

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de  
Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos**

**Ana Carolina Nascimento Santos**

**ITAJUBÁ**

**2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Ana Carolina Nascimento Santos**

**Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de  
Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos**

**Dissertação submetida ao programa de Pós-  
Graduação em Meio Ambiente e Recursos  
Hídricos como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Ciências em Meio  
Ambiente e Recursos Hídricos**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva**

**Co-Orientador:**

**Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Vianna**

**ITAJUBÁ**

**2010**



Aos meus pais Dilma e Tadeu, minha madrinha Dirce, a minha avó Ilma e meus avós  
Antônio Xavier e Maria Conceição pelos ensinamentos e amizade  
DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter-me dado força e luz para todas as minhas realizações, guiando sempre o meu caminho.

À minha família, por sempre me apoiar em minhas decisões, dando-me forças para jamais desistir.

Ao Professor Dr. Fernando Braga, pelos ensinamentos, pela orientação e paciência, o que me fez enriquecer como pessoa e como profissional.

Ao meu co-orientador Professor Dr. Augusto Viana pelo apoio e sugestões.

Aos funcionários dos Laboratórios do Instituto de Recursos Naturais, em especial ao Júlio, Oswaldinho, André e Paulo Sérgio por estarem sempre dispostos a ajudar.

Aos colegas Felber, Marcão e Mateus pela grande ajuda na coleta dos dados de campo.

Aos moradores dos bairros Jardim América e Por do Sol.

Aos funcionários da Copasa em especial ao Tales, Eduardo, Sérgio, Ferreira e Alessandro pela colaboração nesta pesquisa.

À Capes, pelo auxílio financeiro.

E aos meus grandes amigos, simplesmente por existirem.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
<b>1. - INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. - OBJETIVO</b> .....	3
<b>3. - JUSTIFICATIVA</b> .....	4
<b>4. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
4.1. - EQUACIONAMENTO DO EQUILÍBRIO HIDRÁULICO.....	5
4.2. - INTRODUÇÃO A CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	6
4.3. - SISTEMÁTICAS DE CALIBRAÇÃO.....	7
<b>4.3.1. - Método iterativo</b> .....	7
<b>4.3.2. - Método explícito</b> .....	8
<b>4.3.3. - Método inverso</b> .....	9
4.4. - APLICAÇÕES RECENTES DE CALIBRAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	9
<b>5. - ALGORITMOS GENÉTICOS</b> .....	13
5.1. - TERMINOLOGIA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	14
5.2. - OPERADORES GENÉTICOS.....	15
<b>5.2.1. - Seleção</b> .....	15
<b>5.2.2. - Recombinação ou cruzamento</b> .....	16
<b>5.2.3. - Mutação</b> .....	18
5.3. - TIPOS DE ALGORITMOS GENÉTICOS.....	20
<b>6. - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	21
6.1. - REDE DO ESTUDO.....	21
6.2. - TREINAMENTOS REALIZADOS.....	23
6.3. - TRABALHOS DE CAMPO REALIZADOS.....	24
<b>6.3.1. - Detecção de vazamentos grosseiros na área de estudo</b> .....	24
<b>6.3.2. - Medidas de pressão</b> .....	26
<b>6.3.3. - Medidas de vazão</b> .....	27
<b>6.3.4. - Dados de consumo de água</b> .....	28
<b>6.3.5. - Verificação das cotas topográficas</b> .....	29
6.4. - ESTUDO DA ROTINA COMPUTACIONAL.....	30

6.5. - IMPLEMENTAÇÃO DA ROTINA COMPUTACIONAL.....	32
<b>7. - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
7.1. - RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	33
<b>7.1.1. - Pressão .....</b>	<b>33</b>
<b>7.1.2. - Vazão .....</b>	<b>37</b>
7.2. - RESULTADOS COMPUTACIONAIS .....	38
<b>7.2.1. - Análise da evolução da função de aptidão.....</b>	<b>39</b>
<b>7.2.3 - Pressão .....</b>	<b>42</b>
<b>7.2.4. - Análise de rugosidade.....</b>	<b>50</b>
8. - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	53
9. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação termos utilizados nos Algoritmos Genéticos e seu correspondente conceito na genética. (adaptada de Da Silva (2006)) .....	14
Tabela 2 – Tipos de cruzamentos (adaptada de Neves, 2007).....	18
Tabela 3 – Tipos de mutação (adaptada de Neves, 2007).....	20
Tabela 4 – Conjuntos dos dados de pressão .....	26
Tabela 5 – Parâmetros dos AGs utilizados para a calibração da rede .....	32
Tabela 6 – Critérios Mínimos para a Estabilização da Calibração (WATER RESEACH CENTRE, 1989).....	39
Tabela 7 – Rugosidades (mm) – conjunto 1 .....	51
Tabela 8 – Rugosidades (mm) - conjunto 2 .....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Recombinação de um ponto (adaptada de Silva, 2003) .....	17
Figura 2 – Recombinação de 2 pontos (adaptada de Silva, 2003).....	17
Figura 3 – Recombinação de 3 pontos (adaptada de Silva, 2003).....	17
Figura 4 – Esquema de mutação .....	19
Figura 5 – Organograma das etapas do trabalho.....	21
Figura 6 – Localização da cidade de Itajubá.....	22
Figura 7 – Rede de distribuição estudada. ....	23
Figura 8 – Treinamentos realizados para uso dos equipamentos:	
(a) Geofone, (b) DGPS. ....	24
Figura 9 – Campanha de campo para a verificação da existência de vazamentos.....	25
Figura 10 – (a) e (b) Medidores de pressão com armazenador de dados instalados em pontos diferentes de monitoramento.....	26
Figura 11 – Rede de distribuição estudada com o detalhe dos pontos de monitoramento. ....	27
Figura 12 – Mostrador digital do medidor de vazão eletromagnético.....	28
Figura 13 – Rede fictícia para estimativas de demandas nos nós.....	29
Figura 14 – (a) e (b) – equipamento DGPS utilizado na verificação das cotas. ....	30
Figura 15 – Algoritmo geracional elitista utilizado, Silva (2003).....	31
Figura 16 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 1 .....	33
Figura 17 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 2 .....	34
Figura 18 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 3 .....	34
Figura 19 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 4 .....	35
Figura 20 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 5 .....	36
Figura 21 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 6 .....	36
Figura 22 – Pressão para o mesmo horário medida nos diferentes pontos .....	37
Figura 23 – Variação da vazão de saída do reservatório medida durante 24 horas. ....	38
Figura 24 – Evolução da função de aptidão ao longo das gerações para o conjunto 01.....	40
Figura 25 – Evolução da função de aptidão ao longo das gerações para o conjunto 02.....	40
Figura 26 – vazões medidas e simuladas para diferentes padrões de demanda – conjunto 1 .....	41
Figura 27 – vazões medidas e simuladas para diferentes padrões de demanda – conjunto 2 .....	42

Figura 28 – Pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima no nó 1.....	43
Figura 29 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima no nó 3.....	43
Figura 30 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 6.....	44
Figura 31 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 8.....	44
Figura 32 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 15.....	45
Figura 33 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 25.....	45
Figura 34 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 1.....	46
Figura 35 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 3.....	46
Figura 36 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 6.....	47
Figura 37 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 8.....	47
Figura 38 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 15.....	48
Figura 39 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 25.....	48
Figura 40 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima.....	49
Figura 41 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média.....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas

AG - Algoritmo Genético

AGs - Algoritmos Genéticos

AGH - Algoritmo Genético Híbrido

*BLX- $\alpha$*  – Recombinação mistura (*Blend Crossover*)

COPASA – Companhia Mineira de Água e Esgoto

EPA – Agência de Proteção Ambiental Americana

EPANET – Simulador hidráulico desenvolvido pela EPA

F.O. – Função Objetivo

GALIB - Biblioteca para o desenvolvimento dos AGS

IPOP – Melhores soluções que garantem a passagem para a iteração seguinte

LM – Método de busca de Levenberg-Marquart

m.c.a. – metro de coluna d'água

NPOP – Tamanho total da população aleatória

Pm - Probabilidade de mutação

VRP – Válvula Redutora de Pressão

TMA - Time Maching Approach

WaterCAD – Simulador hidráulico

## LISTA DE SÍMBOLOS

*Obs* – denota os valores observados

*C* - número de condições de demanda

$C_i$  - demanda do nó *i*

$h_p$  - perda de carga do componente *i* pertencente ao circuito  $\xi$

$h_b$  - energia adicionada pela bomba no trecho *i* pertencente ao circuito  $\xi$

$J_i$  - Elemento hidráulico

*M* - Conjunto de pontos de observação de valores de vazão

*N* - Conjunto de pontos de observação de valores de pressão

*P* - Carga de pressão

$\xi$  - um circuito (aberto ou fechado)

*Q* - Vazão

$Q_{ij}$  - Vazão de chegada ao nó *i* pelo tubo *j*

$\Delta E$  - diferença de energia entre os pontos extremos do circuito.

$N_{\text{genes}}$  – quantidade de elementos de cada solução

*sim* – denotam valores simulados

$w_H$  – pesos atribuídos aos desvios de pressão

$w_Q$  – pesos atribuídos aos desvios de vazão

## RESUMO

SANTOS, A.C.N. (2010), Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos. Itajubá, 2010. 57p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

Os recursos hídricos vêm se tornando cada vez mais escassos em termos de qualidade e quantidade principalmente na proximidade de grandes centros urbanos. Os sistemas de distribuição de água são grandes consumidores de água e normalmente apresentam deficiências em seu pleno funcionamento, ocasionando muitas perdas deste recurso. Uma das principais frentes a serem abordadas está na operação adequada do sistema. Entretanto, a etapa que precede esta atividade está relacionada a calibração da rede. Neste estudo foi aplicada uma metodologia de calibração proposta por Silva (2003) a um sistema de distribuição da Cidade de Itajubá - M.G., em que se ajustam os valores de rugosidades a partir de principalmente valores de pressões medidos e simulados; destacando-se o pioneirismo deste estudo no sul de Minas Gerais. Os resultados mostraram-se coerentes em termos de parâmetros ajustados e de valores de pressões e vazões.

**Palavras-chaves:** redes de distribuição de água, calibração, Algoritmos Genéticos

## **ABSTRACT**

SANTOS, A.C.N. (2010), Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos. Itajubá, 2010. 63p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

Water resources are becoming scarce in terms of quality and quantity mainly near large urban centers. The water distribution systems are large consumers of water and typically have deficiencies in their full functioning causing much loss of water. One of the main fronts to be addressed is the proper operation of the system. However the step before that activity is related to calibration of the network. This study applied a calibration methodology proposed by Silva (2003) to a distribution system of the City of Itajubá - MG in values of roughness changes and modify mainly from pressure values measured and simulated, that study is pioneer to City. The results were consistent in terms of adjusted parameters and values of pressures and flow rates.

**Keywords:** water distribution systems, calibration, Genetic Algorithms

## 1. - INTRODUÇÃO

As perdas em sistemas de distribuição de água representam um percentual significativo do volume de água captado, tratado e distribuído para o consumo. Estas perdas podem ser classificadas como físicas ou não físicas. As perdas não físicas estão relacionadas com o processo de comercialização da água consumida pela população: são erros na medição, usuários não cadastrados, ligações clandestinas; enfim, eventos que fazem com que volumes efetivamente consumidos não sejam faturados. Já as perdas físicas representam o volume de água que é realmente perdido, principalmente através de vazamentos ao longo do sistema de abastecimento de água.

Além das perdas, muitos sistemas de abastecimento de água têm apresentado deficiências operacionais, seja, pelo elevado incremento na demanda nos últimos anos ou pela falta de manutenção adequada. O aumento da demanda ocasionado pelo crescimento demográfico e pelas mudanças nos padrões de consumo da sociedade tem tornado os sistemas de distribuição de água cada vez mais complexos exigindo, portanto, uma análise mais precisa do comportamento hidráulico da rede.

Sabe-se que apesar dos investimentos de algumas companhias de água no sentido de prestarem melhores serviços, algumas redes de abastecimento de água não possuem controle efetivo de perdas, e os dados cadastrais não são confiáveis, ficando evidente a necessidade de modernização do setor de abastecimento de água diante das exigências impostas pelas sociedades urbanas da atualidade, especialmente induzidas pelos processos de democratização e conscientização ecológica.

Embora, seja reconhecido que não existem sistemas estanques, sabe-se que um melhor gerenciamento do sistema de abastecimento de água é capaz de diminuir as perdas causadas principalmente por variações de pressão, esta diminuição de perdas além de tornar a empresa de saneamento mais eficiente também retardaria ou mesmo adiaria a busca por novas fontes de abastecimento que, principalmente em grandes centros se situam cada vez mais distantes do consumidor.

Graças ao desenvolvimento computacional das últimas décadas, modelos matemáticos cada vez mais complexos têm possibilitado o surgimento de técnicas avançadas nas questões relacionadas ao projeto e dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água, incluindo o problema do controle operacional das perdas físicas.

Para a operação adequada de um sistema de abastecimento de água é necessário que sejam conhecidos os parâmetros dos componentes da rede como coeficiente de atrito,

diâmetro, resistência ao escoamento, entre outros. Tais parâmetros se modificam com o tempo e são de difícil medição, para resolver este problema muitos pesquisadores têm desenvolvido ferramentas de calibração obtendo resultados animadores e apontando tais ferramentas como o diferencial no controle operacional de sistemas de distribuição de água.

A calibração é uma técnica que busca estimar valores para as variáveis desconhecidas de um sistema com o auxílio de outras ferramentas como simulador hidráulico e técnicas de otimização, entre as técnicas de otimização utilizadas destacam-se os algoritmos genéticos, que por sua robustez conseguem encontrar soluções ótimas ou próximas da ótima em um menor tempo computacional. Deste modo, avalia-se que a calibração é a uma etapa fundamental para se poder ter o domínio computacional de uma rede de distribuição de água para abastecimento, sendo o enfoque deste trabalho relacionado à aplicação da calibração a uma rede real.

## **2. - OBJETIVO**

O objetivo principal do presente trabalho é realizar a calibração de uma rede de distribuição de água da cidade de Itajubá-MG utilizando o modelo proposto por SILVA (2003). Este modelo utiliza o procedimento inverso, também conhecido como implícito, para calibrar o sistema, avaliar a eficiência hidráulica e otimizar a operacionalização da rede. O procedimento inverso consiste na minimização da diferença dos valores de alguns parâmetros simulados e medidos do sistema de distribuição de água, no caso pressão e vazão. Esta função a ser minimizada é chamada de função objetivo (F.O.), o parâmetro aqui escolhido para ajuste foi a rugosidade das tubulações.

### 3. - JUSTIFICATIVA

O aumento do consumo de água, o déficit na disponibilidade e a iminente cobrança pelo uso da água em diversas bacias, o que até o momento ocorre apenas na bacia do Rio Paraíba do Sul e na bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ), são alguns dos fatores que tornam primordial a utilização consciente do recurso água, principalmente em grandes cidades onde as fontes superficiais de abastecimento se encontram cada vez mais longe dos centros consumidores aumentando os custos com a adução e distribuição.

As empresas concessionárias do abastecimento de água têm agora um novo desafio, atender à demanda, distribuir água de qualidade, com o menor custo, além de buscar metodologias que possibilitem uma operacionalização mais eficiente do sistema.

Muitos pesquisadores como Walski (1983 e 1986), Wu (2002 e 2008), Silva (2003), Soares (2003 e 2007) entre outros, têm se voltado para esse tema e apontado o uso de ferramentas de calibração e otimização como o diferencial na operação de tais sistemas.

A necessidade de um melhor gerenciamento dos sistemas de distribuição de água aliada a observação de que não existem registros da utilização de ferramentas de calibração e otimização aplicadas a redes de distribuição da cidade de Itajubá-MG foi o agente motivador para elaboração deste estudo. Destaca-se, portanto, o caráter pioneiro que este estudo apresenta.

## 4. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 - EQUACIONAMENTO DO EQUILÍBRIO HIDRÁULICO

Nos modelos hidráulicos, as condições de equilíbrio da rede devem ser satisfeitas pela utilização das leis fundamentais que regem a mecânica dos fluidos, que são: a lei de conservação da massa e a lei da conservação da energia, bem como a relação entre a vazão e a perda de carga.

A lei da conservação da massa, aplicada a cada nó do sistema é especificada pela expressão 4.1.

$$\sum_{j \in J_i} (Q_{ij}) - C_i = 0 \text{ para } i = 1, \dots, N \quad (4.1)$$

Sendo  $J_i$  o conjunto de tubos conectados ao nó  $i$ ,  $C_i$  a demanda do nó  $i$  e  $Q_{ij}$  a vazão de chegada ao nó  $i$  pelo tubo  $j$ .

De acordo com Cheung (2003) apud Lansey e Mays (2000), o balanço de energia pode ser escrito sob três formas: (1) entre dois pontos de um trecho (2) entre dois nós de energia constante contendo uma série de tubulações, válvula e bombas entre estes pontos, (3) um circuito que começa e termina no mesmo ponto. De maneira geral, Lansey e Mays (2000) apresentam essas afirmações conforme equação 4.2

$$\sum_{i \in \xi} h_{pi} + \sum_{i \in \xi} h_{bi} = \Delta E \quad (4.2)$$

Sendo  $\xi$  um circuito (aberto ou fechado);  $h_p$  a perda de carga do componente  $i$  pertencente ao circuito  $\xi$ ;  $h_b$  a energia adicionada pela bomba no trecho  $i$  pertencente ao circuito  $\xi$  e  $\Delta E$  a diferença de energia entre os pontos extremos do circuito.

A análise do equilíbrio para redes de distribuição de água malhadas constituída por  $i$  nós e  $j$  tubos é feita pela resolução de  $j$  equações relativas à perda de carga nos tubos e  $i$  equações de continuidade nos nós. Considerando a não linearidade das equações de perda de carga e a grande de quantidade de equações a serem resolvidas mesmo para uma rede de pequeno porte (poucos nós e trechos) percebe-se a complexidade do cálculo de redes malhadas.

A técnica mais antiga e de maior popularidade para a análise do equilíbrio para redes de distribuição de água malhadas é o método Hardy-Cross, sendo praticamente o único método utilizado antes do advento dos computadores. O método Hardy-Cross é um método de aproximações sucessivas, no qual uma única equação é resolvida a cada iteração, o cálculo se repete até que a convergência seja obtida dentro de critérios de tolerância estabelecidos.

#### 4.2 - INTRODUÇÃO A CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A calibração é o processo de determinação dos parâmetros hidráulicos desconhecidos necessários para que o modelo de simulação hidráulica represente realisticamente o comportamento de um sistema.

Um sistema hidráulicamente calibrado, em que são conhecidas as variáveis permite um maior controle nos processos físicos, como por exemplo, o controle da pressão do sistema.

Tendo em vista alguns trabalhos clássicos e detalhando um pouco mais os passos básicos sugeridos por Walski (1986), podem ser sugeridas sete etapas a serem seguidas para calibração de redes:

1. Identificação da finalidade de uso do modelo;
2. Determinação dos parâmetros a serem estimados no modelo;
3. Coleta de dados para a calibração;
4. Aplicação do algoritmo baseando-se nas estimativas iniciais de parâmetros do modelo;
5. Análise de ajuste preliminar ou uma macro-calibração;
6. Análise de sensibilidade;
7. Análise de ajuste fino ou uma micro-calibração.

Walski (1986) em uma análise simplificada divide o processo de calibração em apenas duas etapas: (1) comparação de valores de pressões e vazões simulados com os valores observados para as mesmas condições de operação do sistema, (2) ajuste dos parâmetros de entrada do modelo para melhorar a eficiência do processo na obtenção dos valores calculados.

Segundo o autor, um modelo pode ser considerado calibrado, para uma condição específica de operação, se ele puder prever vazões e pressões com razoável precisão, embora ele próprio tenha encontrado divergência na literatura sobre os critérios de avaliação da precisão a partir dos quais um modelo possa ser considerado calibrado. Entretanto, não é consenso geral o nível de precisão que deve ser obtido quando se calibra um sistema.

Segundo documento publicado pelo Programa de Combate ao Desperdício de Água elaborado pela Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano em 1999 o controle de pressão possibilita:

- Reduzir o volume perdido em vazamentos, economizando recursos de água e custos associados;
- Reduzir a frequência de arrebentamentos de tubulações e conseqüentes danos que têm reparos onerosos, minimizando também as interrupções de fornecimento e os perigos causados ao público usuário de ruas e estradas;
- Prover um serviço com pressões mais estabilizadas ao consumidor, diminuindo a ocorrência de danos às instalações internas dos usuários até a caixa d'água (tubulações, registros e bóias); e
- Reduzir os consumos relacionados com a pressão da rede, como por exemplo, a rega de jardins.

### 4.3 - SISTEMÁTICAS DE CALIBRAÇÃO

Em geral os procedimentos de calibração são classificados em três diferentes categorias, a saber:

Iterativos;

Explícitos, diretos ou analíticos;

Implícitos ou inversos

#### 4.3.1. - Método iterativo

De acordo com 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, sendo que foram realizados trabalhos para redes de 7 nós e 8 trechos e, posteriormente, outras rede

de 271 nós e 307 trechos. Destaca-se ainda o trabalho clássico de Bhave (1988) que 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.

#### **4.3.2. - Método explícito**

Os métodos explícitos também conhecidos como analíticos ou diretos resolvem um conjunto de equações que descrevem o sistema hidráulico. Silva (2003) cita alguns trabalhos relevantes e clássicos, podendo-se destacar os trabalhos de Ormsbee e Wood (1986), Boulos e Wood (1990), Boulos e Ormsbee (1991).

Ormsbee e Wood (1986) desenvolveram um algoritmo de calibração explícito para aplicação em redes de água em termos das rugosidades e da demanda nos nós, o método foi desenvolvido pela reformulação das equações de conservação de massa e de energia e de equações adicionais do escoamento. Tais equações são resolvidas explicitamente através do método de Newton-Raphson para determinadas condições de operação.

Boulos e Wood (1990) apresentaram um método para a determinação direta de parâmetros de projeto, operação e calibração de redes, introduzindo equações adicionais de conservação de massa e energia, os autores estabelecem também restrições nos valores de pressão e vazão para diversas condições de operação. Para a resolução simultânea do sistema de equações foi utilizado o método de Newton-Raphson como procedimento de linearização dos termos não lineares.

Boulos e Ormsbee (1991) propuseram um método de calibração baseado no aperfeiçoamento do método proposto por Ormsbee e Wood (1986). O método que foi originalmente desenvolvido para determinar parâmetros do sistema durante testes de incêndio sob determinadas condições de contorno apresentou algumas falhas, visto que tais testes devem ser realizados simultaneamente, assim o método foi estendido para que diversas condições de contorno fossem consideradas nos testes de incêndio.

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) salienta 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.

Observa-se que, assim como acontece para o procedimento inverso, os modelos de calibração explícitos foram aplicados apenas em redes de pequeno porte da literatura. Silva (2003) afirma 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.

#### **4.3.3. - Método inverso**

O método inverso ou método implícito consiste na minimização da diferença entre valores simulados e os valores correspondentes observados, através de otimização. Os resultados dos modelos de simulação hidráulica de redes são expressos, geralmente, em termos dos valores das variáveis de estado pressão e vazão, o método inverso é aplicado para a determinação dos parâmetros do sistema, tais como rugosidades, diâmetros, demandas, etc., de maneira a minimizar os desvios entre os valores observados e os correspondentes valores simulados das referidas variáveis. Silva (2003) cita alguns trabalhos publicados de relevância que utilizaram o método inverso de calibração: Datta e Sridharan (1994), Ormsbee (1989) Lansley e Basnet (1991), Savic e Walters (1995 e 1997), Vitkovsky e Simpson (1997), Walters (1998), Tucciarelli *et al.* (1999) Kapelan *et al.* (2002), Lingireddy e Ormsbee (2002).

#### **4.4. - APLICAÇÕES RECENTES DE CALIBRAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Atualmente, alguns trabalhos sobre o tema foram apresentados, muitos deles considerando a modelagem de vazamentos e os algoritmos genéticos como ferramenta de otimização, podendo citar: Silva (2003), Soares (2003) e (2007), Wu e Sage (2006), Colombo (2007), Neves (2007), Brown (2007) e Wu (2008).

Inicialmente destaca-se o próprio trabalho de Silva (2003), onde se aplicou os Algoritmos Genéticos no processo de calibração de redes de distribuição de água na cidade de São Carlos, SP. Neste modelo 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. Silva (2003) também investiga operadores genéticos 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 & 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 & 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.

Posteriormente, 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.

Ao término da revisão conclui-se que a calibração de redes de distribuição de água consiste em uma etapa fundamental para o melhor conhecimento do funcionamento da rede oferecendo subsídio para a implantação de um plano de controle do sistema.

## 5. - ALGORITMOS GENÉTICOS

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), estes 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.

A unidade básica de um AG é o cromossomo, referido com string, que é formado por uma série de caracteres ou traços, 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.

A etapa inicial de um AG simples é a geração aleatória de uma população inicial de soluções, durante o processo de otimização a população é avaliada pela função objetivo e cada solução recebe um valor chamado aptidão (*fitness*), que mede o grau de qualidade da solução. Aquelas soluções com valores menores para a função objetivo são descartadas enquanto as que apresentam valores maiores são mantidas para formarem uma próxima população.

Em geral, a população inicial é gerada de maneira aleatória, no entanto se a população inicial for pequena é provável que algumas regiões do espaço de busca não serão representadas. Esse problema pode ser minimizado gerando a população inicial de maneira uniforme. (Lacerda e Carvalho, 1999) indicam que outra alternativa é gerar metade da população aleatoriamente, e os demais indivíduos invertendo-se os bits daqueles gerados de maneira aleatória. Sabe-se que a população inicial afeta diretamente na diversidade dos indivíduos que compõem o espaço de busca. Espaço de busca é o local onde se encontram as possíveis soluções para o problema.

O grau de aptidão de cada indivíduo é, em geral, avaliado pela função objetivo, consistindo na maximização ou minimização desta função, porém existem casos em que a utilização do valor da função objetivo como o valor de aptidão não é adequado sendo necessária a conversão deste valor através de técnicas de escalonamento e ordenamento.

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; realizam buscas simultâneas em várias regiões

do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto; utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar; otimizam um número grande de variáveis; otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais; fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução; são fáceis de serem implementados em computadores e, também, facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas.

### 5.1. - TERMINOLOGIA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Os termos utilizados nos algoritmos genéticos são originários da genética, a Tabela 1 traz uma comparação entre os termos utilizados nos AGs segundo a literatura revisada (Goldberg (1989), Lacerda e Carvalho (1999), Da Silva (2006)) e seu correspondente conceito na genética.

Tabela 1 – Comparação entre termos utilizados nos AGs e seu correspondente conceito na genética. (adaptada de Da Silva (2006))

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

## 5.2. - OPERADORES GENÉTICOS

Silva (2003) faz uma boa revisão sobre os operadores genéticos. Destaca que os operadores genéticos são procedimentos utilizados para a otimização do problema. Os principais operadores genéticos recebem o nome de seleção, recombinação (*crossover*) e mutação e serão discutidos detalhadamente nos tópicos que seguem.

### 5.2.1. - Seleção

O processo que separa os indivíduos menos aptos e, portanto, que serão descartados dos indivíduos mais aptos que sofrerão recombinação e mutação, compondo assim uma nova geração de possíveis soluções é chamado de seleção. Na literatura podem ser encontrados diversos mecanismos de seleção, tais como torneio, roda de roleta, aleatória, amostragem determinística, *Remainder Stochastic Sampling* entre outros.

Torneio - Na seleção por torneio dois indivíduos selecionados aleatoriamente competem diretamente, com base nos valores da função aptidão, e o melhor é selecionado para reproduzir e o processo é repetido até uma nova geração de soluções seja formada.

Roda da roleta – O método de seleção roda da roleta se baseia na determinação da probabilidade de seleção de cada indivíduo proporcionalmente ao valor da aptidão. Uma classificação dos indivíduos é feita em ordem decrescente de aptidão, faz-se então a soma acumulada de todos. Em seguida gera-se um número  $r$  real no intervalo de zero à soma acumulada de todos e seleciona-se o primeiro indivíduo que possui probabilidade de seleção acumulada maior que  $r$ . O processo de seleção se repete até que a população intermediária seja preenchida com os indivíduos selecionados. Percebe-se que os indivíduos com maior aptidão têm mais chance de serem selecionados.

Aleatória – os indivíduos selecionados para compor a população intermediária são escolhidos aleatoriamente.

Proporcional – Na seleção proporcional os indivíduos que obtiveram as maiores pontuações de aptidão têm maiores probabilidades de serem copiados. Enquanto que os que obtiveram os menores valores têm grandes chances de serem descartados.

Amostragem determinística – Na análise determinística, existem duas etapas, primeiramente são calculadas as probabilidades de seleção como na roda da roleta em seguida

determina-se a quantidade esperada de cada indivíduo, multiplicando-se sua probabilidade de seleção pela quantidade de indivíduos da população. Com isso selecionam-se os indivíduos que apresentam valores de aptidões inteiros e depois aqueles com os maiores valores fracionários.

*Remainder Stochastic Sampling* - Este método é uma versão simplificada da análise determinística a primeira fase obedece aos mesmos critérios adotados para a análise determinística, entretanto, a parte fracionária pode ser escolhida por diferentes critérios de seleção: aleatória, por ordem crescente de desempenho, competição entre indivíduos, etc.

Elitismo - Introduzido pela primeira vez por Kenneth De Jong em 1975, o elitismo tem como objetivo principal manter certo número de “melhores” indivíduos dentro da população avaliada a cada geração.

### **5.2.2. - Recombinação ou cruzamento**

Nos Algoritmos Genéticos a reprodução é feita através do operador genético recombinação. A recombinação talvez seja o principal mecanismo para a exploração do espaço de busca. Esse mecanismo gera cromossomos filhos que possuem características genéticas dos indivíduos geradores (pais). Isso permite a criação de novos indivíduos mais adaptados.

O cruzamento é aplicado com uma dada probabilidade a cada par de cromossomos selecionados. Existem algumas divergências na variação dessa probabilidade, denominada de taxa de cruzamento, revisando a literatura foram encontradas variações entre 60% e 90% e 70% e 100%. Tal variação indica a probabilidade com que serão feitos os cruzamentos. Quanto maior essa taxa, mais rapidamente novas estruturas serão inseridas nessa população. Porém uma taxa muito alta, pode fazer com que estruturas com boas aptidões sejam retiradas mais rapidamente, a maior parte da população será substituída e pode ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor muito baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

Não ocorrendo o cruzamento, os filhos serão iguais aos pais, permitindo a preservação de algumas soluções. Isto pode ser implementado, gerando números aleatórios entre 0 e 1 e caso o número seja inferior a taxa de cruzamento ocorrerá a recombinação, caso contrario não.

O operador de recombinação mais tradicional é o de um ponto de corte (simples), onde a cadeia de bits é cortada em um ponto aleatório produzindo duas cabeças e duas caudas, as

caudas são permutadas gerando dois novos cromossomos. O esquema desse tipo de recombinação é apresentado na Figura 1.

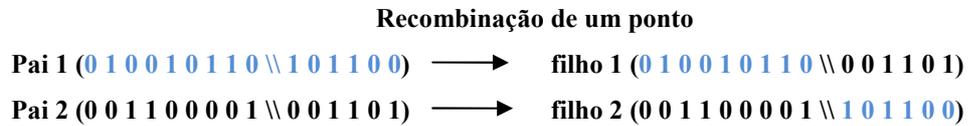


Figura 1 - Recombinação de um ponto (adaptada de Silva, 2003)

Em adição à recombinação de um ponto existem outros tipos de cruzamento: de “n” pontos de corte, uniforme, por variável, entre vários indivíduos e por média.

A recombinação de “n” pontos consiste no corte da cadeia de bits em “n” pontos e a troca das características da solução entre estes pontos. As Figuras 2 e 3 apresentam respectivamente os operadores de 2 e 3 pontos.



Figura 2 - Recombinação de 2 pontos (adaptada de Silva, 2003)

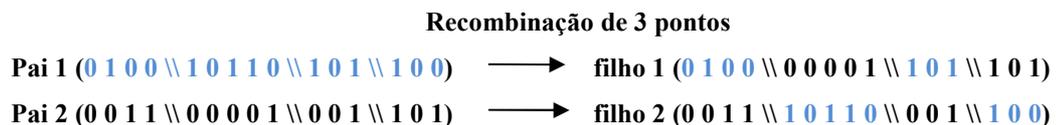


Figura 3 - Recombinação de 3 pontos (adaptada de Silva, 2003)

Soares (2003) ressalta que embora, os operadores genéticos convencionais funcionem bem na representação binária, na representação real eles apenas trocam valores e não geram novas informações o autor indica ainda que a melhor solução para a condição real é o uso de Operadores Aritméticos, onde os tipos de recombinação disponíveis são a recombinação aritmética e a recombinação BLX- $\alpha$  ou recombinação mistura (*Blend crossover*). Outro operador encontrado na literatura para a representação real para simular a combinação genética de dois indivíduos é o cruzamento média. Na Tabela 2 estão descritos de maneira simplificada alguns tipos de recombinação.

Tabela 2 – Tipos de cruzamentos (adaptada de Neves, 2007)

Tipo de cruzamento	Descrição
Cruzamento em um ponto	Corresponde à divisão do material genético em um ponto de corte aleatório, a partir do qual há troca de informações genéticas entre os cromossomos pais.
Cruzamento de n pontos	Corresponde à divisão do material genético em n pontos de corte aleatório, a partir dos quais há troca de informações genéticas entre os cromossomos pais.
Cruzamento média	Corresponde à soma dos parâmetros dos pais dividido por dois. Esse tipo de cruzamento tende a levar os valores para o meio do intervalo diminuindo assim a diversidade.
Cruzamento BLX- $\alpha$	Usado para a representação real, simula o cruzamento média geométrica a partir do parâmetro $\alpha$ .
Cruzamento Simples	Variação do cruzamento em um ponto adaptado para a representação real.
Cruzamento Uniforme	Para cada casal é gerada uma máscara de binária aleatória. Se o primeiro bit da máscara possuir valor igual a 1 então o filho 1 herda o primeiro bit do pai, caso contrário, o bit herdado é do pai dois. Para o segundo filho segue-se a lógica inversa.

### 5.2.3. - Mutação

A mutação é o operador genético que permite que uma característica genética seja introduzida na população de soluções por meio de eventual substituição de genes dos indivíduos. Para o caso de representação binária o valor do gene é alterado de 1 para 0 ou de 0 para 1. No caso de representação real a mutação é feita gene por gene. Esta introdução de característica genética faz com que uma determinada característica necessária que possa não existir na população de soluções e que, portanto, impediria a convergência para a solução correta seja inserida.

Apesar de melhorar a variabilidade genética da população, o operador mutação pode também destruir boas informações contidas no cromossomo, por isso se utiliza uma pequena taxa de mutação. Da Silva (2006) indica que tal taxa varia de 0,1% a 5%. Porém De

Schaetzen (2000) recomenda que a taxa de mutação também chamada de probabilidade de mutação ( $P_m$ ) seja obtida pela fórmula 1:

$$P_m = \frac{1}{N_{genes}} \quad (5.1)$$

Sendo:  $N_{genes}$  a quantidade de elementos de cada solução

O tipo de mutação mais simples é a mutação uniforme em que um único gene é alterado por um número aleatório gerado de uma distribuição uniforme, conforme equação (5.2) apresentada por Da Silva (2006):

$$Filho_i = \begin{cases} \text{Uniforme}(a_i; b_i), & \text{se } i = j \\ Pai_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.2)$$

onde  $a_1$  e  $b_1$  são os limites do intervalo permitido

A Figura 4 apresenta um esquema de mutação simples para representação binária.

Indivíduo (0 1 0 0 1 0 1 1 0)     $\longrightarrow$  antes da mutação  
 Indivíduo (0 1 0 0 0 0 1 1 0)     $\longrightarrow$  depois da mutação

Figura 4 – Esquema de mutação

A Tabela 3 mostra alguns dos principais tipos de mutação que podem ser encontrados na literatura.

Tabela 3 - Tipos de mutação (adaptada de Neves, 2007).

<b>Tipo de Mutação</b>	<b>Descrição</b>
Uniforme	A mutação uniforme é a simples substituição de um gene por um número aleatório gerado de uma distribuição uniforme.
Gaussiana	Na mutação gaussiana é feita a substituição de um gene por um número aleatório de distribuição normal
Limite	Neste tipo de mutação, substitui-se o parâmetro mutante por um dos limites permitidos para este.
Mutação não-uniforme	Simple substituição de um gene por um valor obtido em uma distribuição não-uniforme.
Mutação não-uniforme Múltipla	Todos os genes dos cromossomos sofrem mutação não-uniforme.

### 5.3. - TIPOS DE AGs

Os algoritmos genéticos podem em geral ser classificados, principalmente em geracionais (com ou sem elitismo) e *steady-state*.

Em linhas gerais, nos geracionais a população de soluções dos problemas evoluem e se desenvolvem para um determinado número de gerações pré-estabelecidos. Este número de gerações depende do problema específico e do grau de refinamento exigido. Já nos algoritmos *steady-state*, não são fixados número de gerações mas sim critérios de convergência, com por exemplo valores de pressões e vazões simuladas e medidas.

## 6. - MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas para a realização do presente trabalho são ilustradas no organograma da Figura 5.

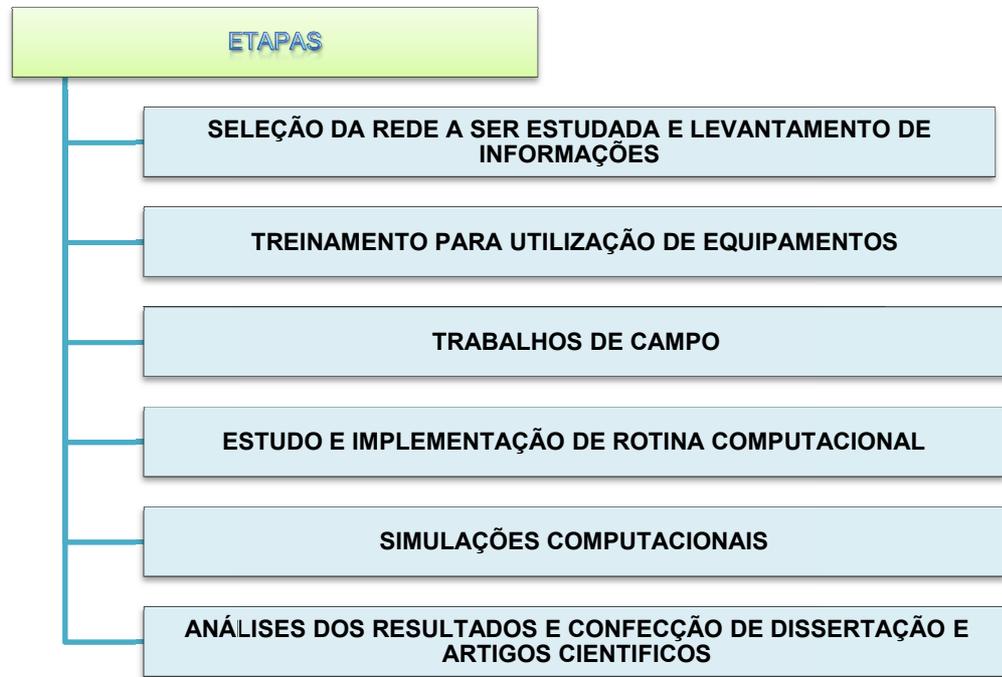


Figura 5 - Organograma das etapas do trabalho.

### 6.1. - REDE DO ESTUDO

A rede selecionada para o estudo faz parte do sistema que abastece o bairro Jardim América e parte do bairro Por do Sol localizados na cidade de Itajubá sul de Minas Gerais. A escolha foi feita principalmente por este setor ser isolado do sistema e dispor de relativa confiabilidade no cadastro, além de disso, foi possível contar com alguns dados iniciais como uma parte do traçado da rede, obtido nos trabalhos de Alves (2006) e Valadão (2006).



Figura 6 – Localização da cidade de Itajubá

Após escolhida a rede foram levantadas informações relativas ao sistema na companhia de água e esgoto (COPASA) tais como: consumo residencial mensal, traçado da rede, definição de materiais das tubulações, diâmetros, dispositivos hidráulicos etc.

No momento em que foi realizada a aquisição destes dados relativos a pesquisa, constava no cadastro da companhia que somente o bairro *Jardim América* era abastecido pelo sistema, porém em visita ao local descobriu-se uma derivação para o bairro denominado *Por do sol*, tal modificação ainda não se encontra alterada no cadastro da COPASA, porém, um esquema da rede com a inclusão da derivação foi feito e pode ser visto na Figura 6, assim como o detalhe da tubulação da derivação. No esquema os números representam os nós da rede, o círculo representa o reservatório que abastece todo o setor estudado e os números em azul as cotas dos nós. A Figura 6 ilustra também a derivação para o bairro *Por do Sol* situado no nó de número 21.

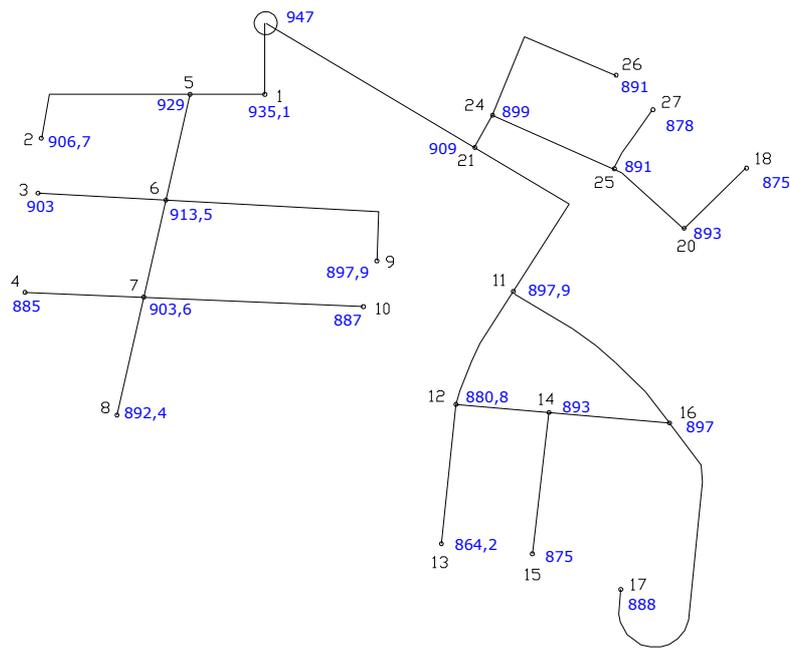


Figura 7 – Rede de distribuição estudada.

A população atendida pela rede de distribuição em questão é de aproximadamente 332 habitantes, contando com 83 ligações de água e esgoto. O comprimento total da rede é de 2591,59 metros. O material da tubulação é PVC, diâmetro 75 mm na região do bairro *Jardim América* e ferro fundido no bairro *Por do Sol* diâmetro 100 mm.

## 6.2. - TREINAMENTOS REALIZADOS

Foram feitos treinamentos para a utilização dos equipamentos necessários para a aquisição dos dados de campo, os treinamentos foram realizados no Laboratório de Estruturas Hidráulicas, no laboratório de Etiquetagem de Bombas e no laboratório de Geoprocessamento, todos na Universidade Federal de Itajubá, sob orientação de funcionários dos laboratórios.

Os equipamentos são:

- Geofone eletrônico;
- Medidores de pressão com armazenadores de dados;
- Medidor de vazão ultra-sônico;
- Equipamento DGPS;

As Figuras 8 (a) e (b) ilustram alguns dos treinamentos realizados.



Figura 8- Treinamentos realizados para uso dos equipamentos: (a) Geofone, (b) DGPS.

### 6.3. - TRABALHOS DE CAMPO REALIZADOS

#### 6.3.1. - Detecção de vazamentos grosseiros na área de estudo

Para a verificação da existência de vazamentos “grosseiros”, que não são previstos no modelo hidráulico utilizado, foi feita a inspeção da área com a utilização de geofone eletrônico. Silva (2003) classifica os vazamentos em dois tipos: “inerentes” e “grosseiros”. Vazamentos inerentes são pequenos vazamentos ao longo da rede causados por falhas nas junções das tubulações já os vazamentos “grosseiros” são provocados por fendas nas tubulações, os vazamentos grosseiros em geral são detectáveis seja pela utilização de equipamentos de detecção acústicos, chamados geofone, pela falha no abastecimento de determinados trechos ou mesmo pela inspeção visual da área em casos mais graves.

Sabe-se que a inspeção com equipamentos de detecção acústica deve preferencialmente, ser executada em período noturno, pois a incidência de ruídos causados principalmente pelo trânsito pode mascarar os resultados. Porém as características do bairro estudado, como pouca ou nenhuma movimentação de carros ou pedestres em determinado horário, permitiram que esse trabalho fosse realizado no período diurno.

Na Figura 9 observa-se a inspeção da rede.



Figura 9 - Campanha de campo para a verificação da existência de vazamentos.

### 6.3.2. - Medidas de pressão

As medidas de pressão foram tomadas em torneiras residenciais abastecidas diretamente pela rede. As residências utilizadas para a aquisição de dados foram selecionadas de forma que pudessem representar a maior parte do sistema, com tomadas de pressão em pontos de máxima, mínima e média pressão.

A tomada de dados de pressão foi feita em datas distintas. A tabela 4 especifica os pontos e a data de cada um dos conjuntos.

Tabela 4 – Conjuntos dos dados de pressão

Conjunto	1	2
Data	03 e 04 de julho de 2009	08 a 10 de julho de 2009
Pontos	3 e 4	1, 2, 5 e 6

Na Figura 10 (a) e (b) podem ser vistas as imagens de dois aparelhos instalados, tais equipamentos realizam mensurações e registro das informações ao longo do tempo.



Figura 10 - (a) e (b) Medidores de pressão com armazenador de dados instalados em pontos diferentes de monitoramento.

Na Figura 10, a rede de distribuição em estudo ilustra os pontos escolhidos para o monitoramento da pressão, tais pontos são representados pelos triângulos e numerados.

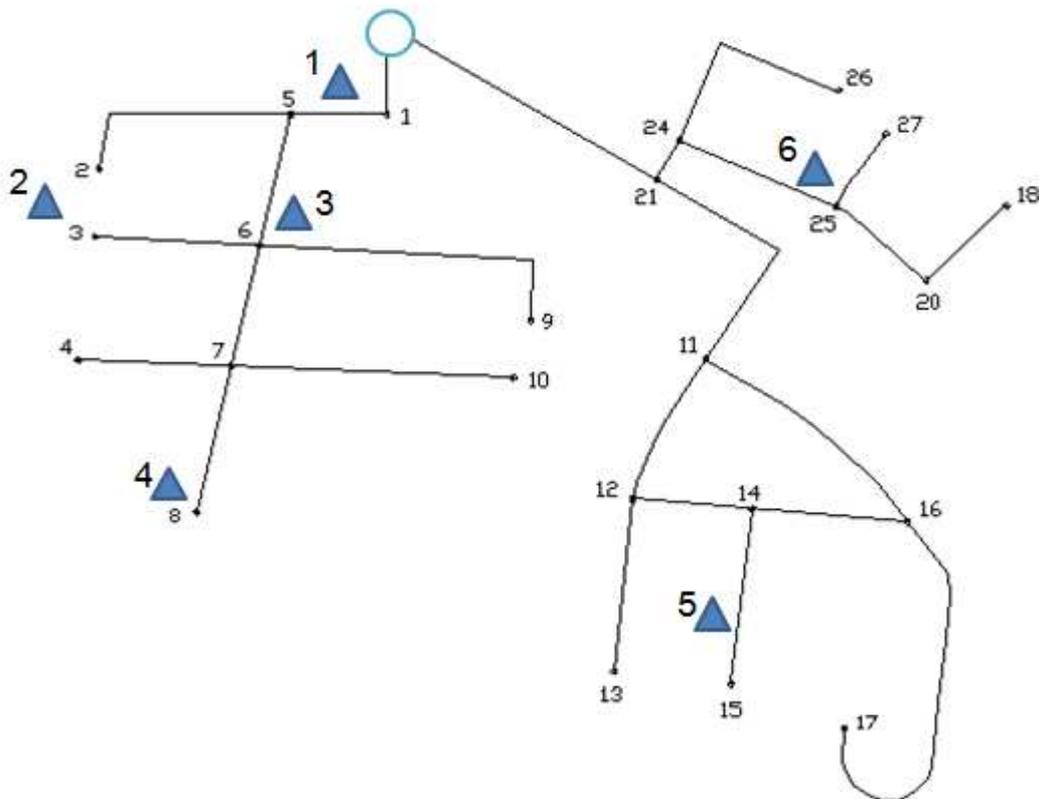


Figura 6– Rede de distribuição estudada com o detalhe dos pontos de monitoramento.

Nas simulações hidráulicas foram consideradas as diferenças topográficas e a perda de carga entre as torneiras e a rede de distribuição.

### 6.3.3. - Medidas de vazão

O sistema em estudo é abastecido por um reservatório exclusivo. Na saída deste reservatório há um medidor de vazão Eletromagnético. Tal medidor não é dotado de dispositivo para o armazenamento dos dados, somente de um mostrador digital, que pode ser visualizado na Figura 12.



Figura 12 – Mostrador digital do medidor de vazão eletromagnético.

Para o registro da vazão foi utilizado um registrador eletrônico do tipo Datalogger, o dispositivo foi programado para a frequência amostral mais apropriada que, no caso, foi de um em um minuto e instalado no medidor de vazão eletromagnético.

#### **6.3.4. - Dados de consumo de água**

A partir dos dados de consumo mensais das residências do bairro, disponibilizados pela COPASA, foram determinados os consumos médios de cada quadra. Alves (2006) elaborou uma planilha onde os dados de consumo de cada residência eram dispostos por ruas de acordo com as ligações existentes para a rede de distribuição em questão. Este modelo de planilha foi utilizado no presente trabalho, inserindo-se as devidas alterações cadastrais, como novas ligações.

Para o cálculo das demandas em cada nó foi utilizado o procedimento descrito por Silva (2003), que consiste em considerar a área de influência das quadras para cada nó.

Este procedimento é exemplificado na Figura 13.

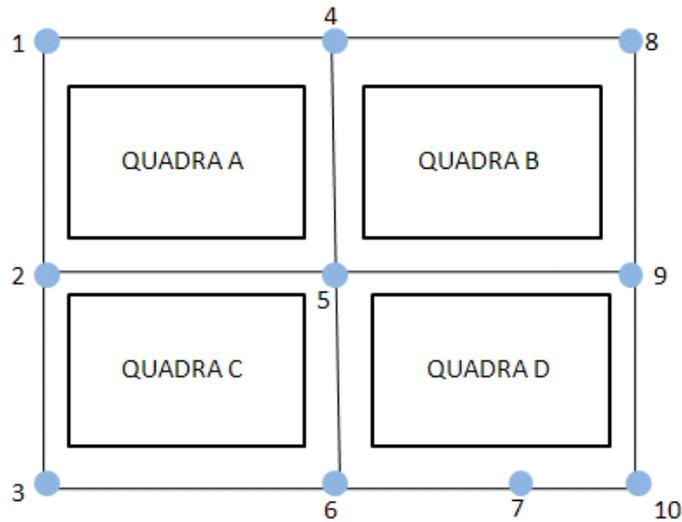


Figura 13- Rede fictícia para estimativas de demandas nos nós.

Considerando  $C$  o consumo médio da quadra e  $D$  a demanda de cada nó.

Como exemplo são tomados os nós 5 e 10.

$$D_5 = \frac{1}{4} \times C_A + \frac{1}{4} \times C_B + \frac{1}{4} \times C_C + \frac{1}{4} \times C_D, \quad D_{10} = \frac{1}{4} \times C_D \quad \text{e} \quad D_7 = \frac{1}{5} \times C_D$$

É necessário sempre considerar os consumidores especiais como escolas, hospitais, indústrias e outros que possuam um padrão de consumo diferenciado, podendo assim afetar o cálculo da demanda por nó. Por se tratar de um bairro essencialmente residencial não foram encontrados consumidores que pudessem ser classificados como especiais.

### 6.3.5. - Verificação das cotas topográficas

Foi realizado o levantamento de dados topográficos nos nós e nos pontos de monitoramento com o auxílio de um GPS de inspeção com o objetivo de verificar as cotas existentes nos mapas. O equipamento utilizado no estudo é mostrado na Figura 14 (a) e (b).



Figura 14 (a) e (b) – equipamento DGPS utilizado na verificação das cotas.

A figura (b) mostra o equipamento DGPS instalado em um marco conhecido situado na Unifei.

#### 6.4. - ESTUDO DA ROTINA COMPUTACIONAL

O procedimento inverso de calibração consiste na minimização da diferença dos valores de alguns parâmetros do sistema de distribuição de água simulados e medidos. A função que descreve o problema é chamada de função objetivo (F.O.). A função objetivo descrita por Silva (2003) e que será utilizada neste trabalho está indicada na equação 6.1.

$$FO = \left\{ \sum_{k=1}^C \left\{ w_H^{(k)} \cdot \sum_{i=1}^N \left[ \frac{P_{sim i} - P_{obs i}}{[\sum_{i=1}^N P_{obs i}] / N} \right]^2 + w_Q^{(k)} \cdot \sum_{j=1}^M \left[ \frac{Q_{sim j} - Q_{obs j}}{[\sum_{j=1}^M Q_{obs j}] / M} \right]^2 \right\} \right\}^{-1} \quad (6.1)$$

Sendo: P – carga de pressão (m); Q – vazão (L/s); N – conjunto de pontos de observação de valores de pressão; M - conjunto de pontos de observação de valores de vazão; C – número de condições de demanda;  $w_H$ ,  $w_Q$  – pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão; *sim*, *obs* – denotam valores simulados e observados, respectivamente.

A Figura 15 ilustra o fluxograma da rotina implementada e alterada para a aplicação dos algoritmos genéticos na calibração das rugosidades de trechos da rede de distribuição de água. Observa-se que basicamente o processo se inicia com a leitura de dados de pressão e vazão medidos em campo, na seqüência se tem a geração da população inicial de soluções que posteriormente são avaliadas de acordo com uma função de aptidão. Após esta etapa são

aplicados os operadores de recombinação e mutação. No processo é adotado o elitismo que significa garantir a cada geração IPOP soluções melhores dentre o conjunto de NPOP soluções totais. O processo geracional é realizado até que se complete o número de gerações previamente estabelecido.



Figura 75 – Algoritmo geracional elitista utilizado, Silva (2003)

## 6.5. - IMPLEMENTAÇÃO DA ROTINA COMPUTACIONAL

O procedimento de calibração realizado para a rede que abastece o bairro Jardim América e parte do bairro Por do Sol em Itajubá, MG foi feito pela implementação de uma rotina computacional, desenvolvida por Silva (2003) para a calibração de redes de distribuição de água que utiliza os Algoritmos Genéticos como método de busca numérica.

Conforme explicado no capítulo 5 existem diversos tipos de algoritmos genéticos: simples, *Steady State*, etc. No presente estudo utilizou-se do tipo geracional elitista, pela garantia de que as melhores soluções para o problema não seriam perdidas durante o processo de busca.

Os AGs também apresentam diversas possibilidades quanto ao tipo de operador utilizado e quanto às taxas aplicadas. Os parâmetros adotados neste estudo seguem as recomendações feitas por Silva (2003), que em tese de doutorado também investigou diversas combinações de tais parâmetros no sentido de melhorar a eficácia da rotina desenvolvida.

Os parâmetros adotados neste estudo podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros dos AGs utilizados para a calibração da rede

População de soluções	30
Número de gerações	1000
Semente aleatória	5
Seleção	Roda da roleta
Probabilidade de cruzamento	95%
Tipo de cruzamento	2 pontos de corte
Probabilidade de mutação	1%
Tipo de Mutação	Gaussiana
Taxa de elitismo	0.166667

## 7. - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1. - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 7.1.1 - Pressão

Os dados de pressão coletados em campo são mostrados nas figuras 15 a 20. Pela análise de tais dados podem ser percebidas algumas peculiaridades da rede estudada. Os bairros abastecidos são essencialmente residenciais, de classe média alta e apresentam características que o difere quanto ao padrão de consumo conhecido.

A figura 15 ilustra o comportamento da pressão em residência, representada na figura 10 pelo ponto 1. Este ponto de monitoramento situa em uma zona de pressão mínima relativa.

Pode-se perceber que a pressão neste ponto tem baixa oscilação devido a baixos valores de vazão de abastecimento. Nota-se pela figura 16 que no período noturno ocorrem valores maiores de pressão, devido a menor consumo, dentro do esperado. Observa-se também que entre os horários de 11:00 h as 14:30 ocorre uma abrupta queda do valor de pressão, que avalia-se devido a consumo elevado ou transitório hidráulico. As variações neste ponto são de 8,5 a 15 mca.

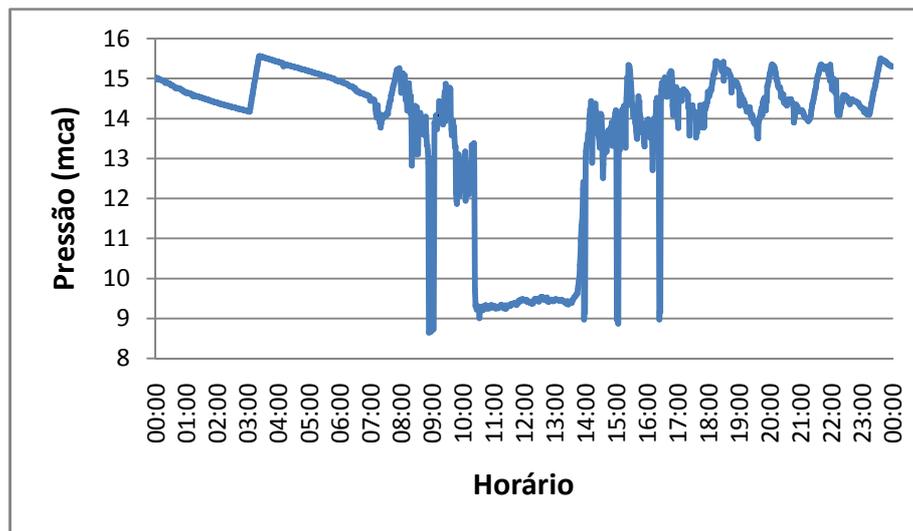


Figura 8 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 1

A Figura 17 ilustra o comportamento de pressão do ponto de monitoramento 2 do esquema ilustrado na figura 11. Neste caso as pressões ocorrem variando entre faixas de 38 a 49 m.c.a.. Analogamente a figura 16, observou-se que no período noturno ocorrem pressões

menores que no período diurno. Nota-se também certa oscilação entre os períodos de 16:30 h as 18:30 h.

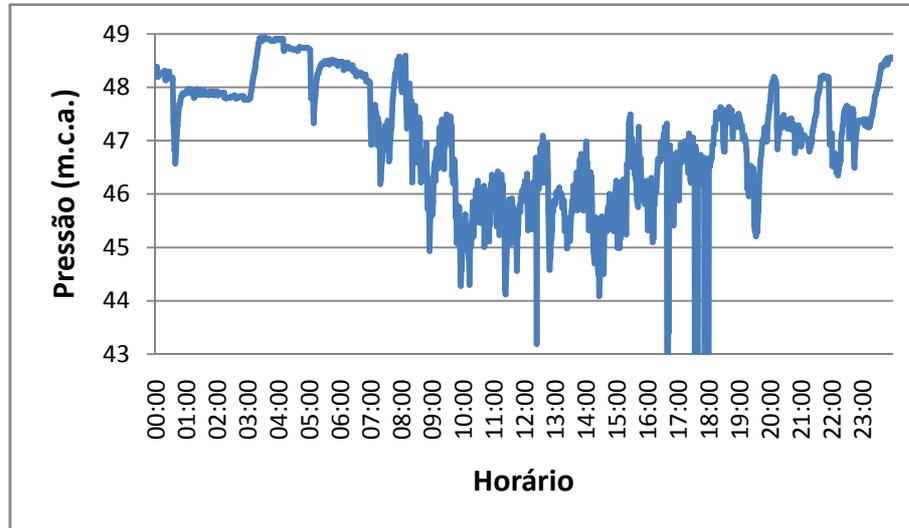


Figura 17 - Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 2

Já na figura 18 que representa o ponto 3 ilustrado na figura 11, observa-se que existe uma variação de pressão entre 26 e 32 m.c.a. O comportamento não é diferente dos pontos analisados anteriormente com relação às pressões nos períodos diurnos e noturnos. O que se observa é a existência de certa constância no comportamento no período da madrugada entre 01:20 as 06:20 h da manhã.

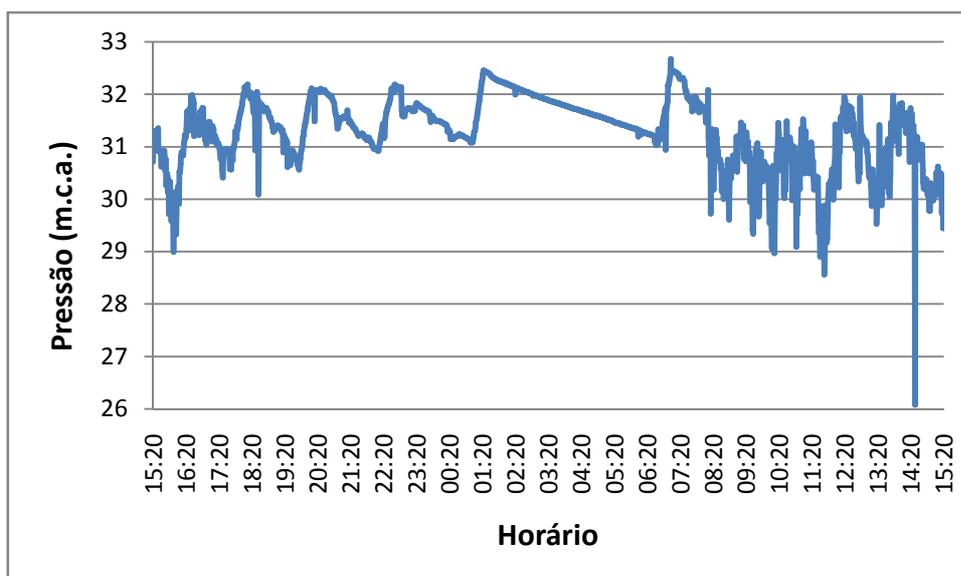


Figura 18 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 3

Na figura 19 que representa o ponto 4 ilustrado na figura 11, observa-se que existe uma variação de pressão entre 52 e 57 m.c.a.. O comportamento não é diferente dos pontos analisados anteriormente com relação às pressões nos períodos diurnos e noturnos. Observam-se oscilações maiores com relação aos pontos anteriores.

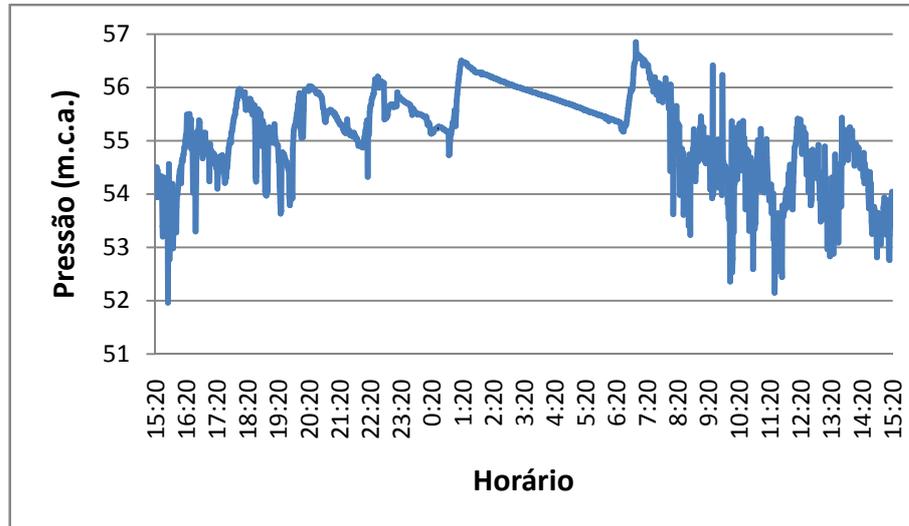


Figura 9 - Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 4

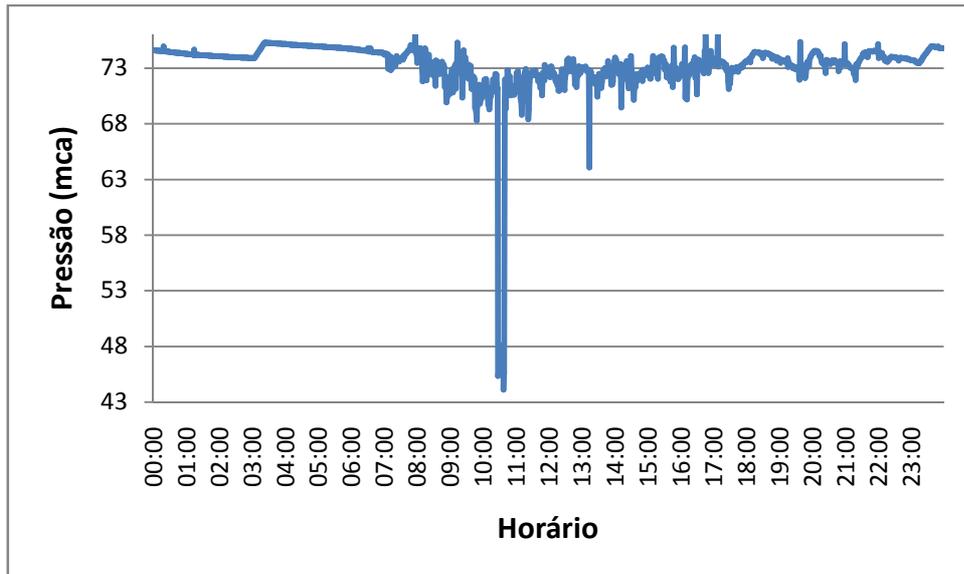


Figura 20 - Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 5

Já na figura 21 observa-se ao longo das 24 horas grandes variações de pressões entre 8 e 63 m.c.a. Como em todos os pontos observa-se um comportamento coerente de oscilações de pressão noturnos e diurnos. Observam-se algumas oscilações entre os períodos de 11:00 a 13:00 h.

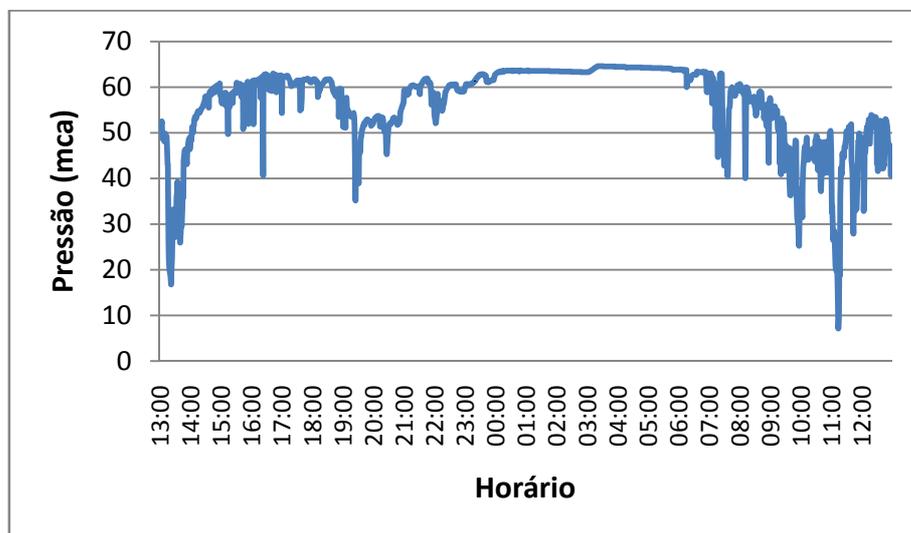


Figura 21 – Variação da pressão ao longo de 24 horas – residência 6

Para que pudesse ser mais bem visualizada a discrepância entre as pressões nas diferentes zonas de pressão da rede foi feito o gráfico 22 que apresenta a pressão para o

mesmo horário em cada ponto onde foram coletados os dados, pode-se perceber a grande variação da pressão que ocorre devido à acentuada topografia do bairro, conforme. Observa-se uma variação de pressão entre as residências entre 8 e 72 mca.

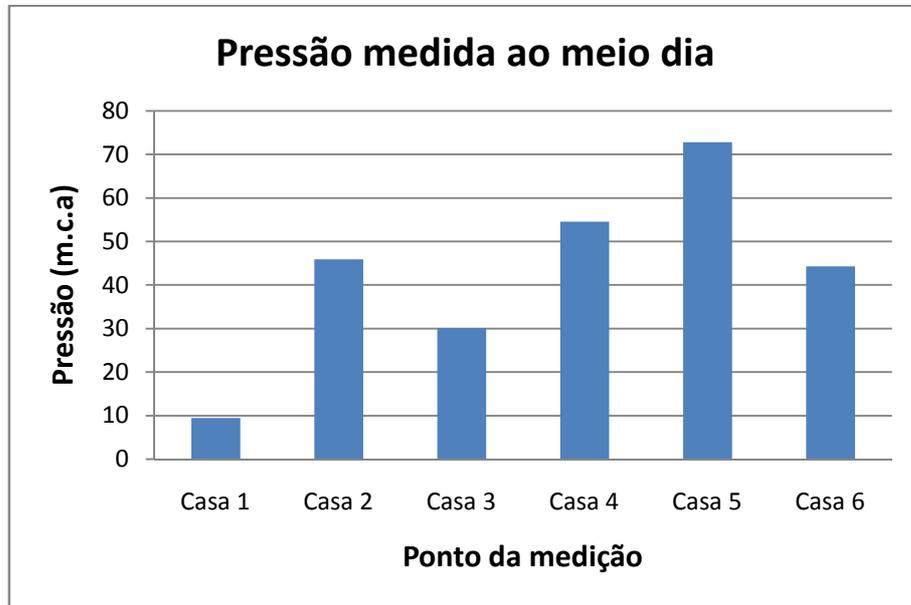


Figura 22 – Pressão para o mesmo horário (12:00) medida nos diferentes pontos

### 7.1.2 - Vazão

Na figura 23 pode ser vista a variação da vazão de saída do reservatório durante 24 horas.

O sistema estudado é uma rede de pequeno porte e, portanto apresenta baixos valores de vazão, não excedendo 3,5 litros por segundo, nem mesmo nos horários de maior consumo que acontece no período entre 10:00 e 12:00 h.

Como já foi dito anteriormente os bairros abastecidos pela rede estudada são essencialmente residenciais, justificando o fato de que no período compreendido entre 02:00 e 06:00 h. o consumo é praticamente nulo.



Figura 23 – Variação da vazão de saída do reservatório medida durante 24 horas.

## 7.2 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS

As simulações foram realizadas para dois padrões diferentes de demanda: demanda máxima, chamado de padrão 1 e demanda média, chamada de padrão 2. A demanda mínima foi cortada, pois devido à baixa vazão apresentada pelo sistema o erro era aumentado significativamente quando inserido o padrão de demanda mínima.

A coleta de dados de pressão e vazão foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa foi instalado o armazenador de dados (*LogBox*) no painel do medidor de vazão eletromagnético que existe na saída do reservatório para o monitoramento da vazão e os medidores de pressão e armazenadores de dados (*dataloggers*) nas casas 3 e 4. Na segunda etapa os *dataloggers* foram instalados nas casas 1, 2, 5 e 6 enquanto o dispositivo armazenador de dados permanecia instalado no reservatório.

Dados coletados simultaneamente foram agrupados em um mesmo conjunto, sendo chamado conjunto 1 os dados coletados na primeira etapa e conjunto 2 os dados coletados na segunda etapa da campanha de campo para aquisição dos dados de pressão e vazão.

Para a análise do desempenho da calibração serão utilizados os critérios estabelecidos pela WATER RESEARCH CENTRE (1989), na comparação entre os valores medidos e obtidos pela simulação.

A Tabela 6 apresenta os critérios.

Tabela 6 – Critérios Mínimos para a Estabilização da Calibração (WATER RESEACH CENTRE, 1989)

<b>CRITÉRIOS PARA VAZÃO</b>
(1) Quando o fluxo é maior que 10% da demanda total, o fluxo modelado ao longo de toda tubulação principal deve apresentar valores com precisão mínima de 5%.
(2) Quando o fluxo é menor que 10% da demanda total, o fluxo modelado ao longo de toda tubulação principal deve apresentar valores com precisão mínima de 10%
<b>CRITÉRIOS PARA PRESSÃO</b>
(1) 85% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de $\pm 0,5$ m ou $\pm 5\%$ da perda máxima obtida em todo o sistema, independente do tamanho deste
(2) 95% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de $\pm 0,75$ m ou $\pm 7,5\%$ da perda máxima obtida em todo o sistema, independente do tamanho deste.
(3) 100% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de $\pm 2$ m ou $\pm 15\%$ da perda máxima obtida em todo o sistema, independente do tamanho deste

### 7.2.1 - Análise da evolução da função de aptidão

Foram realizadas cinco simulações para cada conjunto de dados, chamadas aqui de população aleatória, com o objetivo de comprovar a eficiência da rotina. A figura 24 apresenta o gráfico que compara a evolução da função de aptidão (*Fitness*) e o número de iterações para diferentes sementes para os dados do conjunto 1.

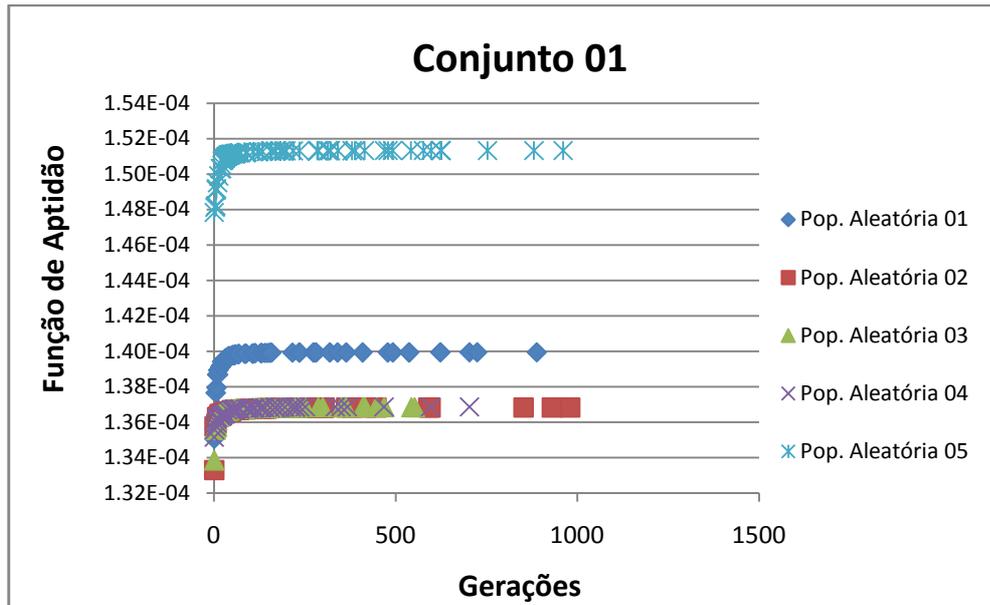


Figura 24 – Evolução da função de aptidão ao longo das gerações para o conjunto 01.

Nota-se que as curvas relativas às diferentes populações aleatórias para o conjunto 1 apresentam o mesmo formato geral e que a tendência é que o valor da função de aptidão aumente com o número de iterações.

Também se pode perceber em análise da figura 24 que as populações aleatórias de 01 a 04 apresentam evolução muito semelhante, pois as funções de aptidão evoluem significativamente até aproximadamente a geração 50, a partir deste momento ocorre uma estabilização dos valores até a geração final. Percebe-se que a população aleatória 05 tem um pequeno deslocamento acima da demais no sentido vertical, entretanto evolução análoga as demais.

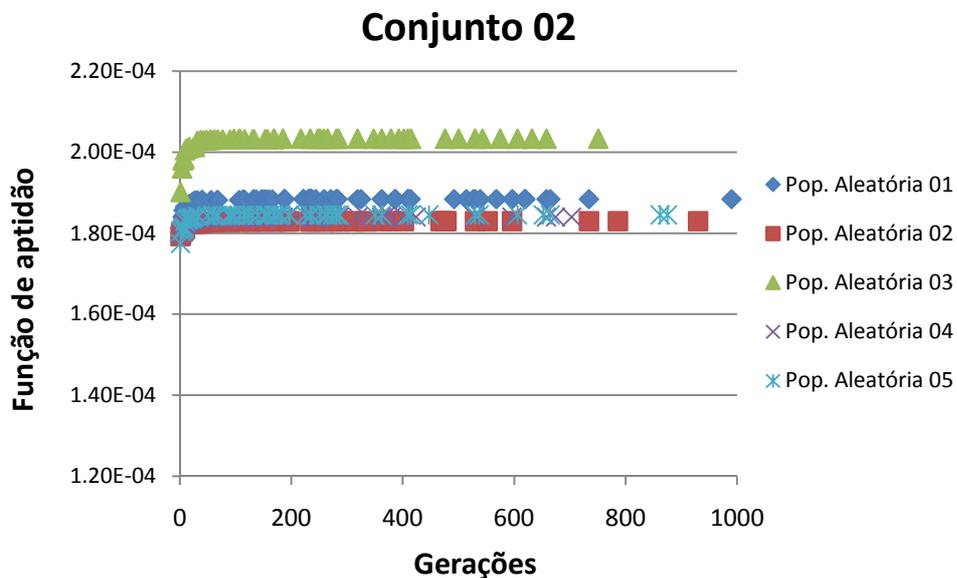


Figura 25 – Evolução da função de aptidão ao longo das gerações para o conjunto 02.

A Figura 25 apresenta a evolução da função de aptidão para os dados do conjunto 2. De maneira bastante semelhante ao que ocorre com o conjunto 1, as curvas para as diferentes populações aleatórias do conjunto 2 apresentam o mesmo formato geral. Nota-se uma evolução bastante semelhante para as populações aleatórias 01, 02, 04 e 05, dando destaque para a população aleatória número 3, que apresenta um pequeno deslocamento em relação as demais.

### 7.2.2 Vazão

As figuras 26 e 27 ilustram as vazões medidas e simuladas para os dois padrões de demanda para o conjunto 1 e 2 respectivamente.

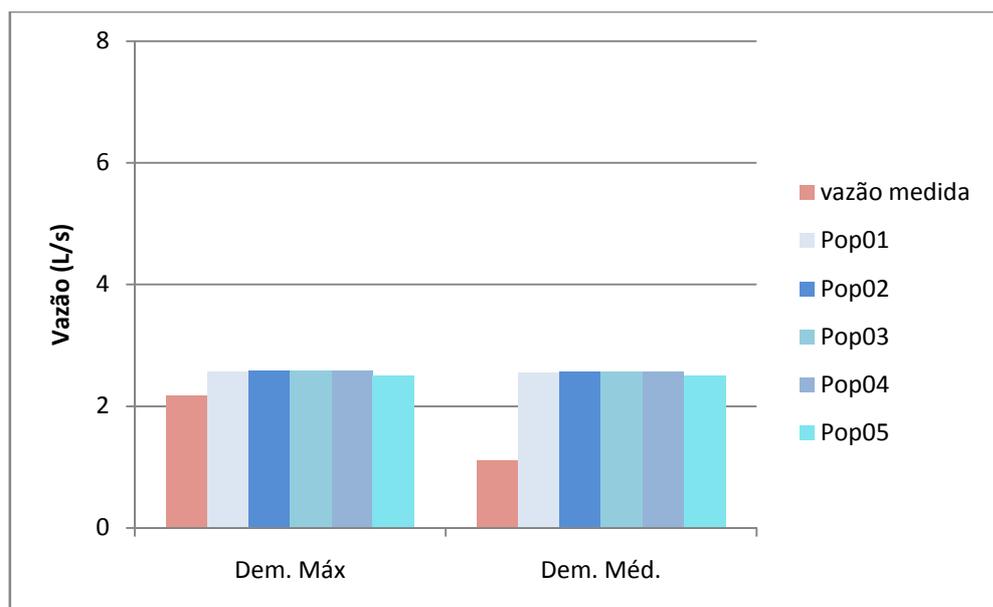


Figura 26 – vazões medidas e simuladas para diferentes padrões de demanda – conjunto 1

A Figura 26 apresenta um gráfico com os valores de vazão resultantes do processo de calibração feito para o conjunto de dados 01, padrão de demanda máxima, considerando as cinco populações aleatórias utilizadas e os dois padrões de demanda. Constata-se que para o padrão de demanda média a diferença entre os valores simulados e medidos é mais discrepante que para o padrão de demanda máxima, avalia-se possivelmente que isto tenha ocorrido devido ao erro dos equipamentos na medição de vazões menores. Porém, não são

verificadas diferenças significativas entre as sementes aleatórias utilizadas em nenhum dos padrões de demanda.

Na figura 27 são apresentadas as vazões resultantes do processo iterativo para o conjunto de dado 02, padrão de demanda média. Também foram utilizadas cinco populações aleatórias. Os resultados apresentam o mesmo formato geral dos resultados do conjunto 01, ou seja, maior discrepância entre valores simulados e medidos para o padrão de menor demanda e não apresentando diferenças entre as diferentes populações aleatórias.

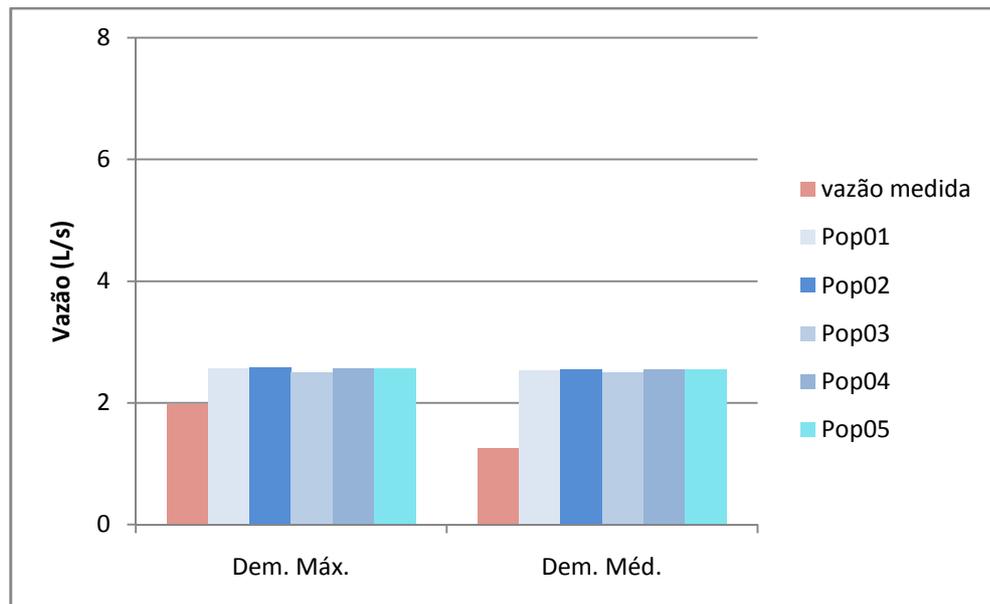


Figura 27 – vazões medidas e simuladas para diferentes padrões de demanda – conjunto 2

Por ser uma rede de pequeno porte, que abastece um número reduzido de residências, a vazão no sistema é bastante baixa durante todo o tempo, sendo ainda menor nos períodos de menor demanda, este comportamento do sistema faz com que o erro decorrente da simulação para o padrão de demanda média seja aumentado.

### 7.2.3 - Pressão

Os resultados das simulações em termos de pressões são apresentados nas figuras 28 a 33.

As Figuras 28 a 33 apresentam os gráficos com os valores das pressões medidas e simuladas para todas as sementes considerando padrão de demanda máxima para todos os nós em que foram coletados dados.

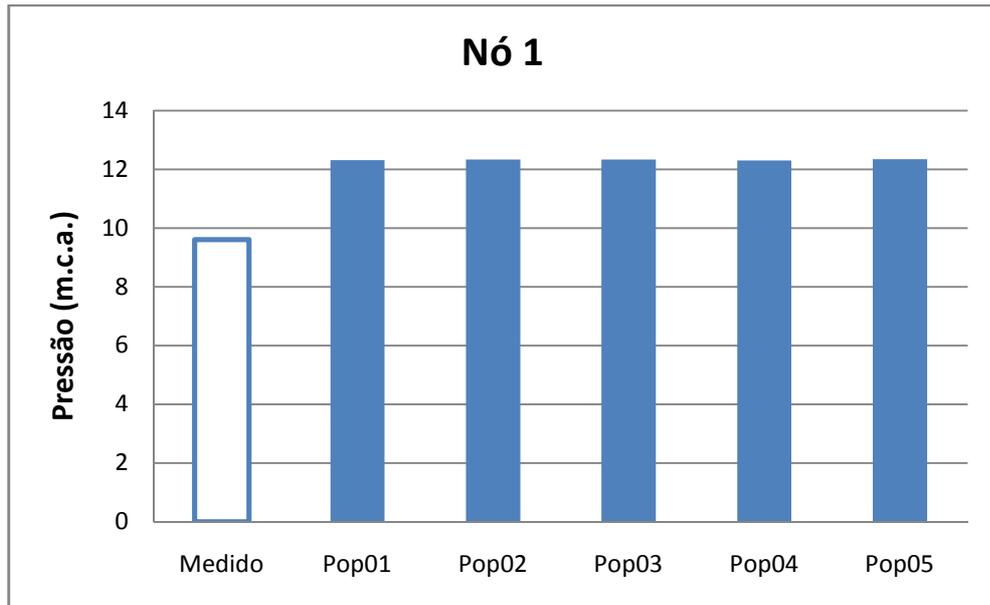


Figura 28 – Pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima no nó 1

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 12 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 9,5 m.c.a..

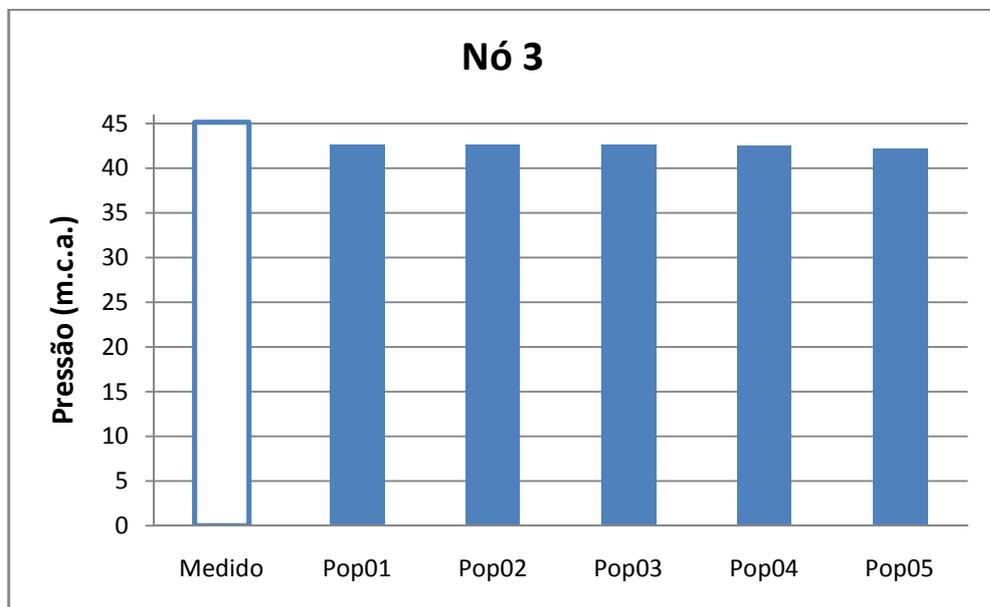


Figura 29 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima no nó 3

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 42 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 45 m.c.a..

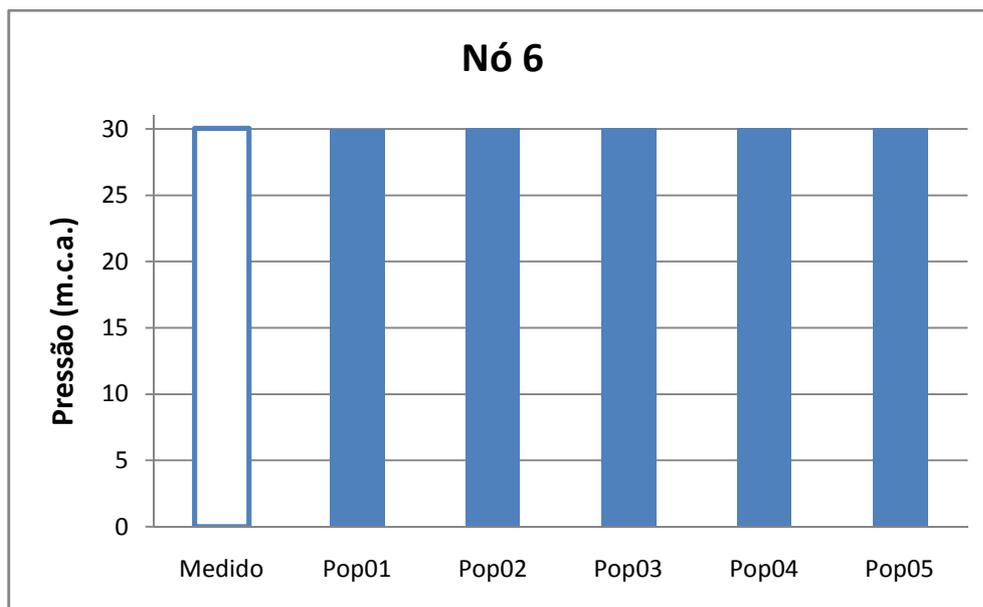


Figura 30 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 6

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 30 m.c.a. e o valor da pressão medida praticamente coincide com os valores simulados.

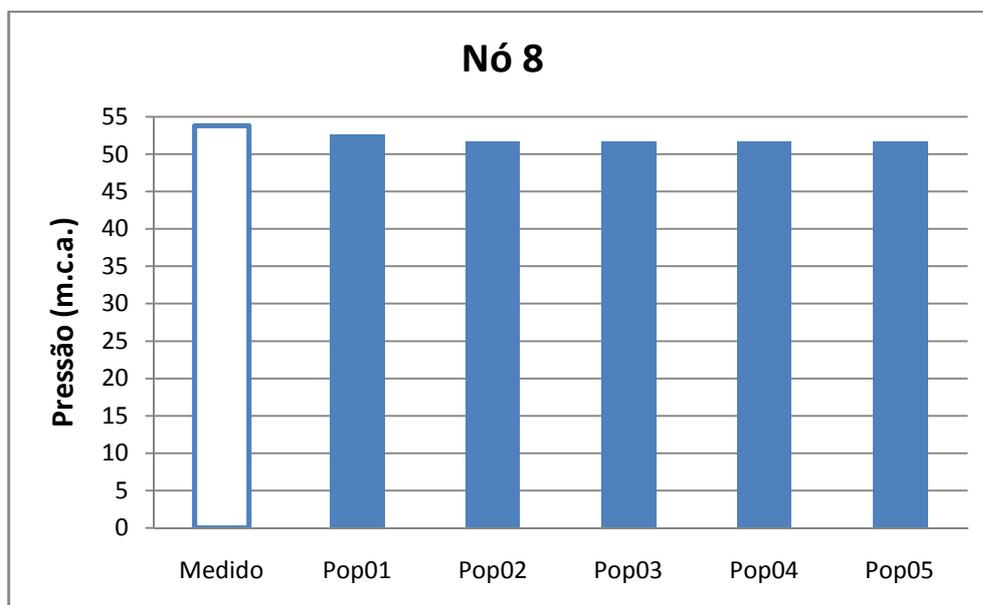


Figura 10 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 8

As pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 52 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 54 m.c.a..

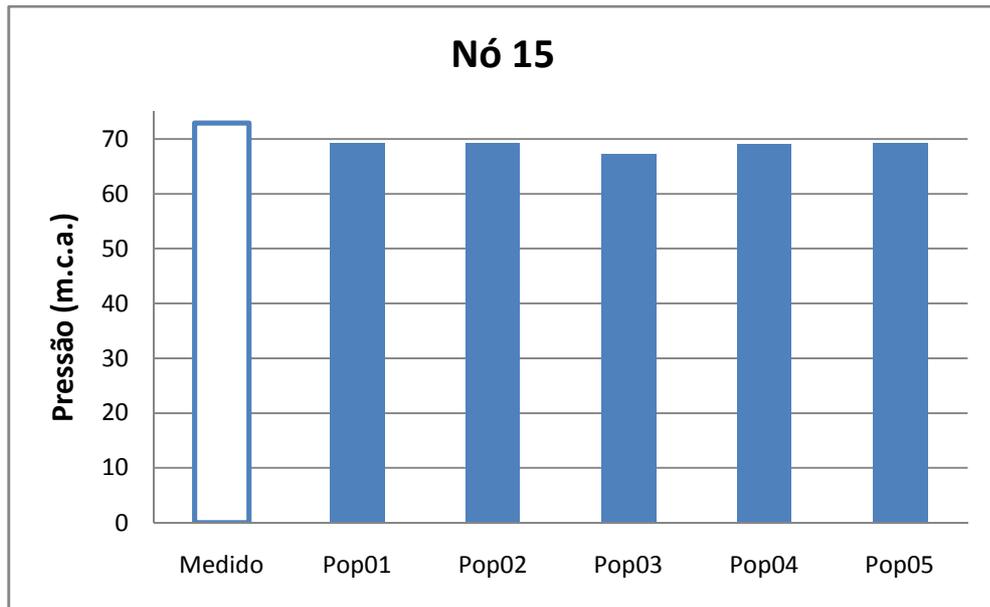


Figura 32 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 15

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 70 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 72 m.c.a..

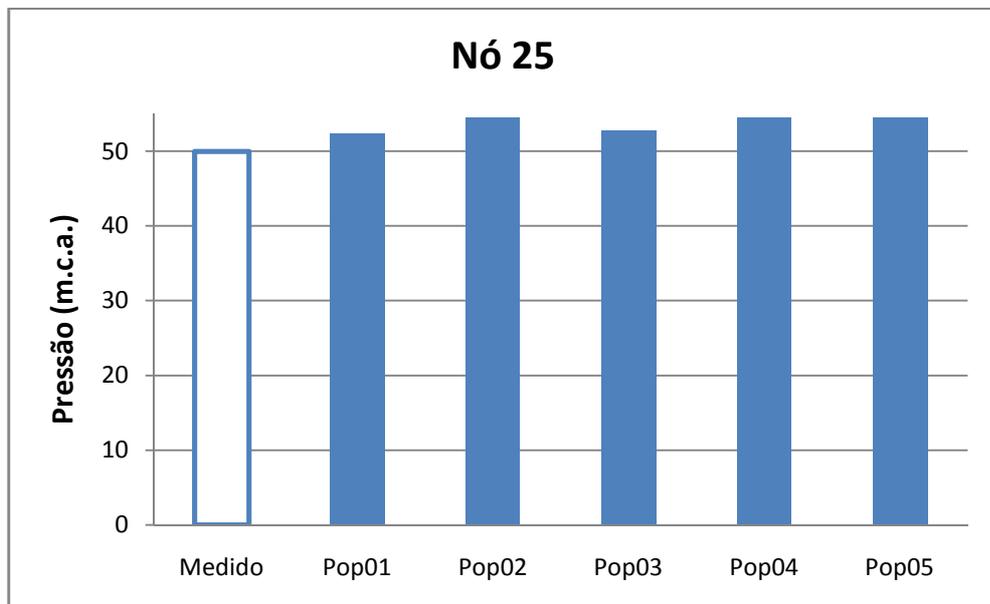


Figura 11 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima para o nó 25

As pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 52 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 50 m.c.a..

As Figuras 34 a 39 apresentam os gráficos com os valores das pressões medidas e simuladas para todas as sementes considerando padrão de demanda média para todos os nós em que foram coletados dados.

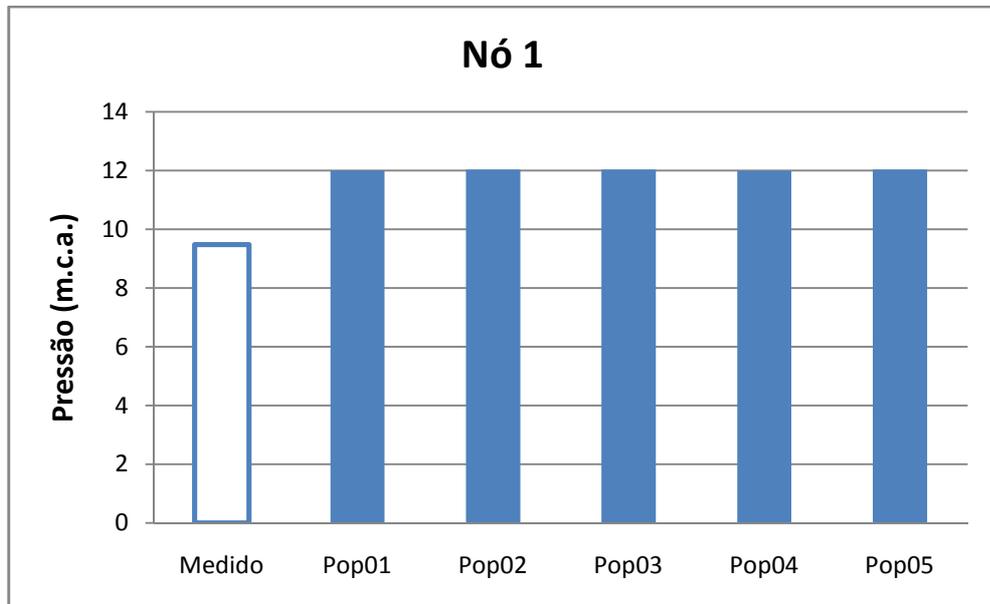


Figura 12 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 1

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 12 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 9 m.c.a..

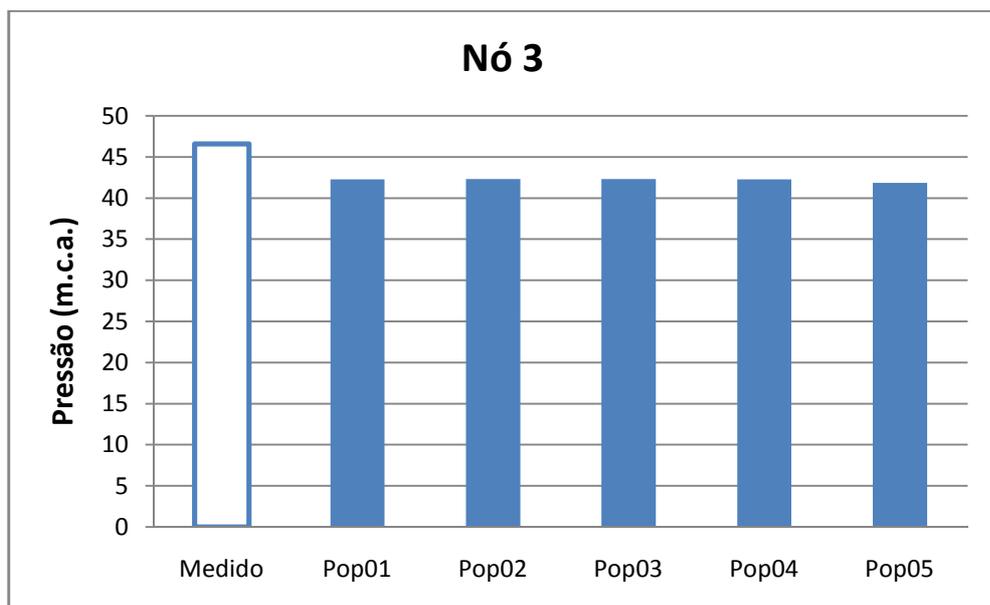


Figura 35 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 3

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 42 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 46 m.c.a..

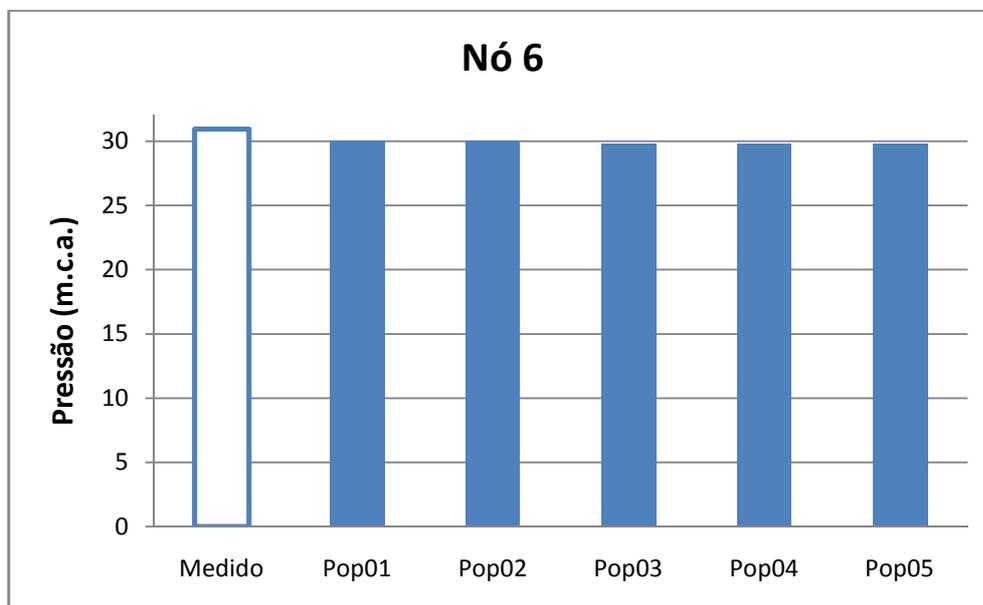


Figura 36 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 6

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 30 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 31 m.c.a..

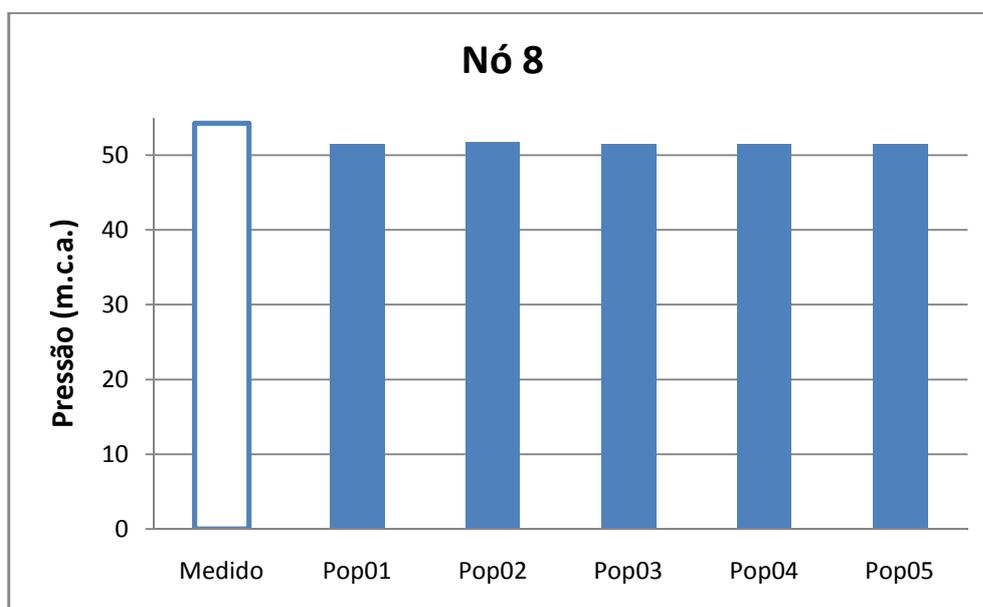


Figura 137 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 8

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 51 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 52 m.c.a.

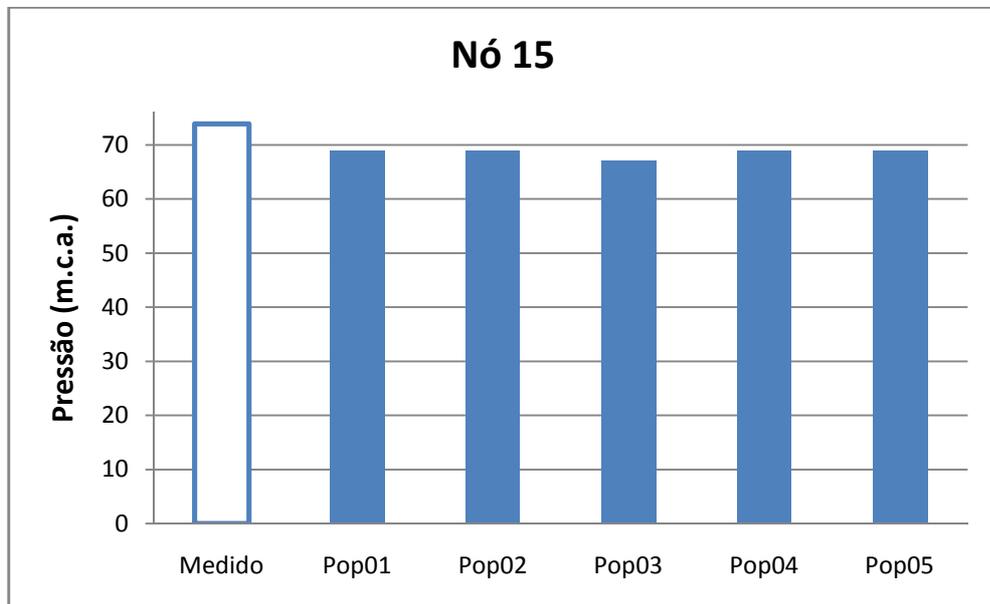


Figura 14 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 15

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 69,5 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 71 m.c.a..

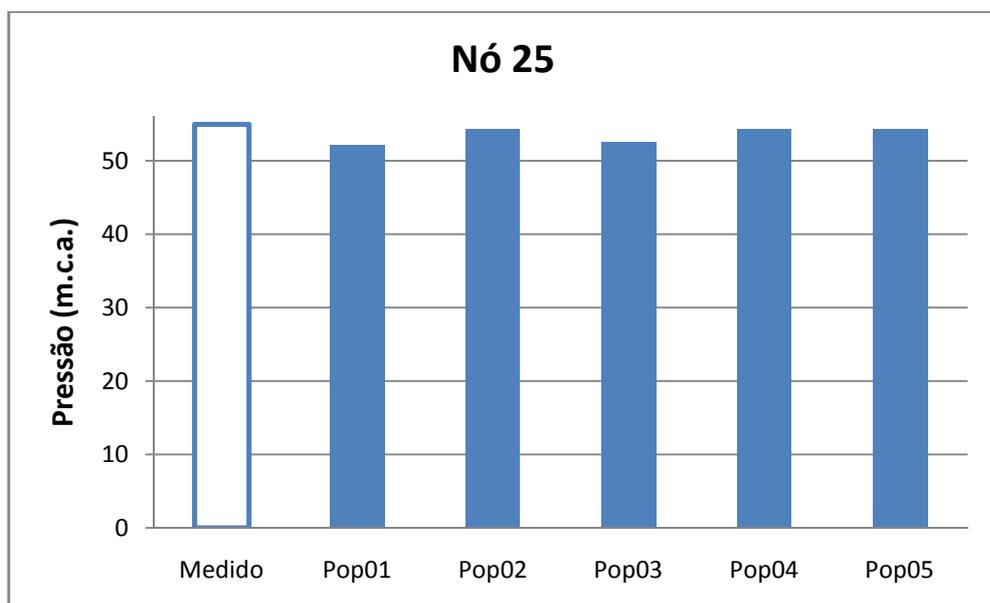


Figura 15 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média para o nó 25

Observa-se que as pressões simuladas para todas as populações aleatórias apresentaram valores em torno de 51 m.c.a. e o valor da pressão medida ficou em torno de 52 m.c.a.

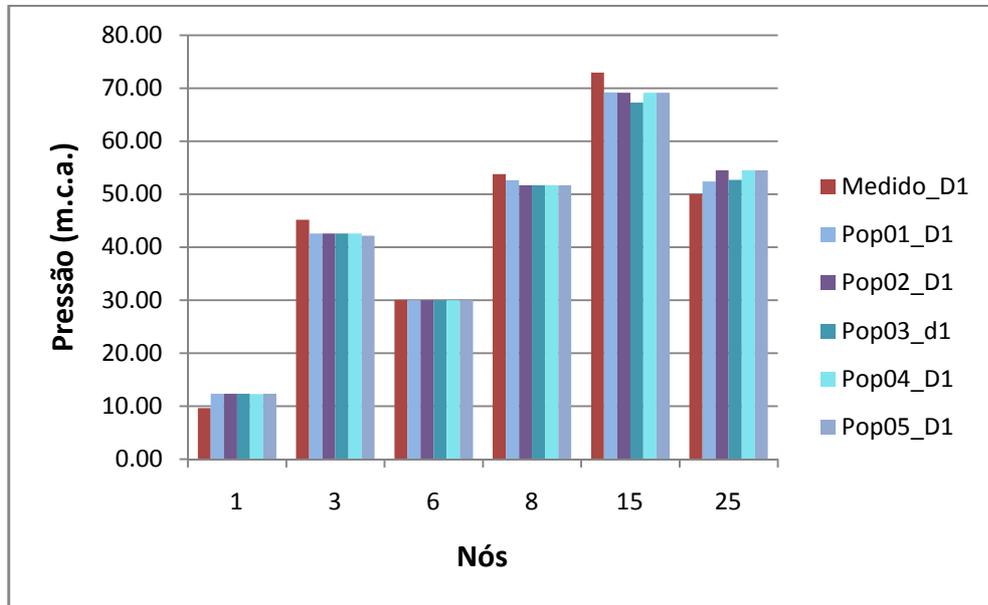


Figura 40 – pressões medidas x simuladas para o padrão de demanda máxima

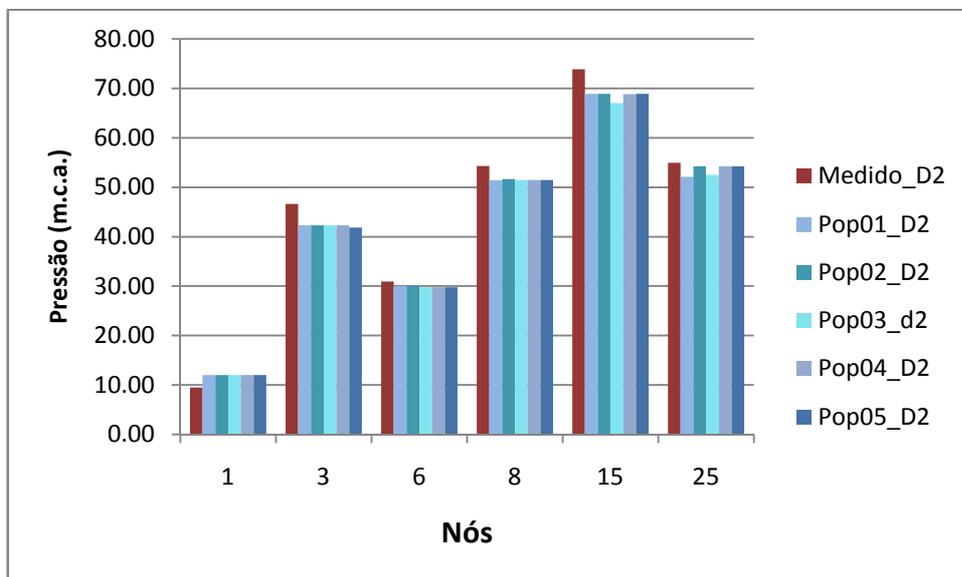


Figura 4116 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média

As figuras 41 e 41 ilustram os valores de pressões medidos e simulados de forma conjunta respectivamente para padrão de demanda máxima e média. Nota-se me geral que as diferenças estão pequenas demonstrando viabilidade de aplicação do modelo.

#### **7.2.4. - Análise de rugosidade**

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos valores das variáveis de decisão (rugosidades) calculados para o conjunto de dados número 1, assim como o desvio padrão que as respostas apresentam.

Embora inúmeras combinações de rugosidades possam gerar resultados de pressão e vazão próximos, percebe-se pela análise das tabelas 7 e 8 que os resultados obtidos a partir de populações aleatórias distintas são bastante parecidos, pode-se perceber também que a existência de alguns valores mais elevados de desvio padrão seja em função de não haver precisa determinação do trecho em que se encontra o valor de rugosidade maior, como por exemplo, nos trechos 15 e 18, os dois apresentam altos valores de desvio padrão, porém nos dois um valor de rugosidade baixo se repete 4 vezes e existe um valor alto que eleva o valor do desvio padrão.



Tabela 8 - Rugosidades (mm) - conjunto 2

<b>Trecho</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Desvio padrão</b>
1	0.49	0.46	0.46	0.49	0.46	0.016
2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.000
3	0.36	0.36	0.36	0.43	0.36	0.031
4	0.48	0.45	0.24	0.19	0.45	0.136
5	9.74	0.49	0.48	0.42	9.56	5.032
6	0.47	0.48	0.49	0.44	9.95	4.240
7	0.44	0.44	0.45	0.44	0.44	0.004
8	0.48	0.42	0.5	0.48	0.48	0.030
9	0.46	0.44	0.46	0.44	0.46	0.011
10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.43	0.157
11	0.45	0.45	0.48	0.45	0.45	0.013
12	0.49	0.49	0.46	0.49	0.49	0.013
13	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.000
14	0.39	0.39	0.39	0.28	0.39	0.049
15	0.5	0.5	0.5	0.5	0.48	0.009
16	0.19	0.19	0.19	3.05	0.19	1.279
17	0.39	0.3	0.39	0.39	0.13	0.113
18	9.9	0.44	0.44	0.5	0.45	4.223
19	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.000
20	9.8	0.49	0.43	0.47	0.43	4.179
21	0.43	0.48	0.46	0.48	0.48	0.022
22	0.49	0.49	9.97	0.49	0.49	4.240
23	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.000
24	0.46	0.49	0.46	9.82	0.46	4.183
25	0.37	0.37	0.37	0.49	0.37	0.054
26	9.96	0.5	0.5	0.5	0.5	4.231
27	0.43	0.48	0.48	0.48	0.48	0.022
28	0.34	0.34	0.34	7.21	0.34	3.072

## 8. - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho de pesquisa trata do estudo de calibração de redes de distribuição de água com a utilização de uma rotina computacional construída especialmente para esse fim, desenvolvida por Silva (2003). Na rotina se utiliza o modelo inverso e como ferramenta de busca os algoritmos genéticos.

O estudo de calibração foi feito para a rede que abastece os bairros Jardim América e parte do bairro Por do sol em termos das rugosidades dos trechos da rede. As simulações foram realizadas para dois padrões de demanda máxima e média e dois conjuntos de dados diferentes.

Os resultados obtidos pela calibração permitem as seguintes conclusões:

- Os desvios entre os valores simulados e medidos de vazão e pressão ficaram em sua maioria dentro da faixa dos limites estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989);
- Os valores de pressões e vazões simuladas apresentaram pouca variação para as diferentes sementes aleatórias;
- Os desvios padrão calculados relativos as rugosidades nos trechos da rede para as diversas sementes aleatórias apresentam valores baixos, demonstrando a consistência dos resultados.

Atribuem-se os resultados obtidos há possíveis incertezas no cadastro das redes em estudo. Dentre estas se destaca a não existência de informação que indique a profundidade que a tubulação está enterrada, o loteamento foi feito por uma construtora e a concessionária de água não possui esses dados. Outra questão que pode ser levantada diz respeito a possíveis imprecisões de medição dos aparelhos utilizados, pois apesar da confiabilidade e algumas aferições em laboratório, a faixa de vazões do setor estudado é relativamente baixa (até 3,5 L/s) propiciando naturalmente dificuldades nas medições.

Recomenda-se para próximos trabalhos na área a investigação mais detalhada dos dados cadastrais, maiores campanhas de campo e avaliar a possibilidade de identificação de outros setores isolados com um maior número de ligações.

## 9. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L. H. de F. Avaliação Hidráulica em Setores da Rede de Distribuição de Água de Itajubá considerando vazamentos. Trabalho de conclusão de Curso. Universidade Federal de Itajubá. 2006
- BHAVE, P. R. (1988). Calibrating Water Distribution Network Models. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb.
- BOULOS, P.F.; WOOD, D.J. (1990). Explicit Calculation of Pipe - Network Parameters. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, v.116, n.11, p.1329-1344.
- BOULOS,P.F.; ORMSBEE,L.E. (1991) Explicit Network Calibrations for Multiple Loading Conditions. *Civil Engineering Systems*, v. 8, p. 153-160.
- BRASIL (1999). Presidência d República. “Programa nacional de Combate ao Desperdício de Água – Controle de Pressão na Rede, Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano, Brasília, DF 1999.
- BROWN. K.(2007), Modeling Leakage in Water Distribution Systems. Dissertação de Mestrado apresentada à Florida State University, College os Engeneering, Florida. 73 p.
- CHEUNG, P.B. (2001) Investigação dos métodos clássicos de calibração de redes hidráulicas. Campo grande. 132 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de mato Grosso do Sul
- COLOMBO, F., (2007), calibração de Modelos hidráulicos de redes de abastecimento de água de sistemas reais admitindo vazamentos. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2007.
- COVAS, D. E RAMOS, H. (2001). “Hydraulic Transients used for Leakage Detection in Water Distribution System”. 4th International Conference on WATER PIPELINE SYSTEMS. BHR group, Managing Pipeline Assets in an Evolving Market York. Publicação com Referência Internacional. UK: 28-30 March 2001.
- DA SILVA, A.C.A., Calibração Automática de Rugosidades de Tubulações em Sistemas de Distribuição de água com aplicação de Algoritmos Genéticos. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2006.

- DATTA, R. S. N.; SRIDHARAN, K. (1994). Parameter Estimation in Water-Distribution Systems by Least Squares. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 4, p. 405-422, July/Aug.
- De SCHAETZEN, W.B.F. (2000). *Optimal Calibration and Sampling Design for Hydraulic Network Models*. 276p. Tese (Doutorado). Exeter University, U.K.
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.
- GUMIER, C.C., LUVIZOTTO JR. E., *Aplicação de Modelo de Simulação – Otimização na Gestão da perda de água em Sistemas de Abastecimento*. ABES, Vol. 12 – Nº 1 jan/mar 2006. p. 32-41.
- HOLNICKI-SZULC, J., KOLAKOWSKI, P., NASHER. N., (2005) Leakage Detection in Water Networks. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 16, nº3, p.207-219.
- KAPELAN, Z.S., SAVIC, D.A., AND WALTERS, G.A. (2002). “Optimal Sampling Design Methodologies for Water Distribution Model Calibration”. *Water Resources Research, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 3, March 2005, p. 190-200.
- KANG, D., LANSEY K. (2009). Real-Time Demand Estimation and Confidence Limit analysis for Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 10, October 1, 2009.
- LACERDA, E.G.M. DE; E CARVALHO, A.C.P.L.F. DE (1999). “Introdução aos Algoritmos Genéticos”. In: Galvão, C. de O. e Valença, M.J.S. (orgs). *Sistemas Inteligentes*. ABRH, Porto Alegre-RS, Brasil, 99-150.
- LANSEY, K. ; BASNET, C. (1991). Parameter Estimation for Water Distribution Networks . *J. of Water Resources. Plng and Mgmt, ASCE*, v. 117, n.1, p.126-144.
- LANSEY, K. ; MAYS, L.W. (2000). *Hydraulics of Water Distribution Systems* In: Mays L.W. editor. *Water distribution Systems Handbook*, New York: McGraw Hill.
- LUVIZOTTO JR, E. *Relatório final de programa de pós-doutoramento na Universidade Politécnica de Valência – Espanha*, 1998.

- NEVES, C.L. (2007). Calibração de parâmetros de modelos hidráulicos de redes de distribuição de água para estudos de operação de rede. Dissertação de mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos, Universidade de Brasília, Brasília - DF 143p.
- ORMSBEE, L.E.; WOOD, D.J. (1986). Hydraulic Design Algorithm for Pipe Networks. J. Hydr. Engrg., ASCE, v.112, n.12, p.1195-1207.
- ORMSBEE, L.E. (1989). Implicit Network Calibration. J. Water Res. Plng and Mgmt, ASCE, v.115, n.2, p.243-257.
- PIZZO, H.S. (2004) Calibração de modelos de distribuição de água através do acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder –Mead. Tese de Doutorado apresentada à Universidade estadual de campinas. Campinas SP - 124 p.
- RAHAL, C.M; STERLING, M.J.H.; COUBELCK, B. (1980). Parameter Tuning for Simulation Models of Water Distribution Networks. Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2, Sept., p.751-762.
- SAVIC, D.A. & WALTERS, G.A. (1995). An Evolution Program for Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks. University of Exeter. School of Engineering.
- SILVA, Fernando G. B. Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos – Tese de Doutorado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2003.
- SOARES, A. K.; Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão - Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2003.
- SOARES, A. K.; Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório- Tese de Doutorado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2007.
- SOUZA, R.S. Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente. São Carlos. 236 p. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, (1994).
- TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. (1999). Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. Journal of Hydraulic Engineering, v. 125, n. 3, p. 277-285, Mar.

- VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON (1997). Calibration and leak detection in pipe networks using inverse transient analysis and genetic algorithms. Research Report, No R157, University of Adelaide, Austrália
- VALADÃO, M. N. Simulação Hidráulica de redes de abastecimento de água – Aplicação em setores de Itajubá - MG. Trabalho de conclusão de Curso. Universidade Federal de Itajubá. 2006
- WALSKI, T.M. (1983). Technique for Calibrating Network Models. J. Water Res. Plng and Mgmt, ASCE, v. 109, n.4, p.360-372.
- WALSKI, T. M. (1986). Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 112, n. 2, p. 238-249, Apr.
- 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/set. de 2007.
- WALTERS, G.A.; SAVIC, D.A.; MORLEY, M.; WERNER, D.S. (1998). Calibration of Water Distribution Network Models Using Genetic Algorithms. University of Exeter. School of Engineering. HYDROSOFT 1998 ( Inglaterra).
- WATER RESEARCH CENTRE (1989). Network analysis – A code of practice. Published by WRc, Swindon, England.
- WU, Z. Y, WALSKI, T., MANKOWSKI, R., COOK, J. TRYBY, M. AND HERRIN G. (2002) “Calibrating Water Distribution Model Via Genetic Algorithms”, in proceedings of the AWWA IMTech Conference, April 16-19, Kansas City, MO.
- WU, Z.Y. (2008). “Data Usage Protocol For Leakage Detection And Eps Model Calibration”. Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2008), August 17-20, 2008, Kruger National Park, South Africa.
- WU, Z.Y. E SAGE, P. (2006). “Water Loss Detection Via Genetic Algorithm Optimization-Based Model Calibration”. 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis, Cincinnati, Ohio, 11p.

