



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – RECURSOS HÍDRICOS

ALYSSON CESAR AZEVEDO DA SILVA

CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE RUGOSIDADES DE TUBULAÇÕES
EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM APLICAÇÃO DE
ALGORITMOS GENÉTICOS

FORTALEZA

2006

ALYSSON CESAR AZEVEDO DA SILVA

CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE RUGOSIDADES DE TUBULAÇÕES
EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM APLICAÇÃO DE
ALGORITMOS GENÉTICOS

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

2006

ALYSSON CESAR AZEVEDO DA SILVA

CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE RUGOSIDADES DE
TUBULAÇÕES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
COM APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Esta dissertação foi submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia – Área de Concentração em Recursos Hídricos.

Dissertação aprovada em 15 de dezembro de 2006

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D
Universidade Federal do Ceará - UFC

Profª. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - EESC / USP

À minha esposa Aspázia, meus pais Aldemir e Liduina, e meus irmãos Adriano, Neto, Aline e Amanda pela compreensão e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo milagre da vida.

Ao Prof. Dr. John Kenedy de Araújo, pela orientação durante o desenvolvimento dessa dissertação, sempre acreditando em meu potencial.

À Profa. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis e ao Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro, pela presença na banca examinadora, fato que engrandece e valoriza o presente trabalho.

Aos amigos André Bezerra, André Facó, Fábio Lavor, João Fernando, José Carlos Asfor, Rafael Aguiar, Roberto César e Vivaldo Nilo, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

A todos os colegas do Mestrado em Recursos Hídricos, em especial a Luis Henrique Magalhães por compartilhar seus conhecimentos em DELPHI, auxiliando na elaboração da rotina computacional.

A todos os professores e funcionários desta instituição que tiveram parte na minha formação, calcada na ética e profissionalismo.

“Feliz o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento; porque melhor é o lucro que ela dá do que o da prata, e melhor a sua renda do que o ouro mais fino. Mais preciosa é do que pérolas, e tudo o que podes desejar não é comparável a ela.”

RESUMO

A simulação das condições de equilíbrio hidráulico de uma rede de distribuição é uma das principais etapas na análise técnica de sistemas de abastecimento de água. Para que os modelos simuladores reproduzam com fidelidade o escoamento do fluido na rede, é fundamental que os parâmetros do sistema sejam identificados com precisão. Considerando o coeficiente de resistência das tubulações como a variável de maior dificuldade de determinação devido à sua característica dinâmica, é desenvolvida uma rotina computacional para calibração da rugosidade absoluta ou do coeficiente de *Hazen-Williams* de redes de distribuição, utilizando o método dos algoritmos genéticos como técnica de otimização. O modelo de calibração proposto permite a escolha de parâmetros de cálculo dos algoritmos genéticos, possibilitando uma análise comparativa entre métodos de substituição de indivíduos, operadores de seleção, mutação e recombinação (*crossover*), bem como uma avaliação da influência da quantidade de indivíduos da população inicial na qualidade das soluções encontradas. Os resultados da calibração realizada em uma rede hipotética apontam as vantagens e desvantagens dos principais parâmetros e operadores do método dos algoritmos genéticos, demonstrando que a pesquisa ampliou os conhecimentos sobre a técnica, contribuindo para a sua aplicação de forma mais eficiente.

Palavras-chave: calibração, rugosidade, redes de distribuição de água, algoritmos genéticos.

ABSTRACT

Simulation of hydraulic equilibrium conditions on distribution network is fundamental to technically analyze water supply systems. In order to reproduce reliable results on fluids flow by using simulation models it is very important that the system parameters are precisely evaluated. Considering the resistance coefficient of pipes as the most difficult variable to be determined due to its dynamic characteristics, it was developed a computational routine to calibrate the absolute roughness or Hazen-Williams coefficient of distribution networks, by applying the genetic algorithms method as an optimization technique. The calibration model proposed allows the choice of genetic operators, making possible a comparative study among chromosomes replacement methods, selection, mutation and crossover operators, as well as evaluating the influence of initial population size on the solution quality found. The calibration results achieved in a hypothetical network pointed the advantages and disadvantages of the main parameters and operators of genetic algorithms method, demonstrating that the research made the technical knowledge on the subject broader, thus contributing to a more efficient application of the method.

Keywords: calibration, roughness, water distribution networks, genetic algorithms.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Princípio da conservação de energia em condutos forçados.....	25
FIGURA 2.2 – Linha piezométrica real e simplificada.....	29
FIGURA 3.1 – Recombinação de um ponto.....	46
FIGURA 3.2 – Recombinação de dois pontos.....	47
FIGURA 3.3 – Recombinação de três pontos.....	47
FIGURA 3.4 – Recombinação simples para representação real.....	49
FIGURA 4.1 – Janela principal de entrada de dados do aplicativo CARTAG.....	56
FIGURA 4.2 – Fluxograma da rotina executada pelo EPANET <i>Toolkit</i>	61
FIGURA 4.3 – Fluxograma do processo de calibração do aplicativo CARTAG.....	62
FIGURA 4.4 – Rede de distribuição hipotética.....	63
FIGURA 4.5 – Exemplo de curva de distribuição normal das rugosidades calculadas.....	66
FIGURA 5.1 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.....	70
FIGURA 5.2 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.....	72
FIGURA 5.3 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.....	74
FIGURA 5.4 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição <i>steady-state</i>	76
FIGURA 5.5 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados por tipo de substituição de indivíduos (número de gerações = 100).....	77
FIGURA 5.6 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados por tipo de substituição de indivíduos (número de gerações = 1000).....	78
FIGURA 5.7 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por tipo de substituição de indivíduos (número de gerações = 100).....	78
FIGURA 5.8 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por tipo de substituição de indivíduos (número de gerações = 1000).....	79
FIGURA 5.9 – Comportamento da função objetivo média por tipo de substituição de indivíduos.....	79
FIGURA 5.10 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando seleção por torneio.....	82

FIGURA 5.11 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção roda da roleta. ...	84
FIGURA 5.12 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.	86
FIGURA 5.13 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.	88
FIGURA 5.14 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção <i>remainder stochastic sampling</i>	90
FIGURA 5.15 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, por operador de seleção (número de gerações = 100).	90
FIGURA 5.16 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, por operador de seleção (número de gerações = 1000).	91
FIGURA 5.17 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por operador de seleção (número gerações = 100).	92
FIGURA 5.18 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por operador de seleção (número gerações = 1000).	92
FIGURA 5.19 – Comportamento da função objetivo média por operador de seleção.	93
FIGURA 5.20 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação uniforme.	95
FIGURA 5.21 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação <i>Gaussiana</i>	97
FIGURA 5.22 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação limite.	99
FIGURA 5.23 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação não-uniforme.	101
FIGURA 5.24 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados por operador de mutação (número de gerações = 100).	102
FIGURA 5.25 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados por operador de mutação (número de gerações = 1000).	103
FIGURA 5.26 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por operador de mutação (número gerações = 100).	103
FIGURA 5.27 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por operador de mutação (número gerações = 1000).	104
FIGURA 5.28 – Comportamento da função objetivo média por operador de mutação.	104
FIGURA 5.29 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação mistura.	107
FIGURA 5.30 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação simples.	109

FIGURA 5.31 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação aritmético.	111
FIGURA 5.32 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação heurístico.	113
FIGURA 5.33 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando todos os operadores de recombinação.	115
FIGURA 5.34 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados por operador de recombinação (número de gerações = 100).	116
FIGURA 5.35 – Média e desvio padrão dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados por operador de recombinação (número de gerações = 1000).	116
FIGURA 5.36 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por operador de recombinação (número gerações = 100).	117
FIGURA 5.37 – Probabilidade de calibração do coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5%, por operador de recombinação (número gerações = 1000).	117
FIGURA 5.38 – Comportamento da função objetivo média por operador de recombinação.	118
FIGURA 5.39 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 200 indivíduos.	120
FIGURA 5.40 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 500 indivíduos.	121
FIGURA 5.41 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 1000 indivíduos.	123
FIGURA 5.42 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 2000 indivíduos.	124
FIGURA 5.43 – Média e desvio padrão das rugosidades absolutas calibradas por tamanho da população.	125
FIGURA 5.44 – Probabilidade de calibração das rugosidades absolutas com erro menor que 10%, por tamanho da população.	126
FIGURA 5.45 – Comportamento da função objetivo média por tamanho da população.	126
FIGURA B.1 – Formulário <i>FormPrincipal</i> do programa CARTAG.	176
FIGURA B.2 – Formulário <i>FormSobre</i> do programa CARTAG.	176

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 –Comparativo entre os métodos de otimização.	33
TABELA 3.1 – Conceitos Biológicos.	35
TABELA 3.2 – Variação de pressão na Seleção <i>Boltzmann</i>	40
TABELA 3.3 – Cálculo das probabilidades de seleção pela Roda da Roleta.....	41
TABELA 3.4 – Exemplo de seleção pelo método Roda da Roleta.	42
TABELA 3.5 – Exemplo de seleção por Amostragem Estocástica Universal.	43
TABELA 3.6 – Cálculo das probabilidades de seleção e quantidades esperadas.....	44
TABELA 3.7 - Exemplo de seleção por Amostragem Determinística.	45
TABELA 3.8 - Exemplo de seleção pelo método <i>Remainder Stochastic Sampling</i>	45
TABELA 3.9 – Indivíduos selecionados de acordo com a parte fracionária – <i>Remainder Stochastic Sampling</i> ..	46
TABELA 3.10 – Operadores de recombinação média aritmética e geométrica.	47
TABELA 3.11 – Métodos de otimização	53
TABELA 3.12 – Características dos algoritmos genéticos	53
TABELA 4.1 – Características físicas da rede de distribuição hipotética	63
TABELA 4.2 – Caracterização dos testes realizados para estudo comparativo.	65
TABELA 5.1 – Parâmetros dos algoritmos genéticos comuns para todas as alternativas.....	67
TABELA 5.2 – Demandas nodais para os cenários estudados.....	67
TABELA 5.3 – Pressões “observadas”, geradas sinteticamente pelo simulador hidráulico.....	68
TABELA 5.4 – Dados utilizados para análise dos tipos de substituição de indivíduos.	68
TABELA 5.5 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.....	69
TABELA 5.6 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.....	69
TABELA 5.7 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.....	70
TABELA 5.8 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.	71
TABELA 5.9 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.	71

TABELA 5.10 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.....	72
TABELA 5.11 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.....	73
TABELA 5.12 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.....	73
TABELA 5.13 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.....	74
TABELA 5.14 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição <i>steady-state</i>	75
TABELA 5.15 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição <i>steady-state</i>	75
TABELA 5.16 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando substituição <i>steady-state</i>	76
TABELA 5.17 – Dados utilizados para análise dos operadores de seleção.....	80
TABELA 5.18 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando seleção por torneio.....	80
TABELA 5.19 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando seleção por torneio.....	81
TABELA 5.20 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando seleção por torneio.....	81
TABELA 5.21 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção roda da roleta.....	82
TABELA 5.22 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção roda da roleta.....	83
TABELA 5.23 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção roda da roleta.....	83
TABELA 5.24 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.....	84
TABELA 5.25 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.....	85
TABELA 5.26 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.....	85
TABELA 5.27 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.....	86
TABELA 5.28 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.....	87

TABELA 5.29 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.	87
TABELA 5.30 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção <i>remainder stochastic sampling</i>	88
TABELA 5.31 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção <i>remainder stochastic sampling</i>	89
TABELA 5.32 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de seleção <i>remainder stochastic sampling</i>	89
TABELA 5.33 – Dados utilizados para análise dos operadores de mutação.	93
TABELA 5.34 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação uniforme.	94
TABELA 5.35 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação uniforme.	94
TABELA 5.36 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação uniforme.	95
TABELA 5.37 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação <i>Gaussiana</i>	96
TABELA 5.38 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação <i>Gaussiana</i>	96
TABELA 5.39 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação <i>Gaussiana</i>	97
TABELA 5.40 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação limite.	98
TABELA 5.41 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação limite.	98
TABELA 5.42 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação limite.	99
TABELA 5.43 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação não-uniforme.	100
TABELA 5.44 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação não-uniforme.	100
TABELA 5.45 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando mutação não-uniforme.	101
TABELA 5.46 – Dados utilizados para análise dos operadores de recombinação.	105
TABELA 5.47 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação mistura.	105
TABELA 5.48 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação mistura.	106

TABELA 5.49– Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação mistura.....	106
TABELA 5.50 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação simples.	107
TABELA 5.51 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação simples.	108
TABELA 5.52 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação simples.....	108
TABELA 5.53 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação aritmético.	109
TABELA 5.54 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação aritmético.	110
TABELA 5.55 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação aritmético.....	110
TABELA 5.56 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação heurístico.....	111
TABELA 5.57 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação heurístico.....	112
TABELA 5.58 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o operador de recombinação heurístico.	112
TABELA 5.59 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando todos os operadores de recombinação.	113
TABELA 5.60 – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando todos os operadores de recombinação.	114
TABELA 5.61 –Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando todos os operadores de recombinação.	114
TABELA 5.62 – Dados utilizados para análise do tamanho da população.	118
TABELA 5.63 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando população de 200 indivíduos.	119
TABELA 5.64 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 200 indivíduos.	119
TABELA 5.65 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 400 iterações, utilizando população de 500 indivíduos.	120
TABELA 5.66 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 500 indivíduos.	121
TABELA 5.67 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 200 iterações, utilizando população de 1000 indivíduos.	122
TABELA 5.68 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 1000 indivíduos.	122

TABELA 5.69 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando população de 2000 indivíduos. 123

TABELA 5.70 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 2000 indivíduos. 124

LISTA DE SÍMBOLOS

$[L]$	unidade de comprimento
$[M]$	unidade de massa
$[T]$	unidade de tempo
a	coeficiente dos escalonamentos linear e exponencial, limite inferior do intervalo de busca
A	matriz Jacobiana
b	coeficiente dos escalonamentos linear, exponencial e logarítmico, coeficiente da mutação não-uniforme, limite superior do intervalo de busca
c	coeficiente do escalonamento com truncamento sigma
C	demanda $[L^3T^{-1}]$, coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> $[L^{0,3698}T^{-1}]$, coeficiente do escalonamento linear
D	diâmetro da tubulação $[L]$
e	número de <i>Neper</i> , quantidade esperada
f	fator de atrito (adimensional), valor da aptidão
F	vetor balanço de massa acrescido de um fator de correção de vazão
g	aceleração da gravidade $[LT^{-2}]$, domínio da função objetivo
\bar{g}	valor médio da função objetivo
G	número da geração atual
H	energia mecânica $[L]$, vetor de incógnitas em termos de cota piezométrica
J_f	conjunto dos reservatórios conectados a um nó
J_i	conjunto dos nós conectados a um determinado nó
J_j	conjunto dos tubos conectados a um nó
k	taxa de elitismo
K	coeficiente de perda de carga localizada (adimensional)
L	comprimento da tubulação $[L]$
Log	Logaritmo
m	número de bits de um cromossomo na representação binária
n	quantidade de casas decimais na representação real de um cromossomo, número de participantes da seleção por torneio
N	número de indivíduos da população
p	pressão hidráulica $[ML^{-1}T^{-2}]$, probabilidade de seleção
P_o	pressão hidráulica observada $[ML^{-1}T^{-2}]$
P_c	pressão hidráulica calculada $[ML^{-1}T^{-2}]$
q	coeficiente do ordenamento exponencial

Q	vazão [L^3T^{-1}]
Re	número de <i>Reynolds</i> (adimensional)
r	número aleatório entre 0 e 1, utilizado nos operadores genéticos
T	coeficiente da seleção <i>Boltzmann</i> (adimensional)
V	velocidade [LT^{-1}]
x	inverso da derivada da perda de carga total [TL^{-2}]
y	fator de correção de vazão [L^3T^{-1}]
z	energia potencial [L], cota topográfica [L]
α	expoente do escalonamento exponencial, coeficiente da recombinação mistura (BLX- α)
β	coeficiente das recombinações mistura (BLX- α), aritmética e heurística
Δ	desvio absoluto
ΔH	energia dissipada [L]
∂	derivada parcial
ε	rugosidade absoluta da tubulação [L]
ϕ	função
γ	peso específico [$ML^{-2}T^{-2}$], coeficiente do escalonamento normalizado
λ	perda de carga localizada [L]
ν	viscosidade cinemática [L^2T^{-1}]
σ	desvio padrão
Σ	somatório

Subscritos

i	nó, cromossomo, indivíduo, índice de vetor e matriz
j	nó, tubo, indivíduo, cenário de demanda, índice de matriz
min	valor mínimo
max	valor máximo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Histórico	21
1.2 Justificativa.....	22
1.3 Objetivo.....	22
2 MODELOS DE SIMULAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA....	24
2.1 Formulação Matemática do Equilíbrio Hidráulico	24
2.2 Métodos de Resolução das Condições de Equilíbrio Hidráulico.....	27
2.3 Calibração de Sistemas de Distribuição de Água	28
2.4 Técnicas de Calibração.....	30
2.4.1 Métodos Explícitos.....	30
2.4.2 Métodos Implícitos.....	31
3 ALGORITMOS GENÉTICOS	34
3.1 Introdução.....	34
3.2 Representação dos parâmetros.....	35
3.3 População Inicial	36
3.4 Função Objetivo e Cálculo da Aptidão.....	36
3.4.1 Ordenamento	37
3.4.2 Escalonamento.....	37
3.5 Seleção	40
3.5.1 Torneio	41
3.5.2 Roda da Roleta	41
3.5.3 Amostragem Estocástica Universal.....	43
3.5.4 Amostragem Determinística	44
3.5.5 Remainder Stochastic Sampling.....	45
3.6 Recombinação (Crossover).....	46
3.6.1 Média.....	47
3.6.2 Mistura (BLX- α).....	48

3.6.3 Aritmética.....	48
3.6.4 Heurística.....	48
3.6.5 Simples.....	48
3.7 Mutação.....	49
3.7.1 Uniforme.....	49
3.7.2 Gaussiana.....	49
3.7.3 Limite.....	50
3.7.4 Não Uniforme.....	50
3.7.5 Não Uniforme Múltipla.....	51
3.8 Substituição de Indivíduos.....	51
3.8.1 Geracional.....	51
3.8.2 Steady-State.....	51
3.9 Convergência.....	52
3.10 Vantagens e Aplicações dos Algoritmos Genéticos.....	52
4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA APLICADA PARA RESOLUÇÃO.....	55
4.1 Definição do problema.....	55
4.2 Módulo de calibração.....	55
4.3 Simulador hidráulico e a interface com o CARTAG.....	59
4.4 Rede Hipotética.....	62
4.5 Análise e precisão da calibração.....	64
4.6 Análise de operadores dos algoritmos genéticos.....	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1 Análise dos tipos de substituição de indivíduos.....	68
5.1.1 Geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.....	68
5.1.2 Geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.....	71
5.1.3 Geracional, com espaço amostral ampliado.....	73
5.1.4 Steady-State.....	75
5.1.5 Análise comparativa entre as alternativas de substituição de indivíduos.....	77
5.2 Análise dos operadores de seleção.....	80
5.2.1 Torneio.....	80

5.2.2 Roda da Roleta	82
5.2.3 Amostragem Estocástica Universal	84
5.2.4 Amostragem Determinística	86
5.2.5 Remainder Stochastic Sampling	88
5.2.6 Análise comparativa entre os operadores de seleção	90
5.3 Análise dos operadores de mutação	93
5.3.1 Uniforme	93
5.3.2 Gaussiana.....	96
5.3.3 Limite	98
5.3.4 Não-Uniforme	100
5.3.5 Análise comparativa entre os operadores de mutação	102
5.4 Análise dos operadores de recombinação.....	105
5.4.1 Mistura (BLX- α).....	105
5.4.2 Simples.....	107
5.4.3 Aritmético.....	109
5.4.4 Heurístico	111
5.4.5 Todos (média aritmética e geométrica, mistura, simples, aritmético e heurístico).....	113
5.4.6 Análise comparativa entre os operadores de recombinação	115
5.5 Análise do tamanho da população	118
5.5.1 População de 200 indivíduos.....	119
5.5.2 População de 500 indivíduos.....	120
5.5.3 População de 1000 indivíduos.....	121
5.5.4 População de 2000 indivíduos.....	123
5.5.5 Análise comparativa entre as alternativas de tamanho da população	124
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
APÊNDICE A – ARQUIVOS DE ENTRADA DE RESULTADOS DO CARTAG	135
APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA CARTAG	140

1 INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

Dentre os recursos naturais, o mais importante para o bem-estar da humanidade é a água, por ser um elemento indispensável à vida. A essencialidade da água já se fazia notar nos povos primitivos que se estabeleciam nas margens de fontes hídricas como rios e lagos, visando garantir sua subsistência.

Com o desenvolvimento de alguns povos primitivos, surgiram as civilizações antigas (Roma, Grécia, Egito, etc.), que se mostraram preocupadas com o transporte de água até o ponto de consumo, haja vista os aquedutos construídos com a finalidade de distribuí-la para a população em cisternas, tanques, banhos públicos, etc.

À medida que as civilizações evoluíam, os sistemas de distribuição foram se adequando às necessidades da época. Nesse processo, os condutos livres começaram a ser substituídos por tubulações sob pressão; as redes, que a princípio eram ramificadas, foram formando malhas e equipamentos foram sendo inseridos na rede para melhorar seu controle e operação. Sendo assim, uma rede de distribuição de água pode ser definida como um conjunto de tubulações, conexões, válvulas, registros, bombas, reservatórios (de distribuição ou compensação), cujo objetivo é o abastecimento das unidades de consumo por meio de ramais de ligação.

A crescente demanda, ocasionada pelo aumento populacional e desenvolvimento industrial ocorrido nas últimas décadas, tem tornado as estruturas das redes hidráulicas mais complexas, exigindo uma análise mais precisa do comportamento hidráulico de tais sistemas de distribuição.

1.2 Justificativa

A simulação do comportamento hidráulico de uma rede de distribuição de água é de fundamental importância na elaboração de projetos e na fase de operação, pois fornece resultados que indicam se o sistema atende, com pressões adequadas, às diversas condições operacionais. A qualidade dos resultados obtidos na simulação hidráulica depende da precisão com que as características físicas do sistema são determinadas.

Dentre as características da rede de distribuição, a rugosidade da tubulação é um dos parâmetros decisivos para a análise da situação do sistema, tendo em vista a possibilidade de se identificar trechos críticos que necessitem de serviços como: limpeza, desobstrução ou substituição. Entretanto a calibração das rugosidades dos tubos de uma rede é uma tarefa difícil e onerosa. Diante disso, observou-se, a partir de alguns trabalhos (WALSKI, 1983a; ORMSBEE, 1989; SAVIC e WALTERS, 1997; GAMBALE, 2000 e ARAÚJO, 2003), a evolução das técnicas de calibração, dentre as quais se destaca o método dos algoritmos genéticos.

Apesar das pesquisas realizadas, faz-se necessária a elaboração de estudos mais aprofundados objetivando o aperfeiçoamento do método dos algoritmos genéticos como ferramenta de calibração. Esse fato motivou a construção de um programa de calibração automática de rugosidades que pudesse ser aplicado a qualquer rede de distribuição e que fornecesse dados consistentes para a avaliação dos parâmetros e operadores de cálculo dos algoritmos genéticos.

1.3 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo principal desenvolver um aplicativo para a calibração automática das rugosidades absolutas ou dos coeficientes de *Hazen-Williams* de redes de distribuição em geral, utilizando algoritmos genéticos para a minimização dos desvios entre pressões observadas e simuladas em escoamento permanente.

Considerando a diversidade de parâmetros e operadores genéticos, a pesquisa propõe um estudo comparativo entre métodos de substituição de indivíduos, operadores de seleção, mutação e recombinação (*crossover*), além da quantidade de indivíduos da população inicial, a fim de analisar a influência da escolha do operador na qualidade do resultado.

Diante disso, a rotina computacional idealizada consiste em um simulador hidráulico acoplado a um módulo otimizador flexível que permita a escolha de parâmetros de

cálculo dos algoritmos genéticos como: tamanho da população, função objetivo, tipo de substituição de indivíduos, método de cálculo da aptidão, operadores de seleção, recombinação e mutação; e que possibilite a calibração de qualquer rede de distribuição.

Para avaliar a eficiência do módulo otimizador e dos operadores genéticos, o programa é testado em uma rede hipotética da literatura, possibilitando a comparação entre as soluções encontradas e os valores “reais” (simulados) de pressão e rugosidade.

2 MODELOS DE SIMULAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

O conhecimento das características do escoamento do fluido, o seu comportamento, bem como dos principais parâmetros envolvidos é imprescindível para uma melhor compreensão do processo de calibração de sistemas de distribuição de água.

As técnicas de simulação hidráulica têm por objetivo reproduzir o comportamento de fluidos em condutos forçados, através de modelos matemáticos que representam as leis físicas que regem o fenômeno.

Observa-se que os simuladores hidráulicos são de fundamental importância na análise de sistemas de abastecimento de água, sendo empregados na fase de projeto para dimensionamento de unidades, ampliação ou reabilitação de redes; e durante a operação subsidiando estudos de setorização, monitoramento de pressões por aumento de demandas e controle de perdas.

2.1 Formulação Matemática do Equilíbrio Hidráulico

Os modelos hidráulicos caracterizam as condições de equilíbrio da rede baseados nas duas leis fundamentais da mecânica dos fluidos: a da conservação da massa e da conservação de energia, bem como na relação entre a vazão (ou velocidade) e a perda de carga (ou energia dissipada).

A lei da conservação de massa pode ser traduzida pela equação 2.1 aplicada a cada nó do sistema.

$$\sum_{j \in J_j} (Q_{ij}) - C_i = 0 \quad (2.1)$$

Sendo J_j o conjunto de tubos conectados ao nó i , C_i a demanda do nó i e Q_{ij} a vazão de chegada no nó i pelo tubo j , que é negativa caso a vazão seja efluente.

A equação 2.2 representa a lei da conservação de energia que deve ser utilizada em cada trecho da tubulação em escoamento permanente.

$$H = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + \Delta H \quad (2.2)$$

Onde:

H é a energia mecânica por unidade de peso $[L]$;

z é a energia potencial por unidade de peso $[L]$;

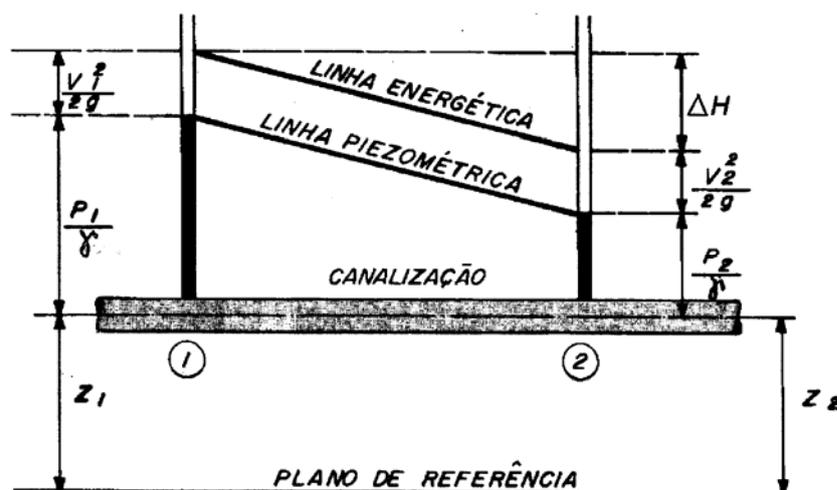
$\frac{V^2}{2g}$ é a energia cinética por unidade de peso $[L]$;

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

ΔH é a energia dissipada por unidade de peso $[L]$, devido à fricção das partículas fluidas entre si e das partículas fluidas com a parede interna do tubo.

Sendo V a velocidade do escoamento $[LT^{-1}]$, g a aceleração da gravidade $[LT^{-2}]$, p a pressão do fluido $[ML^{-1}T^{-2}]$ e γ o seu peso específico $[ML^{-2}T^{-2}]$.

A figura 2.1 ilustra o princípio da conservação de energia, em um líquido que flui do ponto 1 para o ponto 2 de uma tubulação, em regime permanente e uniforme, onde se observa a energia dissipada ou perda de carga (ΔH) pela diminuição da pressão estática do escoamento.



Fonte: PEDRAZZI (2003).

FIGURA 2.1 – Princípio da conservação de energia em condutos forçados.

A determinação da perda de carga distribuída para qualquer escoamento incompressível pode ser feita pela fórmula de *Darcy-Weisbach* apresentada a seguir:

$$\Delta H = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

onde L é o comprimento da tubulação [L], D o seu diâmetro [L] e f o fator de atrito (adimensional). O fator de atrito é função do número de *Reynolds* (R_e) e da rugosidade relativa.

$$f = \phi \left(R_e; \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad (2.4 \text{ a})$$

onde:
$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.4 \text{ b})$$

sendo ν a viscosidade cinemática [$L^2 T^{-1}$] que varia com o tipo de fluido e sua temperatura; e ε a rugosidade absoluta da tubulação [L].

Para escoamento laminar, onde $R_e \leq 2000$, o fator de atrito (f) não depende da rugosidade da parede interna do tubo, e é calculado pela fórmula de *Hagen-Poiseuille* (BHAVE, 1991):

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (2.5)$$

Nos casos de escoamento turbulento, em que $R_e \geq 4000$, utiliza-se a fórmula explícita aproximada de SWAMEE e JAIN (1976) para resolver a equação de *Colebrook-White* (BHAVE, 1991):

$$f = \frac{0,25}{\left[\text{Log} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.6)$$

Para escoamento de transição, onde $2000 < R_e < 4000$, utiliza-se o ábaco de MOODY (1944).

Outro método de cálculo da perda de carga distribuída é a equação de *Hazen-Williams* (2.7), que, apesar de ser uma expressão empírica e seu emprego se restringir ao escoamento de água, é largamente utilizada devido à simplicidade de execução dos cálculos.

$$\Delta H = 6,815 \cdot \frac{L}{D^{1,167}} \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^{1,8518} \quad (2.7)$$

Sendo C o coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* [$L^{0,3698} T^{-1}$].

Em toda rede de distribuição existem descontinuidades na tubulação, também chamadas de singularidades, que podem ser peças especiais de mudança de direção (curva, tê), de alteração de velocidade (redução, registro), etc. Essas singularidades geram uma turbulência adicional, e conseqüentemente uma dissipação de energia adicional, denominada perda de carga localizada, que geralmente pode ser expressa pela equação 2.8.

$$\lambda = K \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.8)$$

Onde λ é a perda de carga localizada e K é o coeficiente de perda de carga localizada obtido experimentalmente para cada peça ou conexão.

Outra forma de se calcular a perda de carga localizada é pelo método dos comprimentos equivalentes, que consiste em adicionar à extensão da tubulação comprimentos fictícios que correspondam à mesma perda de carga ocasionada pelas singularidades.

2.2 Métodos de Resolução das Condições de Equilíbrio Hidráulico

A análise das condições de equilíbrio de redes ramificadas é um problema trivial de hidráulica, exigindo apenas a resolução das equações de continuidade nos nós, onde são calculadas as vazões separadamente para cada trecho da rede, seguida da utilização da relação vazão e perda de carga, para determinação das cotas piezométricas dos nós.

O cálculo hidráulico das redes de distribuição malhadas constituídas por j tubos e i nós, é expresso pela resolução de j equações relativas a perda de carga nos tubos e i equações de continuidade nos nós.

Tendo em vista a não linearidade das j equações de perda de carga, o cálculo de redes malhadas se torna complicado, incentivando o surgimento de diversos métodos numéricos para resolução do problema.

O método de HARDY-CROSS (1936) é a técnica mais antiga e de maior popularidade para o cálculo das condições de equilíbrio hidráulico de sistemas de distribuição de água, sendo praticamente o único método utilizado antes do advento dos computadores. Trata-se de um processo iterativo, no qual uma única equação do sistema é resolvida a cada iteração, que se repete até que a convergência seja obtida dentro de uma tolerância estabelecida.

MARTIN e PETERS (1963) aplicaram pela primeira vez o método numérico de *Newton-Raphson* para a determinação das condições de equilíbrio hidráulico de um sistema de distribuição de água. De acordo com o método proposto, a solução matemática do

problema é obtida através da resolução iterativa de um sistema de equações lineares, resultando em um aumento da eficiência de convergência, com relação ao método de *Hardy-Cross*.

WOOD e CHARLES (1972) propuseram o método da Teoria Linear, que se baseia na resolução simultânea do sistema de equações, pela linearização das equações de conservação de energia, em função de um valor aproximado de vazão em cada trecho da rede. A solução obtida para valores de vazão é utilizada para a resolução do sistema de equações da iteração seguinte. O processo se repete até que as variações de vazões entre duas iterações consecutivas sejam inferiores a uma tolerância pré-definida. Dentre as vantagens desta técnica destacam-se: a facilidade de programação e a alta velocidade de convergência.

2.3 Calibração de Sistemas de Distribuição de Água

As equações matemáticas que determinam as condições de equilíbrio hidráulico dependem de parâmetros que identificam as características do fluido transportado como: peso específico (γ) e viscosidade cinemática (ν); da geografia da região na qual o sistema está inserido como: cota (z) e demanda (C_i) dos nós; e dos aspectos físicos do sistema de distribuição como: comprimento (L), diâmetro (D) e rugosidade (ε e C) da tubulação; e tipo de conexões existentes.

O processo de identificação dos parâmetros necessários para que a simulação hidráulica de redes de distribuição de água represente com fidelidade o comportamento do sistema é denominado de calibração. Considerando a grande quantidade de variáveis envolvidas na análise de sistemas de abastecimento de água, a precisão com que as mesmas são obtidas é um fator determinante para a confiabilidade dos modelos hidráulicos.

O peso específico (γ) e a viscosidade cinemática (ν) do fluido são variáveis identificadas experimentalmente cujos resultados, já consolidados para diversos tipos de fluido, estão disponibilizados em manuais de hidráulica.

As técnicas comumente utilizadas para a determinação das cotas dos nós são o levantamento topográfico e a restituição aerofotogramétrica da região, enquanto que o comprimento (L) e diâmetro (D) da tubulação, bem como os tipos de conexões existentes, podem ser obtidos por meio de planta cadastral.

Em redes de distribuição, as demandas nodais podem ser determinadas pelo sistema de micromedição das unidades consumidoras. Esse método apresenta dados

imprecisos devido ao volume de água não computado referente a vazamentos, consumo operacional, sub-medição dos hidrômetros e ligações clandestinas. Outro fator que contribui para a imprecisão dos cálculos é a simplificação de se admitir os consumos pontualmente nos extremos de montante e jusante de cada trecho, quando na realidade as ligações prediais, ou seja, os pontos de consumo, estão distribuídos ao longo da rede, como apresentado na figura 2.2 a seguir.

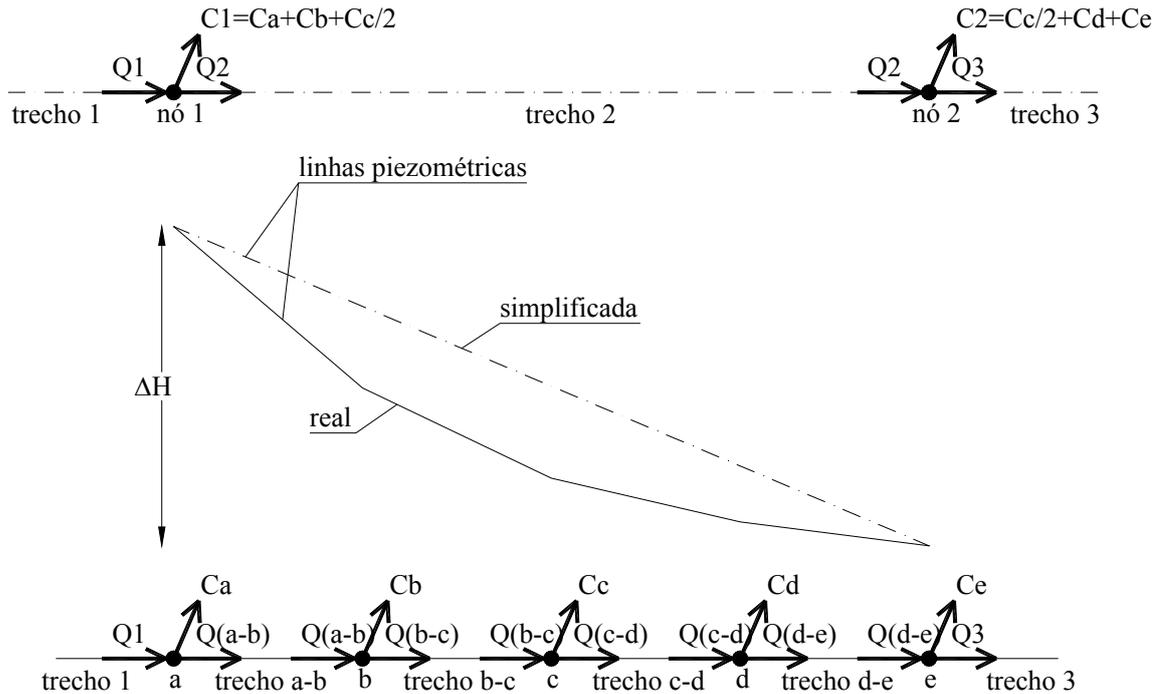


FIGURA 2.2 – Linha piezométrica real e simplificada.

Para macro-sistemas adutores de água, os consumos dos nós (C_i) podem ser obtidos por meio de macromedidores instalados nos pontos onde as linhas de adução alimentam os sistemas de distribuição.

Dentre os parâmetros necessários à reprodução do comportamento hidráulico das redes, o de mais difícil identificação é a rugosidade dos trechos de um sistema de distribuição, tendo em vista sua característica dinâmica, que exige um levantamento abrangente e contínuo sobre todo o sistema (ZAHED FILHO, 1990).

CHEUNG e SOUZA (2001) destacam que as técnicas de calibração estão divididas em duas categorias: aquelas que calculam apenas as rugosidades dos tubos, e as que calculam simultaneamente as rugosidades e as demandas dos nós.

O cálculo da rugosidade em redes de distribuição se torna complexo devido às incertezas dos dados de demanda nodal, à grande quantidade de pontos de consumo e ao relevante número de peças e conexões ocasionando perdas localizadas. Diante disso a

calibração simultânea das rugosidades dos tubos e dos consumos dos nós é a mais adequada em redes de distribuição.

Em macro-sistemas de distribuição de água, as rugosidades podem ser estimadas com melhor precisão devido à consistência dos dados de consumo dos nós. Neste caso o sistema deve ser dividido em segmentos homogêneos, onde cada trecho da tubulação a ser calibrada deve possuir as mesmas características como: tipo de material, diâmetro e idade. Após a identificação dos trechos homogêneos, inicia-se o processo de calibração a partir de dados de vazões e pressões observados.

2.4 Técnicas de Calibração

2.4.1 Métodos Explícitos

Os parâmetros envolvidos nos modelos matemáticos que reproduzem o equilíbrio hidráulico da rede podem ser obtidos de forma explícita, por meio da resolução analítica do sistema de equações não lineares. Essa metodologia exige que o número de medidas de pressões e/ou vazões seja igual ao número de parâmetros desconhecidos.

A técnica proposta por WALSKI (1983a, 1983b, 1986) baseia-se no agrupamento de tubos equivalentes onde o coeficiente de perda de carga dos mesmos é calculado analiticamente, a partir de vazões e pressões observadas em hidrantes para duas condições de escoamento distintas. BHAVE (1988) aplicou essa técnica utilizando um fator de ajuste global na correção dos coeficientes de rugosidade dos tubos.

ORMSBEE e WOOD (1986) desenvolveram algoritmos de calibração em função da velocidade e/ou diâmetro, que resolvem analiticamente as equações da rede, gerando fatores de ajuste das rugosidades dos tubos, a partir de vazões e pressões observadas durante testes de incêndio realizados sob determinadas condições de contorno. Esse modelo foi aperfeiçoado por BOULOS e ORMSBEE (1991), que ampliaram o método realizando diversos testes de incêndio para diferentes condições de contorno.

O modelo apresentado por BOULOS e WOOD (1990) determina explicitamente os valores ótimos dos parâmetros de projeto, operação e calibração de redes de distribuição de água, que podem ser calculados para identificação das restrições específicas de vazão e pressão sob um grande intervalo de condições de operação.

FERRERI, NAPOLI e TUMBILOLO (1994) desenvolveram uma técnica para análise dos coeficientes de resistência de tubulações de uma rede de distribuição de água

utilizando o método de *Newton-Raphson* para calibração e uma matriz de sensibilidade para determinação da rede de amostragem. Os autores concluíram que o melhor período para obtenção de dados de vazões e pressões é o noturno.

CHEUNG (2001) elaborou um estudo comparativo entre as técnicas de calibração apresentadas por WALSKI (1983a), BHAVE (1988) e BOULOS e WOOD (1990). Nesse estudo, CHEUNG propôs a utilização do simulador hidráulico desenvolvido por SOUZA (1994) e a generalização do método apresentado por BOULOS e WOOD (1990).

2.4.2 Métodos Implícitos

Os métodos implícitos consistem na minimização de uma função objetivo que, em geral, é o módulo da diferença entre os valores de dados observados e calculados de pressão e/ou vazão do sistema de distribuição de água.

O modelo implícito desenvolvido por ORMSBEE (1989) utiliza uma técnica de otimização não linear para a calibração da rugosidade das tubulações com base em condições de carga em regime permanente e para período de operação estendido. Apesar da facilidade de compreensão e implementação da rotina de otimização empregada pelo autor, esse método é capaz de operar funções não convexas.

LANSEY e BASNET (1991) apresentaram uma aproximação similar à de ORMSBEE (1989) utilizando programação não linear para identificar coeficientes de rugosidade, abertura de válvulas e demandas nodais de uma rede hidráulica. Os autores elaboraram um estudo comparativo minimizando duas funções objetivo, na qual o erro quadrático apresentou maior velocidade de convergência que o erro absoluto.

O coeficiente de resistência das tubulações foi ajustado por DATTA e SRIDHARAN (1994) através da minimização da soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e calculados, considerando diferentes condições de carregamento hidráulico. Com o uso de técnica de sensibilidade foram analisadas as incertezas dos valores estimados.

REDDY, SRIDHARAN e RAO (1996) propuseram a técnica de minimização de *Gauss-Newton* ao método dos mínimos quadrados para estimativa da rugosidade dos tubos utilizando uma sistemática de adoção de pesos na função objetivo, que variam ao longo do processo de otimização.

Para calibração de redes de distribuição mais complexas, SAVIC e WALTERS (1997) apresentaram a técnica estocástica dos algoritmos genéticos, que se baseia no processo

de seleção natural descrito por *Darwin*. Nesse trabalho os coeficientes de rugosidade de uma rede real foram identificados pelo método dos algoritmos genéticos, que apresentou melhores resultados que os procedimentos de tentativa e erro.

REIS, PORTO E CHAUDHRY (1997) desenvolveram um estudo para a localização ótima de válvulas de controle de pressão em uma rede de abastecimento de água visando a redução de vazamentos, considerando as demandas dos nós e os níveis dos reservatórios. Aplicando os algoritmos genéticos como técnica de otimização, os autores obtiveram uma eficiência no controle de vazamentos com poucas válvulas situadas em pontos ótimos.

A análise do método dos algoritmos genéticos para calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* de uma rede hipotética, foi feita por GAMBALE (2000) utilizando o simulador hidráulico EPANET 1.1 e o modelo otimizador desenvolvido pelo autor (CAAIGen). Essa pesquisa conclui que a dimensão da população de soluções influencia significativamente na qualidade dos resultados obtidos e que não é necessário efetuar o monitoramento de todos os nós de uma rede para calibrá-la. O autor sugere pesquisas complementares visando o aperfeiçoamento da calibração como a variação não proporcional das demandas nodais, e da aplicação dos algoritmos genéticos como o estudo comparativo entre funções objetivo, tipos de seleção, tipos de codificação, tipos de recombinação e probabilidades de recombinação e mutação.

Os algoritmos genéticos também são utilizados como ferramenta de otimização nos trabalhos de De SCHAEZTEN *et al.* (2000) para identificação de rugosidades absolutas, diâmetros das tubulações e demandas dos nós e LINGIREDDY e ORMSBEE (2002) para determinação de rugosidades absolutas e demandas.

Tendo como principal objetivo a redução do tempo de processamento e a obtenção de melhores resultados, KAPELAN, SAVIC e WALTERS (2002) propuseram um método híbrido para a determinação de rugosidades absolutas e detecção de vazamentos em redes de distribuição de água operando em regime transiente. O método consiste na aplicação de uma técnica de busca global (algoritmos genéticos), para percorrer todo o espaço amostral, seguida de uma técnica de busca local (*Levenberg-Marquardt*) para refinamento da solução final.

Visando aplicar o método dos algoritmos genéticos ao projeto de redes de distribuição de água, ALENCAR NETO (2003) desenvolveu um programa computacional para a determinação da solução de menor custo. Com base na análise comparativa dos resultados, o autor conclui que, embora não tenha apresentado valores melhores que a

otimização de *Morgan*, utilizada por AMARAL (1998), o método dos algoritmos genéticos se mostrou satisfatório, com convergência rápida para uma solução sub-ótima.

ARAÚJO (2003) elaborou um procedimento para estudar a calibração de redes de distribuição de água a partir de dados observados de cargas hidráulicas transientes, utilizando o método transiente inverso com um algoritmo genético. Na resolução do problema inverso proposto foram consideradas cinco situações específicas de calibração ou identificação de parâmetros: fatores de atrito, rugosidades absolutas, diâmetros das tubulações, vazamentos e simultaneamente fatores de atrito e vazamentos. De acordo com os resultados obtidos, a utilização dos algoritmos genéticos no processo de calibração via método transiente inverso se mostrou viável na identificação dos diversos parâmetros da rede, na identificação de vazamentos e na avaliação do estado das redes hidráulicas em uso, mesmo quando as condições iniciais de estado permanente são desconhecidas e se dispõe de poucos dados observados.

Considerando as perdas por vazamentos e a dependência das demandas com a pressão, SOARES (2003) desenvolveu uma rotina computacional acoplada ao simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000), objetivando a calibração das rugosidades absolutas, demandas, diâmetros das tubulações, cotas topográficas e parâmetros dos modelos de vazamentos, bem como a localização de componentes hidráulicos na rede, através de modelo inverso, empregando os algoritmos genéticos e procedimento híbrido (algoritmos genéticos e método simplex – NELDER e MEAD, 1965) como ferramentas.

Os trabalhos de pesquisa desenvolvidos nos últimos anos demonstram ser viável o emprego do método dos algoritmos genéticos para calibração de redes de distribuição de água. A tabela 2.1, a seguir, compara algumas propriedades dos métodos de otimização tradicionais com o método dos algoritmos genéticos.

TABELA 2.1 –Comparativo entre os métodos de otimização.

<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

3 ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 Introdução

Na década de 60, os algoritmos genéticos foram introduzidos por John Holland, que teve a idéia de desenvolver procedimentos através dos quais os fenômenos de adaptação natural pudessem ser aplicados em sistemas computacionais.

O algoritmo genético é uma técnica de busca estocástica da melhor solução para um determinado problema, que está firmado no conjunto de regras e operações fundamentadas no princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, apresentado pelo naturalista e fisiologista inglês *Charles Darwin*. Segundo o processo de seleção natural descrito por DARWIN (1859), quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes.

Baseados em fenômenos biocientíficos, os algoritmos genéticos possuem alguns conceitos oriundos das ciências biológicas. A tabela 3.1 apresenta os principais termos utilizados e a relação entre os algoritmos genéticos e a biologia.

A primeira etapa de um algoritmo genético simples é a geração aleatória de um conjunto de cromossomos representando possíveis soluções do problema em questão. Cada cromossomo é avaliado pela função de aptidão, que mede o grau de sucesso ou a qualidade da solução. Em seguida, os indivíduos menos aptos são descartados, e os mais aptos são selecionados (sobrevivem) para gerar descendentes, através dos operadores recombinação (crossover) e mutação, encerrando o biociclo que se repete até que uma solução satisfatória seja encontrada.

TABELA 3.1 – Conceitos Biológicos.

DESCRICÃO	RELAÇÃO	
	Algoritmo Genético	Biologia
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. Representação decimal: 0 a 9.	Adenosina (A), Citosina (C), Timina (T) e Guanina (G).
Cromossomo: unidade onde são armazenadas as informações genéticas (genes).	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.	Característica de um indivíduo determinada pelo genótipo e pelas condições ambientais.
Indivíduo: um simples membro da população.	Representado pelo cromossomo e sua aptidão.	Exemplar de uma espécie que constitui uma unidade distinta.
População: conjunto de indivíduos.	Matriz formada por vetores contidos no espaço de busca e respectivas aptidões.	Conjunto de indivíduos da mesma espécie, que vivem numa mesma região.

3.2 Representação dos parâmetros

Um cromossomo é um ponto no espaço de busca que representa um conjunto de parâmetros da função a ser otimizada. A forma mais tradicional de representação das soluções é a binária, sendo de fácil utilização e análise teórica simplificada. No entanto, para problemas com parâmetros contínuos, onde se exige boa precisão numérica, os pontos do espaço de busca são representados por longas cadeias de bits, pois para cada casa decimal acrescentada na precisão, é necessário adicionar 3,3 bits na cadeia, aumentando o tempo de processamento do algoritmo.

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

$$2^m = (g_{\max} - g_{\min}) \cdot 10^n + 1 \quad (3.1 \text{ a})$$

$$m = \log_2[(g_{\max} - g_{\min}) \cdot 10^n + 1] \quad (3.1 \text{ b})$$

onde m é o número de bits necessários para a representação binária de um cromossomo, n é a quantidade de casas decimais para a precisão exigida, g_{min} e g_{max} são os limites inferior e superior do intervalo do domínio.

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. 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.

Este trabalho utiliza a representação real, tendo em vista as pesquisas desenvolvidas por MICHALEWICZ (1994), cujos experimentos revelam que a representação real produz resultados melhores que a representação binária.

3.3 População Inicial

Em geral, a população inicial é formada pela geração aleatória de todos os indivíduos. No entanto, se a população for pequena, algumas regiões do espaço de busca possivelmente não serão representadas.

Visando minimizar este problema a população inicial pode ser gerada de maneira uniforme, com pontos igualmente espaçados. Outra forma é gerar a primeira metade da população aleatoriamente e a segunda metade a partir da primeira, invertendo posição de cada ponto no espaço amostral.

Inserir soluções obtidas por outros métodos de otimização na população inicial garante que a solução gerada pelo algoritmo genético, não seja pior que as soluções geradas por estes métodos. Essa técnica, denominada *seeding*, é muito útil em vários problemas de otimização (GALVÃO *et al.*, 1999).

3.4 Função Objetivo e Cálculo da Aptidão

As técnicas de otimização consistem na maximização ou minimização de uma função. Quando a solução do problema é um máximo global, os valores da aptidão podem ser obtidos por meio da própria função objetivo. Contudo existem casos em que não é adequado

utilizar o valor da função objetivo como valor de aptidão, sendo necessária a conversão através de ordenamento e escalonamento.

3.4.1 Ordenamento

Segundo o método do ordenamento os vetores solução são classificados do melhor para o pior, ou seja, em ordem decrescente dos valores da função objetivo quando deseja maximizá-la; e em ordem crescente para minimizá-la. Em seguida calcula-se o valor de aptidão considerando a posição de cada indivíduo na população ordenada, ignorando o valor da função objetivo.

Ordenamento Linear: é um método apresentado por BAKER (1987); WHITLEY (1989), no qual o valor da aptidão do cromossomo i é dado por:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \frac{N - i}{N - 1}. \quad (3.2)$$

onde f_i é o valor da aptidão; f_{\min} e f_{\max} são respectivamente os valores mínimo (geralmente zero) e máximo (geralmente entre 1 e 2) estabelecidos para a aptidão; i é a posição do cromossomo na população ordenada e N o tamanho da população.

Ordenamento exponencial: nesse método o cálculo da aptidão é feito pela seguinte fórmula (MICHALEWICZ, 1994):

$$f_i = q \cdot (1 - q)^{i-1}. \quad (3.3)$$

onde f_i é o valor da aptidão do cromossomo i ; q é um número real entre 0 e 1 que indica a pressão da seleção e i é a posição do cromossomo na população ordenada.

O ordenamento exponencial permite uma maior flexibilidade no ajuste da pressão de seleção, pois um elevado valor de q implica em uma alta pressão de seleção, favorecendo os melhores cromossomos.

3.4.2 Escalonamento

Outra forma de se obter os valores de aptidão dos cromossomos, é o escalonamento da função objetivo pelos seguintes métodos: escalonamento linear, exponencial, truncamento sigma, logarítmico, normalizado e seleção Boltzmann.

Escalonamento Linear: nesta técnica de escalonamento, a aptidão de cada cromossomo i é obtida pela seguinte equação:

$$f_i = a \cdot g_i + b. \quad (3.4)$$

onde f_i é o valor da aptidão, g_i é o valor da função objetivo, e os coeficientes a e b limitam a quantidade esperada de filhos dos cromossomos.

GOLDBERG (1989) propôs um escalonamento onde os valores de a e b são calculados de forma que a aptidão média seja igual ao valor médio da função objetivo; e a aptidão máxima igual a C vezes a aptidão média, onde C pode assumir valores entre 1,2 e 2,0. Caso o escalonamento gere aptidões negativas, os coeficientes a e b devem ser recalculados fixando $f_{\min} = 0$.

Os algoritmos de cálculo dos coeficientes a e b do escalonamento linear de uma função objetivo, são descritos a seguir.

Para maximização da função objetivo:

Se $g_{\min} > \frac{C \cdot \bar{g} - g_{\max}}{C-1}$ (verifica ocorrência de aptidão negativa)

$$\Delta \leftarrow g_{\max} - \bar{g}$$

$$a \leftarrow \frac{(C-1) \cdot \bar{g}}{\Delta}$$

$$b \leftarrow \frac{\bar{g} \cdot (g_{\max} - C \cdot \bar{g})}{\Delta}$$

senão

$$\Delta \leftarrow \bar{g} - g_{\min}$$

$$a \leftarrow \frac{\bar{g}}{\Delta}$$

$$b \leftarrow \frac{-\bar{g} \cdot g_{\min}}{\Delta}$$

fim se

retornar a e b

onde \bar{g} é o valor médio da função objetivo.

Para minimização da função objetivo:

Se $g_{\max} < \frac{C \cdot \bar{g} - g_{\min}}{C - 1}$ (verifica ocorrência de aptidão negativa)

$$\Delta \leftarrow g_{\min} - \bar{g}$$

$$a \leftarrow \frac{(C - 1) \cdot \bar{g}}{\Delta}$$

$$b \leftarrow \frac{\bar{g} \cdot (g_{\min} - C \cdot \bar{g})}{\Delta}$$

senão

$$\Delta \leftarrow \bar{g} - g_{\max}$$

$$a \leftarrow \frac{\bar{g}}{\Delta}$$

$$b \leftarrow \frac{-\bar{g} \cdot g_{\max}}{\Delta}$$

fim se

retornar a e b

onde \bar{g} é o valor médio da função objetivo.

Escalonamento exponencial: é um refinamento do escalonamento linear, onde o valor de aptidão é elevado a uma potência, como pode ser observado na função a seguir.

$$f_i = (a \cdot g_i + b)^\alpha. \quad (3.5)$$

O valor do expoente (α) determina a pressão da seleção, isto é, o aumento do valor de α favorece os cromossomos mais aptos.

Escalonamento com truncamento sigma: proposto por FORREST (1985), essa técnica converte a função objetivo em valores de aptidão, aperfeiçoando o método do escalonamento linear, por meio da equação 3.6, reformulada por GOLDBERG (1989):

$$f_i = g_i - (\bar{g} - c \cdot \sigma). \quad (3.6)$$

onde c é um valor inteiro contido no intervalo de 1 e 5; σ é o desvio padrão populacional e \bar{g} é o valor médio da função objetivo. Neste método de cálculo, atribui-se zero para os valores de aptidão negativos.

Considerando que o presente trabalho visa minimizar a função objetivo, a equação 3.6 foi reformulada para a função de escalonamento apresentada a seguir (equação 3.7).

$$f_i = (\bar{g} + c \cdot \sigma) - g_i \quad (3.7)$$

Escalonamento Logarítmico: nesse método de escalonamento, desenvolvido para mapeamento de funções objetivo de problemas de minimização, os valores de aptidão são obtidos pela seguinte fórmula:

$$f_i = b - \log(g_i). \quad (3.8)$$

onde b é um coeficiente que deve ser maior que qualquer valor de $\log(g_i)$, a fim de garantir que todos os valores de aptidão sejam maiores que zero.

Escalonamento Normalizado: essa técnica é um tipo de escalonamento dinâmico proposto por CHENG e GEN (1994), em que os valores de aptidão são dados por:

$$f_i = \frac{g_i - g_{\min} + \gamma}{g_{\max} - g_{\min} + \gamma}, \text{ para problemas de maximização, e} \quad (3.9 \text{ a})$$

$$f_i = \frac{g_{\max} - g_i + \gamma}{g_{\max} - g_{\min} + \gamma}, \text{ para problemas de minimização.} \quad (3.9 \text{ b})$$

onde γ é um número real contido no intervalo aberto (0;1).

Seleção Boltzmann: é outro método de escalonamento para cálculo da aptidão, cuja pressão de seleção pode ser ajustada por meio de um parâmetro. A função de escalonamento para problemas de maximização é:

$$f_i = e^{\frac{g_i}{T}}. \quad (3.10 \text{ a})$$

Para minimização da função objetivo, proposta no presente trabalho, a equação foi adaptada como apresentada a seguir.

$$f_i = e^{\frac{T}{g_i}} \quad (3.10 \text{ b})$$

A pressão de seleção é controlada pelo parâmetro T , conforme apresentado na tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Variação de pressão na Seleção Boltzmann.

<i>Tipo de Otimização</i>	<i>Parâmetro T</i>	<i>Pressão de Seleção</i>
Maximização	Aumenta	Diminui
	Diminui	Aumenta
Minimização	Aumenta	Aumenta
	Diminui	Diminui

3.5 Seleção

Fundamentado no processo de seleção biológica natural de *Darwin*, o algoritmo genético seleciona os melhores indivíduos da população (aqueles com alta aptidão), para

compor uma população intermediária, que representa os indivíduos mais adaptados, que sobrevivem para gerar descendentes para a próxima geração.

A escolha dos pais pode ser feita de várias formas e dentre os operadores de seleção dos algoritmos genéticos destacam-se: torneio, roda da roleta, amostragem estocástica universal, amostragem determinística e *remainder stochastic sampling*.

3.5.1 Torneio

Na seleção por torneio são escolhidos aleatoriamente n (geralmente 2 ou 3) indivíduos da população, e o melhor é selecionado para reproduzir. Esse processo se repete até a população intermediária estar completa. Nesse método não se faz necessário o escalonamento da aptidão nem o ordenamento, pois a competição entre os indivíduos é feita através da comparação dos valores da própria função objetivo. O número de indivíduos do torneio (n) determina a pressão de seleção, que cresce com o seu aumento.

3.5.2 Roda da Roleta

Um dos métodos mais tradicionais é a roda da roleta, que se baseia na determinação da probabilidade de seleção para cada indivíduo proporcional ao valor da aptidão. A probabilidade de seleção (p_i) do indivíduo i é dada por:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}. \quad (3.11)$$

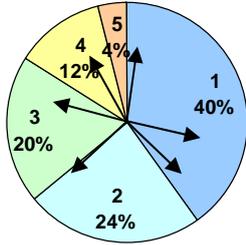
onde f_i e f_j são valores de aptidão dos indivíduos i e j respectivamente, e N é a quantidade de indivíduos da população. Com a determinação das probabilidades de seleção de cada indivíduo, calculam-se as probabilidades acumuladas, conforme a tabela 3.3 a seguir.

TABELA 3.3 – Cálculo das probabilidades de seleção pela Roda da Roleta.

Indivíduo (i)	Aptidão (f_i)	Probabilidade de seleção	
		Simple	Acumulada
1	1,0	40%	40%
2	0,6	24%	64%
3	0,5	20%	84%
4	0,3	12%	96%
5	0,1	4%	100%
6	0,0	0%	100%

Em seguida, gera-se aleatoriamente um número real r do intervalo de zero a um, e seleciona-se o primeiro indivíduo que possui probabilidade de seleção acumulada maior que r . O processo de seleção se repete até que a população intermediária seja preenchida com os indivíduos selecionados, como demonstrado na tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Exemplo de seleção pelo método Roda da Roleta.

<i>Número aleatório (r)</i>	<i>Indivíduo selecionado</i>	<i>Roda da Roleta</i>
37,3%	1	
79,2%	3	
28,4%	1	
2,1%	1	
91,5%	4	
63,0%	2	

Esse método de seleção possui a limitação de não funcionar com aptidões negativas, e quando surgem indivíduos com aptidão elevada, mas não ótima; a convergência tende a ser prematura.

O algoritmo a seguir, apresenta o procedimento de seleção roda da roleta.

$$total \leftarrow \sum_{i=1}^N f_i$$

$$r \leftarrow \text{aleatório}(0;1)$$

$$totalparcial \leftarrow 0$$

$$i \leftarrow 0$$

repetir

$$i \leftarrow i + 1$$

$$p_i \leftarrow \frac{f_i}{total}$$

$$totalparcial \leftarrow totalparcial + p_i$$

até totalparcial $\geq r$

selecionar cromossomo i

Fonte: GALVÃO *et al.* (1999).

3.5.3 Amostragem Estocástica Universal

Na seleção por amostragem estocástica universal (BAKER, 1987), como no método roda da roleta; a população é disposta em um gráfico de setores, cuja área dos setores é proporcional ao valor de aptidão do indivíduo que ele representa. A diferença está no processo de seleção, que é feito por N ponteiros igualmente espaçados que apontam para os indivíduos escolhidos.

O espaçamento entre os ponteiros é calculado pela seguinte equação:

$$\text{espaçamento} = \frac{100\%}{N} . \quad (3.12)$$

onde N é o número de indivíduos da população intermediária.

Então cada ponteiro irá apontar para o valor determinado pela fórmula:

$$\text{ponteiro}(i) = [(i - 1) + r] \cdot \text{espaçamento} . \quad (3.13)$$

sendo r um número aleatório contido no intervalo entre zero e um.

Portanto o primeiro indivíduo com probabilidade de seleção acumulada maior que o valor indicado pelo ponteiro, é alocado na posição i da população intermediária.

A tabela 3.5 e o algoritmo apresentados a seguir descrevem o processo de seleção por amostragem estocástica universal.

TABELA 3.5 – Exemplo de seleção por Amostragem Estocástica Universal.

<i>Posição do Ponteiro</i> <i>(r=0,90; N=6)</i>	<i>Indivíduo</i> <i>selecionado</i>	<i>Amostragem Estocástica</i> <i>Universal</i>
15,00%	1	
31,67%	1	
48,33%	2	
65,00%	3	
81,67%	3	
98,33%	5	

```

totalparcial ← 0
espaçamento ←  $\frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}$ 
r ← aleatório(0;1)
ponteiro ← r · espaçamento
para i ← 1 a N faça:
    totalparcial ← totalparcial + fi
    enquanto totalparcial > ponteiro, faça:
        selecione cromossomo i
        ponteiro ← ponteiro + espaçamento
    fim enquanto
fim

```

Fonte: GEN, CHENG (1997).

3.5.4 Amostragem Determinística

Segundo o método da amostragem determinística, as probabilidades de seleção são calculadas como na roda da roleta. Em seguida determina-se a quantidade esperada (e_i) de cópias de cada indivíduo, multiplicando sua probabilidade de seleção pela quantidade de indivíduos da população.

TABELA 3.6 – Cálculo das probabilidades de seleção e quantidades esperadas.

<i>Indivíduo (i)</i>	<i>Aptidão (f_i)</i>	<i>Probabilidade de seleção (p_i)</i>	<i>Quantidade Esperada (e_i)</i>
1	1,0	40%	2,40
2	0,6	24%	1,44
3	0,5	20%	1,20
4	0,3	12%	0,72
5	0,1	4%	0,24
6	0,0	0%	0,00
TOTAL	2,5	100%	6,00

Com isso os indivíduos são selecionados de acordo com a parte inteira da quantidade esperada, e para finalizar o processo, ordena-se a população de acordo com a parte fracionária da quantidade esperada, e, do topo da lista, seleciona-se o restante dos indivíduos

necessários para o preenchimento da população intermediária, como apresentado na tabela 3.7 a seguir.

TABELA 3.7 - Exemplo de seleção por Amostragem Determinística.

<i>Indivíduo (i)</i>	<i>Quantidade Esperada (e_i)</i>	<i>Quantidade de cópias</i>	
		<i>Parte Inteira</i>	<i>Parte Fracionária</i>
4	0,72	0	1
2	1,44	1	1
1	2,40	2	0
5	0,24	0	0
3	1,20	1	0
6	0,00	0	0

Dessa forma a população intermediária será composta pelos seguintes indivíduos:

1, 1, 2, 3, 4, 2.

3.5.5 Remainder Stochastic Sampling

Esse método é uma versão modificada da amostragem determinística, pois se inicia da mesma forma, com a seleção dos indivíduos de acordo com a parte inteira da quantidade esperada (e_i). Entretanto, os demais membros da população intermediária são escolhidos através da competição entre os indivíduos (Roda da Roleta, Amostragem Estocástica Universal, etc.), cuja probabilidade de seleção (p_j) é proporcional à parte fracionária da quantidade esperada.

TABELA 3.8 - Exemplo de seleção pelo método *Remainder Stochastic Sampling*.

<i>Indivíduo (i)</i>	<i>Aptidão (f_i)</i>	<i>Probabilidade seleção (p_i)</i>	<i>Quantidade Esperada (e_i)</i>	<i>Parte Inteira</i>	<i>Parte Fracionária</i>	<i>Probabilidade seleção (p_j)</i>
1	1,0	40%	2,40	2	0,40	20%
2	0,6	24%	1,44	1	0,44	22%
3	0,5	20%	1,20	1	0,20	10%
4	0,3	12%	0,72	0	0,72	36%
5	0,1	4%	0,24	0	0,24	12%
6	0,0	0%	0,00	0	0,00	0%

TABELA 3.9 – Indivíduos selecionados de acordo com a parte fracionária – *Remainder Stochastic Sampling*

<i>Número aleatório (r)</i>	<i>Indivíduo selecionado</i>	<i>Roda da Roleta</i>
91,8%	5	
69,1%	4	

Sendo assim a população intermediária será formada pelos indivíduos: 1, 1, 2, 3, 5, 4.

3.6 Recombinação (Crossover)

A geração de novos indivíduos é feita através da reprodução, que nos algoritmos genéticos é representada pelo operador recombinação (crossover). A recombinação é o principal mecanismo para exploração do espaço de busca, e consiste na troca de informações genéticas entre dois indivíduos da população intermediária, gerando filhos que irão herdar características dos pais.

O operador de recombinação mais tradicional na representação binária é o de um ponto (simples), que corta a cadeia de bits de cada um dos cromossomos pais em uma posição aleatória, produzindo duas cabeças e duas caudas. As caudas são permutadas, gerando dois novos cromossomos. A figura 3.1 ilustra o comportamento desse operador.

$$Pai_1 = (01100011011||100001101)$$

$$Pai_2 = (11001100110||000010010)$$

$$Filho_1 = (01100011011||000010010)$$

$$Filho_2 = (11001100110||100001101)$$

FIGURA 3.1 – Recombinação de um ponto.

Existem ainda os operadores de n pontos, que cortam a cadeia de bits em n pontos escolhidos aleatoriamente como demonstrado nas figuras 3.2 e 3.3.

$$\begin{aligned}
 Pai_1 &= (0110001||\mathbf{101110}||0001101) \\
 Pai_2 &= (1100110||\mathbf{011000}||0010010) \\
 Filho_1 &= (0110001||\mathbf{011000}||0001101) \\
 Filho_2 &= (1100110||\mathbf{101110}||0010010)
 \end{aligned}$$

FIGURA 3.2 – Recombinação de dois pontos

$$\begin{aligned}
 Pai_1 &= (01100||\mathbf{011011}||10000||\mathbf{1101}) \\
 Pai_2 &= (11001||\mathbf{100110}||00001||\mathbf{0010}) \\
 Filho_1 &= (01100||\mathbf{100110}||10000||\mathbf{0010}) \\
 Filho_2 &= (11001||\mathbf{011011}||00001||\mathbf{1101})
 \end{aligned}$$

FIGURA 3.3 – Recombinação de três pontos

Para determinados problemas é interessante que algumas soluções sejam preservadas, por isso a recombinação é aplicada com uma probabilidade que geralmente varia de 70% a 100%. Dessa forma 70% a 100% dos pares de indivíduos da população intermediária gerarão filhos, e para o restante, os filhos serão iguais aos pais.

Na representação real, os principais operadores utilizados para simular a combinação de informações genéticas entre dois indivíduos são: média (DAVIS, 1991), mistura BLX- α (ESHELMAN e SHAFFER, 1993), aritmético (MICHALEWICZ, 1994), heurístico (MICHALEWICZ, 1994) e simples (MICHALEWICZ, 1994).

3.6.1 Média

Segundo o operador média, os filhos são gerados a partir da média dos cromossomos pais, utilizando as equações 3.14 a e b, para o cálculo de cada gene.

TABELA 3.10 – Operadores de recombinação média aritmética e geométrica.

<i>Média Aritmética</i>	<i>Média Geométrica</i>
$Filho_i = \frac{Pai_{1i} + Pai_{2i}}{2} \quad (3.14 \text{ a})$	$Filho_i = \sqrt{Pai_{1i} \cdot Pai_{2i}} \quad (3.14 \text{ b})$

O operador média possui a desvantagem de direcionar os genes para o meio do intervalo permitido, tendo como consequência a perda de diversidade.

3.6.2 Mistura (BLX- α)

A recombinação mistura (BLX- α) produz filhos através da combinação de dois cromossomos pais da seguinte forma:

$$Filho_{1i} = Pai_{1i} + \beta \cdot (Pai_{2i} - Pai_{1i}) \quad (3.15 \text{ a})$$

$$Filho_{2i} = Pai_{2i} + \beta \cdot (Pai_{1i} - Pai_{2i}) \quad (3.15 \text{ b})$$

onde β é um número aleatório pertencente ao intervalo $I(-\alpha; 1+\alpha)$, que pode ou não variar para cada par de gene. O parâmetro α controla a tendência de geração de filhos próximos ao centro do intervalo, pois esse parâmetro amplia o intervalo nos dois sentidos, evitando a perda de diversidade.

3.6.3 Aritmética

Um caso particular da recombinação mistura é o operador aritmético que realiza uma combinação linear entre os pais, sem extrapolar o intervalo entre eles ($\alpha = 0$), gerando dois filhos da seguinte forma:

$$Filho_{1i} = \beta \cdot Pai_{1i} + (1 - \beta) \cdot Pai_{2i} \quad (3.16 \text{ a})$$

$$Filho_{2i} = (1 - \beta) \cdot Pai_{1i} + \beta \cdot Pai_{2i} \quad (3.16 \text{ b})$$

onde β é um número aleatório contido no intervalo compreendido entre 0 e 1.

3.6.4 Heurística

A recombinação heurística utiliza a informação da aptidão para realizar uma extrapolação linear entre os pais, produzindo um filho a partir da equação a seguir:

$$Filho_{1i} = Pai_{1i} + \beta \cdot (Pai_{1i} - Pai_{2i}) \quad (3.17)$$

onde o número real β é gerado aleatoriamente variando entre 0 e 1, e o Pai_1 tem aptidão maior que o Pai_2 .

3.6.5 Simples

Esse método de recombinação é uma adaptação da recombinação de um ponto para a representação real, onde cada um dos cromossomos pais são cortados em uma posição

aleatória, produzindo duas cabeças e duas caudas, que são trocadas, gerando dois filhos, como apresentado na figura 3.4.

$$\begin{aligned}
 Pai_1 &= (95; 132; 106; 148; 76; 121; || 127; 75; 145; 119) \\
 Pai_2 &= (98; 92; 133; 96; 122; 106; || 71; 128; 120; 131) \\
 Filho_1 &= (95; 132; 106; 148; 76; 121; || 71; 128; 120; 131) \\
 Filho_2 &= (98; 92; 133; 96; 122; 106; || 127; 75; 145; 119)
 \end{aligned}$$

FIGURA 3.4 – Recombinação simples para representação real.

3.7 Mutaç o

O operador muta o   um mecanismo de busca que explora regi es desconhecidas do espa o amostral, alterando o valor de um gene, situado em uma posi o aleat ria; de 1 para 0, ou de 0 para 1, no caso de representa o bin ria.

Apesar de melhorar a diversidade de indiv duos na popula o, a muta o pode destruir boas informa es contidas no cromossomo, por isso se utiliza a uma pequena taxa de muta o, geralmente entre 0,1% a 5%, que seja suficiente para assegurar a diversidade.

Os principais tipos de muta o para a representa o real s o descritos a seguir.

3.7.1 Uniforme

A muta o uniforme   a simples substitui o de um gene por um n mero aleat rio gerado de uma distribui o uniforme, conforme apresentado a seguir:

$$Filho_i = \begin{cases} Uniforme(a_i; b_i), & se \ i = j; \\ Pai_i, & caso \ contr rio. \end{cases} \quad (3.18)$$

onde a_i e b_i os limites do intervalo permitido.

3.7.2 Gaussiana

Na muta o *Gaussiana*, o gene selecionado   substituído por um n mero gerado aleatoriamente de uma distribui o normal com m dia igual ao valor do gene e desvio padr o (σ), que indica o grau de diversidade dos valores que o gene pode assumir.

$$Filho_i = \begin{cases} Normal(Pai_i; \sigma), & \text{se } i = j; \\ Pai_i, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.19)$$

3.7.3 Limite

Proposta por MICHALEWICZ (1994), a mutação limite substitui o gene selecionado por um dos limites do intervalo permitido da seguinte forma:

$$Filho_i = \begin{cases} a_i, & \text{se } r < 0,5 \text{ e } i = j; \\ b_i, & \text{se } r \geq 0,5 \text{ e } i = j; \\ Pai_i, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.20)$$

sendo a_i e b_i os limites do intervalo permitido e r um número aleatório compreendido entre zero e um.

Este operador transporta o gene para um dos limites do intervalo permitido, evitando a perda de diversidade dos filhos gerados pelas recombinações média e aritmética, que tendem a levar os genes para o centro do intervalo permitido.

3.7.4 Não Uniforme

MICHALEWICZ (1994) propôs a mutação não uniforme que consiste na troca do gene selecionado por um número gerado a partir da distribuição não uniforme apresentada a seguir:

$$Filho_i = \begin{cases} Pai_i + (b_i - Pai_i) \cdot f(G), & \text{se } r_1 < 0,5 \text{ e } i = j; \\ Pai_i - (Pai_i - a_i) \cdot f(G), & \text{se } r_1 \geq 0,5 \text{ e } i = j; \\ Pai_i, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.21 \text{ a})$$

$$f(G) = \left(r_2 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \right)^b \quad (3.21 \text{ b})$$

sendo r_1 e r_2 números gerados aleatoriamente do intervalo entre zero e um; G o número da geração atual; G_{\max} o número máximo de gerações; e b um parâmetro que determina a forma da função, o qual Michalewicz sugeriu $b = 6$.

Observa-se que, a cada geração a função $f(G)$ decresce, reduzindo a perda de informações ao longo das gerações.

3.7.5 Não Uniforme Múltipla

A mutação não uniforme múltipla (MICHALEWICZ,1994) amplia a aplicação do operador mutação não uniforme para todos os genes do cromossomo, melhorando ainda mais a diversidade de indivíduos da população.

3.8 Substituição de Indivíduos

Após a aplicação dos operadores genéticos de recombinação e mutação, inicia-se o processo de substituição de alguns ou todos os indivíduos da geração anterior pelos novos indivíduos gerados, formando uma nova população. Esse processo de substituição pode ser classificado em dois tipos: geracional e *steady-state*.

3.8.1 Geracional

De acordo com o algoritmo genético original de Holland toda a população é substituída pelos descendentes a cada geração, ou seja, somente os indivíduos gerados (filhos) sobrevivem para compor a geração seguinte.

Nesse processo de substituição, chamado de geracional com espaço amostral regular, pode ocorrer de alguns indivíduos serem substituídos por descendentes menos aptos. Para superar essa deficiência foram criadas algumas estratégias de substituição como: elitismo e espaço amostral ampliado.

O emprego do elitismo assegura que os k melhores indivíduos da geração anterior nunca serão substituídos por filhos piores. É comum a utilização de um valor baixo para k , a fim de reduzir os riscos de convergência prematura.

Na substituição geracional com espaço amostral ampliado, tanto os descendentes como os pais disputam pela sobrevivência, e os mais aptos do universo formado por pais e filhos são selecionados para a próxima geração.

3.8.2 *Steady-State*

O tipo de substituição *steady-state* caracteriza-se pela renovação gradativa dos indivíduos da população, onde n filhos são gerados para assumir o lugar dos n piores indivíduos da geração anterior. Esse mecanismo foi concebido visando atenuar algumas

distorções como a destruição ou alteração de características importantes de indivíduos submetidos à recombinação e mutação, por isso é comum utilizar uma probabilidade de recombinação maior na substituição *steady-state* (≈ 1) do que na geracional.

3.9 Convergência

Através dos operadores genéticos, os indivíduos se reproduzem com a tendência de gerarem descendentes mais aptos, caracterizando dessa forma a evolução da população a cada geração.

O processo de evolução se encerra quando uma solução satisfatória é identificada por meio de critérios de parada dos quais podem se destacar: convergência da função objetivo, convergência da aptidão, número de gerações e quantidade de indivíduos que convergem para um mesmo valor.

Quando os pontos de ótimo global não estão presentes na população, e surgem indivíduos de alta aptidão (superindivíduos), que não estejam na região de ótimo global, esses indivíduos geram uma quantidade excessiva de filhos espalhando seus genes por toda a população, fazendo desaparecer outros genes (*genetic drift*). Dessa forma a população perde a diversidade e conseqüentemente o algoritmo converge para um máximo ou mínimo local.

Esse problema, conhecido como convergência prematura, pode ser minimizado mantendo a diversidade dos indivíduos da população com o aumento da taxa de mutação, impedindo a inserção de filhos duplicados e restringindo a quantidade de filhos por indivíduo. Dentre as técnicas para limitação da quantidade de filhos para cada indivíduo sobressaem o escalonamento da aptidão e o ordenamento.

3.10 Vantagens e Aplicações dos Algoritmos Genéticos

Situando os algoritmos genéticos no contexto das ferramentas de calibração em geral, a tabela 3.11 descreve algumas das principais classes de métodos de otimização, suas vantagens e desvantagens.

Os algoritmos genéticos diferem dos procedimentos de busca e otimização convencionais em vários aspectos. A tabela 3.12 destaca as principais características desta técnica e os respectivos benefícios.

TABELA 3.11 – Métodos de otimização

<i>Método de Otimização</i>	<i>Descrição</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Gerar-Testar	Gera aleatoriamente ou sistematicamente possíveis soluções, que são avaliadas, até que sejam encontradas soluções satisfatórias.	- Localização do ótimo global, em funções com vários ótimos locais. - Capacidade de otimização de funções complexas e com vários parâmetros.	- Baixa velocidade de convergência, portanto, alto custo computacional.
Analítico	As soluções são identificadas por meio de técnicas do Cálculo Diferencial (teoria dos limites e funções derivadas).	- Alta precisão no cálculo de pontos de máximo e mínimo.	- Dificuldade de identificar se a solução encontrada é um ótimo local ou global. - Em funções com vários parâmetros, torna-se altamente complexa a identificação das soluções.
Subida de Encosta	Através da investigação de pontos adjacentes do espaço de busca, direcionam para pontos de melhor valor da função objetivo.	- Alta velocidade de convergência, portanto baixo custo computacional.	- Dificuldade de localização do ótimo global, em funções com vários ótimos locais. - Dificuldade de otimizar funções que apresentem planícies ou platôs na superfície de busca.

TABELA 3.12 – Características dos algoritmos genéticos

<i>Característica</i>	<i>Vantagem</i>
Trabalha com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros.	Funciona tanto com parâmetros contínuos como discretos ou a combinação deles.
Trabalha com uma população de pontos e não com um simples ponto.	Realiza buscas simultâneas em várias regiões do espaço amostral, reduzindo a incidência de ótimos locais. Otimiza um grande número de variáveis, identificando uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução. Possibilita o uso de soluções encontradas por outros métodos de otimização (<i>seeding</i>).
Utiliza funções de aptidão simples.	Não necessita de conhecimento matemático aprofundado do problema. Otimiza parâmetros de funções objetivo com superfícies complexas, não necessitando de técnicas do Cálculo Diferencial. Pode ser aplicado em funções descontínuas. É flexível para trabalhar com restrições arbitrárias, e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes. O mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema, podendo ser transferido de um problema para outro. É facilmente hibridizado com outras técnicas heurísticas.

Os aspectos relacionados na tabela 3.12 fazem do algoritmo genético uma poderosa ferramenta, cujos campos de aplicação são: problemas onde o espaço a ser pesquisado é grande; funções multimodais, isto é, com múltiplos pontos de máximo ou mínimo; e problemas complexos envolvendo grande quantidade de variáveis cujo inter-relacionamento não é bem conhecido ou se dá de forma não linear.

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA APLICADA PARA RESOLUÇÃO

4.1 Definição do problema

Para simular o equilíbrio hidráulico de uma rede, a variável dotada de maior grau de incerteza, principalmente em macro-sistemas de distribuição de água, é a rugosidade das tubulações, devido sua característica dinâmica, tornando a determinação dessa variável uma tarefa difícil e onerosa. Diante disso, o presente trabalho propõe a utilização de um modelo que visa otimizar a identificação dos coeficientes de resistência das tubulações em sistemas de distribuição, através de um processo de calibração automática.

A resolução do problema inicia-se com a preparação dos dados de entrada do modelo que são compostos pelos valores observados de pressões, demandas nodais e níveis dos reservatórios, juntamente com os dados da rede a ser calibrada, como: topografia do terreno, diâmetro e comprimento das tubulações.

Após a definição dos dados de entrada, aplica-se o modelo de otimização associado a um módulo de avaliação hidráulica, para calibração do sistema.

4.2 Módulo de calibração

O modelo proposto aplica o método dos algoritmos genéticos por ser uma técnica adequada para a determinação das rugosidades de redes de distribuição, haja vista a complexidade do problema devido à grandeza do espaço de busca e à presença de vários pontos de ótimo local. Para a resolução do problema proposto, foi desenvolvido, nesse trabalho, um programa computacional na linguagem DELPHI 7.0, denominado CARTAG

(Calibração Automática de Rugosidades de Tubulações por Algoritmos Genéticos). A figura 4.1 apresenta a principal janela do programa CARTAG, onde se observa a interface amigável do aplicativo.

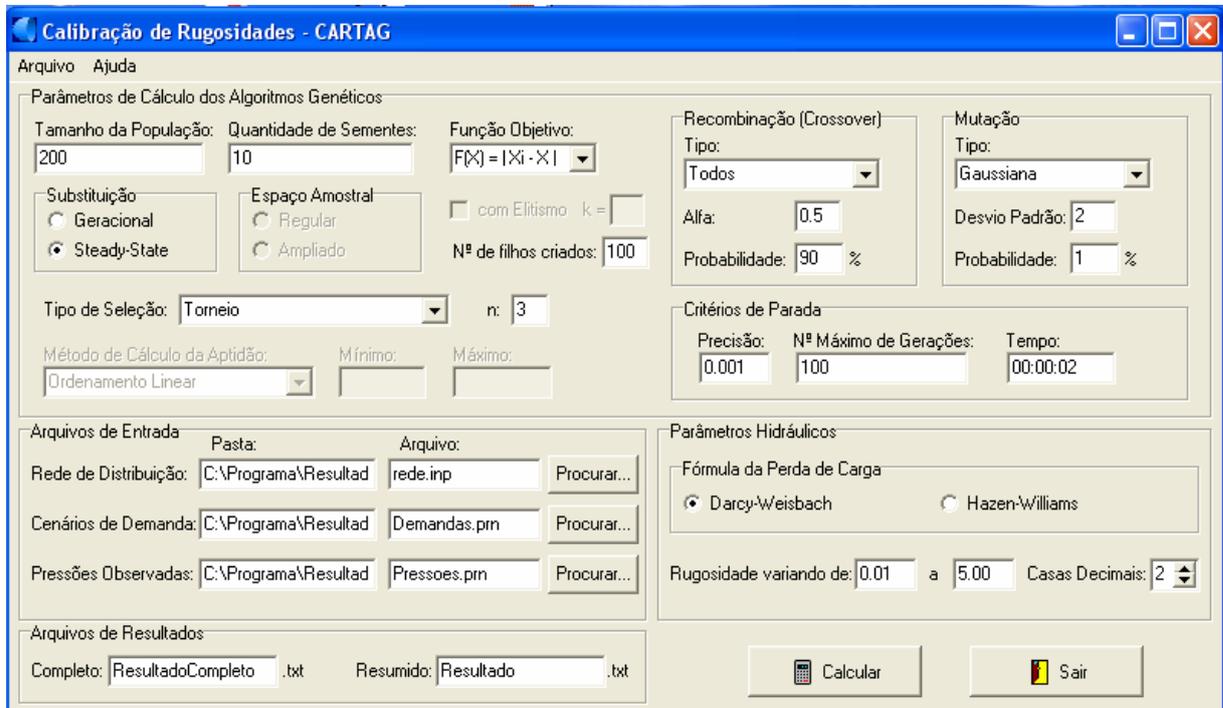


FIGURA 4.1 – Janela principal de entrada de dados do aplicativo CARTAG.

Durante a concepção do programa, alguns aspectos dos algoritmos genéticos foram considerados invariáveis, com base em pesquisas anteriores. Exemplo disso é a escolha da representação real para os cromossomos, baseado nos experimentos de MICHALEWICZ (1994) cujos resultados são favoráveis a este tipo de representação. Outro aspecto inerente ao aplicativo é a metodologia adotada para geração da população inicial com a finalidade de melhorar a representação do espaço de busca, onde a primeira metade é gerada aleatoriamente e a segunda metade a partir da primeira, invertendo a posição dos cromossomos no espaço de busca conforme a equação 4.1.

$$\text{Indivíduo}_{\frac{N}{2}+i} = b_i - \text{Indivíduo}_i + a_i \quad (4.1)$$

onde a_i e b_i são respectivamente os limites inferior e superior do intervalo permitido e N o tamanho da população inicial.

Os dados de entrada podem ser divididos em duas categorias: parâmetros de cálculo dos algoritmos genéticos e informações sobre o sistema de distribuição a ser calibrado.

Os parâmetros de cálculo dos algoritmos genéticos requeridos pelo CARTAG são:

- *Tamanho da população*: quantidade de indivíduos (vetores) que compõem a população de possíveis soluções.
- *Quantidade de populações*: quantidade de populações de soluções que serão geradas, sendo a solução do problema a média dos melhores indivíduos de cada população, ao final do processo de calibração.
- *Função objetivo*: função a ser otimizada (minimizada). O aplicativo oferece duas alternativas para função objetivo: erro absoluto, que é o módulo da diferença entre os valores de pressão observados e calculados, expresso pela equação 4.2; e erro relativo, que é o módulo da diferença entre a pressões observadas e calculadas, ponderadas pelos valores de pressões observados (equação 4.3).

$$FO_1 = \sum_i \sum_j |Po_{ij} - Pc_{ij}| \quad (4.2)$$

$$FO_2 = \sum_i \sum_j \frac{|Po_{ij} - Pc_{ij}|}{Po_{ij}} \quad (4.3)$$

Sendo Po_{ij} e Pc_{ij} respectivamente as pressões observadas e calculadas no nó i para o cenário j .

- *Tipo de substituição e espaço amostral*: forma como os indivíduos serão substituídos a cada geração. As opções disponibilizadas no programa são: geracional (com espaço amostral regular ou ampliado) e *steady-state*. No caso de substituição geracional com espaço amostral regular o usuário pode optar pelo emprego do elitismo a uma taxa (k) a ser informada no aplicativo. Nos demais casos o programa requer a quantidade de filhos a serem gerados em cada geração.
- *Tipo de seleção*: modo como os indivíduos serão selecionados para compor a população intermediária. O programa CARTAG possibilita a utilização dos seguintes tipos de seleção: torneio, devendo ser informado o número de participantes; roda da roleta; amostragem estocástica universal; amostragem determinística e *remainder stochastic sampling*.
- *Método de cálculo da aptidão*: metodologia a ser empregada na conversão da função objetivo em valor de aptidão, que, para esse programa, pode ser feita através do ordenamento linear e exponencial;

do escalonamento linear, exponencial, logarítmico e normalizado; do truncamento sigma e da seleção *Boltzmann*.

- *Tipo de recombinação (crossover)*: operador de recombinação a ser utilizado e sua probabilidade de ocorrência. As alternativas de recombinação apresentadas no aplicativo são: média aritmética e geométrica, mistura (BLX- α), simples, aritmética e heurística. O programa possibilita ainda a utilização de todos os tipos de recombinação disponíveis, onde a cada iteração um método é escolhido aleatoriamente.
- *Tipo de mutação*: operador de mutação a ser utilizado e sua probabilidade de ocorrência. Os tipos de mutação disponibilizados nesse aplicativo são: uniforme, *gaussiana*, limite, não-uniforme e não-uniforme múltipla.
- *Critérios de parada*: condição a ser estabelecida para que o processo de calibração seja encerrado. Para a execução do aplicativo é necessário que sejam fixados dois critérios de parada: precisão da função objetivo e número máximo de gerações. Com isso o programa é finalizado quando pelo menos um dos critérios de parada é satisfeito.

Como pode ser observado o CARTAG é uma ferramenta de grande potencial que pode ser explorado no desenvolvimento de pesquisas visando a melhor utilização dos algoritmos genéticos como o estudo comparativo entre operadores de seleção, recombinação, mutação e métodos de cálculo de aptidão e substituição de indivíduos.

Os dados de entrada do programa referentes ao sistema de distribuição são:

- *Informações da rede*: nome e caminho do arquivo de texto no formato de importação para o EPANET (ver apêndice A.1), contendo os dados da rede como cotas topográficas dos nós, nível dos reservatórios, comprimentos e diâmetros das tubulações, bombas válvulas e regras de operação do sistema, opções quanto ao uso de equações de perda de carga, unidades e outros.
- *Cenários de demandas*: nome e caminho do arquivo de texto contendo os valores de demanda dos nós com a identificação dos respectivos cenários. O referido arquivo deve seguir a formatação do modelo apresentado no apêndice A.2.

- *Pressões observadas*: nome e caminho do arquivo de texto contendo os valores observados de pressão nos nós para cada cenário. No apêndice A.3 encontra-se um modelo de formato do arquivo.
- *Parâmetros hidráulicos*: fórmula da perda de carga a ser empregada no simulador hidráulico, cujas opções são *Darcy – Weisbach* e *Hazen – Williams*. Limites máximo e mínimo para valores que podem ser atribuídos às rugosidades e quantidade de casas decimais.
- *Arquivos de resultados*: nome dos arquivos de texto a serem criados pelo programa para o armazenamento dos resultados. O arquivo completo apresenta as soluções a cada iteração conforme o apêndice A.4 e o resumido apresenta o resultado final conforme o apêndice A.5.

Diante disso verifica-se que o CARTAG foi idealizado para possibilitar a calibração das rugosidades de tubulações para uma rede de distribuição qualquer, tornando-o uma poderosa ferramenta com aplicação prática em sistemas reais, fornecendo subsídios para a elaboração de projetos e para o controle operacional.

4.3 Simulador hidráulico e a interface com o CARTAG

O simulador hidráulico empregado nesse trabalho é o programa de distribuição livre EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000), que soluciona o sistema de equações que caracteriza as condições de equilíbrio de uma rede de distribuição por meio de um Método Híbrido Nó-Malha, denominado por TODINI e PILATI (1987) e SALGADO *et al.* (1988) como Método do Gradiente, que se baseia na resolução da equação 4.4.

$$A \cdot H = F \quad (4.4)$$

em que H é o vetor de incógnitas em termos de cota piezométrica, A é a matriz Jacobiana cujos elementos da diagonal são:

$$A_{ii} = \sum_{j \in J_i} x_{ij} \quad (4.5)$$

enquanto que os elementos não nulos fora da diagonal são:

$$A_{ij} = -x_{ij} \quad (4.6)$$

sendo J_i o conjunto de nós conectados ao nó i e x_{ij} o inverso da derivada da perda de carga total no trecho entre os nós i e j em função da vazão (equação 4.7):

$$x_{ij} = \left(\frac{\partial(\Delta H_{ij})}{\partial Q_{ij}} \right)^{-1} \quad (4.7)$$

e F é o vetor balanço de massa acrescido de um fator de correção de vazão:

$$F_i = \left(\sum_{j \in J_i} Q_{ij} - C_i \right) + \sum_{j \in J_i} y_{ij} + \sum_{f \in J_f} (x_{ij} \cdot H_f) \quad (4.8)$$

sendo o último termo aplicável em qualquer trecho que ligue um nó i a um reservatório de nível fixo f , J_f o conjunto de nós com carga hidráulica constante ligados ao nó i e y_{ij} o fator de correção de vazão dado pela seguinte expressão para tubulações:

$$y_{ij} = x_{ij} \cdot \Delta H_{ij} \cdot \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (4.9)$$

onde $\text{sgn}(Q_{ij}) = 1$ se $Q_{ij} > 0$ e $\text{sgn}(Q_{ij}) = -1$ caso contrário.

Com o cálculo das cargas hidráulicas, resolvendo a equação 4.3, as novas vazões podem ser obtidas de acordo com a equação a seguir.

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - x_{ij} \cdot (H_i - H_j)) \quad (4.10)$$

Se a soma de todas as variações de vazão (em valor absoluto) relativamente à vazão total em todos os trechos for maior que a tolerância pré-estabelecida, as equações 4.4 e 4.10 serão resolvidas novamente.

Para a simulação hidráulica foi incorporada ao CARTAG uma biblioteca dinâmica de funções (*EPANET Programmer's Toolkit*) que permite personalizar a rotina computacional do EPANET 2.0 conforme a necessidade do programador. A biblioteca, armazenada no arquivo EPANET2.DLL, possui funções de análise hidráulica e de qualidade da água que podem ser executadas como sub-rotinas de aplicativos desenvolvidos em *C/C++*, *Delphi Pascal*, *Visual Basic* entre outros.

O EPANET *Toolkit* possui módulos distintos para entrada de dados, simulação hidráulica, simulação da qualidade da água, análise de matriz esparsa / equação linear e geração de relatórios.

O procedimento para simulação de uma rede de distribuição pelo EPANET *Toolkit* pode ser descrito da seguinte forma:

- O módulo de entrada de dados recebe, de um arquivo externo (.INP), a descrição da rede a ser simulada. Os dados do arquivo são analisados, interpretados e armazenados em uma área da memória compartilhada.
- O processo de simulação hidráulica reproduz as condições de equilíbrio hidráulico para um período estendido, onde os resultados obtidos podem

ser registrados em um arquivo sem formatação (binário) com extensão “.HYD”.

- Através do módulo de simulação da qualidade da água os dados de vazões são acessados do arquivo de resultados hidráulicos (.HYD) para o cálculo do transporte e reação de substâncias através da rede de distribuição. Durante este processo os resultados hidráulicos e de qualidade da água são registrados em um arquivo de saída sem formatação (.OUT).
- O módulo de geração de relatórios acessa os resultados da simulação armazenados no arquivo de saída (.OUT) e transcreve-os para um arquivo formatado com extensão “.RPT”. Qualquer mensagem de erro ou aviso gerada durante a execução também são registradas neste arquivo.

A figura 4.2 apresenta o fluxograma de simulação pelo EPANET *Toolkit*.

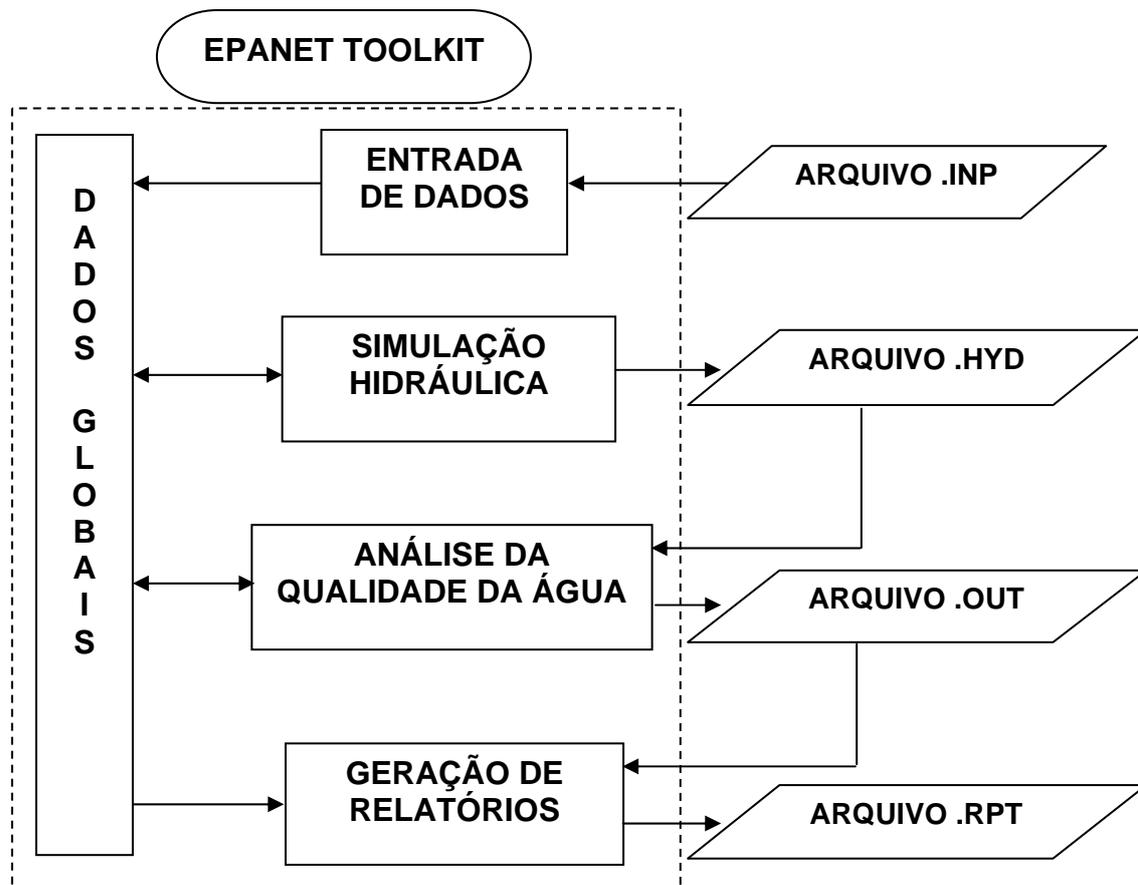


FIGURA 4.2 – Fluxograma da rotina executada pelo EPANET *Toolkit*.

A rotina de calibração do aplicativo CARTAG é ilustrada pelo fluxograma da figura 4.3.

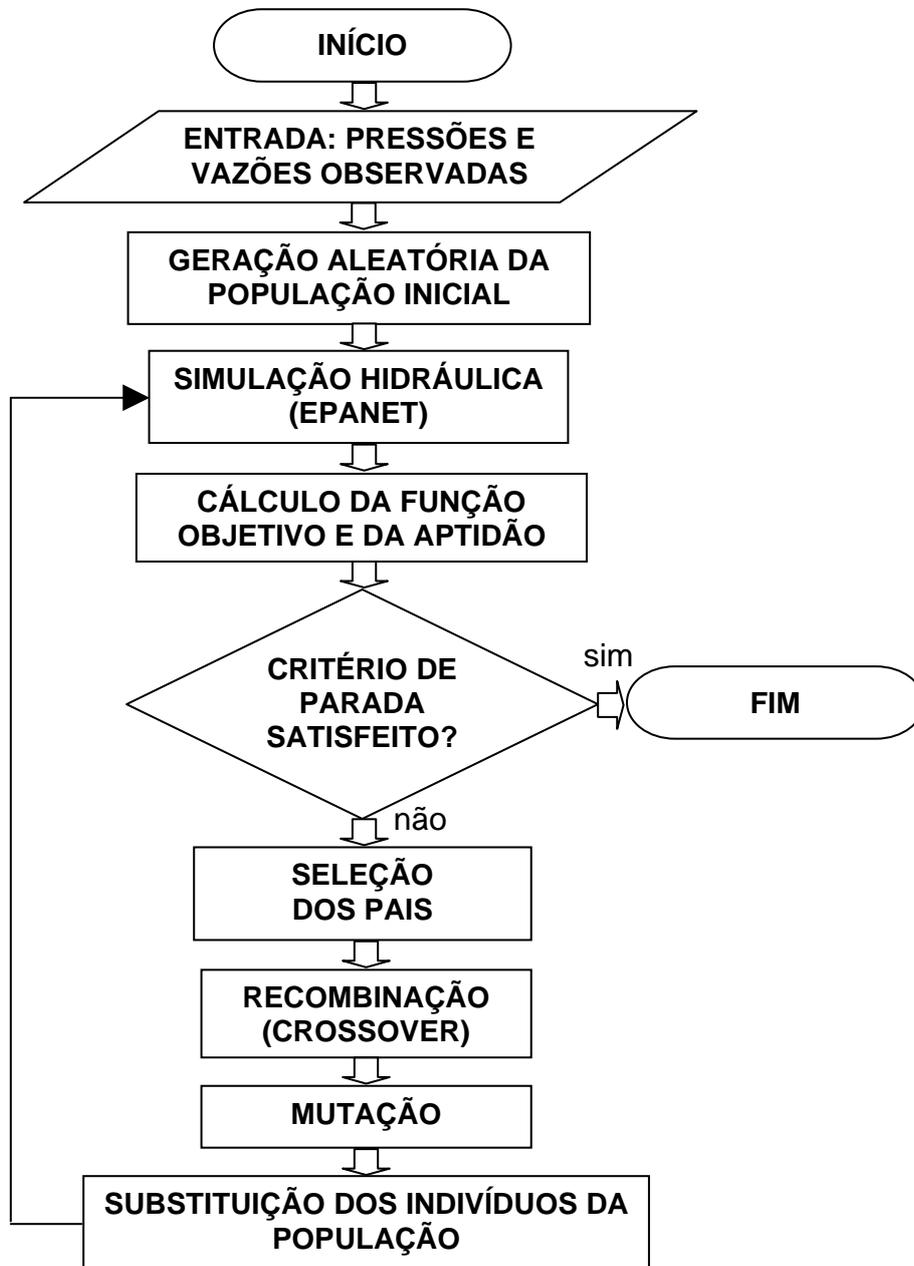


FIGURA 4.3 – Fluxograma do processo de calibração do aplicativo CARTAG.

4.4 Rede Hipotética

Visando avaliar a eficiência do modelo de calibração proposto (CARTAG), o mesmo foi aplicado a um caso hipotético, baseado na rede de distribuição criada por WALSKI (1983b) e adaptada por GAMBALE (2000) ilustrada na figura 4.4.

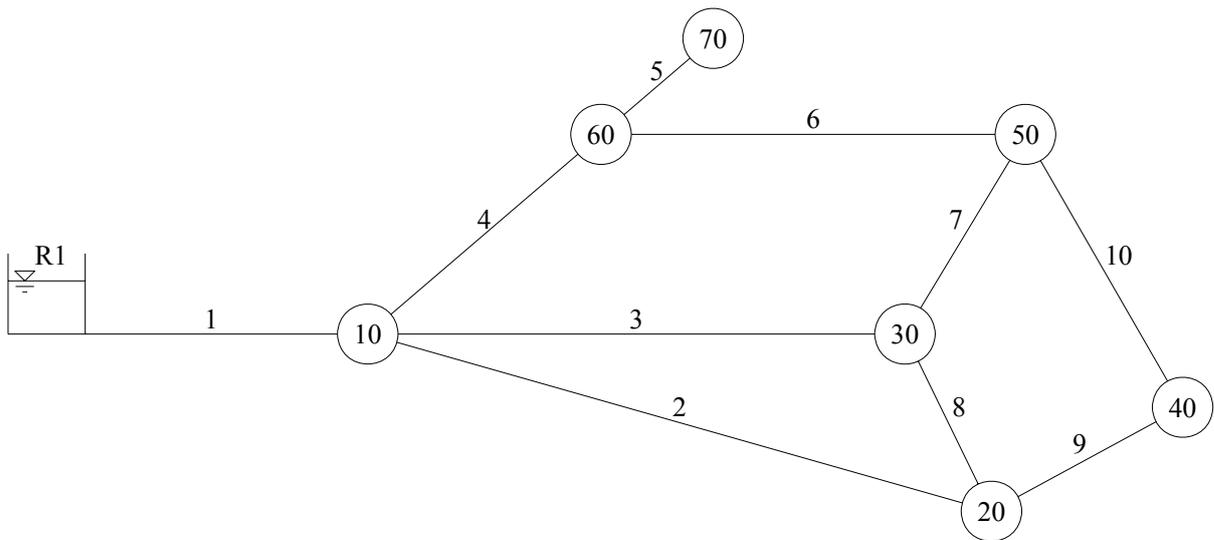


FIGURA 4.4 – Rede de distribuição hipotética.

Nessa rede fictícia todas as variáveis, como: topografia do terreno, demandas nodais, nível do reservatório, diâmetro, comprimento e rugosidade das tubulações; são conhecidas e corretas.

Os nós estarão na mesma cota topográfica (elevação igual a zero) e o nível de água do reservatório de nível fixo estará na cota 60 metros. As características físicas das tubulações da rede em estudo estão apresentadas na tabela 4.1 a seguir.

TABELA 4.1 – Características físicas da rede de distribuição hipotética

TUBO	DIÂMETRO (mm)	COMPRIMENTO (m)	RUGOSIDADE	
			$C (m^{0,3698}/s)$	$\epsilon (mm)$
1	500	700	140	0,09
2	250	1800	110	1,20
3	400	1520	130	0,20
4	300	1220	135	0,12
5	300	600	90	4,80
6	200	1220	110	1,20
7	250	920	120	0,50
8	150	300	115	1,00
9	200	600	85	6,50
10	100	1220	80	7,80

Considerando que o aplicativo será testado em um exemplo hipotético, os dados de entrada de pressão não serão obtidos por meio de observações em campo, e sim pela simulação do sistema através do EPANET 2.0 cujos valores de pressão calculados serão considerados como pressão observada em campo. O modelo de calibração será analisado

confrontando os valores de pressão calibrados e observados (sintéticos), enquanto a avaliação da eficiência dos operadores genéticos será feita por meio da comparação entre os coeficientes de rugosidades estimados pelo CARTAG e os reais, apresentados na tabela 4.1.

4.5 Análise e precisão da calibração

A qualidade dos resultados obtidos na calibração depende diretamente da precisão na qual os dados de entrada foram obtidos. Para a análise e comparação entre os valores de pressão observados e calibrados, WALSKI (1983a) considera uma precisão entre 1,5m e 5,0m, para bons dados de entrada e entre 3,0m e 10,0m para dados de entrada de má qualidade. Em outra abordagem, WALSKI (1986) e BHAVE (1988) *apud* BOURGUETT adotam o erro relativo como critério de comparação entre os valores observados e calculados, sugerindo uma tolerância da ordem de 3%.

Nesse trabalho, a avaliação do desempenho do modelo de calibração será baseada nos critérios estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989). Para os valores de pressão, o erro absoluto, que é a diferença entre o valor calibrado e o observado, deve estar dentro das seguintes faixas.

- $\pm 0,5$ m para 85% das medidas de pressão;
- $\pm 0,75$ m para 95% das medidas de pressão;
- $\pm 2,0$ m para 100% das medidas de pressão;

4.6 Análise de operadores dos algoritmos genéticos

A análise dos principais operadores aplicados ao método dos algoritmos genéticos foi feita por meio de estudos comparativos entre tipos de substituição de indivíduos, operadores de seleção, recombinação (crossover) e mutação, conforme apresentado na tabela 4.2.

Em cada alternativa o programa foi processado doze vezes para calibração das rugosidades da rede hipotética, com os seguintes critérios de parada: função objetivo menor que 0,001 e número máximo de gerações igual a 1000. Sendo assim foram obtidos doze resultados para cada alternativa, onde cada resultado é um vetor, cuja dimensão é a quantidade de tubos, e cada posição do vetor corresponde à rugosidade de um tubo.

TABELA 4.2 – Caracterização dos testes realizados para estudo comparativo.

<i>OPERADOR</i>	<i>ALTERNATIVAS ANALISADAS</i>
Substituição de indivíduos	Geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo Geracional, com espaço amostral regular e elitismo ($k=1$) Geracional, com espaço amostral ampliado <i>Steady-state</i>
Seleção	Torneio Roda da roleta Amostragem Estocástica Universal Amostragem Determinística <i>Remainder Stochastic Sampling (RSS)</i>
Recombinação (<i>Crossover</i>)	Mistura ($BLX-\alpha$) Simplex Aritmético Heurístico Todos (em cada geração um operador é escolhido aleatoriamente)
Mutação	Uniforme <i>Gaussiana</i> Limite Não-Uniforme

Tendo em vista a distribuição normal dos resultados da calibração, foi realizado um estudo probabilístico, que se iniciou com a determinação da média e do desvio padrão das amostras de doze resultados obtidos para cada alternativa. Com base na curva de distribuição normal, foram calculadas, para as situações analisadas, as probabilidades dos coeficientes de rugosidade serem estimados com um erro menor que 5 % e 10 % do real.

Para ilustrar a metodologia adotada, a figura 4.5 apresenta a curva de distribuição normal referente a uma amostra de rugosidades absolutas (ϵ) calibradas pelo CARTAG com média 1,02mm e desvio padrão de 0,04mm. Sabendo que a rugosidade absoluta real é 1,00mm, calcula-se a probabilidade do programa identificar a rugosidade com uma margem de erro de 5 % pela área compreendida entre o eixo das abscissas e a curva de distribuição, no intervalo de 0,95mm até 1,05mm.

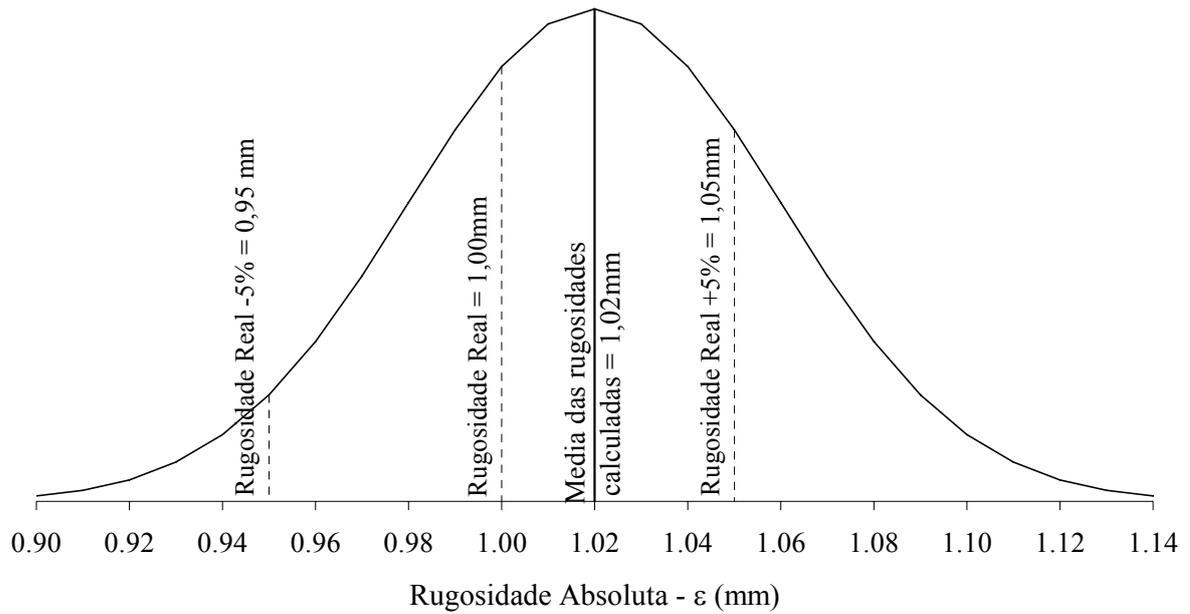


FIGURA 4.5 – Exemplo de curva de distribuição normal das rugosidades calculadas pelo CARTAG.

Com base nesse estudo estatístico, a análise do desempenho dos operadores genéticos empregados no CARTAG é feita comparando as probabilidades médias de cada alternativa, que é a média geométrica das probabilidades calculadas para cada tubo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de otimização proposto é aplicado à rede fictícia da figura 4.4, com a finalidade de avaliá-lo como ferramenta de calibração e aprimorar o emprego do método dos algoritmos genéticos, por meio da avaliação de desempenho de seus principais operadores.

Para que as alternativas sejam analisadas em condições de igualdade, alguns parâmetros dos algoritmos genéticos são os mesmos durante o processo de calibração. Esses parâmetros estão apresentados na tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Parâmetros dos algoritmos genéticos comuns para todas as alternativas.

Representação dos parâmetros	Real
Função Objetivo	Erro absoluto
Cálculo da Aptidão (desnecessário na seleção por torneio)	Escalonamento Linear
Probabilidade de Recombinação (<i>Crossover</i>)	90%
Probabilidade de Mutação	1%

Foram considerados para a rede exemplo dois cenários de demandas não proporcionais indicados na tabela 5.2 a seguir.

TABELA 5.2 – Demandas nodais para os cenários estudados.

Nó	Demanda (L/s)	
	Cenário 1	Cenário 2
10	0,0	0,0
20	15,0	36,0
30	62,5	120,0
40	15,0	10,0
50	47,5	80,0
60	30,0	80,0
70	37,5	37,5

Os valores de pressão considerados “reais” são calculados pela simulação do sistema hipotético utilizando o EPANET 2.0, em que são aplicadas as fórmulas de *Darcy-Weisbach* e *Hazen-Williams*. As pressões “reais” (sintéticas) assim obtidas estão apresentadas na tabela 5.3.

TABELA 5.3 – Pressões “observadas”, geradas sinteticamente pelo simulador hidráulico.

Nó	Pressões “reais” – sintéticas (m)			
	<i>Darcy-Weisbach</i>		<i>Hazen-Williams</i>	
	<i>Cenário 1</i>	<i>Cenário 2</i>	<i>Cenário 1</i>	<i>Cenário 2</i>
10	58,78	56,42	58,74	56,44
20	55,90	48,24	55,75	48,37
30	56,28	48,72	56,08	48,72
40	53,71	46,81	53,77	47,03
50	53,55	41,46	53,35	41,80
60	54,47	43,95	54,27	44,12
70	53,17	42,66	53,03	42,88

5.1 Análise dos tipos de substituição de indivíduos

As alternativas de substituição de indivíduos estudadas foram: geracional com espaço amostral regular (com e sem elitismo); geracional com espaço amostral ampliado e *steady-state*. Para comparação entre os métodos, os demais parâmetros e operadores comuns para todas as calibrações estão indicados na tabela 5.4.

TABELA 5.4 – Dados utilizados para análise dos tipos de substituição de indivíduos.

Seleção	Torneio (n = 3)
Recombinação	Em cada geração um dos operadores é escolhido aleatoriamente.
Mutação	Uniforme
Cálculo da perda de carga	<i>Hazen-Williams</i>

5.1.1 Geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo

Os resultados de rugosidade obtidos nas 12 calibrações realizadas, utilizando a substituição geracional, com espaço amostral regular de 100 indivíduos, sem elitismo, estão apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6.

TABELA 5.5 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	138,18	104,78	134,77	135,50	92,74	114,58	114,86	130,90	90,77	107,85
2	140,43	118,98	126,52	134,03	93,57	111,22	118,43	89,59	94,21	125,92
3	136,21	120,08	127,68	134,62	105,06	123,00	118,94	92,18	88,00	114,43
4	138,57	122,14	127,95	133,42	92,40	100,67	121,68	70,37	90,98	118,01
5	138,38	113,33	131,53	132,62	93,01	93,77	123,78	104,31	86,67	94,34
6	139,59	114,25	131,29	129,93	106,01	94,09	122,92	114,24	95,21	128,86
7	139,95	114,78	130,07	130,63	98,32	91,52	126,08	102,32	87,92	97,88
8	137,35	119,53	129,21	131,72	95,10	85,62	128,32	89,66	87,80	91,02
9	132,78	110,98	132,36	138,85	100,60	140,11	111,77	129,43	93,10	109,81
10	132,90	120,77	129,70	136,32	90,71	104,12	120,41	106,35	97,57	125,60
11	138,51	109,07	129,48	137,69	90,28	126,12	114,43	131,23	87,97	93,75
12	137,29	111,28	132,87	131,90	100,69	97,41	123,11	126,96	88,67	103,85
<i>Média</i>	<i>137,51</i>	<i>115,00</i>	<i>130,29</i>	<i>133,94</i>	<i>96,54</i>	<i>106,85</i>	<i>120,39</i>	<i>107,29</i>	<i>90,74</i>	<i>109,28</i>
σ	2,48	5,39	2,38	2,78	5,45	16,44	4,94	19,78	3,53	13,45
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,78%</i>	<i>4,54%</i>	<i>0,22%</i>	<i>0,79%</i>	<i>7,27%</i>	<i>2,86%</i>	<i>0,33%</i>	<i>6,70%</i>	<i>6,75%</i>	<i>36,60%</i>

TABELA 5.6 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	138,18	104,78	134,75	135,50	92,73	114,55	115,00	130,90	90,26	106,94
2	140,43	119,00	127,74	134,03	91,71	107,09	118,40	80,27	91,66	120,98
3	137,86	120,04	128,00	135,01	95,64	115,43	118,74	69,50	87,00	97,56
4	139,01	122,00	128,00	133,42	90,64	98,00	121,68	55,11	89,61	112,52
5	138,42	113,33	131,53	132,95	91,01	93,73	123,78	100,00	85,99	89,32
6	139,84	114,28	131,29	131,00	95,41	88,92	123,00	110,00	95,85	126,45
7	140,00	115,00	130,31	131,00	96,07	90,31	126,03	87,99	85,84	86,18
8	138,00	119,53	129,21	131,95	90,52	85,12	128,05	73,06	86,00	86,03
9	133,03	111,00	132,00	139,20	97,47	137,99	112,00	138,40	90,83	107,06
10	133,00	121,43	130,01	136,32	90,02	104,16	120,41	94,04	93,97	117,46
11	138,51	109,07	129,48	137,69	90,27	126,15	114,43	133,41	87,97	93,75
12	137,29	111,28	132,87	132,40	96,93	96,70	123,11	121,57	87,28	98,98
<i>Média</i>	<i>137,80</i>	<i>115,06</i>	<i>130,43</i>	<i>134,21</i>	<i>93,20</i>	<i>104,85</i>	<i>120,39</i>	<i>99,52</i>	<i>89,36</i>	<i>103,60</i>
σ	2,42	5,43	2,15	2,61	2,87	16,11	4,86	27,55	3,28	13,78
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,57%</i>	<i>4,60%</i>	<i>0,33%</i>	<i>0,59%</i>	<i>3,56%</i>	<i>4,69%</i>	<i>0,32%</i>	<i>13,46%</i>	<i>5,12%</i>	<i>29,50%</i>

A tabela 5.7 e a figura 5.1 mostram as diferenças absolutas entre as pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas. De acordo com os critérios estabelecidos no capítulo quatro, observa-se que com 100 iterações o sistema já está calibrado.

TABELA 5.7 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,70	0,04	58,70	0,04
20	55,75	55,71	0,04	55,75	0,00
30	56,08	56,08	0,00	56,08	0,00
40	53,77	53,83	0,06	53,87	0,10
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,22	0,05	54,24	0,03
70	53,03	53,13	0,10	53,08	0,05

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,32	0,12	56,34	0,10
20	48,37	48,37	0,00	48,38	0,01
30	48,72	48,68	0,04	48,71	0,01
40	47,03	47,00	0,03	47,01	0,02
50	41,80	41,82	0,02	41,81	0,01
60	44,12	43,98	0,14	44,05	0,07
70	42,88	42,90	0,02	42,89	0,01

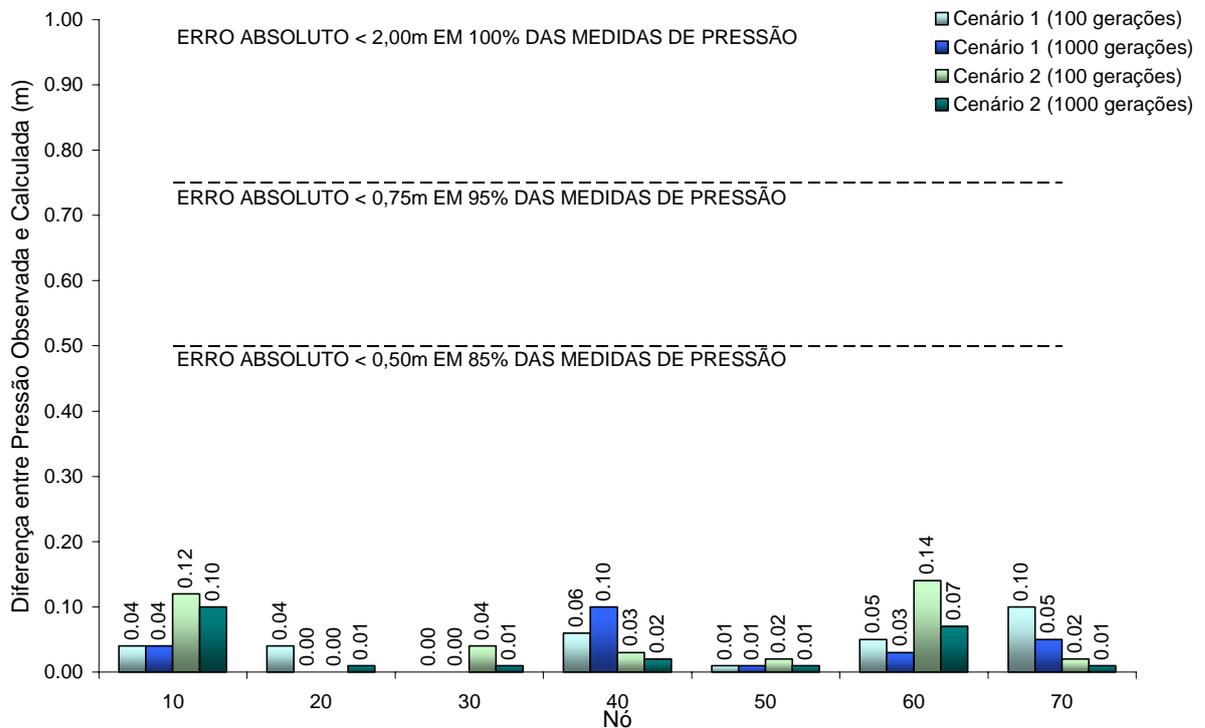


FIGURA 5.1 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, sem elitismo.

5.1.2 Geracional, com espaço amostral regular, com elitismo

As tabelas 5.8 e 5.9 apresentam as amostras de 12 rugosidades calibradas utilizando a substituição geracional, com espaço amostral regular de 100 indivíduos e taxa de elitismo igual a um.

TABELA 5.8 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,91	115,41	125,71	139,24	90,63	140,79	108,67	102,23	96,15	127,04
2	139,87	115,87	128,98	133,37	90,17	98,45	122,92	86,88	86,31	92,46
3	134,72	118,28	130,80	135,48	90,85	102,40	120,84	100,33	89,35	108,23
4	136,26	110,07	132,71	135,21	88,81	102,91	121,97	121,38	86,00	81,47
5	132,12	119,17	132,00	137,28	91,96	114,82	117,96	89,63	87,59	101,87
6	140,02	115,97	126,20	135,29	92,29	116,28	118,59	108,02	93,09	107,04
7	139,31	119,31	127,00	134,20	90,17	103,53	121,09	92,52	92,46	117,47
8	136,74	120,57	126,73	137,93	93,66	132,76	111,23	88,05	98,36	140,26
9	139,41	122,23	126,33	135,64	90,23	114,04	117,74	59,27	87,00	106,02
10	139,68	111,79	131,01	129,55	112,46	99,75	125,50	119,49	88,29	91,48
11	140,55	117,02	127,13	132,98	94,28	109,13	121,05	96,95	90,20	105,56
12	131,34	123,67	133,73	134,27	92,78	89,01	121,76	84,22	96,00	146,00
<i>Média</i>	<i>137,49</i>	<i>117,45</i>	<i>129,03</i>	<i>135,04</i>	<i>93,19</i>	<i>110,32</i>	<i>119,11</i>	<i>95,75</i>	<i>90,90</i>	<i>110,41</i>
σ	3,24	3,98	2,87	2,53	6,28	14,69	4,82	16,75	4,24	19,39
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,79%</i>	<i>6,77%</i>	<i>0,75%</i>	<i>0,03%</i>	<i>3,55%</i>	<i>0,29%</i>	<i>0,74%</i>	<i>16,74%</i>	<i>6,94%</i>	<i>38,01%</i>

TABELA 5.9 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,91	115,41	125,71	139,24	90,63	140,79	108,67	102,23	96,15	127,04
2	139,87	116,07	129,01	133,37	90,17	98,45	122,92	80,85	86,31	90,18
3	135,00	119,13	131,00	135,48	90,06	103,29	120,85	82,32	85,97	95,48
4	136,26	110,07	132,71	135,21	89,14	102,15	121,97	122,00	84,99	78,57
5	132,12	119,17	132,00	137,58	91,37	113,45	118,01	88,62	87,00	99,14
6	140,02	116,01	127,92	135,29	91,10	114,10	118,59	84,99	85,93	90,04
7	139,31	119,31	127,00	134,20	90,21	103,53	121,09	89,77	92,50	112,75
8	137,14	120,57	126,90	138,00	92,00	129,96	111,23	86,87	98,00	140,24
9	139,41	122,23	126,33	135,64	90,23	114,00	117,74	59,27	87,00	106,00
10	140,00	112,04	131,01	131,81	92,81	91,15	125,48	106,09	85,25	82,87
11	140,72	117,02	128,00	133,71	91,12	104,24	121,05	72,58	86,96	94,97
12	131,34	123,67	133,73	134,27	91,37	88,01	121,76	84,22	96,01	144,02
<i>Média</i>	<i>137,59</i>	<i>117,56</i>	<i>129,28</i>	<i>135,32</i>	<i>90,85</i>	<i>108,59</i>	<i>119,11</i>	<i>88,32</i>	<i>89,34</i>	<i>105,11</i>
σ	3,25	3,96	2,71	2,11	0,99	15,14	4,82	16,12	4,86	21,68
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,72%</i>	<i>6,87%</i>	<i>0,56%</i>	<i>0,23%</i>	<i>0,94%</i>	<i>1,28%</i>	<i>0,74%</i>	<i>23,20%</i>	<i>5,10%</i>	<i>31,38%</i>

Os dados da tabela 5.10 e da figura 5.2 permitem que se considere o sistema calibrado, pois as diferenças absolutas entre pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas estão dentro dos limites definidos no capítulo quatro.

TABELA 5.10 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,70	0,04	58,70	0,04
20	55,75	55,76	0,01	55,75	0,00
30	56,08	56,06	0,02	56,08	0,00
40	53,77	53,91	0,14	53,87	0,10
50	53,35	53,35	0,00	53,34	0,01
60	54,27	54,24	0,03	54,26	0,01
70	53,03	53,08	0,05	53,05	0,02

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,32	0,12	56,33	0,11
20	48,37	48,39	0,02	48,40	0,03
30	48,72	48,66	0,06	48,69	0,03
40	47,03	47,01	0,02	47,02	0,01
50	41,80	41,82	0,02	41,81	0,01
60	44,12	44,05	0,07	44,10	0,02
70	42,88	42,89	0,01	42,89	0,01

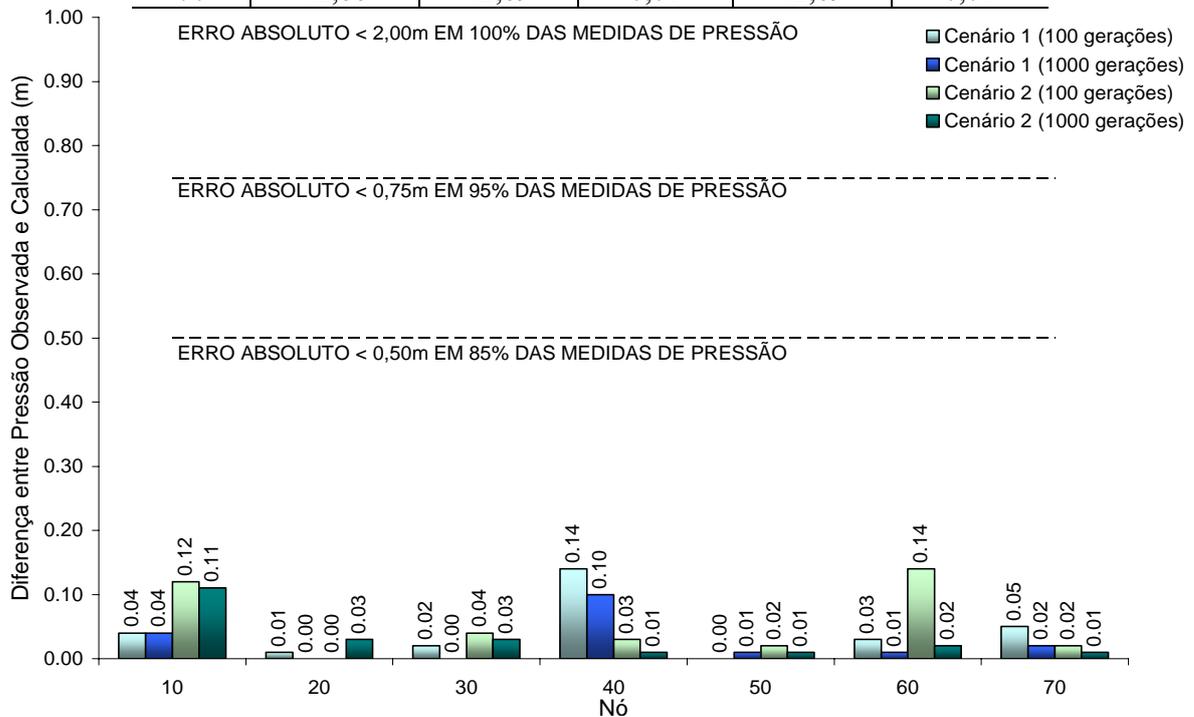


FIGURA 5.2 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral regular, com elitismo.

5.1.3 Geracional, com espaço amostral ampliado

Os resultados da calibração adotando a substituição geracional, com espaço amostral ampliado e população de 100 indivíduos são apresentados nas tabelas 5.11 e 5.12.

TABELA 5.11 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	132,41	127,07	127,28	138,53	92,33	121,98	114,63	69,59	96,92	140,64
2	136,38	119,44	130,79	132,91	99,93	103,16	121,64	78,11	89,45	111,00
3	141,16	109,22	132,69	128,66	99,32	80,46	128,04	115,48	90,87	95,64
4	140,21	104,34	132,10	132,81	101,31	110,32	119,47	148,00	90,38	97,99
5	137,80	110,47	129,08	138,60	90,05	130,27	113,84	117,00	85,66	84,66
6	133,89	122,85	127,94	137,54	89,56	113,50	118,43	81,35	90,59	112,00
7	139,84	116,39	130,01	131,13	101,23	100,04	121,98	93,18	91,54	113,39
8	139,95	116,56	130,30	131,30	95,67	92,00	122,03	98,28	96,96	132,00
9	133,61	114,86	134,53	135,67	94,10	107,87	117,61	99,05	89,00	110,90
10	136,88	115,93	130,50	134,14	90,24	99,39	123,00	107,93	89,34	100,15
11	137,02	118,61	130,89	131,83	106,15	103,74	121,73	88,04	91,02	115,12
12	134,03	129,59	126,28	140,35	91,70	138,40	110,78	70,18	83,16	113,69
<i>Média</i>	<i>136,93</i>	<i>117,11</i>	<i>130,20</i>	<i>134,46</i>	<i>95,97</i>	<i>108,43</i>	<i>119,43</i>	<i>97,18</i>	<i>90,41</i>	<i>110,60</i>
σ	2,96	7,21	2,33	3,65	5,48	16,08	4,71	22,63	3,89	15,27
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>2,19%</i>	<i>6,46%</i>	<i>0,15%</i>	<i>0,40%</i>	<i>6,63%</i>	<i>1,43%</i>	<i>0,47%</i>	<i>15,49%</i>	<i>6,36%</i>	<i>38,25%</i>

TABELA 5.12 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	133,10	127,00	127,42	138,53	90,13	120,67	114,63	69,59	97,01	140,75
2	138,09	117,00	130,79	133,00	91,78	94,69	123,02	86,03	86,22	98,61
3	141,01	110,05	132,69	130,01	90,69	77,74	128,04	113,00	85,86	86,04
4	140,00	105,52	132,00	134,08	90,51	103,87	121,00	144,84	84,96	81,06
5	137,80	110,47	129,08	138,60	90,05	131,00	114,00	118,09	85,66	84,12
6	133,98	123,00	128,55	137,54	89,93	114,99	118,43	69,97	86,00	98,18
7	139,84	116,39	130,00	131,72	97,50	97,99	122,00	92,56	91,08	113,01
8	140,02	116,56	130,30	131,65	91,92	89,07	122,51	97,99	94,91	129,00
9	133,61	114,86	133,93	135,67	90,93	103,00	119,12	105,15	88,99	112,10
10	137,03	116,00	131,00	134,14	90,01	97,97	123,00	85,00	86,00	86,00
11	138,05	119,00	130,95	131,83	95,26	91,27	122,78	83,76	91,02	119,72
12	134,03	129,59	126,28	140,35	91,00	137,01	110,78	69,92	83,16	113,12
<i>Média</i>	<i>137,21</i>	<i>117,12</i>	<i>130,25</i>	<i>134,76</i>	<i>91,64</i>	<i>104,94</i>	<i>119,94</i>	<i>94,66</i>	<i>88,41</i>	<i>105,14</i>
σ	2,85	6,92	2,18	3,34	2,35	17,69	4,81	22,70	4,27	19,23
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,99%</i>	<i>6,47%</i>	<i>0,19%</i>	<i>0,18%</i>	<i>1,83%</i>	<i>4,60%</i>	<i>0,05%</i>	<i>17,69%</i>	<i>4,01%</i>	<i>31,43%</i>

A tabela 5.13 e a figura 5.3 mostram o comparativo entre as pressões reais e calibradas pelo programa.

TABELA 5.13 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,69	0,05	58,69	0,05
20	55,75	55,76	0,01	55,76	0,01
30	56,08	56,08	0,00	56,08	0,00
40	53,77	53,90	0,13	53,85	0,08
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,22	0,05	54,26	0,01
70	53,03	53,12	0,09	53,06	0,03

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,30	0,14	56,31	0,13
20	48,37	48,41	0,04	48,42	0,05
30	48,72	48,71	0,01	48,72	0,00
40	47,03	47,02	0,01	47,01	0,02
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,00	0,12	44,09	0,03
70	42,88	42,90	0,02	42,89	0,01

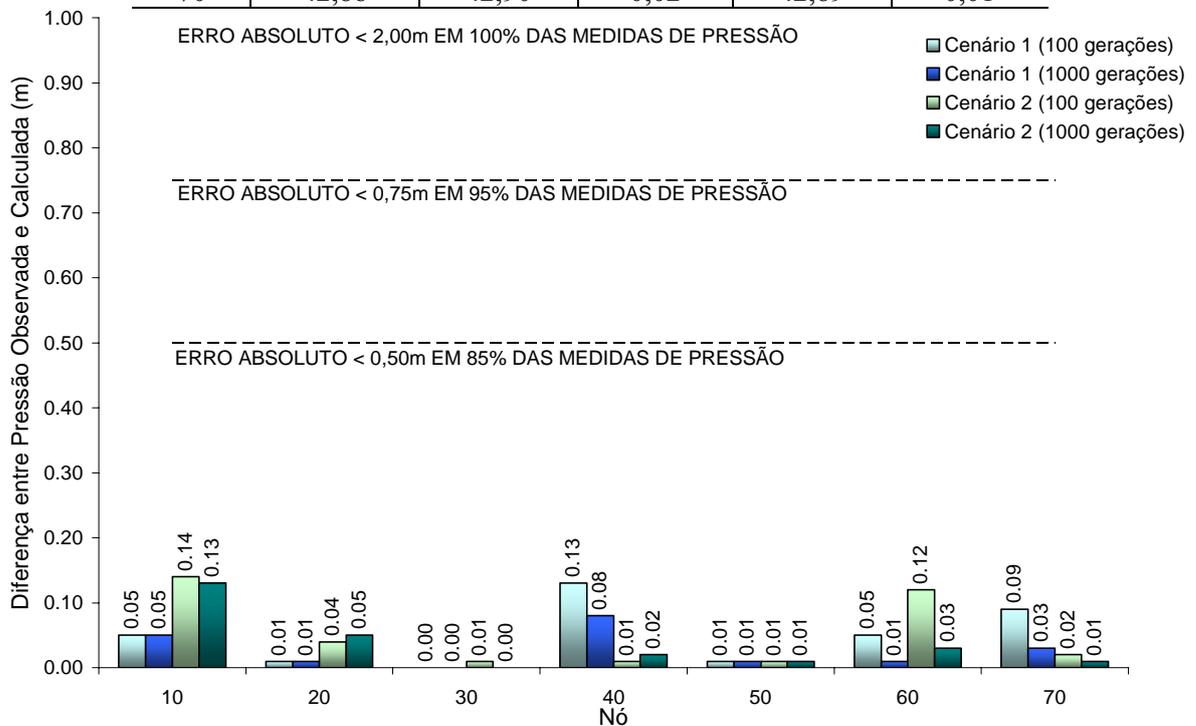


FIGURA 5.3 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição geracional, com espaço amostral ampliado.

5.1.4 Steady-State

Para o método de substituição *steady-state* adotou-se uma população de 200 indivíduos gerando 100 filhos a cada iteração, para que o tempo de processamento seja igual ao das demais alternativas. As soluções encontradas estão nas tabelas 5.14 e 5.15.

TABELA 5.14 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando substituição *steady-state*.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	137,14	112,42	132,92	135,12	90,00	104,81	118,09	104,48	88,40	105,92
2	137,31	109,85	133,11	133,83	91,48	99,93	121,52	123,31	87,20	96,07
3	135,79	107,97	132,96	135,99	90,69	109,52	118,84	145,36	90,72	101,54
4	138,64	112,05	128,89	137,30	89,77	123,21	114,83	117,33	88,45	103,86
5	139,82	120,57	126,09	134,45	91,60	110,28	121,60	68,87	87,00	94,38
6	140,52	115,33	129,44	133,12	90,20	97,98	121,48	87,43	89,59	104,71
7	130,64	116,78	132,79	139,48	90,14	119,49	115,09	98,00	91,26	101,45
8	136,99	114,78	131,17	133,31	95,98	101,06	122,47	104,59	87,59	97,40
9	138,87	113,29	131,64	132,75	90,64	92,90	121,49	114,85	94,53	120,22
10	135,80	112,72	132,00	135,82	93,23	112,61	119,06	106,64	85,31	85,09
11	139,58	112,70	131,09	131,42	96,92	93,74	124,28	110,98	89,08	97,87
12	132,00	116,45	132,94	137,07	90,52	108,04	119,42	109,10	88,57	102,89
Média	136,93	113,74	131,25	134,97	91,76	106,13	119,85	107,58	88,97	100,95
σ	3,04	3,33	2,14	2,28	2,39	9,56	2,87	18,71	2,39	8,33
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro	2,20%	3,40%	0,96%	0,02%	1,96%	3,52%	0,13%	6,45%	4,68%	26,19%

TABELA 5.15 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando substituição *steady-state*.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	137,14	112,42	132,92	135,12	90,04	104,81	118,09	104,48	88,40	106,97
2	137,31	109,84	133,11	134,02	90,17	98,00	121,72	123,38	88,00	94,57
3	136,00	107,97	133,00	136,00	90,30	109,46	118,94	148,96	85,33	96,62
4	138,64	112,05	128,89	137,30	89,77	123,21	114,83	117,33	88,45	103,86
5	139,91	121,04	126,08	134,46	90,41	106,94	121,60	68,89	85,96	92,65
6	140,52	115,33	129,44	133,12	90,18	97,96	121,48	87,38	87,64	105,90
7	130,64	116,88	132,79	139,48	90,14	120,89	115,82	103,70	88,91	98,38
8	137,71	114,78	131,17	133,31	94,04	100,02	122,47	97,61	86,38	91,52
9	138,87	113,29	131,64	132,75	90,65	92,90	121,49	115,06	94,53	122,15
10	135,80	112,72	132,00	135,82	93,23	112,61	119,06	106,28	85,31	85,09
11	140,01	112,75	131,08	131,71	94,25	92,94	124,30	100,22	85,97	91,76
12	132,01	116,45	133,00	137,07	90,52	108,02	119,42	104,86	88,00	99,89
Média	137,05	113,79	131,26	135,01	91,14	105,65	119,93	106,51	87,74	99,11
σ	3,08	3,43	2,16	2,23	1,66	9,93	2,77	19,52	2,49	9,72
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro	2,11%	3,45%	0,97%	0,01%	1,27%	3,96%	0,05%	7,38%	3,22%	23,89%

Os critérios estabelecidos para calibração foram atendidos, como indicado na tabela 5.16 e no gráfico 5.4.

TABELA 5.16 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição *steady-state*.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,69	0,05	58,69	0,05
20	55,75	55,75	0,00	55,76	0,01
30	56,08	56,09	0,01	56,09	0,01
40	53,77	53,87	0,10	53,83	0,06
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,26	0,01	54,26	0,01
70	53,03	53,06	0,03	53,05	0,02

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,30	0,14	56,30	0,14
20	48,37	48,38	0,01	48,39	0,02
30	48,72	48,73	0,01	48,74	0,02
40	47,03	47,01	0,02	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,08	0,04	44,10	0,02
70	42,88	42,89	0,01	42,89	0,01

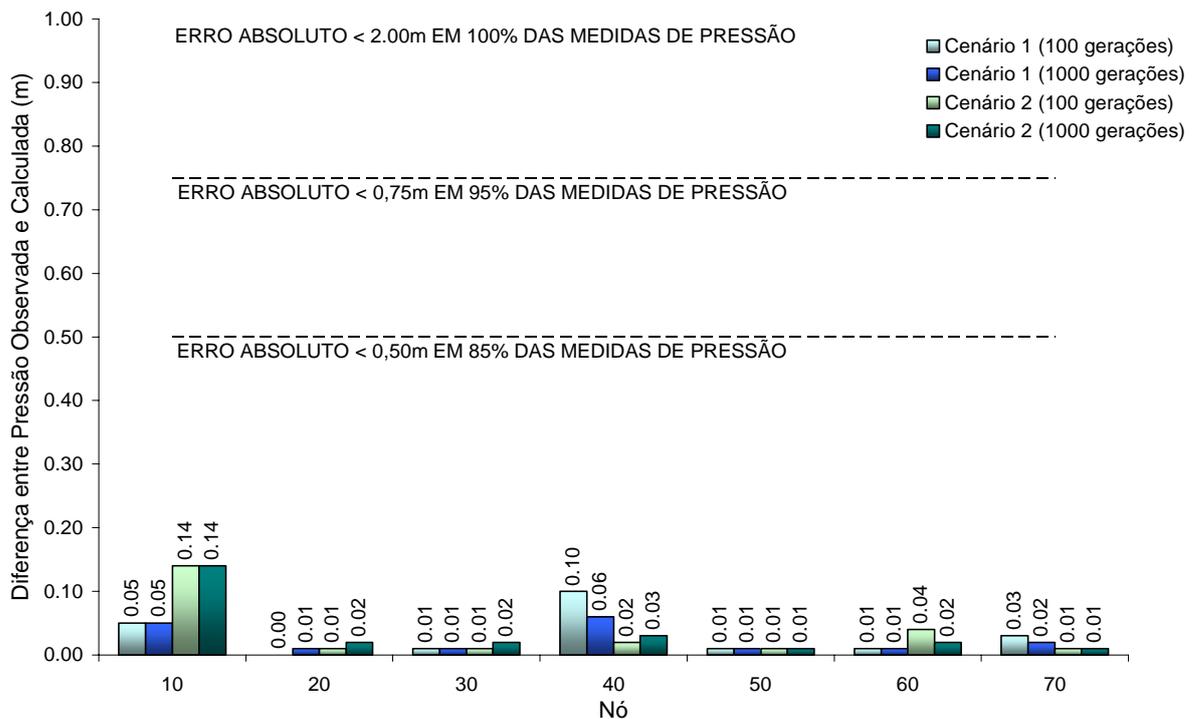


FIGURA 5.4 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando substituição *steady-state*.

5.1.5 Análise comparativa entre as alternativas de substituição de indivíduos

A partir das simulações realizadas, percebe-se que, apesar das diferenças entre pressões reais e calculadas não serem superiores a 0,14 m, indicando que o sistema está calibrado, as soluções encontradas para alguns tubos divergem do real. Pelas figuras 5.5 e 5.6 nota-se que as rugosidades estimadas para os tubos 6, 8 e 10 apresentam um desvio padrão elevado nos quatro métodos de substituição adotados, mostrando que esses tubos são pouco sensíveis ao processo de calibração, pois uma variação significativa em suas rugosidades ocasiona uma pequena alteração nos valores de pressões.

A avaliação do desempenho de cada técnica de substituição de indivíduos é feita com base no cálculo da probabilidade com que as rugosidades são determinadas com erro menor que 5%. As probabilidades estão ilustradas nas figuras 5.7 e 5.8 que também evidenciam a influência do número de *Reynolds* sobre o resultado da calibração, haja vista que os tubos menos sensíveis, apresentam baixa velocidade de escoamento e conseqüentemente baixo número de *Reynolds*.

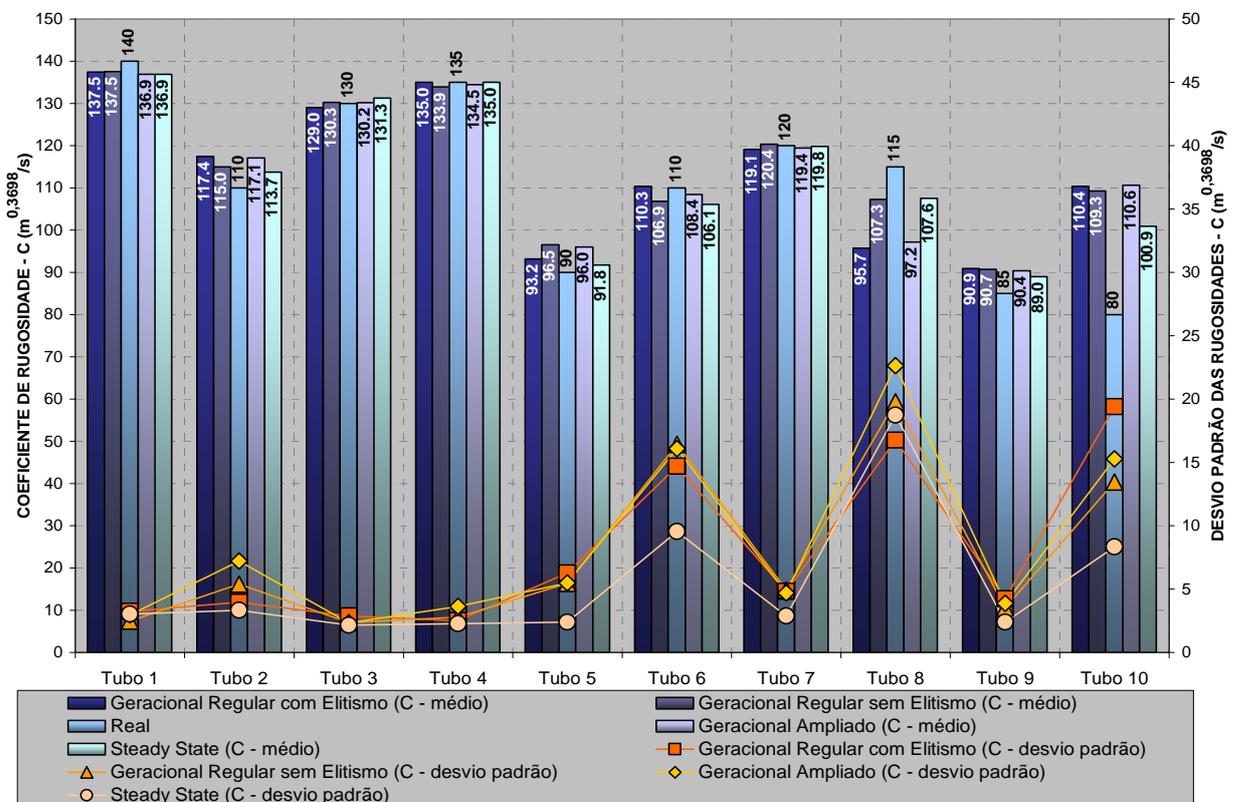


FIGURA 5.5 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados por tipo de substituição de indivíduos (número de gerações = 100).

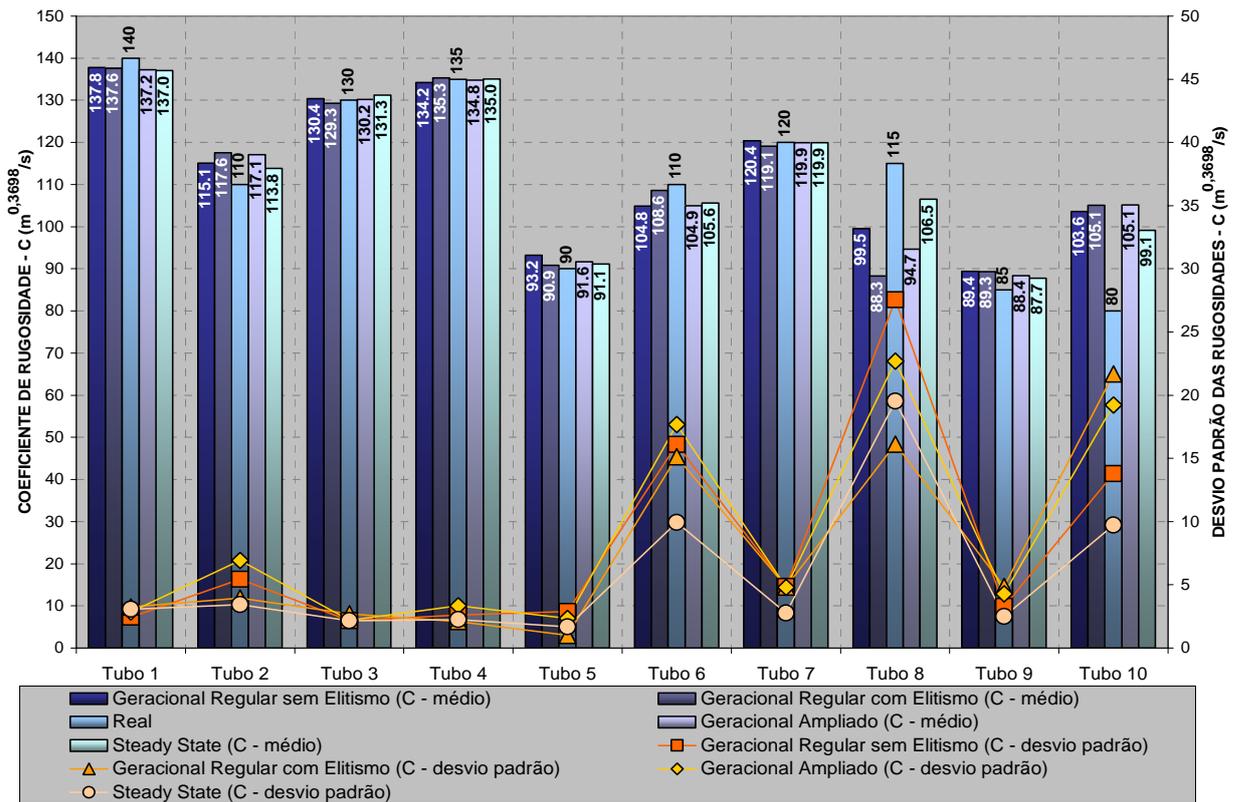


FIGURA 5.6 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados por tipo de substituição de indivíduos (número de gerações = 1000).

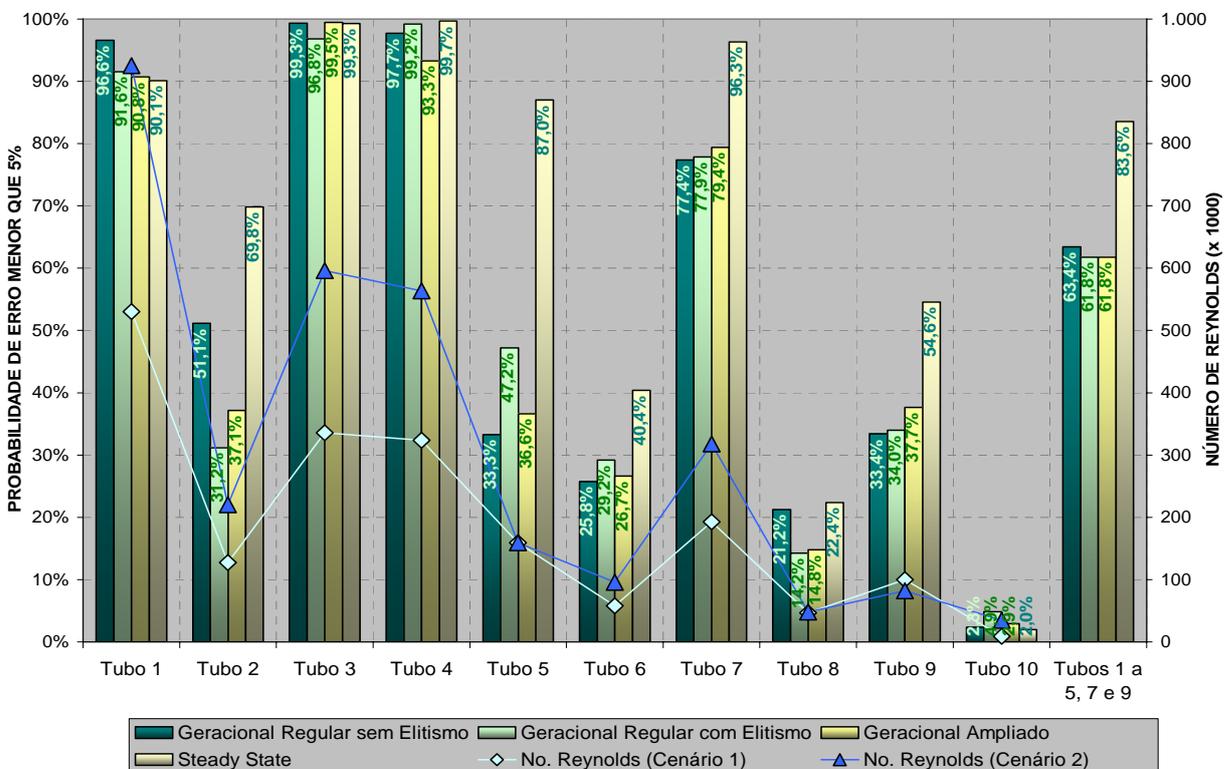


FIGURA 5.7 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por tipo de substituição de indivíduos (número de gerações = 100).

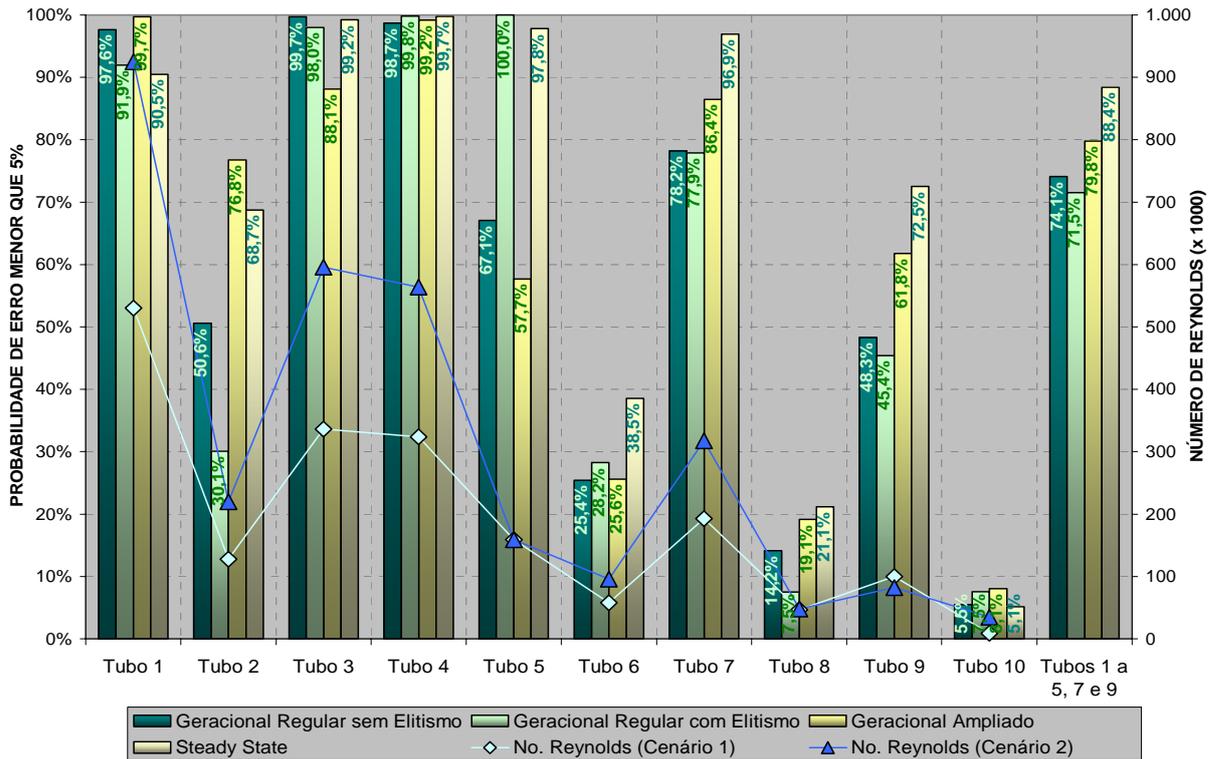


FIGURA 5.8 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por tipo de substituição de indivíduos (número gerações = 1000).

Além das probabilidades de cada tubo, as figuras 5.7 e 5.8 indicam as probabilidades médias com que todos os tubos, exceto os menos sensíveis (tubos 6, 8 e 10), são calibrados com erro menor que 5%. Diante disso, verifica-se que o método de substituição *steady-state* apresenta melhores resultados tanto para 100 como para 1000 iterações. Analisando a evolução da função objetivo demonstrada na figura 5.9, nota-se a rápida convergência das substituições *steady-state* e geracional regular, com elitismo.

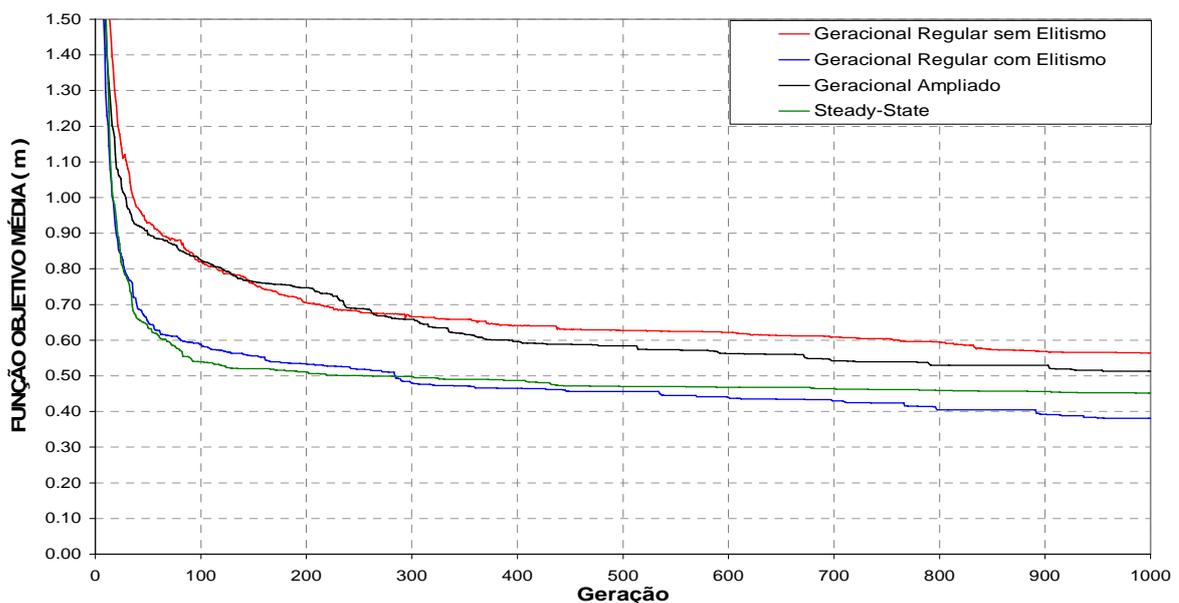


FIGURA 5.9 – Comportamento da função objetivo média por tipo de substituição de indivíduos.

5.2 Análise dos operadores de seleção

Os operadores de seleção avaliados nesse trabalho são: torneio, roda da roleta, amostragem estocástica universal, amostragem determinística e *remainder stochastic sampling*. Para comparação dos métodos de seleção, os demais parâmetros e operadores são constantes para todas as calibrações, e estão apresentados na tabela a seguir.

TABELA 5.17 – Dados utilizados para análise dos operadores de seleção.

Substituição indivíduos	<i>Steady-state</i>
Recombinação	Em cada geração um dos operadores é escolhido aleatoriamente.
Mutação	Uniforme
Cálculo da perda de carga	<i>Hazen-Williams</i>

5.2.1 Torneio

As amostras dos 12 resultados de rugosidades obtidas utilizando a seleção por torneio com três participantes, estão apresentadas nas tabelas 5.18 e 5.19.

TABELA 5.18 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando seleção por torneio.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	137,14	112,42	132,92	135,12	90,00	104,81	118,09	104,48	88,40	105,92
2	137,31	109,85	133,11	133,83	91,48	99,93	121,52	123,31	87,20	96,07
3	135,79	107,97	132,96	135,99	90,69	109,52	118,84	145,36	90,72	101,54
4	138,64	112,05	128,89	137,30	89,77	123,21	114,83	117,33	88,45	103,86
5	139,82	120,57	126,09	134,45	91,60	110,28	121,60	68,87	87,00	94,38
6	140,52	115,33	129,44	133,12	90,20	97,98	121,48	87,43	89,59	104,71
7	130,64	116,78	132,79	139,48	90,14	119,49	115,09	98,00	91,26	101,45
8	136,99	114,78	131,17	133,31	95,98	101,06	122,47	104,59	87,59	97,40
9	138,87	113,29	131,64	132,75	90,64	92,90	121,49	114,85	94,53	120,22
10	135,80	112,72	132,00	135,82	93,23	112,61	119,06	106,64	85,31	85,09
11	139,58	112,70	131,09	131,42	96,92	93,74	124,28	110,98	89,08	97,87
12	132,00	116,45	132,94	137,07	90,52	108,04	119,42	109,10	88,57	102,89
<i>Média</i>	<i>136,93</i>	<i>113,74</i>	<i>131,25</i>	<i>134,97</i>	<i>91,76</i>	<i>106,13</i>	<i>119,85</i>	<i>107,58</i>	<i>88,97</i>	<i>100,95</i>
σ	3,04	3,33	2,14	2,28	2,39	9,56	2,87	18,71	2,39	8,33
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>2,20%</i>	<i>3,40%</i>	<i>0,96%</i>	<i>0,02%</i>	<i>1,96%</i>	<i>3,52%</i>	<i>0,13%</i>	<i>6,45%</i>	<i>4,68%</i>	<i>26,19%</i>

TABELA 5.19 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando seleção por torneio.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	137,14	112,42	132,92	135,12	90,04	104,81	118,09	104,48	88,40	106,97
2	137,31	109,84	133,11	134,02	90,17	98,00	121,72	123,38	88,00	94,57
3	136,00	107,97	133,00	136,00	90,30	109,46	118,94	148,96	85,33	96,62
4	138,64	112,05	128,89	137,30	89,77	123,21	114,83	117,33	88,45	103,86
5	139,91	121,04	126,08	134,46	90,41	106,94	121,60	68,89	85,96	92,65
6	140,52	115,33	129,44	133,12	90,18	97,96	121,48	87,38	87,64	105,90
7	130,64	116,88	132,79	139,48	90,14	120,89	115,82	103,70	88,91	98,38
8	137,71	114,78	131,17	133,31	94,04	100,02	122,47	97,61	86,38	91,52
9	138,87	113,29	131,64	132,75	90,65	92,90	121,49	115,06	94,53	122,15
10	135,80	112,72	132,00	135,82	93,23	112,61	119,06	106,28	85,31	85,09
11	140,01	112,75	131,08	131,71	94,25	92,94	124,30	100,22	85,97	91,76
12	132,01	116,45	133,00	137,07	90,52	108,02	119,42	104,86	88,00	99,89
<i>Média</i>	137,05	113,79	131,26	135,01	91,14	105,65	119,93	106,51	87,74	99,11
σ	3,08	3,43	2,16	2,23	1,66	9,93	2,77	19,52	2,49	9,72
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	2,11%	3,45%	0,97%	0,01%	1,27%	3,96%	0,05%	7,38%	3,22%	23,89%

A tabela 5.20 e a figura 5.10 mostram as diferenças absolutas entre as pressões observadas e pressões simuladas com a média dos coeficientes de rugosidade calibrados.

TABELA 5.20 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando seleção por torneio.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,69	0,05	58,69	0,05
20	55,75	55,75	0,00	55,76	0,01
30	56,08	56,09	0,01	56,09	0,01
40	53,77	53,87	0,10	53,83	0,06
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,26	0,01	54,26	0,01
70	53,03	53,06	0,03	53,05	0,02
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,30	0,14	56,30	0,14
20	48,37	48,38	0,01	48,39	0,02
30	48,72	48,73	0,01	48,74	0,02
40	47,03	47,01	0,02	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,08	0,04	44,10	0,02
70	42,88	42,89	0,01	42,89	0,01

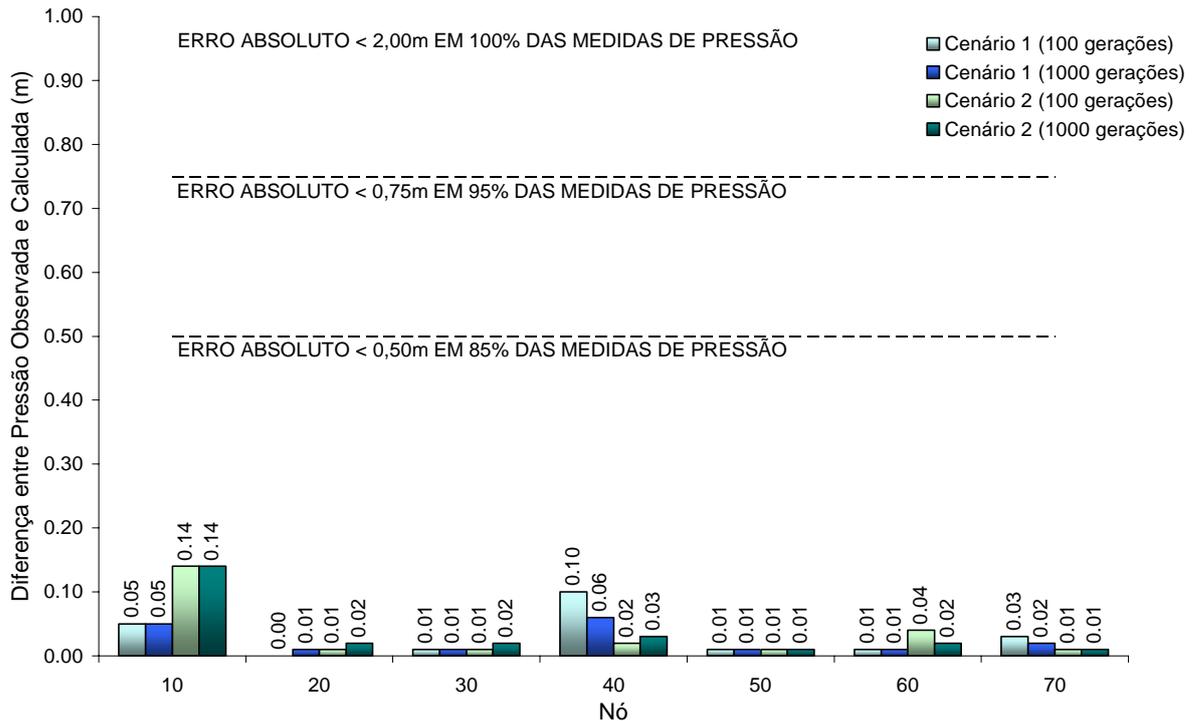


FIGURA 5.10 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando seleção por torneio.

5.2.2 Roda da Roleta

As tabelas 5.21 e 5.22 apresentam as amostras de 12 rugosidades calibradas utilizando a roda da roleta como operador de seleção.

TABELA 5.21 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção roda da roleta.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	135,91	118,92	129,76	135,97	90,84	110,12	118,05	90,85	92,16	116,28
2	134,22	121,58	128,58	136,15	91,41	109,13	121,97	85,05	87,47	94,27
3	139,97	110,51	130,55	133,04	96,09	105,39	120,99	124,38	89,26	98,76
4	140,19	116,27	127,56	134,10	94,12	111,25	119,92	94,47	89,32	104,23
5	140,19	118,27	126,31	135,32	90,50	113,76	117,98	92,69	91,73	112,54
6	138,73	117,39	128,77	134,56	93,84	110,61	117,97	92,84	92,43	119,08
7	137,77	114,66	128,99	137,26	90,37	121,90	114,00	104,47	94,12	118,92
8	137,84	111,07	130,74	134,67	93,36	117,08	117,81	124,09	91,17	105,04
9	141,06	115,34	127,19	134,97	90,04	111,75	118,12	100,81	91,97	109,86
10	136,73	116,49	130,04	134,16	92,43	100,04	123,08	105,10	88,81	95,57
11	136,52	117,64	129,07	136,05	90,67	111,65	118,79	94,27	91,02	107,96
12	139,93	111,06	130,63	133,64	90,51	101,46	121,17	116,57	89,21	99,13
<i>Média</i>	138,25	115,76	129,01	134,99	92,01	110,34	119,16	102,13	90,72	106,80
σ	2,11	3,44	1,43	1,21	1,93	6,08	2,43	13,20	1,91	8,78
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	1,25%	5,24%	0,76%	0,01%	2,24%	0,31%	0,70%	11,19%	6,73%	33,51%

TABELA 5.22 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção roda da roleta.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	136,08	118,95	129,91	135,97	90,00	108,59	118,10	87,15	90,71	113,77
2	134,59	121,52	129,63	136,17	89,95	106,79	120,78	71,82	85,73	92,35
3	139,98	110,51	130,61	133,59	92,39	103,84	121,27	116,38	86,50	90,42
4	140,07	116,31	128,64	134,53	90,36	107,35	119,84	85,22	85,76	92,92
5	139,94	119,12	127,41	135,43	90,05	113,09	118,00	71,50	86,33	98,40
6	139,38	117,09	128,74	134,79	90,14	107,51	118,10	91,22	91,91	117,60
7	137,78	114,69	128,99	137,28	90,21	121,72	114,05	106,64	94,13	118,89
8	138,45	111,08	130,76	135,38	90,07	109,65	118,22	122,46	90,41	104,28
9	140,43	115,92	128,17	134,99	90,28	111,26	118,07	89,78	88,04	103,69
10	137,07	115,64	130,86	134,41	89,92	99,69	122,54	90,13	85,58	85,35
11	136,83	117,96	129,40	136,11	89,98	111,23	118,57	84,81	86,01	97,99
12	139,93	111,10	130,64	133,70	90,11	100,87	121,33	115,63	87,82	95,87
<i>Média</i>	138,38	115,82	129,48	135,19	90,29	108,47	119,07	94,39	88,24	100,96
σ	1,90	3,49	1,12	1,08	0,68	5,84	2,25	17,01	2,87	10,94
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	1,16%	5,29%	0,40%	0,14%	0,32%	1,39%	0,77%	17,92%	3,82%	26,20%

As diferenças absolutas entre pressões observadas e calibradas estão de acordo com os limites de tolerância, como pode ser constatado na tabela 5.23 e na figura 5.11.

TABELA 5.23 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção roda da roleta.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,71	0,03	58,71	0,03
20	55,75	55,76	0,01	55,75	0,00
30	56,08	56,06	0,02	56,08	0,00
40	53,77	53,92	0,15	53,84	0,07
50	53,35	53,35	0,00	53,34	0,01
60	54,27	54,25	0,02	54,27	0,00
70	53,03	53,06	0,03	53,04	0,01
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,36	0,08	56,37	0,07
20	48,37	48,38	0,01	48,40	0,03
30	48,72	48,66	0,06	48,71	0,01
40	47,03	47,02	0,01	47,01	0,02
50	41,80	41,81	0,01	41,80	0,00
60	44,12	44,07	0,05	44,11	0,01
70	42,88	42,88	0,00	42,88	0,00

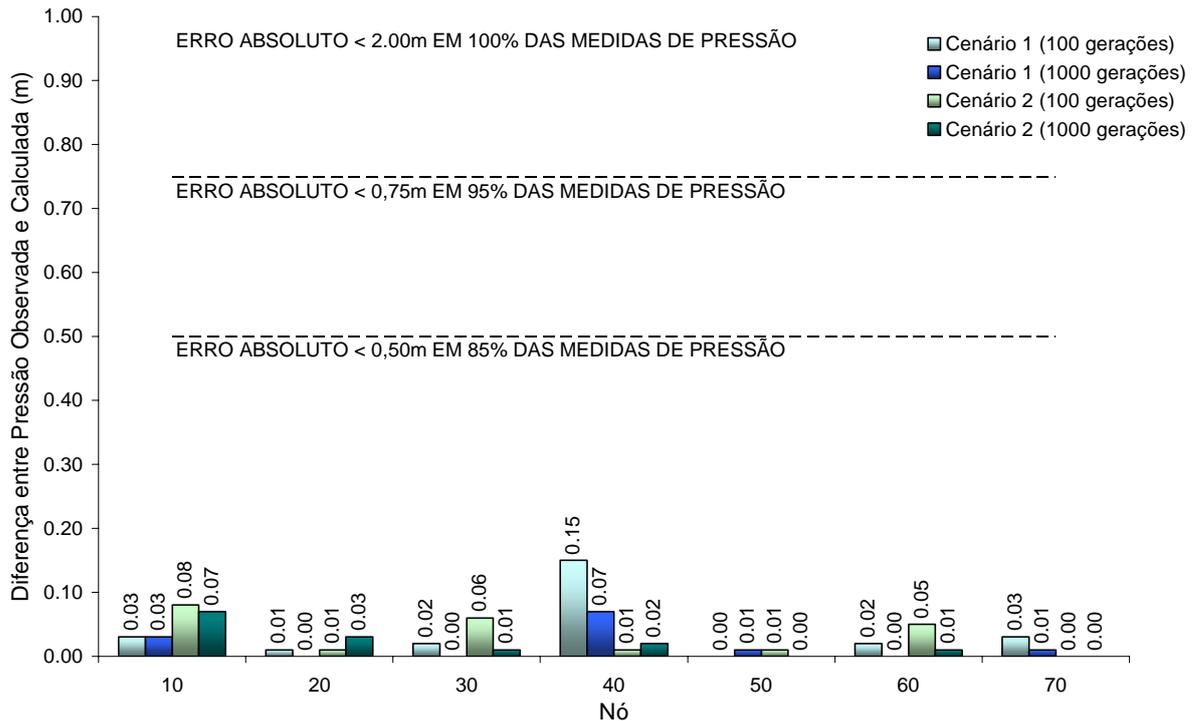


FIGURA 5.11 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção roda da roleta.

5.2.3 Amostragem Estocástica Universal

Os resultados da calibração onde os indivíduos são selecionados pelo método da amostragem estocástica universal estão apresentados nas tabelas 5.24 e 5.25.

TABELA 5.24 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,53	113,83	130,00	132,60	102,01	110,13	120,54	107,29	89,06	111,20
2	139,76	117,79	127,34	133,84	94,52	108,71	120,24	93,12	91,21	113,95
3	138,00	115,39	127,00	137,39	88,93	120,17	118,91	111,00	85,60	82,00
4	139,50	119,35	128,06	132,29	92,04	91,00	126,00	80,95	85,46	88,33
5	140,26	109,49	130,09	134,31	94,81	115,00	118,14	124,89	89,13	97,76
6	141,45	112,29	127,91	135,23	93,00	119,04	117,63	103,00	86,38	90,55
7	138,02	107,00	132,01	135,44	89,93	108,33	119,13	147,02	87,56	92,40
8	140,41	112,82	130,74	133,60	92,57	105,27	118,73	100,00	88,81	107,43
9	132,86	113,36	134,43	136,38	92,00	107,07	116,78	123,41	90,95	123,69
10	138,32	119,98	124,47	138,66	90,57	134,11	115,00	76,01	83,53	82,24
11	138,47	117,99	128,95	134,88	90,95	107,85	117,93	86,14	90,73	122,23
12	135,61	114,14	131,55	136,35	91,03	111,71	117,29	108,74	91,28	110,01
<i>Média</i>	138,51	114,45	129,38	135,08	92,70	111,53	118,86	105,13	88,31	101,82
σ	2,33	3,91	2,66	1,91	3,41	10,30	2,70	20,23	2,60	14,83
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	1,06%	4,05%	0,48%	0,06%	2,99%	1,39%	0,95%	8,58%	3,89%	27,27%

TABELA 5.25 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,53	113,83	130,00	134,00	91,00	103,62	120,54	100,40	87,86	97,37
2	140,00	118,00	128,00	134,00	92,50	107,55	120,24	72,00	87,00	97,00
3	138,00	115,69	127,00	137,39	89,62	122,37	118,00	98,00	85,00	79,00
4	139,50	119,35	128,06	132,29	91,00	91,20	126,18	79,00	85,46	88,73
5	140,26	109,49	130,09	134,31	94,00	112,00	118,14	131,32	90,01	105,00
6	141,45	112,29	127,91	135,23	92,25	119,04	117,63	102,25	86,00	87,08
7	138,02	107,00	132,01	135,44	89,93	108,33	119,13	149,00	87,56	91,17
8	140,41	112,82	130,74	133,60	91,00	102,07	119,00	102,51	89,00	114,76
9	133,00	113,36	134,65	136,38	91,15	107,00	117,00	119,24	95,00	124,00
10	138,32	119,98	124,47	138,66	90,57	133,60	115,00	76,01	85,00	84,54
11	138,47	118,00	128,95	134,91	90,95	107,85	117,93	86,14	89,60	122,23
12	135,61	114,14	131,55	136,35	91,00	111,71	117,29	108,74	91,28	110,00
<i>Média</i>	<i>138,55</i>	<i>114,50</i>	<i>129,45</i>	<i>135,21</i>	<i>91,25</i>	<i>110,53</i>	<i>118,84</i>	<i>102,05</i>	<i>88,23</i>	<i>100,07</i>
σ	2,31	3,94	2,66	1,77	1,18	10,76	2,74	22,93	2,96	15,02
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,04%</i>	<i>4,09%</i>	<i>0,42%</i>	<i>0,16%</i>	<i>1,39%</i>	<i>0,48%</i>	<i>0,97%</i>	<i>11,26%</i>	<i>3,80%</i>	<i>25,09%</i>

A tabela 5.26 e a figura 5.12 mostram o comparativo entre as pressões reais e calibradas pelo programa.

TABELA 5.26 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,72	0,02	58,72	0,02
20	55,75	55,76	0,01	55,75	0,00
30	56,08	56,07	0,01	56,08	0,00
40	53,77	53,85	0,08	53,85	0,08
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,25	0,02	54,26	0,01
70	53,03	53,07	0,04	53,05	0,02
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,37	0,07	56,38	0,06
20	48,37	48,38	0,01	48,39	0,02
30	48,72	48,69	0,03	48,70	0,02
40	47,03	46,99	0,04	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,80	0,00
60	44,12	44,06	0,06	44,09	0,03
70	42,88	42,89	0,01	42,88	0,00

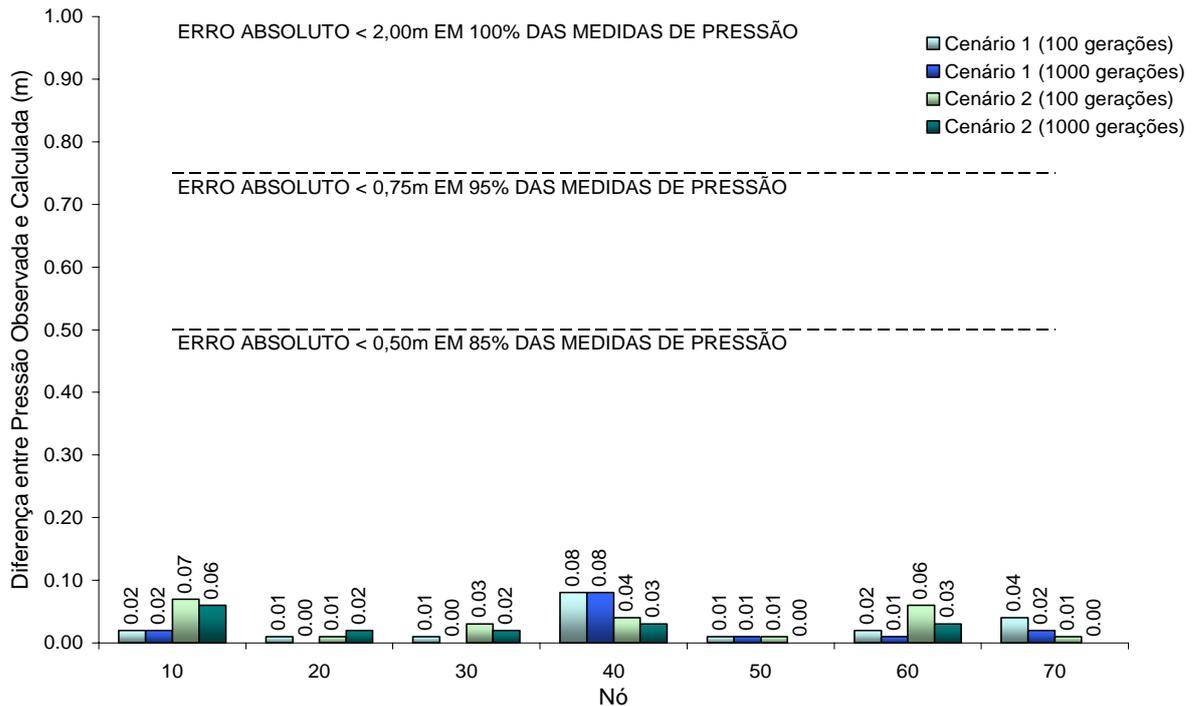


FIGURA 5.12 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem estocástica universal.

5.2.4 Amostragem Determinística

A seleção por amostragem determinística será avaliada a partir dos resultados obtidos nas calibrações, que estão apresentados nas tabelas 5.27 e 5.28.

TABELA 5.27 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	137,70	114,75	131,10	133,12	96,05	101,65	121,16	103,00	89,24	109,51
2	137,20	114,99	129,72	136,35	90,63	115,20	116,14	111,55	93,23	120,00
3	132,61	117,72	132,51	135,70	98,45	112,27	118,15	102,75	93,50	117,48
4	139,47	112,13	129,14	135,68	90,39	114,67	117,88	111,33	87,05	96,08
5	136,33	114,38	130,49	136,37	90,37	113,52	117,76	103,95	88,87	99,05
6	139,67	118,13	126,77	134,91	89,93	109,00	120,08	92,74	90,74	105,79
7	138,61	113,78	129,56	134,99	94,80	115,00	117,18	110,26	92,72	113,33
8	135,22	112,80	132,45	136,84	92,53	117,43	115,85	107,04	89,62	103,67
9	139,22	112,77	128,99	136,01	91,22	117,57	117,52	107,45	86,20	92,89
10	132,70	120,94	130,03	136,28	93,14	109,44	120,09	94,93	92,66	111,38
11	135,44	116,27	131,93	134,72	90,80	100,14	120,69	103,00	92,41	114,50
12	139,12	107,96	132,63	133,16	97,28	106,85	118,88	133,44	92,96	112,33
Média	136,94	114,72	130,44	135,34	92,97	111,06	118,45	106,79	90,77	108,00
σ	2,51	3,34	1,77	1,22	2,98	5,79	1,74	10,26	2,53	8,59
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro	2,18%	4,29%	0,34%	0,26%	3,30%	0,97%	1,29%	7,14%	6,78%	35,00%

TABELA 5.28 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	138,01	114,75	130,96	133,12	95,95	101,65	121,16	101,86	89,24	107,74
2	137,20	115,00	129,72	136,35	90,63	114,99	116,14	109,40	93,68	118,95
3	132,61	117,72	132,51	136,00	95,29	110,90	118,15	102,63	93,50	117,87
4	139,47	112,13	129,14	135,68	90,39	115,03	117,88	110,73	87,00	94,86
5	136,33	114,38	130,49	136,37	90,37	113,12	118,02	104,00	87,52	99,05
6	139,83	119,29	127,04	134,91	89,97	109,00	120,00	69,80	86,68	94,59
7	139,12	113,91	129,56	135,00	91,66	111,90	117,18	106,44	92,99	116,09
8	135,22	112,80	132,45	137,10	90,69	115,88	115,95	107,02	86,94	104,11
9	139,22	112,95	128,94	136,03	90,98	117,57	117,52	102,94	86,00	89,98
10	133,00	121,03	130,75	136,69	90,65	108,11	120,10	69,22	87,80	95,45
11	135,44	116,27	131,93	134,72	90,22	98,92	120,69	102,85	92,41	113,49
12	139,11	108,00	132,63	133,16	92,19	98,78	120,41	147,01	93,00	116,21
<i>Média</i>	<i>137,05</i>	<i>114,85</i>	<i>130,51</i>	<i>135,43</i>	<i>91,58</i>	<i>109,65</i>	<i>118,60</i>	<i>102,82</i>	<i>89,73</i>	<i>105,70</i>
σ	2,53	3,46	1,72	1,29	1,99	6,59	1,80	19,80	3,10	10,65
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>2,11%</i>	<i>4,41%</i>	<i>0,39%</i>	<i>0,32%</i>	<i>1,76%</i>	<i>0,31%</i>	<i>1,17%</i>	<i>10,59%</i>	<i>5,57%</i>	<i>32,13%</i>

Os limites de tolerância para calibração foram atendidos, como indicado na tabela 5.29 e no gráfico 5.13.

TABELA 5.29 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,69	0,05	58,69	0,05
20	55,75	55,76	0,01	55,75	0,00
30	56,08	56,08	0,00	56,09	0,01
40	53,77	53,91	0,14	53,88	0,11
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,24	0,03	54,24	0,03
70	53,03	53,08	0,05	53,06	0,03
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,30	0,14	56,30	0,14
20	48,37	48,38	0,01	48,38	0,01
30	48,72	48,71	0,01	48,72	0,00
40	47,03	47,01	0,02	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,05	0,07	44,08	0,04
70	42,88	42,88	0,00	42,88	0,00

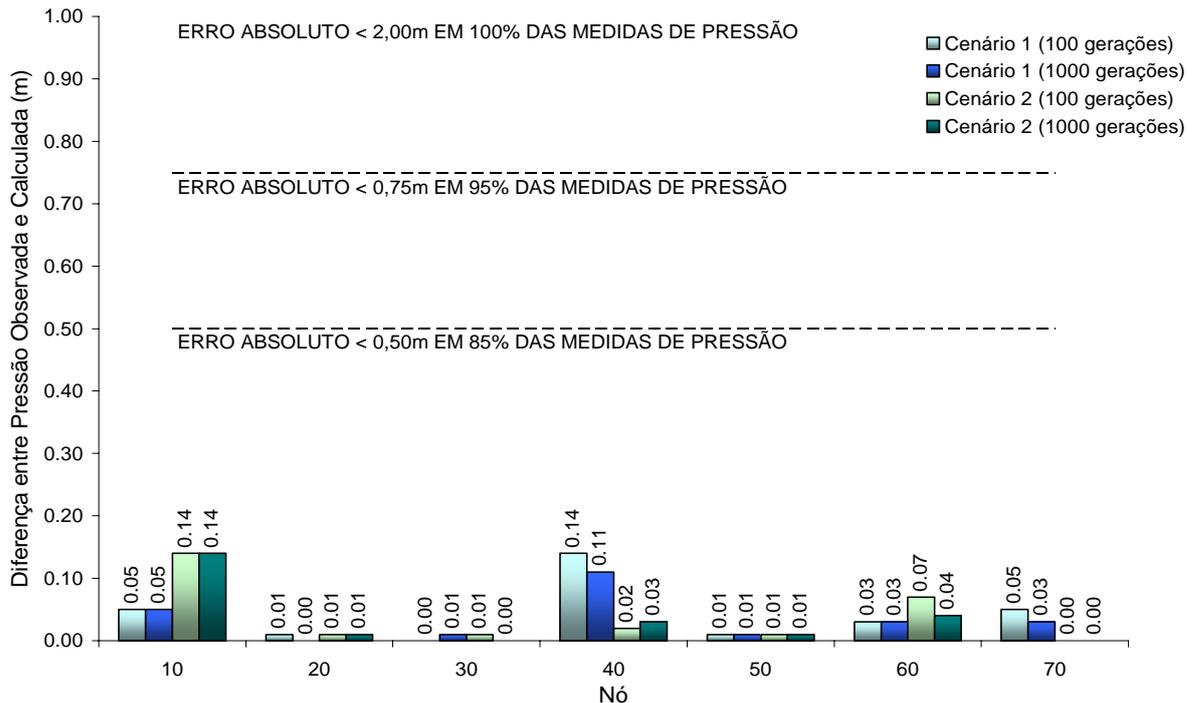


FIGURA 5.13 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção amostragem determinística.

5.2.5 Remainder Stochastic Sampling

Os resultados obtidos com o emprego da ferramenta de seleção *remainder stochastic sampling* estão nas tabelas 5.30 e 5.31.

TABELA 5.30 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de seleção *remainder stochastic sampling*.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de Hazen-Williams ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,21	112,41	129,13	135,31	93,12	116,44	118,07	111,27	87,56	95,73
2	139,95	112,57	127,84	136,92	90,98	125,00	114,59	113,84	90,59	105,00
3	138,92	118,47	127,93	132,32	100,65	104,19	122,14	96,11	93,72	115,72
4	138,79	119,24	128,13	132,78	93,08	96,79	123,39	92,91	92,93	113,64
5	135,69	118,03	130,60	135,41	89,91	104,09	120,21	87,06	88,00	107,65
6	129,75	114,96	135,14	139,32	90,61	118,68	116,51	104,31	86,12	88,66
7	139,91	111,26	131,83	130,43	101,42	93,90	125,00	115,84	88,45	98,51
8	138,35	115,90	130,67	133,33	91,00	95,08	122,00	96,41	89,75	110,30
9	139,32	114,20	130,78	132,53	92,10	94,45	122,76	101,95	89,00	106,25
10	137,70	105,26	134,78	133,19	91,75	95,17	121,54	147,70	90,16	106,80
11	137,50	110,98	131,46	133,83	101,09	112,27	119,06	121,47	90,55	101,04
12	139,95	113,61	129,42	133,36	96,58	108,75	119,85	104,50	89,94	104,33
Média	137,92	113,91	130,64	134,06	94,36	105,40	120,43	107,78	89,73	104,47
σ	2,86	3,88	2,43	2,36	4,38	10,80	3,00	16,15	2,15	7,61
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro	1,49%	4,27%	1,46%	1,55%	4,86%	9,09%	2,01%	12,08%	5,57%	30,59%

TABELA 5.31 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de seleção *remainder stochastic sampling*.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,21	113,05	129,13	135,31	93,13	116,48	118,07	101,65	85,99	92,66
2	139,95	112,57	127,84	136,94	90,98	125,00	114,59	112,13	90,59	104,00
3	140,00	120,03	128,01	132,99	92,17	99,98	122,13	69,85	87,26	101,38
4	139,89	119,19	128,93	132,82	90,09	94,31	123,16	69,67	86,97	98,41
5	135,80	118,03	130,60	135,41	89,93	104,09	120,21	82,15	87,01	102,07
6	129,75	115,01	135,00	139,32	90,38	117,98	116,58	106,25	85,93	89,24
7	139,92	111,26	131,95	131,02	94,42	90,53	125,00	112,62	87,99	93,37
8	138,35	116,02	130,67	133,33	90,10	94,97	122,00	96,43	89,75	110,30
9	139,32	114,20	130,78	132,53	92,10	94,45	122,76	100,99	87,97	105,49
10	138,05	105,32	134,80	133,19	91,33	95,17	121,54	148,29	90,18	101,71
11	137,93	111,00	131,46	134,02	97,55	110,50	119,61	118,92	88,64	97,17
12	140,01	113,61	129,42	133,36	96,64	108,74	119,85	103,37	88,87	103,86
<i>Média</i>	<i>138,18</i>	<i>114,11</i>	<i>130,72</i>	<i>134,19</i>	<i>92,40</i>	<i>104,35</i>	<i>120,46</i>	<i>101,86</i>	<i>88,10</i>	<i>99,97</i>
σ	2,94	4,04	2,34	2,24	2,58	11,27	2,95	21,68	1,55	6,03
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,30%</i>	<i>3,73%</i>	<i>0,55%</i>	<i>0,60%</i>	<i>2,67%</i>	<i>5,14%</i>	<i>0,38%</i>	<i>11,43%</i>	<i>3,64%</i>	<i>24,96%</i>

Os erros absolutos das pressões simuladas com rugosidades calibradas pelo operador de seleção *remainder stochastic sampling* estão na tabela 5.32 e no gráfico 5.14.

TABELA 5.32 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção *remainder stochastic sampling*.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,71	0,03	58,71	0,03
20	55,75	55,75	0,00	55,75	0,00
30	56,08	56,08	0,00	56,09	0,01
40	53,77	53,89	0,12	53,84	0,07
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,24	0,03	54,25	0,02
70	53,03	53,10	0,07	53,07	0,04
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,34	0,10	56,36	0,08
20	48,37	48,37	0,00	48,39	0,02
30	48,72	48,71	0,01	48,73	0,01
40	47,03	47,00	0,03	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,03	0,09	44,06	0,06
70	42,88	42,89	0,01	42,88	0,00

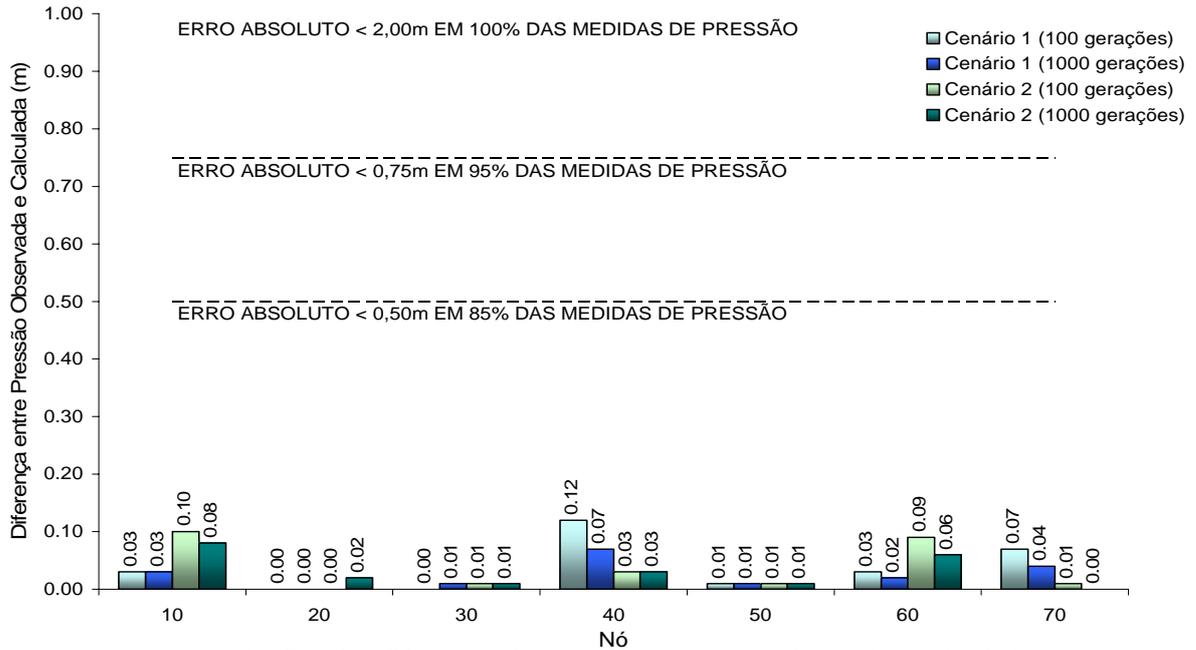


FIGURA 5.14 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de seleção *remainder stochastic sampling*.

5.2.6 Análise comparativa entre os operadores de seleção

Embora o sistema esteja calibrado, as soluções encontradas para os tubos 6, 8 e 10 apresentam novamente um desvio padrão elevado, como mostram as figuras 5.15 e 5.16.

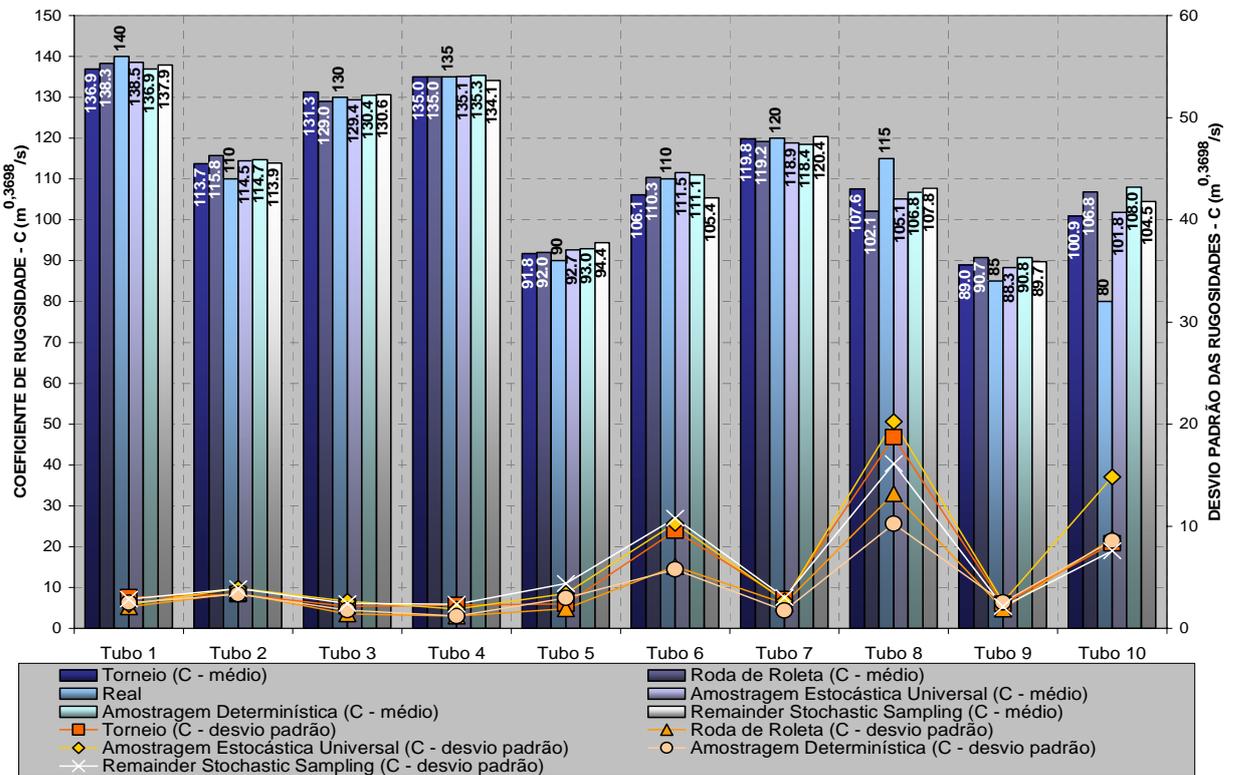


FIGURA 5.15 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, por operador de seleção (número de gerações = 100).

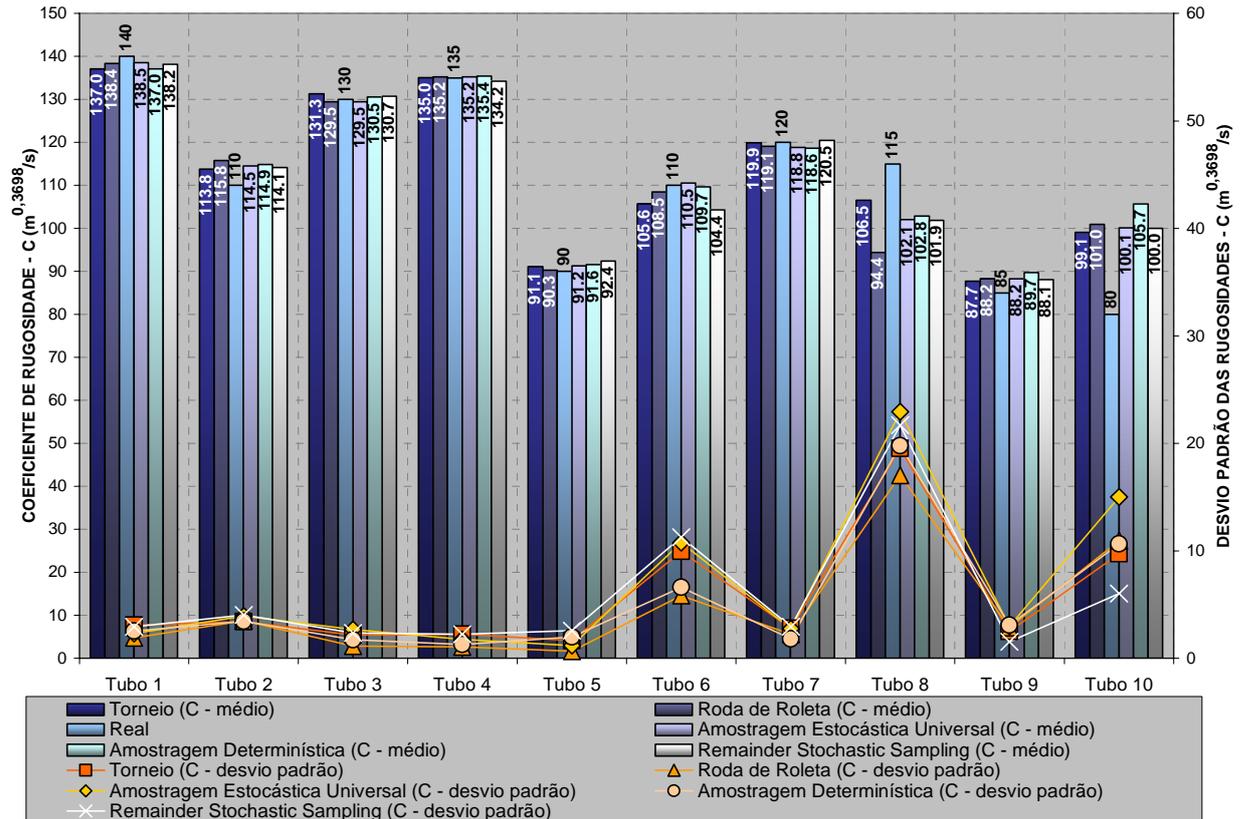


FIGURA 5.16 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, por operador de seleção (número de gerações = 1000).

A partir dos dados estatísticos expostos, foram calculadas as probabilidades de identificação dos coeficientes de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para cada tubo, de acordo com o método de seleção aplicado. Tendo em vista as divergências dos resultados encontrados para os tubos 6, 8 e 10, foram determinadas as probabilidades médias dos demais tubos, a fim de analisar a eficiência dos operadores de seleção dos indivíduos. Além dos gráficos de probabilidade, as figuras 5.17 e 5.18, apresentam o número de *Reynolds* de cada tubo, e sua influência na qualidade dos resultados obtidos.

Examinando os gráficos das figuras 5.17 e 5.18, observa-se que o torneio com três participantes é discretamente melhor que as demais técnicas de seleção estudadas, e o acréscimo na quantidade de iterações de 100 para 1000, aumentando em dez vezes o tempo de processamento, eleva de 83,6% para 88,4% a probabilidade média de calibração dos coeficientes de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, na seleção por torneio.

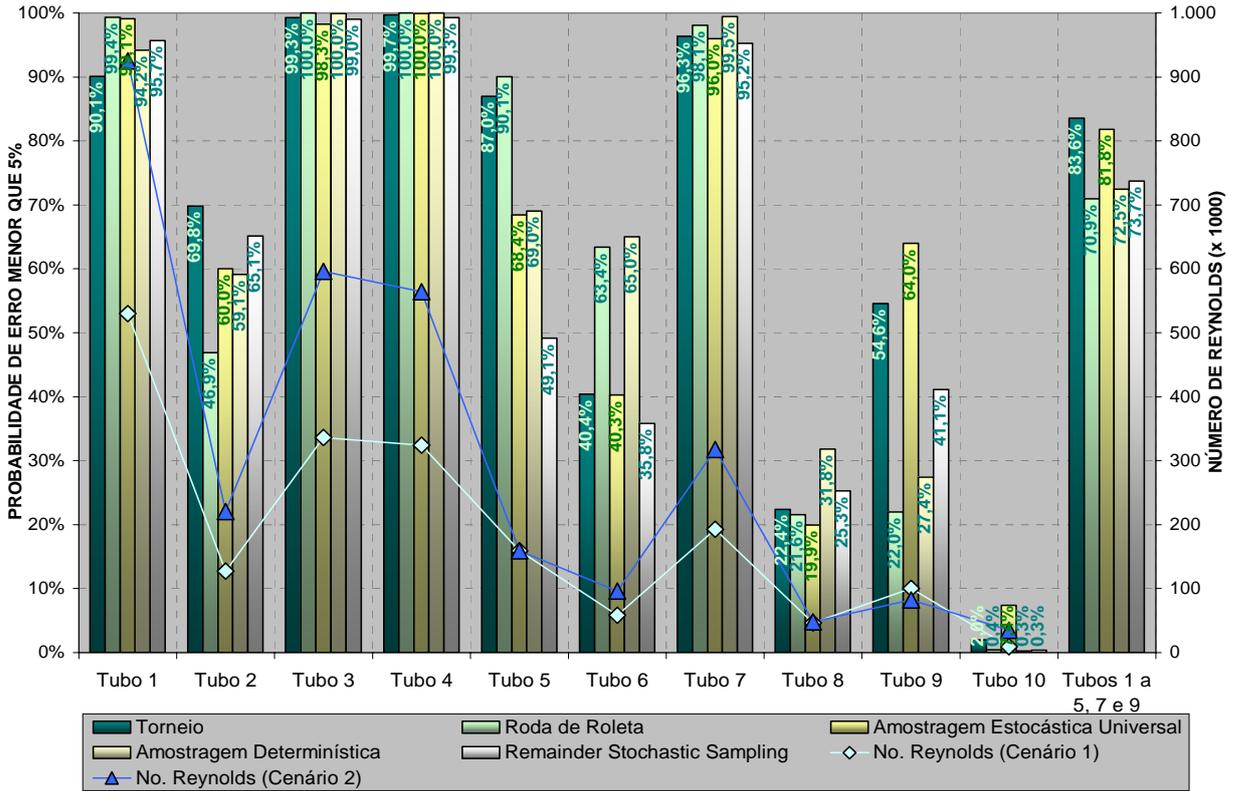


FIGURA 5.17 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por operador de seleção (número gerações = 100).

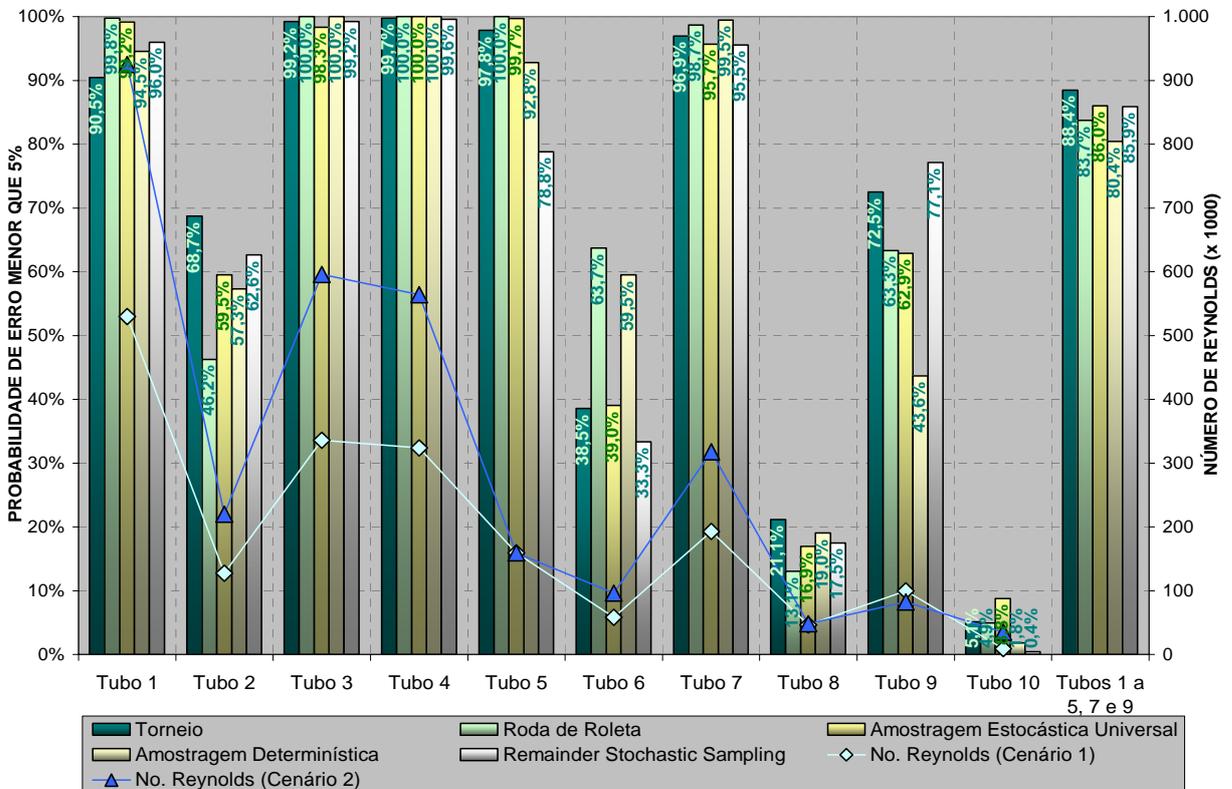


FIGURA 5.18 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por operador de seleção (número gerações = 1000).

Pela figura 5.19 nota-se que, embora a seleção por torneio tenha obtido melhores resultados, sua função objetivo média converge rapidamente até a centésima geração, sendo superada, em seguida, pelos métodos roda da roleta, amostragem estocástica universal e *remainder stochastic sampling*.

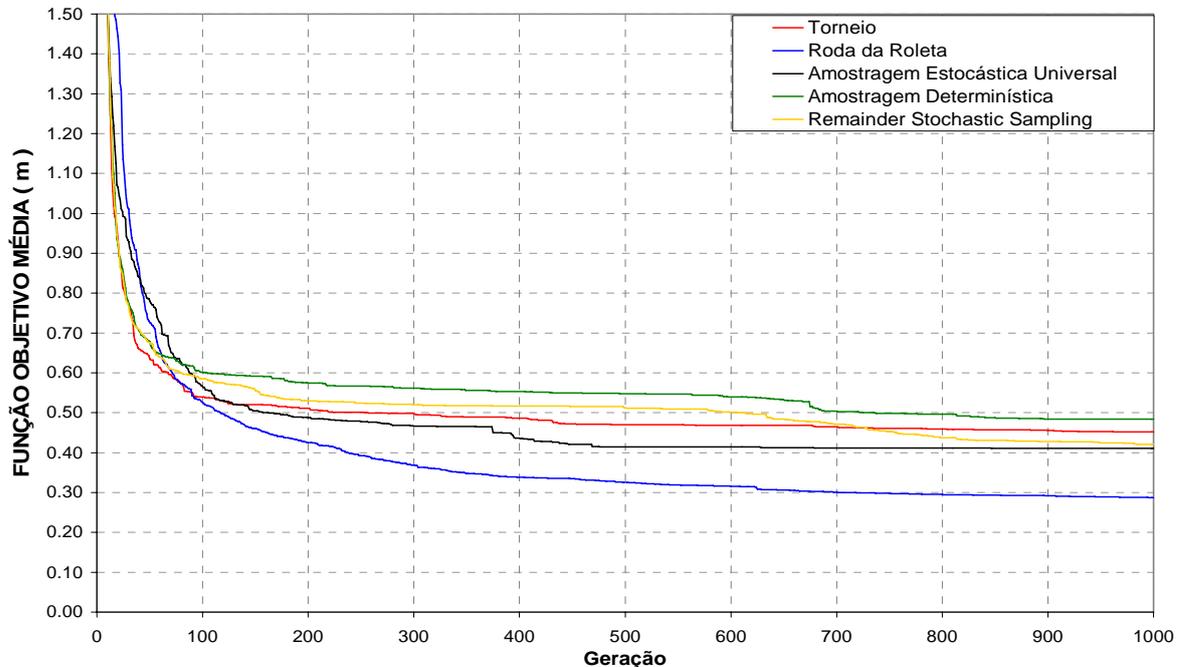


FIGURA 5.19 – Comportamento da função objetivo média por operador de seleção.

5.3 Análise dos operadores de mutação

As técnicas de mutação objeto de estudo desse trabalho são: uniforme, *Gaussiana*, limite e não-uniforme. A tabela 5.33 expõe os demais parâmetros e operadores considerados constantes visando analisar os métodos de mutação em igualdade de condições.

TABELA 5.33 – Dados utilizados para análise dos operadores de mutação.

Substituição indivíduos	<i>Steady-state</i>
Seleção	Torneio (n = 3)
Recombinação	Em cada geração um dos operadores é escolhido aleatoriamente.
Cálculo da perda de carga	<i>Hazen-Williams</i>

5.3.1 Uniforme

Os coeficientes de *Hazen Williams* identificados, utilizando a mutação uniforme, estão indicados nas tabelas 5.34 e 5.35.

TABELA 5.34 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação uniforme.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	137,14	112,42	132,92	135,12	90,00	104,81	118,09	104,48	88,40	105,92
2	137,31	109,85	133,11	133,83	91,48	99,93	121,52	123,31	87,20	96,07
3	135,79	107,97	132,96	135,99	90,69	109,52	118,84	145,36	90,72	101,54
4	138,64	112,05	128,89	137,30	89,77	123,21	114,83	117,33	88,45	103,86
5	139,82	120,57	126,09	134,45	91,60	110,28	121,60	68,87	87,00	94,38
6	140,52	115,33	129,44	133,12	90,20	97,98	121,48	87,43	89,59	104,71
7	130,64	116,78	132,79	139,48	90,14	119,49	115,09	98,00	91,26	101,45
8	136,99	114,78	131,17	133,31	95,98	101,06	122,47	104,59	87,59	97,40
9	138,87	113,29	131,64	132,75	90,64	92,90	121,49	114,85	94,53	120,22
10	135,80	112,72	132,00	135,82	93,23	112,61	119,06	106,64	85,31	85,09
11	139,58	112,70	131,09	131,42	96,92	93,74	124,28	110,98	89,08	97,87
12	132,00	116,45	132,94	137,07	90,52	108,04	119,42	109,10	88,57	102,89
<i>Média</i>	<i>136,93</i>	<i>113,74</i>	<i>131,25</i>	<i>134,97</i>	<i>91,76</i>	<i>106,13</i>	<i>119,85</i>	<i>107,58</i>	<i>88,97</i>	<i>100,95</i>
σ	3,04	3,33	2,14	2,28	2,39	9,56	2,87	18,71	2,39	8,33
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>2,20%</i>	<i>3,40%</i>	<i>0,96%</i>	<i>0,02%</i>	<i>1,96%</i>	<i>3,52%</i>	<i>0,13%</i>	<i>6,45%</i>	<i>4,68%</i>	<i>26,19%</i>

TABELA 5.35 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação uniforme.

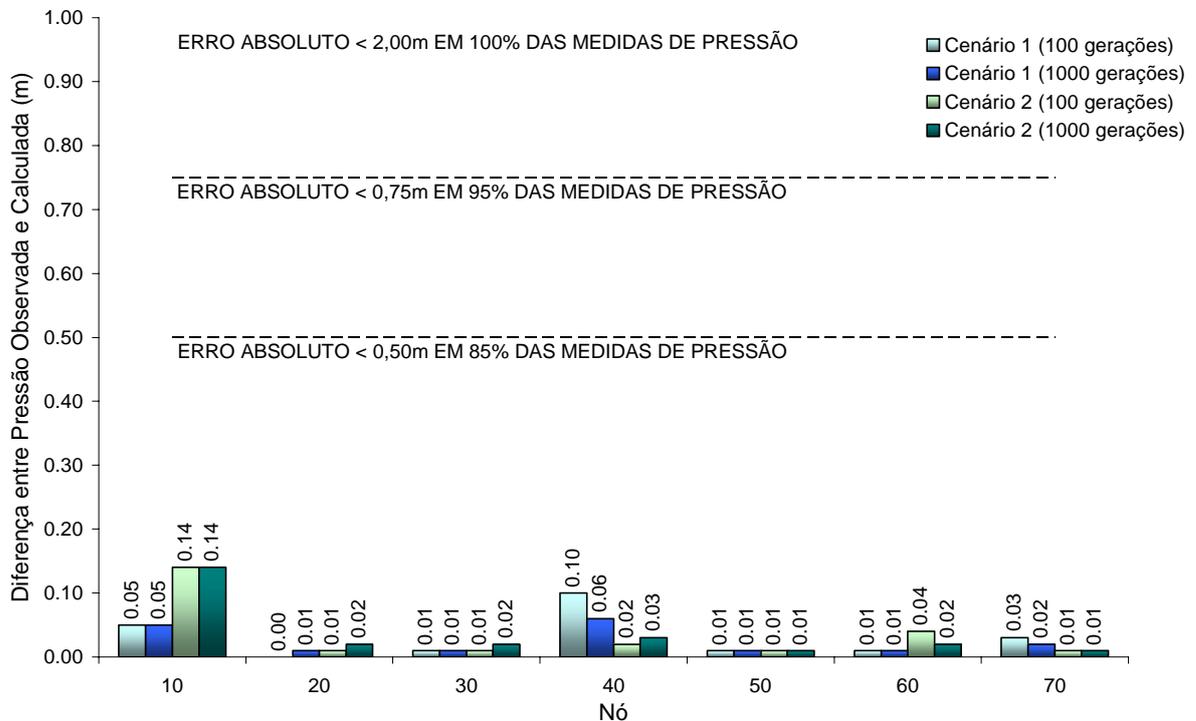
Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	137,14	112,42	132,92	135,12	90,04	104,81	118,09	104,48	88,40	106,97
2	137,31	109,84	133,11	134,02	90,17	98,00	121,72	123,38	88,00	94,57
3	136,00	107,97	133,00	136,00	90,30	109,46	118,94	148,96	85,33	96,62
4	138,64	112,05	128,89	137,30	89,77	123,21	114,83	117,33	88,45	103,86
5	139,91	121,04	126,08	134,46	90,41	106,94	121,60	68,89	85,96	92,65
6	140,52	115,33	129,44	133,12	90,18	97,96	121,48	87,38	87,64	105,90
7	130,64	116,88	132,79	139,48	90,14	120,89	115,82	103,70	88,91	98,38
8	137,71	114,78	131,17	133,31	94,04	100,02	122,47	97,61	86,38	91,52
9	138,87	113,29	131,64	132,75	90,65	92,90	121,49	115,06	94,53	122,15
10	135,80	112,72	132,00	135,82	93,23	112,61	119,06	106,28	85,31	85,09
11	140,01	112,75	131,08	131,71	94,25	92,94	124,30	100,22	85,97	91,76
12	132,01	116,45	133,00	137,07	90,52	108,02	119,42	104,86	88,00	99,89
<i>Média</i>	<i>137,05</i>	<i>113,79</i>	<i>131,26</i>	<i>135,01</i>	<i>91,14</i>	<i>105,65</i>	<i>119,93</i>	<i>106,51</i>	<i>87,74</i>	<i>99,11</i>
σ	3,08	3,43	2,16	2,23	1,66	9,93	2,77	19,52	2,49	9,72
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>2,11%</i>	<i>3,45%</i>	<i>0,97%</i>	<i>0,01%</i>	<i>1,27%</i>	<i>3,96%</i>	<i>0,05%</i>	<i>7,38%</i>	<i>3,22%</i>	<i>23,89%</i>

Para analisar o método de calibração empregado, a tabela 5.36 e a figura 5.20 apresentam as diferenças absolutas entre as pressões observadas e pressões simuladas com a média dos coeficientes de rugosidade calibrados.

TABELA 5.36 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação uniforme.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,69	0,05	58,69	0,05
20	55,75	55,75	0,00	55,76	0,01
30	56,08	56,09	0,01	56,09	0,01
40	53,77	53,87	0,10	53,83	0,06
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,26	0,01	54,26	0,01
70	53,03	53,06	0,03	53,05	0,02

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,30	0,14	56,30	0,14
20	48,37	48,38	0,01	48,39	0,02
30	48,72	48,73	0,01	48,74	0,02
40	47,03	47,01	0,02	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,08	0,04	44,10	0,02
70	42,88	42,89	0,01	42,89	0,01

FIGURA 5.20 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação uniforme.

5.3.2 *Gaussiana*

As soluções identificadas nas calibrações onde se aplicou a mutação *Gaussiana* com desvio padrão igual a dois estão nas tabelas 5.37 e 5.38.

TABELA 5.37 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação *Gaussiana*.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,73	111,45	131,27	132,85	90,38	94,71	122,38	117,13	89,33	103,22
2	135,78	112,95	132,69	135,28	91,60	106,15	119,34	95,81	92,38	103,29
3	139,89	113,60	128,85	133,74	103,31	120,90	117,62	102,80	90,22	104,84
4	139,75	110,55	130,82	132,11	102,38	106,22	121,60	112,36	88,01	95,65
5	138,08	108,22	133,25	132,53	96,14	97,82	123,21	133,34	86,32	88,41
6	135,70	112,96	132,42	133,69	101,79	108,93	120,15	118,47	89,76	105,82
7	139,94	115,45	130,03	132,57	91,13	94,40	122,36	98,75	87,59	111,37
8	139,89	116,91	129,40	132,45	96,38	101,21	121,63	84,88	86,92	105,45
9	139,92	110,79	131,91	131,84	90,85	89,63	124,40	117,27	88,32	95,95
10	136,98	120,83	127,22	135,08	90,95	106,25	121,20	111,76	92,00	113,34
11	130,21	113,16	138,35	136,01	92,24	98,46	119,21	111,65	94,19	117,52
12	139,88	112,23	128,50	136,43	90,09	119,92	115,94	110,74	89,89	100,42
<i>Média</i>	<i>137,98</i>	<i>113,26</i>	<i>131,23</i>	<i>133,71</i>	<i>94,77</i>	<i>103,72</i>	<i>120,75</i>	<i>109,58</i>	<i>89,58</i>	<i>103,77</i>
σ	2,96	3,29	2,91	1,60	5,09	9,72	2,41	12,58	2,36	8,10
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,44%</i>	<i>2,96%</i>	<i>0,94%</i>	<i>0,95%</i>	<i>5,30%</i>	<i>5,71%</i>	<i>0,63%</i>	<i>4,71%</i>	<i>5,38%</i>	<i>29,72%</i>

TABELA 5.38 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação *Gaussiana*.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,77	111,44	131,27	132,87	90,22	94,62	122,46	117,02	89,71	102,59
2	135,91	113,69	132,22	135,33	90,20	104,11	120,03	104,50	85,95	97,72
3	139,95	113,59	128,86	135,24	90,72	112,94	118,32	99,72	86,74	94,63
4	139,94	111,46	130,87	133,14	90,70	97,72	122,54	109,52	85,78	91,12
5	139,16	108,12	132,73	132,82	90,37	93,32	124,07	128,76	84,86	82,25
6	137,50	111,73	132,01	134,18	90,09	99,18	121,30	120,12	89,78	101,19
7	139,94	115,51	130,07	132,80	90,15	94,36	122,36	90,59	86,64	106,87
8	139,92	117,09	129,41	133,38	90,00	98,24	122,07	81,93	85,79	94,18
9	139,92	110,79	131,91	132,06	90,12	88,98	124,51	115,51	86,18	94,17
10	137,45	121,02	128,13	135,08	89,99	105,35	121,12	67,15	86,04	93,75
11	131,64	112,98	136,69	136,01	89,96	98,68	119,54	115,54	90,29	111,93
12	139,88	112,23	128,50	136,43	90,09	119,92	115,94	110,74	89,89	100,42
<i>Média</i>	<i>138,41</i>	<i>113,30</i>	<i>131,06</i>	<i>134,11</i>	<i>90,22</i>	<i>100,62</i>	<i>121,19</i>	<i>105,09</i>	<i>87,31</i>	<i>97,57</i>
σ	2,52	3,34	2,36	1,46	0,26	8,75	2,43	17,62	1,99	7,76
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,13%</i>	<i>3,00%</i>	<i>0,81%</i>	<i>0,66%</i>	<i>0,24%</i>	<i>8,53%</i>	<i>0,99%</i>	<i>8,62%</i>	<i>2,71%</i>	<i>21,96%</i>

A tabela 5.39 e a figura 5.21 mostram as diferenças absolutas entre as pressões observadas e pressões simuladas com a média dos coeficientes de rugosidade calibrados.

TABELA 5.39 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação *Gaussiana*.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,71	0,03	58,71	0,03
20	55,75	55,76	0,01	55,75	0,00
30	56,08	56,09	0,01	56,09	0,01
40	53,77	53,89	0,12	53,82	0,05
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,23	0,04	54,27	0,00
70	53,03	53,11	0,08	53,04	0,01

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,35	0,09	56,37	0,07
20	48,37	48,38	0,01	48,39	0,02
30	48,72	48,73	0,01	48,74	0,02
40	47,03	47,01	0,02	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,02	0,10	44,12	0,00
70	42,88	42,89	0,01	42,88	0,00

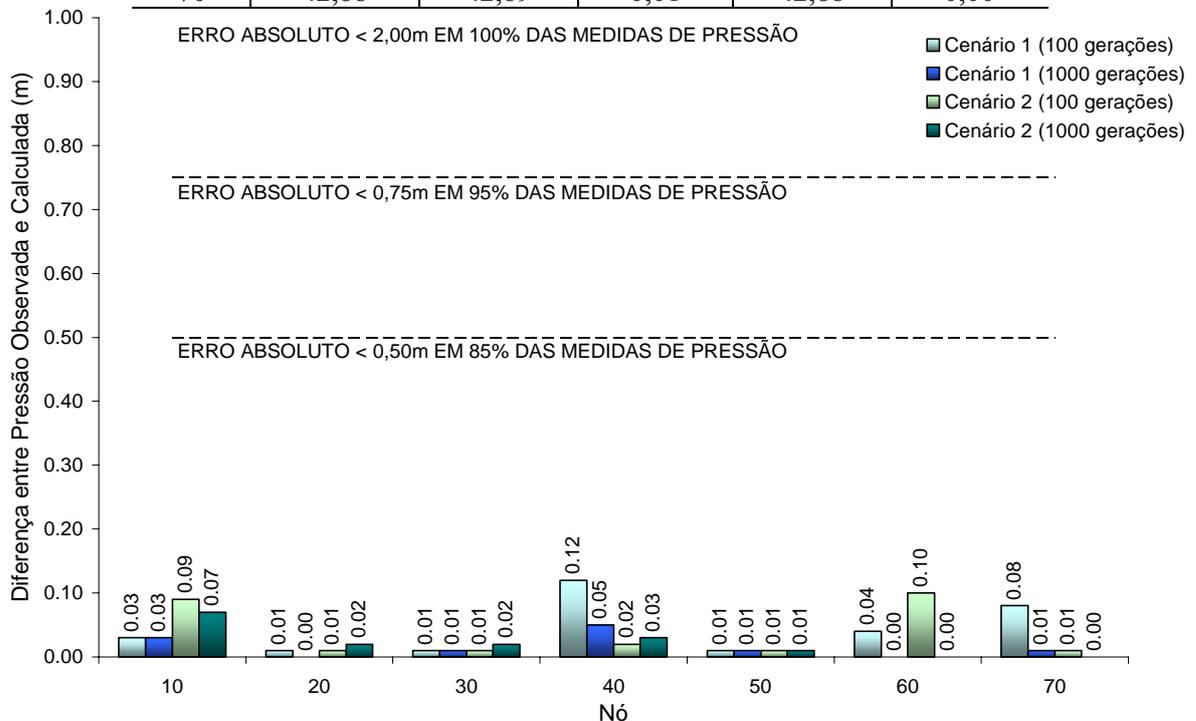


FIGURA 5.21 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação *Gaussiana*.

5.3.3 Limite

Os resultados da calibração adotando a mutação limite são apresentados nas tabelas 5.40 e 5.41.

TABELA 5.40 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação limite.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	132,07	115,25	134,70	135,36	90,41	95,90	121,82	115,44	90,50	108,07
2	139,92	103,40	130,45	134,69	103,47	122,20	116,36	117,77	108,57	110,96
3	138,99	111,38	128,86	136,15	96,94	125,64	114,98	102,84	105,78	104,88
4	137,69	112,23	131,49	134,31	94,88	102,48	120,59	105,44	91,47	100,69
5	137,10	116,99	131,34	133,48	96,33	93,56	121,54	103,64	93,56	122,18
6	140,05	117,52	128,17	132,71	96,27	103,96	121,32	92,78	92,61	116,26
7	136,39	113,26	131,12	134,77	108,43	117,97	117,28	119,24	91,97	113,82
8	137,36	115,69	129,27	135,22	116,61	124,48	115,81	94,64	87,55	98,27
9	137,74	114,79	130,29	132,30	101,62	102,30	123,04	69,90	98,27	98,91
10	138,08	115,72	127,73	136,50	104,46	138,95	113,82	91,45	86,40	95,19
11	137,93	114,73	130,61	134,03	96,07	106,23	119,92	115,34	92,04	119,73
12	137,47	116,05	128,75	136,15	90,01	112,95	117,84	104,68	94,58	109,22
<i>Média</i>	<i>137,56</i>	<i>113,92</i>	<i>130,23</i>	<i>134,64</i>	<i>99,63</i>	<i>112,22</i>	<i>118,69</i>	<i>102,76</i>	<i>94,44</i>	<i>108,18</i>
σ	2,04	3,78	1,89	1,35	7,69	13,78	3,06	14,14	6,71	8,82
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,74%</i>	<i>3,56%</i>	<i>0,18%</i>	<i>0,27%</i>	<i>10,70%</i>	<i>2,02%</i>	<i>1,09%</i>	<i>10,64%</i>	<i>11,11%</i>	<i>35,23%</i>

TABELA 5.41 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação limite.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	132,18	115,23	134,67	135,39	90,08	95,87	121,82	113,80	89,85	107,08
2	139,92	103,40	130,45	134,69	103,47	122,20	116,36	117,77	108,57	110,96
3	138,99	111,38	128,86	136,15	96,94	125,64	114,98	102,84	105,78	104,88
4	137,69	112,23	131,49	134,31	94,88	102,48	120,59	105,44	91,47	100,69
5	137,10	116,99	131,34	133,48	96,33	93,56	121,54	103,64	93,56	122,18
6	140,05	117,52	128,17	132,71	96,27	103,96	121,32	92,78	92,61	116,26
7	136,39	113,26	131,12	134,77	108,43	117,97	117,28	119,24	91,97	113,82
8	137,36	115,69	129,27	135,22	116,61	124,48	115,81	94,64	87,55	98,27
9	137,74	114,79	130,29	132,30	101,62	102,30	123,04	69,90	98,27	98,91
10	138,08	115,72	127,73	136,50	104,46	138,95	113,82	91,45	86,40	95,19
11	137,93	114,73	130,61	134,03	96,07	106,23	119,92	115,34	92,04	116,06
12	137,47	116,05	128,75	136,15	90,01	112,95	117,84	104,68	94,58	109,22
<i>Média</i>	<i>137,57</i>	<i>113,91</i>	<i>130,23</i>	<i>134,64</i>	<i>99,60</i>	<i>112,22</i>	<i>118,69</i>	<i>102,63</i>	<i>94,39</i>	<i>107,79</i>
σ	2,02	3,78	1,88	1,35	7,72	13,79	3,06	14,02	6,75	8,44
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,73%</i>	<i>3,56%</i>	<i>0,18%</i>	<i>0,27%</i>	<i>10,66%</i>	<i>2,01%</i>	<i>1,09%</i>	<i>10,76%</i>	<i>11,04%</i>	<i>34,74%</i>

Observa-se pela tabela 5.42 e pela figura 5.22 que o sistema está calibrado, pois as diferenças absolutas entre pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas estão dentro dos limites definidos no capítulo quatro.

TABELA 5.42 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação limite.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,70	0,04	58,70	0,04
20	55,75	55,72	0,03	55,72	0,03
30	56,08	56,08	0,00	56,08	0,00
40	53,77	54,00	0,23	54,00	0,23
50	53,35	53,35	0,00	53,35	0,00
60	54,27	54,22	0,05	54,22	0,05
70	53,03	53,19	0,16	53,19	0,16

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,33	0,11	56,33	0,11
20	48,37	48,33	0,04	48,33	0,04
30	48,72	48,71	0,01	48,71	0,01
40	47,03	47,06	0,03	47,06	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	43,98	0,14	43,98	0,14
70	42,88	42,95	0,07	42,95	0,07

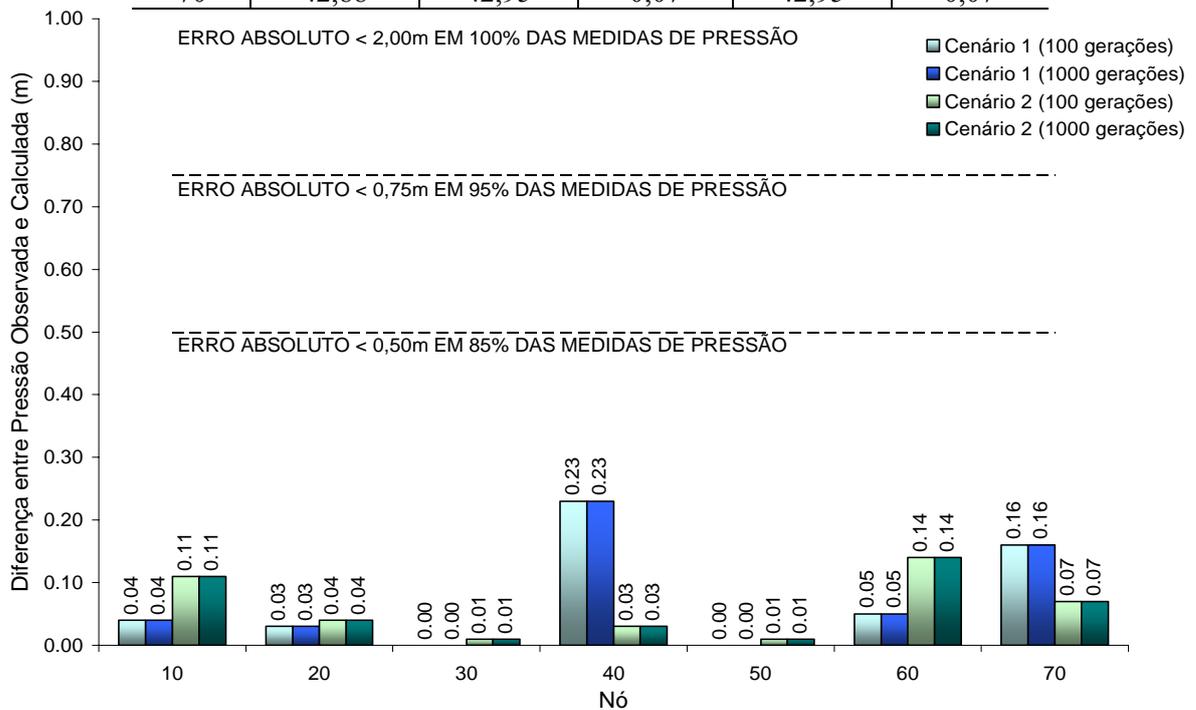


FIGURA 5.22 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação limite.

5.3.4 Não-Uniforme

A calibração das rugosidades com o emprego da mutação não-uniforme gerou resultados cujos valores estão apresentados nas tabelas 5.43 e 5.44.

TABELA 5.43 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando mutação não-uniforme.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,79	110,85	130,82	132,86	96,83	104,75	120,81	122,05	89,48	102,76
2	137,67	112,45	132,51	134,42	90,28	101,60	118,90	107,08	88,95	114,59
3	139,15	116,03	127,96	136,34	90,96	120,41	114,57	101,33	95,93	128,61
4	138,52	112,70	130,97	132,79	100,58	107,74	119,59	120,19	92,58	118,05
5	139,51	118,72	130,19	131,83	89,82	86,10	124,39	81,11	89,27	109,57
6	138,37	117,60	130,61	130,57	110,65	100,78	121,53	96,56	96,50	131,61
7	140,76	118,43	125,69	134,78	96,08	120,05	118,07	77,08	89,09	101,47
8	139,02	109,56	129,89	136,22	90,58	117,91	117,06	133,74	88,30	95,08
9	139,71	114,24	128,69	135,25	92,53	115,45	116,80	102,87	91,41	111,42
10	138,92	114,49	128,72	135,22	97,71	121,92	115,40	109,89	94,38	121,63
11	130,74	117,08	134,37	134,95	106,15	112,09	119,96	105,11	90,45	106,16
12	133,89	108,88	135,15	132,79	107,76	104,96	121,95	133,11	91,96	103,21
<i>Média</i>	<i>138,00</i>	<i>114,25</i>	<i>130,47</i>	<i>134,00</i>	<i>97,49</i>	<i>109,48</i>	<i>119,09</i>	<i>107,51</i>	<i>91,52</i>	<i>112,01</i>
σ	2,85	3,41	2,65	1,80	7,33	10,57	2,87	17,91	2,81	11,27
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,43%</i>	<i>3,86%</i>	<i>0,36%</i>	<i>0,74%</i>	<i>8,33%</i>	<i>0,47%</i>	<i>0,76%</i>	<i>6,51%</i>	<i>7,67%</i>	<i>40,02%</i>

TABELA 5.44 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando mutação não-uniforme.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,90	110,79	130,67	133,28	94,08	103,96	120,86	120,09	89,40	98,86
2	137,75	112,41	132,25	134,48	90,10	101,63	119,09	108,56	88,60	113,83
3	139,29	116,02	127,96	136,37	90,21	118,36	114,55	101,01	95,91	127,27
4	138,75	112,53	130,84	133,52	94,64	104,22	119,92	118,83	92,70	112,82
5	139,54	118,71	130,18	131,81	89,80	86,19	124,41	80,82	89,27	108,87
6	138,86	117,08	130,55	131,88	95,64	93,78	121,77	96,79	94,58	128,52
7	140,74	118,29	126,86	135,19	92,55	117,25	117,63	75,27	85,86	95,69
8	139,16	109,55	129,89	136,24	90,15	117,42	117,06	128,44	87,05	93,80
9	139,86	114,11	128,62	135,45	90,87	114,45	116,98	102,64	91,02	108,67
10	139,03	114,44	128,70	135,44	95,31	120,04	115,52	108,75	94,39	120,03
11	130,87	116,98	134,31	135,78	98,03	107,72	120,22	104,77	89,85	102,84
12	134,79	109,49	134,98	132,97	102,26	101,92	122,11	134,36	88,39	97,25
<i>Média</i>	<i>138,21</i>	<i>114,20</i>	<i>130,48</i>	<i>134,37</i>	<i>93,64</i>	<i>107,24</i>	<i>119,18</i>	<i>106,69</i>	<i>90,58</i>	<i>109,04</i>
σ	2,75	3,27	2,43	1,63	3,83	10,65	2,92	17,53	3,17	11,91
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>1,28%</i>	<i>3,82%</i>	<i>0,37%</i>	<i>0,47%</i>	<i>4,04%</i>	<i>2,51%</i>	<i>0,69%</i>	<i>7,22%</i>	<i>6,57%</i>	<i>36,30%</i>

Os critérios estabelecidos para calibração foram atendidos, como indicado na tabela 5.45 e no gráfico 5.23.

TABELA 5.45 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação não-uniforme.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,71	0,03	58,71	0,03
20	55,75	55,76	0,01	55,76	0,01
30	56,08	56,09	0,01	56,09	0,01
40	53,77	53,93	0,16	53,91	0,14
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,21	0,06	54,24	0,03
70	53,03	53,14	0,11	53,09	0,06

Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,35	0,09	56,36	0,08
20	48,37	48,38	0,01	48,39	0,02
30	48,72	48,73	0,01	48,74	0,02
40	47,03	47,01	0,02	47,01	0,02
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	43,97	0,15	44,04	0,08
70	42,88	42,90	0,02	42,89	0,01

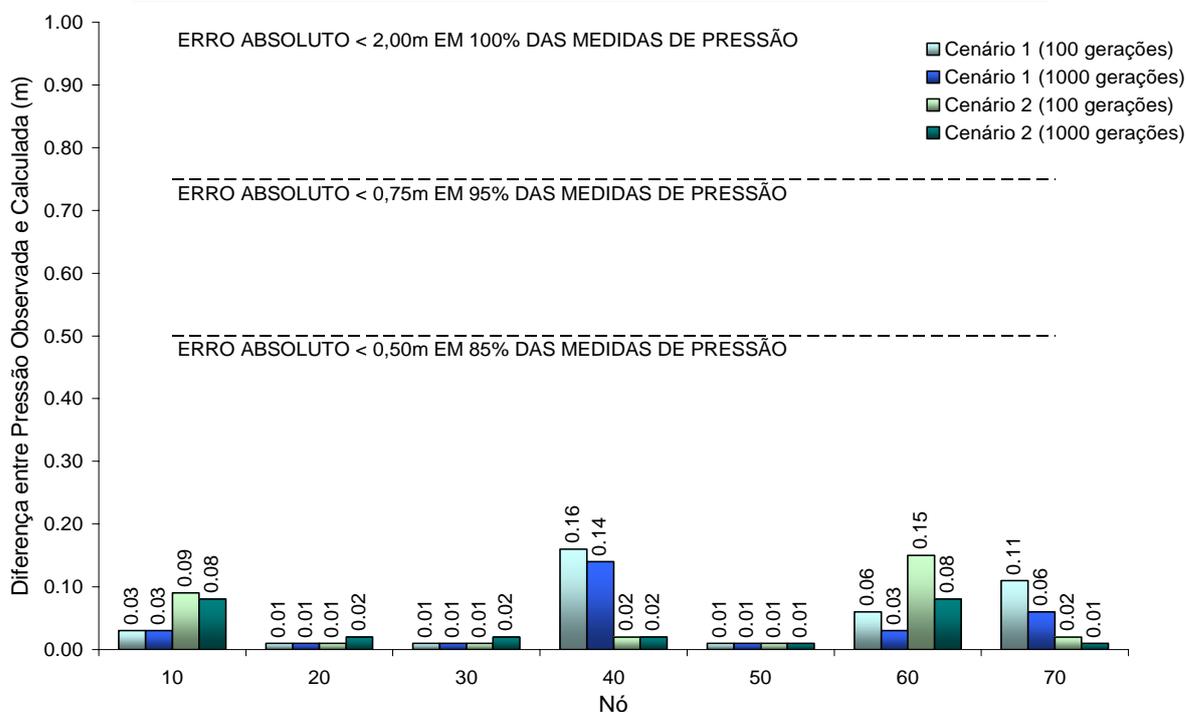


FIGURA 5.23 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando mutação não-uniforme.

5.3.5 Análise comparativa entre os operadores de mutação

Com base nos resultados alcançados verifica-se que, nas quatro situações onde são aplicados operadores de mutação distintos, o sistema está calibrado segundo os critérios definidos pelo WATER RESEARCH CENTRE. No entanto, os coeficientes de resistência calibrados para os tubos 6, 8 e 10 apresentam um desvio padrão elevado, como pode ser constatado nas figuras 5.24 e 5.25.

A análise dos operadores de mutação é feita a partir do cálculo da probabilidade de identificação das rugosidades com erro inferior a 5%. Pelas figuras 5.26 e 5.27 verifica-se que com 100 iterações a mutação uniforme alcança melhores resultados, enquanto que para 1000 iterações a mutação *Gaussiana* é mais eficiente.

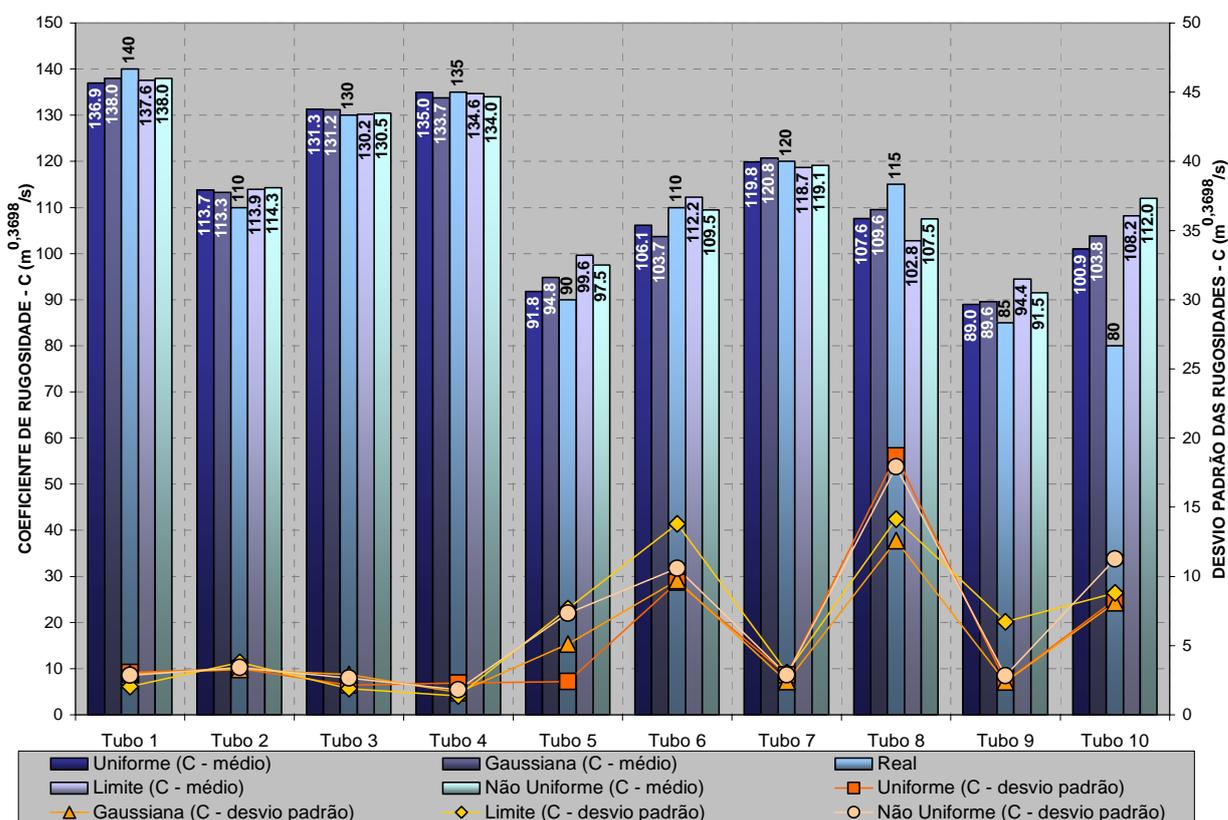


FIGURA 5.24 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados por operador de mutação (número de gerações = 100).

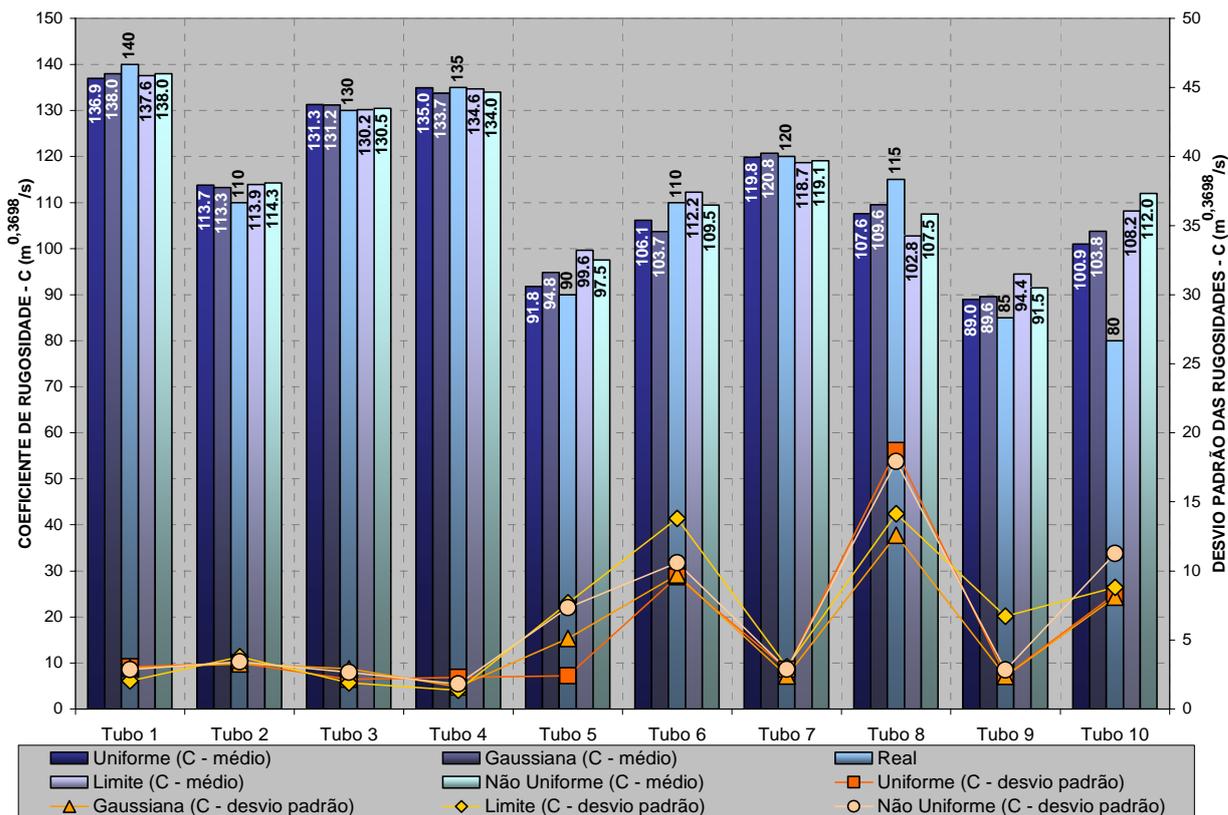


FIGURA 5.25 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados por operador de mutação (número de gerações = 1000).

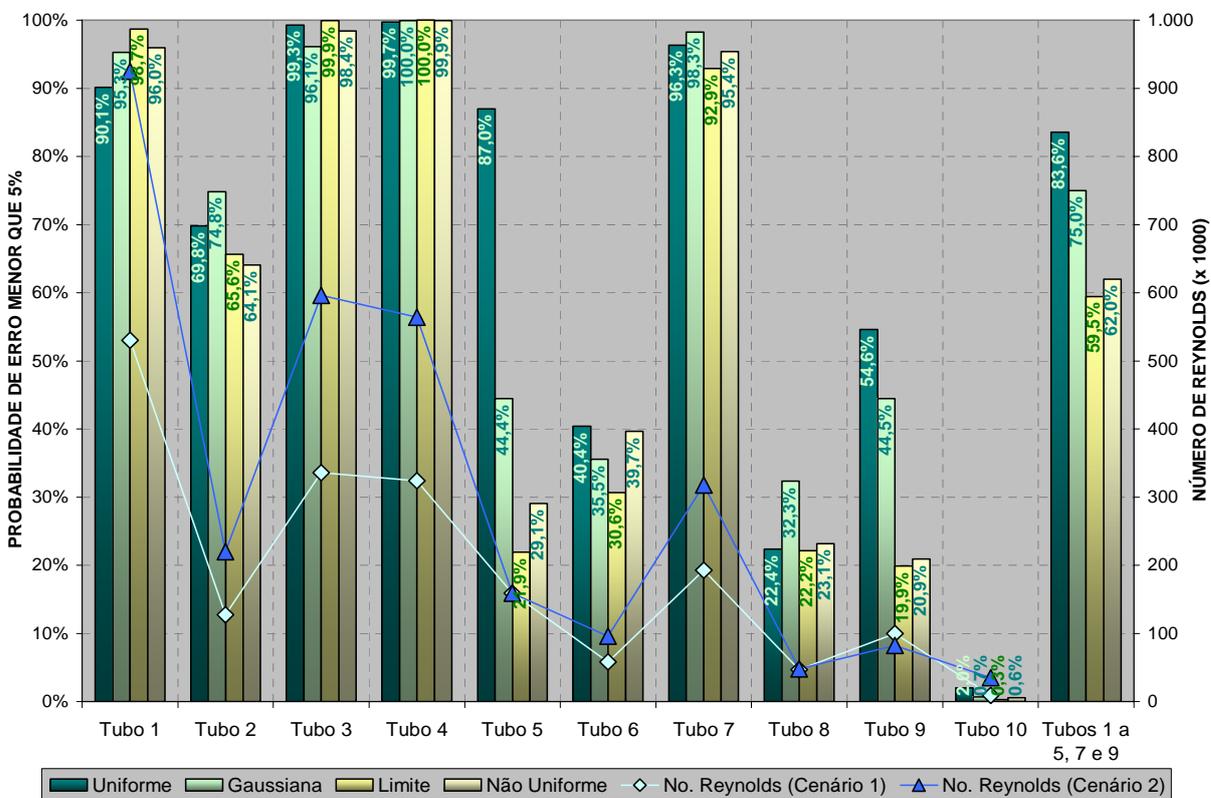


FIGURA 5.26 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por operador de mutação (número gerações = 100).

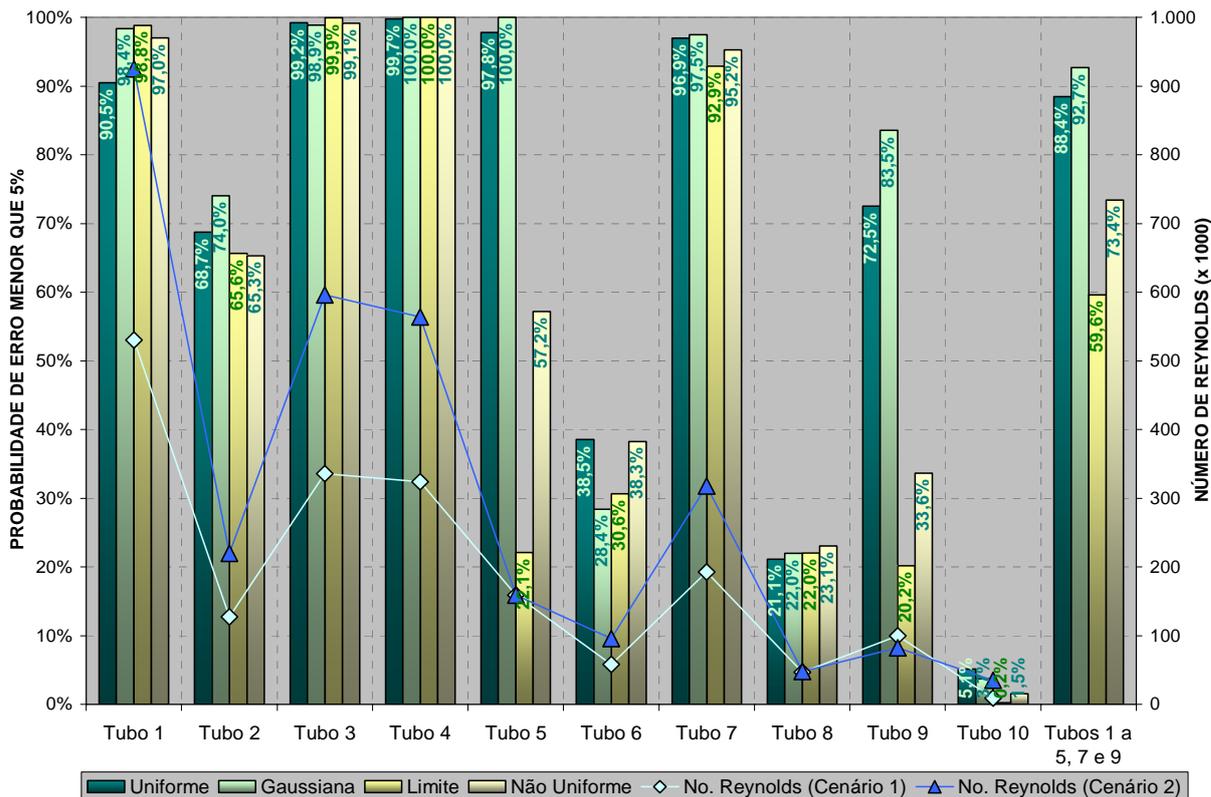


FIGURA 5.27 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por operador de mutação (número gerações = 1000).

A evolução da função objetivo média, representada pela figura 5.28, reforça a análise realizada, mostrando a rápida convergência inicial da mutação uniforme, que é superada pela mutação *Gaussiana* após 150 gerações.

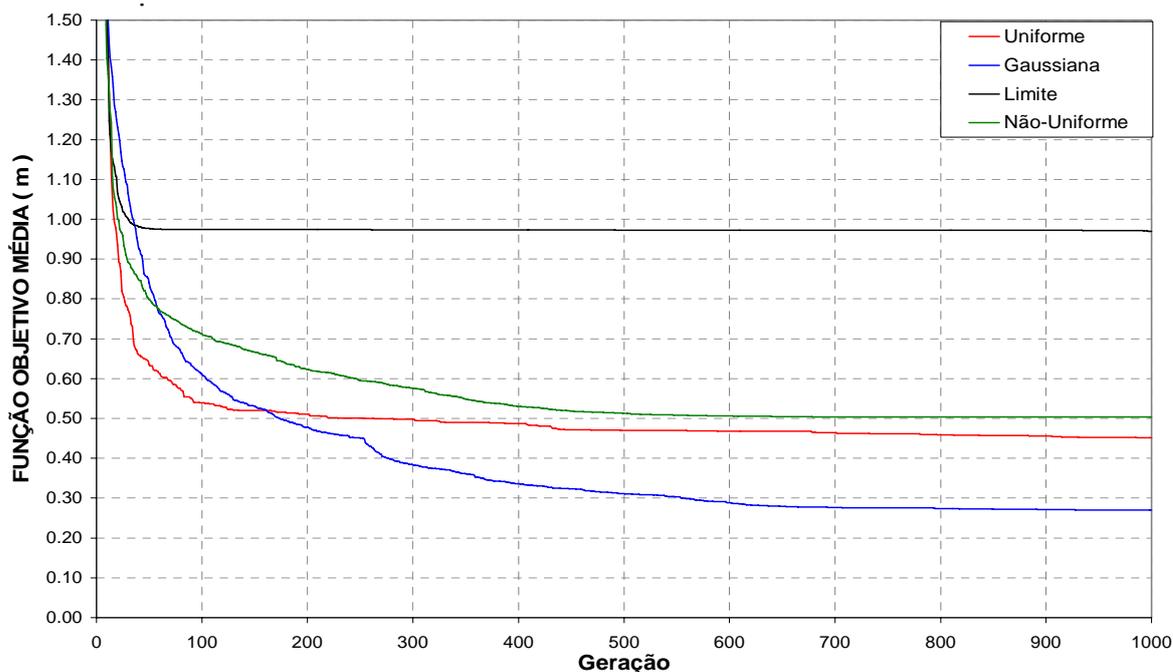


FIGURA 5.28 – Comportamento da função objetivo média por operador de mutação.

5.4 Análise dos operadores de recombinação

A recombinação é um dos operadores de fundamental importância nos algoritmos genéticos. Sendo assim avaliou-se o desempenho dos seguintes métodos: mistura (BLX- α), simples, aritmético, heurístico e a combinação de todos (média aritmética e geométrica, mistura, simples, aritmético e heurístico) onde a cada iteração um tipo de recombinação é escolhido aleatoriamente.

Os demais parâmetros e operadores utilizados para a comparação dos métodos de recombinação estão na tabela 5.46.

TABELA 5.46 – Dados utilizados para análise dos operadores de recombinação.

Substituição indivíduos	<i>Steady-state</i>
Seleção	Torneio (n = 3)
Mutação	<i>Gaussiana</i> ($\sigma = 2$)
Cálculo da perda de carga	<i>Hazen-Williams</i>

5.4.1 Mistura (BLX- α)

A amostra dos 12 resultados de coeficientes de rugosidade obtidos utilizando a recombinação mistura, estão apresentadas nas tabelas 5.47 e 5.48.

TABELA 5.47 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação mistura.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	134,16	112,94	134,04	135,02	90,10	97,91	120,52	126,62	92,30	116,16
2	138,11	113,31	127,99	138,23	87,88	125,33	114,91	115,74	88,68	96,55
3	134,23	110,84	132,00	138,72	90,06	123,93	114,16	136,43	89,09	107,59
4	143,78	111,24	129,41	130,28	98,24	100,36	122,57	118,53	88,13	119,47
5	136,65	118,97	127,44	139,02	90,41	133,46	112,20	98,02	89,73	117,90
6	140,20	108,74	133,88	135,11	90,39	112,01	114,51	89,93	89,71	100,74
7	144,22	110,43	127,33	135,45	90,34	121,25	113,14	121,14	96,33	128,49
8	130,73	111,96	135,14	139,76	94,94	132,24	112,51	115,82	89,68	101,52
9	132,29	116,37	133,22	135,53	90,01	97,54	122,35	125,68	89,81	108,46
10	138,47	114,40	130,08	134,40	92,23	106,16	119,67	114,41	89,80	107,76
11	135,21	113,84	131,72	136,85	90,64	114,03	116,06	109,17	90,04	119,28
12	132,42	114,15	136,06	135,85	90,05	99,27	118,38	110,49	92,64	123,35
<i>Média</i>	<i>136,71</i>	<i>113,10</i>	<i>131,52</i>	<i>136,19</i>	<i>91,27</i>	<i>113,62</i>	<i>116,75</i>	<i>115,16</i>	<i>90,49</i>	<i>112,27</i>
σ	4,39	2,77	3,04	2,58	2,75	13,44	3,79	12,54	2,25	9,94
<i>Real</i>	<i>140,00</i>	<i>110,00</i>	<i>130,00</i>	<i>135,00</i>	<i>90,00</i>	<i>110,00</i>	<i>120,00</i>	<i>115,00</i>	<i>85,00</i>	<i>80,00</i>
<i>Erro</i>	<i>2,35%</i>	<i>2,82%</i>	<i>1,17%</i>	<i>0,88%</i>	<i>1,42%</i>	<i>3,29%</i>	<i>2,71%</i>	<i>0,14%</i>	<i>6,46%</i>	<i>40,34%</i>

TABELA 5.48 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação mistura.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	134,15	113,05	134,02	135,04	89,95	97,75	120,53	125,09	93,08	114,85
2	138,23	113,37	128,20	138,06	90,00	128,18	115,04	99,32	85,27	82,66
3	134,23	110,84	132,00	138,72	90,09	123,93	114,16	136,41	91,36	106,80
4	144,39	111,01	129,44	131,13	89,99	90,37	123,65	108,57	88,36	102,09
5	137,13	117,35	127,47	139,06	90,22	132,90	112,22	89,03	89,22	104,42
6	140,09	108,04	130,96	135,62	90,25	115,08	117,01	118,37	85,57	90,64
7	144,22	110,42	127,32	135,46	90,25	121,23	113,14	121,25	96,35	128,50
8	131,07	111,89	134,19	140,44	90,13	128,42	113,09	116,94	87,08	94,47
9	132,66	116,87	133,68	135,53	89,86	97,73	122,12	97,71	85,90	95,87
10	139,46	114,41	129,64	134,43	89,95	104,74	120,04	97,78	87,12	99,24
11	135,58	113,83	131,58	136,86	90,12	114,10	116,15	110,12	92,51	112,90
12	132,43	113,64	135,97	135,85	89,96	99,42	118,51	115,31	94,53	123,08
<i>Média</i>	136,97	112,89	131,21	136,35	90,07	112,82	117,14	111,32	89,70	104,63
σ	4,44	2,67	2,86	2,48	0,13	14,42	3,81	13,60	3,77	13,42
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	2,16%	2,63%	0,93%	1,00%	0,07%	2,56%	2,39%	3,20%	5,52%	30,78%

A tabela 5.49 e a figura 5.29 apresentam os erros absolutos das pressões obtidas nas simulações executadas com a média das rugosidades calibradas.

TABELA 5.49– Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação mistura.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,68	0,06	58,69	0,05
20	55,75	55,77	0,02	55,76	0,01
30	56,08	56,11	0,03	56,10	0,02
40	53,77	53,91	0,14	53,89	0,12
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,26	0,01	54,27	0,00
70	53,03	53,05	0,02	53,03	0,00
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,28	0,16	56,30	0,14
20	48,37	48,40	0,03	48,39	0,02
30	48,72	48,79	0,07	48,78	0,06
40	47,03	47,01	0,02	47,02	0,01
50	41,80	41,83	0,03	41,81	0,01
60	44,12	44,10	0,02	44,13	0,01
70	42,88	42,89	0,01	42,89	0,01

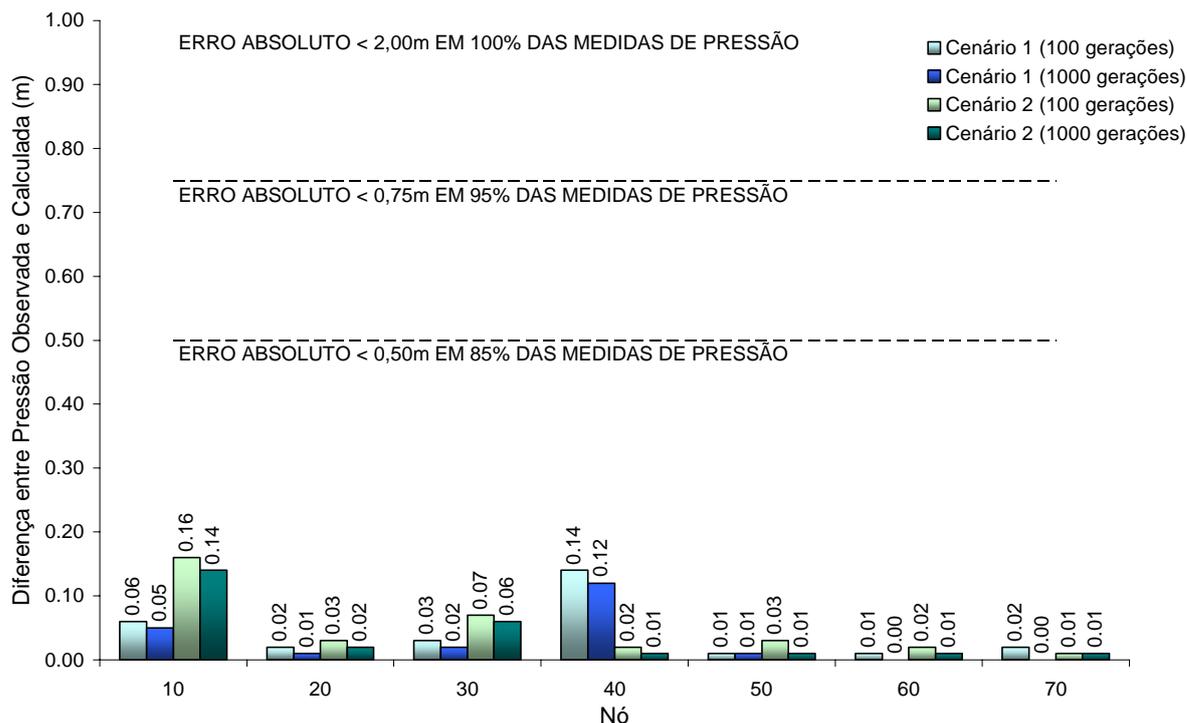


FIGURA 5.29 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação mistura.

5.4.2 Simples

As tabelas 5.50 5.51 apresentam as amostras de 12 rugosidades calibradas utilizando o operador de recombinação simples.

TABELA 5.50 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação simples.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	126,04	123,58	137,00	137,82	89,90	96,77	122,05	86,66	85,44	98,71
2	139,91	105,00	129,56	138,68	90,45	137,03	112,00	138,96	84,94	82,52
3	139,88	122,69	124,00	136,05	89,99	117,20	120,00	70,37	84,10	84,23
4	138,00	105,00	138,00	131,00	89,97	77,38	123,37	140,60	94,70	122,11
5	142,79	113,51	127,89	134,00	90,17	108,43	119,38	95,11	86,38	95,13
6	140,00	119,01	125,00	138,87	90,16	137,74	111,83	92,76	83,41	94,63
7	139,55	108,00	135,00	129,19	90,88	68,85	130,00	132,03	87,00	89,18
8	140,38	119,29	128,27	133,04	89,70	97,00	122,89	73,95	86,09	102,69
9	140,27	111,06	130,00	133,45	90,31	99,98	123,23	128,88	83,77	79,49
10	139,62	141,00	119,82	134,39	90,65	106,86	123,53	152,45	81,80	92,32
11	133,58	117,14	130,00	138,00	89,98	117,49	118,90	96,44	85,41	81,29
12	139,22	111,84	133,00	128,87	104,08	79,00	129,59	109,77	84,83	79,99
<i>Média</i>	138,27	116,43	129,80	134,45	91,35	103,64	121,40	109,83	85,66	91,86
σ	4,40	10,00	5,38	3,54	4,02	21,95	5,62	27,86	3,18	12,27
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	1,23%	5,84%	0,16%	0,41%	1,50%	5,78%	1,16%	4,49%	0,77%	14,82%

TABELA 5.51 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação simples.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	126,05	123,44	136,98	137,85	89,88	96,85	122,11	82,59	86,01	99,38
2	139,89	105,00	129,51	138,81	90,02	136,97	112,31	136,72	84,51	77,02
3	139,88	122,07	124,07	136,04	89,86	117,11	119,94	66,05	85,17	86,16
4	138,74	105,22	136,99	131,00	89,79	78,80	123,55	141,04	93,79	119,08
5	142,79	113,51	127,89	134,00	90,06	108,29	119,42	94,65	85,77	94,65
6	140,00	118,80	124,95	138,87	90,21	137,61	111,81	72,86	85,83	95,17
7	139,75	107,87	134,94	129,38	89,52	69,23	130,34	123,89	85,01	79,54
8	140,38	119,29	128,43	133,04	89,88	96,63	122,66	70,12	86,07	96,69
9	140,34	111,11	130,04	133,47	89,81	99,62	123,23	112,10	84,88	78,60
10	139,96	141,69	120,10	134,41	89,98	105,63	123,55	385,24	80,64	79,88
11	133,66	117,21	130,01	138,00	89,88	117,47	118,82	93,67	85,20	80,64
12	139,89	111,83	133,13	129,86	89,79	72,90	129,52	105,03	85,29	82,95
<i>Média</i>	138,44	116,42	129,75	134,56	89,89	103,09	121,44	123,66	85,68	89,15
σ	4,43	10,10	5,20	3,40	0,17	22,40	5,62	86,12	2,93	12,36
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	1,11%	5,84%	0,19%	0,32%	0,12%	6,28%	1,20%	7,53%	0,80%	11,43%

As diferenças absolutas entre pressões observadas e calibradas estão dentro das faixas de tolerância, como pode ser verificado na tabela 5.52 e na figura 5.30.

TABELA 5.52 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação simples.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,71	0,03	58,71	0,03
20	55,75	55,81	0,06	55,84	0,09
30	56,08	56,07	0,01	56,06	0,02
40	53,77	53,82	0,05	53,85	0,08
50	53,35	53,35	0,00	53,35	0,00
60	54,27	54,27	0,00	54,28	0,01
70	53,03	53,06	0,03	53,03	0,00
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,36	0,08	56,37	0,07
20	48,37	48,48	0,11	48,52	0,15
30	48,72	48,69	0,03	48,69	0,03
40	47,03	47,07	0,04	47,12	0,09
50	41,80	41,82	0,02	41,81	0,01
60	44,12	44,11	0,01	44,13	0,01
70	42,88	42,90	0,02	42,89	0,01

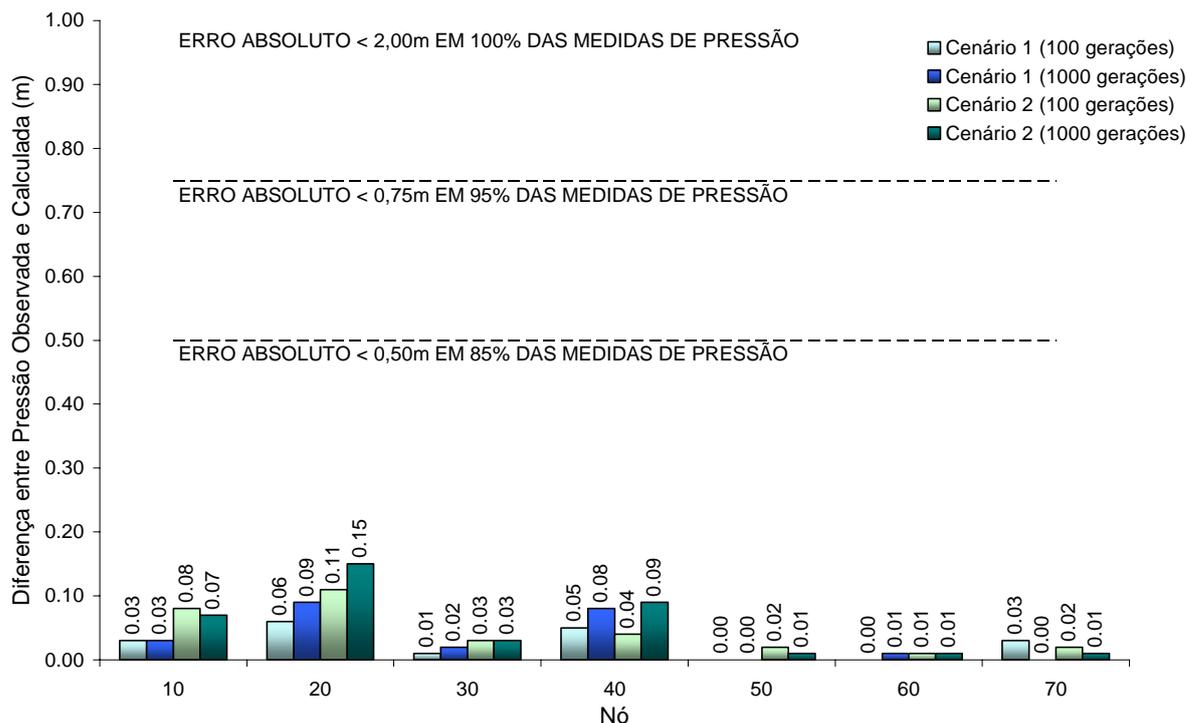


FIGURA 5.30 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação simples.

5.4.3 Aritmético

Os resultados da calibração onde a recombinação entre indivíduos é feita por meio do operador aritmético, estão apresentados nas tabelas 5.53 e 5.54.

TABELA 5.53 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação aritmético.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	126,85	117,24	137,04	137,21	101,31	112,07	118,46	119,55	94,90	118,03
2	124,16	116,10	138,62	139,06	110,57	129,56	116,63	130,09	87,94	97,97
3	135,41	118,22	131,22	133,30	104,75	109,18	118,97	104,25	94,08	131,42
4	139,83	119,42	129,44	131,55	99,65	99,17	122,46	115,83	85,29	115,03
5	138,75	111,40	129,92	134,67	99,15	119,73	117,89	118,45	113,31	93,26
6	133,64	111,55	132,22	138,14	91,22	120,84	115,46	110,32	95,67	105,77
7	138,82	109,44	130,47	135,52	97,34	121,00	116,22	114,54	91,80	106,60
8	136,83	105,05	134,17	134,34	95,01	102,14	118,31	111,17	120,39	116,12
9	133,32	115,21	133,69	132,40	124,47	115,78	121,38	97,48	87,34	92,25
10	134,74	115,69	131,58	134,88	97,68	110,61	119,37	113,10	92,37	113,63
11	135,38	107,95	133,26	134,71	96,93	109,26	119,05	121,82	100,51	111,84
12	139,68	114,49	130,08	131,09	113,28	110,08	120,69	105,36	93,74	117,60
Média	134,78	113,48	132,64	134,74	102,61	113,28	118,74	113,50	96,45	109,96
σ	4,91	4,41	2,88	2,49	9,31	8,55	2,08	8,72	10,48	11,40
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro	3,73%	3,16%	2,03%	0,19%	14,01%	2,99%	1,05%	1,31%	13,47%	37,45%

TABELA 5.54 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação aritmético.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	127,08	117,32	137,04	138,38	90,12	103,90	119,37	120,71	92,50	111,99
2	127,45	115,91	135,75	139,93	92,12	119,04	117,42	111,98	86,05	86,26
3	136,28	117,68	131,15	134,34	90,45	98,28	120,04	98,48	95,17	125,85
4	139,94	118,04	129,68	132,38	91,18	93,07	122,86	81,04	87,94	105,84
5	138,93	111,49	129,92	135,38	92,08	114,15	118,02	116,88	88,74	97,74
6	133,94	112,56	132,19	138,16	90,22	119,76	115,50	121,08	90,23	103,37
7	139,40	110,50	130,42	135,64	90,28	113,83	116,97	115,04	89,88	101,19
8	138,08	108,94	132,77	134,34	90,00	101,35	119,31	137,54	93,01	114,19
9	135,27	114,95	132,44	134,51	92,38	99,50	122,62	99,82	85,78	90,44
10	135,14	115,83	131,76	135,52	90,47	104,28	119,67	103,01	90,85	107,49
11	137,24	109,39	133,09	134,83	90,32	103,65	118,98	130,05	91,63	108,47
12	139,90	114,44	130,07	132,88	92,93	99,32	121,04	102,58	92,01	112,00
<i>Média</i>	135,72	113,92	132,19	135,52	91,04	105,84	119,32	111,52	90,32	105,40
σ	4,41	3,25	2,29	2,25	1,05	8,71	2,19	15,45	2,82	10,73
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	3,06%	3,57%	1,69%	0,39%	1,16%	3,78%	0,57%	3,03%	6,25%	31,75%

A tabela 5.55 e a figura 5.31 mostram o comparativo entre as pressões reais e as calculadas pelas simulações do sistema com a média das rugosidades calibradas.

TABELA 5.55 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação aritmético.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,65	0,09	58,67	0,07
20	55,75	55,74	0,01	55,76	0,01
30	56,08	56,09	0,01	56,09	0,01
40	53,77	54,07	0,30	53,91	0,14
50	53,35	53,36	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,19	0,08	54,27	0,00
70	53,03	53,22	0,19	53,05	0,02
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,19	0,25	56,23	0,21
20	48,37	48,35	0,02	48,39	0,02
30	48,72	48,75	0,03	48,76	0,04
40	47,03	47,12	0,09	47,03	0,00
50	41,80	41,83	0,03	41,82	0,02
60	44,12	43,90	0,22	44,11	0,01
70	42,88	42,93	0,05	42,90	0,02

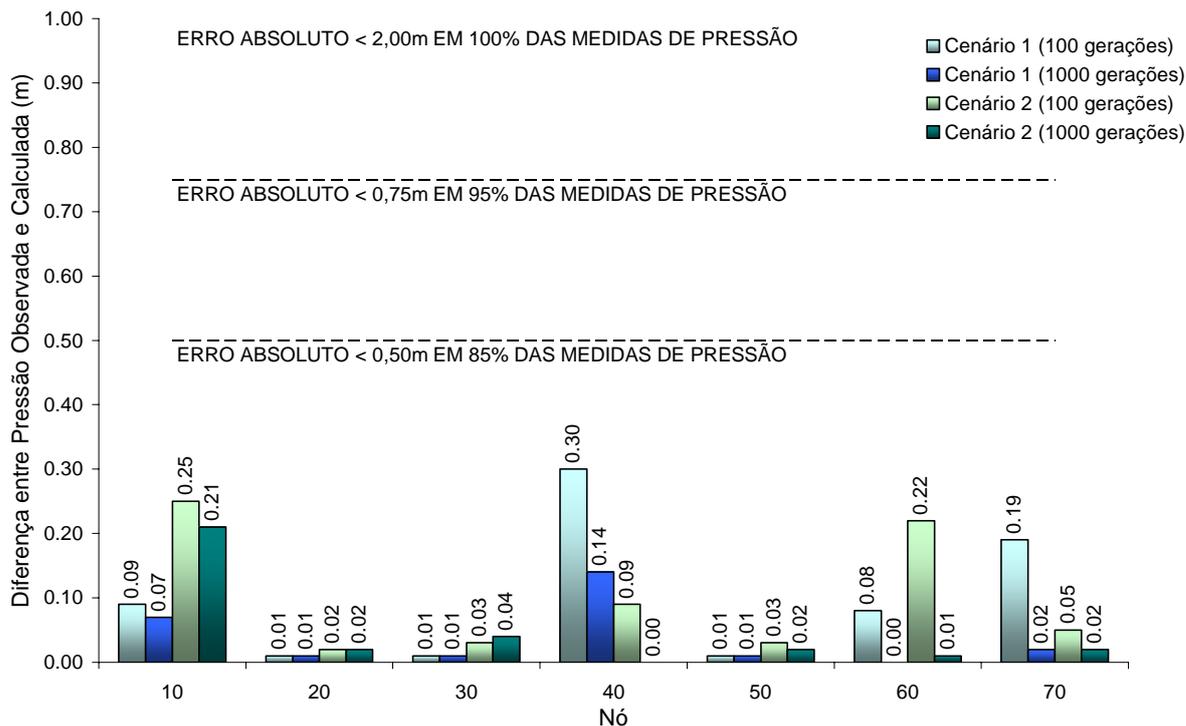


FIGURA 5.31 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação aritmético.

5.4.4 Heurístico

Com a utilização do operador de recombinação heurístico, os coeficientes de *Hazen-Williams* obtidos através das calibrações estão apresentados nas tabelas 5.56 e 5.57.

TABELA 5.56 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando o operador de recombinação heurístico.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,75	111,84	131,49	132,41	89,59	89,75	119,31	143,33	98,40	166,02
2	135,68	114,28	129,47	138,91	89,72	128,15	114,89	92,43	85,89	81,90
3	139,90	108,40	128,15	138,63	89,59	134,51	110,79	152,50	92,20	116,74
4	138,84	111,67	134,20	129,04	90,56	66,06	131,84	107,05	85,14	80,43
5	141,82	114,77	126,63	136,15	90,59	122,67	113,66	101,95	90,72	127,20
6	143,65	105,85	131,53	130,70	89,14	85,89	125,43	147,38	87,47	92,19
7	137,78	114,61	126,56	140,56	91,57	148,00	106,54	118,53	97,40	133,29
8	139,94	120,31	124,84	138,75	89,46	136,05	109,03	80,76	96,11	139,05
9	139,92	113,22	129,64	134,05	89,87	102,73	121,38	98,02	86,22	88,69
10	140,09	120,35	123,47	140,15	91,25	149,11	103,29	100,28	106,49	178,56
11	140,33	121,52	118,19	147,33	91,68	204,12	94,48	54,44	87,12	104,07
12	140,01	114,52	129,67	132,82	90,02	94,89	124,68	105,83	84,77	86,45
Média	139,81	114,28	127,82	136,62	90,25	121,83	114,61	108,54	91,49	116,22
σ	1,94	4,72	4,28	5,12	0,86	37,08	10,57	28,51	6,81	33,20
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro	0,14%	3,89%	1,68%	1,20%	0,28%	10,75%	4,49%	5,62%	7,64%	45,27%

TABELA 5.57 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando o operador de recombinação heurístico.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – <i>C</i> de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,90	111,69	131,50	132,34	89,87	90,65	124,75	106,98	85,19	83,78
2	135,71	114,42	129,39	138,95	89,91	128,85	114,73	92,60	85,71	82,23
3	139,96	107,82	128,21	138,58	90,04	135,43	113,36	128,35	84,48	76,84
4	138,67	112,73	134,24	129,15	89,42	65,45	131,50	98,30	85,69	82,75
5	139,90	105,39	129,52	137,62	89,98	128,44	115,48	139,21	84,37	72,82
6	140,35	109,86	131,70	132,21	89,95	90,57	125,07	113,41	85,08	79,56
7	140,31	111,29	125,72	140,50	90,00	150,05	109,22	105,95	85,12	81,54
8	139,93	118,25	125,01	139,16	90,05	139,53	111,29	73,21	85,96	94,07
9	139,94	113,02	129,92	134,04	89,95	102,88	121,39	100,58	85,32	86,33
10	140,08	121,63	123,24	140,09	90,96	148,44	103,39	89,93	107,85	178,90
11	140,92	114,53	117,73	149,45	90,33	215,35	92,49	85,54	85,49	80,74
12	140,10	115,22	129,40	132,84	89,93	94,67	124,37	83,31	85,92	83,39
<i>Média</i>	139,65	112,99	127,96	137,08	90,03	124,19	115,59	101,45	87,18	90,25
σ	1,34	4,38	4,44	5,40	0,36	39,31	10,81	18,94	6,53	28,39
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	0,25%	2,72%	1,57%	1,54%	0,04%	12,90%	3,68%	11,78%	2,57%	12,81%

Os limites de tolerância estabelecidos para calibração foram obedecidos, como indicado na tabela 5.58 e no gráfico 5.32.

TABELA 5.58 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação heurístico.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,74	0,00	58,74	0,00
20	55,75	55,77	0,02	55,74	0,01
30	56,08	56,08	0,00	56,08	0,00
40	53,77	53,93	0,16	53,82	0,05
50	53,35	53,33	0,02	53,35	0,00
60	54,27	54,26	0,01	54,27	0,00
70	53,03	53,03	0,00	53,03	0,00
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,44	0,00	56,43	0,01
20	48,37	48,38	0,01	48,38	0,01
30	48,72	48,71	0,01	48,71	0,01
40	47,03	46,99	0,04	47,03	0,00
50	41,80	41,81	0,01	41,80	0,00
60	44,12	44,11	0,01	44,12	0,00
70	42,88	42,88	0,00	42,88	0,00

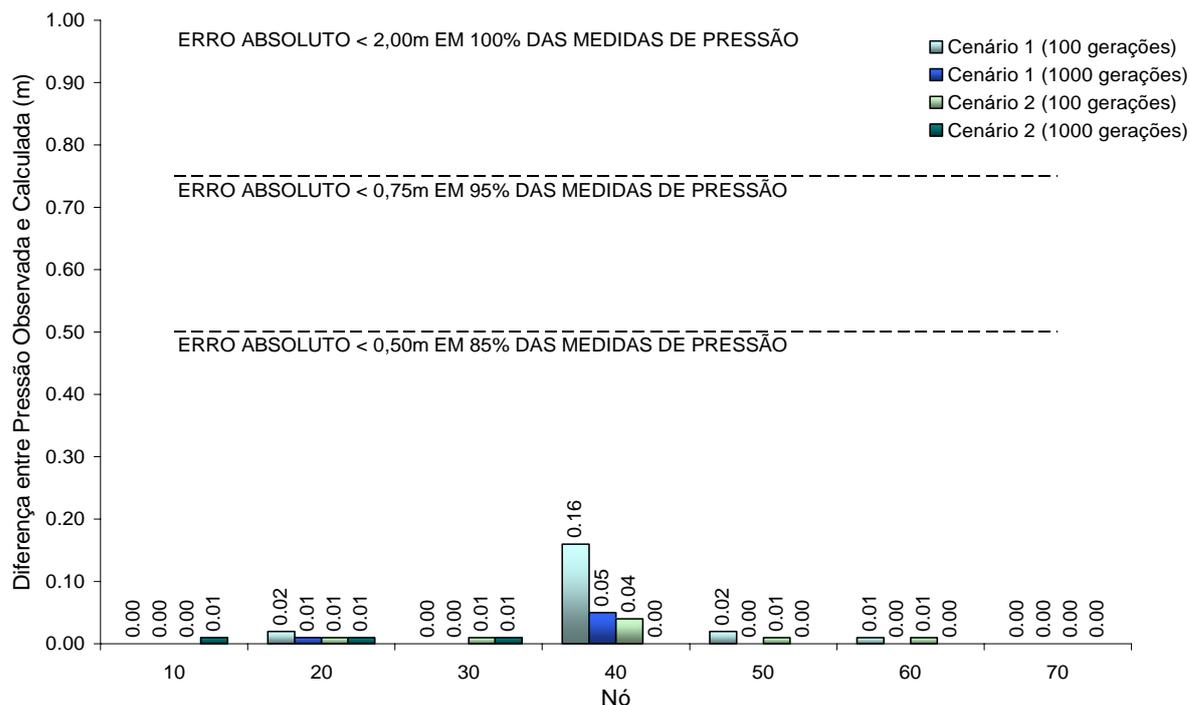


FIGURA 5.32 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o operador de recombinação heurístico.

5.4.5 Todos (média aritmética e geométrica, mistura, simples, aritmético e heurístico)

As rugosidades apresentadas nas tabelas 5.59 e 5.60, são os resultados obtidos utilizando a técnica de recombinação na qual, em cada iteração, um operador, dentre os seis disponíveis no programa, é escolhido de forma aleatória.

TABELA 5.59 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando todos os operadores de recombinação.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,73	111,45	131,27	132,85	90,38	94,71	122,38	117,13	89,33	103,22
2	135,78	112,95	132,69	135,28	91,60	106,15	119,34	95,81	92,38	103,29
3	139,89	113,60	128,85	133,74	103,31	120,90	117,62	102,80	90,22	104,84
4	139,75	110,55	130,82	132,11	102,38	106,22	121,60	112,36	88,01	95,65
5	138,08	108,22	133,25	132,53	96,14	97,82	123,21	133,34	86,32	88,41
6	135,70	112,96	132,42	133,69	101,79	108,93	120,15	118,47	89,76	105,82
7	139,94	115,45	130,03	132,57	91,13	94,40	122,36	98,75	87,59	111,37
8	139,89	116,91	129,40	132,45	96,38	101,21	121,63	84,88	86,92	105,45
9	139,92	110,79	131,91	131,84	90,85	89,63	124,40	117,27	88,32	95,95
10	136,98	120,83	127,22	135,08	90,95	106,25	121,20	111,76	92,00	113,34
11	130,21	113,16	138,35	136,01	92,24	98,46	119,21	111,65	94,19	117,52
12	139,88	112,23	128,50	136,43	90,09	119,92	115,94	110,74	89,89	100,42
Média	137,98	113,26	131,23	133,71	94,77	103,72	120,75	109,58	89,58	103,77
σ	2,96	3,29	2,91	1,60	5,09	9,72	2,41	12,58	2,36	8,10
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro	1,44%	2,96%	0,94%	0,95%	5,30%	5,71%	0,63%	4,71%	5,38%	29,72%

TABELA 5.60 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando todos os operadores de recombinação.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo – C de <i>Hazen-Williams</i> ($m^{0,3698}/s$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	139,77	111,44	131,27	132,87	90,22	94,62	122,46	117,02	89,71	102,59
2	135,91	113,69	132,22	135,33	90,20	104,11	120,03	104,50	85,95	97,72
3	139,95	113,59	128,86	135,24	90,72	112,94	118,32	99,72	86,74	94,63
4	139,94	111,46	130,87	133,14	90,70	97,72	122,54	109,52	85,78	91,12
5	139,16	108,12	132,73	132,82	90,37	93,32	124,07	128,76	84,86	82,25
6	137,50	111,73	132,01	134,18	90,09	99,18	121,30	120,12	89,78	101,19
7	139,94	115,51	130,07	132,80	90,15	94,36	122,36	90,59	86,64	106,87
8	139,92	117,09	129,41	133,38	90,00	98,24	122,07	81,93	85,79	94,18
9	139,92	110,79	131,91	132,06	90,12	88,98	124,51	115,51	86,18	94,17
10	137,45	121,02	128,13	135,08	89,99	105,35	121,12	67,15	86,04	93,75
11	131,64	112,98	136,69	136,01	89,96	98,68	119,54	115,54	90,29	111,93
12	139,88	112,23	128,50	136,43	90,09	119,92	115,94	110,74	89,89	100,42
<i>Média</i>	138,41	113,30	131,06	134,11	90,22	100,62	121,19	105,09	87,31	97,57
σ	2,52	3,34	2,36	1,46	0,26	8,75	2,43	17,62	1,99	7,76
<i>Real</i>	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
<i>Erro</i>	1,13%	3,00%	0,81%	0,66%	0,24%	8,53%	0,99%	8,62%	2,71%	21,96%

As diferenças absolutas entre pressões observadas e pressões simuladas com o coeficiente de rugosidade calibrado pelo CARTAG estão na tabela 5.61 e no gráfico 5.33.

TABELA 5.61 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando todos os operadores de recombinação.

Cenário de demanda 1					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	58,74	58,71	0,03	58,71	0,03
20	55,75	55,76	0,01	55,75	0,00
30	56,08	56,09	0,01	56,09	0,01
40	53,77	53,89	0,12	53,82	0,05
50	53,35	53,34	0,01	53,34	0,01
60	54,27	54,23	0,04	54,27	0,00
70	53,03	53,11	0,08	53,04	0,01
Cenário de demanda 2					
Nó	Pressão (m)				
	Observada	100 gerações		1000 gerações	
		Calculada	Diferença	Calculada	Diferença
10	56,44	56,35	0,09	56,37	0,07
20	48,37	48,38	0,01	48,39	0,02
30	48,72	48,73	0,01	48,74	0,02
40	47,03	47,01	0,02	47,00	0,03
50	41,80	41,81	0,01	41,81	0,01
60	44,12	44,02	0,10	44,12	0,00
70	42,88	42,89	0,01	42,88	0,00

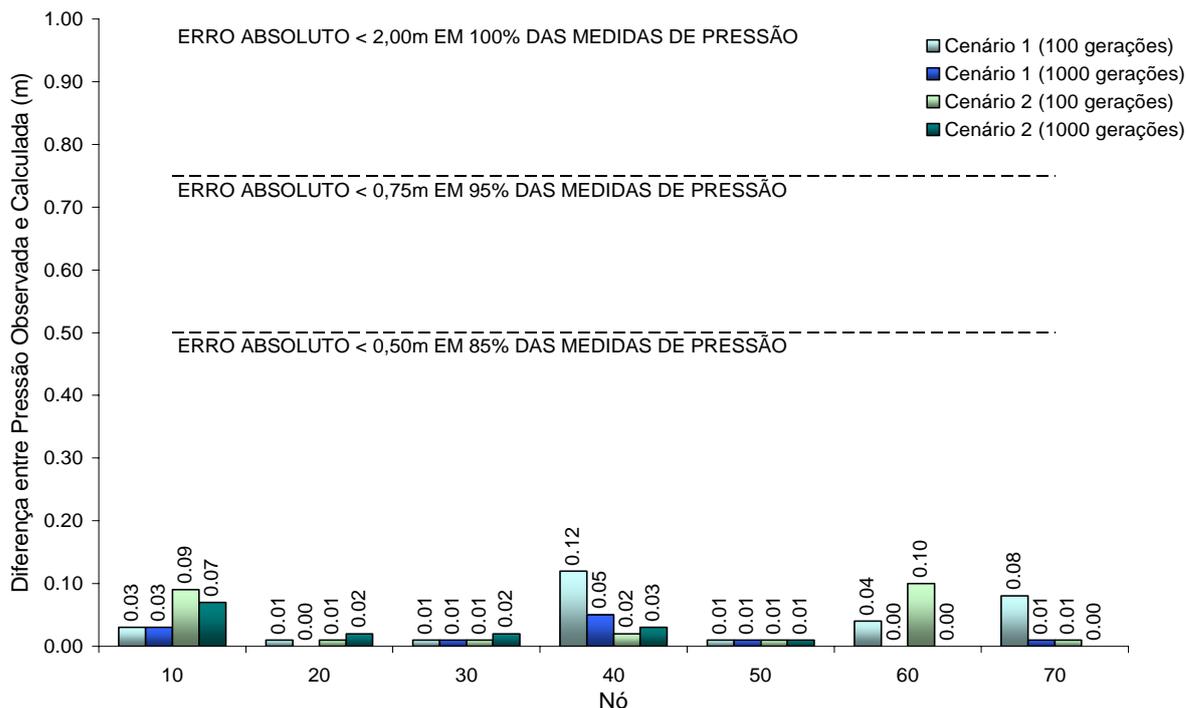


FIGURA 5.33 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando todos os operadores de recombinação.

5.4.6 Análise comparativa entre os operadores de recombinação

Assim como nas análises anteriores, os tubos 6, 8 e 10 apresentaram grande variação de valores de rugosidades calibrados, constatado pelo desvio padrão elevado, como mostram as figuras 5.34 e 5.35.

Considerando as variações dos resultados obtidos para os tubos 6, 8 e 10, foi calculada a probabilidade média de determinação dos coeficientes de *Hazen-Williams*, dos demais tubos, com erro menor que 5%, indicadas nas figuras 5.36 e 5.37, onde se pode verificar que os melhores resultados são obtidos através da técnica de, a cada iteração, utilizar aleatoriamente um dos operadores de recombinação disponíveis no CARTAG.

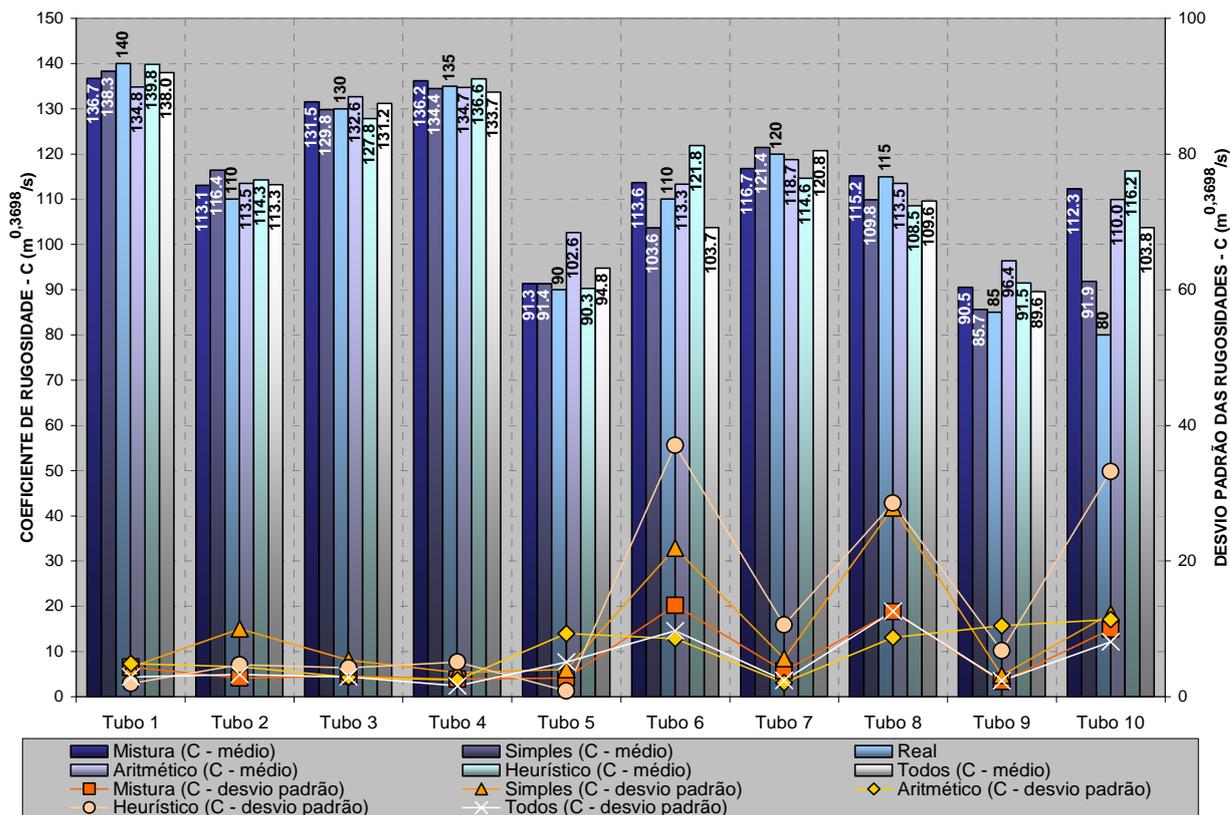


FIGURA 5.34 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados por operador de recombinação (número de gerações = 100).

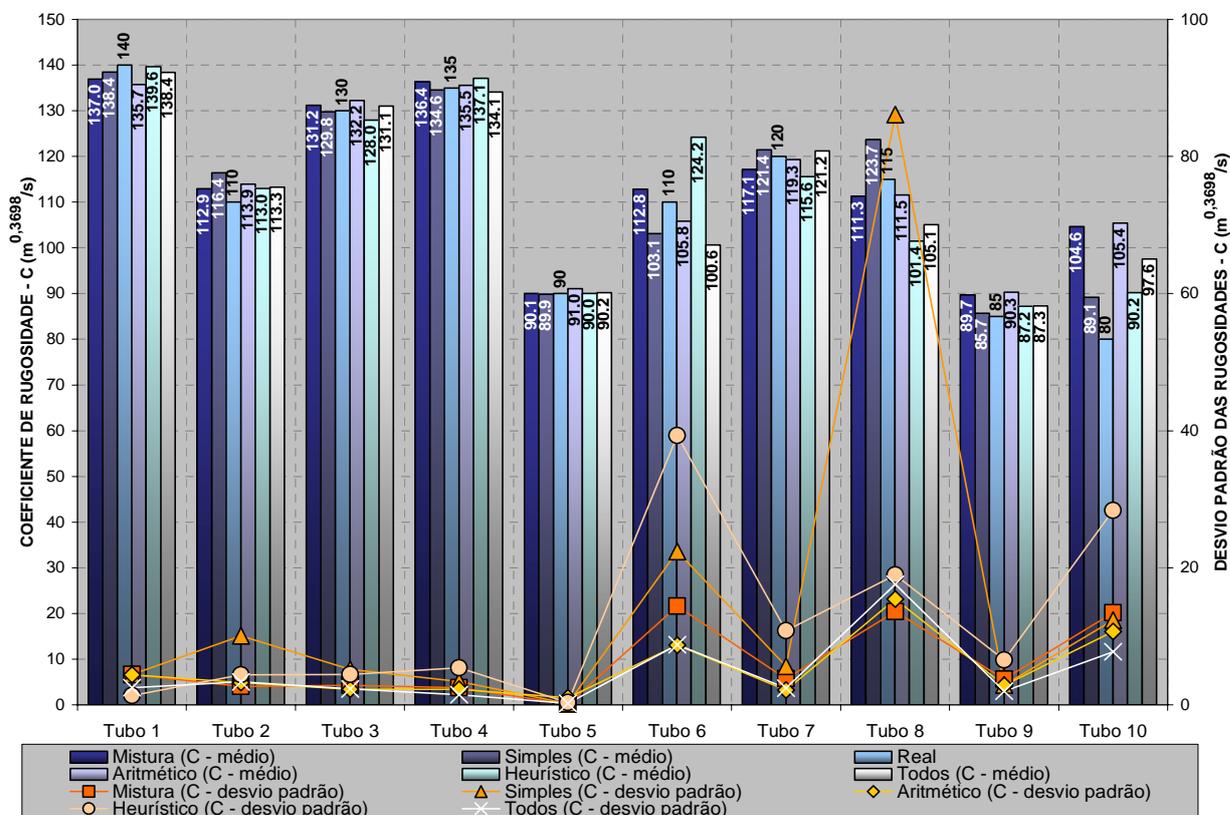


FIGURA 5.35 – Média e desvio padrão dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados por operador de recombinação (número de gerações = 1000).

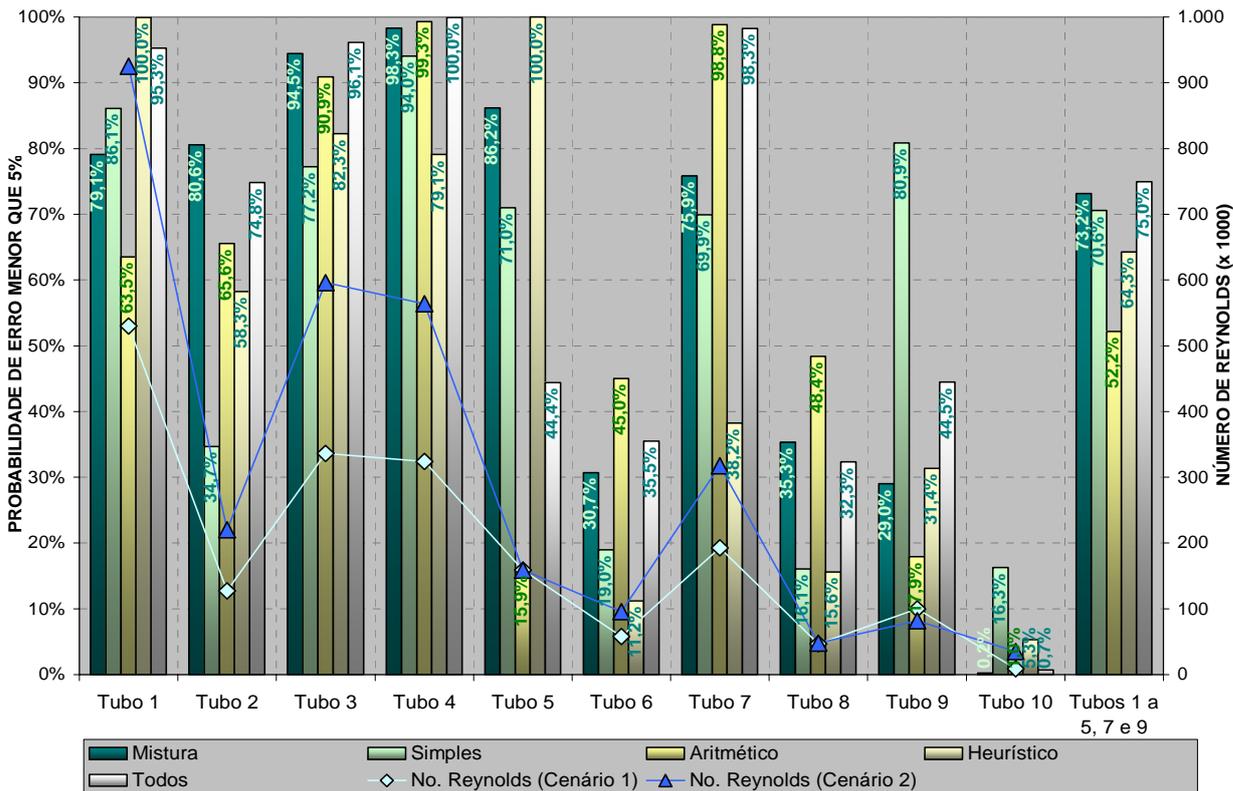


FIGURA 5.36 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por operador de recombinação (número gerações = 100).

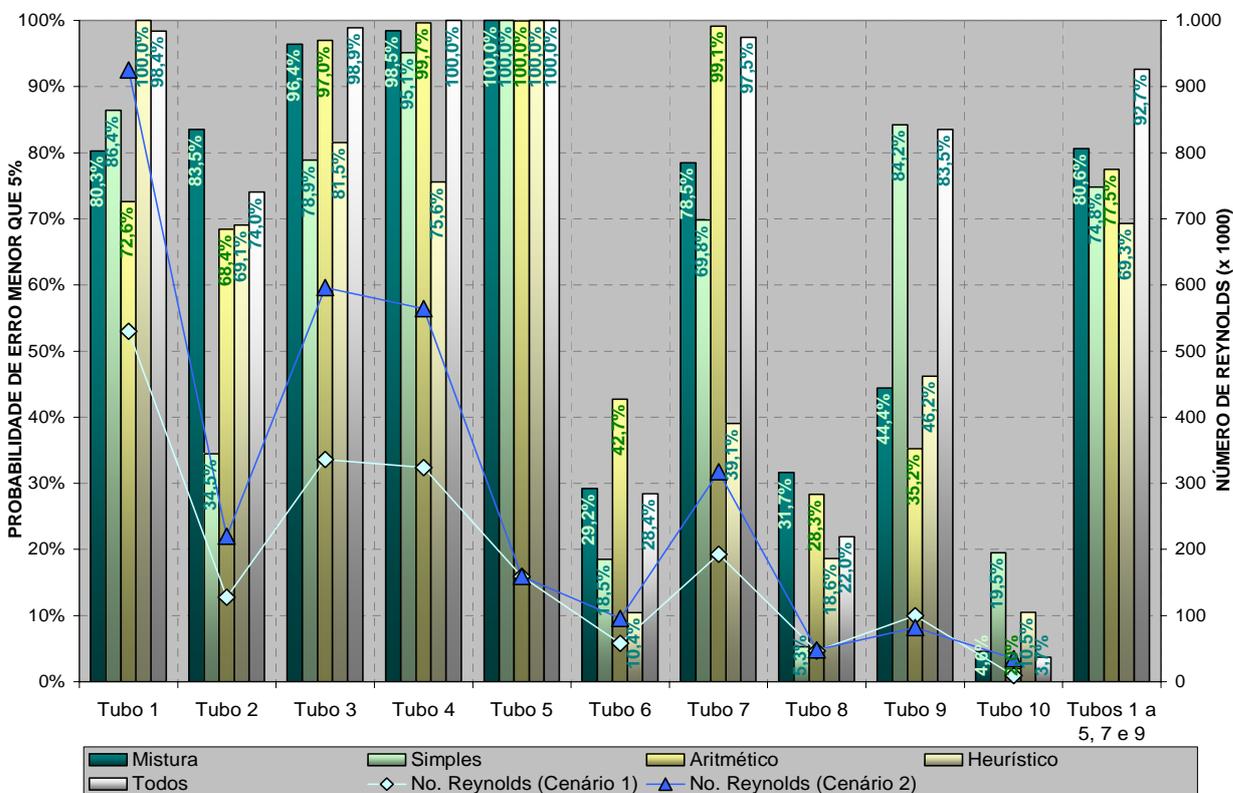


FIGURA 5.37 – Probabilidade de calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5%, por operador de recombinação (número gerações = 1000).

Pela figura 5.38 nota-se que, embora o emprego aleatório de todos os operadores de recombinação tenha obtido melhores soluções, o método heurístico apresenta maior velocidade de convergência da função objetivo média.

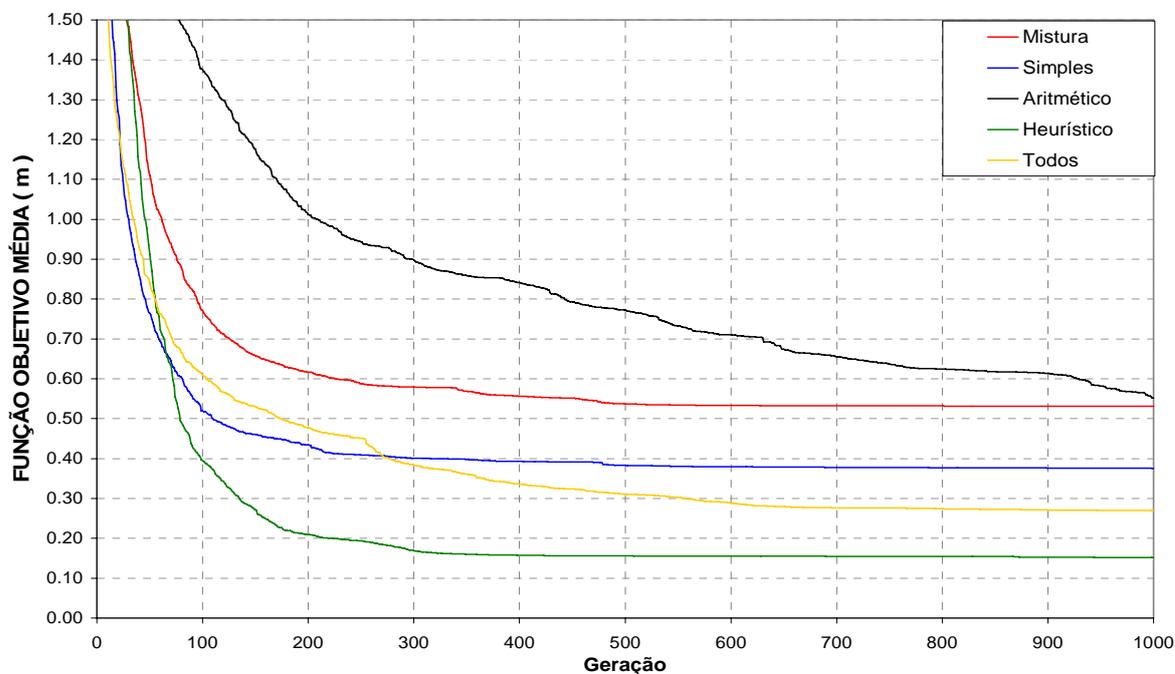


FIGURA 5.38 – Comportamento da função objetivo média por operador de recombinação.

5.5 Análise do tamanho da população

Na calibração das rugosidades absolutas das tubulações optou-se em analisar a influência da quantidade de indivíduos da população na qualidade dos resultados alcançados, tendo em vista a dimensão do espaço de busca, que é maior que no caso dos coeficientes de *Hazen-Williams*. Os demais parâmetros e operadores foram considerados os mesmos para todas as calibrações, e estão indicados na tabela 5.62.

TABELA 5.62 – Dados utilizados para análise do tamanho da população.

Substituição indivíduos	<i>Steady-state</i>
Seleção	Torneio ($n = 3$)
Recombinação	Em cada geração um dos operadores é escolhido aleatoriamente.
Mutação	<i>Gaussiana</i> ($\sigma = 2$)
Cálculo da perda de carga	<i>Darcy-Weisbach</i>

5.5.1 População de 200 indivíduos

Os resultados de rugosidade obtidos nas 12 calibrações realizadas com 1000 iterações, utilizando uma população de 200 indivíduos gerando 100 filhos, estão apresentados na tabela 5.63.

TABELA 5.63 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 1000 iterações, utilizando população de 200 indivíduos.

Calibração	Rugosidade absoluta calculada por tubo – ε (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,047	1,602	0,094	0,240	4,779	24,058	0,287	2,806	5,534	3,790
2	0,100	0,855	0,195	0,135	4,615	2,360	0,429	3,462	6,294	4,044
3	0,065	1,125	0,191	0,161	4,764	3,832	0,396	1,493	5,971	2,603
4	0,067	0,951	0,246	0,135	3,887	0,832	0,561	2,876	5,800	2,836
5	0,010	0,059	0,871	0,235	4,399	10,115	0,104	0,000	6,671	6,402
6	0,091	1,347	0,256	0,057	5,123	0,009	1,311	1,001	6,181	6,355
7	0,088	0,945	0,265	0,091	4,579	0,230	0,780	2,554	6,197	4,984
8	0,086	1,550	0,204	0,068	4,567	0,010	1,334	1,293	5,954	5,203
9	0,245	0,342	0,178	0,100	4,798	2,457	0,361	24,547	6,730	5,152
10	0,095	1,212	0,229	0,086	5,096	0,313	0,833	0,332	4,700	1,958
11	0,532	0,309	0,043	0,081	4,932	6,546	0,319	6,960	5,966	3,074
12	0,097	0,996	0,185	0,121	4,788	1,406	0,546	2,216	5,679	3,353
<i>Média</i>	<i>0,127</i>	<i>0,941</i>	<i>0,246</i>	<i>0,126</i>	<i>4,694</i>	<i>4,347</i>	<i>0,605</i>	<i>4,128</i>	<i>5,973</i>	<i>4,146</i>
<i>σ</i>	<i>0,139</i>	<i>0,489</i>	<i>0,207</i>	<i>0,060</i>	<i>0,331</i>	<i>6,917</i>	<i>0,391</i>	<i>6,681</i>	<i>0,538</i>	<i>1,465</i>
<i>Real</i>	<i>0,090</i>	<i>1,200</i>	<i>0,200</i>	<i>0,120</i>	<i>4,800</i>	<i>1,200</i>	<i>0,500</i>	<i>1,000</i>	<i>6,500</i>	<i>8,000</i>
<i>Erro</i>	<i>41,13%</i>	<i>21,58%</i>	<i>23,22%</i>	<i>4,84%</i>	<i>2,21%</i>	<i>262,27%</i>	<i>21,00%</i>	<i>312,82%</i>	<i>8,11%</i>	<i>48,17%</i>

A tabela 5.64 e a figura 5.39 mostram o comparativo entre as pressões reais e calibradas pelo programa.

TABELA 5.64 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 200 indivíduos.

Nó	Pressão					
	Cenário 1			Cenário 2		
	Observada	Calculada	Diferença	Observada	Calculada	Diferença
10	58,78	58,73	0,05	56,42	56,23	0,19
20	55,90	55,75	0,15	48,24	47,84	0,40
30	56,28	56,16	0,12	48,72	48,31	0,41
40	53,71	53,56	0,15	46,81	46,35	0,46
50	53,55	53,25	0,30	41,46	40,56	0,90
60	54,47	54,46	0,01	43,95	43,86	0,09
70	53,17	53,17	0,00	42,66	42,57	0,09

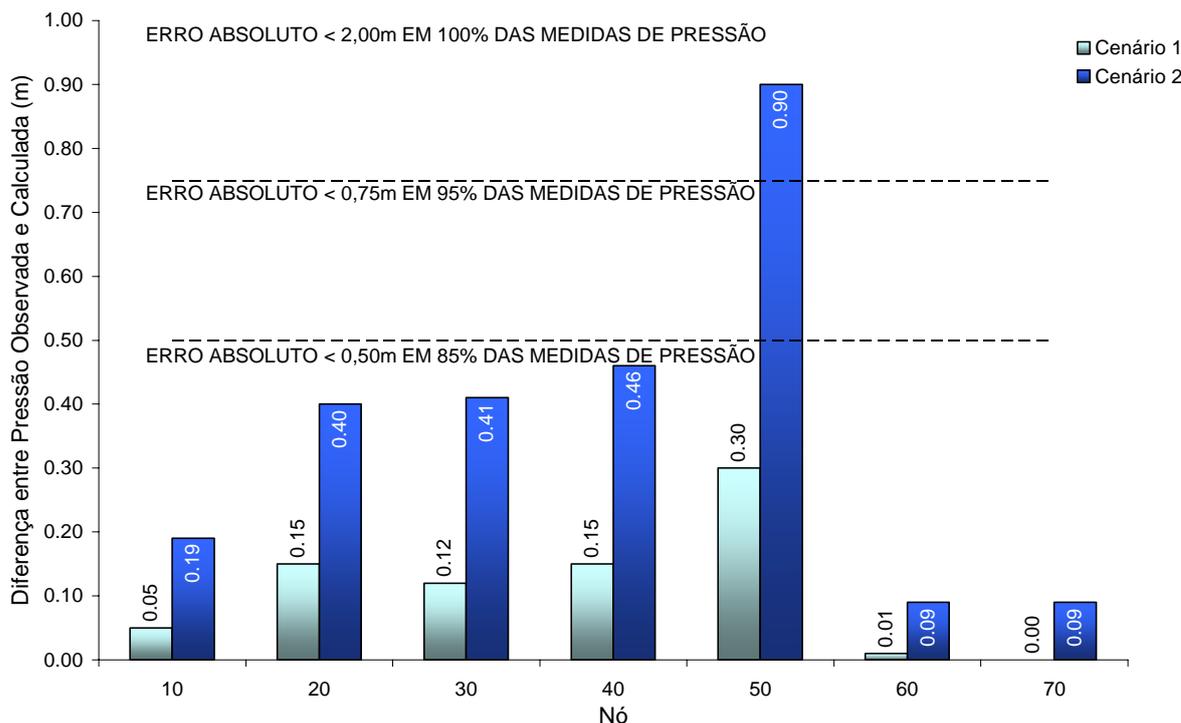


FIGURA 5.39 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 200 indivíduos.

5.5.2 População de 500 indivíduos

A tabela 5.65 apresenta as amostras de 12 rugosidades calibradas com 400 iterações e uma população de 500 indivíduos gerando 250 filhos.

TABELA 5.65 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 400 iterações, utilizando população de 500 indivíduos.

Calibração	Rugosidade absoluta calculada por tubo – ε (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,087	1,175	0,206	0,122	4,756	1,271	0,502	0,710	5,884	5,106
2	0,091	0,844	0,212	0,133	4,418	1,860	0,517	2,411	4,161	1,099
3	0,086	0,804	0,206	0,154	4,138	3,281	0,390	4,746	5,320	2,400
4	0,118	0,704	0,189	0,133	4,889	2,859	0,433	4,871	5,374	1,658
5	0,074	0,897	0,247	0,123	4,245	0,846	0,610	2,529	4,860	1,521
6	0,108	0,893	0,194	0,126	4,373	1,680	0,473	2,560	5,861	3,676
7	0,080	0,968	0,183	0,168	4,587	5,477	0,334	2,088	5,652	3,402
8	0,092	0,680	0,356	0,062	4,886	0,006	1,146	9,107	6,093	4,418
9	0,092	0,843	0,203	0,137	4,851	2,393	0,431	3,924	6,268	3,786
10	0,096	0,901	0,189	0,144	4,372	2,903	0,405	2,903	5,808	3,414
11	0,119	1,905	0,093	0,091	4,447	0,358	1,018	0,761	5,845	3,409
12	0,100	0,743	0,285	0,080	4,680	0,135	0,876	9,525	5,986	4,902
Média	0,095	0,946	0,214	0,123	4,553	1,922	0,595	3,845	5,593	3,233
σ	0,014	0,329	0,063	0,031	0,258	1,581	0,268	2,869	0,591	1,313
Real	0,090	1,200	0,200	0,120	4,800	1,200	0,500	1,000	6,500	8,000
Erro	5,88%	21,13%	6,78%	2,28%	5,14%	60,20%	18,92%	284,45%	13,96%	59,59%

Observa-se pela tabela 5.66 e pela figura 5.40 que o sistema está calibrado, pois as diferenças absolutas entre pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas estão dentro dos limites definidos no capítulo quatro.

TABELA 5.66 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 500 indivíduos.

Nó	Pressão					
	Cenário 1			Cenário 2		
	Observada	Calculada	Diferença	Observada	Calculada	Diferença
10	58,78	58,78	0,00	56,42	56,40	0,02
20	55,90	55,85	0,05	48,24	48,15	0,09
30	56,28	56,28	0,00	48,72	48,70	0,02
40	53,71	53,72	0,01	46,81	46,68	0,13
50	53,55	53,45	0,10	41,46	41,19	0,27
60	54,47	54,46	0,01	43,95	43,93	0,02
70	53,17	53,19	0,02	42,66	42,66	0,00

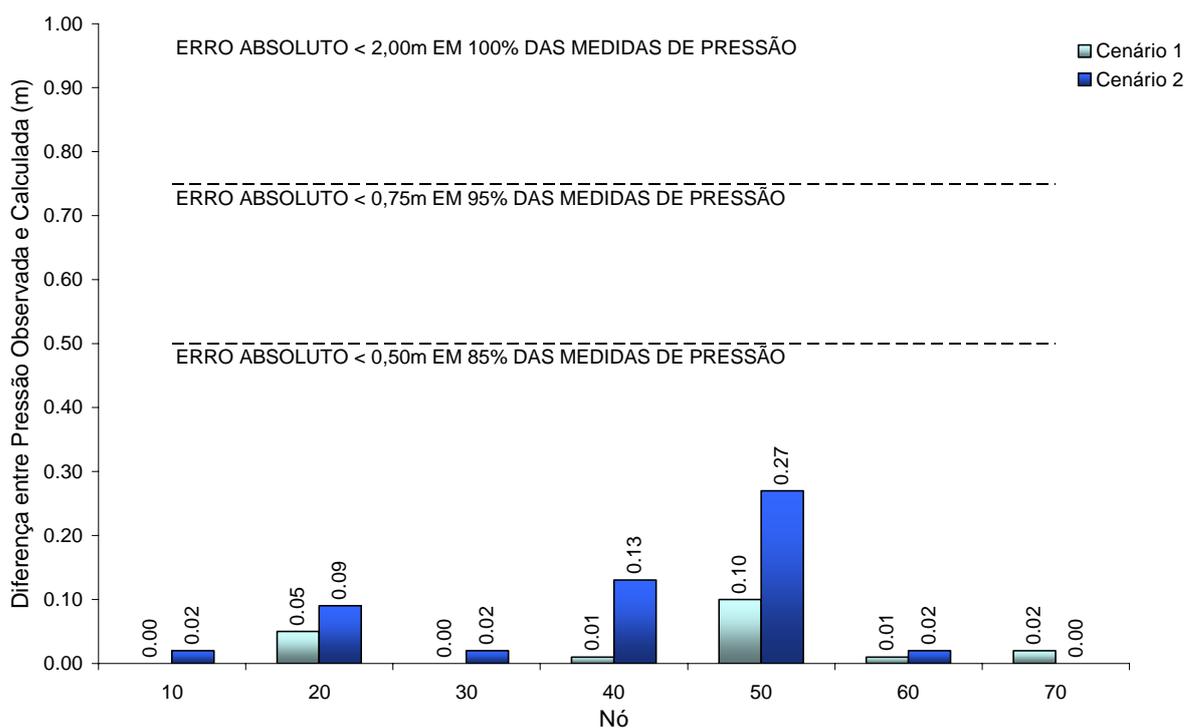


FIGURA 5.40 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 500 indivíduos.

5.5.3 População de 1000 indivíduos

Os resultados da calibração com 200 iterações utilizando uma população de 1000 indivíduos gerando 500 filhos, são apresentados na tabela 5.67.

TABELA 5.67 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 200 iterações, utilizando população de 1000 indivíduos.

Calibração	Rugosidade absoluta calculada por tubo – ε (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,092	0,844	0,236	0,109	4,769	0,777	0,613	3,385	5,462	3,077
2	0,098	0,989	0,169	0,155	4,744	4,808	0,352	1,789	5,986	3,296
3	0,092	1,015	0,188	0,142	4,623	2,742	0,394	2,060	6,344	6,309
4	0,087	1,250	0,251	0,083	4,625	0,132	0,909	0,496	5,442	3,800
5	0,091	0,815	0,218	0,127	4,724	1,588	0,511	3,761	5,032	2,155
6	0,090	0,766	0,198	0,149	5,070	4,011	0,382	4,698	5,527	2,549
7	0,092	1,311	0,152	0,136	4,752	2,262	0,484	1,036	6,033	4,334
8	0,089	0,906	0,187	0,150	4,830	3,701	0,383	3,014	6,232	3,584
9	0,091	0,857	0,204	0,136	4,739	2,303	0,432	3,744	6,283	4,268
10	0,091	0,825	0,211	0,135	4,606	2,102	0,433	5,053	6,189	5,034
11	0,090	0,698	0,232	0,130	4,740	1,797	0,455	10,783	6,093	4,362
12	0,090	1,314	0,161	0,162	4,355	4,876	0,329	0,316	5,877	5,030
<i>Média</i>	<i>0,091</i>	<i>0,966</i>	<i>0,201</i>	<i>0,135</i>	<i>4,715</i>	<i>2,592</i>	<i>0,473</i>	<i>3,344</i>	<i>5,875</i>	<i>3,983</i>
<i>σ</i>	<i>0,003</i>	<i>0,215</i>	<i>0,031</i>	<i>0,022</i>	<i>0,166</i>	<i>1,502</i>	<i>0,157</i>	<i>2,816</i>	<i>0,414</i>	<i>1,162</i>
<i>Real</i>	<i>0,090</i>	<i>1,200</i>	<i>0,200</i>	<i>0,120</i>	<i>4,800</i>	<i>1,200</i>	<i>0,500</i>	<i>1,000</i>	<i>6,500</i>	<i>8,000</i>
<i>Erro</i>	<i>1,30%</i>	<i>19,52%</i>	<i>0,29%</i>	<i>12,15%</i>	<i>1,77%</i>	<i>115,97%</i>	<i>5,39%</i>	<i>234,45%</i>	<i>9,61%</i>	<i>50,21%</i>

A tabela 5.68 e a figura 5.41 mostram as diferenças absolutas entre as pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas. De acordo com os critérios estabelecidos no capítulo quatro, observa-se que o sistema está calibrado.

TABELA 5.68 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 1000 indivíduos.

Nó	Pressão					
	Cenário 1			Cenário 2		
	Observada	Calculada	Diferença	Observada	Calculada	Diferença
10	58,78	58,78	0,00	56,42	56,42	0,00
20	55,90	55,86	0,04	48,24	48,19	0,05
30	56,28	56,28	0,00	48,72	48,71	0,01
40	53,71	53,72	0,01	46,81	46,72	0,09
50	53,55	53,50	0,05	41,46	41,33	0,13
60	54,47	54,48	0,01	43,95	43,95	0,00
70	53,17	53,19	0,02	42,66	42,66	0,00

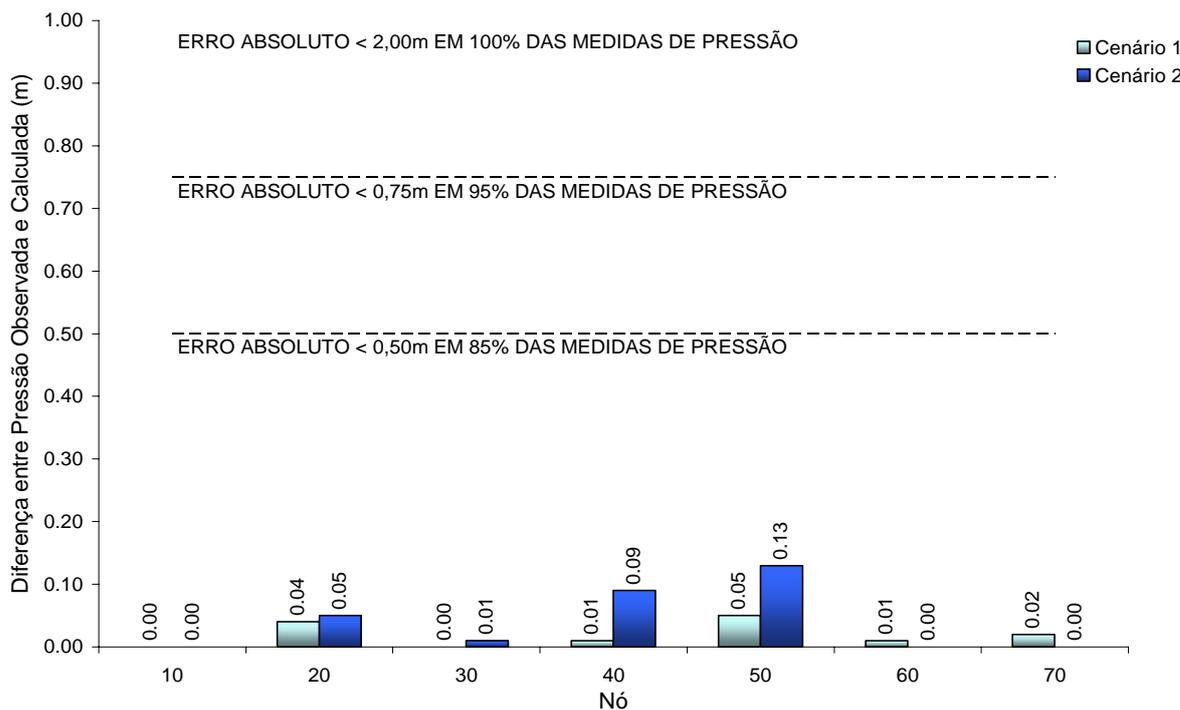


FIGURA 5.41 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 1000 indivíduos.

5.5.4 População de 2000 indivíduos

Para uma população de 2000 indivíduos gerando 1000 filhos em cada iteração, as soluções encontradas foram as seguintes.

TABELA 5.69 – Rugosidades absolutas calculadas pelo CARTAG, em 100 iterações, utilizando população de 2000 indivíduos.

Calibração	Rugosidade absoluta calculada por tubo – ϵ (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,087	0,987	0,210	0,127	4,775	1,570	0,494	2,032	5,497	3,576
2	0,086	1,152	0,199	0,128	4,725	1,562	0,508	0,861	5,455	3,397
3	0,089	1,374	0,183	0,130	4,734	1,783	0,473	0,213	5,506	3,649
4	0,094	1,006	0,182	0,142	4,731	2,905	0,415	1,796	5,754	3,392
5	0,090	1,236	0,180	0,133	4,845	1,994	0,463	0,696	5,664	4,226
6	0,090	1,065	0,181	0,148	4,848	3,425	0,384	1,276	5,518	3,898
7	0,090	1,207	0,174	0,141	4,768	2,759	0,452	0,422	4,561	1,630
8	0,101	0,910	0,193	0,130	4,700	2,057	0,454	2,631	6,042	3,719
9	0,091	1,132	0,172	0,153	4,828	4,081	0,355	1,094	6,048	5,390
10	0,091	1,127	0,202	0,120	4,697	1,211	0,528	1,054	5,645	4,304
11	0,091	1,051	0,210	0,119	4,744	1,143	0,531	1,522	5,733	4,551
12	0,092	0,862	0,194	0,145	4,711	3,201	0,403	3,492	5,949	2,870
Média	0,091	1,092	0,190	0,135	4,759	2,307	0,455	1,424	5,614	3,717
σ	0,004	0,144	0,013	0,011	0,055	0,946	0,056	0,946	0,392	0,926
Real	0,090	1,200	0,200	0,120	4,800	1,200	0,500	1,000	6,500	8,000
Erro	1,16%	8,96%	5,05%	12,24%	0,86%	92,29%	9,01%	42,40%	13,63%	53,54%

Os critérios estabelecidos para calibração foram atendidos, como indicado na tabela 5.70 e no gráfico 5.42.

TABELA 5.70 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 2000 indivíduos.

Nó	Pressão					
	Cenário 1			Cenário 2		
	Observada	Calculada	Diferença	Observada	Calculada	Diferença
10	58,78	58,78	0,00	56,42	56,42	0,00
20	55,90	55,89	0,01	48,24	48,21	0,03
30	56,28	56,28	0,00	48,72	48,73	0,01
40	53,71	53,77	0,06	46,81	46,77	0,04
50	53,55	53,53	0,02	41,46	41,42	0,04
60	54,47	54,47	0,00	43,95	43,95	0,00
70	53,17	53,18	0,01	42,66	42,66	0,00

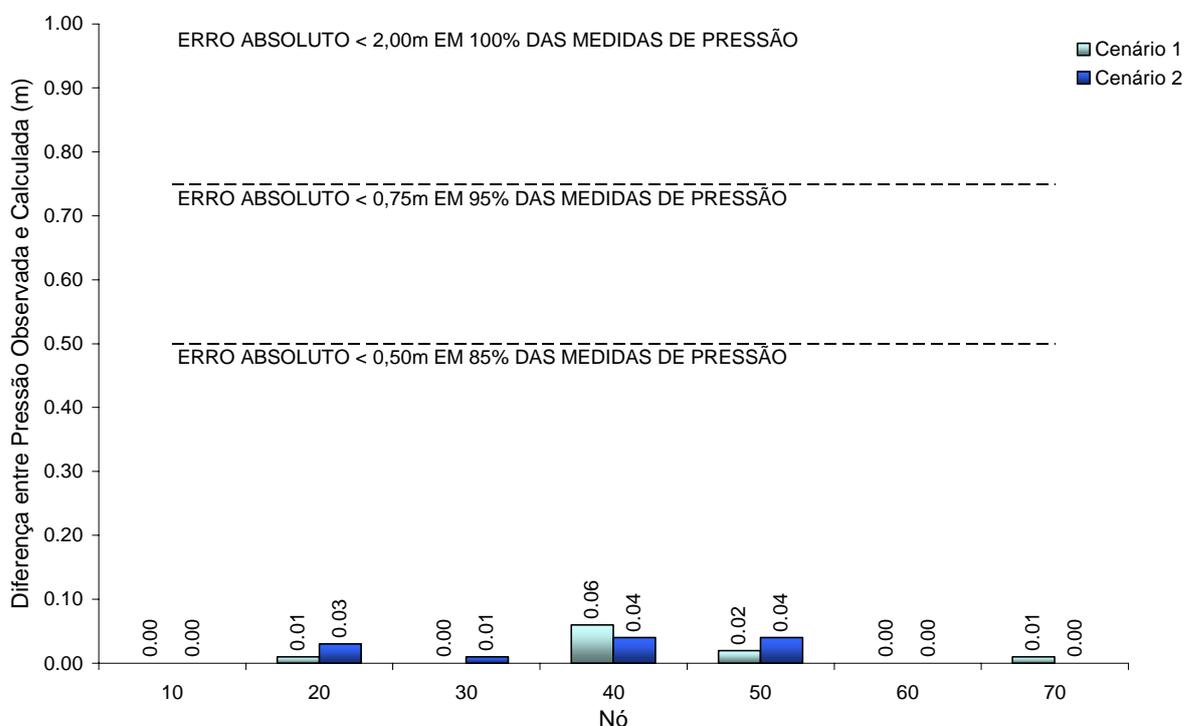


FIGURA 5.42 – Gráfico das diferenças entre pressões observadas e simuladas com as médias das rugosidades absolutas calibradas, utilizando população de 2000 indivíduos.

5.5.5 Análise comparativa entre as alternativas de tamanho da população

A partir das simulações realizadas, percebe-se que, nas alternativas de população com 500, 1000 e 2000 indivíduos, as diferenças entre pressões reais e calculadas em todas as medidas de pressão são inferiores a 0,50 m, indicando que o sistema está calibrado. Na alternativa de população com 200 indivíduos, em uma medida de pressão o erro absoluto foi

superior a 0,75 m, mostrando que, nesse caso, o sistema está no limite do intervalo aceitável de calibração. Da mesma forma que nas análises anteriores, as rugosidades estimadas para os tubos 6, 8 e 10 apresentam um desvio padrão elevado como demonstra a figura 5.43.

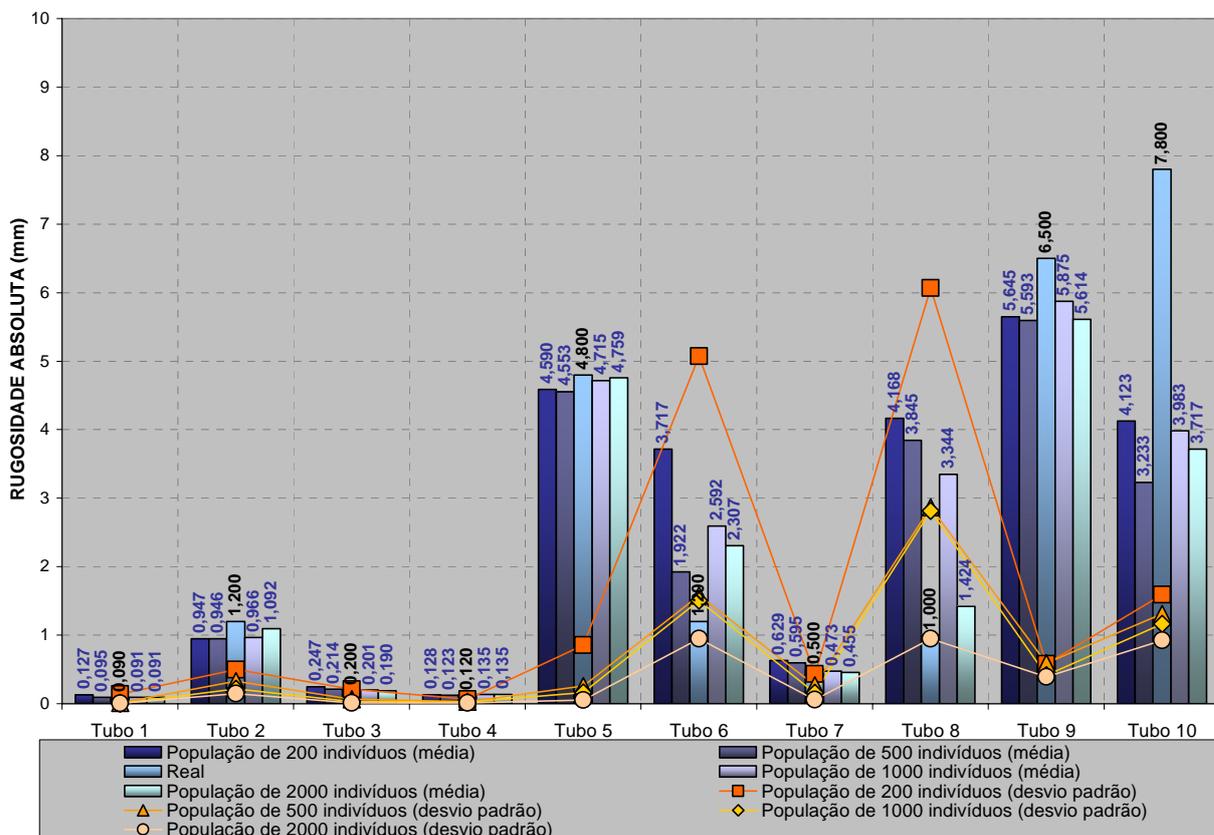


FIGURA 5.43 – Média e desvio padrão das rugosidades absolutas calibradas por tamanho da população.

A avaliação da influência da quantidade de indivíduos da população na qualidade das soluções encontradas é feita com base no cálculo da probabilidade com que as rugosidades absolutas são determinadas com erro menor que 10% (figura 5.44), e não 5% como foi analisado o coeficiente de *Hazen-Williams*, tendo em vista a menor sensibilidade da rugosidade absoluta. Diante disso e do gráfico da figura 5.45, que mostra o comportamento da função objetivo média no decorrer das iterações, conclui-se que com o aumento da população, eleva-se consideravelmente a probabilidade média de identificação das rugosidades absolutas com erro menor que 10%. Observa-se ainda que, no caso estudado, as pressões simuladas com rugosidades absolutas calibradas a partir de uma população de 1000 indivíduos, são semelhantes às pressões simuladas com coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados a partir de uma população de 200 indivíduos.

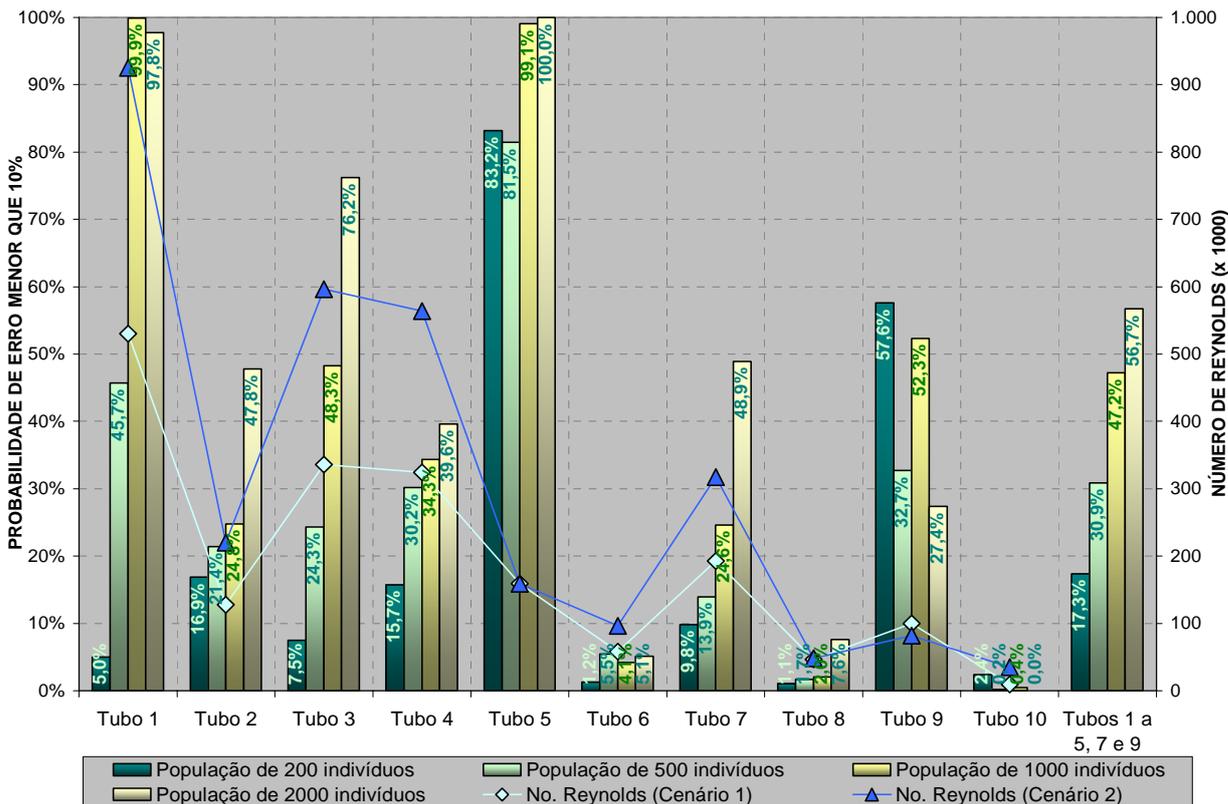


FIGURA 5.44 – Probabilidade de calibração das rugosidades absolutas com erro menor que 10%, por tamanho da população.

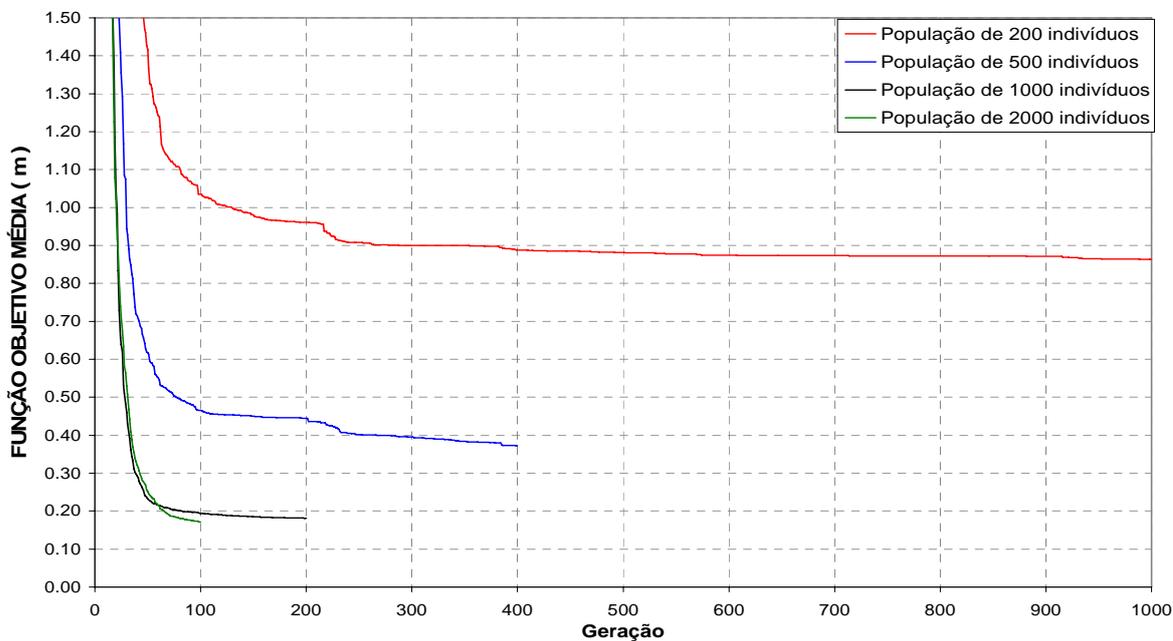


FIGURA 5.45 – Comportamento da função objetivo média por tamanho da população.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nessa dissertação foi apresentado um programa para calibração de rugosidades absolutas e coeficientes de *Hazen-Williams* de redes de distribuição, que aplica a técnica de otimização dos algoritmos genéticos de forma flexível, permitindo a escolha de vários parâmetros e operadores genéticos. Além de disponibilizar uma ferramenta capaz de calibrar os coeficientes de resistência de tubulações em sistemas de distribuição quaisquer, esse aplicativo foi construído com o intuito de subsidiar estudos comparativos visando o aprimoramento do método dos algoritmos genéticos.

Baseado nos resultados apresentados no capítulo cinco, pode-se afirmar que o modelo proposto pode ser utilizado como ferramenta de calibração, tendo em vista que as pressões calculadas em todas as alternativas avaliadas apresentaram erros absolutos dentro dos limites de tolerância definidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989).

A partir de uma visão geral dos resultados obtidos, observa-se que, apesar do modelo calibrar pressões com precisão, as rugosidades estimadas para os tubos 6, 8 e 10 apresentaram desvio padrão elevado em todas alternativas estudadas, demonstrando que esses tubos são menos sensíveis ao processo de calibração. Analisando as condições de equilíbrio hidráulico do sistema, observa-se que os tubos menos sensíveis possuem em comum o baixo valor do número de *Reynolds*, que ocasiona diferenças insignificantes na perda de carga unitária para qualquer variação da rugosidade. Diante disso conclui-se que, para o modelo proposto, os resultados alcançados na calibração se aproximam da realidade à medida em que o escoamento é mais turbulento, característica observada pelo aumento do número de *Reynolds*.

Quanto ao tipo de substituição de indivíduos, a pesquisa mostra que o método *steady-state* é mais eficiente, pois além da rápida convergência da função objetivo, a

probabilidade de identificação dos coeficientes de *Hazen-Williams* com erro inferior a 5% é maior que nas substituições geracionais. Na seleção dos indivíduos a partir do espaço amostral ampliado, a melhora do desempenho só é notada após trezentas gerações, evidenciando a baixa velocidade de convergência; enquanto que a estratégia de substituição com elitismo, apesar de ter melhorado a convergência da função objetivo, diminuiu a probabilidade de identificar a solução final com erro menor que 5%, caracterizando uma convergência prematura.

Dentre os operadores de seleção avaliados, a roda da roleta apresenta uma melhor convergência da função objetivo média a partir da centésima geração, o que não necessariamente implica em uma melhor solução final, pois, de acordo com os estudos estatísticos das rugosidades calibradas, observa-se que as seleções por torneio com três participantes e amostragem estocástica universal geram resultados mais consistentes e próximos do ótimo global.

A análise dos operadores de mutação através dos estudos probabilísticos vistos no capítulo cinco destacam a mutação uniforme, que apresentou as melhores soluções em cem iterações indicando a rápida convergência inicial, e a *Gaussiana*, que se mostrou mais precisa para o cálculo das rugosidades com mil iterações. Nas mutações *Gaussiana* e não-uniforme observa-se que a função objetivo convergiu lentamente, estabilizando-se após quinhentas iterações, o que pode ser justificado pelos valores adotados como parâmetros dos operadores. No caso da mutação *Gaussiana* verifica-se que foi adotado um valor baixo para o desvio padrão ($\sigma = 2$), o que não aumentou de forma significativa a diversidade dos indivíduos da população.

O estudo comparativo entre operadores de recombinação permite concluir que a recombinação mistura (BLX- α) obteve melhor desempenho, pois, embora a função objetivo média não apresente valores melhores que os demais operadores, a probabilidade de calibração dos coeficientes de *Hazen-Williams* com erro inferior a 5% é maior quando se aplica esse operador. A recombinação heurística mostra uma altíssima velocidade de convergência da função objetivo, entretanto os estudos probabilísticos revelam que os outros métodos de recombinação avaliados calibram as rugosidades com maior exatidão. Diante disso verifica-se uma convergência prematura demonstrando que, para a utilização da recombinação heurística, é importante melhorar a diversidade da população evitando a geração de filhos iguais aos pais; aumentando a taxa de mutação ou utilizando outro operador de mutação. No caso da recombinação aritmética constatou-se que a função objetivo converge lentamente, em virtude da tendência de gerar filhos próximos ao centro do intervalo.

Nesse trabalho foi avaliado o benefício de se aplicar em cada iteração, um operador de recombinação escolhido aleatoriamente dentre os seis disponíveis no programa: média aritmética e geométrica, mistura, simples, aritmético e heurístico. Considerando os resultados apresentados no capítulo cinco, conclui-se que o emprego dessa metodologia melhora o desempenho do algoritmo de calibração, tendo em vista que a combinação de várias técnicas minimiza as limitações observadas nos métodos de recombinação quando utilizados isoladamente.

Para o processo de identificação das rugosidades absolutas constatou-se que, embora o sistema esteja calibrado, os resultados foram encontrados com erro relativo maior que na estimativa do coeficiente de *Hazen-Williams*. Este fato se explica pela grande dimensão do espaço de busca, e pela baixa sensibilidade da rugosidade absoluta, isto é, variações no valor desse parâmetro ocasionam oscilações de pressão em menores proporções. Sendo assim foi analisado o impacto do aumento da quantidade de indivíduos da população inicial, sobre a qualidade dos resultados alcançados.

O acréscimo da quantidade de indivíduos melhorou a diversidade da população inicial, refletindo em uma maior precisão da solução final, de forma que, os erros absolutos de pressão para calibração de rugosidades absolutas a partir de uma população de 1000 indivíduos são semelhantes àqueles obtidos na calibração dos coeficientes de *Hazen-Williams* a partir de uma população de 200 indivíduos. Conclui-se, portanto, que a calibração das rugosidades absolutas necessita de um maior tempo de processamento computacional, que pode ser minimizado reduzindo o espaço de busca, através da ampliação dos conhecimentos sobre os materiais das tubulações, tornando menor o intervalo compreendido entre as rugosidades mínima e máxima.

Como pode ser visto, o modelo de calibração proposto possibilitou um estudo aprofundado dos principais parâmetros e operadores aplicáveis ao método dos algoritmos genéticos. Dessa forma essa dissertação cumpriu seus objetivos contribuindo para o aprimoramento da técnica, apontando as vantagens e desvantagens de cada operador, bem como identificando questões que devem ser investigadas, abrindo a possibilidade para novas pesquisas.

No tocante à calibração, recomendam-se como trabalhos futuros: a análise de desempenho do CARTAG na determinação de rugosidades absolutas e coeficientes de *Hazen-Williams* de macro-sistemas de distribuição reais; a aplicação de vários cenários de demanda, incluindo aqueles que proporcionam maiores vazões nos tubos (hora e/ou dia de maior consumo), visando avaliar o efeito do aumento do número de *Reynolds* na qualidade dos

resultados obtidos; e o estudo da quantidade de pontos monitorados necessários para uma boa calibração.

O modelo desenvolvido nessa dissertação (CARTAG) possibilita ainda pesquisas complementares com vistas ao aperfeiçoamento dos algoritmos genéticos, onde se propõe um estudo comparativo das metodologias de cálculo da aptidão; e análise dos parâmetros adotados no algoritmo como: taxa de recombinação, taxa de mutação e o desvio padrão da mutação *Gaussiana* a fim de verificar a influência de cada um na precisão da solução final.

Por fim, recomenda-se a aplicação de um modelo híbrido utilizando os algoritmos genéticos como ponto de partida e outra técnica de otimização convencional para a parte final, visando poupar esforço computacional e refinar a solução final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR NETO, M. F. **Otimização de redes de distribuição de água por algoritmos genéticos**. Fortaleza. 194 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2003.
- AMARAL, P. S. **Otimização de redes de distribuição de água - análise e implementação da metodologia de Morgan**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 1998.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado à escoamento transiente**. São Carlos. 166 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- BAKER, J. E. Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. **Proceedings of the Second International Conference on Genetic algorithms and their application**, p. 14-21. Cambridge, Massachusetts, USA, 1987.
- BHAVE, P. R. Calibrating water distribution network models. **Journal of Environmental Engineering**, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb, 1988.
- BHAVE, P. R. **Analysis of flow in water distribution networks**. Technomic Publishing. Lancaster, Pennsylvania, United States of America, 1991.
- BOULOS, P. F.; 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 Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, Nov, 1990.
- CHENG, R.; GEN, M. Evolution program for resource constrained project scheduling problem. In: FOGEL, D. (ed.): **Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation**, IEEE Press, p. 736-741, Orlando, Florida, 1994.

- 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.
- CHEUNG, P. B.; SOUZA, R. S. Influência do zoneamento de uma rede hidráulica na acurácia de um modelo de calibração. 15 p. In: **21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. João Pessoa – PB, 2001.
- CROSS, H. **Analysis of flow in networks of conduits or conductors**. University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin, n. 286, Nov, 1936.
- DARWIN, C. **On the origin of species**. London, John Murray, 1859.
- DATTA, R. S. N., SRIDHARAN, K. Parameter estimation in water-distribution systems by least squares. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, v. 120, n. 4, p. 405-422, July/Aug, 1994.
- 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.
- FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBILOLO, A. Calibration of roughness in water distribution networks. In: MILLER, D. S. (ed.): **2nd International Conference on Water Pipeline Systems**, BHR Group Conference Series, p. 379-396, Edinburgh, Scotland, 1994.
- FORREST, S. **Documentation for prisoner dilemma and norms programs that use the genetic algorithm**. Technical report, University of Michigan, 1985.
- GALVÃO, C. O. *et al.* (1999). **Sistemas inteligentes – aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Porto Alegre, 1999.
- GAMBALE, S. R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de rede de água**. São Paulo. 266 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.
- GEN, M.; CHENG, R. **Genetic algorithms and engineering design**. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass, 1989.

- 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.
- LANSEY, K. E., BASNET, C. Parameter estimation for water distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, v. 117, n. 1, p. 126-144, Jan/Feb, 1991.
- LINGIREDDY, S.; ORMSBEE, L. E. Hydraulic network calibration using Genetic Optimization. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 19, n. 1, p. 13-39, 2002.
- MARTIN, D. W.; PETERS, G. The application of Newton's method to network analysis by digital computer. **Journal of Institute of Water Engineers**, v. 17, n. 2, p. 115-129, 1963.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**, Second Edition, Springer-Verlag, USA, 1994.
- MOODY, L. F. Friction factor for pipe flow. **ASME Transactions**, v. 66, p. 671, 1944.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The Computer Journal**, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965.
- ORMSBEE, L. E. Implicit network calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, n. 2, p. 243-257, Mar, 1989.
- ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J. Explicit pipe network calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 112, n. 2, p. 166-182, Apr, 1986.
- PEDRAZZI, J. A. **Manual de Hidráulica**. Faculdade de Engenharia de Sorocaba, São Paulo, 2003.
- 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**, v. 122, n. 3, p. 157-164, May/June, 1996.
- REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 6, p. 317-326, 1997.
- ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 users manual**. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.
- SALGADO, R.; TODINI, E.; O'CONNELL, P. E. Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks. **Proc. Inter. Symposium on Computer of Water Distribution Systems**, University of Kentucky, May, 1998.

- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 2, p. 67-77, Mar/Apr, 1997.
- SOARES, A. K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão**. São Carlos. 153 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- SOUZA, R. S. **Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente**. São Carlos. 236 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
- SWAMEE, P. K., JAIN, A. K. Explicit Equations for Pipe Flow Problems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 102, n. 5, p. 657-664, May, 1976.
- TODINI, E.; PILATI, S. A gradient method for the analysis of pipe networks. **International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution**, Leicester Polytechnic, UK, Sep, 1987.
- WALSKI, T. M. Technique for calibrating network models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 109, n. 4, p. 360-372, Oct, 1983a.
- WALSKI, T. M. Using water distribution system models. **Journal of American Water Works Association**, v. 75, n. 2, p. 58-63, Feb, 1983b.
- 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.
- WATER RESEARCH CENTRE. **Network analysis – A code for practice**. Published by WRC, Swindon, UK, 1989.
- WHITLEY, D. The genitor algorithm and selection pressure. In Schaffer, J. D., editor, **Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms**, p. 116-121. Phillips Laboratories, Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1989.
- WOOD, D. J.; CHARLES, C. O. A. Hydraulic network analysis using linear theory. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 98, n. HY7, p. 1157-1170, July, 1972.
- ZAHED FILHO, K. **Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água**. São Paulo. 135 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil, 1990.

APÊNDICE A – Arquivos de entrada e de resultados do CARTAG

A.1 Modelo do arquivo de texto no formato de importação para o EPANET

```

[TITLE]

[JUNCTIONS]
;ID          Elev          Demand          Pattern
10           0             0
20           0             0
30           0             0
40           0             0
50           0             0
60           0             0
70           0             0

[RESERVOIRS]
;ID          Head          Pattern
R1           60

[TANKS]
;ID          Elevation      InitLevel      MinLevel
              MaxLevel      Diameter       MinVol        VolCurve

[PIPES]
;ID  Node1  Node2  Length  Diameter  Roughness  MinorLoss  Status
1    R1     10     700     500       0          0          Open ;
2    10     20     1800    250       0          0          Open ;
3    10     30     1520    400       0          0          Open ;
4    10     60     1220    300       0          0          Open ;
5    60     70     600     300       0          0          Open ;
6    60     50     1220    200       0          0          Open ;
7    30     50     920     250       0          0          Open ;
8    30     20     300     150       0          0          Open ;
9    20     40     600     200       0          0          Open ;
10   40     50     1220    100       0          0          Open ;

[PUMPS]
;ID          Node1          Node2          Parameters

[VALVES]
;ID  Node1  Node2  Diameter  Type  Setting  MinorLoss

[TAGS]

[DEMANDS]
;Junction  Demand          Pattern          Category

[STATUS]
;ID          Status/Setting

[PATTERNS]
;ID          Multipliers

[CURVES]
;ID          X-Value      Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

```

Global Efficiency 75
 Global Price 0
 Demand Charge 0

[EMITTERS]
 ;Junction Coefficient

[QUALITY]
 ;Node InitQual

[SOURCES]
 ;Node Type Quality Pattern

[REACTIONS]
 ;Type Pipe/Tank Coefficient

[REACTIONS]
 Order Bulk 1
 Order Tank 1
 Order Wall 1
 Global Bulk 0
 Global Wall 0
 Limiting Potential 0
 Roughness Correlation 0

[MIXING]
 ;Tank Model

[TIMES]
 Duration 0
 Hydraulic Timestep 1:00
 Quality Timestep 0:05
 Pattern Timestep 2:00
 Pattern Start 0:00
 Report Timestep 1:00
 Report Start 0:00
 Start ClockTime 12 am
 Statistic None

[REPORT]
 Status No
 Summary No
 Page 0

[OPTIONS]
 Units LPS
 Headloss H-W
 Specific Gravity 1
 Viscosity 1
 Trials 40
 Accuracy 0.001
 Unbalanced Continue 10
 Pattern 1
 Demand Multiplier 1
 Emitter Exponent 0.5
 Quality None mg/L
 Diffusivity 1
 Tolerance 0.01

[COORDINATES]

```

;Node          X-Coord      Y-Coord
10             2844.24     6117.38
20             6726.86     4085.78
30             6455.98     6275.40
40             9142.21     4762.98
50             7313.77     8555.30
60             3972.91     8442.44
70             4785.55     9774.27
R1             -451.47     6139.95

[VERTICES]
;Link          X-Coord      Y-Coord

[LABELS]
;X-Coord       Y-Coord      Label & Anchor Node

[BACKDROP]
DIMENSIONS     0.00      0.00      10000.00    10000.00
UNITS          None
FILE
OFFSET        0.00      0.00

[END]

```

A.2 Modelo do arquivo de entrada dos cenários de demanda no CARTAG

```

; [DEMANDAS]

Nó      Cenario1  Cenario2
10      0         0
20      15        36
30      62.5     120
40      15        10
50      47.5     80
60      30        80
70      37.5     37.5

```

A.3 Modelo do arquivo de entrada das pressões observadas no CARTAG

```

; [PRESSÕES]

Nó      Cenario1  Cenario2
10      58.78    56.42
20      55.90    48.24
30      56.28    48.72
40      53.71    46.81
50      53.55    41.46
60      54.47    43.95
70      53.17    42.66

```

A.4 Exemplo de arquivo de resultados completo gerado pelo CARTAG

```

RUGOSIDADES CALCULADAS - SEMENTE 1:
Geração  Tubo 1  Tubo 2  Tubo 3  Tubo 4  Tubo 5  Tubo 6  Função Objetivo
  1      0.12   1.48   0.18   0.15   0.74   0.21   4.89665435791015
  2      0.12   1.48   0.18   0.15   0.74   0.21   4.89665435791015
  3      0.12   1.48   0.18   0.16   0.2    0.81   4.22084274291993
  4      0.12   1.48   0.18   0.16   0.2    0.81   4.22084274291993
  5      0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   1.48   3.24721710205078
  6      0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   1.48   3.24721710205078
  7      0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   1.48   3.24721710205078
  8      0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   0.57   2.88950759887696
  9      0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   0.57   2.88950759887696
 10     0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   0.57   2.71009857177735
 11     0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   0.57   2.71009857177735
 12     0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   0.57   2.71009857177735
 13     0.12   1.48   0.18   0.12   0.39   0.57   2.71009857177735
 14     0.12   1.48   0.18   0.12   0.65   0.66   2.63700897216798
 15     0.12   1.48   0.18   0.12   0.65   0.66   2.63700897216798
 16     0.12   1.48   0.15   0.12   1.49   1.48   2.37961486816407
 17     0.12   1.48   0.15   0.12   1.49   1.48   2.37961486816407
 18     0.12   1.48   0.15   0.12   1.49   1.48   2.37961486816407
 19     0.12   1.48   0.15   0.12   1.49   1.48   2.37961486816407
 20     0.12   1.48   0.18   0.12   1.47   0.57   2.22907287597657

```

A.5 Exemplo de arquivo de resultados resumido gerado pelo CARTAG

MÉDIA DAS RUGOSIDADES CALCULADAS PARA CADA SEMENTE:

```

Tubo      Rugosidade
  1        0.12
  2        1.48
  3        0.18
  4        0.12
  5        1.47
  6        0.57

```

Tempo de Processamento: 00:03:07

APÊNDICE B – Código fonte do programa CARTAG

B.1 Código Fonte do programa CARTAG

```

unit UnitPrincipal;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
  Forms,
  Dialogs, Menus, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, Spin, Math;

type
  TFormPrincipal = class(TForm)
    MenuPrincipal: TMainMenu;
    MenuArquivo: TMenuItem;
    EntradadeDados: TMenuItem;
    Separador: TMenuItem;
    Sair: TMenuItem;
    RedeDistribuicao: TMenuItem;
    CenariosDemandas: TMenuItem;
    PressoesObservadas: TMenuItem;
    CxDialogoAbrir: TOpenDialog;
    GroupBoxEntrada: TGroupBox;
    LabelPasta: TLabel;
    LabelArquivo: TLabel;
    LabelRede: TLabel;
    LabelDemanda: TLabel;
    LabelPressoes: TLabel;
    EditRedePasta: TEdit;
    EditRedeArquivo: TEdit;
    EditDemandaPasta: TEdit;
    EditDemandaArquivo: TEdit;
    EditPressoesPasta: TEdit;
    EditPressoesArquivo: TEdit;
    BotaoCalcular: TBitBtn;
    GroupBoxParametrosAG: TGroupBox;
    LabelPopulacao: TLabel;
    EditPopulacao: TEdit;
    GroupBoxParametrosH: TGroupBox;
    RadioGroupFormula: TRadioGroup;
    EditRugMinima: TEdit;
    EditRugMaxima: TEdit;
    LabelRugosidade: TLabel;
    Label_a: TLabel;
    LabelFObjetivo: TLabel;
    ComboBoxFObjetivo: TComboBox;
    LabelAptidao: TLabel;
    ComboBoxAptidao: TComboBox;
    EditApt1: TEdit;
    LabelApt1: TLabel;
    EditApt2: TEdit;
    LabelApt2: TLabel;
    SpinEditCasasDecimais: TSpinEdit;
    LabelCasasDecimais: TLabel;
    LabelSelecao: TLabel;
    ComboBoxSelecao: TComboBox;
    RadioGroupSubstituicao: TRadioGroup;
    CheckBoxElitismo: TCheckBox;
    Label_k: TLabel;
    Edit_k: TEdit;
    LabelFilhos: TLabel;
  end;

```

```

EditFilhos: TEdit;
GroupBoxCrossover: TGroupBox;
LabelCrossoverTipo: TLabel;
ComboBoxCrossover: TComboBox;
Label_n: TLabel;
Edit_n: TEdit;
LabelAlfa: TLabel;
EditAlfa: TEdit;
RadioGroupEspAmostrai: TRadioGroup;
LabelProbCross: TLabel;
EditProbCross: TEdit;
LabelPorcCross: TLabel;
GroupBoxMutacao: TGroupBox;
LabelMutacaoTipo: TLabel;
ComboBoxMutacao: TComboBox;
LabelProbMut: TLabel;
EditProbMut: TEdit;
LabelPorcMut: TLabel;
LabelB: TLabel;
EditB: TEdit;
GroupBoxParada: TGroupBox;
LabelPrecisao: TLabel;
EditPrecisao: TEdit;
LabelGeracoes: TLabel;
EditGeracoes: TEdit;
LabelTempo: TLabel;
EditTempo: TEdit;
BotaoSair: TBitBtn;
BotaoProcRede: TButton;
BotaoProcDemanda: TButton;
BotaoProcPressao: TButton;
GroupBoxResultados: TGroupBox;
LabelResultCompleto: TLabel;
EditResultCompleto: TEdit;
LabelExtCompleto: TLabel;
LabelResultResumido: TLabel;
EditResultResumido: TEdit;
Label2: TLabel;
LabelSementes: TLabel;
EditSementes: TEdit;
MenuAjuda: TMenuItem;
Sobre: TMenuItem;
procedure RedeDistribuicaoClick(Sender: TObject);
procedure CenariosDemandasClick(Sender: TObject);
procedure PressoesObservadasClick(Sender: TObject);
procedure BotaoCalcularClick(Sender: TObject);
procedure RadioGroupFormulaClick(Sender: TObject);
procedure ComboBoxAptidaoChange(Sender: TObject);
procedure RadioGroupSubstituicaoClick(Sender: TObject);
procedure CheckBoxElitismoClick(Sender: TObject);
procedure ComboBoxSelecaoChange(Sender: TObject);
procedure ComboBoxCrossoverChange(Sender: TObject);
procedure SairClick(Sender: TObject);
procedure ComboBoxMutacaoChange(Sender: TObject);
procedure RadioGroupEspAmostraiClick(Sender: TObject);
procedure BotaoSairClick(Sender: TObject);
procedure BotaoProcRedeClick(Sender: TObject);
procedure BotaoProcDemandaClick(Sender: TObject);
procedure BotaoProcPressaoClick(Sender: TObject);
procedure SobreClick(Sender: TObject);

```

```

private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  FormPrincipal: TFormPrincipal;
  T0, Tf, Duracao: TDateTime;
  NomeArquivoRede, NomeArquivoDemanda, NomeArquivoPressoes, Pasta, Arquivo,
  Arquivo2, Entrada, Saida, ResultadoCompleto, Resultado: AnsiString;
  Linha, Linha2, Espaco, Formula, TempoProc, Sem: String;
  ArquivoResult, ArquivoAberto2: TextFile;
  NPop, Sementes, s: Integer;
  j, QuantCenariosD, QuantCenariosP, TipoEAmostrai: Byte;
  i, k, l, m, n, Cont, QuantNosD, QuantNosP, QuantNos, QuantTubos,
  Intervalo, TipoFuncao, MetodoAptidao, TipoSubst, TipoSelecao, QuantFilhos,
  QuantGenes, QuantMut, NPart, TipoCross, TipoCrossAleatorio, TipoMut,
  TipoMutAleatorio, casas, g, NGeracoes, TaxaElit: Word;
  Minimo, Maximo, Parametro1, Parametro2, SomaPressoes, AptidaoSoma,
  FOmedia, FOdesvio, FOdesv, a, b, TotalParcial, incremento, ProbCross,
  ProbMut, Alfa, casa, decimal, ParamForma, Precisao, FOResultado, Aleat,
  Diametro: Real;
  Elitismo: Boolean;
  Indice, IndiceFO: Array[0..10000] of Integer;
  CenarioDemanda, CenarioPressoes: Array[0..50] of String;
  NoDemanda, NoPressoes, No, Tubo: Array[0..10000] of String;
  Demanda, Pressoes: Array[0..10000] of Array[0..50] of Real;
  PressoesCalc: Array[0..10000] of Array[0..50] of Single;
  Rugosidade: Array[0..10000] of Array[0..10000] of Real;
  FObjetivo: Array[0..10000] of Real;
  Ordem, Aptidao, Esperanca, FOPai, RugosidadeResultado, RugosidadeMedia:
  Array of Double;
  PaiInd: Array of Integer;
  RugosidadeOrdem, RugosidadePai, RugosidadeFilho: Array of Array of
  Double;
  Fracao: Array[0..50] of Double;

  implementation
    Uses epanet2, UnitBarraProgress, UnitSobre;
  {$R *.dfm}

  {PROCEDIMENTOS DE SAÍDA DO CARTAG}
  procedure TFormPrincipal.SairClick(Sender: TObject);
  begin
    Application.Terminate;
  end;

  procedure TFormPrincipal.BotaoSairClick(Sender: TObject);
  begin
    Application.Terminate;
  end;
  {-----//-----}

  {PROCEDIMENTO PARA VISUALIZAÇÃO DA JANELA DE INFORMAÇÕES SOBRE O CARTAG}
  procedure TFormPrincipal.SobreClick(Sender: TObject);
  begin
    FormSobre.ShowModal;
  end;
  {-----//-----}

```

```

{PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DO CAMINHO E NOME DOS ARQUIVOS DE ENTRADA}
procedure TFormPrincipal.BotaoProcRedeClick(Sender: TObject);
begin
  if CxDialogoAbrir.Execute then
    NomeArquivoRede := CxDialogoAbrir.FileName;
    EditRedePasta.Text := ExtractFilePath(NomeArquivoRede);
    EditRedeArquivo.Text := ExtractFileName(NomeArquivoRede);
end;

procedure TFormPrincipal.RedeDistribuicaoClick(Sender: TObject);
begin
  if CxDialogoAbrir.Execute then
    NomeArquivoRede := CxDialogoAbrir.FileName;
    EditRedePasta.Text := ExtractFilePath(NomeArquivoRede);
    EditRedeArquivo.Text := ExtractFileName(NomeArquivoRede);
end;

procedure TFormPrincipal.BotaoProcDemandaClick(Sender: TObject);
begin
  if CxDialogoAbrir.Execute then
    NomeArquivoDemanda := CxDialogoAbrir.FileName;
    EditDemandaPasta.Text := ExtractFilePath(NomeArquivoDemanda);
    EditDemandaArquivo.Text := ExtractFileName(NomeArquivoDemanda);
end;

procedure TFormPrincipal.CenariosDemandasClick(Sender: TObject);
begin
  if CxDialogoAbrir.Execute then
    NomeArquivoDemanda := CxDialogoAbrir.FileName;
    EditDemandaPasta.Text := ExtractFilePath(NomeArquivoDemanda);
    EditDemandaArquivo.Text := ExtractFileName(NomeArquivoDemanda);
end;

procedure TFormPrincipal.BotaoProcPressaoClick(Sender: TObject);
begin
  if CxDialogoAbrir.Execute then
    NomeArquivoPressoes := CxDialogoAbrir.FileName;
    EditPressoesPasta.Text := ExtractFilePath(NomeArquivoPressoes);
    EditPressoesArquivo.Text := ExtractFileName(NomeArquivoPressoes);
end;

procedure TFormPrincipal.PressoesObservadasClick(Sender: TObject);
begin
  if CxDialogoAbrir.Execute then
    NomeArquivoPressoes := CxDialogoAbrir.FileName;
    EditPressoesPasta.Text := ExtractFilePath(NomeArquivoPressoes);
    EditPressoesArquivo.Text := ExtractFileName(NomeArquivoPressoes);
end;
{-----//-----}

{PROCEDIMENTO DE ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS}
procedure TFormPrincipal.RadioGroupFormulaClick(Sender: TObject);
begin
  case RadioGroupFormula.ItemIndex of
    0:
      begin
        EditRugMinima.Text := '0.10';
        EditRugMaxima.Text := '1.50';
        SpinEditCasasDecimais.Value := 2;
      end;
  end;
end;

```

```

1:
  begin
    EditRugMinima.Text := '70';
    EditRugMaxima.Text := '150';
    SpinEditCasasDecimais.Value := 0;
  end;
end;
end;
{-----//-----}

{PROCEDIMENTOS DE ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS}
procedure TFormPrincipal.ComboBoxAptidaoChange(Sender: TObject);
begin
  case ComboBoxAptidao.ItemIndex of
    0:
      begin
        LabelApt1.Caption := 'Mínimo: ';
        LabelApt2.Caption := 'Máximo: ';
        EditApt1.Text := '0';
        EditApt2.Text := '2';
        EditApt1.Enabled := True;
        EditApt2.Enabled := True;
        EditApt1.Color := clWindow;
        EditApt2.Color := clWindow;
      end;
    1:
      begin
        LabelApt1.Caption := '0 < q < 1: ';
        LabelApt2.Caption := '';
        EditApt1.Text := '0.5';
        EditApt2.Text := '';
        EditApt1.Enabled := True;
        EditApt2.Enabled := False;
        EditApt1.Color := clWindow;
        EditApt2.Color := cl3DLight;
      end;
    2:
      begin
        LabelApt1.Caption := 'Mínimo: ';
        LabelApt2.Caption := 'Máximo: ';
        EditApt1.Text := '0';
        EditApt2.Text := '2';
        EditApt1.Enabled := True;
        EditApt2.Enabled := True;
        EditApt1.Color := clWindow;
        EditApt2.Color := clWindow;
      end;
    3:
      begin
        LabelApt1.Caption := 'Parâmetro C: ';
        LabelApt2.Caption := '';
        EditApt1.Text := '1';
        EditApt2.Text := '';
        EditApt1.Enabled := True;
        EditApt2.Enabled := False;
        EditApt1.Color := clWindow;
        EditApt2.Color := cl3DLight;
      end;
  end;
end;

```

```

4:
begin
  LabelApt1.Caption := '1.2 < C < 2: ';
  LabelApt2.Caption := 'Expoente alfa: ';
  EditApt1.Text := '2';
  EditApt2.Text := '1.005';
  EditApt1.Enabled := True;
  EditApt2.Enabled := True;
  EditApt1.Color := clWindow;
  EditApt2.Color := clWindow;
end;
5:
begin
  LabelApt1.Caption := 'Parâmetro b: ';
  LabelApt2.Caption := '';
  EditApt1.Text := '10';
  EditApt2.Text := '';
  EditApt1.Enabled := True;
  EditApt2.Enabled := False;
  EditApt1.Color := clWindow;
  EditApt2.Color := cl3DLight;
end;
6:
begin
  LabelApt1.Caption := '0 < gama < 1: ';
  LabelApt2.Caption := '';
  EditApt1.Text := '1';
  EditApt2.Text := '';
  EditApt1.Enabled := True;
  EditApt2.Enabled := False;
  EditApt1.Color := clWindow;
  EditApt2.Color := cl3DLight;
end;
7:
begin
  LabelApt1.Caption := 'Parâmetro T: ';
  LabelApt2.Caption := '';
  EditApt1.Text := '2';
  EditApt2.Text := '';
  EditApt1.Enabled := True;
  EditApt2.Enabled := False;
  EditApt1.Color := clWindow;
  EditApt2.Color := cl3DLight;
end;
end;
end;

procedure TFormPrincipal.RadioGroupSubstituicaoClick(Sender: TObject);
begin
  case RadioGroupSubstituicao.ItemIndex of
    0:
      begin
        RadioGroupEspAmostrado.ItemIndex := 0;
        RadioGroupEspAmostrado.Enabled := True;
        CheckBoxElitismo.Checked := True;
        CheckBoxElitismo.Enabled := True;
        Label_k.Enabled := True;
        Edit_k.Enabled := True;
        Edit_k.Text := '1';
        Edit_k.Color := clWindow;
        LabelFilhos.Enabled := False;

```

```

    EditFilhos.Enabled := False;
    EditPopulacao.Text := '100';
    EditFilhos.Text := '';
    EditFilhos.Color := cl3DLight;
end;
1:
begin
    RadioGroupEspAmostrAl.ItemIndex := -1;
    RadioGroupEspAmostrAl.Enabled := False;
    CheckBoxElitismo.Checked := False;
    CheckBoxElitismo.Enabled := False;
    Label_k.Enabled := False;
    Edit_k.Enabled := False;
    Edit_k.Text := '';
    Edit_k.Color := cl3DLight;
    LabelFilhos.Enabled := True;
    EditFilhos.Enabled := True;
    EditPopulacao.Text := '200';
    EditFilhos.Text := '100';
    EditFilhos.Color := clWindow;
end;
end;
end;

procedure TFormPrincipal.RadioGroupEspAmostrAlClick(Sender: TObject);
begin
    case RadioGroupEspAmostrAl.ItemIndex of
        0:
            begin
                CheckBoxElitismo.Checked := True;
                CheckBoxElitismo.Enabled := True;
                Label_k.Enabled := True;
                Edit_k.Enabled := True;
                Edit_k.Text := '1';
                Edit_k.Color := clWindow;
                LabelFilhos.Enabled := False;
                EditFilhos.Enabled := False;
                EditFilhos.Text := '';
                EditFilhos.Color := cl3DLight;
            end;
        1:
            begin
                CheckBoxElitismo.Checked := False;
                CheckBoxElitismo.Enabled := False;
                Label_k.Enabled := False;
                Edit_k.Enabled := False;
                Edit_k.Text := '';
                Edit_k.Color := cl3DLight;
                LabelFilhos.Enabled := True;
                EditFilhos.Enabled := True;
                EditFilhos.Text := EditPopulacao.Text;
                EditFilhos.Color := clWindow;
            end;
    end;
end;
end;

```

```

procedure TFormPrincipal.CheckBoxElitismoClick(Sender: TObject);
begin
  if CheckBoxElitismo.Checked then
  begin
    Label_k.Enabled := True;
    Edit_k.Enabled := True;
    Edit_k.Text := '1';
    Edit_k.Color := clWindow;
  end
  else
  begin
    Label_k.Enabled := False;
    Edit_k.Enabled := False;
    Edit_k.Text := '';
    Edit_k.Color := cl3DLight;
  end;
end;

procedure TFormPrincipal.ComboBoxSelecaoChange(Sender: TObject);
begin
  case ComboBoxSelecao.ItemIndex of
    0:
    begin
      Label_n.Enabled := True;
      Edit_n.Enabled := True;
      Edit_n.Text := '3';
      Edit_n.Color := clWindow;
      LabelAptidao.Enabled := False;
      ComboBoxAptidao.Enabled := False;
      LabelApt1.Enabled := False;
      LabelApt2.Enabled := False;
      EditApt1.Enabled := False;
      EditApt2.Enabled := False;
      EditApt1.Text := '';
      EditApt2.Text := '';
      EditApt1.Color := cl3DLight;
      EditApt2.Color := cl3DLight;
    end;
  else
  begin
    Label_n.Enabled := False;
    Edit_n.Enabled := False;
    Edit_n.Text := '';
    Edit_n.Color := cl3DLight;
    LabelAptidao.Enabled := True;
    ComboBoxAptidao.Enabled := True;
    LabelApt1.Enabled := True;
    LabelApt2.Enabled := True;
    EditApt1.Enabled := True;
    EditApt2.Enabled := True;
    EditApt1.Text := '0';
    EditApt2.Text := '2';
    EditApt1.Color := clWindow;
    EditApt2.Color := clWindow;
  end;
end;
end;

```

```
procedure TFormPrincipal.ComboBoxCrossoverChange(Sender: TObject);
begin
  case ComboBoxCrossover.ItemIndex of
    0:
      begin
        LabelAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Text := '';
        EditAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Color := cl3DLight;
      end;
    1:
      begin
        LabelAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Text := '';
        EditAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Color := cl3DLight;
      end;
    2:
      begin
        LabelAlfa.Enabled := True;
        EditAlfa.Enabled := True;
        EditAlfa.Color := clWindow;
        EditAlfa.Text := '0.5';
      end;
    3:
      begin
        LabelAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Text := '';
        EditAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Color := cl3DLight;
      end;
    4:
      begin
        LabelAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Text := '';
        EditAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Color := cl3DLight;
      end;
    5:
      begin
        LabelAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Text := '';
        EditAlfa.Enabled := False;
        EditAlfa.Color := cl3DLight;
      end;
    6:
      begin
        LabelAlfa.Enabled := True;
        EditAlfa.Enabled := True;
        EditAlfa.Color := clWindow;
        EditAlfa.Text := '0.5';
      end;
  end;
end;
end;
```

```

procedure TFormPrincipal.ComboBoxMutacaoChange(Sender: TObject);
begin
  case ComboBoxMutacao.ItemIndex of
    0:
      begin
        LabelB.Enabled := False;
        EditB.Text := '';
        EditB.Enabled := False;
        EditB.Color := cl3DLight;
      end;
    1:
      begin
        LabelB.Caption := 'Desvio Padrão: ';
        LabelB.Enabled := True;
        EditB.Text := '2';
        EditB.Enabled := True;
        EditB.Color := clWindow;
      end;
    2:
      begin
        LabelB.Enabled := False;
        EditB.Text := '';
        EditB.Enabled := False;
        EditB.Color := cl3DLight;
      end;
    3:
      begin
        LabelB.Caption := 'Expoente: ';
        LabelB.Enabled := True;
        EditB.Text := '6';
        EditB.Enabled := True;
        EditB.Color := clWindow;
      end;
    4:
      begin
        LabelB.Caption := 'Expoente: ';
        LabelB.Enabled := True;
        EditB.Text := '6';
        EditB.Enabled := True;
        EditB.Color := clWindow;
      end;
  end;
end;
{-----//-----}

{ENTRADA DE DADOS DO CARTAG}
procedure EntradaDados(ArqRede, ArqDemandas, ArqPressoes: AnsiString);
var
  Dados, Texto, Linha, LinhaNova, Espaco, Cota, No1, No2, Comprimento,
  Diametro: String;
  Posicao, Cont_j: Byte;
  ArquivoAberto, ArquivoAberto2: TextFile;
  Cont_i, Cont_n: Word;
begin
  if FileExists(ArqDemandas) then
    begin
      AssignFile(ArquivoAberto, ArqDemandas);
      Reset(ArquivoAberto);
      Readln(ArquivoAberto, Dados);
      Dados := Trim(Dados);
    end;
  end;
end;

```

```

Posicao := Pos(';', Dados);
while (Posicao = 1) or (CompareStr(Dados, '') = 0) do
begin
  Readln(ArquivoAberto, Dados);
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(';', Dados);
end;
Posicao := Pos(' ', Dados);
Texto := Trim(Copy(Dados, 1, Posicao));
Delete(Dados, 1, Posicao);
j := 1;
Dados := Trim(Dados);
Posicao := Pos(' ', Dados);
while Posicao <> 0 do
begin
  CenarioDemanda[j] := Trim(Copy(Dados, 1, Posicao));
  Delete(Dados, 1, Posicao);
  j := j + 1;
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
end;
QuantCenariosD := j;
CenarioDemanda[j] := Trim(Dados);
i := 1;
Readln(ArquivoAberto, Dados);
Dados := Trim(Dados);
Posicao := Pos(' ', Dados);
while Dados <> '' do
begin
  NoDemanda[i] := Trim(Copy(Dados, 1, Posicao));
  Delete(Dados, 1, Posicao);
  j := 1;
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
  while Posicao <> 0 do
begin
  Demanda[i,j] := StrToFloat(Copy(Dados, 1, Posicao));
  Delete(Dados, 1, Posicao);
  j := j + 1;
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
end;
  Demanda[i,j] := StrToFloat(Dados);
  Readln(ArquivoAberto, Dados);
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
  i := i + 1;
end;
  CloseFile(ArquivoAberto);
  QuantNosD := i - 1;
end
else
  MessageDlg('Arquivo de Cenários de Demanda não Localizado. Tente
Novamente!', mtError, [mbOk], 0);

if FileExists(ArqPressoes) then
begin
  SomaPressoes := 0;
  AssignFile(ArquivoAberto, ArqPressoes);
  Reset(ArquivoAberto);
  Readln(ArquivoAberto, Dados);

```

```

Dados := Trim(Dados);
Posicao := Pos(';', Dados);
while (Posicao = 1) or (CompareStr(Dados, '') = 0) do
begin
  Readln(ArquivoAberto, Dados);
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(';', Dados);
end;
Posicao := Pos(' ', Dados);
Texto := Trim(Copy(Dados, 1, Posicao));
Delete(Dados, 1, Posicao);
j := 1;
Dados := Trim(Dados);
Posicao := Pos(' ', Dados);
while Posicao <> 0 do
begin
  CenarioPressoes[j] := Trim(Copy(Dados, 1, Posicao));
  Delete(Dados, 1, Posicao);
  j := j + 1;
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
end;
QuantCenariosP := j;
CenarioPressoes[j] := Trim(Dados);
i := 1;
Readln(ArquivoAberto, Dados);
Dados := Trim(Dados);
Posicao := Pos(' ', Dados);
while Dados <> '' do
begin
  NoPressoes[i] := Trim(Copy(Dados, 1, Posicao));
  Delete(Dados, 1, Posicao);
  j := 1;
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
  while Posicao <> 0 do
begin
  Pressoes[i,j] := StrToFloat(Copy(Dados, 1, Posicao));
  Delete(Dados, 1, Posicao);
  j := j + 1;
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
end;
  Pressoes[i,j] := StrToFloat(Dados);
  Readln(ArquivoAberto, Dados);
  i := i + 1;
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
end;
CloseFile(ArquivoAberto);
QuantNosP := i - 1;
end
else
  MessageDlg('Arquivo de Pressões não Localizado. Tente
Novamente!', mtError, [mbOk], 0);

if FileExists(ArqRede) then
begin
  AssignFile(ArquivoAberto, ArqRede);
  Reset(ArquivoAberto);
  Readln(ArquivoAberto, Linha);

```

```

Linha := Trim(Linha);
while CompareStr(Linha, '[JUNCTIONS]') <> 0 do
begin
  Readln(ArquivoAberto, Linha);
  Linha := Trim(Linha);
end;
Readln(ArquivoAberto, Linha);
Linha := Trim(Linha);
Posicao := Pos(';', Linha);
while (Posicao = 1) or (CompareStr(Dados, '') = 0) do
begin
  Readln(ArquivoAberto, Linha);
  Linha := Trim(Linha);
  Posicao := Pos(';', Linha);
  Dados := Trim(Copy(Linha, 1, Posicao));
end;
Posicao := Pos(' ', Linha);
l := 1;
Pasta := ExtractFilePath(ArqRede);
for Cont_j := 1 to QuantCenariosP do
for Cont_n := 1 to NPop do
begin
  Arquivo := Pasta + 'Cen' + CenarioDemanda[Cont_j] + 'Rug' +
IntToStr(Cont_n) + '.prn';
  AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo);
  Rewrite(ArquivoAberto2);
  Writeln(ArquivoAberto2, '[TITLE]');
  Writeln(ArquivoAberto2, '[JUNCTIONS]');
  Writeln(ArquivoAberto2, ';ID      Elev      Demand      Pattern');
  CloseFile(ArquivoAberto2);
end;
  while (CompareStr(Linha, '') <> 0) and (CompareStr(Linha,
'[RESERVOIRS]') <> 0) and (CompareStr(Linha, '[TANKS]') <> 0) and
(CompareStr(Linha, '[PIPES]') <> 0) do
begin
  No[l] := Trim(Copy(Linha, 1, Posicao));
  Dados := Linha;
  Delete(Dados, 1, Posicao);
  Dados := Trim(Dados);
  Posicao := Pos(' ', Dados);
  Espaco := StringOfChar(' ', 4);
  Cota := Trim(Copy(Dados, 1, Posicao));
  Cont_i := 1;
  while (CompareStr(No[l], NoDemanda[Cont_i]) <> 0) and (Cont_i <=
QuantNosD) do
    Cont_i := Cont_i + 1;
  for Cont_j := 1 to QuantCenariosP do
  for Cont_n := 1 to NPop do
  begin
    if Cont_i <= QuantNosD then
      LinhaNova := No[l] + Espaco + Cota + Espaco +
FloatToStrF(Demanda[Cont_i, Cont_j], ffFixed, 18, 8) + Espaco + ';';
    else
      LinhaNova := No[l] + Espaco + Cota + Espaco + ';';
    Arquivo := Pasta + 'Cen' + CenarioDemanda[Cont_j] + 'Rug' +
IntToStr(Cont_n) + '.prn';
    AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo);
    Append(ArquivoAberto2);
    Writeln(ArquivoAberto2, LinhaNova);
    CloseFile(ArquivoAberto2);
  end;
end;

```



```

Dados := Trim(Dados);
Posicao := Pos(' ', Dados);
Delete(Dados, 1, Posicao);
Dados := Trim(Dados);
if Cont_n <= NPop/2 then
  Rugosidade[Cont_n, m] := (Random(Intervalo) + Minimo)/decimal
else
  Rugosidade[Cont_n, m] := Maximo/decimal - Rugosidade[Cont_n-
Trunc(NPop/2), m] + Minimo/decimal;

  for Cont_j := 1 to QuantCenariosP do
    begin
      LinhaNova := Tubo[m] + Espaco + No1 + Espaco + No2 + Espaco
+ Comprimento + Espaco + Diametro + Espaco + FloatToStrF(Rugosidade[Cont_n,
m], ffFixed, 8, casas) + Espaco + Dados;
      Arquivo := Pasta + 'Cen' + CenarioDemanda[Cont_j] + 'Rug' +
IntToStr(Cont_n) + '.prn';
      AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo);
      Append(ArquivoAberto2);
      Writeln(ArquivoAberto2, LinhaNova);
      CloseFile(ArquivoAberto2);
    end;
  end;
  Readln(ArquivoAberto, Linha);
  Linha := Trim(Linha);
  Posicao := Pos(' ', Linha);
  m := m + 1;
end;
QuantTubos := m - 1;
Posicao := Pos('Headloss', Linha);

while Posicao <> 1 do
begin
  for Cont_j := 1 to QuantCenariosP do
  for Cont_n := 1 to NPop do
  begin
    Arquivo := Pasta + 'Cen' + CenarioDemanda[Cont_j] + 'Rug' +
IntToStr(Cont_n) + '.prn';
    AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo);
    Append(ArquivoAberto2);
    Writeln(ArquivoAberto2, Linha);
    CloseFile(ArquivoAberto2);
  end;
  Readln(ArquivoAberto, Linha);
  Linha := Trim(Linha);
  Posicao := Pos('Headloss', Linha);
end;

for Cont_j := 1 to QuantCenariosP do
for Cont_n := 1 to NPop do
begin
  Arquivo := Pasta + 'Cen' + CenarioDemanda[Cont_j] + 'Rug' +
IntToStr(Cont_n) + '.prn';
  AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo);
  Append(ArquivoAberto2);
  Writeln(ArquivoAberto2, Formula);
  CloseFile(ArquivoAberto2);
end;
Readln(ArquivoAberto, Linha);
Linha := Trim(Linha);

```

```

while CompareStr(Linha, '[END]') <> 0 do
begin
  for Cont_j := 1 to QuantCenariosP do
  for Cont_n := 1 to NPop do
  begin
    Arquivo := Pasta + 'Cen' + CenarioDemanda[Cont_j] + 'Rug' +
IntToStr(Cont_n) + '.prn';
    AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo);
    Append(ArquivoAberto2);
    Writeln(ArquivoAberto2, Linha);
    CloseFile(ArquivoAberto2);
  end;
  Readln(ArquivoAberto, Linha);
  Linha := Trim(Linha);
end;
for Cont_j := 1 to QuantCenariosP do
for Cont_n := 1 to NPop do
begin
  Arquivo := Pasta + 'Cen' + CenarioDemanda[Cont_j] + 'Rug' +
IntToStr(Cont_n) + '.prn';
  AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo);
  Append(ArquivoAberto2);
  Writeln(ArquivoAberto2, Linha);
  CloseFile(ArquivoAberto2);
end;
CloseFile(ArquivoAberto);
end
else
  MessageDlg('Arquivo de Rede de Distribuição não Localizado. Tente
Novamente!', mtError, [mbOk], 0);

end;
{-----//-----}

{CÁLCULO DA FUNÇÃO OBJETIVO}
function FuncaoObjetivo(x, y: Real; Tipo: Integer): Real;
begin
  case Tipo of
    0: FuncaoObjetivo := Abs(x - y);
    1: FuncaoObjetivo := Abs(x - y)/x*100;
  end;
end;
{-----//-----}

{CÁLCULO DA APTIDÃO}
procedure CalculoAptidao(m, Pop, ind: Integer; P1, P2: Real);
var
  cont: Integer;
  divisor: Real;
begin
  case m of
    0: Aptidao[ind] := P1+(P2-P1)*(Pop-ind)/Pop;
    1: Aptidao[ind] := P1*Power((1-P1), ind);
    2:
      begin
        if Ordem[0] <> Ordem[Pop] then
          begin
            a := (P2-P1)/(Ordem[0]-Ordem[Pop]);
            b := -(P2-P1)*Ordem[Pop]/(Ordem[0]-Ordem[Pop])+P1;
            Aptidao[ind] := a*Ordem[ind]+b;
          end
        end
      end
end

```



```

    for ContIni := n+1 to ContFim do
    begin
        FObjetivo[ContIni] := Ordem[ContIni-n-1];
        IndiceFO[ContIni] := ContIni;
        for k := 0 to m-1 do
            Rugosidade[ContIni, k+1] := RugosidadeOrdem[ContIni-n-1, k];
        end;
    end;
    1:
    begin
        ContFim := NPop + n;
        for ContIni := NPop+1 to ContFim do
        begin
            FObjetivo[ContIni] := Ordem[ContIni-NPop-1];
            IndiceFO[ContIni] := ContIni;
            for k := 0 to m-1 do
                Rugosidade[ContIni, k+1] := RugosidadeOrdem[ContIni-NPop-1,
k];
            end;
        end;
    end;
    end;
else
    begin
        ContFim := NPop;
        for ContIni := n + 1 to ContFim do
        begin
            FObjetivo[ContIni] := Ordem[ContIni-1-n];
            IndiceFO[ContIni] := ContIni;
            for k := 0 to m-1 do
                Rugosidade[ContIni, k+1] := RugosidadeOrdem[ContIni-1-n, k];
            end;
        end;
    end;
SetLength(Ordem, ContFim);
SetLength(RugosidadeOrdem, ContFim, m);
for i := 0 to ContFim-1 do
for j := i+1 to ContFim do
begin
    if (i+1) = j then
    begin
        Ordem[i] := FObjetivo[j];
        Indice[i] := IndiceFO[j];
    end
    else
    begin
        if Ordem[i] > FObjetivo[j] then
        begin
            Memoria := Ordem[i];
            MemoriaID := Indice[i];
            Ordem[i] := FObjetivo[j];
            Indice[i] := IndiceFO[j];
            FObjetivo[j] := Memoria;
            IndiceFO[j] := MemoriaID;
        end;
    end;
end;
for i := 0 to ContFim-1 do
begin
    if TipoSelecao > 0 then
        CalculoAptidao(Metodo, ContFim-1, i, Parametro1, Parametro2);

```

```

Arquivo2 := Resultado;
AssignFile(ArquivoAberto2, Arquivo2);
if (g = 1) and (i = 0) then
begin
  Linha := 'Geração' + Espaco;
  for k := 0 to m-1 do
    Linha := Linha + 'Tubo ' + IntToStr(k+1) + Espaco;
  Linha := Linha + 'Função Objetivo';
  Rewrite(ArquivoAberto2);
  Writeln(ArquivoAberto2, 'RUGOSIDADES CALCULADAS - SEMENTE ' +
IntToStr(s));
  Writeln(ArquivoAberto2, Linha);
  CloseFile(ArquivoAberto2);
end;
Linha := '';
for k := 0 to m-1 do
begin
  RugosidadeOrdem[i, k] := Rugosidade[Indice[i], k+1];
  Linha := Linha + FloatToStr(RugosidadeOrdem[i, k]) + Espaco;
end;
Linha := Linha + FloatToStr(Ordem[i]);
if i = 0 then
begin
  Append(ArquivoAberto2);
  Writeln(ArquivoAberto2, IntToStr(g) + Espaco + Linha);
  CloseFile(ArquivoAberto2);
end;
end;
if TipoSelecao > 0 then
begin
  FOMedia := Mean(Ordem);
  FODesvio := PopnStdDev(Ordem);
  AptidaoSoma := Sum(Aptidao);
end;
end;
{-----//-----}

{PROCEDIMENTOS PARA SELEÇÃO DE INDIVÍDUOS}
procedure Torneio(ind, n, max: Word); {TORNEIO}
var
  i, j, l, Cont: Word;
begin
  l := max;
  for i := 1 to n do
  begin
    j := RandomRange(0, max);
    if l > j then
      l := j;
  end;
  FOPai[ind] := Ordem[l];
  Linha := '';
  for Cont := 0 to QuantTubos-1 do
    RugosidadePai[ind, Cont] := RugosidadeOrdem[l, Cont];
  end;

procedure RodaRoleta(ind: Word); {RODA DA ROLETA}
var
  i, Cont: Word;
Aleatorio, TotalParcial: Real;
begin
  Aleatorio := Random * AptidaoSoma;

```

```

TotalParcial := 0;
i := 0;
while TotalParcial < Aleatorio do
begin
  TotalParcial := TotalParcial + Aptidao[i];
  i := i + 1;
end;
FOPai[ind] := Ordem[i-1];
for Cont := 0 to QuantTubos-1 do
  RugosidadePai[ind, Cont] := RugosidadeOrdem[i-1, Cont];
end;

procedure SUS(ind: Word); {AMOSTRAGEM ESTOCÁTICA UNIVERSAL}
var
Cont: Word;
begin
  if ind = 0 then
  begin
    TotalParcial := 0;
    j := 0;
    incremento := AptidaoSoma / NPop;
    Aleat := Random * incremento;
  end
  else
    Aleat := Aleat + incremento;
  while TotalParcial < Aleat do
  begin
    TotalParcial := TotalParcial + Aptidao[j];
    j := j + 1;
  end;
  FOPai[ind] := Ordem[j-1];
  for Cont := 0 to QuantTubos-1 do
    RugosidadePai[ind, Cont] := RugosidadeOrdem[j-1, Cont];
  end;

procedure ADeterministica(ind: Word); {AMOSTRAGEM DETERMINÍSTICA}
var
Subst: Word;
SubstF: Real;
begin
  if ind = 0 then
  begin
    j := 0;
    k := 0;
    Esperanca[ind] := Aptidao[ind] / AptidaoSoma * NPop;
    l := Trunc(Esperanca[ind]);
  end
  else
  begin
    Esperanca[ind] := Aptidao[ind] / AptidaoSoma * NPop;
    l := l + Trunc(Esperanca[ind]);
  end;
  if (Trunc(Esperanca[ind])=0) then
  begin
    if (Trunc(Esperanca[ind-1])<>0) then
      k := 0;
      l := l+1;
    end;
  while (j < l) and (j < QuantFilhos) do
  begin
    Fracao[j] := Frac(Esperanca[ind]);

```

```

    PaiInd[j] := k;
    m := j;
    while (m > 0) and (Trunc(Esperanca[ind])<>0) do
    begin
        if Fracao[m] > Fracao[m-1] then
        begin
            SubstF := Fracao[m];
            Fracao[m] := Fracao[m-1];
            Fracao[m-1] := SubstF;
            Subst := PaiInd[m];
            PaiInd[m] := PaiInd[m-1];
            PaiInd[m-1] := Subst;
        end;
        m := m - 1;
    end;
    j := j+1;
end;
k := k+1;
end;

procedure RSS(ind: Word); {REMAINDER STOCHASTIC SAMPLING}
var
    Cont, Subst: Word;
    Aleatorio, SomaFrac: Real;
begin
    if ind = 0 then
    begin
        j := 0;
        k := 0;
        Esperanca[ind] := Aptidao[ind] / AptidaoSoma * NPop;
        l := Trunc(Esperanca[ind]);
        Fracao[ind] := Frac(Esperanca[ind]);
    end
    else
    begin
        Esperanca[ind] := Aptidao[ind] / AptidaoSoma * NPop;
        l := l + Trunc(Esperanca[ind]);
        Fracao[ind] := Frac(Esperanca[ind]);
    end;
    while (j < l) and (j < QuantFilhos) do
    begin
        PaiInd[j] := k;
        j := j+1;
    end;
    while (ind = QuantFilhos-1) and (j < QuantFilhos) do
    begin
        SomaFrac := sum(Fracao);
        Aleatorio := Random;
        k := 0;
        TotalParcial := 0;
        while TotalParcial < Aleatorio do
        begin
            TotalParcial := TotalParcial + Fracao[k]/SomaFrac;
            k := k + 1;
        end;
        PaiInd[j] := k-1;
        j := j + 1;
    end;
    k := k+1;
end;
{-----//-----}

```



```

begin
    RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2] +
Beta*(RugosidadePai[Cont1+1, Cont2] - RugosidadePai[Cont1, Cont2]);
    if RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] <= 0 then
        RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := 1/decimal;
        RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1+1,
Cont2] + Beta*(RugosidadePai[Cont1, Cont2] - RugosidadePai[Cont1+1,
Cont2]);
        if RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] <= 0 then
            RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := 1/decimal;
        end;
    end
else
    for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
        begin
            RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2];
            RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1+1,
Cont2];
        end;
        Cont1 := Cont1 + 2;
    end;
end;
3: {SIMPLES}
begin
    Cont1 := 0;
    while Cont1 < QuantFilhos-1 do
        begin
            Aleatorio := Random;
            if (Aleatorio <= ProbCross) and (FOPai[Cont1] <> FOPai[Cont1+1])
then
                begin
                    PontoCross := Random(QuantTubos-1);
                    for Cont2 := 0 to PontoCross do
                        begin
                            RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2];
                            RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1+1,
Cont2];
                        end;
                    for Cont2 := PontoCross+1 to QuantTubos-1 do
                        begin
                            RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1+1, Cont2];
                            RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2];
                        end;
                    end
                else
                    for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
                        begin
                            RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2];
                            RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1+1,
Cont2];
                        end;
                    Cont1 := Cont1 + 2;
                end;
            end;
end;
4: {ARITMÉTICO}
begin
    Cont1 := 0;
    while Cont1 < QuantFilhos-1 do
        begin
            Aleatorio := Random;

```

```

    if (Aleatorio <= ProbCross) and (FOPai[Cont1] <> FOPai[Cont1+1])
then
    begin
        Beta := Random;
        for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
        begin
            RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := Beta * RugosidadePai[Cont1,
Cont2] + (1-Beta) * RugosidadePai[Cont1+1, Cont2];
            RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := Beta *
RugosidadePai[Cont1+1, Cont2] + (1-Beta) * RugosidadePai[Cont1, Cont2];
        end;
    end
else
    for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
    begin
        RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2];
        RugosidadeFilho[Cont1+1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1+1,
Cont2];
    end;
    Cont1 := Cont1 + 2;
end;
end;
5: {HEURÍSTICO}
begin
    for Cont1 := 0 to QuantFilhos-1 do
    begin
        Aleatorio := Random;
        if (Aleatorio <= ProbCross) and (FOPai[Cont1] <> FOPai[Cont1+1])
then
        begin
            Beta := Random;
            if (FOPai[Cont1] < FOPai[Cont1+1]) and (Cont1 < QuantFilhos-1)
then
                for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
                begin
                    RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2]
+ Beta * (RugosidadePai[Cont1, Cont2] - RugosidadePai[Cont1+1, Cont2]);
                    if RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] <= 0 then
                        RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := 1/decimal;
                    end;
                end
            if (FOPai[Cont1] > FOPai[Cont1+1]) and (Cont1 < QuantFilhos-1)
then
                for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
                begin
                    RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1+1,
Cont2] + Beta * (RugosidadePai[Cont1+1, Cont2] - RugosidadePai[Cont1,
Cont2]);
                    if RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] <= 0 then
                        RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := 1/decimal;
                    end;
                end
            if (FOPai[Cont1] < FOPai[0]) and (Cont1 = QuantFilhos-1) then
                for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
                begin
                    RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadePai[Cont1, Cont2]
+ Beta * (RugosidadePai[Cont1, Cont2] - RugosidadePai[0, Cont2]);
                    if RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] <= 0 then
                        RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := 1/decimal;
                    end;
                end
            if (FOPai[Cont1] > FOPai[0]) and (Cont1 = QuantFilhos-1) then
                for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
                begin

```



```

3: {NÃO-UNIFORME}
begin
  AleatorioDist := Random;
  Distribuicao := Power(AleatorioDist*(1-(g/NGeracoes)), ParamForma);
  for Cont := 1 to QuantMut do
  begin
    Posicao := Random(QuantGenes-1);
    Cont1 := (Posicao div QuantTubos);
    Cont2 := (Posicao mod QuantTubos);
    Aleatorio := Random;
    if Aleatorio < 0.5 then
      RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] +
(Maximo/decimal-RugosidadeFilho[Cont1, Cont2])*Distribuicao
    else
      RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] -
(RugosidadeFilho[Cont1, Cont2]-Minimo/decimal)*Distribuicao;
      if RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] <= 0 then
        RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := 1/decimal;
      end;
    end;
  end;
4: {NÃO-UNIFORME MÚLTIPLA}
begin
  if QuantMut = 0 then
  begin
    AleatorioTeste := Random;
    if AleatorioTeste <= QuantFilhos*ProbMut then
    begin
      AleatorioDist := Random;
      Distribuicao := Power(AleatorioDist*(1-(g/NGeracoes)),
ParamForma);
      Cont1 := Random(QuantFilhos-1);
      for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
      begin
        Aleatorio := Random;
        if Aleatorio < 0.5 then
          RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadeFilho[Cont1,
Cont2] + (Maximo/decimal-RugosidadeFilho[Cont1, Cont2])*Distribuicao
        else
          RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadeFilho[Cont1,
Cont2] - (RugosidadeFilho[Cont1, Cont2]-Minimo/decimal)*Distribuicao;
          if RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] <= 0 then
            RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := 1/decimal;
          end;
        end;
      end;
    end;
  else
  begin
    AleatorioDist := Random;
    Distribuicao := Power(AleatorioDist*(1-(g/NGeracoes)), ParamForma);
    for Cont := 1 to QuantMut do
    begin
      Cont1 := Random(QuantFilhos-1);
      for Cont2 := 0 to QuantTubos-1 do
      begin
        Aleatorio := Random;
        if Aleatorio < 0.5 then
          RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadeFilho[Cont1,
Cont2] + (Maximo/decimal-RugosidadeFilho[Cont1, Cont2])*Distribuicao
        else
          RugosidadeFilho[Cont1, Cont2] := RugosidadeFilho[Cont1,
Cont2] - (RugosidadeFilho[Cont1, Cont2]-Minimo/decimal)*Distribuicao;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```



```

        LinhaNova := LinhaNova + Dados;
        Writeln(ArquivoAberto2, LinhaNova);
        Readln(ArquivoAberto, Linha);
        m := m + 1;
    end;
    Writeln(ArquivoAberto2, Linha);
    while CompareStr(Linha, '[END]') <> 0 do
    begin
        Readln(ArquivoAberto, Linha);
        Writeln(ArquivoAberto2, Linha);
    end;
    Writeln(ArquivoAberto2);
    CloseFile(ArquivoAberto);
    CloseFile(ArquivoAberto2);
end;
end;
{-----//-----}

{SIMULAÇÃO HIDRÁULICA UTILIZANDO O EPANET TOOLKIT}
procedure CalculoHidraulico(nCromo: Word);
begin
    for n := 1 to nCromo do
        for j := 1 to QuantCenariosP do
            begin
                Entrada := Pasta + 'Cen' + CenarioPressoes[j] + 'Rug' + IntToStr(n) +
                '.prn';
                ENOpen(PChar(Entrada), 'Temporario.rpt', '');
                ENSolveH();
                for i := 1 to QuantNosP do
                    begin
                        ENGetNodeValue(i, 11, PressoesCalc[i, j]);
                        if (i = 1) and (j = 1) then
                            FObjetivo[n] := FuncaoObjetivo(Pressoes[i, j], PressoesCalc[i, j],
                            TipoFuncao)
                        else
                            FObjetivo[n] := FObjetivo[n] + FuncaoObjetivo(Pressoes[i, j],
                            PressoesCalc[i, j], TipoFuncao);
                        end;
                    end;
                ENClose();
                IndiceFO[n] := n;
            end;
        end;
    end;
{-----//-----}

{PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO DO CARTAG}
procedure TFormPrincipal.BotaoCalcularClick(Sender: TObject);
begin
    {INICIALIZAÇÃO DE VARIÁVEIS E PARÂMETROS}
    EditTempo.Text := '';
    FormPrincipal.Repaint;
    s := 0;
    g := 0;
    Sementes := 0;
    NGeracoes := 0;
    FormCalculando.Show;
    FormCalculando.Repaint;
    T0 := Now;
    Randomize;
    NPop := StrToInt(EditPopulacao.Text);
    Sementes := StrToInt(EditSementes.Text);
    Espaco := StringOfChar(' ', 4);

```

```

QuantFilhos := NPop;

case RadioGroupFormula.ItemIndex of
  0:
    begin
      Formula := 'Headloss      D-W';
      casas := SpinEditCasasDecimais.Value;
      decimal := Power(10, casas);
    end;
  1:
    begin
      Formula := 'Headloss      H-W';
      casas := SpinEditCasasDecimais.Value;
      decimal := Power(10, casas);
    end;
end;
Minimo := StrToFloat(EditRugMinima.Text) * decimal;
Maximo := StrToFloat(EditRugMaxima.Text) * decimal;
Intervalo := Round(Maximo - Minimo);

case ComboBoxFObjetivo.ItemIndex of
  0: TipoFuncao := 0;
  1: TipoFuncao := 1;
end;

case RadioGroupSubstituicao.ItemIndex of
  0: TipoSubst := 0;
  1:
    begin
      TipoSubst := 1;
      QuantFilhos := StrToInt(EditFilhos.Text);
    end;
end;

case RadioGroupEspAmostrai.ItemIndex of
  0:
    begin
      TipoEAmostrai := 0;
      QuantFilhos := NPop;
    end;
  1:
    begin
      TipoEAmostrai := 1;
      QuantFilhos := StrToInt(EditFilhos.Text);
    end;
end;

if CheckBoxElitismo.Checked then
begin
  Elitismo := True;
  TaxaElit := StrToInt(Edit_k.Text);
end
else
begin
  Elitismo := False;
  TaxaElit := 0;
end;

case ComboBoxSelecao.ItemIndex of
  0: TipoSelecao := 0;
  1: TipoSelecao := 1;

```

```

2: TipoSelecao := 2;
3: TipoSelecao := 3;
4: TipoSelecao := 4;
end;
if TipoSelecao = 0 then
  NPart := StrToInt(Edit_n.Text);
if TipoSelecao > 0 then
begin
  case ComboBoxAptidao.ItemIndex of
    0:
      begin
        MetodoAptidao := 0;
        Parametro1 := StrToFloat(EditApt1.Text);
        Parametro2 := StrToFloat(EditApt2.Text);
      end;
    1:
      begin
        MetodoAptidao := 1;
        Parametro1 := StrToFloat(EditApt1.Text);
      end;
    2:
      begin
        MetodoAptidao := 2;
        Parametro1 := StrToFloat(EditApt1.Text);
        Parametro2 := StrToFloat(EditApt2.Text);
      end;
    3:
      begin
        MetodoAptidao := 3;
        Parametro1 := StrToFloat(EditApt1.Text);
      end;
    4:
      begin
        MetodoAptidao := 4;
        Parametro1 := StrToFloat(EditApt1.Text);
        Parametro2 := StrToFloat(EditApt2.Text);
      end;
    5: MetodoAptidao := 5;
    6:
      begin
        MetodoAptidao := 6;
        Parametro1 := StrToFloat(EditApt1.Text);
      end;
    7:
      begin
        MetodoAptidao := 7;
        Parametro1 := StrToFloat(EditApt1.Text);
      end;
  end;
end;
end;
case ComboBoxCrossover.ItemIndex of
  0: TipoCross := 0;
  1: TipoCross := 1;
  2:
    begin
      TipoCross := 2;
      Alfa := StrToFloat(EditAlfa.Text);
    end;
  3: TipoCross := 3;
  4: TipoCross := 4;
  5: TipoCross := 5;

```

```

6:
begin
  TipoCross := 6;
  Alfa := StrToFloat(EditAlfa.Text);
end;
end;
ProbCross := StrToFloat(EditProbCross.Text)/100;

case ComboBoxMutacao.ItemIndex of
0: TipoMut := 0;
1:
begin
  TipoMut := 1;
  ParamForma := StrToFloat(EditB.Text);
end;
2: TipoMut := 2;
3:
begin
  TipoMut := 3;
  ParamForma := StrToFloat(EditB.Text);
end;
4:
begin
  TipoMut := 4;
  ParamForma := StrToFloat(EditB.Text);
end;
5:
begin
  TipoMut := 5;
  ParamForma := StrToFloat(EditB.Text);
end;
end;
ProbMut := StrToFloat(EditProbMut.Text)/100;
Precisao := StrToFloat(EditPrecisao.Text);
NGeracoes := StrToInt(EditGeracoes.Text);
s := 1;
EntradaDados(NomeArquivoRede, NomeArquivoDemanda, NomeArquivoPressoes);
QuantGenes := QuantFilhos * QuantTubos;
SetLength(Ordem, NPop);
SetLength(FOPai, QuantFilhos);
SetLength(Aptidao, NPop);
SetLength(RugosidadeOrdem, NPop, QuantTubos);
SetLength(RugosidadePai, NPop, QuantTubos);
SetLength(RugosidadeFilho, NPop, QuantTubos);
SetLength(RugosidadeResultado, QuantTubos);
SetLength(RugosidadeMedia, QuantTubos);
SetLength(Esperanca, QuantFilhos);
SetLength(PaiInd, QuantFilhos);
{-----//-----}

while s <= Sementes do
begin
  Resultado := Pasta + EditResultCompleto.Text + 'Semente' + IntToStr(s)
+ '.txt';
  g := 1;
  if s > 1 then
  begin
    begin
      {GERAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL}
      for m := 0 to QuantTubos-1 do
      for n := 0 to NPop-1 do
      begin

```



```

{RECOMBINAÇÃO}
if Tipocross = 6 then
begin
  TipocrossAleatorio := Random(5);
  Crossover(TipocrossAleatorio);
end
else
  Crossover(Tipocross);
{-----//-----}

{MUTAÇÃO}
if TipoMut = 4 then
  QuantMut := Round(ProbMut * QuantFilhos)
else
  QuantMut := Round(ProbMut * QuantGenes);
Mutacao(TipoMut);
{-----//-----}

{GERAÇÃO DOS ARQUIVOS DE ENTRADA DO EPANET}
GeraArquivos(QuantFilhos);
{-----//-----}

g := g + 1;
CalculoHidraulico(QuantFilhos); {SIMULAÇÃO HIDRÁULICA}
Ordenamento(QuantFilhos, QuantTubos, MetodoAptidao); {ORDENAMENTO DE
INDIVÍDUOS PELA APTIDÃO}
end;
if s = 1 then
begin
  FOResultado := Ordem[0];
  for i := 0 to QuantTubos-1 do
  begin
    RugosidadeResultado[i] := RugosidadeOrdem[0, i];
    RugosidadeMedia[i] := RugosidadeOrdem[0, i]/Sementes;
  end;
end
else
begin
  if Ordem[0] < FOResultado then
  begin
    for k := 0 to QuantTubos-1 do
    begin
      RugosidadeResultado[k] := RugosidadeOrdem[0, k];
      RugosidadeMedia[k] := RugosidadeOrdem[0, k]/Sementes +
RugosidadeMedia[k];
    end;
    FOResultado := Ordem[0];
    Sem := IntToStr(s);
  end
  else
    for k := 0 to QuantTubos-1 do
      RugosidadeMedia[k] := RugosidadeOrdem[0, k]/Sementes +
RugosidadeMedia[k];
    end;
  s := s + 1;
end;
{GERAÇÃO DOS ARQUIVOS DE RESULTADOS RESUMIDO}
Arquivo := Pasta + EditResultResumido.Text + '.txt';
AssignFile(ArquivoResult, Arquivo);
Rewrite(ArquivoResult);

```

```

    Writeln(ArquivoResult, 'MÉDIA DAS RUGOSIDADES CALCULADAS PARA CADA
SEMENTE:');
    Writeln(ArquivoResult, '');
    Writeln(ArquivoResult, 'Tubo      Rugosidade');
    for k := 0 to QuantTubos-1 do
    begin
        Linha := IntToStr(k+1) + '          ' + FloatToStr(RugosidadeMedia[k]);
        Writeln(ArquivoResult, Linha);
    end;
    Tf := Now;
    Duracao := Tf - T0;
    TempoProc := TimeToStr(Duracao);
    EditTempo.Text := TempoProc;
    Writeln(ArquivoResult, '');
    Writeln(ArquivoResult, 'Tempo de Processamento: ' + TempoProc);
    CloseFile(ArquivoResult);
    {-----//-----}

    FormCalculando.Hide;
    MessageDlg('Programa executado com sucesso!',mtInformation,[mbOk],0);
end;
end.

```

```

unit UnitBarraProgress;

```

```

interface

```

```

uses

```

```

    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
    Dialogs, StdCtrls, ComCtrls;

```

```

type

```

```

    TFormCalculando = class(TForm)
        LabelAviso: TLabel;
        LabelProgresso: TLabel;
        ProgressBarExecucao: TProgressBar;
        BotaoCancelar: TButton;
        procedure FormPaint(Sender: TObject);
        procedure BotaoCancelarClick(Sender: TObject);
    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

```

```

var

```

```

    FormCalculando: TFormCalculando;

```

```

implementation

```

```

    Uses UnitPrincipal;

```

```

{$R *.dfm}

```

```

procedure TFormCalculando.FormPaint(Sender: TObject);

```

```

begin

```

```

    if (s = 1) and (g = 1) then

```

```

    begin

```

```

        ProgressBarExecucao.Min := 0;

```

```

        ProgressBarExecucao.Max := Sementes * NGeracoes;

```

```

    end;

```

```

    LabelProgresso.Caption := 'Geração ' + IntToStr(g) + ' de ' +
IntToStr(NGeracoes) + '. Semente ' + IntToStr(s) + ' de ' +
IntToStr(Sementes) + '.';
    ProgressBarExecucao.Position := (s-1) * NGeracoes + g;
end;

```

```

procedure TFormCalculando.BotaoCancelarClick(Sender: TObject);
begin
    Application.Terminate;
end;
end.

```

```

unit UnitSobre;

```

```

interface

```

```

uses

```

```

    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
    Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, jpeg;

```

```

type

```

```

    TFormSobre = class(TForm)
        LabelCartag: TLabel;
        LabelCartag2: TLabel;
        LabelVersao: TLabel;
        LabelData: TLabel;
        LabelDesenvolvido: TLabel;
        LabelAutor: TLabel;
        Labelemail: TLabel;
        Labelemail2: TLabel;
        ImagemCartag: TImage;
        BotaoOK: TButton;
        procedure BotaoOKClick(Sender: TObject);
    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

```

```

var

```

```

    FormSobre: TFormSobre;

```

```

implementation

```

```

{$R *.dfm}

```

```

procedure TFormSobre.BotaoOKClick(Sender: TObject);
begin
    FormSobre.Close;
end;

end.

```

B.2 Formulários do programa CARTAG

Calibração de Rugosidades - CARTAG

Arquivo Ajuda

Parâmetros de Cálculo dos Algoritmos Genéticos

Tamanho da População: 200 Quantidade de Sementes: 10 Função Objetivo: $F(x) = |X_i - X_j|$

Substituição: Geracional Steady-State Espaço Amostral: Regular Ampliado

com Elitismo $k =$ N° de filhos criados: 100

Recombinação (Crossover) Tipo: Todos Alfa: 0.5 Probabilidade: 90 %

Mutação Tipo: Gaussiana Desvio Padrão: 2 Probabilidade: 1 %

Tipo de Seleção: Torneio n: 3

Método de Cálculo da Aptidão: Ordenamento Linear Mínimo: Máximo:

Critérios de Parada Precisão: 0.001 N° Máximo de Gerações: 100 Tempo: 00:00:02

Arquivos de Entrada Pasta: Arquivo: Rede de Distribuição: C:\Programa\Resultado rede.inp Procurar... Cenários de Demanda: C:\Programa\Resultado Demandas.prn Procurar... Pressões Observadas: C:\Programa\Resultado Pressoes.prn Procurar...

Parâmetros Hidráulicos Fórmula da Perda de Carga: Darcy-Weisbach Hazen-Williams

Rugosidade variando de: 0.01 a 5.00 Casas Decimais: 2

Arquivos de Resultados Completo: ResultadoCompleto .txt Resumido: Resultado .txt

Calcular Sair

FIGURA B.1 – Formulário *FormPrincipal* do programa CARTAG.

Sobre CARTAG

CARTAG
Calibração Automática de Rugosidades de Tubulação utilizando Algoritmos Genéticos

Versão 1.0
Novembro / 2006

Desenvolvido por:
Alysson Cesar Azevedo da Silva, MSc
alysson@cagece.com.br
alyssoncesar@uol.com.br

OK

FIGURA B.2 – Formulário *FormSobre* do programa CARTAG.