



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

PAULA NOBRE DE ANDRADE

**ESTUDO COMPARATIVO DA CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADES EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA SUBMETIDAS A REGIMES DE ESCOAMENTO
TRANSIENTE RÁPIDO E LENTO**

FORTALEZA

2017

PAULA NOBRE DE ANDRADE

ESTUDO COMPARATIVO DA CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADES EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA SUBMETIDAS A REGIMES DE ESCOAMENTO
TRANSIENTE RÁPIDO E LENTO

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 Civil – Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

FORTALEZA

2017

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

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

A569e Andrade, Paula Nobre de.

Estudo comparativo da calibração de rugosidades em redes de distribuição de água submetidas a regimes de escoamento transiente rápido e lento / Paula Nobre de Andrade. – 2017.
98 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

1. Transiente hidráulico. 2. Calibração. 3. Redes de distribuição de água. 4. Rugosidade. 5. Algoritmo Genético. I. Título.

CDD 627

PAULA NOBRE DE ANDRADE

ESTUDO COMPARATIVO DA CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADES EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA SUBMETIDAS A REGIMES DE ESCOAMENTO
TRANSIENTE RÁPIDO E LENTO

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

Aprovada em: 07/04/2017.

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

AGRADECIMENTOS

À UFC, por toda estrutura oferecida. É uma honra fazer parte de uma instituição tão bem-conceituada.

À FUNCAP, pelo suporte financeiro oferecido.

Aos meus pais, Sinaldo e Graça, grandes guerreiros da vida, que me deram tudo e me ensinaram a lutar por aquilo que eu considero ser certo, mesmo que, muitas vezes, tenhamos opiniões divergentes. A vocês, o meu verdadeiro amor.

Às minhas irmãs, Bruna e Victa, que comemoraram comigo cada passo importante na minha carreira acadêmica.

Ao Professor Kenedy, meu querido orientador, por todo suporte, paciência e compreensão nesse período de trabalho, principalmente nos momentos de desespero.

Aos membros da banca avaliadora, que disponibilizaram seu tempo para acrescentar suas contribuições ao meu trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC, por todo conhecimento transmitido.

Às minhas sócias, Fernanda e Nyanne, parceiras desde sempre, que muito me apoiaram e acreditaram em mim até nos momentos de dúvidas.

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Morada Nova - Ceará, na figura do então presidente Caio Castro Navarro, pela confiança em me permitir ter a experiência única de aplicação dos meus conhecimentos a uma realidade tão complexa e que me fez enxergar a verdadeira importância da Engenharia Civil de Recursos Hídricos.

A todos os meus amigos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

“And I'll rise up. I'll rise like the day. I'll rise up. I'll rise unafraid. I'll rise up and I'll do it a thousand times again. And I'll rise up high like the waves. I'll rise up in spite of the ache. I'll rise up and I'll do it a thousands times again.”

RESUMO

A calibração de rugosidades em redes de distribuição de água submetidas a regimes de escoamento transiente foi negligenciada por algum tempo, mas vem sendo alvo de estudos recentes. Nas redes de distribuição de água, onde o consumo varia com cada usuário, os níveis dos reservatórios são ajustados de acordo com as condições climáticas e as estações de bombeamento são ligadas e desligadas continuamente, o uso dos modelos computacionais desenvolvidos para regime permanente se torna limitado. O uso da simulação do comportamento hidráulico da rede é muito útil, quando bem executado, para a prevenção de acidentes, rompimentos ou até mesmo falta de água em alguns pontos determinados da rede. Para que se possa simular o comportamento da rede com uma boa precisão, é necessário se conhecer todos os parâmetros físicos envolvidos no sistema e isso resulta em valores de pressão e vazão muito aproximados dos reais. O processo de estimativa dos parâmetros físicos da rede hidráulica é chamado de calibração. Buscou-se calibrar a rugosidade, que é a variável de maior dificuldade de determinação, em uma rede de distribuição hipotética formada por 8 nós de demanda variável (sendo um reservatório de cota igual a 60 mca) e 10 tubos. As análises foram feitas utilizando programas que aplicam a técnica de otimização do algoritmo genético para encontrar os valores ótimos da carga hidráulica no nó observado. A tubulação foi submetida a um transiente rápido (5 segundos) e um transiente lento (2 minutos). Os critérios de comparação utilizados foram erro relativo, erro médio relativo, desvio padrão e função objetivo. Aplicou-se três taxas de elitismo à população inicial em cada transiente para se observar a influência do operador nos resultados da calibração. Os resultados apontam o melhor cenário para se obter a calibração da rugosidade de uma rede de distribuição de água e os efeitos do elitismo na calibração. A técnica de otimização dos Algoritmos Genéticos é compatível para a calibração de redes de água. No transiente rápido, quanto maior a taxa de elitismo, menor o erro. No transiente lento, o erro aumenta com o crescimento da taxa de elitismo. O valor da função objetivo no regime transiente lento é menor do que no regime transiente rápido. Os parâmetros do algoritmo genético não devem tender a extremos máximos e nem mínimos. A ocorrência do transiente influencia na definição dos parâmetros do algoritmo genético, e o erro da calibração varia o comportamento de acordo com o escoamento transiente rápido ou lento.

Palavras-chave: Transiente hidráulico. Calibração. Redes de distribuição de água. Rugosidade. Algoritmo Genético.

ABSTRACT

The calibration of roughness in water distribution networks submitted to a transient flow was neglected for some time, but has been the object of recent studies. In the water distribution networks, where demand varies with each user, reservoir levels are adjusted according to climatic conditions and pumping stations are continuously turned on and off, the use of computer models developed for steady state becomes limited. The use of simulation for the hydraulic network behavior is very useful, when well executed, for the accidents prevention, breaks or even lack of water in some determined network points. In order to simulate the network behavior with good accuracy, it is necessary to know all the physical parameters involved in the system and this results in values of pressure and flow very close to the real ones. The estimating parameters process of the hydraulic network is called calibration. It was searched to calibrate the roughness, which is the most difficult variable to determine, in a hypothetical distribution network formed by 8 nodes of variable demand (one quota reservoir equal to 60 mca) and 10 tubes. The analyzes were performed using programs that apply the genetic algorithm optimization technique to find the optimal values of the hydraulic load in the observed node. The piping was subjected to a fast transient (5 seconds) and a slow transient (2 minutes). The comparison criteria used were relative error, relative mean error, standard deviation and objective function. Three rates of elitism were applied to the initial population in each transient to observe the influence of the operator on the calibration results. The results indicate the best scenario to obtain the calibration of the roughness of a water distribution network and the effects of elitism on calibration. The Genetic Algorithm optimization technique is compatible for the calibration of water networks. In fast transient, the higher the rate of elitism, smaller the error. In the slow transient, the error increases with the growth of the elitism. The objective function value in the slow transient regime is lower than the fast transient regime one. The parameters of the genetic algorithm should not tend to maximum or minimum extremes. The occurrence of transient influences the definition of the genetic algorithm parameters, and the calibration error varies the behavior according to the fast or slow transient flow.

Keywords: Transiente hidráulico. Calibration. Water distribution network. Roughness. Genetic Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 2.1 | – Princípio da conservação de energia em condutos forçados | 19 |
| Figura 3.1 | – Linhas Características no plano (x,t) | 41 |
| Figura 4.1 | – Recombinação de um ponto | 56 |
| Figura 4.2 | – Mutação simples para codificação binária | 57 |
| Figura 5.1 | – Rede de distribuição utilizada no estudo | 59 |
| Figura 5.2 | – Arquivo de indexação | 61 |
| Figura 5.3 | – Interface de R1 | 61 |
| Figura 5.4 | – Interface de R2 | 64 |
| Figura 5.5 | – Interface de R3 | 65 |
| Figura 5.6 | – Fluxograma da metodologia da calibração das rugosidades na rede submetida ao escoamento transiente..... | 68 |
| Figura 6.1 | – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente rápido se elitismo | 72 |
| Figura 6.2 | – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente lento sem elitismo | 74 |
| Figura 6.3 | – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente rápido com 50% de elitismo | 76 |
| Figura 6.4 | – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente lento com 50% de elitismo | 78 |
| Figura 6.5 | – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente rápido com 80% de elitismo | 80 |
| Figura 6.6 | – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente lento com 80% de elitismo | 82 |
| Figura 6.7 | – Comparativo das rugosidades estimadas nos processos sem elitismo | 82 |
| Figura 6.8 | – Comparativo dos desvios padrão nos processos sem elitismo | 83 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 6.9 | – Comparativo das rugosidades estimadas nos melhores processamentos sem elitismo | 83 |
| Figura 6.10 | – Comparativo das funções objetivo ótimas nos processamentos sem elitismo .. | 84 |
| Figura 6.11 | – Comparativo das rugosidades estimadas nos processos com 50% de elitismo | 84 |
| Figura 6.12 | – Comparativo dos desvios padrão nos processos com 50% de elitismo | 85 |
| Figura 6.13 | – Comparativo das rugosidades estimadas melhores processamentos com 50% de elitismo | 85 |
| Figura 6.14 | – Comparativo das funções objetivo ótimas nos processamentos com 50% de elitismo | 86 |
| Figura 6.15 | – Comparativo das rugosidades estimadas nos processos com 80% de elitismo | 86 |
| Figura 6.16 | – Comparativo dos desvios padrão nos processos com 80% de elitismo | 87 |
| Figura 6.17 | – Comparativo das rugosidades estimadas nos melhores processamentos com 80% elitismo | 87 |
| Figura 6.18 | – Comparativo das funções objetivo ótimas nos processos com 80% de elitismo | 88 |
| Figura 6.19 | – Efeito do elitismo nos valores médios do transiente rápido | 89 |
| Figura 6.20 | – Efeito do elitismo nos melhores processamentos do transiente rápido | 89 |
| Figura 6.21 | – Função objetivo ótima nos melhores processamentos do transiente rápido | 90 |
| Figura 6.22 | – Efeito do elitismo nos valores médios do transiente rápido | 90 |
| Figura 6.23 | – Efeito do elitismo nos melhores processamentos do transiente rápido | 91 |
| Figura 6.24 | – Função objetivo ótima nos melhores processamentos do transiente lento | 92 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 5.1 | - Características Físicas da Rede | 60 |
| Tabela 5.2 | - Demandas nodais..... | 60 |
| Tabela 5.3 | - Cargas hidráulicas obtidas em R1 para cada nó do sistema..... | 63 |
| Tabela 5.4 | - Vazões obtidas em R1 para cada tubo do sistema..... | 63 |
| Tabela 5.5 | - Representação binária dos valores decimais da rugosidade..... | 66 |
| Tabela 6.1 | - Estimativa de rugosidade no transiente rápido sem elitismo – valores médios | 71 |
| Tabela 6.2 | - Estimativa de rugosidade no transiente rápido sem elitismo - melhor processamento..... | 71 |
| Tabela 6.3 | - Estimativa de rugosidade no transiente lento sem elitismo – valores médios | 73 |
| Tabela 6.4 | - Estimativa de rugosidade no transiente lento sem elitismo – melhor processamento | 73 |
| Tabela 6.5 | - Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 50% de elitismo – valores médios | 75 |
| Tabela 6.6 | - Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 50% de elitismo – melhor processamento | 75 |
| Tabela 6.7 | - Estimativa de rugosidade no transiente lento com 50% de elitismo – valores médios | 77 |
| Tabela 6.8 | - Estimativa de rugosidade no transiente lento com 50% de elitismo – melhor processamento | 76 |
| Tabela 6.9 | - Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 80% de elitismo – valores médios | 78 |
| Tabela 6.10 | - Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 80% de elitismo – melhor processamento | 78 |
| Tabela 6.11 | - Estimativa de rugosidade no transiente lento com 80% de elitismo – valores médios | 80 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 6.12 | - Estimativa de rugosidade no transiente lento com 80% de elitismo - melhor processamento | 80 |
|-------------|--|----|

LISTA DE QUADROS

| | | | |
|------------|---|---|----|
| Quadro 2.1 | – | Variações do cálculo do fator de atrito (f) | 19 |
| Quadro 2.2 | – | Parâmetros do sistema hidráulico | 26 |
| Quadro 2.3 | – | Obtenção dos parâmetros para aplicar nos modelos hídricos | 28 |
| Quadro 2.4 | – | Comparativo entre as propriedades de métodos de otimização | 33 |
| Quadro 4.1 | – | Conceitos Biológicos | 49 |
| Quadro 4.2 | – | Métodos de Otimização | 56 |
| Quadro 5.1 | – | Código para a indexação dos nós de acordo com os tipos possíveis | 60 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Justificativa..... | 15 |
| 1.2 | Objetivos | 16 |
| 1.2.1 | <i>Objetivo Geral</i> | 16 |
| 1.2.2 | <i>Objetivos Específicos</i> | 16 |
| 1.3 | Estrutura da Dissertação..... | 17 |
| 2 | MODELOS HIDRÁULICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA | 18 |
| 2.1 | Equilíbrio Hidráulico..... | 18 |
| 2.2 | Métodos de Resolução das Condições de Equilíbrio Hidráulico | 20 |
| 2.3 | Modelos Hidráulicos em Regime Permanente..... | 21 |
| 2.4 | Modelos Hidráulicos em Regime Não Permanente..... | 22 |
| 2.5 | Modelos de Otimização em Redes Hidráulicas | 23 |
| 2.6 | Método de Busca do Algoritmo Genético | 24 |
| 2.7 | Calibração de Sistemas de Distribuição de Água..... | 26 |
| 2.8 | Técnicas de Calibração..... | 28 |
| 2.8.1 | <i>Métodos Explícitos</i> | 28 |
| 2.8.2 | <i>Métodos Implícitos</i> | 30 |
| 2.8.3 | <i>Método Iterativo</i> | 34 |
| 2.9 | Modelos de calibração disponíveis..... | 35 |
| 3 | ESCOAMENTO TRANSIENTE | 37 |
| 3.1 | Escoamento Transiente em Tubulações..... | 37 |
| 3.2 | Modelo da Coluna Elástica..... | 39 |
| 3.2.1 | <i>Equações Fundamentais do Método das Características</i> | 40 |
| 3.2.2 | <i>Cálculo da celeridade</i> | 44 |
| 3.2.3 | <i>Convergência e Estabilidade</i> | 44 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.4 | <i>Incremento de Tempo</i> | 46 |
| 3.2.5 | <i>Condições de Contorno</i> | 47 |
| 4 | ALGORITMOS GENÉTICOS | 48 |
| 4.1 | Representação dos Parâmetros | 49 |
| 4.1.1 | <i>Representação Binária</i> | 49 |
| 4.1.2 | <i>Representação Real</i> | 52 |
| 4.2 | Definição da Função Objetivo | 53 |
| 4.3 | População Inicial | 53 |
| 4.4 | Estrutura dos Algoritmos Genéticos | 53 |
| 4.4.1 | <i>Seleção e Elitismo</i> | 54 |
| 4.4.2 | <i>Recombinação</i> | 55 |
| 4.4.3 | <i>Mutação</i> | 56 |
| 4.5 | Algoritmos Genéticos e Otimização Convencional | 57 |
| 5 | METODOLOGIA APLICADA | 59 |
| 5.1 | Rede Hipotética | 59 |
| 5.2 | Indexação | 61 |
| 5.3 | Cargas nos Nós e Vazões nos Tubos em Regime Permanente | 62 |
| 5.4 | Cálculo das Cargas Hidráulicas Transientes | 63 |
| 5.5 | Simulação das Rugosidades em Regime Transiente | 64 |
| 5.6 | Função Objetivo em Regime Transiente | 65 |
| 5.7 | Configurações do Algoritmo Genético | 66 |
| 5.8 | Medida de Eficiência da Calibração | 68 |
| 5.9 | Transientes analisados | 68 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 70 |
| 6.1 | Transiente Rápido Sem Elitismo | 70 |
| 6.2 | Transiente Lento Sem Elitismo | 72 |
| 6.3 | Transiente Rápido com Taxa de 50% de Elitismo | 74 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 6.4 | Transiente Lento com Taxa de 50% de Elitismo | 76 |
| 6.5 | Transiente Rápido com Taxa de 80% de Elitismo..... | 78 |
| 6.6 | Transiente Lento com Taxa de 80% de Elitismo | 80 |
| 6.7 | Análise dos Resultados..... | 82 |
| 6.7.1 | <i>Simulação de Transiente Sem Elitismo.....</i> | 82 |
| 6.7.2 | <i>Simulação de Transiente com Taxa de 50% de Elitismo.....</i> | 84 |
| 6.7.3 | <i>Simulação de Transiente com Taxa de 80% de Elitismo.....</i> | 86 |
| 6.7.4 | <i>Análise do Efeito do Efeito do Elitismo na Calibração das Rugosidades</i> | 88 |
| 7 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 93 |
| | REFERÊNCIAS..... | 95 |

1 INTRODUÇÃO

Redes de condutos forçados são estruturas fundamentais em sistemas de transportes de fluidos. Um exemplo característico de um fluido que escoar ao longo de uma rede de tubos com variações de pressão e velocidade ao longo do espaço e do tempo é uma rede de distribuição de água para abastecimento humano e industrial. Nessas condições hidráulicas, onde o consumo varia com cada usuário, os níveis dos reservatórios são ajustados de acordo com as condições climáticas e as estações de bombeamento são ligadas e desligadas continuamente, o uso dos modelos computacionais desenvolvidos para regime permanente se torna limitado.

As equações de análise de transientes hidráulicos são conhecidas, mas, mesmo assim, o comportamento dos sistemas reais não é reproduzido com exatidão. Essa imprecisão motiva estudos a desenvolver modelos matemáticos mais realistas para condutos forçados. Além disso, a ocorrência de vazamentos nos sistemas de distribuição de água para abastecimento e os demais incidentes causados por eventos transitórios significam elevadas perdas físicas e financeiras, sendo válido ressaltar a importância dos vazamentos por representarem desperdício de água e um possível ponto de entrada de contaminantes nas redes (SOARES, 2007).

Para se projetar e operar uma rede de distribuição de água é necessário que se conheça todos os parâmetros envolvidos nos cálculos hidráulicos. O uso da simulação do comportamento hidráulico da rede é muito útil, quando bem executado, para a prevenção de acidentes, rompimentos ou até mesmo falta de água em alguns pontos determinados da rede. A ampliação da rede, alterações no traçado, troca de tubos desgastados, entre outros, são alguns dos propósitos da simulação hidráulica. Entretanto, para que se possa simular o comportamento da rede com uma boa precisão, é necessário se conhecer todos os parâmetros físicos envolvidos no sistema e isso resulta em valores de pressão e vazão muito aproximados dos reais.

O processo de estimativa dos parâmetros físicos da rede hidráulica é chamado de calibração.

Souza (1998) divide a análise de regime não-permanente em redes em duas maneiras: predição de transientes rápidos com altas frequências, usando modelos de coluna

elástica e predição de transientes lentos com baixas frequências, usando modelos de coluna rígida.

Os modelos de análise aplicados em redes, tanto no regime permanente como não permanente, são ditos como o problema direto e o problema inverso. No problema direto, o comportamento hidráulico do sistema (vazão nos tubos, pressão em cada nó, cargas hidráulicas e vazões nas bombas) é determinado pelas características do sistema e pelas condições de operação e variação da demanda. No problema inverso, os parâmetros do sistema são tratados como variáveis e são determinados estabelecendo-se especificações de vazão e/ou pressão (ARAÚJO, 2003).

Para simular o equilíbrio hidráulico de uma rede, a variável dotada de maior grau de incerteza, principalmente em microssistemas de distribuição de água, é a rugosidade das tubulações. Essa dificuldade surge por conta das características dinâmicas da rugosidade, tornando a determinação dessa variável um processo difícil e oneroso.

Para tanto, ao longo das últimas décadas, desenvolveram-se ferramentas computacionais que são capazes de simular os parâmetros das redes de distribuição utilizando as características físicas da própria rede como dados de entrada e oferecendo resultados de calibrações satisfatórias.

1.1 Justificativa

O grande aumento populacional dos últimos trinta anos gerou um aumento na complexidade na estrutura das redes hidráulicas. Com isso, a análise de sistemas de distribuição de água tornou-se um problema de grande interesse de pesquisadores e profissionais de engenharia. Antes desse aumento, o fator econômico não era considerado relevante para o sistema que era dimensionado apenas por parâmetros de diâmetro e vazão.

As redes de distribuição de água representam uma grande parcela sobre o custo de implantação de um sistema público de abastecimento de água. As soluções adotadas devem conter os critérios especificados pelas normas e apresentar um investimento mínimo.

O método de dimensionamento mais tradicional é o da tentativa e erro para obter a solução do problema, dos quais o mais empregado é o Hardy-Cross, e fazem tão somente o balanceamento da rede, deixando a cargo da experiência do projetista a busca de um dimensionamento mais econômico.

O estudo dos transientes em redes de distribuição foi negligenciado por algum tempo por ser difícil de se analisar e exigir um grande esforço matemático. Além disso, subestimava-se a severidade dos efeitos do transiente na tubulação, além do alto custo dos equipamentos de segurança e da dificuldade de se desenvolver modelos que estudem regimes não permanentes.

Com o desenvolvimentos de modelos capazes de analisar calibração e localizar vazamentos na rede, as técnicas de otimização passaram a desempenhar importante papel na análise de sistemas de distribuição de água, pois a ligação entre um modelo hidráulico e uma técnica de otimização é uma maneira eficiente de se obter valores das variáveis de decisão com êxito.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desse trabalho é estudar a calibração da rede de distribuição de água para identificar a rugosidade nos tubos durante o escoamento transiente abordando duas situações: transiente rápido e transiente lento (quase permanente) para, posteriormente, realizar uma comparação entre os resultados.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

1. Calcular as cargas hidráulicas transiente e permanente nos nós;
2. Identificar as rugosidades dos tubos utilizando transiente rápido e lento (quase permanente);
3. Calcular as funções objetivo no processo de identificação das rugosidades para o transiente rápido e lento (quase permanente);
4. Avaliar o desempenho do Algoritmo Genético sob o ponto de vista do elitismo;
5. Comparar as soluções ótimas das funções objetivo para os dois eventos transientes: rápido e lento (quase permanente);

6. Comparar o Erro Relativo (ER) e o Erro Médio Relativo (EMR) no processo de identificação das rugosidades nos dois eventos transientes: rápido e lento (quase permanente).

1.3 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 01, a introdução, é apresentado o tema de estudo do projeto em uma abordagem geral, assim como a justificativa da escolha do mesmo e os objetivos do trabalho.

Nos Capítulos 02, 03 e 04 serão apresentados os fundamentos da revisão bibliográfica utilizada como embasamento teórico para o desenvolvimento das ideias divididas da seguinte forma:

- Capítulo 02: Modelos Hidráulicos de Distribuição de Água;
- Capítulo 03: Escoamento Transiente;
- Capítulo 04: Algoritmos Genéticos.

O procedimento metodológico, com ênfase nas bases teóricas aplicadas para o desenvolvimento do trabalho será apresentado na Seção 05 deste projeto.

A seguir, Capítulo 06 e Capítulo 07, serão revelados os resultados e conclusões esperados ao fim do desenvolvimento do projeto, como também sugestões para pesquisas e trabalhos futuros.

Ao fim, são mostradas as referências bibliográficas.

2 MODELOS HIDRÁULICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Para a compreensão do processo de calibração de um sistema de distribuição de água, é imperioso que se tenha o conhecimento das características do escoamento do fluido, de seu comportamento e seus principais parâmetros.

O comportamento do fluido em regime forçado é reproduzido por simulações através de modelos matemáticos que representem as leis físicas regentes do fenômeno. Tais simuladores têm sua valia na análise de sistemas de abastecimento de água, podendo ser empregados desde a fase de projeto (no dimensionamento) até a operação (monitoramento de pressões e demandas).

2.1 Equilíbrio Hidráulico

As duas leis fundamentais da mecânica dos fluidos (Lei da Conservação da Massa e Lei da Conservação de Energia) associadas à relação entre vazão e perda de carga caracterizam as condições de equilíbrio da rede.

A Equação 2.1, a seguir, traduz a Lei da Conservação da Massa:

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

Onde tem-se que, J_i é o conjunto de tubos conectados ao nó i , C_i é a demanda do nó i e Q_{ij} é a vazão de chegada no nó i pelo tubo j (caso a vazão seja efluente, Q_{ij} será negativa).

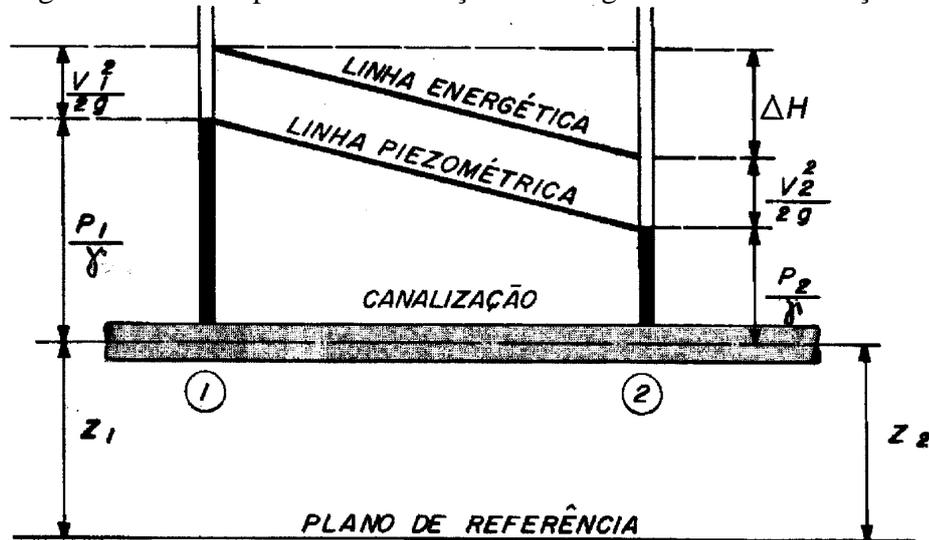
A Equação 2.2, abaixo, representa a Lei da Conservação de Energia, utilizada em trechos de escoamento permanente.

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

Onde tem-se que, H é energia mecânica por unidade de peso, z é a energia potencial por unidade de peso, $\frac{V^2}{2g}$ é a energia cinética por unidade de peso, $\frac{P}{\gamma}$ é a energia de pressão por unidade de peso e ΔH é a energia dissipada por unidade de peso, isto é, a perda de carga devido ao atrito entre o fluido e a parede interna da tubulação. Vale ressaltar que todas essas parcelas tem dimensão de comprimento [L].

O princípio da conservação da energia agindo em um fluido sob regime permanente e uniforme que transcorre de um ponto 1 para um ponto 2, onde se é possível observar a perda de carga, está ilustrado na Figura 1, a seguir (PEDRAZZI, 2003).

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



Fonte: Pedrazzi, 2003.

A fórmula de *Darcy-Weisbach*, apresentada a seguir na Equação 2.3, mostra o cálculo da perda de carga distribuída para qualquer fluido incompressível.

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

Onde tem-se que, L é o comprimento da tubulação e f é o fator de atrito, adimensional e dependente do número de Reynolds (R_e).

De acordo com Porto (2006), o cálculo do fator de atrito varia com o regime do escoamento, como mostrado no Quadro 2.1, a seguir.

Quadro 2.1– Variações do cálculo do fator de atrito (f).

| Fórmulas para cálculo do fator de atrito (f) | | |
|--|--|---|
| Escoamento Laminar ($R_e \leq 2000$) | Escoamento de Transição ($2000 < R_e < 4000$) | Escoamento Turbulento ($R_e \geq 4000$) |
| $f = \frac{64}{R_e}$ | Consultar Diagrama de MOODY (1994) | $f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2}$ |

Fonte: Adaptado de Porto, 2006.

Há ainda a equação empírica de *Hazen-Williams* (Equação 2.4) para se calcular a perda de carga distribuída, cuja aplicação é ampla devido à simplicidade de execução dos cálculos.

$$\Delta H = 6,815 \cdot \frac{L}{D^{1,167}} \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^{1,8518} \quad (2.4)$$

Onde C é o coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams*, L é o comprimento total da tubulação em metros, D é o diâmetro dos tubos em milímetros e V é a velocidade do fluido em metros por segundo.

As instalações de transporte de água sob pressão são constituídas por tubulações montadas em sequência e unidas por acessórios de naturezas diversas. Esses acessórios, ou singularidades, podem ser peças de mudanças de direção (curvas, tês, etc.), de alteração de velocidade (redução, registro, etc.), conexões quaisquer ou ainda máquinas hidráulicas (bomba ou turbina). A presença desses acessórios reflete em um acréscimo de turbulência e produz perdas de cargas por atrito localizadas nas conexões (PORTO, 2006). Essa perda de carga localizada é calculada segundo a Equação 2.5.

$$\Delta h = K \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.5)$$

Onde K é o coeficiente de perda de carga localizada obtido experimentalmente para cada acessório e V é a velocidade do fluido em metros por segundo.

Como alternativa à equação supracitada, pode-se calcular a perda de carga localizada pelo método dos comprimentos equivalentes, que consiste em adicionar comprimentos fictícios correspondentes às perdas de carga de cada acessório ao comprimento total da rede.

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 a determinação das cotas piezométricas dos nós (SILVA, 2006).

Para uma rede de distribuição malhada constituída por j tubos e i nós, tem-se um cálculo feito através da resolução de j equações relativas à perda de carga nos tubos e i equações de continuidade nos nós. Como as equações de perda de carga são não-lineares, o cálculo de redes malhadas torna-se complexo, o que acabou incitando o aparecimento de métodos numéricos para a resolução do problema.

A técnica mais antiga e mais popular de resolução de cálculos de redes malhadas de distribuição de água data de 1936 e é o Método de *Hardy-Cross*. Esse método trata-se de um processo iterativo, onde uma única equação do sistema é resolvida por iteração, repetindo-se até que seja obtida a convergência dentro da tolerância estabelecida.

O método numérico de *Newton-Raphson* determina as condições de equilíbrio hidráulico propondo que a solução matemática seja obtida através da resolução iterativa de um sistema de equações lineares, resultando em um aumento da eficiência e da convergência se comparado ao método de *Hardy-Cross* (MATIN e PETERS, 1963).

O método da Teoria Linear, proposto por Wood e Charles (1972), oferece facilidade de programação e alta velocidade de convergência e é baseado na resolução simultânea do sistema de equações de conservação da energia, em função de um valor aproximado de vazão em cada trecho da rede, obtendo, assim, valores de vazão que serão utilizados para a resolução do sistema de equações na iteração seguinte. O processo termina quando as variações de vazão em duas iterações consecutivas atingem a tolerância pré-definida.

2.3 Modelos Hidráulicos em Regime Permanente

No regime permanente, os modelos hidráulicos geralmente são embasados nas leis da Conservação da Massa e da Energia. Esses modelos são limitados pelo número de parâmetros de indeterminação e pelas condições de contorno aplicadas.

Araújo (2003) listou a analogia elétrica, a técnica de relaxação, a aproximação linear, o comprimento equivalente, a técnica de *Newton-Raphson*, o diâmetro equivalente, os elementos finitos, a técnica de *Gauss-Seidel* (SOR), os mínimos quadrados e expansão da série de Taylor como técnicas desses modelos. Além disso, as condições hidráulicas que devem ser satisfeitas para a solução do problema de redes são: a soma algébrica das vazões em qualquer nó deve ser zero, a carga hidráulica em um nó deve ser a mesma para todos os

tubos conectados a este nó e a relação de perda de carga e vazão deve ser satisfeita para cada elemento da rede.

Os Métodos Diretos para solução de problemas de regime permanente são: o método de Hardy-Cross, o método de analogia elétrica, a técnica do comprimento equivalente, o método da teoria linear, o método de *Newton-Raphson* modificado para as equações do nó, o método de ajustes simultâneos das energias, o modelo de esparsidade orientado, dentre outras adaptações da teoria linear, inclusão de dispositivos, comparações e/ou modificações do algoritmo e dos elementos entre os métodos já existentes, que foram estudadas por vários autores desde a década de 1950 (ARAÚJO, 2003).

Os Métodos Inversos partem de algumas informações de pressão e vazão da rede e recorrem ao uso de uma função objetivo para a aproximação do problema inverso, que consiste em minimizar essa função objetivo, geralmente o módulo da diferença entre os valores de dados observados e calculados de pressão e/ou vazão do sistema.

2.4 Modelos Hidráulicos em Regime Não Permanente

Em análises relativas à Hidráulica Transiente em condutos forçados, onde as condições de vazão, fluxo e pressão variam em função do tempo, o fenômeno do transiente é descrito pela Equação da Continuidade e pela Equação da Quantidade de Movimento, sendo essas resolvidas simultaneamente. Tais equações compõem um sistema de equações parciais do tipo hiperbólico, onde não é possível se obter solução analítica exata. Contudo, esses resultados podem ser encontrados através de métodos numéricos desenvolvidos para solucionar esses sistemas.

Os estudos dos regimes em condições transientes vêm crescendo recentemente, desde a década de 1990. Esse estudo tem se focado na busca de esquemas de otimização para obter melhores soluções nas dimensões das canalizações, estudos de operação de sistemas, reservatórios, bombas e etc.

Os métodos numéricos mais utilizados atualmente são: Método das Características, Método das Diferenças Finitas, Método dos Elementos Finitos, Método Espectral e o Método dos Elementos de Contorno.

Chaudhry (2014) afirma que o Método das Características tornou-se popular e é usado extensivamente para a solução de problemas de transientes hidráulicos unidimensionais,

especialmente se a velocidade da onda for constante. Este método provou ser superior aos outros métodos em vários aspectos, como a simulação correta da onda, a ilustração de propagação da onda, a facilidade de programação e eficiência de cálculos.

O Método das Características é uma ferramenta de grande importância para a solução de sistemas complexos de engenharia. Portanto, justifica-se seu uso nas simulações dos transientes hidráulicos no modelo matemático (CHAUDHRY, 2014).

Para que se obtenham as equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento do transitório são necessárias algumas hipóteses fundamentais para o desenvolvimento da teoria de obtenção das equações (Santos 2000 *apud* RIGHETTO, 1972 e CHAUDHRY, 1987). Essas hipóteses são:

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

Os Métodos Diretos para solução de problemas de regime não permanente são: a simulação transiente de um sistema com reservatório a montante e válvula a jusante de Driels (1975), os modelos de cálculo dos transientes em sistemas de tubo de Shimada e Okushima (1984), o método de análise baseado na teoria da coluna rígida de Onizuka (1986), o método para a análise de transientes lentos de Shimada (1989), a interpretação alternativa de Karney (1990) das condições transientes pela expressão da energia integrada, o método das características com interpretações polinomiais, dentre outros (ARAÚJO, 2003).

2.5 Modelos de Otimização em Redes Hidráulicas

O crescimento populacional e industrial influenciaram os projetos de sistemas de distribuição de água nas últimas três décadas devido, sobretudo, ao papel crucial que eles exercem na sociedade. Várias redes hidráulicas existentes em áreas urbanizadas têm se danificado e são inadequadas do ponto de vista das pressões e vazões requeridas. A maioria dos modelos para instalação e manutenção dos sistemas capazes de satisfazer as exigências de pressão e vazão mínimas requeridas aborda o critério de mínimo custo. Este problema é, normalmente, um exemplo típico de otimização não convexo, tendo um número de mínimos locais, tornando-o difícil de resolvê-lo. O problema de otimização em redes de distribuição d'água é um tema complexo e ainda não completamente resolvido.

O modelo de otimização implementado para os procedimentos de calibração e detecção de vazamentos minimiza os desvios entre os parâmetros pressão e vazão observados e aqueles obtidos através de simulação hidráulica. Segundo Soares (2007), os métodos de busca direta mais utilizados para resolver esse tipo de problema são os métodos Gradiente e *Newton-Raphson*. Contudo, ferramentas mais gerais como Algoritmos Genéticos (AG) vêm sendo apontadas como promissoras na resolução desse tipo de problema.

Righetto (2001) propôs um método de calibração utilizando coeficientes de rugosidades e diâmetros das tubulações como variáveis de decisão. O método de otimização utilizado foi o algoritmo genético e, embora tenha apresentado resultados satisfatórios a metodologia foi aplicada a uma rede teórica pequena e o trabalho não considerou a divisão da rede em grupos e nem a importância da determinação dos pontos de calibração.

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, pois sua característica dinâmica exige um levantamento abrangente e contínuo sobre todo o sistema (ZAHED FILHO, 1990).

Existem estudos para a estimativa das rugosidades através de tentativa e erro, métodos de otimização e métodos de mínimos quadrados ponderados. A grande contribuição do trabalho de Kang (2010) foi a determinação de parâmetros através da calibração simultânea das rugosidades e das demandas de água considerando possíveis erros nos dados e possibilitando a realização de análise de incerteza.

2.6 Método de Busca do Algoritmo Genético

De acordo com Araújo (2003), os Algoritmos Genéticos foram desenvolvidos na Alemanha por Rechenberg (1973), em paralelo com Holland (1975) e seus colaboradores nos Estados Unidos e popularizado por Goldberg (1989). Esses algoritmos baseiam-se nos princípios descritos pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin de seleção natural observado na natureza verificando a reprodução preferencial dos indivíduos mais aptos e propagação das suas boas características. Essa analogia permite construir um algoritmo eficiente com características adequadas à solução de problemas com espaços de busca complexos tais como em sistemas de distribuição d'água.

Existe um grande número de aplicações de AGs em problemas de recursos hídricos demonstrando sua habilidade em obter melhores soluções do que pelos métodos convencionais. Araújo (2003) cita as mais importantes, os AGs que foram aplicados por SIMPSON et al. (1994) e SAVIC e WALTERS (1997) na obtenção do ótimo global para problema de projeto em redes hidráulicas. SAVIC e WALTERS (1995a,b) trabalharam com o problema de localização de válvulas em redes hidráulicas e REIS et al. (1997) consideraram o problema de localização ótima de válvulas de controle em redes hidráulicas com redução de vazamento como função objetivo a ser maximizada. MONTESINOS et al. (1999) apresentaram um AG modificado com a finalidade de aumentar a convergência do algoritmo e obter a solução de mínimo custo em poucas gerações. RITZEL et al. (1994) enfatizaram a importância do AG sobre a otimização convencional, trabalhando com problemas complexos altamente não-lineares e similares ao mundo real. CIENIAWSKI et al. (1995) investigaram um problema de monitoramento multi-objetivo em água subterrânea usando AGs e dois objetivos, maximização da confiabilidade e minimização de áreas contaminadas. Eles afirmaram que a solução obtida pelo AG tem uma vantagem sobre aproximações multi-objetivo tradicionais, pois pode gerar tanto pontos convexos como não-convexos, acomodar a não-linearidade nas duas funções objetivo, encontrar vários pontos Pareto ótimo em uma simples iteração. CIENIAWSKI et al. (1995) apresentaram, analisaram e compararam quatro distintas formulações de AG: função objetivo ponderada, formulação AG com vetor-avaliado (VEGA), formulação por ordenamento do Pareto ótimo, e combinação do VEGA e formulações por ordenamento. GAMBALE (2000) aplicou a técnica dos algoritmos genéticos à calibração dos coeficientes de rugosidades de redes hidráulicas em regime permanente. SIMPSON et al. (2000) usaram o AG na calibração das rugosidades dos tubos sob condições transientes em um sistema de distribuição de água. Foram usados dois esquemas de

codificação para o AG: discreto e contínuo. Na análise da calibração, usaram o Método Transiente Inverso (ITM).

A unidade básica de um AG é o cromossomo, referido com string, que é formado por uma série de caracteres equivalentes aos genes biológicos, representando um conjunto de variáveis de decisão. Cada cromossomo representa uma possível solução para o problema em questão e uma população de cromossomos representa um conjunto de possíveis soluções.

Santos (2010) ratifica que, dentre as vantagens da utilização dos AGs sobre outros métodos de resolução do problema de calibração pode-se citar o fato de que funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou com uma combinação deles e realizam buscas simultâneas em várias regiões.

Em contrapartida, o AG possui uma menor velocidade de convergência quando comparado aos demais métodos de otimização.

2.7 Calibração de Sistemas de Distribuição de Água

O equilíbrio hidráulico é determinado por equações matemáticas que dependem de parâmetros característicos do fluido, da região onde o sistema está inserido e dos aspectos físicos do sistema de distribuição. Esses parâmetros estão dispostos no Quadro 2.2, a seguir.

Quadro 2.2 – Parâmetros do sistema hidráulico.

| | Parâmetro | Simbologia |
|---|--------------------------------------|-------------------|
| Características do fluido transportado | Peso específico (N / m^3) | γ |
| | Viscosidade cinemática (m^2 / s) | ν |
| Geografia da região | Cota (m) | z |
| | Demanda dos nós (L / s) | C_i |
| Aspectos físicos do sistema | Comprimento (m) | L |
| | Diâmetro (m) | D |
| | Rugosidade dos tubos (mm) | ε |

Fonte: Elaborado pela Autora.

Calibração é o processo de identificação dos parâmetros necessários a serem inseridos no simulador para que a simulação do comportamento do sistema hidráulico de redes de distribuição de água produza resultados realísticos. A confiabilidade dos modelos hídricos, ou seja, a eficiência da calibração, depende da qualidade dos dados necessários e da precisão com que esses parâmetros são obtidos.

O Quadro 2.3, a seguir, mostra a forma de obtenção desses parâmetros.

Quadro 2.3 – Obtenção dos parâmetros para aplicar nos modelos hídricos.

| Parâmetro | Obtenção |
|--|--|
| Peso específico (γ) | Variáveis obtidas experimentalmente e com resultados consolidados disponíveis em manuais de hidráulica |
| Viscosidade cinemática (ν) | |
| Cota (z) | Levantamento topográfico |
| Demanda dos nós (C_i) | Sistemas de micromedição de unidades consumidoras ou macromedidores instalados na linha de adução. |
| Comprimento (L) | Planta cadastral |
| Diâmetro (D) | |
| Rugosidade dos tubos ($\varepsilon e C$) | * |

Fonte: Elaborado pela Autora.

Segundo Zahed Filho (1990), a rugosidade dos trechos de um sistema de distribuição é o parâmetro de mais difícil identificação, pois sua característica dinâmica exige um levantamento abrangente e contínuo sobre todo o sistema.

As técnicas de calibração são divididas entre as que calculam a rugosidade dos tubos e as que calculam rugosidade e demandas nos nós simultaneamente. O cálculo da rugosidade em redes de distribuição torna-se complexo devido às incertezas dos dados de demanda nodal, à grande quantidade de pontos de consumo e ao elevado número de peças e conexões que causam perdas localizadas. Diante desse quadro, em redes de distribuição, o mais indicado é a calibração simultânea das rugosidades dos tubos e dos consumos dos nós (CHEUNG e SOUZA, 2001).

2.8 Técnicas de Calibração

2.8.1 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. Tal metodologia exige que o número de medidas de pressões e/ou vazões seja igual ao número de parâmetros desconhecidos (SILVA, 2006).

Bhave (1988) utilizou um fator de ajuste global na correção dos coeficientes de rugosidades dos tubos ao aplicar a técnica proposta por Walski (1983, 1986), que se baseia 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.

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. Boulos e Ormsbee (1991) ampliaram esse modelo realizando diversos testes de incêndio para diferentes condições de contorno.

Boulos e Wood (1990) apresentaram um modelo que 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 Tumbiolo (1994) concluíram que o melhor período para obtenção de dados de vazões e pressões é o noturno ao desenvolverem uma técnica para análise de 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.

Cheung (2001) estudou os métodos de calibração apresentados por Walski (1983), Bhave (1988) e Boulos e Wood (1990) e propôs algumas melhorias para o trabalho de Boulos e Wood (1990) como a inclusão de um simulador hidráulico proposto por Souza (1994) e a generalização da metodologia, já que era restrita a uma única rede da literatura.

Soares (2003) ressalta que o número de medidas de vazão e pressão a serem empregadas será o mesmo número de equações do sistema a serem resolvidas e igual ao número de parâmetros desconhecidos.

Os processos de calibração explícitos, na literatura existente, foram aplicados apenas em redes de pequeno porte. Silva (2003) assevera que algumas limitações dos procedimentos de calibração explícitos incluem o fato deles não avaliarem a confiabilidade dos parâmetros e necessitarem de um número de parâmetros estimados igual ao número de medidas.

2.8.2 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.

Ormsbee (1989) desenvolveu um método que 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. Esse método é capaz de operar funções não convexas.

Uma aproximação similar ao modelo supracitado foi desenvolvida por Lansey e Basnet (1991), que utilizaram programação linear para identificar coeficientes de rugosidade, abertura de válvulas e demandas nodais de uma rede hidráulica, além de elaborarem um estudo comparativo minimizando duas funções objetivo obtendo, como resultado, maior velocidade de convergência do erro quadrático do que do erro absoluto.

Datta e Sridharan (1994) ajustaram o coeficiente de resistência através da minimização da soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e calculados, considerando diferentes condições de carregamento hidráulico. As incertezas dos valores estimados foram analisadas com o uso de técnica de sensibilidade.

A minimização de *Gauss-Newton* ao método dos mínimos quadrados para estimativa da rugosidade dos tubos foi proposta por Reddy, Sridharan e Rao (1996). Os autores utilizaram uma sistemática de adoção de pesos que variam ao longo do processo de otimização na função objetivo.

Savic e Walters (1997) apresentaram a técnica estocástica dos algoritmos genéticos para calibração de redes de distribuição mais complexas. Baseado no processo de seleção natural de Charles Darwin, esse trabalho identificou os coeficientes de rugosidade de uma rede real pelo método de Algoritmos Genéticos e apresentou resultados melhores do que procedimentos que utilizavam tentativa e erro.

Reis, Porto e Chaudhry (1997) obtiveram eficiência no controle de vazamentos com poucas válvulas localizadas em pontos ótimos quando 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 algoritmos genéticos como técnica de otimização.

A pesquisa de Gambale (2000) sobre a análise do método dos algoritmos genéticos para calibração do coeficiente de *Hazen-Williams* de uma rede hipotética concluiu que a dimensão da população de soluções influencia significativamente na qualidade dos resultados obtidos e mostra, também, que não é necessário efetuar o monitoramento de todos os nós de uma rede para calibrá-la.

Kapelan, Savic e Walters (2002) propuseram um modelo híbrido para a determinação de rugosidades absolutas e detecção de vazamentos em redes de distribuição de água operando em regime transiente. O objetivo principal do modelo era a redução do tempo de processamento e a obtenção de melhores resultados e consiste na aplicação de uma técnica de busca global para percorrer todo o espaço amostral seguida de uma técnica de busca local para refinar a solução final.

O programa computacional desenvolvido por Alencar Neto (2003) aplica o método dos algoritmos genéticos ao projeto de redes de distribuição de água para determinar a solução de menor custo. Ao fim, o autor conclui que o método aplicado é satisfatório e tem convergência rápida para uma solução subótima.

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 com um algoritmo genético. Na resolução do problema inverso proposto, foram consideradas cinco situações específicas de calibração: fatores de atrito, rugosidades absolutas, diâmetros das tubulações, vazamentos e simultaneidade de vazamentos e fator de atrito. Desse trabalho, concluiu-se que a utilização dos algoritmos genéticos no processo de calibração via método transiente inverso foi 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 dispõe-se de poucos dados.

Silva (2003), aplicou os Algoritmos Genéticos no processo de calibração de redes de distribuição de água na cidade de São Carlos, SP. Os parâmetros ajustados foram as rugosidades das tubulações, com base em valores de pressões e vazões simulados e medidos em campo, os fatores relativos a vazamento, além de estudos de determinação de localização

ótima de pontos de monitoramento baseado em entropia. O autor investiga, ainda, operador genético e algoritmos mais eficientes.

Soares (2003) desenvolveu uma rotina computacional que considera as perdas por vazamentos e a dependência das demandas com a pressão acoplada ao simulador hidráulico EPANET (Rossman, 2000). O modelo de calibração de redes de distribuição de água integra o pacote GALIB com um código desenvolvido em C^{++} . O problema é resolvido com o suporte da tecnologia dos Algoritmos Genéticos (AGs) e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex-Nelder e Mead (1965).

Pizzo (2004) apresentou uma nova metodologia para a calibração de redes de água, especificamente dos coeficientes de rugosidade da tubulação. O método denominado Híbrido foi desenvolvido com base no acoplamento de um simulador hidráulico baseado no *Time Matching Approach* - TMA, com o algoritmo otimizador de Nelder e Mead. Holnicki-Szulc *et al.* (2005) propuseram um método para a localização de vazamentos em redes de distribuição de água utilizando o modelo inverso.

Wu e Sage (2006) desenvolveram um método de calibração que simultaneamente quantifica e localiza os vazamentos na rede de distribuição de água. A calibração do modelo é formulada como um problema de otimização não-linear que é resolvido utilizando um algoritmo genético. O método é desenvolvido integrando simulação hidráulica, modelagem e otimização. Foram apresentados estudos de caso para demonstrar como a abordagem integrada é aplicada na detecção de vazamentos. Os autores concluíram que o método é eficaz na detecção de vazamentos e que a precisão na localização dos vazamentos é dependente dos dados de campo coletados.

Visando estudar a precisão de modelos de calibração de redes de distribuição de água, Walski *et al.* (2006) construíram um sistema de distribuição em escala de laboratório. Para a análise hidráulica do sistema foi utilizado o calibrador Darwin desenvolvido por Wu *et al.* (2002) que inclui um competente algoritmo genético capaz de identificar *status* de válvulas, demandas e rugosidades. Os resultados indicaram que os métodos de calibração automática funcionaram bem na estimativa da rugosidade da tubulação, demandas e localização de válvulas fechadas. Os únicos problemas ocorreram quando o número de incógnitas excedeu em muito o número de medições.

Gumier e Luvizotto Jr. (2006) aplicaram o modelo computacional proposto por Luvizotto Jr. (1998) a uma rede de distribuição de Jundiaí, SP. O modelo é fundamentado no acoplamento de um simulador hidráulico baseado no *Time Matching Approach* - TMA, com o algoritmo otimizador de Nelder e Mead. Com os testes de campo pode-se observar que o modelo apresenta funcionamento adequado para a detecção de vazamentos.

Soares (2007) desenvolveu um modelo para a calibração de sistemas hidráulicos, além de detecção e localização de vazamentos nas tubulações, através do modelo inverso. O modelo consiste na minimização da diferença entre valores das variáveis de estado (pressão e vazão) simulados e observados. Para tal, foram utilizados como ferramenta de busca numérica os algoritmos genéticos e os métodos de busca local Levenberg - Marquart e método Simplex (Nelder e Mead, 1965).

Colombo (2007), utilizando a rotina computacional desenvolvida por Soares (2003), investigou o comportamento de sistemas de abastecimento reais que apresentam grandes índices de vazamento. Para o estudo foram utilizadas duas redes distintas e com peculiaridades, como grandes índices de vazamentos. Os resultados obtidos para as duas redes de distribuição de água estudadas não foram satisfatórios, nas duas cidades a administração da rede é feita pela mesma concessionária, imagina-se que mudanças na rede não sejam alteradas no cadastro.

Neves (2007) desenvolveu uma rotina com vistas a calibração automática de redes de água, utilizando problema inverso, simulador hidráulico de escoamento de água em regime permanente e algoritmos genéticos como técnica de otimização. O programa foi testado utilizando diferentes valores para os parâmetros de entrada com o objetivo de avaliar a interferência destes valores na eficiência da rotina proposta.

Brown (2007) analisou a ocorrência e localização de vazamentos decorrentes da variação de pressão em uma rede de distribuição de água através da análise de diferentes cenários de pressão na rede. Para o estudo foi utilizado o simulador hidráulico WaterCad e teve como base o trabalho desenvolvido por Covas e Ramos (2001).

Wu (2008) elaborou um protocolo para a calibração de redes de distribuição de água que contém os seguintes passos:

- Utilizar 24 horas de dados de vazão para avaliação do sistema;

- Utilizar dados das horas de menor demanda para otimização da detecção dos vazamentos;
- Utilizar dados dos momentos de maior consumo para calibração da rugosidade;
- Utilizar os demais dados para calibração para períodos de fluxo prolongado.

Para a calibração de uma rede de distribuição de água é essencial o conhecimento das de algumas variáveis de estado da rede.

A demanda nodal é uma delas e requer certo esforço para ser estimada. Kang e Lansey (2009) desenvolveram uma metodologia para a estimação das demandas nodais de uma rede de distribuição de água em tempo real utilizando medições de campo fornecidas por sistemas de supervisão de redes, o método foi testado em uma rede e, em resumo, pode-se concluir que os resultados apresentados mostram que os algoritmos são eficazes para a estimação da demanda nodal em tempo real.

Os trabalhos desenvolvidos mostram que o emprego dos algoritmos genéticos para calibração de redes de distribuição de água é viável. O Quadro 2.4, a seguir, mostra o comparativo entre algumas propriedades dos métodos de otimização tradicionais e o método dos algoritmos genéticos.

Quadro 2.4 – Comparativo entre as propriedades de métodos de otimização.

| Propriedade | Algoritmos Genéticos | Métodos tradicionais |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Velocidade | Baixa a média | Alta |
| Desempenho | Excelente | Depende do problema |
| Compreensão do problema | Não necessária | Necessária |
| Aplicabilidade | Geral | Específica |

Fonte: Adaptado de Silva, 2006.

2.8.3 Método Iterativo

Segundo Silva (2003), o procedimento iterativo geralmente é baseado em tentativa e erro. Os parâmetros de calibração são ajustados a cada iteração usando comparações entre pressões e vazões medidas e simuladas. Destaca-se aqui alguns trabalhos clássicos, podendo citar autores como Rahal *et al* (1980), Walski (1983, 1986) aplicaram o procedimento iterativo de calibração em seus trabalhos, em geral para redes de pequeno porte (poucos nós e trechos). Rahal *et al* (1980) no ajuste do coeficiente de atrito e os demais no ajuste de demandas e rugosidades.

Walski (1983 e 1986) determinou os parâmetros de rugosidades e demandas, para redes de 7 nós e 8 trechos e, posteriormente, outra rede de 271 nós e 307 trechos.

O trabalho de Bhave (1988) consiste na modificação do trabalho de Walski (1983). O procedimento iterativo de calibração é baseado na tentativa e erro, a cada iteração os parâmetros a serem calibrados são ajustados usando comparações entre pressões e vazões medidas e simuladas.

2.9 Modelos de calibração disponíveis

Araújo (2003) reproduz a lista de Gambale (2000), onde esse cita os principais modelos de calibração utilizados. São eles:

- BOSS SEM (“Epanet Modeling System”) – Desenvolvido no ambiente WINDOWS pela empresa “Boss International”, este simulador utiliza o cálculo do modelo EPANET, contando com todos os recursos disponíveis naquele modelo, tendo as vantagens da interface do WINDOWS para a criação da rede e visualização dos resultados.
- CFOR – O programa criado pela “Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo” foi desenvolvido em ambiente WINDOWS e possui os módulos de cálculo em regime permanente, extensivo e transitório.
- H₂ONET – Pertencente à “MW Soft, Inc.”, este programa é um dos mais completos existentes no mercado. Trabalha diretamente no ambiente AUTOCAD, dispondo dos módulos de cálculo de qualidade de água, regime permanente e extensivo. Possui, também, um vasto grupo de recursos, destacando-se o gerenciador de cenários e a interface com os sistemas GIS e SCADA. Apesar de ser um programa de grandes recursos, seu manejo não é simples, necessitando do programa AUTOCAD para funcionar.
- PIPE 2000 – Esta versão para WINDOWS do programa KPIPE, produzida pela Universidade do Kentucky (USA), dispõe de uma grande variedade de recursos, cumprindo destacar a utilização de imagens RASTER (“background”) e a calibração automática. Trata-se de um programa de fácil assimilação.

- WATERCAD – Criado pela empresa “Haestad Methods”, é um programa desenvolvido em WINDOWS, tendo uma extensa gama de recursos, dentre eles, o gerenciador de cenários. Talvez, a maior virtude deste programa seja a facilidade com que o operador aprende a utilizá-lo.

3 ESCOAMENTO TRANSIENTE

No estudo de transientes hidráulicos, é necessário se conhecer as condições iniciais do regime permanente e as condições de contorno do sistema.

Um modelo matemático é uma descrição matemática das características de um sistema. Ao iniciar-se a análise de um sistema dinâmico, o primeiro passo é obter o seu modelo. Na descrição da maioria dos sistemas dinâmicos, sejam mecânicos, elétricos ou hidráulicos, utilizam-se, normalmente, equações diferenciais, cujas resoluções permitem que se tenha uma dada resposta do sistema. Quando não é possível se obter a resolução direta das equações diferenciais, faz-se uso de um modelo numérico para fins de análise.

Mendonça (1986) afirma que há diversos métodos numéricos utilizados para analisar transientes hidráulicos, que substituíram os métodos gráficos e algébricos. Esses modelos numéricos possibilitam a análise de sistemas complexos de engenharia hidráulica com alta precisão – por utilizar um maior número de seções de integração - e tempo de cálculo reduzido. Os métodos numéricos mais utilizados atualmente são: Método das Características, Método das Diferenças Finitas, Método dos Elementos Finitos, Método Espectral, Método dos Elementos de Contorno e o Método das Ondas Planas.

Método das Características, que é uma ferramenta de grande importância para a solução de sistemas complexos de engenharia tornou-se popular e é usado extensivamente para a solução de problemas de transientes hidráulicos unidimensionais, especialmente se a velocidade da onda for constante. Este método provou ser superior aos outros métodos em vários aspectos, como a simulação correta da onda íngreme, a ilustração de propagação da onda, a facilidade de programação e eficiência de cálculos (CHAUDHRY, 2014).

3.1 escoamento Transiente em Tubulações

Sistemas que contenham elementos em movimento estão sujeitos a algum tipo de transitório, que pode ocorrer pela necessidade de alteração da movimentação ou por uma paralisação eventual de algum elemento componente do sistema. Define-se transitório como a situação do fluxo não permanente quando o mesmo está variando entre dois estados permanentes.

Existem muitos tipos de condições de contorno que podem provocar transientes. Araújo (2003) cita os tipos mais comuns de transientes em redes que, mais comumente, requerem análise. Esses transientes são:

- mudanças no ajuste de válvulas, acidental ou planejada;
- partida ou parada de bombas;
- variação nas demandas ou consumos.

As redes de distribuição de água existem há centenas de anos, mas os transientes ainda não são considerados nos projetos de forma mais detalhada. A pouca atenção dada às condições transientes é consequência de sistemas antigos, projetados para redes hidráulicas alimentadas por gravidade e dependente de grandes reservatórios, o que causa condições quase permanentes no sistema. Além disso, os diâmetros dos tubos e os comprimentos das linhas eram pequenos, assim como as baixas pressões existentes. Assim, o sistema resumia-se à previsão de uma distribuição equilibrada do fluxo sob as condições de demanda necessárias.

Nos sistemas de distribuição de água modernos, que são alimentados por numerosas estações de bombeamento, os distúrbios no fluxo são comuns. As ondas de alta pressão que podem ser geradas por paradas e partidas de bombas, manobras de válvulas ou influência de eventos acidentais alteram as condições de fluxo bruscamente, podendo causar sérios danos nos tubos e equipamentos hidráulicos.

A complexidade do fenômeno transiente tem induzido, às vezes, a adoção de procedimentos simplificados, como: componentes complexos e outras complicações no próprio sistema físico podem ser ignorados; ou o intervalo de operação e as condições de carregamento na qual o sistema está sujeito são substancialmente reduzidos. A análise transiente não é garantia de ausência de falhas e problemas hidráulicos no sistema de tubos, pois algumas falhas nos tubos podem estar relacionadas com a ocorrência de terremotos, corrosão, etc. Contudo, em projetos ou pesquisas, as condições transientes não devem ser excluídas e uma boa análise implica em investigar o fenômeno transiente sob uma ampla variedade de condições de fluxo, operações e combinações de mecanismos e componentes do sistema. Os benefícios de tal análise incluem uma melhora no modelo, uma operação mais econômica e possivelmente um custo mais baixo (ARAÚJO, 2003).

Existem dois tipos de modelos para se avaliar o fenômeno transiente: os modelos rígidos e os modelos elásticos. Os modelos rígidos, que não consideram os efeitos elásticos da água e da tubulação, são aplicados para descrever os fenômenos de oscilação de massa. Os

modelos elásticos, que consideram os efeitos elásticos da água e da tubulação, é usualmente utilizado para análise de Golpe de Ariete.

Qualquer ajuste em um fluxo provoca distúrbio no regime permanente. Ademais, sendo a água ligeiramente compressível, um mínimo desequilíbrio de fluxo já é suficiente para produzir grandes variações de pressão e permitir que uma grande quantidade de energia seja armazenada.

O uso do modelo de coluna rígida é justificável quando há variações graduais no fluxo de tal forma que os desequilíbrios de massa e energia nas tubulações sejam pequenos. Mudanças rápidas, sejam planejadas ou acidentais, que geram grandes pulsos de pressão capazes de romper a tubulação devem ser avaliadas sob o modelo elástico.

O fluxo transiente em um conduto forçado é governado por equações diferenciais parciais não-lineares (Equação 3.1 e Equação 3.2, abaixo):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (3.2)$$

Onde H é a carga piezométrica em metros, Q é a vazão volumétrica em litros por segundo, A é a área da seção transversal do tubo em metros quadrados, a é a celeridade da onda de pressão em metros por segundo, D é o diâmetro interno da tubulação em metros, f é o fator de atrito de *Darcy-Weisbach*, adimensional, g é a aceleração da gravidade em metros por segundo ao quadrado, x é a distância em metros e t o tempo em segundos.

A Equação 3.1 representa a conservação da massa, enquanto a Equação 3.2 representa a conservação de “momentum”. Em geral não há uma solução analítica simples para esse conjunto de equações. Utiliza-se, portanto, o recurso de métodos numéricos. Antes da aplicação do método numérico, essas equações devem ser transformadas em equações diferenciais ordinárias para serem resolvidas.

3.2 Modelo da Coluna Elástica

Para se resolver o fenômeno do transiente, utilizar-se-á o modelo da coluna elástica através do método das características como ferramenta de modelagem.

3.2.1 Equações Fundamentais do Método das Características

O Método das Características converte as equações parciais da continuidade e da quantidade de movimento (Equação 3.1 e Equação 3.2, respectivamente) em quatro equações diferenciais totais (denominadas equações características), que são expressas na forma de diferenças finitas utilizando o método de intervalos de tempo específicos e suas soluções são obtidas computacionalmente. Dentre as muitas vantagens desse método, estão o fato de os critérios de estabilidade serem pré-estabelecidos, as condições de contorno serem programadas facilmente, sistemas complexos podem ser manipulados, é o método com a melhor precisão entre qualquer método de diferenças finitas e os programas são fáceis de depurar, pois satisfazem todas as condições do estado estacionário (STREETER e WYLIE, 1978).

Por meio do Método das Características, assim como fez Santos (2000), resolvem-se as equações supracitadas a fim de se determinar a carga H e a vazão Q , ambas sendo funções de um instante t em uma seção x . Como a solução explícita para essas equações diferenciais não está disponível, ao invés de as variáveis dependentes Q e H serem expressas em termos das variáveis independentes x e t , a solução dessas equações é obtida quando as variáveis independentes assumem valores discretos, ou seja, em um dado instante, os valores de H e Q serão conhecidos.

Para se aplicar esse método na obtenção dos valores de Q e H , considera-se como condição inicial, no instante $t_0 = 0$, um regime permanente onde a distribuição dos valores de H e Q implicam em valores discretos da abscissa x (BARBOSA, 2006).

Repetindo a Equação 3.2 e multiplicando a Equação 3.1 por gA , estas podem ser escritas da seguinte forma:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3.3)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

Submetendo as Equações 3.3 e 3.4 à combinação linear mostrada na Equação 3.5, obtém-se a Equação 3.6.

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (3.5)$$

Portanto:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3.6)$$

As equações originais em termos de H e Q são obtidas ao se admitir dois valores reais não nulos quaisquer para o parâmetro λ .

Como a vazão $Q(x,t)$ e a carga $H(x,t)$ são funções da posição e do tempo e são soluções das Equações 3.3 e 3.4, tem-se, pela Regra da Cadeia, que as derivadas totais são:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.7)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.8)$$

O parâmetro λ é definido, a partir das Equações 3.7 e 3.8, pela dependência entre x e t . Portanto:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \Rightarrow \lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (3.9)$$

A Equação 3.6 pode ser escrita como:

$$L = \frac{dQ}{dt} + \lambda gA \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3.10)$$

Substituindo-se o valor de λ obtido pela Equação 3.9 na Equação 3.10, têm-se as quatro equações diferenciais ordinárias resultantes do Método das Características:

$$L_1^* = \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3.11)$$

$$\text{Se } \frac{dx}{dt} = a \quad (3.12)$$

$$L_2^* = \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3.13)$$

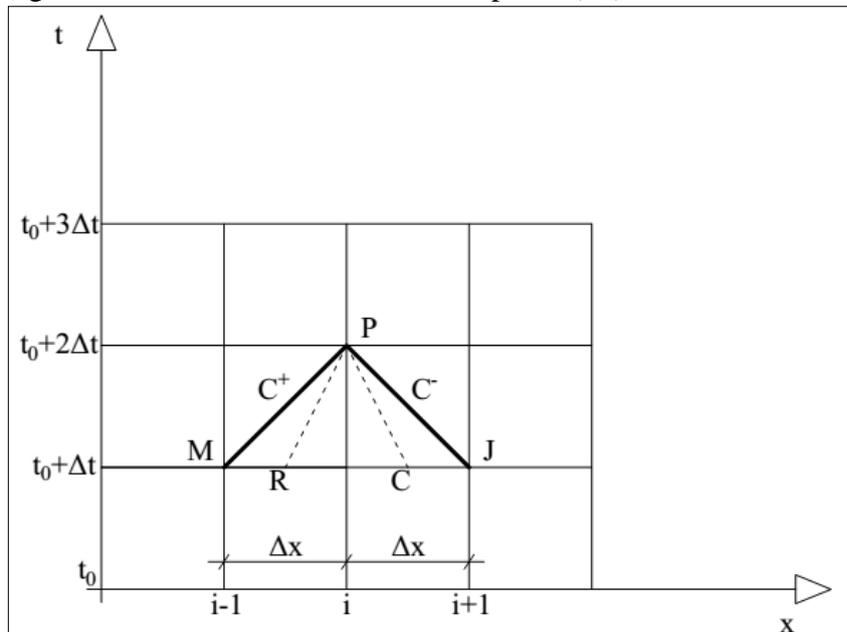
$$\text{Se } \frac{dx}{dt} = -a \quad (3.14)$$

As equações descritas acima representam o fenômeno hidráulico da mesma forma que as Equações 3.3 e 3.4, uma vez que não se fez nenhuma aproximação matemática durante a transformação das equações parciais originais, apenas se usou os dois valores do parâmetro λ . Entretanto, diferenciam-se no fato de que são válidas se, e somente se, as equações 3.12 e 3.14 forem satisfeitas (STREETER e WYLIE, 1978).

Ainda de acordo com Streeter e Wylie (1978), as Equações 3.12 e 3.14 representam duas linhas com declividade $\pm \frac{1}{a}$ no plano (x,t) , denominadas linhas características e representadas por C^+ (linha característica positiva, com coeficiente de inclinação igual a $+\frac{1}{a}$) e C^- (linha característica negativa, com coeficiente de inclinação igual a $-\frac{1}{a}$). As linhas características no plano (x,t) são mostradas na Figura 2.

Segundo Righetto (1972) *apud* Santos (2000), as Equações 3.11 e 3.13 são as equações fundamentais associadas, respectivamente, com as Equações 3.12 e 3.14.

Figura 3.1– Linhas Características no plano (x,t) .



Fonte: Adaptado de Streeter e Wylie (1978).

De acordo com Streeter e Wylie (1978), ao se integrar as Equações 3.11, 3.12, 1.13 E 3.14 por diferenças finitas de primeira ordem, obtém-se as seguintes equações algébricas:

$$C^+ : (Q_P - Q_M) + \frac{gA}{a}(H_P - H_M) + \frac{f}{2DA} \Delta t Q_M |Q_M| = 0 \quad (3.15)$$

$$C^- : (Q_P - Q_J) - \frac{gA}{a}(H_P - H_J) + \frac{f}{2DA} \Delta t Q_J |Q_J| = 0 \quad (3.16)$$

Rearranjando as equações (3.15) e (3.162), as equações características tornam-se:

$$C^+ : dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \quad \text{para} \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (3.17)$$

$$C^- : -dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \quad \text{para} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (3.18)$$

onde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad (3.19)$$

$$R = \frac{fa}{2gDA^2} \quad (3.20)$$

Integrando as equações (3.17) e (3.18) ao longo de MP e JP respectivamente (Figura 3.1):

$$C^+ : \int_M^P dH + B \int_M^P dQ + R \int_M^P Q|Q|dt = 0 \quad (3.21)$$

$$C^- : -\int_J^P dH + B \int_J^P dQ + R \int_J^P Q|Q|dt = 0 \quad (3.22)$$

Os dois primeiros termos das equações (3.21) e (3.22) podem ser facilmente avaliados. Contudo, o terceiro termo destas, representando perdas por atrito, apresenta certa dificuldade, pois não se conhece explicitamente a variação de Q com t . Como os intervalos de tempo usados para resolver essas equações em problemas práticos são usualmente pequenos, uma técnica de primeira ordem sugerida por WYLIE e STREETER (1978) é suficientemente viável e precisa. Usando esta técnica para o termo do atrito, as equações (3.21) e (3.22) tornam-se:

$$C^+ : (H_P - H_M) + B(Q_P - Q_M) + R\Delta t Q_M |Q_M| = 0 \quad (3.23)$$

$$C^- : -(H_P - H_J) + B(Q_P - Q_J) + R\Delta t Q_J |Q_J| = 0 \quad (3.24)$$

com a aproximação do termo do atrito:

$$\int_M^P Q_M |Q_M| dt \cong Q_M |Q_M| \Delta t \quad \text{para } C^+ \quad (3.25)$$

$$\int_J^P Q_J |Q_J| dt \cong Q_J |Q_J| \Delta t \quad \text{para } C^- \quad (3.26)$$

Esse método é conhecido como explícito e produz usualmente resultados satisfatórios em aplicações na engenharia. Entretanto, se o termo do atrito tornar-se muito grande, a aproximação de primeira ordem pode produzir resultados instáveis. Para tais casos, um método previsor-corretor ou uma aproximação de segunda ordem deve ser usada para evitar instabilidade.

A teoria desenvolvida será válida se o fluxo transiente não flutuar muito distante do estado permanente por um longo período de tempo.

3.2.2 Cálculo da celeridade

HALLIWELL apud CHAUDHRY (1987) apresenta uma expressão geral para o cálculo da velocidade da onda:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad (3.27)$$

onde: ψ é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto; E é o módulo de elasticidade de Young da parede do conduto; K e ρ são o módulo de elasticidade e a massa específica do fluido, respectivamente. Existem várias expressões que calculam o parâmetro ψ para diferentes condições dos condutos. Neste trabalho, os condutos serão considerados como elásticos de paredes finas. A expressão é a seguinte:

$$\psi = \frac{D}{e'}(1 - 0,5\nu') \quad (3.28)$$

onde D é o diâmetro do conduto, e' é a espessura da parede e ν' é a razão de Poisson.

3.2.3 Convergência e Estabilidade

Para se obter uma solução numérica precisa de uma equação diferencial parcial, as aproximações por diferenças finitas devem satisfazer as condições de convergência e estabilidade (CHAUDHRY, 2014).

Utilizando-se métodos numéricos é impossível obter-se uma solução exata para equações diferenciais, pois o computador só admite um número finito de casas decimais. Quando as dimensões da malha Δx e Δy são forçadas ao valor zero, a solução se torna bem próxima da realidade e o esquema é dito convergente. Entretanto, a redução das dimensões da malha gera um aumento de operações aritméticas e, conseqüentemente, amplia os erros computacionais embutidos nos arredondamentos e truncamentos do cálculo do transiente (SANTOS, 2000 e BARBOSA, 2006).

De acordo com Chaudhry (2014), quando o erro acumulado cresce tanto quanto a solução progride, o esquema de diferenças finitas é dito instável. Para se obter estabilidade e convergência, deve-se satisfazer a inequação conhecida como Condição de Estabilidade de Courant-Friedrich-Lewy (Equação 3.24), pois os métodos de determinação da convergência e estabilidade para equações não lineares são difíceis de serem obtidos, gerando a necessidade da adoção de critérios aplicados para torná-los válidos.

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq a \quad (3.29)$$

Do ponto de vista geométrico, a condição expressa pela equação acima, como ressaltou Santos (2000), exige que as linhas características positiva e negativa, que passam por P, interceptem a linha MJ entre MD (R) e JD (S), respectivamente.

Para que a Equação 3.24 tenha uma solução mais acurada, Santos (2000), baseando-se nos resultados já apresentados por Chaudhry (1987), Streeter (1978), Almeida (1981) e Koelle (1983), sugere que:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = a \quad (3.30)$$

Se a condição acima não for satisfeita, Streeter e Wylie (1978) afirmam que os valores em R e S podem ser obtidos através de interpolação numérica, uma vez que se conhece as condições nos pontos M, D e J. Ressalta-se, entretanto, que esse processo pode causar dispersão numérica.

Streeter e Wylie afirma que em situações de fluxo instável, nos condutos onde há perdas de energia devido ao atrito (condutos muito longos, diâmetros pequenos, fluidos muito viscosos ou altas velocidades), o tratamento desse termo é dado por uma aproximação de primeira ordem. O critério de estabilidade desenvolvido para esse modelo é dado por:

$$f \frac{\Delta t \bar{Q}}{4DA} \leq 1 \quad (3.31)$$

Onde:

f é o coeficiente de atrito;

\bar{Q} é a vazão média durante o transiente, $[L]^3[T]^{-1}$;

D é o diâmetro do conduto, $[L]$;

A é a área do conduto, $[L]^2$.

3.2.4 Incremento de Tempo

Segundo Santos (2000), para sistemas complexos – que possuem dois ou mais condutos distintos em um mesmo sistema – é necessário que se utilize o mesmo incremento de tempo Δt em todos os condutos, para que se possa utilizar as condições de contorno nas junções e, então, determinar as incógnitas em um dado instante. Portanto, o incremento de tempo Δt deve ser escolhido juntamente com o número (inteiro) de divisões N de modo a obedecer a condição de Courant. Daí, tem-se que:

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i N_i} \quad (3.32)$$

Onde:

L_i é o comprimento do conduto i ;

N_i é o número de trechos do conduto i ;

a é a celeridade da onda no conduto i .

Em sistemas que os condutos possuem comprimentos distintos, a condição proposta na Equação 2.52 pode ser garantida, com obtenção de resultados suficientemente acurados, com apenas um simples ajuste na celeridade de propagação das perturbações em todos os trechos. Tais ajustes são aceitáveis, pois a celeridade de propagação das perturbações não é precisamente conhecida (LESSA, 1984).

3.2.5 Condições de Contorno

Assim como afirmam Lessa (1984), Santos (2000) e Barbosa (2006), como as equações características positiva (Equação 3.17) e negativa (Equação 3.18) são válidas somente nas seções internas do conduto, para as seções de montante e jusante do tubo, apenas uma equação característica pode ser utilizada. Portanto, uma ou mais equações relacionando a carga H e/ou a vazão Q com o tempo devem ser fornecidas para solucionar o problema. Essas equações, denominadas condições de contorno ou de fronteira, são constituídas por qualquer acessório na linha de adução ou junção de trechos de tubos com características físicas distintas.

O método das características providencia um meio sistemático de cálculo das condições transientes em uma tubulação. Cada trecho é dividido em $N-1$ segmentos de comprimento Δx com N seções. No início de cada trecho (primeira seção) e ao término do trecho (última seção) uma equação de contorno e uma equação característica são necessárias. Nos nós interiores ($1 < i < N$), ambas as equações características são empregadas. Aplicando este esquema de discretização, obtêm-se equações para as diversas seções de uma rede hidráulica (ARAÚJO, 2003).

4 ALGORITMOS GENÉTICOS

A Computação Evolutiva é uma aproximação que busca simular o comportamento humano ou de outras espécies por meio de programas computacionais. Desde a década de 1960, a Computação Evolutiva vem tentando imitar as formas mais primitivas de inteligência. Juntas, a Computação Evolutiva, as Redes Neurais e as Lógicas Fuzzy são os três maiores domínios da Inteligência Computacional. A Computação Evolutiva é composta pelos Algoritmos Genéticos, as Estratégias Evolutivas e a Programação Evolutiva. Os Algoritmos Genéticos serão abordados, nesse trabalho, como técnica de otimização, envolvendo suas aplicações na hidráulica e, particularmente, na calibração de redes de água.

Darwin (1859) anunciou o processo de seleção natural, onde quanto melhor a adaptação de indivíduo ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver neste meio e de gerar descendentes. Baseando-se nessa lei, os Algoritmos Genéticos foram desenvolvidos como uma técnica de busca estocástica para a melhor solução de um problema que está firmado no conjunto de regras e operações fundamentadas no princípio da seleção natural.

Os Algoritmos Genéticos foram inventados por John Holland e desenvolvidos por ele e sua equipe de pesquisa durante as décadas de 1960 e 1970 na Universidade de Michigan. A ideia do desenvolvimento foi estudar o fenômeno da adaptação da forma que ocorre na natureza e explicar os caminhos em que fosse possível importar os mecanismos da adaptação natural para os sistemas computacionais.

Os Algoritmos Genéticos são firmados em fenômenos biocientíficos e possuem conceitos originados das ciências biológicas. O Quadro 4.1, a seguir, apresenta os termos utilizados e suas relações com os Algoritmos Genéticos e a biologia.

Os Algoritmos Genéticos constituem um método que altera a população de cromossomos para formar uma nova população utilizando a seleção natural junto com operadores inspirados na genética. Cada cromossomo é formado por genes, onde cada gene é um alelo em particular. O operador *Seleção* escolhe os cromossomos mais aptos na população para reprodução. O *Crossover* promove o intercâmbio de subpartes de dois cromossomos. A *Mutação* muda aleatoriamente o valor do alelo em uma determinada posição do cromossomo e a *Inversão* reverte a ordem das seções contíguas do cromossomo, rearranjando a ordem da disposição dos genes (GAMBALE, 2000).

Quadro 4.1 – Conceitos Biológicos.

| Descrição | Relação com Algoritmo Genético | Relação com Ciências Biológicas |
|--|--|--|
| Gene: unidade genética que determina as características de um indivíduo. | 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). | Possível solução para o 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, 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. |

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

4.1 Representação dos Parâmetros

A função a ser otimizada é representada por um ponto no espaço de busca, denominado de cromossomo. Existem duas formas de se representar um cromossomo: a representação binária, de fácil utilização e análise teórica simplificada, e a representação real, que possibilita a utilização de funções matemáticas para a criação de novos operadores genéticos.

4.1.1 Representação Binária

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

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (4.1)$$

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

O binário pode ser escrito na base dois. Para tanto, cada posição digital representará uma potência de dois, da mesma forma que nos números decimais cada posição, uma potência de dez. Tomando como exemplo o número 14289, tem-se que sua representação será:

$$1 \times 10^4 + 4 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 9 \times 10^0$$

Na base dois, a base usada nos computadores binários, o número 110101 é representado por:

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

A conversão do número inteiro na base dez para binário será feita da direita para a esquerda, isto é, determina-se primeiro os algarismos das unidades (o que vai ser multiplicado por 2^0), em seguida o segundo algarismo da direita (o que vai ser multiplicado por 2^1), e assim sucessivamente.

É importante observar se o número é par ou ímpar. Em binário, o número par termina em 0 e o ímpar em 1. Assim, determina-se o algarismo da direita, pela simples divisão do número por 2. Se o resto da divisão for 0 (número par) o algarismo da direita é 0, se for 1 (número ímpar) o algarismo da direita é 1. Como exemplo, o número 45 pode ser convertido para binário da seguinte forma:

| | | | | | | | |
|----|----|----|---|---|---|---|---|
| 45 | 2 | | | | | | |
| 1 | 22 | 2 | | | | | |
| | 0 | 11 | 2 | | | | |
| | | 1 | 5 | 2 | | | |
| | | | 1 | 2 | 2 | | |
| | | | | 0 | 1 | 2 | |
| | | | | | 1 | 0 | 0 |

$45 = 101101$

Na representação binária em um algoritmo genético, o comprimento do cromossomo depende da precisão desejada. Por exemplo: o domínio da variável x_j é $[a_j, b_j]$ e a precisão desejada é de 5 casas decimais. A precisão implica que o intervalo do domínio de cada variável possa ser dividido no mínimo por $(b_j - a_j) \times 10^5$ intervalos. Dessa forma, o número de bits necessários para uma variável pode ser calculado como segue:

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times 10^5 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (4.2)$$

Onde m_j = número de bits necessários em um cromossomo. A determinação de m_j será mostrada a seguir.

O mapeamento do cromossomo binário para um número real na variável x_j pode ser calculado assim (GEN e CHEN, 1997):

$$x_j = a_j + \text{decimal (indivíduo } j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (4.3)$$

Onde: decimal (indivíduo_{*j*}) representa o valor decimal do cromossomo *j* para a variável de decisão x_j .

Considerando o seguinte problema de otimização (GEN & CHEN, 1997) e supondo que a precisão desejada seja de 4 casas decimais:

$$\begin{aligned} \max f(x_1, x_2) &= 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2) \\ &- 3.0 \leq x_1 \leq 12.1 \\ &4.1 \leq x_2 \leq 5.8 \end{aligned}$$

Os bits necessários para as variáveis x_1 e x_2 são calculados da equação (4.2):

$$\begin{aligned} (12.1 - (-3.0)) \times 10^4 &= 151000 \\ 2^{17} < 151000 \leq 2^{18}, & \quad m_1 = 18 \\ (5.8 - 4.1) \times 10^4 &= 17000 \\ 2^{14} < 17000 \leq 2^{15}, & \quad m_2 = 15 \\ m &= m_1 + m_2 = 18 + 15 = 33 \end{aligned}$$

O comprimento total do cromossomo é 33. Um cromossomo qualquer da população será representado assim:

$$\overbrace{\underbrace{0000010101}_{18 \text{ bits}} \underbrace{00101001}_{15 \text{ bits}}}_{33 \text{ bits}} \quad \underbrace{1011110111}_{15 \text{ bits}} \quad \underbrace{11110}_{15 \text{ bits}}$$

Os valores correspondentes para as variáveis x_1 e x_2 são:

| | Número Binário | Número Decimal |
|-------|--------------------|----------------|
| x_1 | 000001010100101001 | 5417 |
| x_2 | 1011110111111110 | 24318 |

A representação binária é historicamente importante, uma vez que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de Holland (1975). Essa representação tradicional é fácil de utilizar e manipular, além de ter uma simples de análise teórica. Contudo, se um problema tem parâmetros contínuos e o usuário quer trabalhar com boa precisão numérica, ele precisará armazenar cromossomos longos na memória. Para cada ponto decimal acrescentado na precisão, é necessário adicionar 3,3 bits na cadeia. Se 8 casas decimais forem necessárias, $8 \times 3,3 \approx 27$ bits serão utilizados para cada parâmetro. Quando há muitos parâmetros, obtêm-se cadeias de bits que podem fazer o algoritmo convergir vagorosamente.

4.1.2 Representação Real

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

$$\frac{(2^l - 1)V}{(V_{max} - V_{min})} \quad (4.4)$$

A representação real, ou com ponto flutuante, gera cromossomos menores e é compreendida mais naturalmente do que a cadeia de bits. No exemplo anterior referente à codificação binária, o cromossomo em questão seria representado por um vetor, (-2.687969; 5.361653), de dois números com ponto flutuante conforme a Equação 4.3:

$$x_1 = -3.0 + 5147 \times \frac{12.1 - (-3.0)}{2^{18} - 1} = -2.687969$$

$$x_2 = 4.1 + 24318 \times \frac{5.8 - 4.1}{2^{15} - 1} = 5.361653$$

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 é necessária uma maior exatidão nos cálculos. A aplicação desses parâmetros possibilita a utilização de funções matemáticas para a criação de novos operadores genéticos proporcionando uma maior diversidade de opções para otimização do problema.

Os testes pilotos realizados na fase preliminar de preparação deste estudo permitiram escolher a representação binária como a padrão neste trabalho.

4.2 Definição da Função Objetivo

As técnicas de otimização consistem em maximizar ou minimizar uma função. Caso a solução do problema seja um máximo global, os valores da aptidão podem ser obtidos através da própria função objetivo. Caso não seja adequado utilizar o valor da função objetivo como valor de aptidão, é necessária a conversão através de ordenamento e escalonamento.

Há funções objetivos que levam em consideração várias medidas como: cargas hidráulicas, vazões nos tubos, demandas e custos. Estas medidas são aglomeradas na função objetivo através da definição de pesos que servem como indicadores dos respectivos graus de influência da medida no processo de otimização.

Para o processo de calibração proposto neste estudo, utilizando-se o Método Transiente Inverso em conjunto com um Algoritmo Genético, serão necessárias medidas de cargas hidráulicas em um ou mais nós da rede hidráulica durante um certo intervalo de tempo. A ideia de trabalhar somente com cargas hidráulicas tem o objetivo de justificar a eficiência dos processos inversos ao mesmo tempo em que simplifica a construção da função objetivo.

4.3 População Inicial

Genericamente, a população inicial é formada pela geração aleatória de todos os indivíduos. Contudo, em casos de populações pequenas, há o risco de algumas regiões não serem representadas. Para amenizar esse problema, pode-se gerar uma população inicial uniforme com pontos igualmente espaçados ou ainda gerar a primeira metade da população de forma aleatória e a segunda metade a partir da primeira invertendo as posições de cada um dos pontos no espaço amostral.

Silva (2006) comenta ainda a técnica denominada *seeding*, muito útil em problemas de otimização, que consiste em inserir soluções obtidas por outros métodos de otimização na população inicial para garantir que a solução gerada pelo algoritmo genético não seja pior que as soluções inicialmente inseridas.

4.4 Estrutura dos Algoritmos Genéticos

Araújo (2003) destaca o que as técnicas de otimização por busca, geralmente, apresentam:

- Um espaço de busca, onde estão todas as possíveis soluções do problema;

- Uma função objetivo (algumas vezes chamada de função de aptidão na literatura de AG's), que é utilizada para avaliar as soluções produzidas, associando a cada uma delas um valor.

Em termos matemáticos, a otimização consiste em achar a solução que corresponda ao ponto de máximo ou mínimo da função objetivo. As técnicas de otimização convencional por busca apresentam dificuldades em localizar o ponto de máximo global de uma função com múltiplos pontos de máximo.

Durante o processo evolutivo da população inicial, é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota (denominada de aptidão), refletindo a qualidade da solução que ele representa. Os membros selecionados podem sofrer modificações em suas características fundamentais através dos operadores de *crossover* (cruzamento ou recombinação) e mutação, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

No geral, um cromossomo representa um conjunto de parâmetros da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada. O conjunto de todas as configurações que o cromossomo pode assumir forma o seu espaço de busca. Se o cromossomo representa n parâmetros de uma função, então o espaço de busca é um espaço com n dimensões. Para funções objetivos com múltiplas variáveis de decisão, tais variáveis são representadas na mesma cadeia de bit, com cada uma ocupando uma parte da cadeia. A cada cromossomo s_i é atribuída uma aptidão f_i . Aptidão é um valor que avalia quão boa é a solução codificada em s_i .

Após a geração da população inicial, o Algoritmo Genético aplica os operadores de recombinação e mutação aos melhores cromossomos da população inicial para gerar cromossomos filhos. Os melhores cromossomos são escolhidos por meio de um processo de seleção. Os operadores de recombinação e mutação são os principais mecanismos dos Algoritmos Genéticos para explorar regiões desconhecidas do espaço de busca.

4.4.1 Seleção e Elitismo

O operador Seleção é fundamentado na Lei da Seleção Natural de Charles Darwin e compreende na seleção dos melhores indivíduos da população (indivíduos com alta aptidão) para compor uma população intermediária que sobrevive e gera descendentes para a próxima geração.

A escolha dos pais pode ser realizada de diversos modos e dentre os operadores de seleção dos algoritmos genéticos destacam-se o torneio, a roda da roleta, a amostragem estocástica universal, a amostragem determinística e o *remainder stochastic sampling*.

Para esse trabalho será adotado um procedimento de seleção proporcional à aptidão baseado na ideia do *Elitismo*. O *Elitismo* foi proposto por DEJONG (1975) e é uma estratégia que permite transferir os melhores cromossomos de uma geração para outra sem alterações. Isto ocorre devido ao corte do cruzamento ou à ocorrência de mutação.

O procedimento de seleção com elitismo adotado é o seguinte:

1. Seja a população de NC indivíduos (a_1, a_2, \dots, a_{NC});
2. A aptidão, $F_{obj}(a_i)$, de cada indivíduo é calculada conforme o valor da função objetivo;
3. Faz-se o ordenamento crescente da aptidão (para problema de minimização);
4. Selecionam-se os melhores indivíduos deste ordenamento de maneira a formar uma população de $p_e \times NC$ indivíduos, onde p_e está sendo definido como taxa de elitismo;
5. Forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos (dentre os melhores) que irão compor a população de pais.
6. Finalmente vem a sucessão. A população de indivíduos para a próxima geração é formada com um percentual para os cromossomos dos pais e dos cromossomos dos filhos, dentre aqueles de melhor aptidão. Estabelece-se, então, uma probabilidade de sucessão: p_s .

Este procedimento visa melhorar o desempenho do AG.

4.4.2 Recombinação

A geração de novos indivíduos é feita através da reprodução, que nos Algoritmos Genéticos é representada pelo operador Recombinação ou cruzamento (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.

A forma tradicional de recombinação na representação binária é o cruzamento de um ponto (simples), que corta a cadeia de bits dos cromossomos pais em uma posição aleatória produzindo duas partes de cada cromossomo. A recombinação se dá na permuta das

partes cortadas gerando, assim, dois novos cromossomos. A Figura 4.1, a seguir, ilustra o comportamento desse operador. Existem também os operadores de n pontos, que cortam a cadeia de bits em n pontos escolhidos aleatoriamente.

Figura 4.1 – Recombinação de um ponto.

$$\begin{array}{l} \text{Pai}_1 = (01100011011 \| 100001101) \\ \text{Pai}_2 = (11001100110 \| 000010010) \\ \text{Filho}_1 = (01100011011 \| 000010010) \\ \text{Filho}_2 = (11001100110 \| 100001101) \end{array}$$

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

A escolha do ponto de corte não é constante em toda a população, ou seja, para cada par de pais um novo número inteiro n é gerado aleatoriamente. Não ocorrendo o cruzamento, os filhos serão iguais aos pais (isto permite que algumas soluções sejam preservadas). É prática comum utilizar probabilidade de cruzamento entre 60% e 100% (ARAÚJO, 2003).

A recombinação aritmética produz filhos através da combinação linear de dois cromossomos pais sem extrapolar o intervalo entre eles. Os filhos gerados tem o seguinte formato:

$$\text{Filho}_{1i} = \beta \cdot \text{Pai}_{1i} + (1 - \beta) \cdot \text{Pai}_{2i} \quad (4.7a)$$

$$\text{Filho}_{2i} = (1 - \beta) \cdot \text{Pai}_{1i} + \beta \cdot \text{Pai}_{2i} \quad (4.7b)$$

Onde β é um número aleatório contido no intervalo $[0, 1]$, que pode ou não variar para cada par de gene.

4.4.3 Mutação

A mutação consiste em fazer alterações nos valores de um ou mais genes num dado cromossomo. Em cromossomos binários, significa a inversão aleatória dos bits do genótipo. A mutação é considerada um método mais para recuperar material genético perdido do que de procura de uma solução melhor.

Em cromossomos binários a mutação simples inverte os valores de bits, ou seja, muda o valor de um dado bit de 1 para 0 ou o contrário. A Figura 4.2 apresenta um exemplo

em que dois bits do primeiro filho e um bit do segundo sofrem mutação (bits estes que passaram no teste de probabilidade).

Figura 4.2 – Mutação simples para codificação binária.

| | | |
|--------|--------------------------|---|
| Antes | <i>filho₁</i> | (00101010111010010101100) |
| | <i>filho₂</i> | (00111111010100000111111) |
| Depois | <i>filho₁</i> | (0010 <u>0</u> 0101110100101 <u>1</u> 1100) |
| | <i>filho₂</i> | (00111111010 <u>0</u> 00000111111) |

Fonte: Araújo (2003).

A mutação uniforme é a simples substituição de um gene por um número aleatório gerado de uma distribuição uniforme, conforme apresentado na Equação 4.8, abaixo.

$$Filho_1 = \begin{cases} \text{uniforme}(a_i; b_i) & \text{se } i = j \\ Pai_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.8)$$

Onde a_i e b_i representam os limites do intervalo permitido para o gene e $Filho_1$ e $\text{uniforme}(a_i; b_i)$ representa um número aleatório de uma distribuição uniforme no intervalo $[a_i; b_i]$.

4.5 Algoritmos Genéticos e Otimização Convencional

A fim de situar os Algoritmos Genéticos no contexto das ferramentas de calibração, são consideradas as principais classes de métodos de otimização, dispostas no Quadro 4.2, a seguir.

Quadro 4.2 – Métodos de Otimização.

| Métodos de Otimização (continua) | | | |
|----------------------------------|--|--|--|
| Método de Otimização | Descrição | Vantagens | Desvantagens |
| Gerar-e-Testar | Gera aleatoriamente ou sistematicamente possíveis soluções que são avaliadas até que sejam encontradas soluções satisfatórias. | Localização do ponto ótimo global, em funções com vários ótimos locais. Capacidade de otimização de funções complexas e com vários parâmetros. | Baixa velocidade de convergência, o que gera alto custo computacional. |

| Métodos de Otimização (continuação) | | | |
|--|---|--|--|
| Método de Otimização | Descrição | Vantagens | Desvantagens |
| Métodos Analíticos | As soluções são identificadas por meio de técnicas do Cálculo Diferencial. | 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, o que gera 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 |

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

Apesar dessas vantagens, os AG's não são eficientes para muitos problemas. São bastante lentos e não raro ainda estão avaliando a população inicial enquanto muitos métodos de Subida de Encosta já têm encontrado a solução. O principal campo de aplicação dos AG's é em problemas complexos, com múltiplas variáveis de decisão e mínimos/máximos, para os quais não é conhecido um algoritmo de otimização eficiente.

5 METODOLOGIA APLICADA

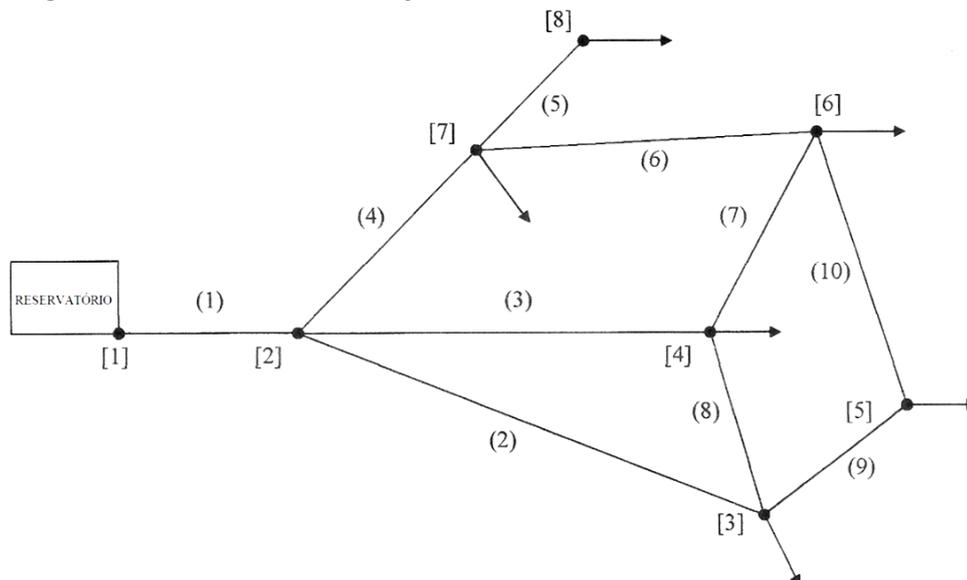
Para este trabalho, escolheu-se a rede de distribuição hipotética criada por Walski (1983b) e adaptada por Gambale (2000). As características físicas de comprimento, diâmetro e rugosidade são conhecidas. Os nós terão elevação igual a zero.

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 (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. Esse estudo é compreendido em três fases: calibração das rugosidades da rede submetida a regime transiente rápido, calibração das rugosidades da rede submetida a regime transiente lento e a comparação das duas calibrações obtidas.

5.1 Rede Hipotética

Nesse presente estudo utilizou-se a rede criada por Walski (1983b) e utilizada por Gambale (2000) na versão adaptada apresentada por Araújo (2003). A Figura 5.1, a seguir, ilustra a rede hipotética adotada.

Figura 5.1 – Rede de distribuição utilizada no estudo.



Fonte: Araújo (2003).

Na representação da rede hipotética (Figura 5.1), os nós estão representados por algarismos entre colchetes e os tubos estão representados por algarismos entre parênteses. As características físicas dessa rede são conhecidas e estão dispostas na Tabela 5.1, a seguir.

Tabela 5.1 – Características Físicas da Rede.

| Tubo | L (m) | D (m) | ε (mm) |
|-------------|--------------|--------------|--------------------------------------|
| 1 | 700,0 | 0,500 | 0,0100 |
| 2 | 1800,0 | 0,250 | 0,3100 |
| 3 | 1520,0 | 0,400 | 0,1100 |
| 4 | 1220,0 | 0,300 | 0,0600 |
| 5 | 600,0 | 0,300 | 0,5100 |
| 6 | 1220,0 | 0,200 | 0,3100 |
| 7 | 920,0 | 0,250 | 0,2100 |
| 8 | 300,0 | 0,150 | 0,2600 |
| 9 | 600,0 | 0,200 | 0,5600 |

Fonte: Adaptado de Gambale (2000).

Os parâmetros da rede possuem as seguintes unidades: o comprimento “L” dos tubos está em metros (m), a rugosidade “ ε ” em milímetros (mm) e a vazão “Q” em litros por segundo (L/s).

As rugosidades reais dispostas na Tabela 5.1 foram obtidas através de uma associação ao coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (C) apresentado por Gambale (2000). Para cada valor de C , designou-se uma rugosidade ε , admitida como valor real de parâmetro de comparação para os valores a serem obtidos nas calibrações.

As demandas nodais da rede hipotética estão dispostas na Tabela 5.2, a seguir. A elevação da linha piezométrica se dará no reservatório, cujo nível adotado, com base em estudos prévios, é de 60 metros.

Tabela 5.2 – Demandas nodais.

| Nó | Demanda (L/s) |
|-----------|----------------------|
| 1 | 0.0 |
| 2 | 0.0 |
| 3 | 30.0 |
| 4 | 125.0 |
| 5 | 30.0 |
| 6 | 95.0 |
| 7 | 60.0 |
| 8 | 75.0 |

5.2 Indexação

Streeter e Wylie (1978) propõem que a indexação tem a função de descrever a geometria e as propriedades de um sistema de forma com que um programa consiga, eficientemente, resolver as condições de contorno. Desse modo cada nó do sistema pode ser escrito de uma maneira legível para a linguagem desejada considerando algumas condições, como é mostrado a seguir no Quadro 5.1.

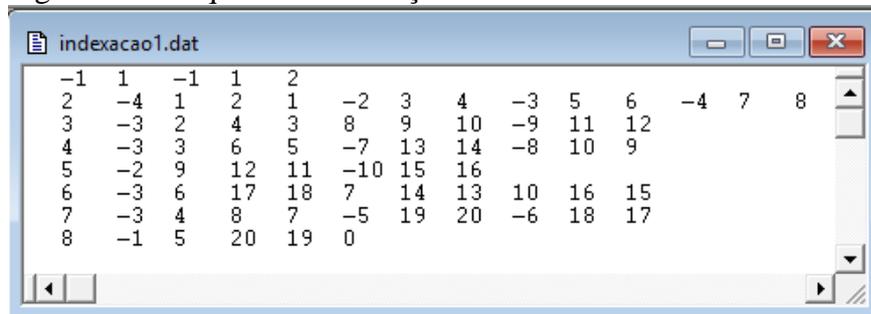
Quadro 5.1 – Código para a indexação dos nós de acordo com os tipos possíveis.

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

Cada nó do sistema é descrito como uma sequência de algarismos, seguindo o esquema: (\pm número do nó), (\pm quantidade tubos que se ligam ao nó), (\pm número do tubo), (número da seção do tubo no nó), (número da seção do tubo no nó seguinte).

Quanto à variação entre positivo e negativo no algarismo representando o número do tubo, considera-se que o mesmo é positivo quando a vazão está chegando ao nó e negativo quando a vazão está saindo do nó. Considerou-se que a todos os nós seriam do tipo “nó com demanda” com exceção do nó 1, que é tipo reservatório. O Arquivo de indexação dos nós da rede hipotética está mostrado na Figura 5.2, a seguir.

Figura 5.2 - Arquivo de indexação.



```

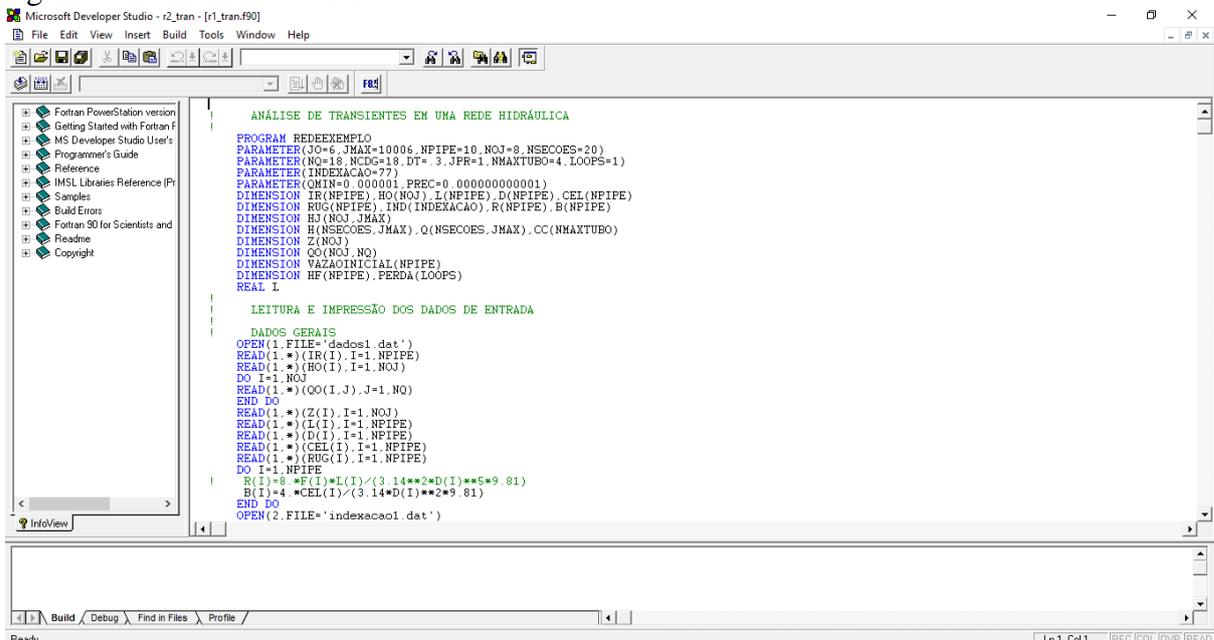
indexacao1.dat
-1 1 -1 1 2
2 -4 1 2 1 -2 3 4 -3 5 6 -4 7 8
3 -3 2 4 3 8 9 10 -9 11 12
4 -3 3 6 5 -7 13 14 -8 10 9
5 -2 9 12 11 -10 15 16
6 -3 6 17 18 7 14 13 10 16 15
7 -3 4 8 7 -5 19 20 -6 18 17
8 -1 5 20 19 0
  
```

5.3 Cargas nos Nós e Vazões nos Tubos em Regime Permanente

Os valores das cargas hidráulicas nos nós e vazões nos tubos são sintéticos, pois esse trabalho trata do estudo de uma rede hipotética. O simulador utilizado para esse cálculo, R1, foi desenvolvido por Araújo (2003) e utiliza a linguagem FORTRAN.

R1 é capaz de discretizar a rede e realizar as interações necessárias para o cálculo em regime permanente. Os dados de entrada em R1 são as características físicas da rede apresentadas na Tabela 5.1, assim como outros dados de vazões de demanda em cada nó. A Figura 5.3, a seguir, apresenta a interface do programa R1.

Figura 5.3 – Interface de R1.



```

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

ANÁLISE DE TRANSIENTES EM UMA REDE HIDRÁULICA
PROGRAM REDEEXEMPLO
PARAMETER(JO=5, JMAX=10006, NPIPE=10, NOJ=8, NSECOES=20)
PARAMETER(NQ=18, NCDG=18, DT= 3, JPR=1, NMAXTUBO=4, LOOPS=1)
PARAMETER(INDEXACAO=777)
PARAMETER(OHIN=0, 000001, PREC=0, 0000000000001)
DIMENSION IR(NPIPE), HO(NOJ), L(NPIPE), D(NPIPE), CEL(NPIPE)
DIMENSION RUG(NPIPE), IND(INDEXACAO), R(NPIPE), B(NPIPE)
DIMENSION HJ(NOJ, JMAX)
DIMENSION H(NSECOES, JMAX), Q(NSECOES, JMAX), CC(NMAXTUBO)
DIMENSION Z(NOJ)
DIMENSION QO(NOJ, NOJ)
DIMENSION VAZAOINICIAL(NPIPE)
DIMENSION HF(NPIPE), PERDA(LOOPS)
REAL I

LEITURA E IMPRESSÃO DOS DADOS DE ENTRADA

DADOS GERAIS
OPEN(1, FILE='dados1.dat')
READ(1, *) (IR(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (HO(I), I=1, NOJ)
DO I=1, NOJ
  READ(1, *) (QO(I, J), J=1, NQ)
END DO
READ(1, *) (Z(I), I=1, NOJ)
READ(1, *) (L(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (D(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (CEL(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (RUG(I), I=1, NPIPE)
DO I=1, NPIPE
  R(I)=8. *F(I)*L(I)/(3.14**2*D(I)**5*9.81)
  B(I)=4. *CEL(I)/(3.14*D(I)**2*9.81)
END DO
OPEN(2, FILE='indexacao1.dat')

```

Os arquivos de entrada e saída do programa R1 estão dispostos no Apêndice A.

Ao fim da utilização do programa R1, tem-se as cargas hidráulicas calculadas nos nós e as vazões observadas em cada tubo, respectivamente.

Os resultados das cargas hidráulicas estão dispostos na Tabela 5.3 e os resultados das vazões estão dispostos na Tabela 5.4, ambas a seguir.

Tabela 5.3 – Cargas hidráulicas obtidas em R1 para cada nó do sistema.

| Nó | Cargas hidráulicas (mca) |
|-----------|---------------------------------|
| 1 | 60.0 |
| 2 | 56.18 |
| 3 | 46.84 |
| 4 | 47.65 |
| 5 | 42.35 |
| 6 | 39.12 |
| 7 | 41.47 |
| 8 | 38.81 |

Tabela 5.4 – Vazões obtidas em R1 para cada tubo do sistema.

| Tubo | Vazão (L/s) |
|-------------|--------------------|
| 1 | 415.0 |
| 2 | 53.0 |
| 3 | 209.3 |
| 4 | 152.7 |
| 5 | 75.0 |
| 6 | 17.7 |
| 7 | 74.3 |
| 8 | 10.0 |
| 9 | 33.0 |
| 10 | 3.0 |

5.4 Cálculo das Cargas Hidráulicas Transientes

Para o cálculo das cargas hidráulicas geradas pela aplicação do regime transiente dentro da rede utilizou-se o programa aqui chamado de R2 (Figura 5.4), também desenvolvido por Araújo (2003). Assim como R1, o programa R2 utiliza a linguagem FORTRAN e tem como saída única um arquivo com os valores das cargas hidráulicas em um determinado nó no espaço de tempo desejado.

Os arquivos de entrada em R2 são o arquivo com as características físicas da rede usado em R1, o arquivo com os valores de cargas hidráulicas em cada nó e vazões de cada tubo obtidos em R1 e o arquivo de indexação. Podem-se encontrar valores para qualquer um dos nós do sistema aplicando os valores correspondentes.

Para o cálculo das cargas hidráulicas transientes, escolheu-se o Nó 5 como ponto representativo por tratar-se do nó mais distante do reservatório. Após as simulações com a variação de demanda no nó 5, o estudo será aplicado a uma variação de demanda simultânea

em todos os nós da rede de distribuição. Os arquivos de entrada e saída do programa R2 estão dispostos no Apêndice B.

Figura 5.4 – Interface de R2.

```

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

ANÁLISE DE TRANSIENTES EM UMA REDE HIDRÁULICA
PROGRAM REDEEXEMPLO
PARAMETER(JO=6, JHAX=106, NPIPE=10, NOJ=8, NSECOES=20)
PARAMETER(NQ=18, NCDG=18, DT= .3, JPR=1, NMAXTUBO=4)
PARAMETER(INDEXACAO=77)
PARAMETER(QMIN=0.000001)
DIMENSION IR(NPIPE), RO(NOJ), L(NPIPE), D(NPIPE), CEL(NPIPE)
DIMENSION RUG(NPIPE), IND(INDEXACAO), R(NPIPE), B(NPIPE)
DIMENSION HJ(NOJ, JHAX)
DIMENSION HNSECOES, JMAX, Q(NSECOES, JMAX), CC(NMAXTUBO)
DIMENSION Z(NOJ)
DIMENSION CDG(1, NCDG)
DIMENSION QQ(NOJ, NQ), VAZAOINICIAL(NPIPE)
REAL L

LEITURA E IMPRESSÃO DOS DADOS DE ENTRADA

DADOS GERAIS
OPEN(1, FILE='dados2.dat')
READ(1, *) (IR(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (RO(I), I=1, NOJ)
DO I=1, 7
  READ(1, *) (QQ(I, J), J=1, NQ)
END DO
READ(1, *) (CDG(1, J), J=1, NCDG)
READ(1, *) (Z(I), I=1, NOJ)
READ(1, *) (L(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (D(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (CEL(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (RUG(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (VAZAOINICIAL(I), I=1, NPIPE)
DO I=1, NPIPE
  R(I)=8.*F(I)*L(I)/(3.14**2*D(I)**5*9.81)
  B(I)=4.*CEL(I)/(3.14*D(I)**2*9.81)
END DO

```

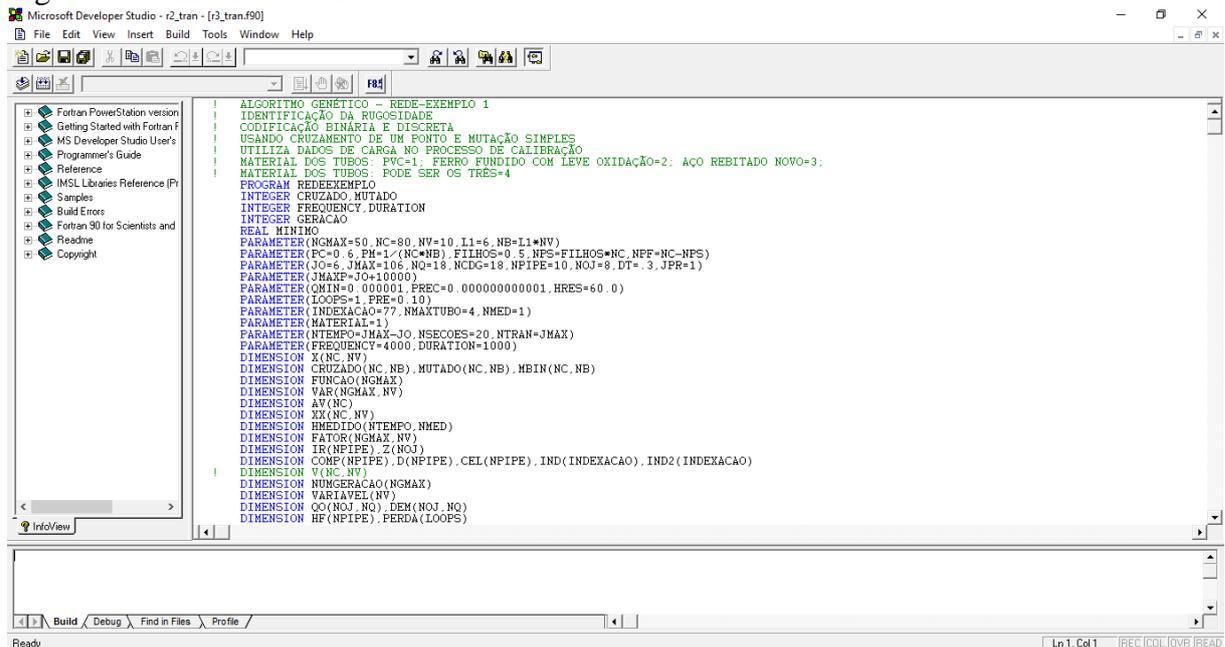
5.5 Simulação das Rugosidades em Regime Transiente

Araújo (2003) desenvolveu o programa R3 (Figura 5.5), em linguagem FORTRAN juntos com os outros dois programas supracitados. Aplicou-se, então, a técnica dos algoritmos genéticos para a geração de resultados relacionados à rugosidade de cada tubo.

Os dados de entrada em R3 foram todas as características físicas até agora apresentadas, com exceção da rugosidade, as cargas e vazões em cada nó e as demandas nos nós. Outro dado de entrada é a carga do transiente através do tempo que foi obtida na execução do R2, de acordo com o nó estudado. Como dados de saída temos as rugosidades estimadas de cada tubo da rede.

Para esse estudo, aplicou-se a alteração do tempo de aplicação do transiente (NTEMPO) de 20 segundos, com um intervalo de tempo de transiente (Δt), isto é, passo de tempo de 0.3 segundos.

Figura 5.5 – Interface de R3.



5.6 Função Objetivo em Regime Transiente

A função objetivo transiente inicialmente utilizada por Gambale (2000) (Equação 5.1) irá encontrar o melhor valor de carga hidráulica estimada que corresponde ao valor real calculados nos m nós e nas n condições de variação de demanda minimizando o erro. Portanto, tem-se que:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |H_{r_{ij}} - H_{e_{ij}}|}{m \cdot n} \leq P_{re} \quad (5.1)$$

Onde $H_{r_{ij}}$ é a carga hidráulica no ponto i e no cenário j , $H_{e_{ij}}$ é a carga hidráulica estimada pelo simulador no nó i e no tempo de estudo do transiente j , P_{re} é a precisão pré-estabelecida (dado de entrada no sistema), i representa o nó que está variando de 1 a m e j representa o passo de tempo de estudo do transiente que varia de 1 a n . O produto do denominador dessa função tem o objetivo de parametrizar a função.

Portanto, a identificação das rugosidades segue a diretriz da minimização da função objetivo.

5.7 Configurações do Algoritmo Genético

A cadeia binária que representa a solução do problema é composta de 60 posições, ou seja, o comprimento do cromossomo (NB) é igual a 60, onde o número de tubos da rede (NV) é igual a 10. Assim a rugosidade de um tubo será determinada a cada 6 algarismos binários, isto é, o comprimento de cada variável (L1) vale 6.

Os valores foram representados em uma cadeia binária de comprimento 6. Essa cadeia pode representar um número decimal no intervalo de [0; 63] com rugosidades variando de 0,01 mm a 0,64 mm. A representação binária dos coeficientes de rugosidade encontra-se na Tabela 5.5, abaixo.

Tabela 5.5 – Representação binária dos valores decimais da rugosidade.

| ϵ (mm) | Cadeia de binário | | | | | | Decimal |
|-----------------|-------------------|---|---|---|---|---|---------|
| 0,64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,63 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0,62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| 0,61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 |
| 0,60 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| * | * | * | * | * | * | * | * |
| 0,05 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 59 |
| 0,04 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 60 |
| 0,03 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 61 |
| 0,02 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 62 |
| 0,01 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 63 |

O fluxograma da metodologia de trabalho da simulação das rugosidades na rede submetida ao regime transiente está representado na Figura 5.6, a seguir. Como supracitado, o programa R1 calcula as cargas e as vazões do regime permanente. O programa R2, por sua vez, calcula as cargas transientes na rede. Com os dados de saída de R1 e R2, as outras etapas da calibração são realizadas em R3. Para os casos estudados, adotou-se, previamente, uma população de tamanho 40 (NC=40), e esse dado é usado na etapa 3.

Ao calcular-se o valor da função objetivo de cada uma das populações iniciais (etapa 4), seu valor é comparado com a precisão escolhida. Para que o programa chegue ao fim, há duas possibilidades: (a) o valor da função objetivo deve ser menor que a precisão,

caso contrário, (b) o processo tem continuidade até que se atinja o número de gerações definidas.

Para a análise do efeito do elitismo no processo de identificação da rugosidade, será admitida três situações: análise sem elitismo, análise com taxa de elitismo 50% e análise com taxa de elitismo 80% (etapa 5).

Para a etapa 6, a taxa de cruzamento (PC) determinada foi de 60%, admitindo a proposição de Gambale (2000) que esse valor deveria estar entre 50% e 80%. As soluções, que estão ordenadas em ordem decrescente de 1 a NC em decorrência do elitismo aplicado, são divididas em duplas e através de PC podem ou não se cruzar. Considerando o cruzamento de 1 ponto, a cadeia é dividida em dois em um determinado local, também escolhido aleatoriamente, e os valores a direita do ponto de cada solução são trocados.

A etapa 7 consiste na aplicação da mutação aos cromossomos. A escolha do local de aplicação ocorre aleatoriamente entre todas as posições da solução, tornando-se, portanto, a responsável pela troca do valor na posição determinada. A taxa de mutação a ser aplicada na etapa 7 é definida pela Equação 5.2, abaixo:

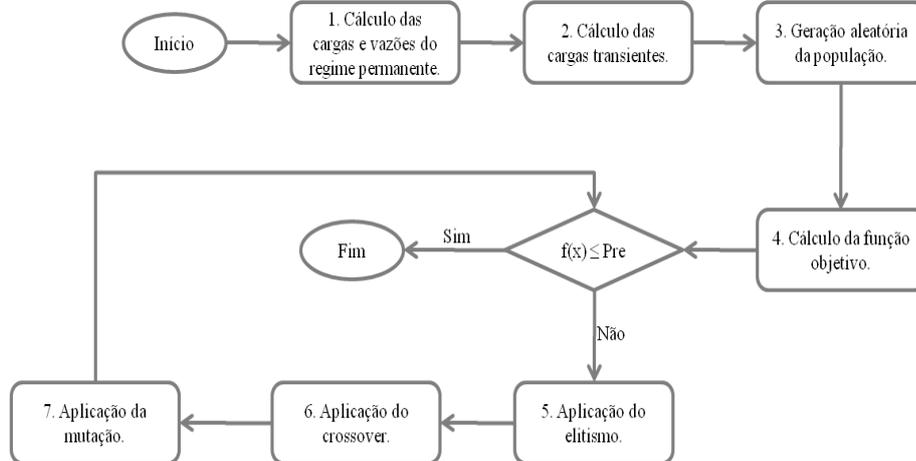
$$PM = \frac{1}{NC \times NB} \times 100 \quad (5.2)$$

Onde PM é a probabilidade de mutação, NC é o tamanho da população e NB é o comprimento do cromossomo.

Ao final da etapa 7, tem-se uma nova família de soluções, que será aplicada novamente à função objetivo e comparada com a precisão. Caso essa não seja atingida, as soluções passarão novamente pelos processos de elitismo, recombinação e mutação até que o valor da função objetivo seja satisfatório. Caso a convergência não ocorra, o programa finaliza ao atingir o número máximo de 20 gerações (NG) predefinido.

A Figura 5.6 mostra o fluxograma da metodologia adotada em etapas, para cada análise (transiente lento e transiente rápido).

Figura 5.6 – Fluxograma da metodologia da calibração das rugosidades na rede submetida ao escoamento transiente.



5.8 Medida de Eficiência da Calibração

No processo de calibração é importante que os dados observados sejam de boa qualidade. O cenário ideal seria aquele em que não houvesse nenhum tipo de erro nas medidas. Na prática, a observação é cheia de dificuldades e erros oriundos de desajustes dos aparelhos, leituras erradas, etc.

A análise da qualidade da identificação dos parâmetros será feita observando dois critérios: (i) a melhor Função Objetivo (FO_{\min}); e (ii) pelo Erro Médio Relativo (EMR). O EMR pode ser escrito de acordo com a Equação 5.3.

$$EMR(\%) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^n \frac{|\varepsilon_i^{real} - \varepsilon_i^{estimada}|}{\varepsilon_i^{real}} \times 100 \right] \quad (5.3)$$

Onde ε é a rugosidade real e estimada no tubo i , i é o número do tubo e N é o número total de tubos da rede.

5.9 Transientes analisados

As análises sucedem-se em regimes transientes distintos, Transiente Rápido, com duração de 5 segundos e Transiente Lento, com duração de 120 segundos.

No Transiente Rápido, a vazão observada reduz de 30 L/s para 15 L/s em um tempo total de apenas 5 segundo, submetendo a rede hipotética a um transiente brusco.

No Transiente Lento, a vazão observada reduz de 30 L/s para 29 L/s em um tempo total de 2 minutos, ou seja, 120 segundos. Nesse caso, a rede está submetida a um transiente

suave, de tal forma que o escoamento pode ser equiparado a um escoamento permanente, por não haver mudanças bruscas nos parâmetros de vazão carga hidráulica da rede.

O estudo comparativo, portanto, consiste em analisar 20 segundos de cada regime transiente supracitado para se obter parâmetros coerentes de comparação entre os regimes.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo estão dispostos da seguinte maneira: simulação do transiente rápido sem elitismo, simulação do transiente lento sem elitismo, simulação do transiente rápido com taxa de elitismo 50%, simulação do transiente lento com taxa de elitismo 50%, simulação do transiente rápido com taxa de elitismo 80% e simulação do transiente lento com taxa de elitismo 80%. Os outros parâmetros do algoritmo genético permanecem constantes.

As simulações foram executadas em 10 processamentos para cada caso supracitado. As comparações dos resultados serão baseadas nos resultados médios entre todos os processamentos e, também, nos melhores processamentos de cada caso, que corresponde ao processamento da menor função objetivo calculada.

6.1 Transiente Rápido Sem Elitismo

Na disposição dos resultados, tem-se, os parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados na simulação assim como a tabela que contém as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e os parâmetros de medida de calibração para as simulações de resultados médios (rugosidades estimadas, erro médio e desvio padrão) e para o melhor processamento (rugosidades estimadas, erro médio e função objetivo ótima).

Os parâmetros do algoritmo genético para essa simulação são:

| | |
|---------------------------|---------|
| - Regime Transiente | Rápido |
| - Cruzamento: | 1 ponto |
| - Mutação: | Simple |
| - Representação: | Binária |
| - Taxa de Elitismo: | 0% |
| - Taxa de Cruzamento: | 60% |
| - Taxa de Mutação: | 0,0417% |
| - Intervalo de transiente | 0.3s |
| - Tempo Transiente: | 30s |
| - Número de Gerações: | 40 |
| - Tamanho da População: | 20 |
| - Precisão: | 0,1m |
| - Nó Observado: | 5 |

A Tabela 6.1, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para os valores médios dos 10 processamentos.

Tabela 6.1 – Estimativa de rugosidade no transiente rápido sem elitismo – valores médios.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | $\epsilon_{\text{estimado}}$ (mm) | EA | ER (%) | DP |
|------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------------|--------|
| 1 | 0,0100 | 0,0460 | 0,0360 | 360,0 | 0,0324 |
| 2 | 0,3100 | 0,0630 | 0,2470 | 79,7 | 0,0624 |
| 3 | 0,1100 | 0,0470 | 0,0630 | 57,3 | 0,0483 |
| 4 | 0,0600 | 0,1360 | 0,0760 | 126,7 | 0,1493 |
| 5 | 0,5100 | 0,3290 | 0,1810 | 35,5 | 0,1730 |
| 6 | 0,3100 | 0,3180 | 0,0080 | 2,6 | 0,2126 |
| 7 | 0,2100 | 0,2230 | 0,0130 | 6,2 | 0,2128 |
| 8 | 0,2600 | 0,3160 | 0,0560 | 21,5 | 0,2002 |
| 9 | 0,5600 | 0,3130 | 0,2470 | 44,1 | 0,2030 |
| 10 | 0,6100 | 0,4410 | 0,1690 | 27,7 | 0,1370 |
| | | | EMR (%) | 76,1 | |
| | | | DPmédio | 0,1431 | |

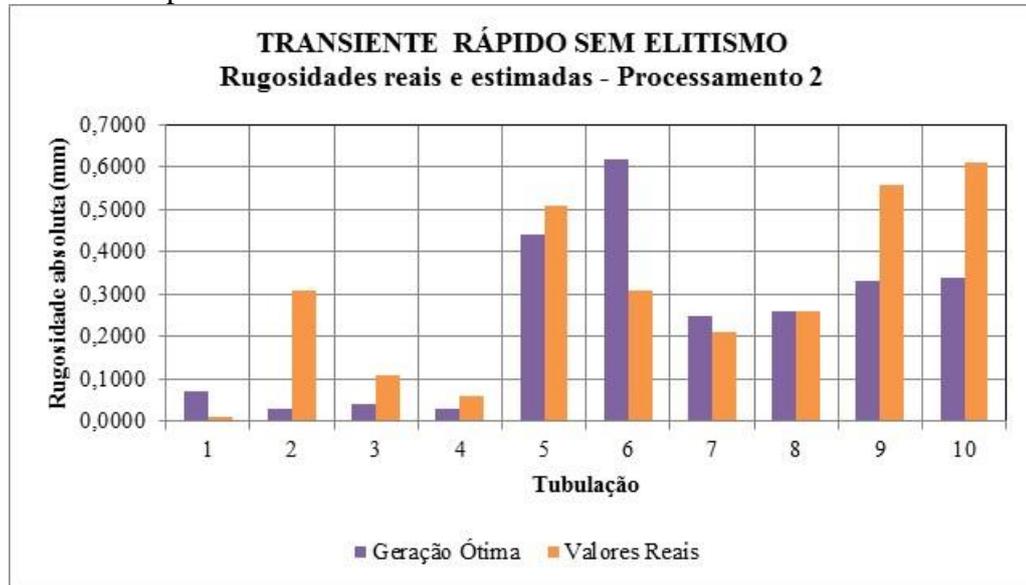
A Tabela 6.2, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para o Processamento 1 que, nesse caso, forneceu a menor função objetivo sendo, portanto, o melhor processamento.

Tabela 6.2 – Estimativa de rugosidade no transiente rápido sem elitismo - melhor processamento

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | ϵ_{est} (mm) | EA | ER (%) |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|--------------|
| 1 | 0,0100 | 0,0700 | 0,0600 | 600,0 |
| 2 | 0,3100 | 0,0600 | 0,2500 | 80,6 |
| 3 | 0,1100 | 0,0200 | 0,0900 | 81,8 |
| 4 | 0,0600 | 0,0100 | 0,0500 | 83,3 |
| 5 | 0,5100 | 0,5500 | 0,0400 | 7,8 |
| 6 | 0,3100 | 0,0900 | 0,2200 | 71,0 |
| 7 | 0,2100 | 0,1100 | 0,1000 | 47,6 |
| 8 | 0,2600 | 0,3700 | 0,1100 | 42,3 |
| 9 | 0,5600 | 0,5600 | 0,0000 | 0,0 |
| 10 | 0,6100 | 0,6100 | 0,0000 | 0,0 |
| FO_{ótima}: | | 0,6989 | EMR (%) | 101,5 |

A Figura 6.1, a seguir, mostra o gráfico de comparação entre as rugosidades do melhor processamento e os valores reais admitidos.

Figura 6.1 – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente rápido sem elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.2 Transiente Lento Sem Elitismo

Na disposição dos resultados, tem-se, os parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados na simulação assim como a tabela que contém as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e os parâmetros de medida de calibração para as simulações de resultados médios (rugosidades estimadas, erro médio e desvio padrão) e para o melhor processamento (rugosidades estimadas, erro médio e função objetivo ótima). Os parâmetros do algoritmo genético para essa simulação são:

- Regime Transiente Lento
- Cruzamento: 1 ponto
- Mutação: Simples
- Representação: Binária
- Taxa de Elitismo: 0%
- Taxa de Cruzamento: 60%
- Taxa de Mutação: 0,0417%
- Intervalo de transiente 0.3s
- Tempo Transiente: 20s
- Número de Gerações: 40
- Tamanho da População: 20
- Precisão: 0,1m
- Nó Observado: 5

A Tabela 6.3, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para os valores médios dos 10 processamentos.

Tabela 6.3 – Estimativa de rugosidade no transiente lento sem elitismo – valores médios.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | $\epsilon_{\text{estimado}}$ (mm) | EA | ER (%) | DP |
|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------|---------------|--------|
| 1 | 0,0100 | 0,0670 | 0,0570 | 570,0 | 0,0442 |
| 2 | 0,3100 | 0,0840 | 0,2260 | 72,9 | 0,0554 |
| 3 | 0,1100 | 0,0510 | 0,0590 | 53,6 | 0,0223 |
| 4 | 0,0600 | 0,2660 | 0,2060 | 343,3 | 0,2194 |
| 5 | 0,5100 | 0,2850 | 0,2250 | 44,1 | 0,1988 |
| 6 | 0,3100 | 0,3010 | 0,0090 | 2,9 | 0,1913 |
| 7 | 0,2100 | 0,3020 | 0,0920 | 43,8 | 0,1961 |
| 8 | 0,2600 | 0,3070 | 0,0470 | 18,1 | 0,1871 |
| 9 | 0,5600 | 0,0750 | 0,4850 | 86,6 | 0,0486 |
| 10 | 0,6100 | 0,2390 | 0,3710 | 60,8 | 0,1541 |
| EMR (%) | | | | 129,6 | |
| DPmédio | | | | 0,1317 | |

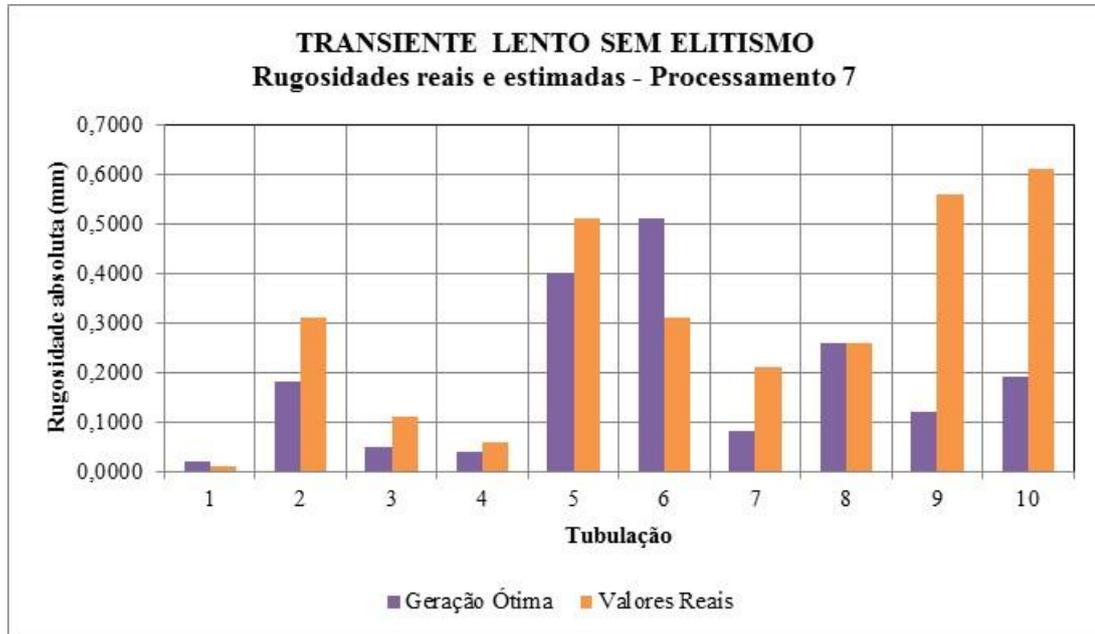
A Tabela 6.4, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para o Processamento 8 que, nesse caso, forneceu a menor função objetivo sendo, portanto, o melhor processamento.

Tabela 6.4 – Estimativa de rugosidade no transiente lento sem elitismo - melhor processamento.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | ϵ_{est} (mm) | EA | ER (%) |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|--------------|
| 1 | 0,0100 | 0,0800 | 0,0700 | 700,0 |
| 2 | 0,3100 | 0,1700 | 0,1400 | 45,2 |
| 3 | 0,1100 | 0,0500 | 0,0600 | 54,5 |
| 4 | 0,0600 | 0,0600 | 0,0000 | 0,0 |
| 5 | 0,5100 | 0,0100 | 0,5000 | 98,0 |
| 6 | 0,3100 | 0,2400 | 0,0700 | 22,6 |
| 7 | 0,2100 | 0,5000 | 0,2900 | 138,1 |
| 8 | 0,2600 | 0,0600 | 0,2000 | 76,9 |
| 9 | 0,5600 | 0,0100 | 0,5500 | 98,2 |
| 10 | 0,6100 | 0,2600 | 0,3500 | 57,4 |
| FOótima: | | 0,6242 | EMR (%) | 129,1 |

A Figura 6.2, a seguir, mostra o gráfico de comparação entre as rugosidades do melhor processamento e os valores reais admitidos.

Figura 6.2 – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente lento sem elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.3 Transiente Rápido com Taxa de 50% de Elitismo

Na disposição dos resultados, tem-se, os parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados na simulação assim como a tabela que contém as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e os parâmetros de medida de calibração para as simulações de resultados médios (rugosidades estimadas, erro médio e desvio padrão) e para o melhor processamento (rugosidades estimadas, erro médio e função objetivo ótima).

Os parâmetros do algoritmo genético para essa simulação são:

| | |
|---------------------------|---------|
| – Regime Transiente | Rápido |
| – Cruzamento: | 1 ponto |
| – Mutação: | Simplex |
| – Representação: | Binária |
| – Taxa de Elitismo: | 50% |
| – Taxa de Cruzamento: | 60% |
| – Taxa de Mutação: | 0,0417% |
| – Intervalo de transiente | 0.3s |
| – Tempo Transiente: | 20s |
| – Número de Gerações: | 40 |
| – Tamanho da População: | 20 |
| – Precisão: | 0,1m |
| – Nó Observado: | 5 |

A Tabela 6.5, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para os valores médios dos 10 processamentos.

Tabela 6.5 – Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 50% de elitismo – valores médios.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | ϵ_{est} (mm) | EA | ER (%) | Tubo |
|----------------|---|--|-----------|---------------|-------------|
| 1 | 0,0100 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 |
| 2 | 0,3100 | 0,0160 | 0,2940 | 94,8 | 0,0070 |
| 3 | 0,1100 | 0,0110 | 0,0990 | 90,0 | 0,0032 |
| 4 | 0,0600 | 0,0190 | 0,0410 | 68,3 | 0,0074 |
| 5 | 0,5100 | 0,2020 | 0,3080 | 60,4 | 0,1438 |
| 6 | 0,3100 | 0,1750 | 0,1350 | 43,5 | 0,1229 |
| 7 | 0,2100 | 0,1790 | 0,0310 | 14,8 | 0,1496 |
| 8 | 0,2600 | 0,4890 | 0,2290 | 88,1 | 0,0985 |
| 9 | 0,5600 | 0,2720 | 0,2880 | 51,4 | 0,1790 |
| 10 | 0,6100 | 0,3790 | 0,2310 | 37,9 | 0,1854 |
| EMR (%) | | | | 54,9 | |
| DPmédio | | | | 0,0897 | |

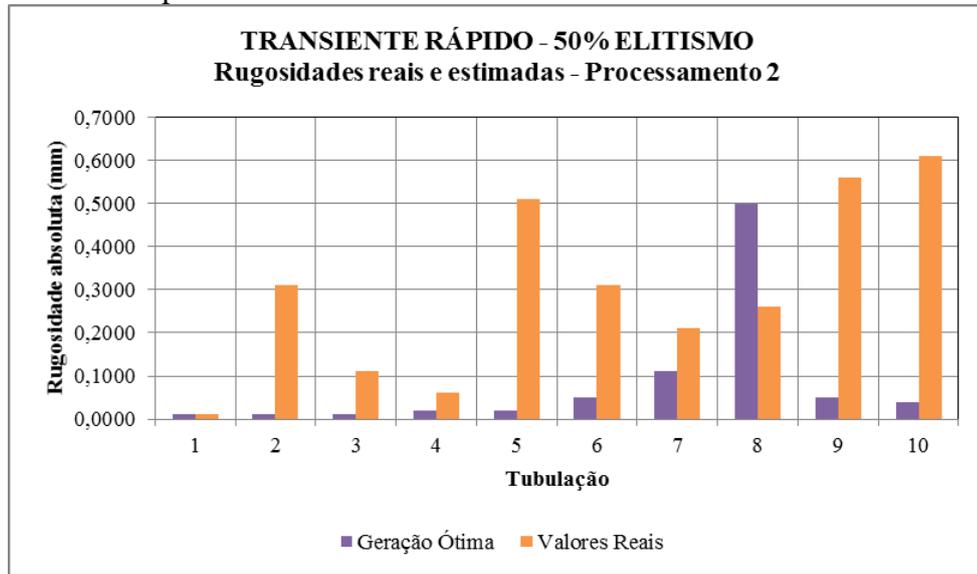
A Tabela 6.6, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para o Processamento 2 que, nesse caso, forneceu a menor função objetivo sendo, portanto, o melhor processamento.

Tabela 6.6 – Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 50% de elitismo - melhor processamento.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | ϵ_{est} (mm) | EA | ER (%) |
|-----------------|---|--|----------------|---------------|
| 1 | 0,0100 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0 |
| 2 | 0,3100 | 0,0100 | 0,3000 | 96,8 |
| 3 | 0,1100 | 0,0100 | 0,1000 | 90,9 |
| 4 | 0,0600 | 0,0200 | 0,0400 | 66,7 |
| 5 | 0,5100 | 0,0200 | 0,4900 | 96,1 |
| 6 | 0,3100 | 0,0500 | 0,2600 | 83,9 |
| 7 | 0,2100 | 0,1100 | 0,1000 | 47,6 |
| 8 | 0,2600 | 0,5000 | 0,2400 | 92,3 |
| 9 | 0,5600 | 0,0500 | 0,5100 | 91,1 |
| 10 | 0,6100 | 0,0400 | 0,5700 | 93,4 |
| FOótima: | | 0,6844 | EMR (%) | 75,9 |

A Figura 6.3, a seguir, mostra o gráfico de comparação entre as rugosidades do melhor processamento e os valores reais admitidos.

Figura 6.3 – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente rápido com 50% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.4 Transiente Lento com Taxa de 50% de Elitismo

Na disposição dos resultados, tem-se, os parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados na simulação assim como a tabela que contém as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e os parâmetros de medida de calibração para as simulações de resultados médios (rugosidades estimadas, erro médio e desvio padrão) e para o melhor processamento (rugosidades estimadas, erro médio e função objetivo ótima).

Os parâmetros do algoritmo genético para essa simulação são:

- | | |
|---------------------------|---------|
| – Regime Transiente | Lento |
| – Cruzamento: | 1 ponto |
| – Mutação: | Simplex |
| – Representação: | Binária |
| – Taxa de Elitismo: | 50% |
| – Taxa de Cruzamento: | 60% |
| – Taxa de Mutação: | 0,0417% |
| – Intervalo de transiente | 0.3s |
| – Tempo Transiente: | 20s |
| – Número de Gerações: | 40 |
| – Tamanho da População: | 20 |
| – Precisão: | 0,1m |
| – Nó Observado: | 5 |

A Tabela 6.7, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para os valores médios dos 10 processamentos.

Tabela 6.7 – Estimativa de rugosidade no transiente lento com 50% de elitismo – valores médios.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | $\epsilon_{\text{estimado}}$ (mm) | EA | ER (%) | DP |
|----------------|---|---|-----------|---------------|-----------|
| 1 | 0,0100 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 |
| 2 | 0,3100 | 0,0230 | 0,2870 | 92,6 | 0,0142 |
| 3 | 0,1100 | 0,0140 | 0,0960 | 87,3 | 0,0052 |
| 4 | 0,0600 | 0,0320 | 0,0280 | 46,7 | 0,0235 |
| 5 | 0,5100 | 0,3220 | 0,1880 | 36,9 | 0,1214 |
| 6 | 0,3100 | 0,3490 | 0,0390 | 12,6 | 0,2133 |
| 7 | 0,2100 | 0,3460 | 0,1360 | 64,8 | 0,2079 |
| 8 | 0,2600 | 0,1540 | 0,1060 | 40,8 | 0,0846 |
| 9 | 0,5600 | 0,0170 | 0,5430 | 97,0 | 0,0095 |
| 10 | 0,6100 | 0,4690 | 0,1410 | 23,1 | 0,1213 |
| EMR (%) | | | | 50,2 | |
| DPmédio | | | | 0,0801 | |

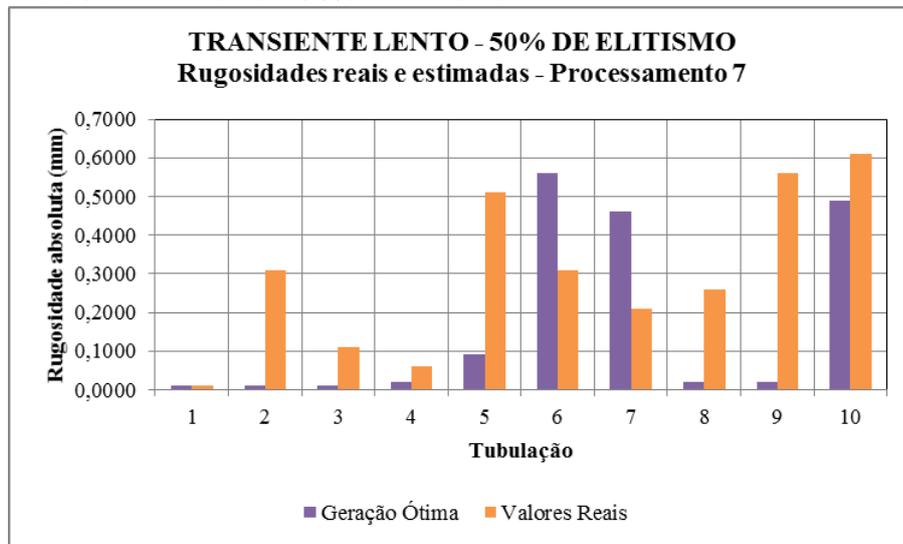
A Tabela 6.8, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para o Processamento 7 que, nesse caso, forneceu a menor função objetivo sendo, portanto, o melhor processamento.

Tabela 6.8 – Estimativa de rugosidade no transiente lento com 50% de elitismo - melhor processamento.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | ϵ_{est} (mm) | EA | ER (%) |
|-----------------|---|--|----------------|---------------|
| 1 | 0,0100 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0 |
| 2 | 0,3100 | 0,0100 | 0,3000 | 96,8 |
| 3 | 0,1100 | 0,0100 | 0,1000 | 90,9 |
| 4 | 0,0600 | 0,0200 | 0,0400 | 66,7 |
| 5 | 0,5100 | 0,0900 | 0,4200 | 82,4 |
| 6 | 0,3100 | 0,5600 | 0,2500 | 80,6 |
| 7 | 0,2100 | 0,4600 | 0,2500 | 119,0 |
| 8 | 0,2600 | 0,0200 | 0,2400 | 92,3 |
| 9 | 0,5600 | 0,0200 | 0,5400 | 96,4 |
| 10 | 0,6100 | 0,4900 | 0,1200 | 19,7 |
| FOótima: | | 0,5385 | EMR (%) | 74,5 |

A Figura 6.4, a seguir, mostra o gráfico de comparação entre as rugosidades do melhor processamento e os valores reais admitidos.

Figura 6.4 – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente lento com 50% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.5 Transiente Rápido com Taxa de 80% de Elitismo

Na disposição dos resultados, tem-se, os parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados na simulação assim como a tabela que contém as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e os parâmetros de medida de calibração para as simulações de resultados médios (rugosidades estimadas, erro médio e desvio padrão) e para o melhor processamento (rugosidades estimadas, erro médio e função objetivo ótima).

Os parâmetros do algoritmo genético para essa simulação são:

- | | |
|---------------------------|---------|
| - Regime Transiente | Rápido |
| - Cruzamento: | 1 ponto |
| - Mutação: | Simplex |
| - Representação: | Binária |
| - Taxa de Elitismo: | 80% |
| - Taxa de Cruzamento: | 60% |
| - Taxa de Mutação: | 0,0417% |
| - Intervalo de transiente | 0.3s |
| - Tempo Transiente: | 20s |
| - Número de Gerações: | 40 |
| - Tamanho da População: | 20 |
| - Precisão: | 0,1m |
| - Nó Observado: | 5 |

A Tabela 6.9, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para os valores médios dos 10 processamentos.

Tabela 6.9 – Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 80% de elitismo – valores médios.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | $\epsilon_{\text{estimado}}$ (mm) | EA | ER (%) | DP |
|------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------------|--------|
| 1 | 0,0100 | 0,0140 | 0,0040 | 40,0 | 0,0084 |
| 2 | 0,3100 | 0,0180 | 0,2920 | 94,2 | 0,0162 |
| 3 | 0,1100 | 0,0130 | 0,0970 | 88,2 | 0,0048 |
| 4 | 0,0600 | 0,0220 | 0,0380 | 63,3 | 0,0103 |
| 5 | 0,5100 | 0,2850 | 0,2250 | 44,1 | 0,2074 |
| 6 | 0,3100 | 0,2890 | 0,0210 | 6,8 | 0,1786 |
| 7 | 0,2100 | 0,2990 | 0,0890 | 42,4 | 0,1810 |
| 8 | 0,2600 | 0,2000 | 0,0600 | 23,1 | 0,1291 |
| 9 | 0,5600 | 0,0150 | 0,5450 | 97,3 | 0,0071 |
| 10 | 0,6100 | 0,4350 | 0,1750 | 28,7 | 0,1892 |
| | | | EMR (%) | 52,8 | |
| | | | DPmédio | 0,0932 | |

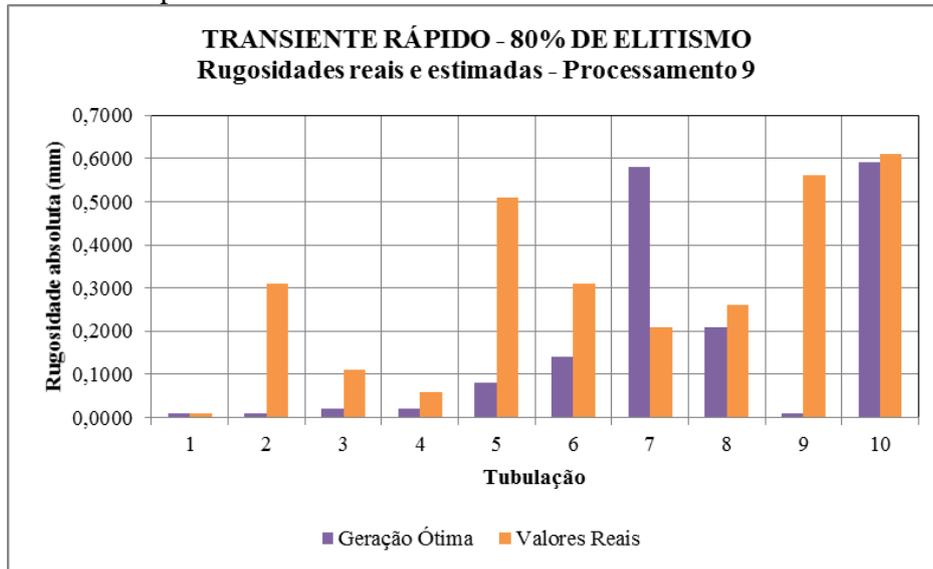
A Tabela 6.10, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para o Processamento 9 que, nesse caso, forneceu a menor função objetivo sendo, portanto, o melhor processamento.

Tabela 6.10 – Estimativa de rugosidade no transiente rápido com 80% de elitismo - melhor processamento.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | ϵ_{est} (mm) | EA | ER (%) |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|-------------|
| 1 | 0,0100 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0 |
| 2 | 0,3100 | 0,0100 | 0,3000 | 96,8 |
| 3 | 0,1100 | 0,0200 | 0,0900 | 81,8 |
| 4 | 0,0600 | 0,0200 | 0,0400 | 66,7 |
| 5 | 0,5100 | 0,0800 | 0,4300 | 84,3 |
| 6 | 0,3100 | 0,1400 | 0,1700 | 54,8 |
| 7 | 0,2100 | 0,5800 | 0,3700 | 176,2 |
| 8 | 0,2600 | 0,2100 | 0,0500 | 19,2 |
| 9 | 0,5600 | 0,0100 | 0,5500 | 98,2 |
| 10 | 0,6100 | 0,5900 | 0,0200 | 3,3 |
| FOótima: | 0,8203 | | EMR (%) | 68,1 |

A Figura 6.5, a seguir, mostra o gráfico de comparação entre as rugosidades do melhor processamento e os valores reais admitidos.

Figura 6.5 – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente rápido com 80% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.6 Transiente Lento com Taxa de 80% de Elitismo

Na disposição dos resultados, tem-se, os parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados na simulação assim como a tabela que contém as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e os parâmetros de medida de calibração para as simulações de resultados médios (rugosidades estimadas, erro médio e desvio padrão) e para o melhor processamento (rugosidades estimadas, erro médio e função objetivo ótima).

Os parâmetros do algoritmo genético para essa simulação são:

- | | |
|---------------------------|---------|
| - Regime Transiente | Lento |
| - Cruzamento: | 1 ponto |
| - Mutação: | Simplex |
| - Representação: | Binária |
| - Taxa de Elitismo: | 80% |
| - Taxa de Cruzamento: | 60% |
| - Taxa de Mutação: | 0,0417% |
| - Intervalo de transiente | 0.3s |
| - Tempo Transiente: | 20s |
| - Número de Gerações: | 40 |
| - Tamanho da População: | 20 |
| - Precisão: | 0,1m |
| - Nó Observado: | 5 |

A Tabela 6.11, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para os valores médios dos 10 processamentos.

Tabela 6.11 – Estimativa de rugosidade no transiente lento com 80% de elitismo – valores médios.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | $\epsilon_{\text{estimado}}$ (mm) | EA | ER (%) | DP |
|------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------------|---------|
| 1 | 0,0100 | 0,0130 | 0,0030 | 30,0 | 0,0048 |
| 2 | 0,3100 | 0,0200 | 0,2900 | 93,5 | 0,0189 |
| 3 | 0,1100 | 0,0130 | 0,0970 | 88,2 | 0,0048 |
| 4 | 0,0600 | 0,0420 | 0,0180 | 30,0 | 0,04444 |
| 5 | 0,5100 | 0,2500 | 0,2600 | 51,0 | 0,1865 |
| 6 | 0,3100 | 0,2140 | 0,0960 | 31,0 | 0,1982 |
| 7 | 0,2100 | 0,3350 | 0,1250 | 59,5 | 0,2518 |
| 8 | 0,2600 | 0,1850 | 0,0750 | 28,8 | 0,2304 |
| 9 | 0,5600 | 0,0150 | 0,5450 | 97,3 | 0,0071 |
| 10 | 0,6100 | 0,4700 | 0,1400 | 23,0 | 0,1649 |
| | | | EMR (%) | 53,2 | |
| | | | DPmédio | 0,1112 | |

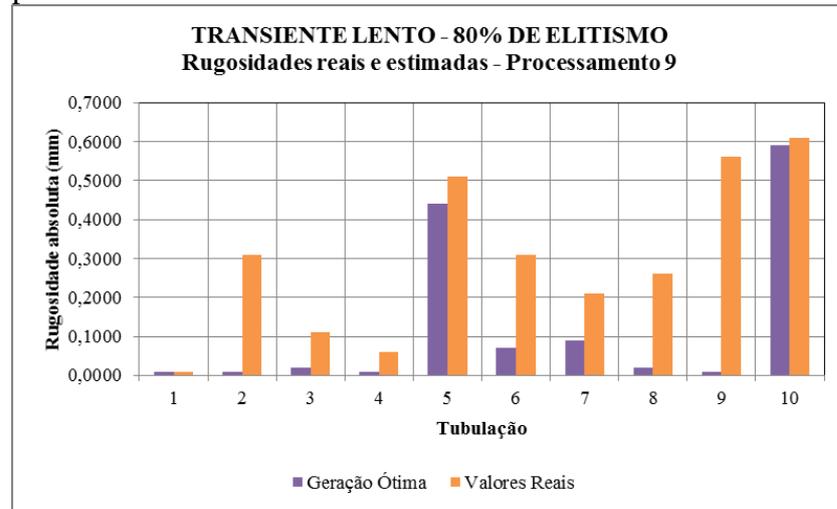
A Tabela 6.12, a seguir, mostra as rugosidades reais, as rugosidades estimadas, calculadas por R3, e o parâmetros de medida de calibração para o Processamento 9 que, nesse caso, forneceu a menor função objetivo sendo, portanto, o melhor processamento.

Tabela 6.12 – Estimativa de rugosidade no transiente lento com 80% de elitismo - melhor processamento.

| Tubo | ϵ_{real} (mm) | ϵ_{est} (mm) | EA | ER (%) |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|-------------|
| 1 | 0,0100 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0 |
| 2 | 0,3100 | 0,0100 | 0,3000 | 96,8 |
| 3 | 0,1100 | 0,0200 | 0,0900 | 81,8 |
| 4 | 0,0600 | 0,0100 | 0,0500 | 83,3 |
| 5 | 0,5100 | 0,4400 | 0,0700 | 13,7 |
| 6 | 0,3100 | 0,0700 | 0,2400 | 77,4 |
| 7 | 0,2100 | 0,0900 | 0,1200 | 57,1 |
| 8 | 0,2600 | 0,0200 | 0,2400 | 92,3 |
| 9 | 0,5600 | 0,0100 | 0,5500 | 98,2 |
| 10 | 0,6100 | 0,5900 | 0,0200 | 3,3 |
| FOótima: | | 0,6038 | EMR (%) | 60,4 |

A Figura 6.6, a seguir, mostra o gráfico de comparação entre as rugosidades do melhor processamento e os valores reais admitidos.

Figura 6.6 – Rugosidades reais e estimadas do melhor processamento – transiente lento com 80% de elitismo.



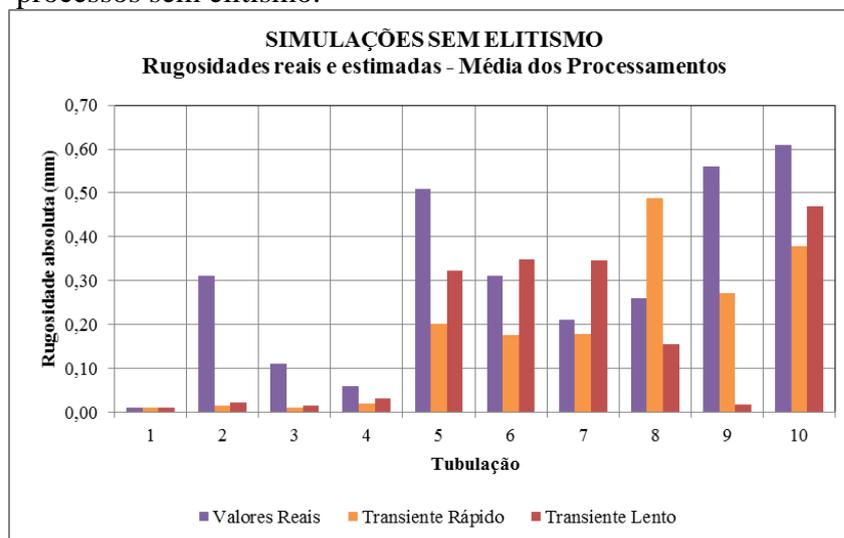
Fonte: Elaborado pela autora.

6.7 Análise dos Resultados

6.7.1 Simulação de Transiente Sem Elitismo

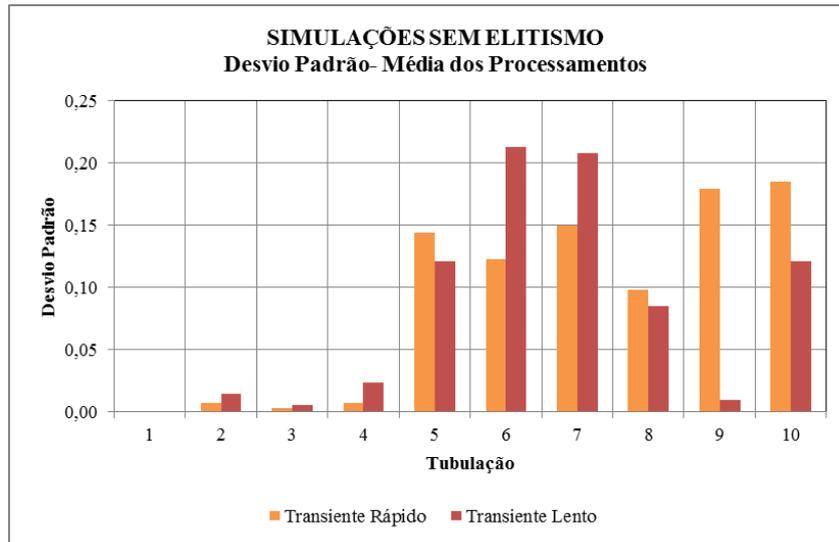
No competente à análise de valores médios, notou-se que em quase todos os tubos da rede os valores do Erro Relativo foi menor para a calibração da rede no Transiente Rápido, exceto nos tubos 2, 3 e 8. A calibração no Transiente Lento teve um EMR 70,3% vezes maior, com desvio padrão médio 8% menor em relação aos obtidos na calibração no Transiente Rápido. A Figuras 6.7 e 6.8, a seguir, demonstram graficamente essas análises.

Figura 6.7 – Comparativo das rugosidades estimadas nos processos sem elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

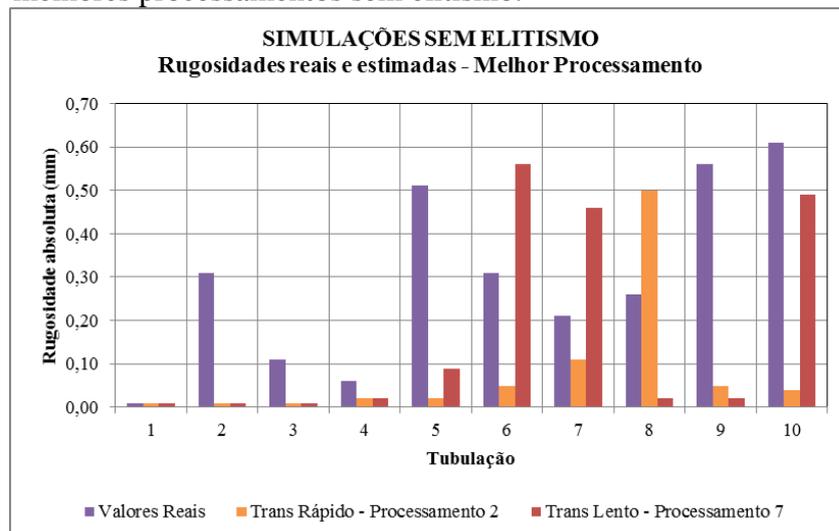
Figura 6.8 – Comparativo dos desvios padrão nos processos sem elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

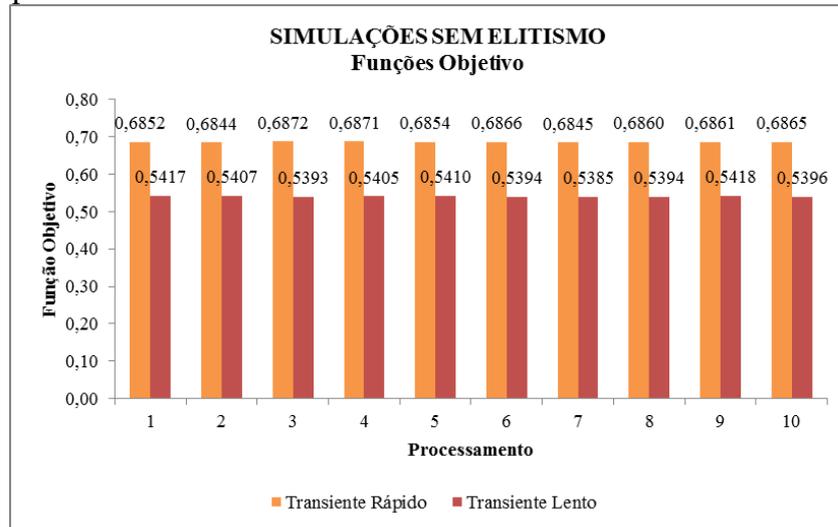
No relativo à análise dos valores de melhor processamento, ou seja, aquele que obteve a menor função objetivo ótima, notou-se que apenas nos tubos 2, 3, 4 e 6 os valores de erro relativo no Transiente Lento foram menores em relação aos obtidos na calibração no Transiente Rápido. A Figura 6.9 mostra graficamente o comparativo das rugosidades estimadas nos melhores processamentos dos transientes rápido e lento com a rugosidade real admitida para cada tubo. A Figura 6.10 mostra graficamente as funções objetivo de todos os processamentos dos dois transientes.

Figura 6.9 – Comparativo das rugosidades estimadas nos melhores processamentos sem elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 6.10 – Comparativo das funções objetivo ótimas nos processamentos sem elitismo.

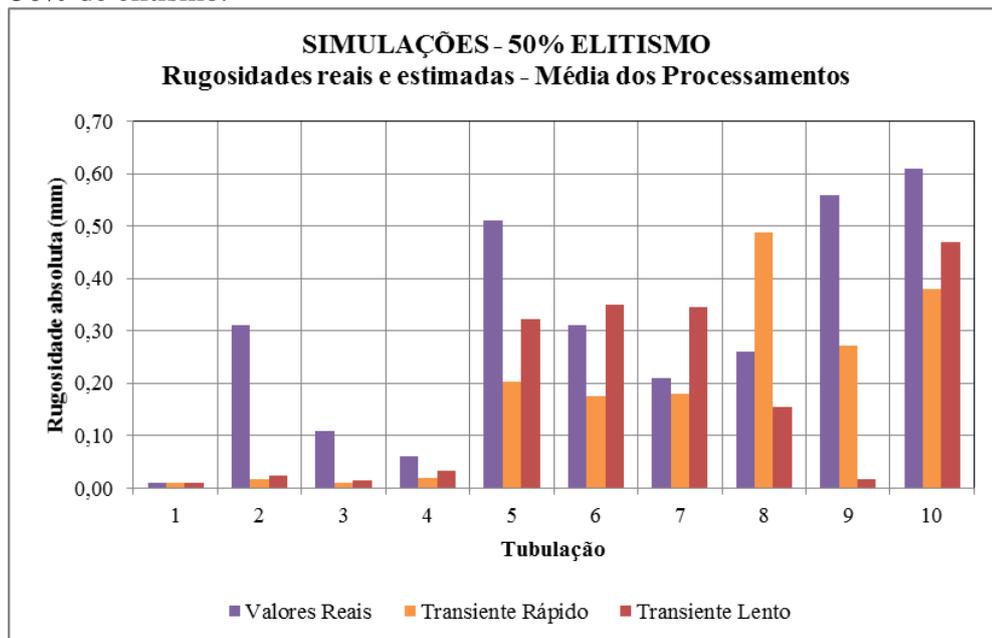


Fonte: Elaborado pela autora.

6.7.2 Simulação de Transiente com Taxa de 50% de Elitismo

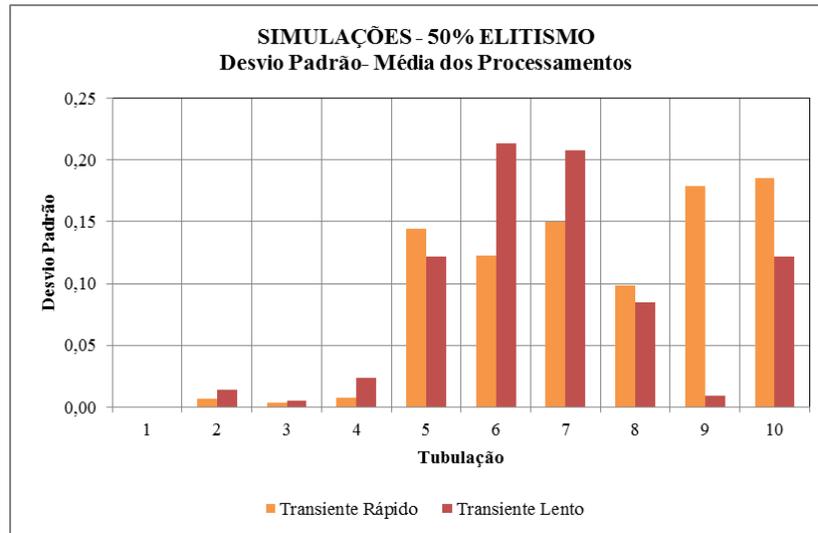
No competente à análise de valores médios, notou-se que em quase todos os tubos da rede os valores do Erro Relativo foi menor para a calibração da rede no Transiente Lento, exceto nos tubos 7 e 9. A calibração no Transiente Lento também teve um EMR 8,7% vezes menor e desvio padrão médio 10% menor em relação aos obtidos na calibração no Transiente Rápido. A Figuras 6.11 e 6.12, a seguir, demonstram graficamente essas análises.

Figura 6.11 – Comparativo das rugosidades estimadas nos processos com 50% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

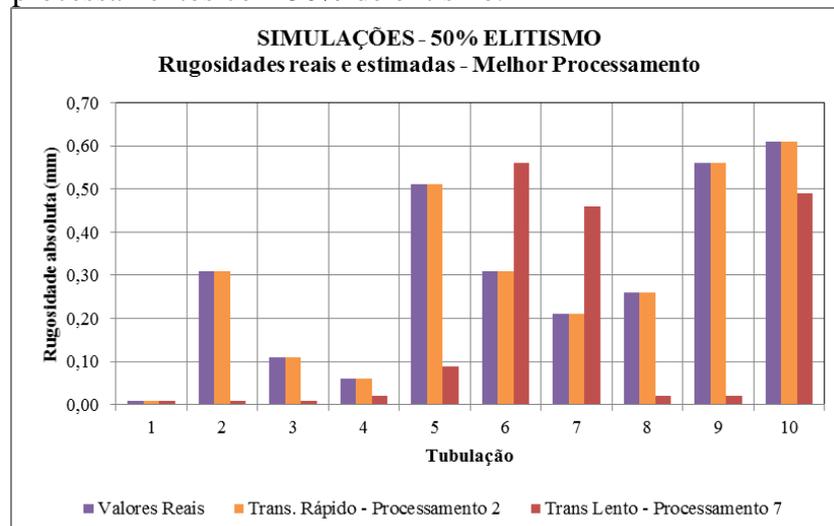
Figura 6.12 – Comparativo dos desvios padrão nos processos com 50% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

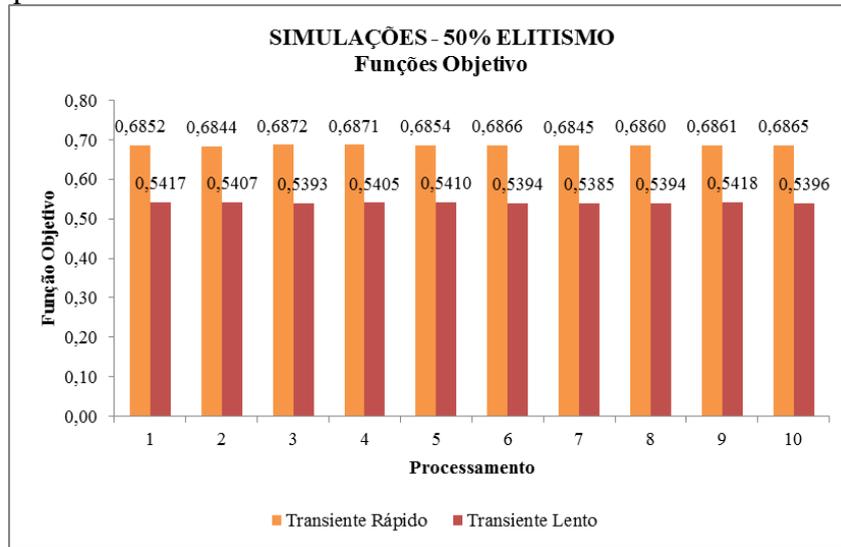
No relativo à análise dos valores de melhor processamento, ou seja, aquele que obteve a menor função objetivo ótima, notou-se que nos tubos 2, 4, 6 e 9 os valores de erro relativo no Transiente Lento foram maiores em relação aos obtidos na calibração no Transiente Rápido. Notou-se, também, que o ER do melhor processamento do Transiente Lento foi 23,5% menor do que o ER do melhor processamento do Transiente Rápido. A Figura 6.13 mostra graficamente o comparativo das rugosidades estimadas nos melhores processamentos dos transientes rápido e lento com a rugosidade real admitida para cada tubo. A Figura 6.14 mostra graficamente as funções objetivo de todos os processamentos dos dois transientes.

Figura 6.13 – Comparativo das rugosidades estimadas melhores processamentos com 50% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 6.14 – Comparativo das funções objetivo ótimas nos processamentos com 50% de elitismo.

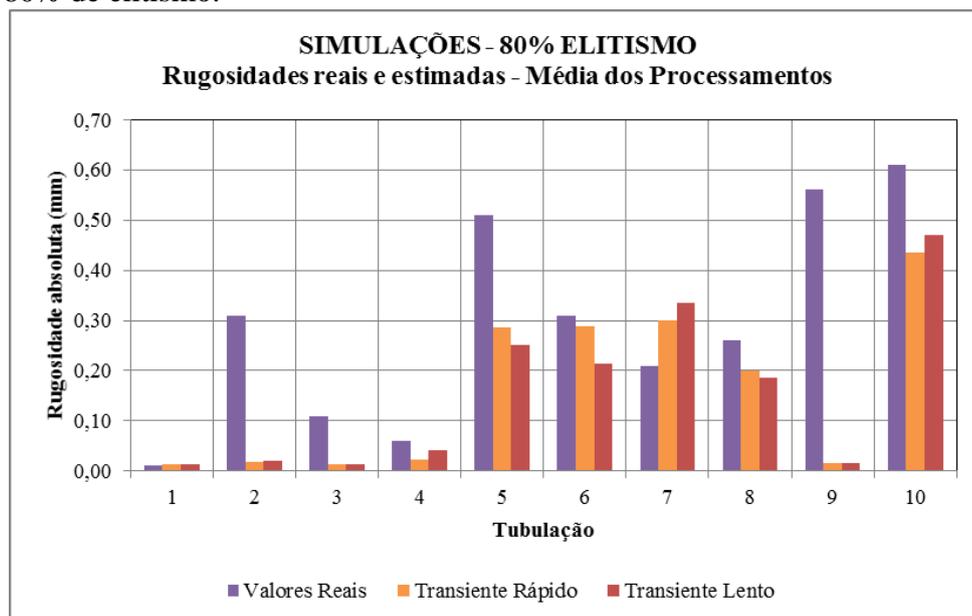


Fonte: Elaborado pela autora.

6.7.3 Simulação de Transiente com Taxa de 80% de Elitismo

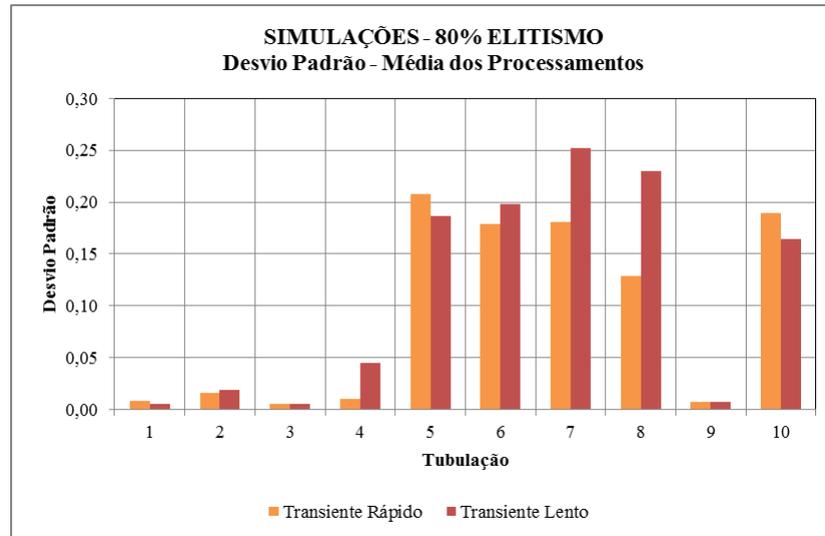
No competente à análise de valores médios, notou-se que em quase todos os tubos da rede os valores do Erro Relativo foi maior para a calibração da rede no Transiente Lento, exceto nos tubos 1, 2, 3 e 10. A calibração no Transiente Lento também teve um EMR 0,8% vezes maior e desvio padrão médio 19,3% maior em relação aos obtidos na calibração no Transiente Rápido. A Figuras 6.15 e 6.16, a seguir, demonstram graficamente essas análises.

Figura 6.15 – Comparativo das rugosidades estimadas nos processos com 80% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

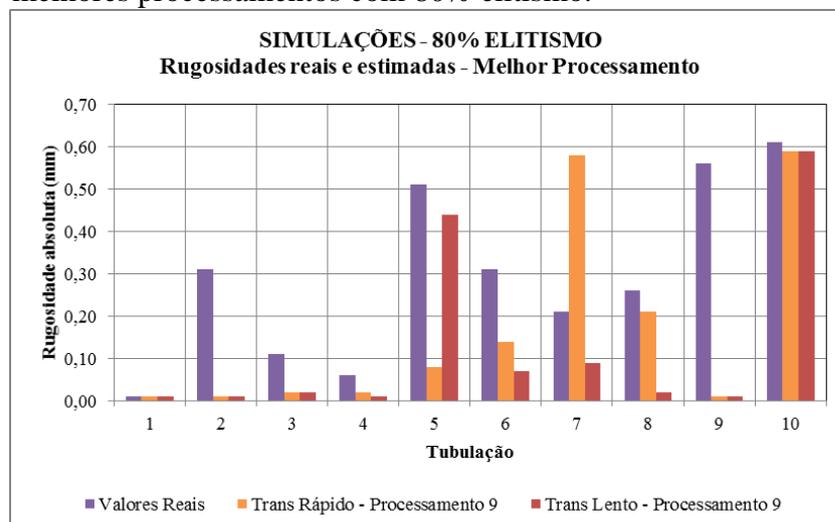
Figura 6.16 – Comparativo dos desvios padrão nos processos com 80% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

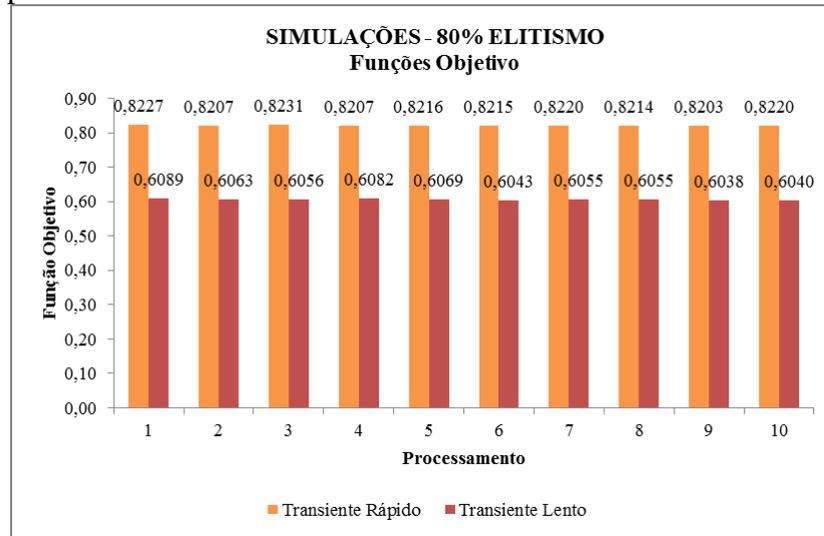
No relativo à análise dos valores de melhor processamento, ou seja, aquele que obteve a menor função objetivo ótima, notou-se que apenas nos tubos 5 e 7 os valores de erro relativo no Transiente Lento foram menores em relação aos obtidos na calibração no Transiente Rápido. Notou-se, também, que o ER do melhor processamento do Transiente Lento foi 11% menor do que o ER do melhor processamento do Transiente Rápido. A Figura 6.17 mostra graficamente o comparativo das rugosidades estimadas nos melhores processamentos dos transientes rápido e lento com a rugosidade real admitida para cada tubo. A Figura 6.18 mostra graficamente as funções objetivo de todos os processamentos dos dois transientes.

Figura 6.17 – Comparativo das rugosidades estimadas nos melhores processamentos com 80% elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 6.18 – Comparativo das funções objetivo ótimas nos processos com 80% de elitismo.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.7.4 Análise do Efeito do Efeito do Elitismo na Calibração das Rugosidades

Ao se aplicar o elitismo no transiente rápido (duração de 20 segundos), nota-se que o EMR reduz na medida em que se aumenta a taxa de elitismo. Com a aplicação da taxa de 50% de elitismo houve uma redução de 27,8% do EMR (em relação à simulação sem elitismo) e de 37,3% no desvio padrão.

A aplicação da taxa de 80% de elitismo, provocou uma redução de 3,9% no EMR e um aumento de 4% no desvio padrão (em relação aos valores da taxa de 50%) dos valores médios dos processamentos.

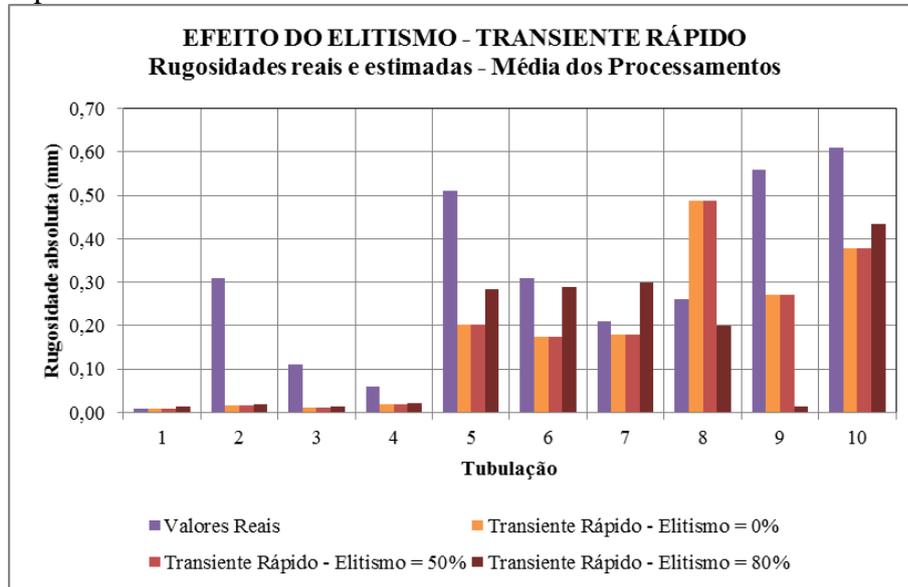
Ao se realizar um comparativo do comportamento da população inicial (sem elitismo) com a população final (taxa de 80% de elitismo), tem-se uma redução significativa de 30,6% no EMR da calibração das rugosidades e de 34,8% no desvio padrão, mostrando que há uma tendência de que quanto maior a taxa de elitismo aplicada, melhor a calibração das rugosidades.

Os efeitos do elitismo na média dos processamentos estão mostrados graficamente na Figura 6.19, a seguir.

Ainda no transiente rápido, ao analisar-se os melhores processamentos de cada taxa de elitismo aplicada, tem-se que a função objetivo ótima da taxa de 50% de elitismo é a de menor valor absoluto (2,07% menor que a função objetivo ótima sem elitismo), enquanto a

função objetivo ótima da taxa de 80% de elitismo é a de maior valor absoluto (17,36% maior que a função objetivo ótima sem elitismo).

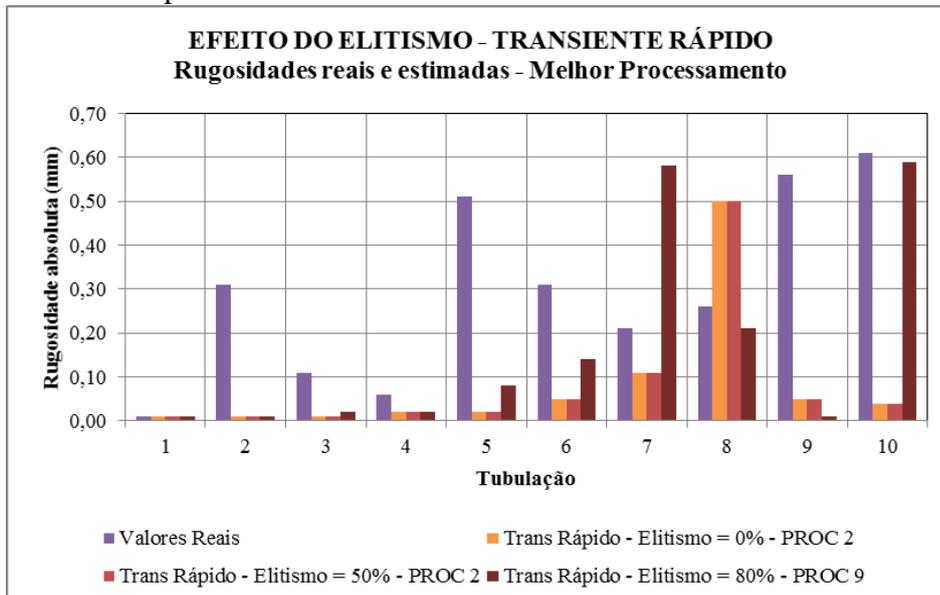
Figura 6.19 – Efeito do elitismo nos valores médios do transiente rápido.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto ao EMR dos melhores processamentos, há a redução sucessiva do mesmo (25,2% para a taxa de 50% de elitismo e 32,8% para a taxa de 80% de elitismo, ambos em relação ao processamento sem elitismo) à medida em que se aumenta a taxa de elitismo. Esses efeitos estão mostrados graficamente na Figura 6.20, abaixo.

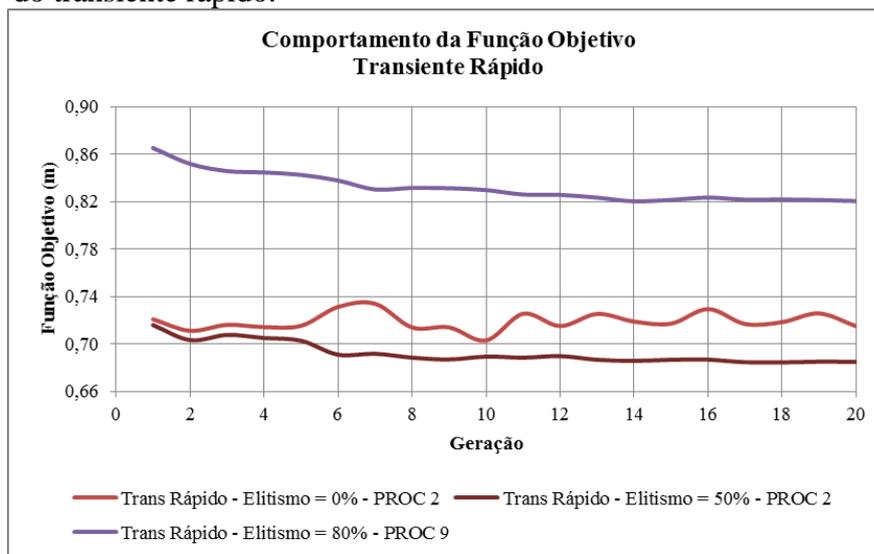
Figura 6.20 – Efeito do elitismo nos melhores processamentos do transiente rápido.



Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento da função objetivo ótima nas 20 gerações para o transiente rápido com base no melhor processamento está disposto na Figura 6.21, abaixo, e, nela, pode-se notar que os mínimos valores procurados da função objetivo são encontrados com a taxa de elitismo de 50%, valores esses que são bem inferiores aos valores da taxa de elitismo de 80%, embora as funções possuam comportamentos bem semelhantes.

Figura 6.21 – Função objetivo ótima nos melhores processamentos do transiente rápido.



Fonte: Elaborado pela autora.

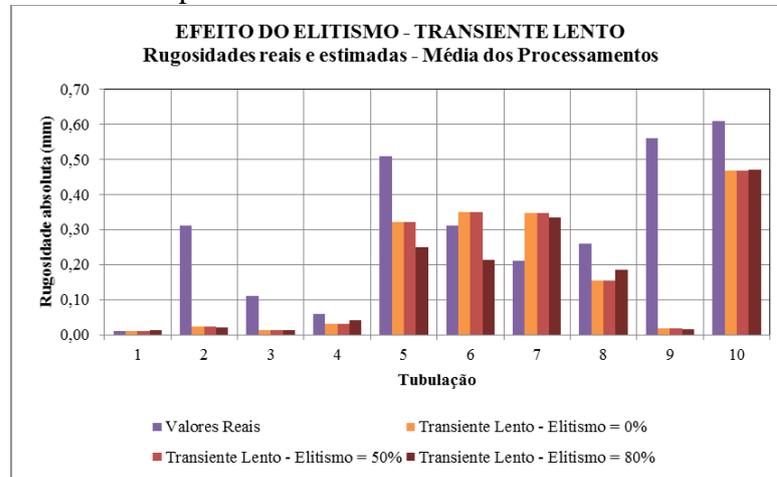
Ao se aplicar o elitismo no transiente lento (duração de 120 segundos) o comportamento do EMR é divergente quando se comparado ao transiente rápido. Com a aplicação da taxa de 50% de elitismo houve uma redução de 61,3% do EMR (em relação à simulação sem elitismo) e de 39,2% no desvio padrão. A aplicação da taxa de 80% de elitismo provocou uma redução de 58,9% do EMR (em relação à simulação sem elitismo) e de 15,6% no desvio padrão dos valores médios dos processamentos.

Ao se realizar um comparativo do comportamento da população inicial (sem elitismo) com a população final (taxa de 80% de elitismo), mesmo que se tenha uma redução significativa de 58,9% no EMR da calibração das rugosidades e de 15,6%, na população referente à taxa de 50% de elitismo foram obtidos melhores resultados para EMR e desvio padrão.

Portanto, essa análise indica que, para processos de transiente lento, onde o escoamento se comporta de maneira similar ao escoamento transiente, valores extremos de taxas de elitismos não apresentam resultados tão bons quanto taxas intermediárias. Os efeitos

do elitismo na média dos processamentos estão mostrados graficamente na Figura 6.22, a seguir.

Figura 6.22 – Efeito do elitismo nos valores médios do transiente rápido.

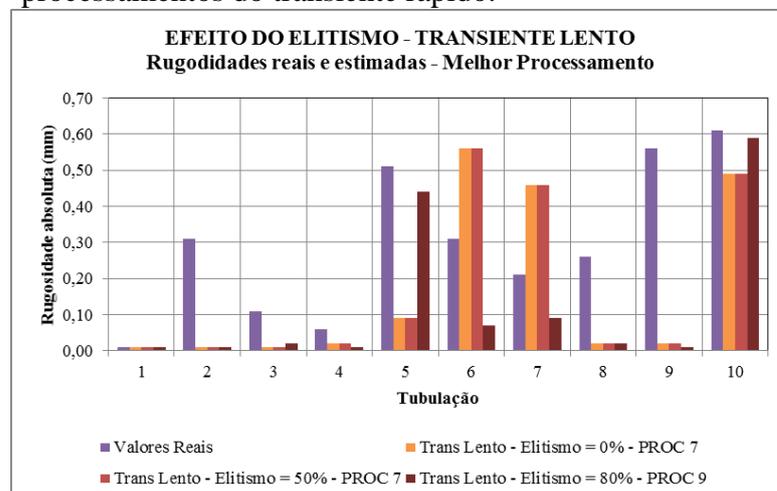


Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda no transiente lento, ao analisar-se os melhores processamentos de cada taxa de elitismo aplicada, tem-se que a função objetivo ótima da taxa de 50% de elitismo é a de menor valor absoluto (13,72% menor que a função objetivo ótima sem elitismo), enquanto a função objetivo ótima da taxa de 80% de elitismo é 3,27% menor que a função objetivo ótima sem elitismo, que é a função objetivo ótima que apresenta maior valor absoluto.

Quanto ao EMR dos melhores processamentos, há a redução de 61,3% do mesmo na aplicação da taxa de 50% de elitismo e a redução de 58,9% do mesmo na aplicação da taxa de 80% de elitismo (ambos em relação ao processamento sem elitismo). Esses efeitos estão mostrados graficamente na Figura 6.23, abaixo.

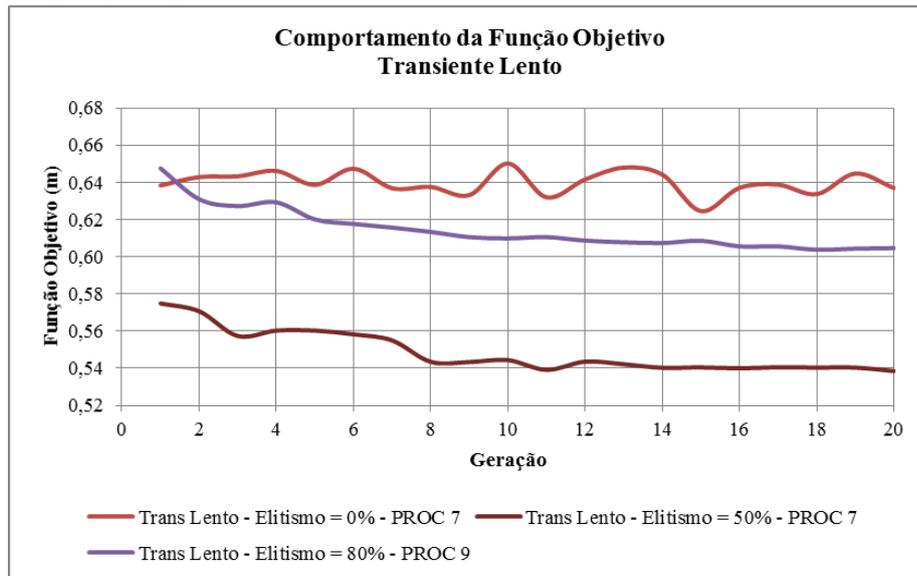
Figura 6.23 – Efeito do elitismo nos melhores processamentos do transiente rápido.



Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento da função objetivo ótima nas 20 gerações para o transiente lento com base no melhor processamento está disposto na Figura 6.24, abaixo, e, nela, pode-se notar que os mínimos valores procurados da função objetivo são encontrados com a taxa de elitismo de 50%, valores esses que são bem inferiores aos valores da taxa de elitismo de 0%. Diferentemente do transiente rápido, as funções não possuem comportamentos tão semelhantes.

Figura 6.24 – Função objetivo ótima nos melhores processamentos do transiente lento.



Fonte: Elaborado pela autora.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação apresentou-se um estudo comparativo da calibração de rugosidades em uma rede de distribuição de água hipotética submetida a escoamentos transientes distintos, de curta duração (transiente rápido) e de longa duração (transiente lento), que remete a comportamentos semelhantes ao escoamento permanente.

Os cálculos das cargas hidráulicas permanentes, necessários para as simulações, foram realizados com precisão pelo programa R1, assim como as cargas hidráulicas transientes foram calculadas pelo programa R2. O programa R3 calculou as rugosidades estimadas nos tubos da rede, assim como a função objetivo ótima mínima em todas as gerações de simulações.

A técnica de otimização dos Algoritmos Genéticos é compatível para a calibração de redes de água e sua baixa velocidade de convergência quando comparada aos demais métodos de otimização como a Programação Linear, Programação Dinâmica e Programação Não Linear não impacta nas aplicações do método.

Pela análise dos estudos, pode-se concluir que, com base nos erros médios relativos, a taxa de elitismo escolhida como parâmetro vai influenciar na redução ou aumento do erro da calibração da rede. Com base nos estudos, no transiente rápido, quanto maior a taxa de elitismo, menor o erro, enquanto no transiente lento, o erro apresenta valores altos para as taxas extremas e valor mínimo para taxas intermediárias.

O valor da função objetivo no regime transiente lento foi menor do que no regime transiente rápido. Quanto à taxa de elitismo, o comportamento da função objetivo foi mínimo na taxa intermediária de 50%, o que indica que os parâmetros do algoritmo genético não devem tender a extremos máximos e nem mínimos, ou seja, valores intermediários de taxas de variação de elitismo implicam em resultados com menor erro médio relativo e menor desvio padrão.

Para se realizar a calibração de uma rede, o ideal é conhecer as possibilidades dos transientes que venham a acontecer nesta, assim como as suas durações, pois essas informações influenciam na definição dos parâmetros do algoritmo genético, uma vez que o erro da calibração varia o comportamento de acordo com o escoamento transiente (rápido ou lento).

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a opção de variar a taxa de elitismo em um intervalo mais abrangente para se avaliar melhor o comportamento da calibração com a variação desse parâmetro. Sugere-se também variar outros parâmetros do algoritmo genético para avaliar a influência de todos os parâmetros na calibração.

Indica-se estender a metodologia desse trabalho para os outros nós da rede de distribuição e comparar os resultados obtidos em cada nó observado.

Aconselha-se, ainda, a aumentar-se a amplitude dos tempos dos transientes (desde transientes mais bruscos a transientes com durações maiores para que o escoamento tenda mais ao escoamento permanente) para tentar reduzir os erros.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR NETO, M. F. **Otimização de redes de distribuição de água por algoritmos genéticos**. 2003. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**. 2003. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- BARBOSA, M. P. R. **Modelagem Computacional de Chaminés de Equilíbrio e Tanques de Alimentação Unidirecional Como Dispositivos Atenuadores do Golpe de Aríete em Adutoras**. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.
- BHAVE, P. R. Calibrating water distribution network models. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v.114, n. 1, p. 120-136, 1988.
- 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 calibration of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.116, n. 11, p. 1329-1344, novembro, 1990.
- BROWN. K. **Modeling Leakage in Water Distribution Systems**. Florida.2003. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Florida State University, College of Engineering, 2007.
- CARRERA, J., NEUMAN, S. P. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. maximum likelihood method incorporating prior information. **Water Resources Research**, v. 22, n. 2, p. 199-210, 1986a.
- CHAUDHRY, M. Hainf. **Applied Hydraulic Transients**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 3ª edição, 2014.
- CHEUNG, P. B.; SOUZA, R. S. Influência do zoneamento de uma rede hidráulica na acurácia de um modelo de calibração. 15p. 21º **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. João Pessoa – PB, 2001.
- COLOMBO, F. **Calibração de modelos hidráulicos de redes de abastecimento de água de sistemas reais admitindo vazamentos**. 2007. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- 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.
- DEJONG, K. **The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems**. University of Michigan, 1975. 256 p. (PhD thesis).

FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBIOLO, A. Calibration of roughness in water distribution networks. MILLER, D. S. (ed.). **2nd International Conference on Water Pipeline Systems**, BHR Group Conference Series, p. 379-396, Edinburgh, Scotland, 1994.

GAMBALE, S. R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de rede de água**. 2000. 266 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 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: Reading, Mass, 1989.

GUMIER, C.C., LUVIZOTTO JR. E. Aplicação de modelo de simulação-otimização na gestão da perda de água em sistemas de abastecimento. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, v. 12, n. 1, p. 32-4, Jan/Mar, 2006.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. MIT Press, 1975.

KANG, D., LANSEY K. Real-Time demand estimation and confidence limit analysis for water distribution systems. **Journal of Hydraulic Engineering Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 10, October 1, 2009.

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.

KOELLE, E. **Transientes hidráulicos em instalações de condutos forçados, aplicações em Engenharia**. Apostila da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1983.

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.

LESSA, R. C. **Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Água**. 1984. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1984.

MARTIN, D. W.; PETERS, G. The application of Newton's method to network analysis by digital computer. **Journal of Institute of Water Engineers**, v17, n,2, p. 115-129, 1963.

MENDONÇA, L. C. **Estudo de Transientes Hidráulicos em uma Instalação de Bombeamento**. 1986. 213 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1986.

NEVES, C.L. **Calibração de parâmetros de modelos hidráulicos de redes de distribuição de água para estudos de operação de rede**. 2007. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília. Brasília, 2007.

ORMSBEE, L. E. Implicit network calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 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.

PIZZO, H.S. **Calibração de modelos de distribuição de água através do acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder–Mead**. 2004. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

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

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

RECHENBERG, I. **Evolutionsstrategie - Optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution**. 170 S. mit 36 Abb. Frommann-Holzboog-Verlag. Stuttgart 1973.

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

REIS, L. F.; 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.

RIGHETTO, A. M. Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 3 p.33-44, Set. 2001.

SANTOS, A. C. N. **Estudo de calibração de uma rede de distribuição de água de Itajubá-MG utilizando Algoritmos Genéticos**. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010.

SANTOS, R. M. N. **Modelagem computacional do golpe de Aríete em adutoras**. 2000. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2000.

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

SILVA, F. G. B. **Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos**. 2003. 325 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo *campus* São Carlos. São Carlos, 2003.

SILVA, A. C. A. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos**. 2006. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

SOARES, A. K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão**. 2003. 336 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

SOARES, A. K. **Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório**. 2007. 332 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

SOUZA, R. S. de. **Controle operacional otimizado de redes de distribuição de água usando a teoria do regulador quadrático linear**. 1998. 297 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

STREETER, Victor L., WYLIE, E. Benjemim. **Fluid Transients**. Nova York. McGrawHill Editora, 1978.

SUN, N. Z. **Inverse problems in groundwater modeling**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.

RAHAL, C.M; STERLING, M.J.H.; COUBELCK, B. **Parameter tuning for simulation models of water distribution networks**. Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2, Sept., p.751-762. 1980.

WALSKI, T.M. **Technique for Calibrating Network Models**. J. Water Res. Plng and Mgmt, ASCE, v. 109, n.4, p.360-372, 1983.

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

WALSKI, T.M; DEFRANK, N.; VOGLINO, T.; WOOD, R E WHITMAN, B.E. (2006). **Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models**. Disponível em: < <http://epanet.com/whitepapers.asp>>. Acessado em 01 de fevereiro de 2017.

WALSKI, T.M; DEFRANK, N.; VOGLINO, T.; WOOD, R E WHITMAN, B.E. Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models. **8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium**, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30, 2006.

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.

WU, Z.Y. Data usage protocol for leakage detection and EPS model calibration. **10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference**, Kruger National Park, South Africa, August 17-20, 2008.

WU, Z.Y. E SAGE, P. Water Loss Detection Via Genetic Algorithm Optimization-Based Model Calibration. **8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis**, Cincinnati, Ohio, 11p, 2006.

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