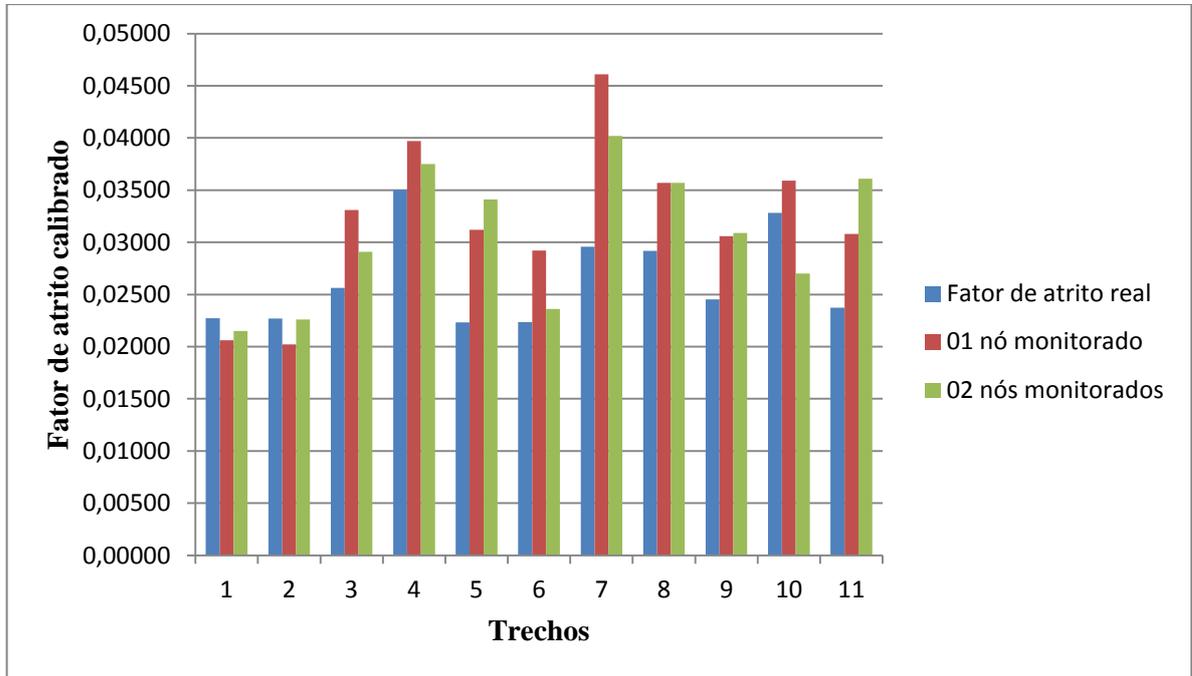
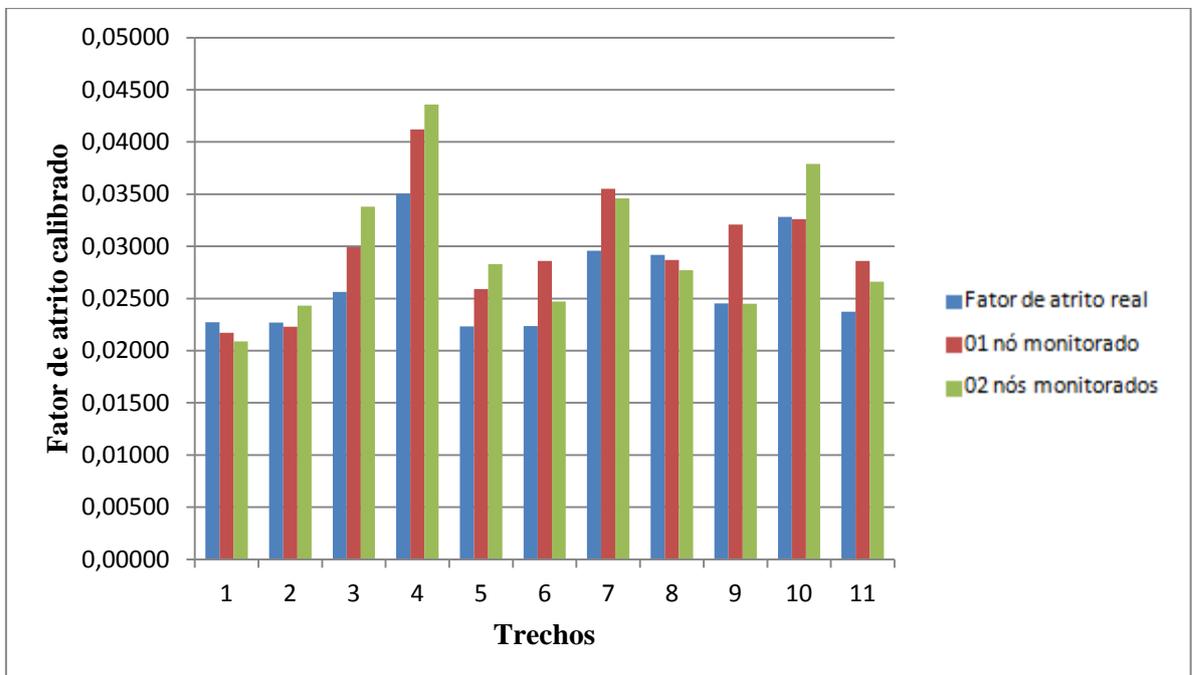


Gráfico 27 - Fatores de atrito calibrados para a Manobra 2 sem elitismo da rede B



#### ***4.2.7 Análise da conveniência dos valores de fatores de atrito calibrados e calculados pela fórmula de Swamee***

As etapas realizadas possibilitaram comparar os valores de fator de atrito calibrados pelo MTI -AG com os valores de fator de atrito calculado diretamente pela fórmula de Swamee através da calibração da rugosidade. Os resultados encontrados apresentaram erros relativos médio menores (ERM) para o cálculo do fator de atrito a partir da rugosidade calibrada do que quando calculados pelo MTI-AG em todas as circunstâncias, assim como Araújo (2003) havia concluído em sua análise. As Tabelas 29 e 30 apresentam os resultados.

A Tabela 29 compara as diversas situações propostas para a manobra 1 na qual observou-se que:

- Os EMR's apresentaram-se menores quando os fatores de atrito são calculados a partir das rugosidades calibradas:

- a) para 01 nó monitorado observou-se 1.55% com elitismo e 2.57% sem elitismo enquanto na calibração do fator de atrito pelo MTI-AG obteve-se 13.37% com elitismo e 22.01% sem elitismo;

- b) para 02 nós monitorados observou-se 1.76% com elitismo e 3.21% sem elitismo enquanto na calibração do fator de atrito pelo MTI-AG obteve-se 15.38% com elitismo e 20.15% sem elitismo.

- Analisando isoladamente o cálculo do fator de atrito equivalente para as quatro situações: com elitismo, sem elitismo, 01 e 02 nós monitorados verificou-se EMR menor para a situação com uso de elitismo e 01 nó monitorado (1.55%) embora a diferença desse valor em relação ao encontrado na situação de uso com elitismo e 02 nós monitorados (1.76%) seja bem pequena.

- A função objetivo ( $FO_{ótima}$ ) apresentou-se menor quando o fator de atrito foi calibrado com 01 nó monitorado e com elitismo. No entanto os valores apresentaram pequenas diferenças quando comparados da seguinte forma:

- a) Com elitismo: 13.37% para 01 nó monitorado e 15.38% para 02 nós monitorados;

- b) Sem elitismo: 22.01% para 01 nó monitorado e 20.15% para 02 nós monitorados;

Resultando pouca influência da quantidade de nós monitorados quando do uso da manobra brusca (01).

Tabela 29 - Análise da conveniência entre  $f_{\text{equivalente}}$  e  $f_{\text{calibrado}}$  para a manobra 1 na rede B

| Trecho                  | $\varepsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 1                                |                     |                        |  |                     |                        |  |                     |                        |  |                     |                        |
|-------------------------|-------------------------------------|-------------------|--|---------------------|------------------------|--|---------------------|------------------------|--|---------------------|------------------------|--|---------------------|------------------------|
|                         |                                     |                   | 01 nó monitorado                         |                     |                        |  |                     |                        | 02 nós monitorados                       |                     |                        |  |                     |                        |
|                         |                                     |                   | Com elitismo                             |                     |                        | Sem elitismo                             |                     |                        | Com elitismo                             |                     |                        | Sem elitismo                             |                     |                        |
|                         |                                     |                   | $\varepsilon_{\text{calibrada}}$<br>(mm) | $f_{\text{equiv.}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| 1                       | 0.3                                 | 0.02273           | 0.3330                                   | 0.0232              | 0.0216                 | 0.3590                                   | 0.0235              | 0.0222                 | 0.3330                                   | 0.0232              | 0.0210                 | 0.3450                                   | 0.0233              | 0.0221                 |
| 2                       | 0.3                                 | 0.02270           | 0.2740                                   | 0.0223              | 0.0220                 | 0.2890                                   | 0.0225              | 0.0185                 | 0.2750                                   | 0.0223              | 0.0216                 | 0.2920                                   | 0.0226              | 0.0196                 |
| 3                       | 0.3                                 | 0.02563           | 0.3035                                   | 0.0256              | 0.0344                 | 0.3260                                   | 0.0260              | 0.0348                 | 0.2805                                   | 0.0253              | 0.0350                 | 0.3870                                   | 0.0268              | 0.0356                 |
| 4                       | 0.3                                 | 0.03503           | 0.3700                                   | 0.0352              | 0.0330                 | 0.2070                                   | 0.0345              | 0.0307                 | 0.3450                                   | 0.0350              | 0.0282                 | 0.2510                                   | 0.0336              | 0.0293                 |
| 5                       | 0.3                                 | 0.02233           | 0.3040                                   | 0.0224              | 0.0307                 | 0.3190                                   | 0.0226              | 0.0328                 | 0.2880                                   | 0.0222              | 0.0311                 | 0.3830                                   | 0.0234              | 0.0337                 |
| 6                       | 0.3                                 | 0.02234           | 0.2890                                   | 0.0222              | 0.0236                 | 0.2750                                   | 0.0220              | 0.0255                 | 0.2830                                   | 0.0221              | 0.0262                 | 0.2630                                   | 0.0218              | 0.0240                 |
| 7                       | 0.3                                 | 0.02958           | 0.4100                                   | 0.0306              | 0.0294                 | 0.4890                                   | 0.0312              | 0.0282                 | 0.4100                                   | 0.0305              | 0.0300                 | 0.4520                                   | 0.0308              | 0.0339                 |
| 8                       | 0.3                                 | 0.02918           | 0.3120                                   | 0.0293              | 0.0352                 | 0.1657                                   | 0.0271              | 0.0317                 | 0.2950                                   | 0.0291              | 0.0300                 | 0.1787                                   | 0.0274              | 0.0290                 |
| 9                       | 0.3                                 | 0.02452           | 0.3520                                   | 0.0251              | 0.0219                 | 0.3740                                   | 0.0253              | 0.0216                 | 0.3440                                   | 0.0250              | 0.0248                 | 0.3530                                   | 0.0251              | 0.0218                 |
| 10                      | 0.3                                 | 0.03281           | 0.2822                                   | 0.0323              | 0.0330                 | 0.3070                                   | 0.0329              | 0.0416                 | 0.2695                                   | 0.0322              | 0.0331                 | 0.3230                                   | 0.0330              | 0.0388                 |
| 11                      | 0.3                                 | 0.02372           | 0.3940                                   | 0.0248              | 0.0293                 | 0.2565                                   | 0.0231              | 0.0380                 | 0.4080                                   | 0.0250              | 0.0327                 | 0.2505                                   | 0.0230              | 0.0349                 |
| EMR (%)                 |                                     |                   | 13.13                                    | 1.55                | 13.37                  | 20.63                                    | 2.57                | 22.01                  | 13.61                                    | 1.76                | 15.38                  | 21.45                                    | 3.21                | 20.15                  |
| $FO_{\text{ótima}}$ (m) |                                     |                   | -2.31                                    |                     | -10.23                 | -1.16                                    |                     | -12.23                 | -5.53                                    |                     | -18.43                 | -2.26                                    |                     | -24.08                 |

A Tabela 30 compara as diversas situações propostas para a manobra 2 na qual observou-se que:

- Os EMR's apresentaram-se menores quando os fatores de atrito são calculados a partir das rugosidades calibradas:

a) para 01 nó monitorado observou-se 5.14% com elitismo e 2.25% sem elitismo enquanto na calibração do fator de atrito pelo MTI-AG obteve-se 25.05% com elitismo e 14.39% sem elitismo;

b) para 02 nós monitorados observou-se 2.64% com elitismo e 0.71% sem elitismo enquanto na calibração do fator de atrito pelo MTI-AG obteve-se 21.72% com elitismo e 14.41% sem elitismo.

- Analisando isoladamente o cálculo do fator de atrito equivalente para as quatro situações: com elitismo, sem elitismo, 01 e 02 nós monitorados verificou-se EMR menor para a situação sem uso de elitismo e 02 nós monitorados (0.71%) embora a diferença desse valor em relação ao encontrado na situação de uso com elitismo e 02 nós monitorados (2.64%) seja pequena.

- Na calibração do fator de atrito a função objetivo ( $FO_{ótima}$ ) pareceu convergir em todas as situações,mas apresentou-se mais satisfatória quando foi realizada para 01 nó monitorado com elitismo (-81.06) e sem elitismo (-80.97). No entanto os valores de EMR(%) apresentaram pequenas diferenças quando comparados da seguinte forma:

a) Com elitismo: 25.05%% para 01 nó monitorado e 21.72% para 02 nós monitorados;

b) Sem elitismo: 14.39% para 01 nó monitorado e 14.41% para 02 nós monitorados;

Resultando, mais uma vez, pouca influência da quantidade de nós monitorados, agora também quando do uso da manobra lenta (02).

Tabela 30 - Análise da conveniência entre  $f_{\text{equivalente}}$  e  $f_{\text{calibrado}}$  para a manobra 2 na rede B

| Trecho                 | $\varepsilon_{\text{real}}$<br>(mm) | $f_{\text{real}}$ | Manobra 2                                |                     |                        |  |                     |                        |  |                     |                        |  |                     |                        |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------|--|---------------------|------------------------|--|---------------------|------------------------|--|---------------------|------------------------|--|---------------------|------------------------|
|                        |                                     |                   | 01 nó monitorado                         |                     |                        |  |                     |                        | 02 nós monitorados                       |                     |                        |  |                     |                        |
|                        |                                     |                   | Com elitismo                             |                     |                        | Sem elitismo                             |                     |                        | Com elitismo                             |                     |                        | Sem elitismo                             |                     |                        |
|                        |                                     |                   | $\varepsilon_{\text{calibrada}}$<br>(mm) | $f_{\text{equiv.}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| 1                      | 0.3                                 | 0.02273           | 0.3560                                   | 0.0231              | 0.0206                 | 0.2580                                   | 0.0221              | 0.0217                 | 0.3580                                   | 0.0235              | 0.0215                 | 0.3130                                   | 0.0229              | 0.0209                 |
| 2                      | 0.3                                 | 0.02270           | 0.2810                                   | 0.0233              | 0.0202                 | 0.3380                                   | 0.0232              | 0.0223                 | 0.2790                                   | 0.0224              | 0.0226                 | 0.3070                                   | 0.0228              | 0.0243                 |
| 3                      | 0.3                                 | 0.02563           | 0.3270                                   | 0.0260              | 0.0331                 | 0.3255                                   | 0.0260              | 0.0299                 | 0.2870                                   | 0.0255              | 0.0291                 | 0.2810                                   | 0.0254              | 0.0338                 |
| 4                      | 0.3                                 | 0.03503           | 0.3450                                   | 0.0340              | 0.0397                 | 0.3890                                   | 0.0346              | 0.0412                 | 0.3740                                   | 0.0334              | 0.0375                 | 0.3800                                   | 0.0349              | 0.0436                 |
| 5                      | 0.3                                 | 0.02233           | 0.3330                                   | 0.0238              | 0.0312                 | 0.3340                                   | 0.0228              | 0.0259                 | 0.4040                                   | 0.0237              | 0.0341                 | 0.3350                                   | 0.0228              | 0.0283                 |
| 6                      | 0.3                                 | 0.02234           | 0.2740                                   | 0.0230              | 0.0292                 | 0.2980                                   | 0.0223              | 0.0286                 | 0.2350                                   | 0.0214              | 0.0236                 | 0.2950                                   | 0.0223              | 0.0247                 |
| 7                      | 0.3                                 | 0.02958           | 0.4090                                   | 0.0302              | 0.0461                 | 0.5170                                   | 0.0317              | 0.0355                 | 0.3520                                   | 0.0301              | 0.0402                 | 0.3390                                   | 0.0300              | 0.0346                 |
| 8                      | 0.3                                 | 0.02918           | 0.3510                                   | 0.0298              | 0.0357                 | 0.3980                                   | 0.0305              | 0.0287                 | 0.3570                                   | 0.0299              | 0.0357                 | 0.3060                                   | 0.0293              | 0.0277                 |
| 9                      | 0.3                                 | 0.02452           | 0.3700                                   | 0.0253              | 0.0306                 | 0.2600                                   | 0.0240              | 0.0321                 | 0.3470                                   | 0.0250              | 0.0309                 | 0.2970                                   | 0.0245              | 0.0245                 |
| 10                     | 0.3                                 | 0.03281           | 0.3522                                   | 0.0290              | 0.0359                 | 0.2805                                   | 0.0327              | 0.0326                 | 0.2583                                   | 0.0321              | 0.0270                 | 0.3150                                   | 0.0330              | 0.0379                 |
| 11                     | 0.3                                 | 0.02372           | 0.3760                                   | 0.0191              | 0.0308                 | 0.2825                                   | 0.0235              | 0.0286                 | 0.3080                                   | 0.0238              | 0.0361                 | 0.2875                                   | 0.0236              | 0.0266                 |
| EMR (%)                |                                     |                   | 17.10                                    | 5.14                | 25.05                  | 18.86                                    | 2.25                | 14.39                  | 16.38                                    | 2.64                | 21.72                  | 7.11                                     | 0.71                | 14.41                  |
| $FO_{\text{ótima}}(m)$ |                                     |                   | -0.22                                    |                     | -81.06                 | -0.18                                    |                     | -80.97                 | -0.94                                    |                     | -191.67                | -0.81                                    |                     | -191.70                |

- As  $FO_{ótima}$ 's encontradas apresentaram grandes divergências ocasionando FO's mais satisfatórias quando os fatores de atritos, em todas as situações, são calibrados diretamente pelo MTI-AG para a manobra brusca (01). Para a manobra lenta (02) os resultados individuais (por trecho) das  $FO_{ótima}$ 's parecem convergir a um mesmo valor conforme Tabelas anexadas no apêndice B.

### 4.3 Resumo dos resultados

Uma análise final compara através de gráficos e um quadro resumo os valores dos EMR (%) encontrados na identificação dos fatores de atrito equivalentes e calibrados para as condições e metodologias adotadas para a rede A e B verificando a influência do tamanho da rede, tipo de manobras (brusca e lenta), número de nós monitorados (01 nó para a rede A, 01 e 02 nós para a rede B) e o tipo de seleção do algoritmo genético (com elitismo e sem elitismo).

Gráfico 28 - Análise do EMR (%) na identificação do fator de atrito para as condições impostas para a Rede A

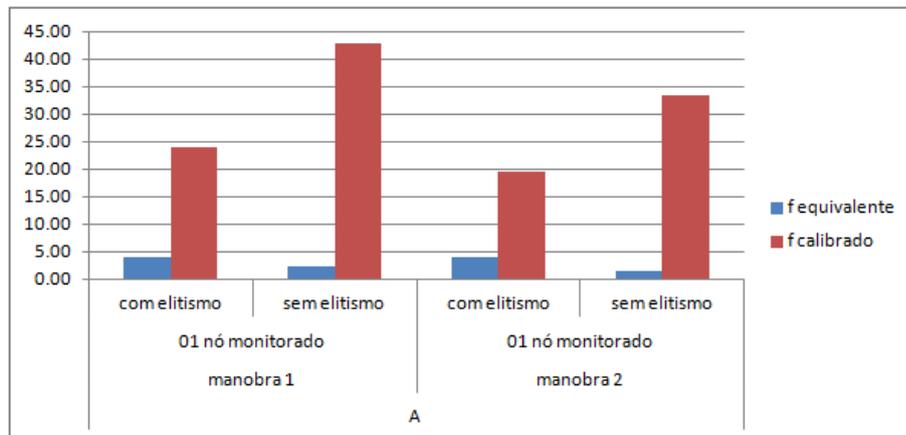


Gráfico 29 - Análise do EMR (%) na identificação do fator de atrito para as condições impostas para a Rede B

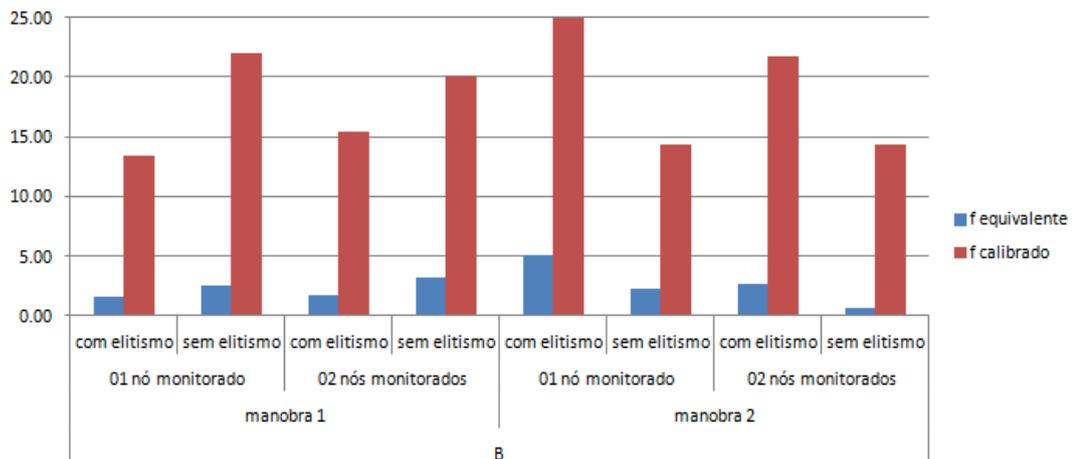


Tabela 31 - Valores de fatores de atrito equivalente e calibrados para as situações impostas

| Rede | Tipo de manobra | Nº nós monitorados | Tipo de seleção | EMR (%)                  |                        |
|------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|
|      |                 |                    |                 | $f_{\text{equivalente}}$ | $f_{\text{calibrado}}$ |
| A    | manobra 1       | 01 nó monitorado   | com elitismo    | 3.88                     | 23.82                  |
|      |                 |                    | sem elitismo    | 2.29                     | 42.88                  |
|      | manobra 2       | 01 nó monitorado   | com elitismo    | 3.80                     | 19.38                  |
|      |                 |                    | sem elitismo    | 1.35                     | 33.42                  |
| B    | manobra 1       | 01 nó monitorado   | com elitismo    | 1.55                     | 13.37                  |
|      |                 |                    | sem elitismo    | 2.57                     | 22.01                  |
|      |                 | 02 nós monitorados | com elitismo    | 1.76                     | 15.38                  |
|      |                 |                    | sem elitismo    | 3.21                     | 20.15                  |
|      | manobra 2       | 01 nó monitorado   | com elitismo    | 5.14                     | 25.05                  |
|      |                 |                    | sem elitismo    | 2.25                     | 14.39                  |
|      |                 | 02 nós monitorados | com elitismo    | 2.64                     | 21.72                  |
|      |                 |                    | sem elitismo    | 0.71                     | 14.41                  |

A Tabela permite verificar que os EMR (%) na identificação dos fatores de atrito equivalentes são próximos de zero e variam entre os mesmos valores para todas as situações a que são submetidas. Entretanto, são observados valores de EMR (%) maiores e instáveis para os fatores de atrito calibrados.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados apontam que, para todas as situações adotadas, a identificação do fator de atrito é mais conveniente quando calculado através da rugosidade do que quando calibrado diretamente pelo MTI-AG, visto que no evento transiente o fator de atrito, que depende da vazão (Reynolds), se altera comumente, enquanto a rugosidade admite a influência da variabilidade temporal das vazões nos tubos e permanece constante.

Uma outra análise realizada da conveniência verifica a influência direta dos demais fatores: tamanho da rede, tipo de manobras (brusca e lenta), número de nós monitorados (01 nó para a rede A, 01 e 02 nós para a rede B) e o tipo de seleção do algoritmo genético (com elitismo e sem elitismo). Pode ser dividida da em duas partes.

A primeira compara os valores de EMR (%) encontrados na identificação dos fatores de atrito equivalentes para todas as situações, na qual conclui-se que as diversas condições impostas parecem não influenciar nos resultados, pois os erros médios relativos em todas elas são baixos e próximos de zero (ver Tabela 31), variando de 0.71% (Rede B, manobra 2, 02 nós monitorados e sem elitismo) até 5.14% (Rede B, manobra 2, 01 nós monitorados e com elitismo). A pouca instabilidade desses resultados ocorre porque esses valores são calculados a partir de rugosidades calibradas pelo MTI-AG, que nesse estudo mostram não se alterar significamente quando na mudança de manobras e do número de nós monitorados. Alterando-se ainda sensivelmente quando da alteração do tipo de seleção do algoritmo.

A segunda parte permite comparar os valores de EMR (%) encontrados na calibração do fator de atrito pelo MTI-AG nas diversas situações impostas, nas quais os valores de erros são maiores e variam entre 13.37% (Rede B, manobra 1, 01 nó monitorado e com elitismo) a 42.88% (Rede A, manobra 1, 01 nó monitorado e sem elitismo). O tipo de manobra e o número de nós a monitorar parecem não influenciar significamente nos resultados, no entanto o tipo de seleção do AG aponta erros menores para a condição de seleção com elitismo, com exceção para a manobra 02 (lenta), na qual as funções objetivos ótimas parecem convergir em valores altos (-81.06 e -80.97 para 01 nó monitorado e -191.67 e -191.70 para 02 nós monitorados) o que indica a necessidade de estudo do aumento dos parâmetros do AG (número de gerações e número de cromossomos) para verificação.

O método utilizado, MTI-AG, se mostrou promissor à identificação dos diversos parâmetros, sobretudo em sua conveniência. O objetivo deste trabalho foi cumprido visto que foi identificado, dentro da análise apresentada, a melhor forma de calibrar o parâmetro fator

de atrito nas diversas situações apresentadas, apontado as influências dos usos dos fatores secundários do tamanho da rede, tipo de manobra, número de nós a monitorar e tipo de seleção adotado.

O estudo propõe ainda aplicações futuras otimizadas da metodologia para sistemas de distribuição de água hipotéticos ou reais considerando as suas condições de vazamentos e erros de leitura de cargas para que seja identificado a proporção do erro em relação as condições apresentadas nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, J. C. C.; HAYASHI, L. M.; CANELLAS, A. V. B. - **Modelagem de Transientes Hidráulicos em Condutos Forçados**. Comitê Brasileiro de Barragens. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Goiânia, 2005.

ARAÚJO, J. K. - **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicada à escoamento transiente**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

BHAVE, P. R. Calibrating Water Distribution Network Models. **Journal of Environmental Engineering**, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb, 1988.

BHAVE, P. R.; ORMSBEE, L. E. Explicit network calibration for multiple loading conditions. **Civil Engineering Systems**, v.8, p. 153-160, 1991

BOULOS, P. F., WOOD, D. J. - Explicit calculation of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.

CARRERA, J., NEUMAN, S. P. – Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. maximum likelihood method incorporating prior information. **Water Resources Research**, v. 22, n. 2, p. 199-210, 1986a.

CHAUDHRY, M. H. - **Applied hydraulic transients**. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 521p, 1987.

CHEUNG, P.B. - **Investigação dos métodos clássicos de calibração de redes hidráulicas**. Campo Grande. 132 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2001.

DATTA, R. S. N., SRIDHARAN, K. - Parameter estimation in water-distribution systems by least squares. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 4, p. 405-422, 1994.

DARWIN, C. - **A origem das espécies**. Hemus – Livraria Editora Ltda, São Paulo, 2002.

DARWIN, C. - **A origem das espécies**. Tradução de John Green. Editora Martin Claret, 2007.

DAVIS, L. **Handbook of genetic algorithms**. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.

De SCHAEZTEN, W.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; ROUSSEAU, M. **Analysis of the sensitivity of the calibration optimization problem**. In: SAVIC, D. A. (ed); WALTERS, G. A. (ed.): *Water network modeling for optimal design and management*, p. 43-54, Sept, 2000.

ESHELMAN, L. J.; SCHAFFER, J. D. **Real-coded genetic algorithms and interval-schemata**. In: *Foundations of Genetic Algorithms 2 (FOGA 2)*, p. 187-202, 1993.

GALIZA, R. V. P. **Calibração de rugosidade de tubulações de redes de distribuição de água, via método transiente inverso com aplicação de algoritmo genético.** 162p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2009.

GAMBALE, S. R. – **Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água.** São Paulo. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. - **Hybrid GA for calibration of water distribution hydraulic models.** Proceedings of the 2002 Conference Water Resources Planning and Management, Roanoke, Virginia, 2002.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos algoritmos genéticos. In: Galvão, C.O.; Valença, M.J.S. (Org.). **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais.** 1 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 99-150, 1999.

LANCEY, K. E., BASNET, C. – Parameter estimation for water distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 117, n. 1, p. 126-144, 1991.

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

LINGIREDDY, S.; ORMSBEE, L. E. Hydraulic network calibration using Genetic Optimization. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 19, n. 1, p. 13-39, 2002.

MICHALEWICZ, Z. – **Genetic algorithms + data structures = evolution programs.** Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.

NEUMAN, S. – Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. **Water Resources Research**, v. 9, n. 4, p. 1006-1021, 1973.

ORMSBEE, L. E., WOOD, D. J. - Explicit pipe network calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management.** ASCE, v. 112, n. 2, p. 166-182, 1986a.

ORMSBEE, L. E., WOOD, D. J. - Implicit pipe network calibration. **Journal of Hydraulics Engineering.** ASCE, v. 112, n. 12, p. 1195-1207, 1986b.

ORMSBEE, L. E. - Implicit network calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management.** ASCE, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.

PORTO, R. M. – **Hidráulica básica.** EESC-USP, 540p, 2006.

PUDAR, R. S., LIGGETT, J. A – Leaks in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 118, n. 7, p. 1031-1046, 1992.

RAHAL, C.M; STERLING, M.J.H.; COUBELCK, B. Parameter Tuning for Simulation Models of Water Distribution Networks. **Proc. Instn. Civ. Engrs.** Part 2, Sept., p.751-762, 1980.

REDDY, P. V. N., SRIDHARAN, K., RAO, P. V. – WLS method for parameter estimation in water distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 122, n. 3, p. 157-164, 1996.

REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H. – Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 123, n. 6, p. 317-326, 1997.

RIDLEY, Mark. **Evolução**. 3ª edição. Editora ARTMED. São Paulo, 2006.

SANTOS, A. C. N. - **Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos**. Itajubá. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Itajubá, 2010.

SAVIC, D. A., WALTERS, G. A. – Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.

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, F. G. B. **Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos** – Tese de Doutorado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2003.

SILVA, A. C. A. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos**. 134p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2006.

SIMPSON, A.; VITKOVSKÝ, J.; LAMBERT, M. Transients for calibration of pipe roughnesses - A review and the application of Genetic Algorithms. 8th International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems. **BHR Groups. Publications** n. 39, p. 587-597, 2000.

SOUZA, R.S. **Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente**. São Carlos. 236 p. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, (1994).

SOARES, A. K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão**. São Carlos. 153p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003).

SOARES, A. K. - **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório** - Tese de Doutorado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2007.

SWAMEE, P. K. – Design of a submarine pipeline. **Journal Transp Eng.**, ASCE, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

VIEIRA, M. E. A G. - **Calibração de modelos de redes de distribuição de água usando algoritmo genético multiobjetivo**. Goiás. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Goiás, 2008.

WALSKI, T. M. Technique for Calibrating Network Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 109, n.4, p.360-372, 1983.

WALSKI, T. M. Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 112, n. 2, p. 238-249, Apr, 1986.

WYLIE, E. B., STREETER, V. L. - **Fluid transients**. New York, McGraw-Hill, 384p, 1978.

**APÊNDICE A**  
**ANÁLISE DOS PARÂMETROS NG E NC**

Tabela A.1 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração da rugosidade para a manobra 1 na rede A

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração da Rugosidade |                       |              |         |         |              |         |        |
|---|-----------------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|--------|
| n°<br>gerações<br>(NG)  | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 1    |         |         |              |         |        |
|   |                       | Com elitismo |         |         | Sem elitismo |         |        |
|   |                       | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%)  | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2   | 4                     | 21.13        | 78.87   | -27.08  | 16.52        | 83.48   | -42.00 |
| 5   | 10                    | 12.43        | 87.57   | -133.21 | 11.13        | 88.87   | -11.22 |
| 10  | 20                    | 15.39        | 84.61   | -32.13  | 12.71        | 87.29   | -2.21  |
| 20  | 40                    | 20.11        | 79.89   | -1.98   | 17.13        | 82.87   | -2.77  |
| 50  | 50                    | 27.07        | 72.93   | -1.43   | 12.60        | 87.40   | -0.07  |

Tabela A.2 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração da rugosidade para a manobra 2 na rede A

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração da Rugosidade |                       |              |         |         |              |         |        |
|---|-----------------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|--------|
| n°<br>gerações<br>(NG)  | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 2    |         |         |              |         |        |
|   |                       | Com elitismo |         |         | Sem elitismo |         |        |
|   |                       | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%)  | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2   | 4                     | 21.13        | 78.87   | -26.81  | 16.52        | 83.48   | -32.64 |
| 5   | 10                    | 12.43        | 87.57   | -133.81 | 11.90        | 88.10   | -6.51  |
| 10  | 20                    | 15.39        | 84.61   | -35.65  | 12.71        | 87.29   | -2.53  |
| 20  | 40                    | 20.11        | 79.89   | -1.79   | 14.20        | 85.80   | -1.77  |
| 50  | 50                    | 26.07        | 73.93   | -0.63   | 8.40         | 91.60   | -0.04  |

Tabela A.3 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração do fator de atrito para a manobra 1 na rede A

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração do Fator de Atrito |                       |              |         |         |              |         |         |
|--|-----------------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| n°<br>gerações<br>(NG)   | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 1    |         |         |              |         |         |
|  |                       | Com elitismo |         |         | Sem elitismo |         |         |
|  |                       | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%)  | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%)  |
| 2  | 4                     | 26.54        | 73.46   | -218.00 | 24.21        | 75.79   | -484.96 |
| 5  | 10                    | 29.33        | 70.67   | -8.07   | 19.46        | 80.54   | -8.08   |
| 10   | 20                    | 18.67        | 81.33   | -893.27 | 28.73        | 71.27   | -12.46  |
| 20   | 40                    | 20.01        | 79.99   | -7.69   | 24.28        | 75.72   | -4.81   |
| 50   | 50                    | 23.82        | 76.18   | -3.23   | 42.88        | 57.12   | -5.82   |

Tabela A.4 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração do fator de atrito para a manobra 2 na rede A

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração do Fator de Atrito |                       |              |         |         |              |         |         |
|--|-----------------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| n°<br>gerações<br>(NG)   | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 2    |         |         |              |         |         |
|  |                       | Com elitismo |         |         | Sem elitismo |         |         |
|  |                       | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%)  | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%)  |
| 2  | 4                     | 26.54        | 73.46   | -200.55 | 24.21        | 75.79   | -467.50 |
| 5  | 10                    | 29.33        | 70.67   | -3.85   | 19.46        | 80.54   | -3.92   |
| 10   | 20                    | 20.39        | 79.61   | -897.92 | 27.18        | 72.82   | -4.15   |
| 20   | 40                    | 20.01        | 79.99   | -12.67  | 26.71        | 73.29   | -4.88   |
| 50   | 50                    | 19.38        | 80.62   | -9.03   | 33.42        | 66.58   | -4.91   |

Tabela A.5 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração da rugosidade para a manobra 1 na rede B considerando 01 nó monitorado

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração da Rugosidade |                       |                          |         |          |              |         |        |
|---|-----------------------|--------------------------|---------|----------|--------------|---------|--------|
| n°<br>gerações<br>(NG)  | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 1                |         |          |              |         |        |
|   |                       | 01 nó monitorado (Nó 04) |         |          |              |         |        |
|   |                       | Com elitismo             |         |          | Sem elitismo |         |        |
|   |                       | EMR (%)                  | IMA (%) | FO (%)   | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2   | 4                     | 22.36                    | 78.66   | -2081.64 | 15.35        | 85.67   | -5.29  |
| 5   | 10                    | 16.89                    | 90.00   | -2080.56 | 19.27        | 80.64   | -3.91  |
| 10  | 20                    | 21.71                    | 66.63   | -2079.43 | 11.83        | 91.29   | -2.08  |
| 20  | 40                    | 20.77                    | 70.78   | -2079.67 | 8.17         | 94.77   | -1.76  |
| 50  | 50                    | 13.13                    | 90.90   | -2.31    | 20.63        | 86.13   | -1.16  |

Tabela A.6 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração da rugosidade para a manobra 1 na rede B considerando 02 nós monitorados

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração da Rugosidade |                       |                                    |         |          |              |         |        |
|---|-----------------------|------------------------------------|---------|----------|--------------|---------|--------|
| n°<br>gerações<br>(NG)  | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 1                          |         |          |              |         |        |
|   |                       | 02 nós monitorados (Nó 04 e Nó 07) |         |          |              |         |        |
|   |                       | Com elitismo                       |         |          | Sem elitismo |         |        |
|   |                       | EMR (%)                            | IMA (%) | FO (%)   | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2   | 4                     | 22.30                              | 78.66   | -4299.55 | 17.44        | 84.43   | -9.79  |
| 5   | 10                    | 14.23                              | 71.81   | -4300.52 | 19.89        | 81.68   | -8.22  |
| 10  | 20                    | 18.71                              | 71.81   | -4297.01 | 14.15        | 86.54   | -4.69  |
| 20  | 40                    | 26.15                              | 74.33   | -4297.74 | 15.15        | 89.50   | -3.40  |
| 50  | 50                    | 13.61                              | 91.03   | -5.53    | 21.45        | 81.87   | -2.26  |

Tabela A.7 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração da rugosidade para a manobra 2 na rede B considerando 01 nó monitorado

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração da Rugosidade |                       |                          |         |        |              |         |        |
|---|-----------------------|--------------------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| n°<br>gerações<br>(NG)  | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 2                |         |        |              |         |        |
|   |                       | 01 nó monitorado (Nó 04) |         |        |              |         |        |
|   |                       | Com elitismo             |         |        | Sem elitismo |         |        |
|   |                       | EMR (%)                  | IMA (%) | FO (%) | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2   | 4                     | 21.69                    | 79.86   | -1.92  | 15.23        | 82.80   | -0.46  |
| 5   | 10                    | 14.06                    | 87.53   | -0.23  | 18.50        | 77.18   | -0.49  |
| 10  | 20                    | 16.86                    | 77.70   | -0.61  | 9.83         | 87.87   | -0.25  |
| 20  | 40                    | 23.18                    | 79.03   | -0.20  | 9.04         | 92.93   | -0.20  |
| 50  | 50                    | 17.10                    | 88.00   | -0.22  | 18.86        | 84.77   | -0.18  |

Tabela A.8 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração da rugosidade para a manobra 2 na rede B considerando 02 nós monitorados

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração da Rugosidade |                       |                                    |         |        |              |         |        |
|---|-----------------------|------------------------------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| n°<br>gerações<br>(NG)  | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 2                          |         |        |              |         |        |
|   |                       | 02 nós monitorados (Nó 04 e Nó 07) |         |        |              |         |        |
|   |                       | Com elitismo                       |         |        | Sem elitismo |         |        |
|   |                       | EMR (%)                            | IMA (%) | FO (%) | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2   | 4                     | 21.45                              | 79.86   | -5.33  | 13.02        | 88.33   | -1.72  |
| 5   | 10                    | 13.27                              | 79.47   | -1.67  | 17.13        | 83.28   | -1.71  |
| 10  | 20                    | 16.30                              | 79.47   | -2.74  | 17.59        | 83.32   | -0.91  |
| 20  | 40                    | 20.15                              | 77.50   | -1.64  | 20.15        | 93.00   | -0.89  |
| 50  | 50                    | 16.38                              | 82.00   | -0.94  | 7.11         | 89.73   | -0.81  |

Tabela A.9 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração do fator de atrito para a manobra 1 na rede B considerando 01 nó monitorado

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração do fator de atrito |                       |                          |         |        |              |         |        |
|--|-----------------------|--------------------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| n°<br>gerações<br>(NG)   | n°<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 1                |         |        |              |         |        |
|  |                       | 01 nó monitorado (Nó 04) |         |        |              |         |        |
|  |                       | Com elitismo             |         |        | Sem elitismo |         |        |
|  |                       | EMR (%)                  | IMA (%) | FO (%) | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2  | 4                     | 27.09                    | 77.70   | -36.19 | 16.00        | 81.17   | -36.84 |
| 5  | 10                    | 29.30                    | 66.23   | -34.74 | 21.76        | 72.74   | -16.64 |
| 10   | 20                    | 17.31                    | 83.48   | -24.07 | 19.09        | 73.79   | -19.21 |
| 20   | 40                    | 20.52                    | 73.88   | -15.15 | 24.01        | 74.21   | -16.31 |
| 50   | 50                    | 13.37                    | 82.90   | -10.23 | 22.01        | 76.84   | -12.23 |

Tabela A.10 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração do fator de atrito para a manobra 1 na rede B considerando 02 nós monitorados

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração do fator de atrito |                       |                                    |         |        |              |         |        |
|--|-----------------------|------------------------------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| nº<br>gerações<br>(NG)   | nº<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 1                          |         |        |              |         |        |
|  |                       | 02 nós monitorados (Nó 04 e Nó 07) |         |        |              |         |        |
|  |                       | Com elitismo                       |         |        | Sem elitismo |         |        |
|  |                       | EMR (%)                            | IMA (%) | FO (%) | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2  | 4                     | 27.01                              | 77.70   | -80.64 | 17.04        | 79.65   | -67.22 |
| 5  | 10                    | 29.30                              | 75.79   | -67.82 | 23.13        | 76.06   | -28.14 |
| 10   | 20                    | 22.52                              | 75.79   | -49.69 | 16.11        | 75.61   | -39.38 |
| 20   | 40                    | 21.03                              | 73.79   | -31.95 | 21.34        | 73.77   | -34.56 |
| 50   | 50                    | 15.38                              | 78.46   | -18.43 | 20.15        | 75.49   | -24.08 |

Tabela A.11 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração do fator de atrito para a manobra 2 na rede B considerando 01 nó monitorado

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração do fator de atrito |                       |                          |         |        |              |         |        |
|--|-----------------------|--------------------------|---------|--------|--------------|---------|--------|
| nº<br>gerações<br>(NG)   | nº<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 2                |         |        |              |         |        |
|  |                       | 01 nó monitorado (Nó 04) |         |        |              |         |        |
|  |                       | Com elitismo             |         |        | Sem elitismo |         |        |
|  |                       | EMR (%)                  | IMA (%) | FO (%) | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%) |
| 2  | 4                     | 27.09                    | 77.70   | -81.24 | 90.15        | 9.53    | -81.93 |
| 5  | 10                    | 89.98                    | 10.33   | -81.29 | 90.38        | 9.43    | -81.25 |
| 10   | 20                    | 89.82                    | 9.85    | -81.36 | 90.93        | 8.85    | -81.24 |
| 20   | 40                    | 89.59                    | 9.91    | -81.07 | 91.48        | 8.16    | -80.98 |
| 50   | 50                    | 89.30                    | 9.65    | -81.06 | 90.09        | 9.40    | -80.97 |

Tabela A.12 - Demonstração dos Indicadores de Eficiência na calibração do fator de atrito para a manobra 2 na rede B considerando 02 nós monitorados

| Análise dos parâmetros do Algoritmo Genético - Calibração do fator de atrito |                       |                                    |         |         |              |         |         |
|--|-----------------------|------------------------------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| nº<br>gerações<br>(NG)   | nº<br>cromos.<br>(NC) | Manobra 2                          |         |         |              |         |         |
|  |                       | 02 nós monitorados (Nó 04 e Nó 07) |         |         |              |         |         |
|  |                       | Com elitismo                       |         |         | Sem elitismo |         |         |
|  |                       | EMR (%)                            | IMA (%) | FO (%)  | EMR (%)      | IMA (%) | FO (%)  |
| 2  | 4                     | 90.10                              | 10.07   | -191.90 | 90.03        | 10.15   | -194.55 |
| 5  | 10                    | 89.97                              | 10.03   | -192.02 | 90.80        | 9.71    | -192.24 |
| 10   | 20                    | 89.85                              | 10.03   | -193.71 | 90.98        | 9.17    | -192.12 |
| 20   | 40                    | 89.83                              | 9.98    | -191.62 | 90.82        | 8.23    | -191.50 |
| 50   | 50                    | 89.75                              | 9.65    | -191.67 | 90.09        | 10.06   | -191.70 |

## APÊNDICE B

### PROCESSAMENTOS DE CALIBRAÇÃO DA RUGOSIDADE E FATOR DE ATRITO

#### REDE A

Tabela B.1 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede A com elitismo para a manobra 1

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
|---|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Com elitismo - Manobra 1 - NG50 - NC50                      |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°      | 6°     | 7°     | 8°     | 9°      | 10°    |
| 1   | 0.5800 | 0.3600 | 0.2500 | 0.3500 | 0.1100  | 0.3500 | 0.4500 | 0.6000 | 0.4100  | 0.3000 |
| 2   | 0.1900 | 0.1300 | 0.5800 | 0.3900 | 0.1300  | 0.2400 | 0.2900 | 0.3200 | 0.1700  | 0.5800 |
| 3   | 0.4200 | 0.4100 | 0.2500 | 0.4700 | 0.4900  | 0.3800 | 0.2100 | 0.5900 | 0.5800  | 0.5700 |
| 4   | 0.4300 | 0.5900 | 0.1700 | 0.2400 | 0.5700  | 0.3600 | 0.3100 | 0.2800 | 0.5000  | 0.1700 |
| 5   | 0.1400 | 0.4700 | 0.5200 | 0.5700 | 0.5200  | 0.0500 | 0.3800 | 0.1600 | 1.0000  | 0.4800 |
| FOótima   | -3.61  | -67.53 | -10.69 | -1.61  | -134.38 | -4.94  | -43.92 | -14.48 | -237.53 | -1.43  |

Tabela B.2 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede A com elitismo para a manobra 2

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
|---|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Com elitismo - Manobra 2 - NG50 - NC50                      |        |        |        |        |         |        |        |        |         |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°      | 6°     | 7°     | 8°     | 9°      | 10°    |
| 1   | 0.5800 | 0.3600 | 0.2500 | 0.3500 | 0.1100  | 0.3500 | 0.4500 | 0.6000 | 0.4100  | 0.0700 |
| 2   | 0.1900 | 0.1300 | 0.5800 | 0.3900 | 0.1300  | 0.2400 | 0.2900 | 0.3200 | 0.1700  | 0.5200 |
| 3   | 0.4200 | 0.4100 | 0.2500 | 0.4700 | 0.4900  | 0.3800 | 0.2100 | 0.5900 | 0.5800  | 0.6100 |
| 4   | 0.4300 | 0.5900 | 0.1700 | 0.2400 | 0.5700  | 0.3600 | 0.3100 | 0.2800 | 0.5000  | 0.1900 |
| 5   | 0.1400 | 0.4700 | 0.5200 | 0.5700 | 0.5200  | 0.0500 | 0.3800 | 0.1600 | 1.0000  | 0.4800 |
| FOótima   | -5.49  | -59.05 | -13.76 | -0.63  | -139.07 | -3.41  | -42.54 | -17.16 | -233.58 | -1.60  |

Tabela B.3 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede A sem elitismo para a manobra 1

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 1 - NG50 - NC50                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.0500 | 0.1600 | 0.2500 | 0.3800 | 0.0400 | 0.4600 | 0.4200 | 0.2000 | 0.6000 | 0.3000 |
| 2   | 0.1800 | 0.2600 | 0.3400 | 0.1500 | 0.3800 | 0.3100 | 0.4300 | 0.2900 | 0.1900 | 0.3000 |
| 3   | 0.5600 | 0.1000 | 0.4500 | 0.3200 | 0.2700 | 0.6000 | 0.5100 | 0.4800 | 0.0800 | 0.2300 |
| 4   | 0.4600 | 0.3400 | 0.2700 | 0.5200 | 0.2500 | 0.2900 | 0.2200 | 0.3100 | 0.4300 | 0.3000 |
| 5   | 0.5500 | 0.4500 | 0.2800 | 0.3200 | 0.4100 | 0.0500 | 0.3100 | 0.3700 | 0.4200 | 0.4300 |
| FOótima   | -3.90  | -1.32  | -11.86 | -6.69  | -2.39  | -0.49  | -1.13  | -1.53  | -5.32  | -0.07  |

Tabela B.4 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede A sem elitismo para a manobra 2

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 2 - NG50 - NC50                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.0500 | 0.1600 | 0.2500 | 0.5700 | 0.0400 | 0.0700 | 0.4400 | 0.2000 | 0.6000 | 0.3000 |
| 2   | 0.1800 | 0.2600 | 0.3400 | 0.1800 | 0.3800 | 0.5200 | 0.4300 | 0.2900 | 0.1900 | 0.3000 |
| 3   | 0.5600 | 0.1000 | 0.4500 | 0.3700 | 0.2700 | 0.1000 | 0.5100 | 0.4800 | 0.0800 | 0.2300 |
| 4   | 0.4600 | 0.3400 | 0.2700 | 0.4500 | 0.2500 | 0.1900 | 0.2200 | 0.3100 | 0.4300 | 0.3000 |
| 5   | 0.5500 | 0.4500 | 0.2800 | 0.3000 | 0.4100 | 0.1200 | 0.1700 | 0.3700 | 0.4200 | 0.4300 |
| FOótima   | -2.54  | -1.02  | -11.43 | -5.48  | -5.31  | -1.44  | -1.84  | -0.91  | -4.53  | -0.04  |

Tabela B.5 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede A com elitismo para a manobra 1

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |         |        |         |         |        |        |        |        |
|--|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 1 - NG50 - NC50                           |        |        |         |        |         |         |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°      | 4°     | 5°      | 6°      | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0470 | 0.0220 | 0.0240  | 0.0350 | 0.0150  | 0.0350  | 0.0120 | 0.0260 | 0.0670 | 0.0200 |
| 2  | 0.0190 | 0.0200 | 0.0170  | 0.0470 | 0.0230  | 0.0170  | 0.0490 | 0.0260 | 0.0220 | 0.0540 |
| 3  | 0.0370 | 0.0390 | 0.0370  | 0.0220 | 0.0090  | 0.0530  | 0.0440 | 0.0480 | 0.0100 | 0.0490 |
| 4  | 0.0360 | 0.0350 | 0.0420  | 0.0180 | 0.0310  | 0.0410  | 0.0180 | 0.0270 | 0.0300 | 0.0170 |
| 5  | 0.0140 | 0.0400 | 0.0490  | 0.0190 | 0.0480  | 0.0120  | 0.0180 | 0.0140 | 0.0260 | 0.0410 |
| FOótima  | -56.69 | -46.44 | -277.72 | -33.49 | -201.09 | -348.54 | -16.70 | -3.23  | -54.37 | -58.22 |

Tabela B.6 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede A com elitismo para a manobra 2

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |         |        |         |         |        |        |        |        |
|--|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 2 - NG50 - NC50                           |        |        |         |        |         |         |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°      | 4°     | 5°      | 6°      | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0160 | 0.0220 | 0.0240  | 0.0350 | 0.0150  | 0.0350  | 0.0120 | 0.0260 | 0.0360 | 0.0490 |
| 2  | 0.0490 | 0.0200 | 0.0170  | 0.0270 | 0.0230  | 0.0170  | 0.0490 | 0.0260 | 0.0270 | 0.0420 |
| 3  | 0.0090 | 0.0390 | 0.0370  | 0.0240 | 0.0090  | 0.0450  | 0.0440 | 0.0480 | 0.0280 | 0.0610 |
| 4  | 0.0180 | 0.0350 | 0.0420  | 0.0260 | 0.0310  | 0.0430  | 0.0180 | 0.0270 | 0.0260 | 0.0190 |
| 5  | 0.0100 | 0.0400 | 0.0490  | 0.0250 | 0.0480  | 0.0160  | 0.0180 | 0.0140 | 0.0570 | 0.0560 |
| FOótima  | -68.81 | -43.07 | -258.15 | -30.23 | -207.17 | -349.28 | -12.69 | -9.03  | -44.84 | -45.67 |

Tabela B.7 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede A sem elitismo para a manobra 1

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 1 - NG50 - NC50                           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0180 | 0.0410 | 0.0380 | 0.0140 | 0.0440 | 0.0590 | 0.0520 | 0.0550 | 0.0410 | 0.0240 |
| 2  | 0.0370 | 0.0220 | 0.0360 | 0.0220 | 0.0220 | 0.0580 | 0.0380 | 0.0210 | 0.0220 | 0.0480 |
| 3  | 0.0630 | 0.0650 | 0.0420 | 0.0170 | 0.0340 | 0.0480 | 0.0350 | 0.0510 | 0.0650 | 0.0190 |
| 4  | 0.0210 | 0.0310 | 0.0210 | 0.0320 | 0.0310 | 0.0160 | 0.0200 | 0.0320 | 0.0310 | 0.0180 |
| 5  | 0.0410 | 0.0180 | 0.0320 | 0.0340 | 0.0670 | 0.0650 | 0.0090 | 0.0570 | 0.0250 | 0.0250 |
| FOótima  | -8.08  | -6.43  | -22.52 | -15.90 | -35.67 | -69.24 | -16.72 | -13.03 | -5.82  | -12.01 |

Tabela B.8 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede A sem elitismo para a manobra 2

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 2 - NG50 - NC50                           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0180 | 0.0130 | 0.0380 | 0.0140 | 0.0440 | 0.0590 | 0.0160 | 0.0550 | 0.0410 | 0.0240 |
| 2  | 0.0370 | 0.0290 | 0.0360 | 0.0220 | 0.0220 | 0.0580 | 0.0440 | 0.0210 | 0.0220 | 0.0480 |
| 3  | 0.0630 | 0.0200 | 0.0420 | 0.0170 | 0.0340 | 0.0480 | 0.0270 | 0.0510 | 0.0650 | 0.0130 |
| 4  | 0.0210 | 0.0250 | 0.0210 | 0.0320 | 0.0310 | 0.0160 | 0.0190 | 0.0320 | 0.0310 | 0.0180 |
| 5  | 0.0410 | 0.0130 | 0.0320 | 0.0340 | 0.0670 | 0.0650 | 0.0120 | 0.0570 | 0.0250 | 0.0290 |
| FOótima  | -9.30  | -13.15 | -12.20 | -19.45 | -18.44 | -32.73 | -15.85 | -36.60 | -20.07 | -4.91  |

**REDE B**

Tabela B.9 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B com elitismo para a manobra 1 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 1 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.0800 | 0.5300 | 0.3700 | 0.3800 | 0.2900 | 0.0900 | 0.4300 | 0.3400 | 0.3900 | 0.4300 |
| 2   | 0.2800 | 0.2700 | 0.2400 | 0.2300 | 0.1500 | 0.2600 | 0.3100 | 0.3600 | 0.3100 | 0.3300 |
| 3   | 0.3400 | 0.2700 | 0.4700 | 0.5600 | 0.0050 | 0.0500 | 0.2800 | 0.2600 | 0.5700 | 0.2300 |
| 4   | 0.4700 | 0.2600 | 0.0500 | 0.2000 | 0.5000 | 0.5900 | 0.3600 | 0.6000 | 0.5000 | 0.1700 |
| 5   | 0.3500 | 0.4200 | 0.1200 | 0.6000 | 0.1500 | 0.2300 | 0.2500 | 0.5600 | 0.2400 | 0.1200 |
| 6   | 0.5000 | 0.2900 | 0.1700 | 0.3500 | 0.3300 | 0.4900 | 0.1300 | 0.3500 | 0.1700 | 0.1100 |
| 7   | 0.5700 | 0.2000 | 0.1100 | 0.6100 | 0.1500 | 0.4800 | 0.5800 | 0.5400 | 0.5100 | 0.3500 |
| 8   | 0.1700 | 0.4900 | 0.3100 | 0.5600 | 0.1300 | 0.3800 | 0.2200 | 0.2400 | 0.3500 | 0.2700 |
| 9   | 0.4200 | 0.5700 | 0.2600 | 0.2000 | 0.2000 | 0.2500 | 0.4700 | 0.4900 | 0.2400 | 0.4200 |
| 10  | 0.4300 | 0.0015 | 0.3800 | 0.4500 | 0.5000 | 0.5100 | 0.1600 | 0.0500 | 0.1800 | 0.1600 |
| 11  | 0.3300 | 0.4900 | 0.3300 | 0.5700 | 0.5700 | 0.4900 | 0.1300 | 0.3000 | 0.6100 | 0.1200 |
| FOótima   | -6.17  | -4.50  | -3.03  | -3.30  | -4.16  | -5.40  | -2.69  | -3.09  | -2.31  | -2.91  |

Tabela B.10 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B com elitismo para a manobra 1 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 1 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.0800 | 0.3700 | 0.3700 | 0.3800 | 0.2900 | 0.2500 | 0.4300 | 0.3400 | 0.3900 | 0.4300 |
| 2   | 0.2800 | 0.3000 | 0.2400 | 0.2300 | 0.1500 | 0.3000 | 0.3100 | 0.3600 | 0.2500 | 0.3300 |
| 3   | 0.3400 | 0.2700 | 0.4700 | 0.5600 | 0.0050 | 0.2100 | 0.2800 | 0.2600 | 0.1800 | 0.2300 |
| 4   | 0.4700 | 0.1800 | 0.0500 | 0.2000 | 0.5000 | 0.4300 | 0.3600 | 0.6000 | 0.4900 | 0.1700 |
| 5   | 0.3500 | 0.3400 | 0.1200 | 0.6000 | 0.1500 | 0.2300 | 0.2500 | 0.5600 | 0.1600 | 0.1200 |
| 6   | 0.5000 | 0.4500 | 0.1700 | 0.3500 | 0.3300 | 0.2100 | 0.1300 | 0.3500 | 0.2300 | 0.1100 |
| 7   | 0.5700 | 0.2000 | 0.1100 | 0.6100 | 0.1500 | 0.4800 | 0.5800 | 0.5400 | 0.5100 | 0.3500 |
| 8   | 0.1700 | 0.3200 | 0.3100 | 0.5600 | 0.1300 | 0.3800 | 0.2200 | 0.2400 | 0.3500 | 0.2700 |
| 9   | 0.4200 | 0.4900 | 0.2600 | 0.2000 | 0.2000 | 0.2500 | 0.4700 | 0.4900 | 0.2400 | 0.4200 |
| 10  | 0.4300 | 0.0250 | 0.3800 | 0.4500 | 0.5000 | 0.3200 | 0.1600 | 0.0500 | 0.2200 | 0.1600 |
| 11  | 0.3300 | 0.5900 | 0.3300 | 0.5700 | 0.5700 | 0.5300 | 0.1300 | 0.3000 | 0.6100 | 0.1200 |
| FOótima   | -14.65 | -9.38  | -6.25  | -6.93  | -8.47  | -9.08  | -6.13  | -6.34  | -5.53  | -6.36  |

Tabela B.11 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B com elitismo para a manobra 2 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 2 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.1100 | 0.2100 | 0.3700 | 0.5400 | 0.4500 | 0.2500 | 0.4200 | 0.3600 | 0.3800 | 0.4700 |
| 2   | 0.4400 | 0.3000 | 0.4100 | 0.1500 | 0.1300 | 0.2600 | 0.2200 | 0.4000 | 0.2500 | 0.2500 |
| 3   | 0.4200 | 0.5900 | 0.1500 | 0.5600 | 0.0400 | 0.1600 | 0.2000 | 0.5800 | 0.2600 | 0.3100 |
| 4   | 0.3900 | 0.5800 | 0.4900 | 0.5200 | 0.2300 | 0.4300 | 0.0600 | 0.4500 | 0.0900 | 0.2100 |
| 5   | 0.3700 | 0.3400 | 0.2800 | 0.3700 | 0.4700 | 0.5200 | 0.4000 | 0.1200 | 0.2400 | 0.2200 |
| 6   | 0.3500 | 0.2900 | 0.2400 | 0.1700 | 0.2300 | 0.1900 | 0.2300 | 0.3700 | 0.3700 | 0.3000 |
| 7   | 0.4500 | 0.2000 | 0.2500 | 0.6100 | 0.5500 | 0.5200 | 0.4300 | 0.1800 | 0.5100 | 0.3900 |
| 8   | 0.1700 | 0.4900 | 0.0400 | 0.4000 | 0.2500 | 0.3800 | 0.5200 | 0.5300 | 0.4200 | 0.3100 |
| 9   | 0.4400 | 0.5700 | 0.2600 | 0.5300 | 0.1700 | 0.5700 | 0.2300 | 0.2700 | 0.2400 | 0.4200 |
| 10  | 0.4700 | 0.4800 | 0.1500 | 0.6100 | 0.3600 | 0.5400 | 0.5200 | 0.0015 | 0.2200 | 0.1700 |
| 11  | 0.0900 | 0.4900 | 0.3300 | 0.5700 | 0.2900 | 0.5300 | 0.0900 | 1.0000 | 0.1300 | 0.2400 |
| FOótima   | -0.67  | -0.29  | -0.52  | -0.63  | -0.41  | -0.42  | -0.32  | -0.33  | -0.22  | -0.42  |

Tabela B.12 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B com elitismo para a manobra 2 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 2 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.4200 | 0.3700 | 0.3600 | 0.3800 | 0.4500 | 0.1100 | 0.4200 | 0.2200 | 0.3800 | 0.4700 |
| 2   | 0.3300 | 0.3000 | 0.1500 | 0.1500 | 0.1300 | 0.5800 | 0.2300 | 0.4200 | 0.2500 | 0.2500 |
| 3   | 0.4200 | 0.5100 | 0.0700 | 0.1600 | 0.0400 | 0.3600 | 0.1600 | 0.5800 | 0.2600 | 0.3100 |
| 4   | 0.4700 | 0.5800 | 0.4900 | 0.5400 | 0.2300 | 0.4700 | 0.2200 | 0.4400 | 0.0900 | 0.2100 |
| 5   | 0.3900 | 0.4700 | 0.4700 | 0.6000 | 0.4700 | 0.5200 | 0.4000 | 0.2600 | 0.2400 | 0.2200 |
| 6   | 0.1900 | 0.1300 | 0.2200 | 0.1600 | 0.2300 | 0.1700 | 0.2100 | 0.3700 | 0.3700 | 0.3000 |
| 7   | 0.0700 | 0.2000 | 0.0900 | 0.5700 | 0.5500 | 0.5200 | 0.4200 | 0.2000 | 0.5100 | 0.3900 |
| 8   | 0.1600 | 0.4900 | 0.2300 | 0.5600 | 0.2500 | 0.1900 | 0.4800 | 0.4800 | 0.4200 | 0.3100 |
| 9   | 0.4600 | 0.5700 | 0.2600 | 0.2000 | 0.1700 | 0.4100 | 0.2300 | 0.5100 | 0.2400 | 0.4200 |
| 10  | 0.3800 | 0.0015 | 0.4600 | 0.4500 | 0.3600 | 0.0600 | 0.4800 | 0.0015 | 0.2200 | 0.1700 |
| 11  | 0.1100 | 0.4900 | 0.3700 | 0.5300 | 0.2900 | 0.5300 | 0.2500 | 0.1400 | 0.1300 | 0.2400 |
| FOótima   | -3.13  | -2.52  | -1.93  | -1.81  | -1.58  | -1.50  | -1.25  | -1.41  | -0.94  | -1.19  |

Tabela B.13 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B sem elitismo para a manobra 1 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 1 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.4200 | 0.3400 | 0.3800 | 0.3800 | 0.3100 | 0.3100 | 0.3800 | 0.3400 | 0.4200 | 0.3100 |
| 2   | 0.3300 | 0.2700 | 0.2200 | 0.2900 | 0.2400 | 0.3700 | 0.3500 | 0.3300 | 0.2500 | 0.2400 |
| 3   | 0.1600 | 0.5700 | 0.4600 | 0.3800 | 0.0500 | 0.2600 | 0.2300 | 0.3200 | 0.2800 | 0.5500 |
| 4   | 0.4900 | 0.0500 | 0.0700 | 0.1800 | 0.0900 | 0.1900 | 0.1800 | 0.0500 | 0.5600 | 0.2100 |
| 5   | 0.1600 | 0.2300 | 0.4300 | 0.3500 | 0.1000 | 0.3600 | 0.5500 | 0.2200 | 0.5600 | 0.2300 |
| 6   | 0.1400 | 0.2800 | 0.4400 | 0.2000 | 0.4100 | 0.3000 | 0.3400 | 0.2200 | 0.2500 | 0.1700 |
| 7   | 0.4400 | 0.5400 | 0.3200 | 0.2600 | 0.2000 | 0.5400 | 0.5500 | 1.0000 | 0.5100 | 0.5300 |
| 8   | 0.2300 | 0.1500 | 0.0400 | 0.0250 | 0.0900 | 0.2900 | 0.0015 | 0.1200 | 0.1100 | 0.6000 |
| 9   | 0.3900 | 0.2900 | 0.2900 | 0.4400 | 0.3500 | 0.5100 | 0.4800 | 0.3900 | 0.3900 | 0.2100 |
| 10  | 0.1100 | 0.3400 | 0.4400 | 0.3000 | 0.3400 | 0.2000 | 0.1300 | 0.2900 | 0.3200 | 0.6000 |
| 11  | 0.2300 | 0.4000 | 0.4700 | 0.1000 | 0.4200 | 0.0700 | 0.1100 | 0.0050 | 0.3700 | 0.3900 |
| FOótima   | -2.45  | -1.16  | -2.48  | -1.96  | -3.12  | -2.92  | -2.01  | -2.45  | -3.46  | -2.44  |

Tabela B.14 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B sem elitismo para a manobra 1 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 1 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.4200 | 0.3400 | 0.3800 | 0.3700 | 0.3100 | 0.2400 | 0.3800 | 0.3400 | 0.3600 | 0.3100 |
| 2   | 0.3300 | 0.2700 | 0.2200 | 0.3100 | 0.2400 | 0.3300 | 0.3500 | 0.3300 | 0.3000 | 0.2400 |
| 3   | 0.1600 | 0.5700 | 0.4600 | 0.4400 | 0.0500 | 0.5500 | 0.2300 | 0.3200 | 0.5400 | 0.5500 |
| 4   | 0.4900 | 0.0500 | 0.0700 | 0.3000 | 0.0900 | 0.5800 | 0.1800 | 0.0500 | 0.4900 | 0.2100 |
| 5   | 0.1600 | 0.2300 | 0.4300 | 0.5100 | 0.1000 | 1.0000 | 0.5500 | 0.2200 | 0.4000 | 0.2300 |
| 6   | 0.1400 | 0.2800 | 0.4400 | 0.2000 | 0.4100 | 0.1800 | 0.3400 | 0.2200 | 0.2500 | 0.1700 |
| 7   | 0.4400 | 0.5400 | 0.3200 | 0.3600 | 0.2000 | 0.1900 | 0.5500 | 1.0000 | 0.3900 | 0.5300 |
| 8   | 0.2300 | 0.1500 | 0.0400 | 0.2200 | 0.0900 | 0.3300 | 0.0015 | 0.1200 | 0.0050 | 0.6000 |
| 9   | 0.3900 | 0.2900 | 0.2900 | 0.4400 | 0.3500 | 0.3200 | 0.4800 | 0.3900 | 0.3700 | 0.2100 |
| 10  | 0.1100 | 0.3400 | 0.4400 | 0.2400 | 0.3400 | 0.4700 | 0.1300 | 0.2900 | 0.2700 | 0.6000 |
| 11  | 0.2300 | 0.4000 | 0.4700 | 0.1800 | 0.4200 | 0.1100 | 0.1100 | 0.0050 | 0.1900 | 0.3900 |
| FOótima   | -5.21  | -2.26  | -5.23  | -4.25  | -5.96  | -6.56  | -4.09  | -4.78  | -7.88  | -4.68  |

Tabela B.15 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B sem elitismo para a manobra 2 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 2 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.1600 | 0.3700 | 0.2300 | 0.2700 | 0.2800 | 0.2100 | 0.1800 | 0.2200 | 0.3900 | 0.2700 |
| 2   | 0.4500 | 0.1700 | 0.3700 | 0.2700 | 0.3600 | 0.3400 | 0.3600 | 0.4600 | 0.2600 | 0.3400 |
| 3   | 0.5700 | 0.3300 | 0.6100 | 0.0600 | 0.2900 | 0.4700 | 0.5800 | 0.0600 | 0.2600 | 0.0250 |
| 4   | 0.4800 | 0.4700 | 0.4900 | 0.0600 | 0.5800 | 0.1700 | 0.2400 | 0.4000 | 0.5000 | 0.5000 |
| 5   | 0.3800 | 0.3900 | 0.2500 | 0.3700 | 0.3100 | 0.4000 | 0.3200 | 0.3100 | 0.2600 | 0.3500 |
| 6   | 0.2600 | 0.2600 | 0.3700 | 0.2900 | 0.3200 | 0.2600 | 0.3200 | 0.3200 | 0.2900 | 0.2900 |
| 7   | 0.5000 | 0.2500 | 0.4500 | 0.1200 | 2.0000 | 0.2700 | 0.2300 | 0.5500 | 0.3500 | 0.4500 |
| 8   | 0.5100 | 0.5700 | 0.4500 | 0.0800 | 0.5100 | 0.4700 | 0.5200 | 0.5500 | 0.0400 | 0.2800 |
| 9   | 0.2100 | 0.2400 | 0.1100 | 0.4400 | 0.0400 | 0.5900 | 0.0900 | 0.1000 | 0.5000 | 0.2800 |
| 10  | 0.1500 | 0.3000 | 0.3300 | 0.3000 | 0.4200 | 0.3800 | 0.4000 | 0.1200 | 0.4000 | 0.0050 |
| 11  | 0.3500 | 0.3000 | 0.3100 | 0.2600 | 0.0050 | 0.2200 | 0.5900 | 0.1000 | 0.5000 | 0.1900 |
| FOótima   | -0.23  | -0.28  | -0.25  | -0.18  | -0.36  | -0.24  | -0.27  | -0.21  | -0.24  | -0.37  |

Tabela B.16 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração da rugosidade da Rede B sem elitismo para a manobra 2 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração da rugosidade |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 2 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho  | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1   | 0.2600 | 0.3000 | 0.1500 | 0.1800 | 0.2600 | 0.5300 | 0.3600 | 0.5100 | 0.3900 | 0.1900 |
| 2   | 0.4100 | 0.2900 | 0.3900 | 0.4900 | 0.2600 | 0.1400 | 0.2800 | 0.2100 | 0.2600 | 0.3400 |
| 3   | 0.1600 | 0.0700 | 0.3900 | 0.1800 | 0.4700 | 0.4700 | 0.0700 | 0.3600 | 0.2600 | 0.3800 |
| 4   | 0.4200 | 0.4500 | 0.1600 | 0.0400 | 1.0000 | 0.4900 | 0.3100 | 0.2700 | 0.5000 | 0.1600 |
| 5   | 0.1800 | 0.2400 | 0.6000 | 0.2300 | 0.4700 | 0.4000 | 0.3400 | 0.2200 | 0.2600 | 0.4100 |
| 6   | 0.4200 | 0.3600 | 0.2000 | 0.3900 | 0.2100 | 0.2200 | 0.3100 | 0.3000 | 0.2900 | 0.2500 |
| 7   | 0.4500 | 0.1100 | 0.5500 | 0.6100 | 0.2000 | 0.1900 | 0.0600 | 0.5400 | 0.3500 | 0.3300 |
| 8   | 0.5100 | 0.0900 | 0.1600 | 0.4800 | 0.2400 | 0.3500 | 0.1500 | 0.4400 | 0.0400 | 0.6000 |
| 9   | 0.3700 | 0.4400 | 0.1200 | 0.3200 | 0.1100 | 0.2700 | 0.3000 | 0.3800 | 0.5000 | 0.1600 |
| 10  | 0.1100 | 0.3200 | 0.4500 | 0.1700 | 0.5800 | 0.4300 | 0.1600 | 0.1200 | 0.4000 | 0.4100 |
| 11  | 0.5400 | 0.5000 | 0.1800 | 0.2000 | 0.1200 | 0.2800 | 0.0050 | 0.3100 | 0.5000 | 0.2400 |
| FOótima   | -0.97  | -0.91  | -0.81  | -1.23  | -1.18  | -0.92  | -1.25  | -1.14  | -1.17  | -1.37  |

Tabela B.17 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B com elitismo para a manobra 1 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 1 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0130 | 0.0130 | 0.0260 | 0.0220 | 0.0180 | 0.0160 | 0.0200 | 0.0350 | 0.0330 | 0.0200 |
| 2  | 0.0200 | 0.0300 | 0.0130 | 0.0200 | 0.0180 | 0.0150 | 0.0300 | 0.0240 | 0.0210 | 0.0290 |
| 3  | 0.0610 | 0.0460 | 0.0140 | 0.0620 | 0.0230 | 0.0120 | 0.0190 | 0.0470 | 0.0250 | 0.0350 |
| 4  | 0.0370 | 0.0270 | 0.0340 | 0.0100 | 0.0210 | 0.0300 | 0.0440 | 0.0350 | 0.0700 | 0.0220 |
| 5  | 0.0140 | 0.0330 | 0.0180 | 0.0510 | 0.0310 | 0.0230 | 0.0450 | 0.0170 | 0.0250 | 0.0500 |
| 6  | 0.0110 | 0.0350 | 0.0200 | 0.0500 | 0.0170 | 0.0130 | 0.0290 | 0.0100 | 0.0140 | 0.0370 |
| 7  | 0.0180 | 0.0230 | 0.0160 | 0.0470 | 0.0250 | 0.0120 | 0.0370 | 0.0380 | 0.0430 | 0.0350 |
| 8  | 0.0210 | 0.0460 | 0.0300 | 0.0280 | 0.0130 | 0.0380 | 0.0430 | 0.0450 | 0.0580 | 0.0300 |
| 9  | 0.0240 | 0.0150 | 0.0270 | 0.0230 | 0.0230 | 0.0150 | 0.0230 | 0.0150 | 0.0190 | 0.0350 |
| 10   | 0.0720 | 0.0130 | 0.0400 | 0.0390 | 0.0490 | 0.0660 | 0.0130 | 0.0100 | 0.0180 | 0.0100 |
| 11   | 0.0110 | 0.0170 | 0.0320 | 0.0420 | 0.0470 | 0.0610 | 0.0140 | 0.0230 | 0.0260 | 0.0200 |
| FOótima  | -28.95 | -30.49 | -17.49 | -17.65 | -10.23 | -25.72 | -21.44 | -30.54 | -23.79 | -20.45 |

Tabela B.18 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B com elitismo para a manobra 1 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 1 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0130 | 0.0210 | 0.0260 | 0.0220 | 0.0180 | 0.0160 | 0.0200 | 0.0350 | 0.0190 | 0.0200 |
| 2  | 0.0200 | 0.0290 | 0.0130 | 0.0200 | 0.0180 | 0.0150 | 0.0300 | 0.0240 | 0.0180 | 0.0290 |
| 3  | 0.0610 | 0.0480 | 0.0140 | 0.0620 | 0.0230 | 0.0120 | 0.0190 | 0.0470 | 0.0290 | 0.0350 |
| 4  | 0.0370 | 0.0110 | 0.0340 | 0.0100 | 0.0210 | 0.0300 | 0.0440 | 0.0350 | 0.0380 | 0.0220 |
| 5  | 0.0140 | 0.0330 | 0.0180 | 0.0510 | 0.0310 | 0.0230 | 0.0450 | 0.0170 | 0.0290 | 0.0500 |
| 6  | 0.0110 | 0.0330 | 0.0200 | 0.0500 | 0.0170 | 0.0130 | 0.0290 | 0.0100 | 0.0420 | 0.0370 |
| 7  | 0.0180 | 0.0230 | 0.0160 | 0.0470 | 0.0250 | 0.0120 | 0.0370 | 0.0380 | 0.0490 | 0.0350 |
| 8  | 0.0210 | 0.0100 | 0.0300 | 0.0280 | 0.0130 | 0.0380 | 0.0430 | 0.0450 | 0.0420 | 0.0300 |
| 9  | 0.0240 | 0.0450 | 0.0270 | 0.0230 | 0.0230 | 0.0150 | 0.0230 | 0.0150 | 0.0180 | 0.0350 |
| 10   | 0.0720 | 0.0100 | 0.0400 | 0.0390 | 0.0490 | 0.0660 | 0.0130 | 0.0100 | 0.0220 | 0.0100 |
| 11   | 0.0110 | 0.0170 | 0.0320 | 0.0420 | 0.0470 | 0.0610 | 0.0140 | 0.0230 | 0.0600 | 0.0200 |
| FOótima  | -68.27 | -51.58 | -37.30 | -32.54 | -18.43 | -52.94 | -42.48 | -70.51 | -43.77 | -41.83 |

Tabela B.19 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B com elitismo para a manobra 2 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Com elitismo - Manobra 2 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0130 | 0.0130 | 0.0340 | 0.0200 | 0.0180 | 0.0160 | 0.0200 | 0.0350 | 0.0190 | 0.0180 |
| 2  | 0.0170 | 0.0130 | 0.0370 | 0.0200 | 0.0180 | 0.0150 | 0.0250 | 0.0240 | 0.0220 | 0.0110 |
| 3  | 0.0330 | 0.0480 | 0.0400 | 0.0460 | 0.0110 | 0.0240 | 0.0360 | 0.0470 | 0.0280 | 0.0180 |
| 4  | 0.0400 | 0.0270 | 0.0680 | 0.0440 | 0.0220 | 0.0380 | 0.0440 | 0.0350 | 0.0580 | 0.0210 |
| 5  | 0.0450 | 0.0250 | 0.0180 | 0.0410 | 0.0400 | 0.0230 | 0.0300 | 0.0330 | 0.0330 | 0.0240 |
| 6  | 0.0410 | 0.0390 | 0.0200 | 0.0180 | 0.0290 | 0.0370 | 0.0290 | 0.0180 | 0.0240 | 0.0370 |
| 7  | 0.0340 | 0.0230 | 0.0320 | 0.0560 | 0.0650 | 0.0420 | 0.0550 | 0.0400 | 0.0430 | 0.0710 |
| 8  | 0.0290 | 0.0420 | 0.0380 | 0.0680 | 0.0250 | 0.0320 | 0.0150 | 0.0410 | 0.0580 | 0.0090 |
| 9  | 0.0240 | 0.0470 | 0.0270 | 0.0210 | 0.0190 | 0.0480 | 0.0130 | 0.0480 | 0.0200 | 0.0390 |
| 10   | 0.0390 | 0.0420 | 0.0160 | 0.0390 | 0.0630 | 0.0340 | 0.0550 | 0.0110 | 0.0180 | 0.0420 |
| 11   | 0.0110 | 0.0410 | 0.0320 | 0.0420 | 0.0110 | 0.0450 | 0.0150 | 0.0370 | 0.0300 | 0.0440 |
| FOótima  | -87.95 | -81.24 | -82.22 | -81.86 | -81.20 | -81.06 | -81.23 | -82.15 | -81.42 | -81.21 |

Tabela B.20 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B com elitismo para a manobra 2 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Com elitismo - Manobra 2 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50       |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Trecho   | 1°      | 2°      | 3°      | 4°      | 5°      | 6°      | 7°      | 8°      | 9°      | 10°     |
| 1  | 0.0150  | 0.0210  | 0.0170  | 0.0180  | 0.0140  | 0.0320  | 0.0200  | 0.0350  | 0.0190  | 0.0240  |
| 2  | 0.0170  | 0.0290  | 0.0210  | 0.0200  | 0.0210  | 0.0230  | 0.0250  | 0.0240  | 0.0210  | 0.0250  |
| 3  | 0.0370  | 0.0160  | 0.0130  | 0.0450  | 0.0110  | 0.0230  | 0.0360  | 0.0470  | 0.0280  | 0.0350  |
| 4  | 0.0400  | 0.0270  | 0.0380  | 0.0440  | 0.0510  | 0.0400  | 0.0440  | 0.0350  | 0.0340  | 0.0220  |
| 5  | 0.0450  | 0.0250  | 0.0540  | 0.0410  | 0.0390  | 0.0230  | 0.0300  | 0.0330  | 0.0330  | 0.0180  |
| 6  | 0.0410  | 0.0230  | 0.0200  | 0.0180  | 0.0190  | 0.0230  | 0.0290  | 0.0180  | 0.0240  | 0.0210  |
| 7  | 0.0340  | 0.0150  | 0.0480  | 0.0560  | 0.0320  | 0.0440  | 0.0550  | 0.0400  | 0.0430  | 0.0350  |
| 8  | 0.0140  | 0.0420  | 0.0300  | 0.0680  | 0.0290  | 0.0280  | 0.0150  | 0.0410  | 0.0600  | 0.0300  |
| 9  | 0.0240  | 0.0470  | 0.0280  | 0.0210  | 0.0230  | 0.0480  | 0.0130  | 0.0480  | 0.0200  | 0.0370  |
| 10   | 0.0400  | 0.0100  | 0.0240  | 0.0390  | 0.0430  | 0.0180  | 0.0550  | 0.0110  | 0.0200  | 0.0100  |
| 11   | 0.0110  | 0.0410  | 0.0310  | 0.0420  | 0.0470  | 0.0450  | 0.0150  | 0.0370  | 0.0600  | 0.0320  |
| FOótima  | -204.75 | -191.82 | -193.72 | -192.46 | -192.40 | -192.88 | -191.67 | -193.80 | -193.08 | -194.27 |

Tabela B.21 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B sem elitismo para a manobra 1 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 1 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0250 | 0.0250 | 0.0150 | 0.0130 | 0.0240 | 0.0240 | 0.0220 | 0.0230 | 0.0250 | 0.0260 |
| 2  | 0.0270 | 0.0110 | 0.0140 | 0.0220 | 0.0160 | 0.0200 | 0.0230 | 0.0210 | 0.0170 | 0.0140 |
| 3  | 0.0520 | 0.0680 | 0.0140 | 0.0110 | 0.0350 | 0.0380 | 0.0390 | 0.0290 | 0.0210 | 0.0410 |
| 4  | 0.0150 | 0.0160 | 0.0490 | 0.0460 | 0.0420 | 0.0270 | 0.0360 | 0.0150 | 0.0330 | 0.0280 |
| 5  | 0.0290 | 0.0410 | 0.0150 | 0.0260 | 0.0360 | 0.0400 | 0.0350 | 0.0380 | 0.0430 | 0.0250 |
| 6  | 0.0130 | 0.0270 | 0.0220 | 0.0490 | 0.0160 | 0.0220 | 0.0270 | 0.0270 | 0.0280 | 0.0240 |
| 7  | 0.0160 | 0.0470 | 0.0390 | 0.0300 | 0.0400 | 0.0490 | 0.0160 | 0.0090 | 0.0130 | 0.0230 |
| 8  | 0.0130 | 0.0360 | 0.0330 | 0.0240 | 0.0590 | 0.0140 | 0.0290 | 0.0120 | 0.0500 | 0.0470 |
| 9  | 0.0320 | 0.0170 | 0.0140 | 0.0180 | 0.0200 | 0.0280 | 0.0200 | 0.0250 | 0.0190 | 0.0230 |
| 10   | 0.0110 | 0.0480 | 0.0660 | 0.0310 | 0.0560 | 0.0280 | 0.0360 | 0.0510 | 0.0350 | 0.0540 |
| 11   | 0.0360 | 0.0720 | 0.0400 | 0.0320 | 0.0360 | 0.0370 | 0.0270 | 0.0160 | 0.0400 | 0.0440 |
| FOótima  | -17.08 | -16.42 | -14.51 | -17.21 | -12.23 | -15.47 | -13.33 | -17.38 | -18.09 | -15.41 |

Tabela B.22 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B sem elitismo para a manobra 1 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 1 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0250 | 0.0250 | 0.0150 | 0.0130 | 0.0240 | 0.0240 | 0.0220 | 0.0230 | 0.0250 | 0.0250 |
| 2  | 0.0270 | 0.0110 | 0.0140 | 0.0220 | 0.0160 | 0.0200 | 0.0230 | 0.0210 | 0.0190 | 0.0230 |
| 3  | 0.0520 | 0.0680 | 0.0140 | 0.0110 | 0.0350 | 0.0380 | 0.0390 | 0.0290 | 0.0210 | 0.0490 |
| 4  | 0.0150 | 0.0160 | 0.0490 | 0.0460 | 0.0420 | 0.0270 | 0.0360 | 0.0150 | 0.0380 | 0.0090 |
| 5  | 0.0290 | 0.0410 | 0.0150 | 0.0260 | 0.0360 | 0.0400 | 0.0350 | 0.0380 | 0.0470 | 0.0300 |
| 6  | 0.0130 | 0.0270 | 0.0220 | 0.0490 | 0.0160 | 0.0220 | 0.0270 | 0.0270 | 0.0280 | 0.0090 |
| 7  | 0.0160 | 0.0470 | 0.0390 | 0.0300 | 0.0400 | 0.0490 | 0.0160 | 0.0090 | 0.0460 | 0.0470 |
| 8  | 0.0130 | 0.0360 | 0.0330 | 0.0240 | 0.0590 | 0.0140 | 0.0290 | 0.0120 | 0.0500 | 0.0200 |
| 9  | 0.0320 | 0.0170 | 0.0140 | 0.0180 | 0.0200 | 0.0280 | 0.0200 | 0.0250 | 0.0190 | 0.0250 |
| 10   | 0.0110 | 0.0480 | 0.0660 | 0.0310 | 0.0560 | 0.0280 | 0.0360 | 0.0510 | 0.0330 | 0.0280 |
| 11   | 0.0360 | 0.0720 | 0.0400 | 0.0320 | 0.0360 | 0.0370 | 0.0270 | 0.0160 | 0.0390 | 0.0140 |
| FOótima  | -34.31 | -31.28 | -31.04 | -39.97 | -24.08 | -30.06 | -25.11 | -36.14 | -33.78 | -34.15 |

Tabela B.23 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B sem elitismo para a manobra 2 - 1 nó monitorado

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sem elitismo - Manobra 2 - 1 nó monitorado - NG50 - NC50         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Trecho   | 1°     | 2°     | 3°     | 4°     | 5°     | 6°     | 7°     | 8°     | 9°     | 10°    |
| 1  | 0.0250 | 0.0140 | 0.0270 | 0.0160 | 0.0210 | 0.0200 | 0.0180 | 0.0210 | 0.0300 | 0.0250 |
| 2  | 0.0280 | 0.0240 | 0.0190 | 0.0220 | 0.0140 | 0.0190 | 0.0210 | 0.0250 | 0.0280 | 0.0230 |
| 3  | 0.0270 | 0.0390 | 0.0130 | 0.0310 | 0.0180 | 0.0240 | 0.0160 | 0.0110 | 0.0690 | 0.0510 |
| 4  | 0.0370 | 0.0490 | 0.0610 | 0.0440 | 0.0160 | 0.0500 | 0.0400 | 0.0340 | 0.0680 | 0.0130 |
| 5  | 0.0240 | 0.0280 | 0.0250 | 0.0280 | 0.0240 | 0.0300 | 0.0230 | 0.0230 | 0.0220 | 0.0320 |
| 6  | 0.0240 | 0.0320 | 0.0250 | 0.0330 | 0.0350 | 0.0250 | 0.0340 | 0.0340 | 0.0190 | 0.0250 |
| 7  | 0.0090 | 0.0350 | 0.0340 | 0.0470 | 0.0260 | 0.0690 | 0.0340 | 0.0270 | 0.0290 | 0.0450 |
| 8  | 0.0100 | 0.0120 | 0.0090 | 0.0310 | 0.0700 | 0.0500 | 0.0120 | 0.0220 | 0.0520 | 0.0190 |
| 9  | 0.0260 | 0.0260 | 0.0360 | 0.0240 | 0.0500 | 0.0280 | 0.0440 | 0.0310 | 0.0420 | 0.0140 |
| 10   | 0.0090 | 0.0330 | 0.0230 | 0.0370 | 0.0660 | 0.0490 | 0.0260 | 0.0330 | 0.0100 | 0.0400 |
| 11   | 0.0400 | 0.0140 | 0.0230 | 0.0240 | 0.0360 | 0.0390 | 0.0350 | 0.0210 | 0.0400 | 0.0140 |
| FOótima  | -81.25 | -81.08 | -81.28 | -81.21 | -80.97 | -81.13 | -81.05 | -81.00 | -81.35 | -81.12 |

Tabela B.24 - Conjunto de 10 (dez) processamentos de calibração do fator de atrito da Rede B sem elitismo para a manobra 2 - 2 nós monitorados

| Conjunto de 10 processamentos para calibração do fator de atrito |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sem elitismo - Manobra 2 - 2 nós monitorados - NG50 - NC50       |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Trecho   | 1°      | 2°      | 3°      | 4°      | 5°      | 6°      | 7°      | 8°      | 9°      | 10°     |
| 1  | 0.0150  | 0.0200  | 0.0270  | 0.0170  | 0.0210  | 0.0180  | 0.0210  | 0.0240  | 0.0210  | 0.0250  |
| 2  | 0.0290  | 0.0220  | 0.0190  | 0.0230  | 0.0320  | 0.0250  | 0.0270  | 0.0230  | 0.0270  | 0.0160  |
| 3  | 0.0120  | 0.0310  | 0.0130  | 0.0500  | 0.0690  | 0.0240  | 0.0240  | 0.0220  | 0.0450  | 0.0480  |
| 4  | 0.0300  | 0.0500  | 0.0610  | 0.0580  | 0.0460  | 0.0440  | 0.0390  | 0.0230  | 0.0600  | 0.0250  |
| 5  | 0.0310  | 0.0260  | 0.0250  | 0.0270  | 0.0240  | 0.0370  | 0.0290  | 0.0230  | 0.0320  | 0.0290  |
| 6  | 0.0230  | 0.0320  | 0.0250  | 0.0210  | 0.0240  | 0.0260  | 0.0220  | 0.0310  | 0.0190  | 0.0240  |
| 7  | 0.0490  | 0.0360  | 0.0340  | 0.0320  | 0.0400  | 0.0110  | 0.0310  | 0.0380  | 0.0290  | 0.0460  |
| 8  | 0.0160  | 0.0120  | 0.0090  | 0.0380  | 0.0280  | 0.0450  | 0.0140  | 0.0500  | 0.0200  | 0.0450  |
| 9  | 0.0150  | 0.0120  | 0.0360  | 0.0170  | 0.0310  | 0.0160  | 0.0340  | 0.0190  | 0.0500  | 0.0150  |
| 10   | 0.0410  | 0.0590  | 0.0230  | 0.0540  | 0.0160  | 0.0460  | 0.0280  | 0.0430  | 0.0110  | 0.0580  |
| 11   | 0.0140  | 0.0380  | 0.0230  | 0.0290  | 0.0200  | 0.0120  | 0.0150  | 0.0380  | 0.0300  | 0.0470  |
| FOótima  | -192.12 | -192.46 | -191.73 | -192.68 | -191.91 | -191.88 | -191.70 | -191.95 | -192.10 | -192.38 |

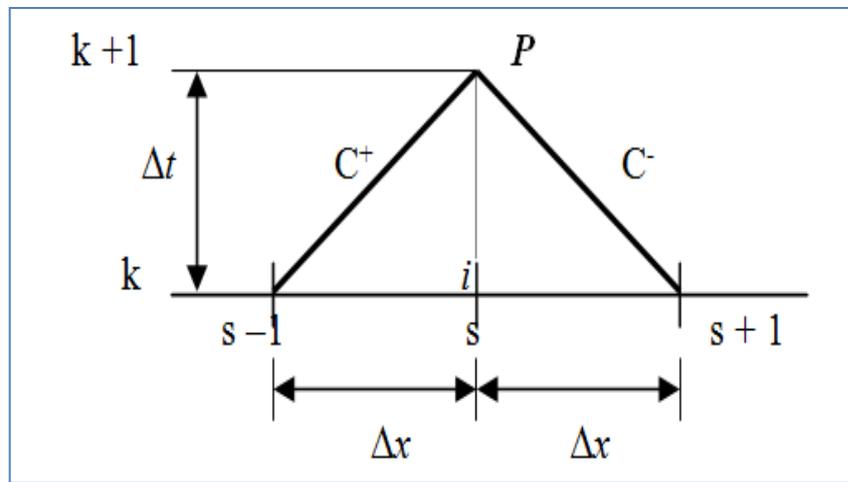
## ANEXO A

## CONDIÇÕES DE CONTORNO DA MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS (MOC)

## A.1 Seção Interna

Considere uma seção genérica  $s$  interna a um trecho  $i$  da tubulação. A Figura a.1 apresenta as linhas características e positiva e negativa no plano  $x-t$ .

Figura a.1 - Esquema de uma seção interna  $s$  de uma tubulação  $i$



Fonte: Araújo, 2003.

As equações características seriam:

$$C^+ = [H_{i,s}(k+1) - H_{i,s-1}(k)] + B_i[Q_{i,s}(k+1) - Q_{i,s-1}(k)] + R_i\Delta t Q_{i,s-1}(k)|Q_{i,s-1}(k)| = 0 \quad (a.1)$$

$$C^- = -[H_{i,s}(k+1) - H_{i,s+1}(k)] + B_i[Q_{i,s}(k+1) - Q_{i,s+1}(k)] + R_i\Delta t Q_{i,s+1}(k)|Q_{i,s+1}(k)| = 0 \quad (a.2)$$

Das equações (a.1) e (a.2), vem:

$$Q_{i,s}(k+1) = \frac{H_{i,s-1}(k)}{2B_i} - \frac{H_{i,s+1}(k)}{2B_i} + \frac{[B_i - R_i\Delta t|Q_{i,s-1}(k)|]}{2B_i} Q_{i,s-1}(k) + \frac{[B_i - R_i\Delta t|Q_{i,s+1}(k)|]}{2B_i} Q_{i,s+1}(k) \quad (a.3)$$

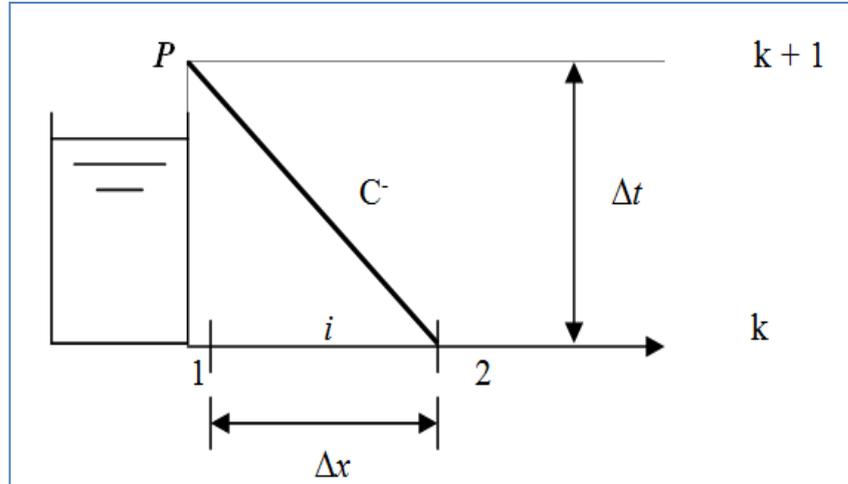
Substituindo a equação (a.3) na equação (a.1) ou na equação (a.2) teremos:

$$H_{i,s}(k+1) = \frac{H_{i,s-1}(k)}{2} + \frac{H_{i,s+1}(k)}{2} + \frac{[B_i - R_i\Delta t|Q_{i,s-1}(k)|]}{2} Q_{i,s-1}(k) - \frac{[B_i - R_i\Delta t|Q_{i,s+1}(k)|]}{2} Q_{i,s+1}(k) \quad (a.4)$$

## A.2 Reservatório de Nível Constante a Montante

Considerando um reservatório a nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica  $i$ , ver Figura a.2:

Figura a.2 - Esquema de um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica  $i$



Fonte: Araújo, 2003.

A equação característica negativa é dada por:

$$C^- = -[H_{i,1}(k+1) - H_{i,2}(k)] + B_i[Q_{i,1}(k+1) - Q_{i,2}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,2}(k) |Q_{i,2}(k)| = 0 \quad (\text{a.5})$$

Condições de Contorno:

$$H_{i,1}(k+1) = H_1 = \text{constante} \quad (\text{a.6})$$

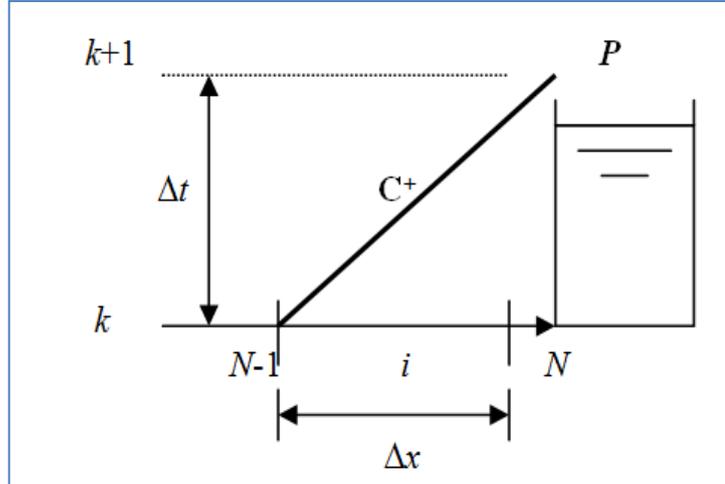
Das equações (a.5) e (a.6):

$$Q_{i,1}(k+1) = \frac{H_1}{B_i} - \frac{H_{i,2}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,2}(k)|]}{B_i} Q_{i,2}(k) \quad (\text{a.7})$$

## A.3 Reservatório com Nível Constante a Jusante

Considere um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica  $i$  (Figura a.3).

Figura a.3 - Esquema de um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica



Fonte: Araújo, 2003.

A equação característica positiva é dada por:

$$C^+ = [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i[Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| = 0 \quad (\text{a.8})$$

Contorno:

$$H_{i,N}(k+1) = H_N = \text{constante} \quad (\text{a.9})$$

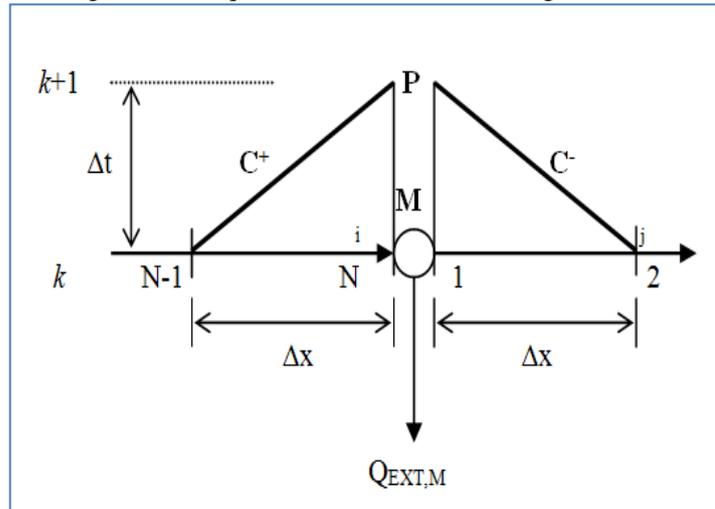
Das equações (a.8) e (a.9):

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_N}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (\text{a.10})$$

#### A.4 Nó de Consumo ou Demanda

Para um nó de consumo genérico M com vazão de demanda igual a  $Q_{EXT,M}$  e duas tubulações  $i$  e  $j$  representando as tubulações que chegam (conjunto  $N_1$  – sentido positivo) e as tubulações que saem (conjunto  $N_2$  – sentido negativo) do nó M respectivamente, ver Figura a.4.

Figura a.4 - Esquema de um nó de consumo genérico M.



Fonte: Araújo, 2003.

As equações características são dadas por:

$$C^+ = [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i[Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| = 0 \quad (\text{a.11})$$

$$C^- = -[H_{j,1}(k+1) - H_{j,2}(k)] + B_j[Q_{j,1}(k+1) - Q_{j,2}(k)] + R_j \Delta t Q_{j,2}(k) |Q_{j,2}(k)| = 0 \quad (\text{a.12})$$

Contorno:

$$\sum_{i \in N_1} Q_{i,N}(k+1) - \sum_{j \in N_2} Q_{j,1}(k+1) - Q_{EXT,M} = 0 \quad (\text{a.13})$$

$$H_{i,N}(k+1) = H_{j,1}(k+1) = H_m(k+1) \quad (\text{a.14})$$

Das equações (a.11) e (a.12):

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_{i,N}(k+1)}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (\text{a.15})$$

$$Q_{j,1}(k+1) = \frac{H_{j,1}(k+1)}{B_j} + \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + \frac{[B_j - R_j \Delta t |Q_{j,2}(k)|]}{B_j} Q_{j,2}(k) \quad (\text{a.16})$$

Substituindo as equações (a.15) e (a.16) na equação (a.13) e usando a equação (a.14):

$$\begin{aligned}
H_M(k+1) = & \\
& B_M \sum_{i \in N_1} \frac{H_{i,S-1}(k)}{B_i} + B_M \sum_{j \in N_2} \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + B_M \sum_{i \in N_1} \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) - \\
& BMj \in N_2 B_j - R_j \Delta t Q_{j,2}(k) B_j Q_{j,2}(k) - BMQ_{EXT,M}
\end{aligned} \tag{a.17}$$

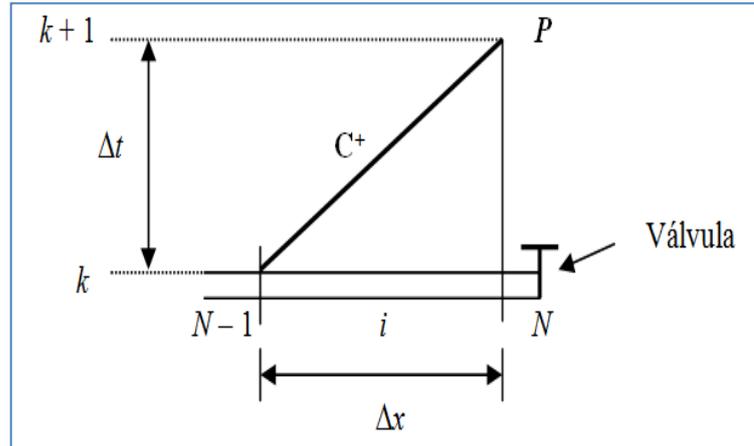
onde:

$$B_M = \left[ \sum_{i \in N_1} \frac{1}{B_i} + \sum_{j \in N_2} \frac{1}{B_j} \right]^{-1} \tag{a.18}$$

### A.5 Válvula a Jusante

Considerando uma válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica  $i$  da Figura a.5.

Figura a.5 - Válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica  $i$



Fonte - Araújo, 2003.

A equação característica positiva é dada por:

$$C^+ = [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| = 0 \tag{a.19}$$

O fluxo permanente através da válvula pode ser escrito como:

$$Q_{o,i,N} = (C_d A_v)_{o,i,N} \sqrt{2gH_{o,i,N}} \tag{a.20}$$

onde:

$Q$  = fluxo permanente [ $L^3T^{-1}$ ];

$o$  - indica condições de escoamento permanente;

$C_d$  - coeficiente de descarga [adimensional];

$A_v$  - área do orifício [ $L^2$ ];

$g$  - aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ];

$H_{o,i,N}$  - carga a montante da válvula [L];

Considerando que o escoamento transiente, quando na válvula, pode ser descrito por uma equação similar ao escoamento permanente, pode-se escrever:

$$Q_{i,N}(k+1) = (C_d A_v) \sqrt{2g H_{i,N}(k+1)} \quad (\text{a.21})$$

Dividindo a equação (a.21) pela equação (a.20) e elevando ao quadrado ambos os lados:

$$Q_{i,N}^2(k+1) = \frac{(Q_{o,i,N} \tau)^2}{H_{o,i,N}} H_{i,N}(k+1) \quad (\text{a.22})$$

onde a abertura ou fechamento relativo da válvula é dado por:

$$\tau = \frac{C_d A_v}{(C_d A_v)_o} \quad (\text{a.23})$$

Substituindo  $H_{i,N}(k+1)$  da equação (a.21) na equação (a.22), produz:

$$Q_{i,N}^2(k+1) + C_v Q_{i,N}(k+1) - C_{p_i} C_v = 0 \quad (\text{a.24})$$

onde:

$$C_v = (\tau Q_{o,i,N})^2 B_i / H_{o,i,N} \quad (\text{a.25})$$

$$C_{p_i} = \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + Q_{i,N-1}(k) - \frac{R_i}{B_i} \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| \quad (\text{a.26})$$

Resolvendo as equações (a.24) para  $Q_{i,N-1}(k+1)$  e desprezando o termo negativo em uma das raízes, vem:

$$Q_{i,N}(k+1) = 0,5(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{p_i}C_v}) \quad (\text{a.28})$$

$H_{i,N}(k+1)$  pode ser calculado, agora por meio da equação (a.19).