



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

**A INFLUÊNCIA DE MANOBRAS DE VÁLVULAS NA IDENTIFICAÇÃO  
DO FATOR DE ATRITO EM TUBULAÇÕES DE REDE DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.**

**FRANCISCO MARQUES VIANA**

**Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo**

Fortaleza, Dezembro de 2014



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

**A INFLUÊNCIA DE MANOBRAS DE VÁLVULAS NA IDENTIFICAÇÃO  
DO FATOR DE ATRITO EM TUBULAÇÕES DE REDE DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.**

**FRANCISCO MARQUES VIANA**

**Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo**

A apresentação desta dissertação é exigência do Programa de Pós-graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, para obtenção do título de Mestre.

Fortaleza, Brasil.  
2014

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

- 
- V667i Viana, Francisco Marques.  
A Influência de manobras de válvulas na identificação do fator de atrito em tubulações de rede de distribuição de água / Francisco Marques Viana. – 2014.  
83 f. : il. , enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2014.  
Área de Concentração: Recursos Hídricos.  
Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.
1. Recursos hídricos. 2. Atrito. 3. Algoritmos genéticos. I. Título.

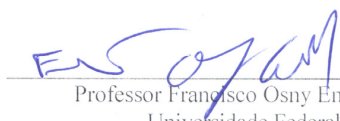
Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Área de Concentração em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade. A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

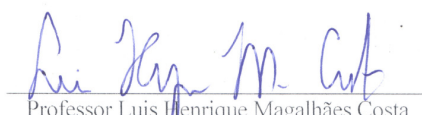
  
Francisco Marques Viana

Dissertação aprovada em 03 de dezembro 2014.

Examinadores:

  
Professor Doutor John Kennedy de Araújo (Orientador).  
Universidade Federal do Ceará

  
Professor Francisco Osny Eneas da Silva  
Universidade Federal do Ceará

  
Professor Luis Henrique Magalhães Costa  
Universidade Estadual Vale do Acaraú.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus por ter me dado a oportunidade de estar vivo e ter tido uma formação que me possibilitou desenvolver este trabalho.

Aos meus pais, Raimundo Nonato Viana e Maria de Lourdes Soares Viana, que sempre me orientaram e me apoiaram em todos momentos da minha vida, sendo antes de tudo exemplos de competência, honestidade e perseverança.

A minha companheira Conceição de Maria Ibiapina e meus filhos Maria Clara Ibiapina Viana, Rafael Duarte Viana, Emanuelle Duarte Viana, Leonardo Duarte Viana, João Victor Duarte Viana e Izabele Duarte Viana, por sempre me apoiarem e compreenderem a minha ausência.

Ao Prof. Dr. John Kenedy de Araújo, pela orientação e credibilidade que foi depositada na elaboração deste trabalho.

Aos meus irmãos Sônia, Sandra, Francisca Maria, Raimundo Júnior e Cláudio Henrique.

Aos meus parentes e amigos pelo apoio.

A banca examinadora por valorizar o trabalho com sua presença.

A todos os professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Um avanço importante na modelagem de rede hidráulica foi a calibração, através desta é possível conhecer o comportamento das características físicas da rede, sendo esta de grande importância nas tomadas de decisão. Neste trabalho vamos utilizar o método transiente inverso aplicado com algoritmo genético, para calibração dos fatores de atrito das tubulações de uma rede de distribuição de água por meio de simulações a partir da variação de parâmetros como: número de cromossomos, número de gerações, cruzamento de um ponto e mutação simples, quantidade de nós medidos, e diferentes tipos de manobras de válvulas (brusca e suave). As simulações foram divididas em casos, onde cada solução encontrada pelo modelo computacional foi avaliada por uma função objetiva, baseada na diferença quadrática entre resultados observados e calculados para as cargas transientes no(s) nó(s) monitorado(s). As análises das soluções encontradas demonstram como o método inverso, o algoritmo genético e a escolha de seus parâmetros influenciam o resultado final. Por meio dos casos, observou-se que para as redes estudadas, não adianta simplesmente aumentar isoladamente os valores dos parâmetros do algoritmo genético no intuito de melhorar a eficiência do método. Como se trata de um método inverso, uma combinação específica de fator de atrito foi gerada a partir da média das soluções obtidas, sob os mesmos parâmetros, em dez aplicações sucessivas do algoritmo genético (processamentos). Os resultados apresentados para as cargas hidráulicas no(s) nó(s) monitorado(s) foram bem próximas das cargas consideradas reais (observadas), tendo em alguns trechos das tubulações valores para a força de atrito bem próximos dos considerados reais. A eficiência dos resultados encontrados foi medida por meio da Função Objetiva.

Palavras-chave: fator de atrito, algoritmos genéticos, manobras de válvulas, função objetiva.

## ABSTRACT

An important advancement in the modeling of hydraulic net went to calibration; through this it is possible to know the behavior of the physical characteristics of the net, being this of great importance in the taking decision. In this work we are going to use the method transient reverse applied with genetic algorithm, for calibration of the strength of friction of the piping of a net of distribution of water through simulations from the variation of parameters. The simulations were divided in cases, where each solution found by the computational model was valued by an objective function based on the quadratic difference between results observed and calculated for the loads transient in (s) knot (s) monitored (s). The analyses of the considered solutions demonstrate like the reverse method, the genetic algorithm and the choice of his parameters influence the final result. Through the cases, it was noticed that for the studied nets, it does not advance simply to increase separately the values of the parameters of the genetic algorithm in the intention of improving the efficiency of the method. Since it the question is a reverse method, a specific combination of strength of friction was produced from the average of the obtained solutions, under the same parameters, in ten successive applications of the genetic algorithm (seeds). The results presented for the hydraulic loads in (s) knot (s) monitored (s) were quite near of the loads considered reals (observed), I tend towards in some passages of the piping values the strength of friction quite near of the respected reals. The efficiency of the considered results was measured through the Objective Function.

Key-words: calibration; strength of friction; transient; genetic algorithms.

## LISTA DE FIGURA

FIGURA 1 – Linhas Características no plano $x-t$ .....	23
FIGURA 2 – Tubulação simples .....	23
FIGURA 3 – Região de validade para uma tubulação simples .....	23
FIGURA 4 – Excitação no nó de jusante .....	24
FIGURA 5 – Excitação nos nós a montante e jusante .....	24
FIGURA 6 – Definição da malha de discretização do método das características .....	25
FIGURA 7 – Esquema de uma seção interna $s$ de uma tubulação $i$ .....	28
FIGURA 8 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica $i$ .....	29
FIGURA 9 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica $i$ .....	30
FIGURA 10 – Esquema de um nó de consumo genérico $M$ .....	30
FIGURA 11 – Válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica $i$ .....	32
FIGURA 12 – Exemplo de abertura e fechamento de uma válvula .....	34
Figura 13: Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 1 .....	58
Figura 14: Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 2 .....	58
Figura 15: Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 3 .....	59
Figura 16: Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 4 .....	59
Figura 17 - Rede A .....	60
Figura 18 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 1.	65
Figura 19 - Carga Hidráulica observada e estimada para F.O. – Manobra 1 .....	65
Figura 20 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 2.	67
Figura 21 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para ER – Manobra 2 .....	67
Figura 22 - Carga Hidráulica observada e estimada para F.O. – Manobra 2 .....	68
Figura 23 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 3.	69
Figura 24 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para ER – Manobra 3.....	70
Figura 25 - Carga Hidráulica observada e estimada para F.O. – Manobra 3.....	70
Figura 26 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 4.	70
Figura 27 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para ER – Manobra 4.....	72
Figura 28 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para F.O. – Manobra 4 ..	72
Figura 29 - Resultados da F.O para todas as Manobras.....	73

Figura 30 - Rede B .....	<b>74</b>
Figura 31 - Resultados da F.O para todas as Manobras – (1 nó monitorado) EMR,ER e F.O .....	<b>77</b>
Figura 32 - Resultados da F.O para todas as Manobras – (2 nós monitorados)	<b>78</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Algoritmo Genético típico	43
Tabela 2 - Características físicas dos tubos.	61
Tabela 3 – Vazões iniciais para condições permanentes consideradas reais.	61
Tabela 4 – Cargas hidráulicas iniciais para condições permanentes consideradas	62
Tabela 5 – Parâmetros alterados para esta análise.	62
Tabela 6 - Valores das forças de atrito para EMR, EMR por Processamento e F.O. – Manobra 1	63
Tabela 7 - Resultados dos fatores de atrito por processamento simulada (Caso04).	64
Tabela 8 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).	64
Tabela 9 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 01).	64
Tabela 10 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 01).	65
Tabela 11 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).	66
Tabela 12 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).	66
Tabela 13 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 03).	66
Tabela 14 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).	67
Tabela 15 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).	68
Tabela 16 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).	68
Tabela 17 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 03).	69
Tabela 18 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).	69
Tabela 19 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).	70
Tabela 20 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).	71
Tabela 21 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).	71
Tabela 22 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).	71
Tabela 23 - Características físicas dos tubos.	74
Tabela 24 – Vazões iniciais para condições permanentes consideradas reais.	75
Tabela 25 – Cargas hidráulicas iniciais para condições permanentes consideradas	75
Tabela 26 – Parâmetros do Algoritmo Genético.	76
Tabela 27 - Valores dos fatores de atritos para F.O. (1 Nó Monitorado)	77



## LISTA DE SIMBOLOS

[M]	Unidade de massa
[L]	Unidade comprimento
[T]	Unidade de tempo
A	Área da seção transversal do tubo, $[L]^2$
a	Celeridade da onda, $[L] / [T]$
$a_j$	Celeridade da onda ajustada, $[L] / [T]$
B	Variável auxiliar $[T] / [L]^2$
D	Diâmetro do tubo $[L]$
E	Módulo de elasticidade de Young - GPa
$e'$	Espessura da parede do tubo $[L]$
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach - adimensional
g	Aceleração da gravidade $[L] / [T]^2$
H	Carga hidráulica $[L]$
$H_{i,jc}$	Carga calculada para o nó i e tempo j $[L]$
$H_{i,jm}$	Carga medida para o nó i e tempo j $[L]$
$H_j$	Carga no ponto J $[L]$
$H_M$	Carga no ponto de nó de consumo M $[L]$
$H_P$	Carga na seção P $[L]$
k	Nível de iteração k
K	Módulo de elasticidade do fluido - GPa
$k+1$	Nível de iteração (k + 1)
Q	Vazão $[L]^3 / [T]$
$Q_{EXT;M}$	Vazão de consumo no nó M $[L]^3 / [T]$
$Q_{i,s}$	Vazão na seção s da tubulação i $[L]^3 / [T]$
$Q_J$	Vazão na seção J $[L]^3 / [T]$
$Q_M$	Vazão na seção M $[L]^3 / [T]$
$Q_P$	Vazão na seção P $[L]^3 / [T]$
R	Constante do termo do atrito $[T]^2 / [L]^5$
Re	Número de Reynolds - adimensional
t	Tempo $[T]$
$\rho$	Massa específica do fluido $[M] / [L]^3$
$\lambda$	Operador do MOC

$\gamma$	Peso específico do fluido $[M] / ([T][L]^2)$
$\varepsilon$	Fator de atrito absoluta do tubo [L]
$\nu$	Viscosidade cinemática $[L]^2[T]^{-1}$
$\psi$	Parâmetro adimensional
$\nu'$	Razão de Poisson - adimensional
$\Delta t$	Intervalo de tempo [T]
$\Delta x$	Intervalo de espaço [L]

## SUMÁRIO

1. - INTRODUÇÃO	14
1.1 - Históricos	14
1.2 - OBJETIVOS	15
1.2.1 - Objetivos Gerais	15
1.2.2 - Objetivos Específicos	15
2. - REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 – Tipos de Escoamentos	17
2.2 – Escoamento Transiente em Tubulações	18
2.2.1 – Histórico	18
2.2.2 – Modelo da Coluna Elástica	20
2.2.2.1 – Equações Fundamentais do Método das Características	20
2.2.2.2 - Cálculo da Celeridade	27
2.2.2.3– Condições de Contorno	27
2.2.2.4– Considerações	34
2.3 – Calibração	34
2.4 – Técnicas de calibração	37
2.4 - Estudo do método do Algoritmo Genético como ferramenta de otimização	39
2.4.1 – Histórico da Teoria Evolutiva	39
2.4.2 – Terminologia Biológica	41
2.4.3 – Estrutura dos Algoritmos Genéticos	42
2.4.3.1 - Seleção	44
2.4.3.2 – Representação dos Parâmetros	45
2.4.3.3 - Cruzamento	49
2.4.3.4 - Mutação	50
2.4.4 – Função Objetivo	52
2.4.5 – Algoritmos Genéticos e Otimização Convencional	52
3. - METODOLOGIA	56
3.1 - Formulação do Problema Inverso e Estratégias de Solução	56
3.1.1 - Definição do Problema Inverso	56
3.1.2 - Formulação do Problema Inverso e Resolução	56
3.1.3 - Manobras de Válvula	57

3.1.4. - Estudo de Casos 1	<b>59</b>
3.1.4.1 - RESULTADOS	<b>63</b>
3.1.5. - Estudo de Casos 2	<b>73</b>
3.1.5.1 - RESULTADOS	<b>77</b>
4 - CONCLUSÃO	<b>79</b>
5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	<b>81</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Históricos

O Brasil tem 12% da água doce do planeta e menos de 3% da população mundial. O problema é que os nossos maiores rios ficam no Norte do país e quase a metade dos brasileiros mora no Sudeste.

Entende-se por rede de distribuição o conjunto de peças (tubulações, válvulas, registros, conexões, bombas, reservatórios de alimentação; cujo objetivo é o abastecimento através de ramais de ligação com a finalidade de uso doméstico, industrial e público) especiais destinadas a conduzir a água até os pontos de tomada das instalações prediais, ou os pontos de consumo público, sempre de forma contínua e segura.

As redes são consideradas pelo sentido de escoamento da água nas tubulações secundárias (ramificadas ou malhadas). Podem distribuir exclusivamente potáveis (rede única) ou também água imprópria para beber (rede dupla). Podem situar-se em níveis diferentes nas cidades acidentadas, bem como possuir duas tubulações nas ruas largas ou tráfego intenso.

A análise de sistemas de distribuição de água é um problema de grande interesse de pesquisadores e profissionais de engenharia. O assunto passou a ser investigado com maior precisão nos últimos trinta anos, devido ao grande aumento populacional.

Uma rede hidráulica é formada por trechos de tubulações e composta de outros elementos hidráulicos, tais como válvulas, bombas, reservatórios de alimentação, registros. Um nó é um ponto de encontro entre dois ou mais trechos de tubulações. As redes hidráulicas costumam ser classificadas como ramificadas e malhadas.

O monitoramento de redes hidráulicas pelos órgãos responsáveis aprimorou-se bastante. Diversas técnicas foram desenvolvidas no sentido de otimizar a distribuição de água e minimizando danos e vazamentos na rede. Entretanto, nota-se um grau de incerteza na caracterização da estrutura física. O desconhecimento total da fator de atrito dos tubos ou dos fatores de atrito em determinadas áreas ou sub-áreas da rede pode dificultar o monitoramento. A tentativa de tornar conhecidos esses parâmetros é chamada de calibração e pode ser interpretado como um processo de modelagem.

O processo de calibração pode ser desenvolvido em escoamento permanente e não-permanente. No escoamento permanente, as vazões nos tubos e pressões nos nós não variam com o tempo enquanto no escoamento não-permanente, acontece o contrário. O estudo de

escoamento não-permanente em redes de distribuição de água foi durante algum tempo negligenciado.

As técnicas de otimização estão desempenhando um papel fundamental na análise de sistemas de distribuição de água, sobretudo no processo de calibração. Aplica-se atualmente a técnica do Algoritmo Genético como ferramenta de busca da melhor solução dos parâmetros desconhecidos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos Gerais**

Este trabalho tem por objetivo identificar fatores de atritos em uma rede de distribuição de água, para o caso do regime transiente, analisando a influência das manobras de válvulas. Para o cálculo das cargas nos nós e vazão nas tubulações será utilizado o método das características, que serão comparados com as cargas hidráulicas observadas.

Será aplicado juntamente com o método transiente inverso, para identificação do fator de atrito, gerando um processo de substituição de indivíduos, por meio de operadores genéticos, operadores de seleção, mutação e recombinação (crossover); que servirá para minimizar os parâmetros observados e simulados. A análise da influência da escolha da quantidade da população, do número de gerações, do número de nós monitorados, do tempo do transiente e do tipo de manobra (suave ou brusca) na qualidade do resultado final também será observado.

Duas redes de abastecimento de água são escolhidas para obtenção de valores para pressão e fator de atrito que serão considerados reais, a fim de que se possa compará-los com resultados obtidos complementando o processo de calibração.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar o processo de calibração dos parâmetros utilizando dados transientes.
- Avaliar a influência o fenômeno transiente por meio de diferentes manobras de válvula.

- Avaliar a função objetiva das diferentes manobras de válvulas e diferentes redes.

## 2. REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Tipos de Escoamentos

Os *escoamentos* ou *fluxos dos fluidos* estão sujeitos a determinadas condições gerais, princípios e leis da dinâmica e à teoria da turbulência. podem ser: laminar, turbulento, unidimensional, bidimensional, rotacional, irrotacional, permanente, variável, uniforme, variado, livre, forçado entre outros.

O **Fluxo laminar** ocorre quando as partículas de um fluido movem-se ao longo de trajetórias bem definidas, apresentando lâminas ou camadas (daí o nome laminar) cada uma delas preservando sua característica no meio. No escoamento laminar a viscosidade age no fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência. Este escoamento ocorre geralmente a baixas velocidades e em fluídos que apresentem grande viscosidade.

O **Escoamento turbulento** ocorre quando as partículas de um fluido não movem-se ao longo de trajetórias bem definidas, ou seja as partículas descrevem trajetórias irregulares, com movimento aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida. Este escoamento é comum na água, cuja a viscosidade e relativamente baixa. O **Escoamento unidimensional** cujas propriedades (velocidade, massa específica, pressão etc...), são funções exclusivas de uma única coordenada espacial e do tempo, ou seja, são representadas em função de valores médios da seção. **Escoamento bidimensional** ocorre quando as partículas de um fluido escoam em planos paralelos e seguindo trajetórias idênticas, não havendo escoamento na direção normal aos planos. O **Escoamento rotacional** ocorre quando as partículas de um fluido, numa certa região, apresentarem rotação em relação a um eixo qualquer. O escoamento rotacional também é denominado de vorticoso. O **Escoamento irrotacional** ocorre quando as partículas de um fluido, numa certa região, não apresentarem rotação em relação a um eixo qualquer. Quando as propriedades de um fluído em cada ponto do mesmo, não variarem no tempo o escoamento é dito **Escoamento permanente**. O **Escoamento variável** Também conhecido como escoamento não permanente, ocorre quando as propriedades de um fluído em cada ponto do mesmo, apresentarem variações no tempo. Temos um **Escoamento uniforme** quando todas as seções transversais de um dado conduto, forem iguais e a velocidade média, em todas as seções, em um determinado instante, for a mesma. Em outras palavras, escoamento uniforme é aquele no qual o vetor velocidade, tem suas características(módulo, direção, sentido) iguais em todos os pontos do fluido. O **Escoamento variado** é Aquele no qual o vetor velocidade,

apresenta características (módulo, direção, sentido), distintas nos pontos do fluido. O *Escoamento livre* ocorre quando todas as seções transversais de um líquido estiver em contato com a atmosfera. Esta situação se verifica em rios, córregos entre outros. Este escoamento se dá necessariamente pela ação da gravidade. Também conhecido como escoamento em superfície livre. E o *Escoamento forçado* ocorre no interior de tubulações, ocupando toda sua área geométrica, não apresentando contato com o ambiente externo. A pressão que o líquido exerce na tubulação é diferente da pressão atmosférica. Este escoamento se dá por ação gravitacional ou através de bombeamento.

## **2.2 – Escoamento Transiente em Tubulações**

### **2.2.1 – Histórico**

Qualquer sistema que contenha elementos em movimento está sujeito a algum tipo de transitório, quer seja pela paralisação eventual desses elementos, quer pela necessidade de alteração da movimentação. O transitório hidráulico é definido como a situação de fluxo não permanente quando o fluxo varia de um estado permanente para outra situação de estado permanente. Uma alteração do fluxo permanente em um sistema de tubulações ocorre devido a uma mudança nas condições de contorno. Existem muitos tipos de condições de contorno que podem provocar transientes. Os tipos mais comuns de transientes em redes, que frequentemente requerem análise, são:

- mudanças no ajuste de válvulas, acidental ou planejada;
- partida ou parada de bombas;
- variação nas demandas ou consumos;
- alteração do nível d'água de um reservatório.

O fenômeno transiente em tubulações, atualmente, é considerado de grande importância. As equações que governam o movimento são equações diferenciais parciais e que necessitam de um método numérico para resolvê-las. O comportamento dos elementos hidráulicos é complexo e os sistemas de tubos estão sujeitos a uma grande variedade de condições de operações e restrições.

Embora as redes de distribuição de água existam há centenas de anos, os transientes não têm sido detalhadamente considerados nos projetos. As redes hidráulicas eram alimentadas por gravidade por meio de grandes reservatórios ou caixas-d'água e as condições quase-permanentes prevaleciam. Além disso, os diâmetros dos tubos e os comprimentos das

linhas eram pequenos, assim como as baixas pressões existentes. O problema mais importante era prever uma distribuição equilibrada do fluxo sob determinadas condições de demanda. Devido a isso, pouca atenção foi dada às considerações transientes.

Modernos sistemas de distribuição de água, pelo contrário, são alimentados por numerosas estações de bombeamento descarregando diretamente no sistema. Distúrbios no fluxo são comuns. Parada e partida de bombas, manobras de válvulas, e a influência de eventos acidentais podem gerar ondas de alta pressão. Essas ondas de pressão conduzem informações para todo o sistema hidráulico. Quando as condições de fluxo mudam lentamente, as variações nas pressões são pequenas e se há uma mudança rápida nas condições de fluxo, entretanto, grandes pressões são geradas com magnitudes suficientes para causar sérios danos nos tubos e equipamentos hidráulicos.

A complexidade do fenômeno transiente tem induzido, às vezes, a adoção de procedimentos simplificados, tais como: (1) componentes complexos e outras complicações no próprio sistema físico podem ser ignorados; ou (2) o intervalo de operação e as condições de carregamento na qual o sistema está sujeito são substancialmente reduzidos. Até um pequeno ou secundário evento pode produzir uma resposta previsível de pressões máximas e mínimas. A análise transiente não é um remédio milagroso para todos os problemas hidráulicos e falhas no sistema de tubos. Algumas falhas nos tubos podem estar relacionadas com a ocorrência de terremotos, corrosão, etc. Sejam em projetos ou pesquisas, as condições transientes não devem ser excluídas e uma boa análise implica em investigar o fenômeno transiente sob uma larga variedade de condições de fluxo, operações e combinações de mecanismos e componentes do sistema. Os benefícios de tal análise incluem uma melhora no modelo, uma operação mais econômica e possivelmente um custo mais baixo.

O fenômeno transiente pode ser analisado considerando dois tipos de modelos. Os modelos rígidos, que não levam em consideração os efeitos elásticos da água e da tubulação, e os modelos elásticos, que levam em consideração estes efeitos. Os modelos rígidos são empregados usualmente para descrever os fenômenos de oscilação de massa, e os elásticos na análise do golpe de aríete.

Como as condições transientes ocorrem devido à ação de válvulas, bombas e outros dispositivos hidráulicos, um ajuste qualquer de um fluxo local provoca um distúrbio do regime permanente. Sendo a água ligeiramente compressível, um pequeno desequilíbrio de fluxo pode produzir grandes variações de pressões e permitir que uma quantidade considerável de energia seja armazenada. O emprego do modelo da coluna rígida justifica-se quando as mudanças no fluxo são graduais, tal que os desequilíbrios de energia e massa nas

tubulações sejam pequenos. No entanto, rápidas mudanças, causadas por operações planejadas ou acidentais, podem criar grandes pulsos de pressão capazes de romper ou prejudicar as linhas de tubulações. Neste caso, o modelo elástico é mais apropriado.

O fluxo transiente em um conduto forçado é governado por equações diferenciais parciais não-lineares:

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

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

onde  $H$  é a carga piezométrica,  $Q$  é a vazão volumétrica,  $A$  é a área da seção transversal do tubo,  $a$  é a celeridade da onda de pressão,  $D$  é o diâmetro interno da tubulação,  $f$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $x$  é a distância e  $t$  o tempo.

A equação (3.1) representa a conservação da massa, enquanto a equação (3.2) representa a conservação de “momentum”. Em geral não há uma solução analítica simples para esse conjunto de equações. Utiliza-se, portanto, o recurso de métodos numéricos. Antes da aplicação do método numérico, essas equações devem ser transformadas em equações diferenciais ordinárias para serem resolvidas. Neste capítulo utiliza-se o modelo da coluna elástica através do método das características como ferramenta de modelagem do fenômeno transiente.

## 2.2.2 – Modelo da Coluna Elástica

Esta seção apresenta o modelo elástico para um sistema de distribuição de água. As equações diferenciais parciais não-lineares (2.1) e (2.2) são discretizadas e linearizadas.

### 2.2.2.1 – Equações Fundamentais do Método das Características

O transitório hidráulico pode ser expresso matematicamente pelas equações (3.1) e (3.2). Essas duas equações diferenciais permitem calcular os valores da vazão  $Q$  e da carga piezométrica  $H$  ao longo da tubulação  $x$  e do tempo  $t$ . Há muitas referências (CHAUDHRY, 1987; e WYLIE e STREETER, 1978) que fornecem as deduções dessas equações e ilustram o

uso delas em simulações com fluxo de redes hidráulicas. Estas deduções podem ser vistas no ANEXO A.

Para resolver o sistema de equações diferenciais torna-se necessário um método numérico e as condições de contorno do sistema necessitam ser especificadas. Na literatura há vários métodos numéricos, tais como: método das características; método das diferenças finitas; método dos elementos finitos; método espectral; método de contorno integral; método de volumes finitos. Sabe-se que estes métodos são aproximados, mas com uma boa escolha dos intervalos de discretização e uma definição explícita e coerente das condições de contorno do problema, as soluções são bastante razoáveis. Dentre os métodos, há a preferência ao método das características pelo fato do fenômeno transitório seguir uma lei de propagação de ondas que associa o tempo  $t$  com a abcissa  $x$  definida ao longo da canalização através da celeridade  $a$ . A principal vantagem do método das características é apresentar a possibilidade de obter equações explícitas para a determinação das cargas e vazões. O método é muito eficiente quando se aplicam valores convenientes para a celeridade da onda ( $V \ll a$ , onde  $V$  é velocidade média de escoamento).

As equações (2.1) e (2.2) podem ser reescritas como:

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

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

Considerando a combinação linear das equações (2.3) e (2.4):

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

ou

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

ou

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

Se  $H = H(x,t)$  e  $Q = Q(x,t)$  são soluções das equações (2.3) e (2.4), então as derivadas totais podem ser escritas como:

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

e

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

Definindo o multiplicador  $\lambda$  como:

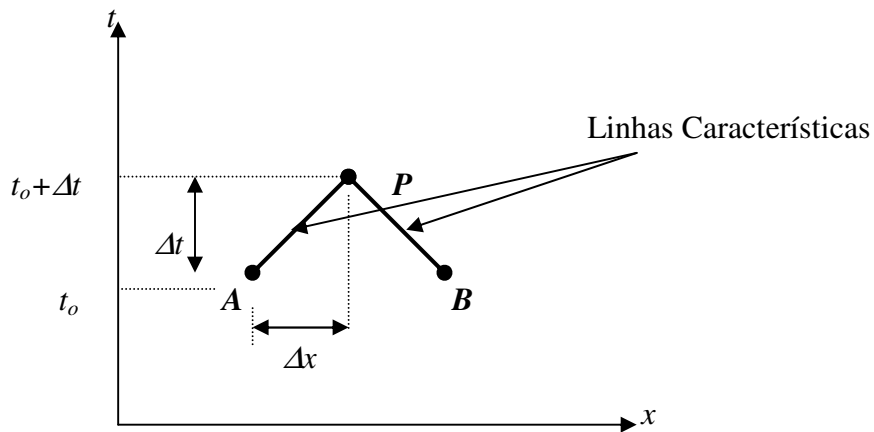
$$\lambda a^2 = \frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

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

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

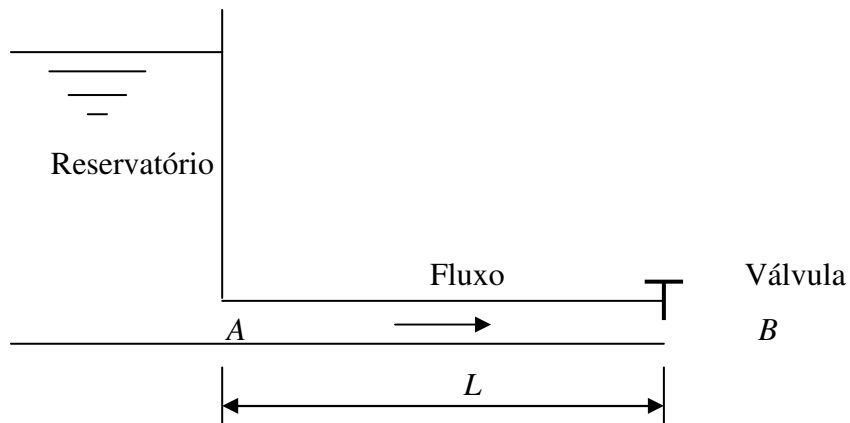
$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (2.12)$$

Note que a equação (2.11) é válida para  $(dx/dt) = a$ , e que a equação (2.12) é válida para  $(dx/dt) = -a$ . Em outras palavras, impondo as relações dadas por  $(dx/dt) = a$  e  $(dx/dt) = -a$ , elimina-se a variável independente  $x$ , e convertem-se as equações diferenciais parciais (2.3) e (2.4) em equações diferenciais ordinárias na variável independente  $t$ . No plano  $x-t$  estas relações representam duas linhas retas tendo inclinações  $\pm 1/a$ . Essas linhas são chamadas linhas características. Matematicamente, essas linhas dividem o plano  $x-t$  em duas regiões. Por exemplo, um distúrbio no ponto  $A$  (figura 1) em  $t_0$  alcançaria o ponto  $P$  depois de um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

FIGURA 1 – Linhas Características no plano  $x-t$ .

Antes da apresentação do procedimento de solução das equações (2.11) e (2.12), será discutido o significado físico das linhas características. Para facilitar a discussão, considere uma tubulação simples mostrada na figura 2.

FIGURA 2 – Tubulação simples.



As equações (2.11) e (2.12) são válidas ao longo do comprimento do tubo ( $0 < x < L$ ) e é necessário estabelecer condições de contorno nas extremidades (para  $x=0$  e  $x=L$ ) (figura 3).

FIGURA 3 – Região de validade para uma tubulação simples.

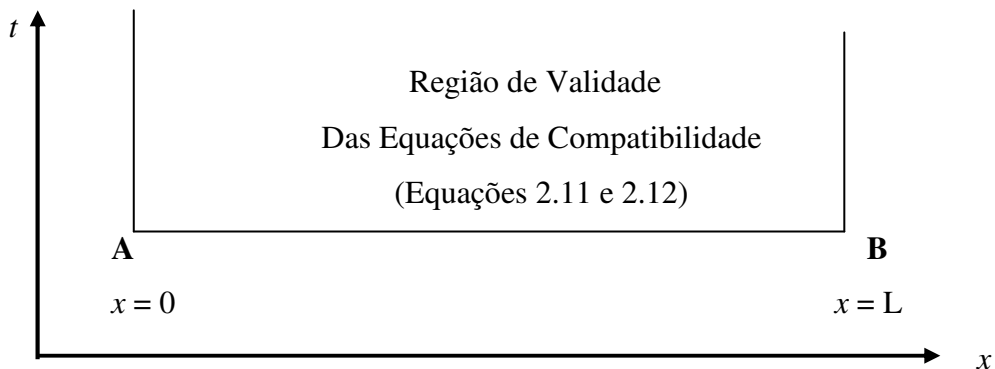
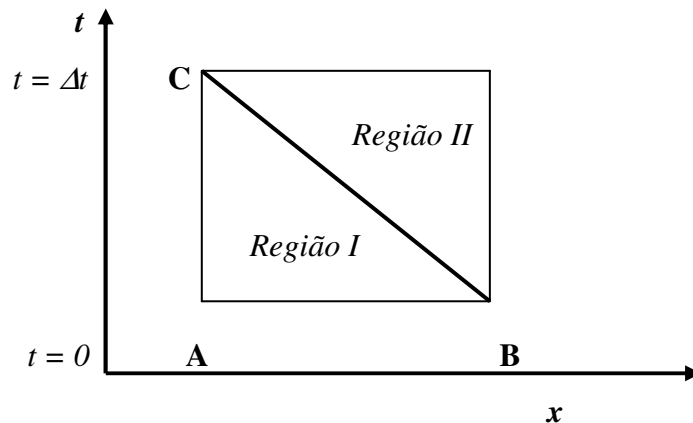


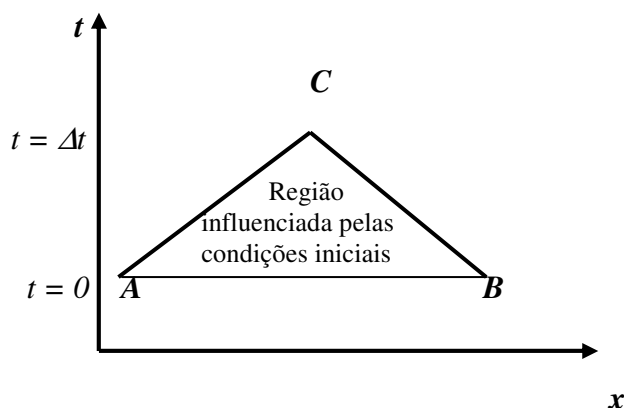
FIGURA 4 – Excitação no nó de jusante.



No exemplo sob consideração, há um reservatório de carga constante no nó a montante ( $x = 0$ ) e uma válvula no nó a jusante ( $x = L$ ), e as condições transientes são produzidas pela válvula. Assume-se que há um fluxo inicial ( $t = 0$ ) permanente na tubulação quando a válvula é instantaneamente fechada. Isso reduz o fluxo através da válvula a zero e resulta em uma elevação da pressão na válvula. Devido a esta elevação de pressão, uma onda de pressão se propaga para montante. Se o caminho desta onda é plotado no plano  $x-t$ , ele será representado pela linha  $BC$  como mostrado na figura 4. A figura mostra que as condições na região I dependem somente das condições iniciais, pois as condições de contorno não mudam, enquanto que na região II elas dependem das condições impostas pelo contorno a jusante.

Portanto, a linha característica  $BC$  separa os dois tipos de soluções. Se excitações são impostas simultaneamente nos pontos  $A$  e  $B$ , então a região influenciada pelas condições iniciais é conforme mostrado na figura 5.

FIGURA 5 – Excitação nos nós a montante e jusante.



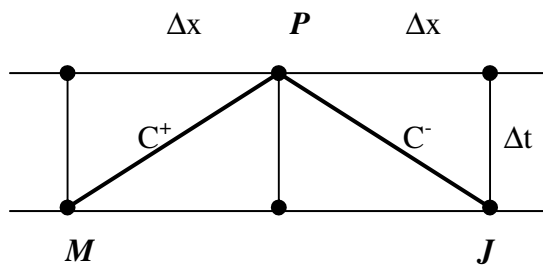
A linha característica  $AC$  separa as regiões influenciadas pelo contorno a montante e as condições iniciais, e a linha  $BC$  separa as regiões influenciadas pelo contorno de jusante e as

condições iniciais. Em outras palavras, as linhas características no plano  $x-t$  representam o caminho de propagação das perturbações em vários pontos do sistema.

A resolução numérica das equações (2.11) e (2.12) é obtida discretizando-se o domínio e o tempo em intervalos  $\Delta x$  e  $\Delta t$ , respectivamente. Assim, têm-se os valores discretos de  $x$ , que indicam as seções consideradas:  $x_0 = 0, x_1 = 1\Delta x, x_2 = 2\Delta x, \dots, x_N = N\Delta x$ . Para o tempo  $t$ , tem-se:  $t_0 = 0, t_1 = 1\Delta t, t_2 = 2\Delta t, \dots, t_M = M\Delta t$ . Necessariamente, por imposição do método das características, tem-se que  $\Delta x = a\Delta t$ . A figura 6 ilustra a discretização de  $x$  e  $t$ .

Os pontos  $M, J$  e  $P$  correspondem, respectivamente, aos pontos de coordenadas  $(x_{i-1}, t_j), (x_{i+1}, t_j), (x_i, t_{j+1})$ . A Eq. (2.11) é usada para relacionar os valores de  $H_P$  e  $Q_P$  com o par de valores  $H_M$  e  $Q_M$  e a Eq. (2.12) para relacionar  $H_P$  e  $Q_P$  com  $H_J$  e  $Q_J$ .

FIGURA 6 – Definição da malha de discretização do método das características.



Rearranjando as equações (2.11) e (2.12), as equações características tornam-se:

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

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

onde:

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

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

Integrando as equações (2.13) e (2.14) ao longo de  $MP$  e  $JP$  respectivamente (figura 6):

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

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

Os dois primeiros termos das equações (2.17) e (2.18) podem ser facilmente avaliados, entretanto o terceiro termo destas, representando perdas por atrito, apresenta uma certa dificuldade, pois não se conhece explicitamente a variação de  $Q$  com  $t$ . Como os intervalos de tempo usados para resolver essas equações em problemas práticos são usualmente pequenos, uma técnica de primeira ordem sugerida por WYLIE e STREETER (1978) é suficientemente viável e precisa. Usando esta técnica para o termo do atrito, as equações (2.17) e (2.18) tornam-se:

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

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

com a aproximação do termo do atrito:

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

e

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

Esse método é conhecido como explícito e produz usualmente resultados satisfatórios em aplicações na engenharia. Entretanto, se o termo do atrito tornar-se muito grande, a

aproximação de primeira ordem pode produzir resultados instáveis. Para tais casos, um método predictor-corrector ou uma aproximação de segunda ordem deve ser usada para evitar instabilidade.

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

### 2.2.2.2 Cálculo da Celeridade

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

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

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

$$\psi = \frac{D}{e'}(1 - 0,5\nu') \quad (2.24)$$

onde  $D$  = diâmetro do conduto,  $e'$  = espessura da parede e  $\nu'$  = razão de Poisson.

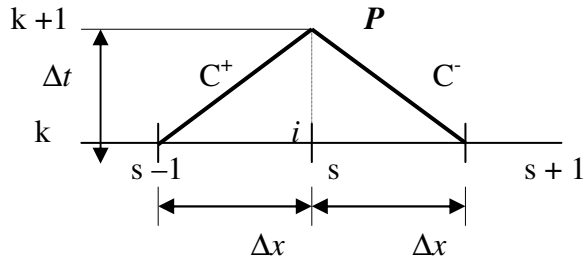
### 2.2.2.3 – Condições de Contorno

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

- **Seção Interna**

Considere uma seção genérica  $s$  interna a um trecho  $i$  da tubulação. A figura 7 apresenta as linhas características positiva e negativa no plano  $x-t$ .

FIGURA 7 – Esquema de uma seção interna  $s$  de uma tubulação  $i$ .



As equações características são dadas por:

$$C^+ : [H_{i,s}(k+1) - H_{i,s-1}(k)] + B_i [Q_{i,s}(k+1) - Q_{i,s-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,s-1}(k) Q_{i,s-1}(k) = 0 \quad (2.25)$$

$$C^- : -[H_{i,s}(k+1) - H_{i,s+1}(k)] + B_i [Q_{i,s}(k+1) - Q_{i,s+1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,s+1}(k) Q_{i,s+1}(k) = 0 \quad (2.26)$$

Das equações (2.25) e (2.26), vem:

$$Q_{i,s}(k+1) = \frac{H_{i,s-1}(k)}{2B_i} - \frac{H_{i,s+1}(k)}{2B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s-1}(k)|]}{2B_i} Q_{i,s-1}(k) + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s+1}(k)|]}{2B_i} Q_{i,s+1}(k) \quad (2.27)$$

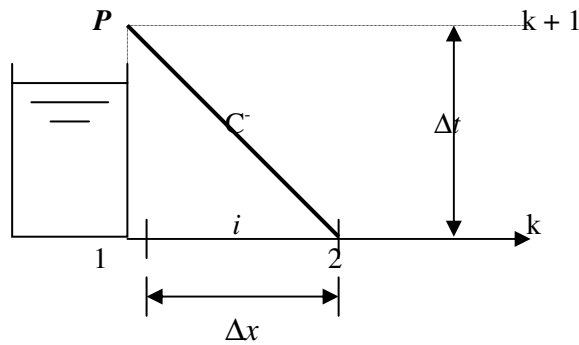
Substituindo a equação (2.27) na equação (2.25) ou na equação (2.26), resulta:

$$H_{i,s}(k+1) = \frac{H_{i,s-1}(k)}{2} + \frac{H_{i,s+1}(k)}{2} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s-1}(k)|]}{2} Q_{i,s-1}(k) - \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s+1}(k)|]}{2} Q_{i,s+1}(k) \quad (2.28)$$

- **Reservatório de Nível Constante a Montante**

Considere um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica  $i$  (figura 8).

FIGURA 8 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica  $i$ .



A equação característica negativa é dada por:

$$C^- : -[H_{i,1}(k+1) - H_{i,2}(k)] + B_i [Q_{i,1}(k+1) - Q_{i,2}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,2}(k) - Q_{i,2}(k) = 0 \quad (2.29)$$

Contorno:

$$H_{i,1}(k+1) = H_1 = \text{constante} \quad (2.30)$$

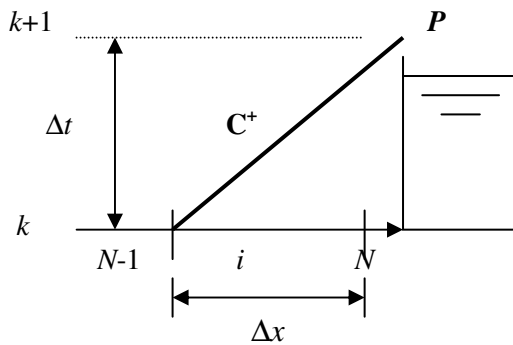
Das equações (2.29) e (2.30):

$$Q_{i,1}(k+1) = \frac{H_1}{B_i} - \frac{H_{i,2}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t] Q_{i,2}(k)}{B_i} \quad (2.31)$$

- **Reservatório com Nível Constante a Jusante**

Considere um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica  $i$  (figura 9).

FIGURA 9 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica  $i$ .



A equação característica positiva é dada por:

$$C^+ : [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) | Q_{i,N-1}(k) | = 0 \quad (2.32)$$

Contorno:

$$H_{i,N}(k+1) = H_N = \text{constante} \quad (2.33)$$

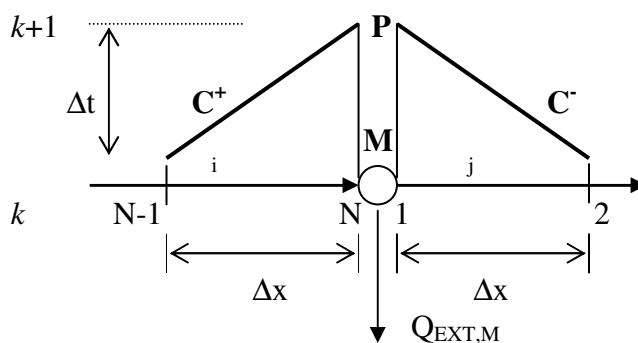
Das equações (2.32) e (2.33):

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_N}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t | Q_{i,N-1}(k) |]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (2.34)$$

- **Nó de Consumo ou Demanda**

Considere um nó de consumo genérico M com vazão de demanda igual a  $Q_{EXT,M}$  e duas tubulações  $i$  e  $j$  representando as tubulações que chegam (conjunto  $N_1$  – sentido positivo) e as tubulações que saem (conjunto  $N_2$  – sentido negativo) do nó M respectivamente (figura 10).

FIGURA 10 – Esquema de um nó de consumo genérico M.



As equações características são dadas por:

$$C^+ : [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) | Q_{i,N-1}(k) = 0 \quad (2.35)$$

$$C^- : -[H_{j,1}(k+1) - H_{j,2}(k)] + B_j [Q_{j,1}(k+1) - Q_{j,2}(k)] + R_j \Delta t Q_{j,2}(k) | Q_{j,2}(k) = 0 \quad (2.36)$$

Contorno:

$$\sum_{i \in N_1} Q_{i,N}(k+1) - \sum_{j \in N_2} Q_{j,1}(k+1) - Q_{EXT,M} = 0 \quad (2.37)$$

$$H_{i,N}(k+1) = H_{j,1}(k+1) = H_m(k+1) \quad (2.38)$$

Das equações (2.35) e (2.36):

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_{i,N}(k+1)}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t | Q_{i,N-1}(k)]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (2.39)$$

$$Q_{j,1}(k+1) = \frac{H_{j,1}(k+1)}{B_j} + \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + \frac{[B_j - R_j \Delta t | Q_{j,2}(k)]}{B_j} Q_{j,2}(k) \quad (2.40)$$

Substituindo as equações (2.39) e (2.40) na equação (2.37) e usando a equação (2.38):

$$H_M(k+1) = B_M \sum_{i \in N_1} \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + B_M \sum_{j \in N_2} \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + B_M \sum_{i \in N_1} \frac{[B_i - R_i \Delta t | Q_{i,N-1}(k)]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) - B_M \sum_{j \in N_2} \frac{[B_j - R_j \Delta t | Q_{j,2}(k)]}{B_j} Q_{j,2}(k) - B_M Q_{EXT,M} \quad (2.41)$$

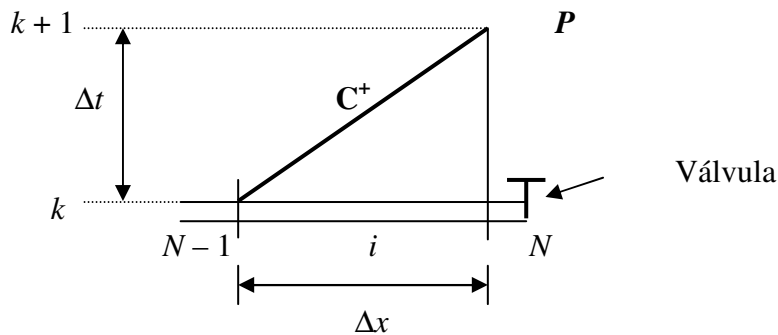
onde:

$$B_M = \left[ \sum_{j \in N_1} \frac{1}{B_j} + \sum_{j \in N_2} \frac{1}{B_j} \right]^{-1} \quad (2.42)$$

- **Válvula a Jusante**

Considere uma válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica  $i$  (figura 11)

FIGURA 11 – Válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica  $i$ .



A equação característica positiva é dada por:

$$C^+ : [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) | Q_{i,N-1}(k) | = 0 \quad (2.43)$$

O fluxo permanente através da válvula pode ser escrito como:

$$Q_{o_{i,N}} = (C_d A_v)_o \sqrt{2gH_{o_{i,N}}} \quad (2.44)$$

onde o índice  $o$  indica condições de escoamento permanente,  $C_d$  = coeficiente de descarga,  $H_{o_{i,N}}$  = carga a montante da válvula e  $A_v$  = área do orifício.

Assumindo que o fluxo em escoamento transiente, através da válvula, possa ser descrito por uma equação similar ao escoamento permanente, pode-se escrever:

$$Q_{i,N}(k+1) = (C_d A_v) \sqrt{2gH_{i,N}(k+1)} \quad (2.45)$$

Dividindo a equação (2.45) pela equação (2.44) e elevando ao quadrado ambos os lados, obtêm-se:

$$Q_{i,N}^2(k+1) = \frac{(Q_{o_{i,N}} \tau)^2}{H_{o_{i,N}}} H_{i,N}(k+1) \quad (2.46)$$

onde:  $\tau = (C_d A_v)/(C_d A_v)_o$  é a abertura ou fechamento relativo da válvula.

Substituindo  $H_{i,N}(k+1)$  da equação (2.45) na equação (2.46), produz:

$$Q_{i,N}^2(k+1) + C_v Q_{i,N}(k+1) - C_{p_i} C_v = 0 \quad (2.47)$$

onde:

$$C_v = (\tau Q_{o_{i,N}})^2 B_i / H_{o_{i,N}} \quad (2.48)$$

$$C_{p_i} = \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + Q_{i,N-1}(k) - \frac{R_i}{B_i} \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| \quad (2.49)$$

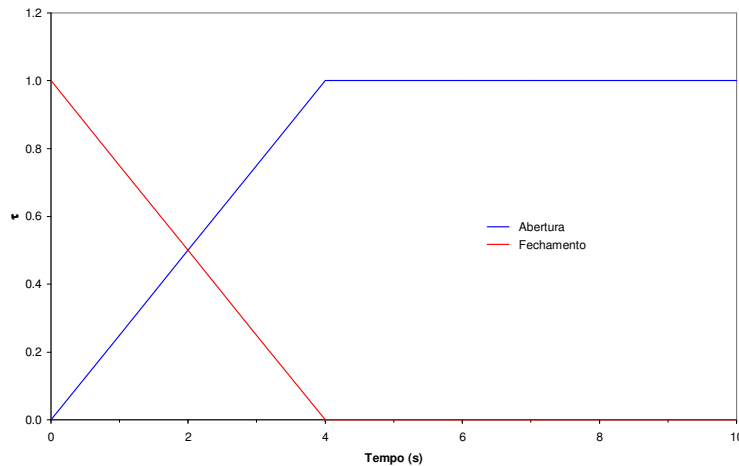
Resolvendo a equação (2.47) para  $Q_{i,N-1}(k+1)$  e desprezando o termo negativo em uma das raízes, vem:

$$Q_{i,N}(k+1) = 0.5 \left( -C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{p_i} C_v} \right) \quad (2.50)$$

$H_{i,N}(k+1)$  pode ser calculado, agora, por meio da equação (2.43).

Para o cálculo das condições transientes provocadas por abertura ou fechamento de uma válvula, uma relação entre  $\tau$  e  $t$  deve ser especificada. Geralmente esta relação apresenta-se sob forma gráfica. A figura 12 ilustra exemplo de abertura e fechamento de uma válvula. Notar que  $\tau = 1$  corresponde a uma abertura na qual o escoamento é permanente.

FIGURA 12 – Exemplo de abertura e fechamento de uma válvula.



#### 2.2.2.4 – Considerações

O Método das Características é um método de resolução das equações hiperbólicas que governam o escoamento transiente. O método conduz a uma análise abrangente dos mecanismos de operação de transientes e mostra que o cálculo do transitório hidráulico em uma rede é facilmente realizado por meio de equações explícitas, que fornecem diretamente os valores das cargas nos nós e vazões nas tubulações da rede em cada passo de tempo em função dos respectivos valores no passo de tempo anterior.

No equacionamento do modelo hidráulico apresentado visando à calibração da rede, foram apresentadas várias condições de contorno em uma rede hidráulica. Este trabalho não contempla os transientes provocados por operações de bombas e de reservatórios de nível variável, porém as respectivas condições de contorno podem ser equacionadas sem causar grandes dificuldades na modelagem.

### 2.3 – Calibração

A fim de se racionalizar o uso dos recursos hídricos, a utilização de modelos matemáticos de previsão do comportamento hidráulico via computador vem se mostrando fundamental na análise das redes de distribuição de água. A calibração é uma etapa decisiva na consistência dos resultados obtidos a partir do modelo de simulação hidráulico da rede em estudo. Este trabalho apresenta um modelo de calibração de rede de abastecimento de água

que considera o fator de atrito nos trechos da rede como variáveis de decisão. Para a obtenção destas variáveis, utilizaram-se os Algoritmos Genéticos.

Shamir e Howard (1977) destacam a importância da calibração para a determinação de características físicas e operacionais de um sistema existente e obtenção de dados, que quando inseridos ao modelo matemático da rede, produzem dados realísticos.

A calibração pode ser considerada como parte integrante da modelagem, onde após o primeiro passo é possível dar continuidade para se tentar operar e controlar o sistema estudado.

Cesario e Davis (1984) definem calibração como sendo o processo de ajuste fino de modelo até que esse simule as condições de campo para um horizonte de tempo específico, e para as condições de demanda máxima horárias, com uma precisão razoável.

Walski (1983,1986) e Bhave (1988) propuseram técnicas analíticas que requerem informações do campo para ajustarem simultaneamente os coeficientes de fator de atrito das tubulações e as demandas dos nós. Estes dados podem ser obtidos durante testes de rotina nas redes de distribuição de água. A aplicação feita por Walski (1983), foi modificada por Bhave (1983), que ajustou simultaneamente as demandas nos nós e os coeficientes de resistência dos tubos por meio de um processo iterativo de calibração. Através de um processo de tentativas foi possível ajustar os coeficientes de resistência das tubulações e/ou as demandas nos nós, fazendo uma previsão das pressões nos nós e comparando-as com as respectivas pressões observadas. Enquanto na técnica de Bhave (1988) a vazão de entrada no nó de origem pode ser medida e permanecer fixa durante a calibração, na proposta de Walski (1983) as demandas nos nós e as vazões de entrada nos nós de origem (próximo ao reservatório), crescem ou decrescem, dependendo do valor do fator de ajuste de demanda.

Boulos e Wood (1990) determinaram diretamente parâmetros de projetos, operação e calibração de redes de abastecimento de água por meio de um processo de algoritmo explícito. Através deste processo valores ótimos para estes parâmetros de projetos, operação e calibração puderam ser determinados para encontrar as restrições específicas de vazão e pressão. Todos os tipos de sistema de distribuição podem ser considerados neste modelo. O método adotado para resolver simultaneamente o sistema de equações lineares e não lineares foi o de Newton-Raphson. As variáveis de decisão para o algoritmo de otimização são representados pelos parâmetros indeterminados da rede. A medida que estes parâmetros são explicitamente determinados, o algoritmo explícito se torna bastante eficiente para satisfazer especificações limites.

Ferreri, Napoli e Tumbiolo (1994) destacam a importância de avaliar com

precisão os parâmetros da rede, essenciais para a calibração, onde o coeficiente de fator de atrito assume grande importância; uma vez que estes parâmetros se alteram consideravelmente com o tempo.

Gambale (2000) definiu calibração em redes de água como sendo a determinação das características físicas do modelo, particularmente dos coeficientes de fator de atrito dos tubos, que inseridos no modelo simulador produziram resultados realísticos.

A calibração é uma tarefa imprescindível à simulação e envolve um grande consumo de tempo dos profissionais para sua realização. Devido a este fato, nos últimos anos, a calibração tem sido objeto do estudo de vários pesquisadores. Em sua pesquisa Gambale calibrou uma rede de abastecimento de água, adaptada do exemplo criado por Walski (1983), aplicando sua técnica utilizando o Algoritmo Genético em regime permanente. Segundo ele os modelos de calibração são modelos otimizadores que têm como escopo a determinação, de forma automática, dos coeficientes de fator de atrito das redes ou das demandas nodais, ou seja, calibração de rede. Atualmente, a otimização genética tem sido objeto de estudo para operar nestes modelos. Em seu trabalho, ele cita alguns modelos disponíveis no mercado, tais como:

- EPANET - Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (Environmental Protection Agency - EPA). Este programa de distribuição livre possui vários recursos como Controles, Padrões e as simulações em Período Extensivo e de Qualidade de Água. Encontra-se disponível em bibliotecas voltadas para a plataforma em WINDOWS.
- BOSS SEM - (Epanet Modeling System) - Desenvolvido no ambiente WINDOWS pela empresa “Boss International”, este simulador utiliza o cálculo do EPANET, contando com todos os recursos disponíveis naquele modelo, tendo as vantagens da interface do WINDOWS para a criação da rede e visualização dos resultados.
- CFOR - O programa criado pela “Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo” foi desenvolvido em ambiente WINDOWS e possui os módulos de cálculo em regime permanente, extensivo e transitório.
- H2ONET - Pertencente a “MW Soft, Inc” este programa é um dos mais completos existentes no mercado. Trabalha diretamente no ambiente AUTOCAD, dispondo dos módulos de cálculo de qualidade de água, regime permanente e extensivo. Possui, também, um vasto grupo de recursos, destacando-se o

gerenciador de cenários e a interface com os sistemas GIS (Geographic Information System) e SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Apesar de ser um programa de grandes recursos, seu manejo não é simples, necessitando do programa AUTOCAD para funcionar.

- PIPE 2000 - Esta versão para WINDOWS do programa KYPIPE, produzida pela Universidade do Kentucky (USA), dispõe de uma grande variedade de recursos, cumprindo destacar a utilização de imagens RASTER (background) e a calibração automática. Trata-se de um programa de fácil assimilação.
- WATERCAD - Criado pela empresa “Haestad Methods”, é um programa desenvolvido em WINDOWS, tendo uma extensa gama de recursos, dentre eles, o gerenciador de cenários. Talvez, a maior virtude deste programa seja a facilidade com que o operador aprenda a utilizá-lo.

### 2.3.1 Técnicas de calibração

Desde a década de 70, numerosas técnicas de calibração tem sido usadas em redes, como nos seguintes casos:

Egger e Polkowski (1976) sugeriram que as condições de vazão podem ser melhor definidas que o fator de atrito, segundo eles o método mais lógico de se modelar um sistema malhado, seria dar entrada no computador com dados de vazão, juntamente com as pressões nodais observadas em pontos determinados e uma série de valores de fator de atritos assumidos.

A ideia é que o computador realize o balanço da rede para cada condição de carga, armazene os resultados, examine o ajuste global do modelo, explore as melhores estimativas e realize um outro balanço com as novas fator de atritos. Este processo deve se repetir de forma iterativa até que alguma condição de aceitação seja satisfeita. Segundo os autores, naquela época um esquema ainda pouco divulgado, havia sido descrito por Donachie, na Inglaterra.

Segundo Sharp e Walski (1988) a fator de atrito dos condutos de água é um fator crítico para o dimensionamento das tubulações. Existem vários métodos para obtenção deste parâmetro, entre eles utilizar valores da literatura tradicional, porém estes valores variam muito de um sistema para outro. Um segundo método seria determinar a fator de atrito de uma tubulação já instalada, ajustando valores que façam um modelo computacional atender várias condições pré-determinadas. Um terceiro método e mais preciso seria medir em campo a

fator de atrito real dos tubos por meio das perdas de cargas. Este método apesar de fornecer resultados mais confiáveis, é também o mais dispendioso em tempo e custo. No entanto, segundo os autores, nenhum destes métodos são capazes de garantir no futuro a fator de atrito das tubulações.

Garcia-Serra (1988) em sua tese de doutorado apresenta várias técnicas e variações para calibração de modelos matemáticos de distribuição de água, dividindo-as em determinísticos e não-determinísticos. Primeiramente aborda métodos mais simples, que proporcionam um ajuste não tão preciso do modelo. Discorrem ainda desta fase, técnicas matemáticas de minimização, que são úteis para o cálculo de certas funções objetivas. Posteriormente, apresenta técnicas de calibração mais refinadas, as quais são apoiadas em base analítica fundamentada na própria formulação do sistema de equações que definem o comportamento da rede. Também foram utilizadas técnicas de análise que permitem determinar a variação de certa grandeza ao se modificar parâmetros de ajuste. Segundo o autor, em muitos casos inicialmente se aplicou um técnica de precalibração e a seguir se aplicou uma técnica mais apurada.

Cheung e Souza (2001) definiram como finalidade de um processo de calibração de uma rede de abastecimento de água como sendo o ajuste dos dados de entrada do modelo com a finalidade de reduzir os desvios entre os valores observados e prognosticados. Em seu trabalho dois métodos foram utilizados e comparados, o Analítico (Bhave 1988) que ajusta os coeficientes de fator de atrito das tubulações e/ou demandas nos nós através de um processo iterativo até alcançar a calibração da rede, e o Explícito, proposto por Boulos e Wood (1990), que determina diretamente os parâmetros de calibração. Neste processo as condições de pressão e vazão em regime permanente são determinadas por técnicas fornecidas pelas equações da energia e da continuidade. A solução do problema é dada em termo da reformulação da equação de equilíbrio da rede.

Araújo e Chaudhry (2003) utilizaram o Método Transiente Inverso, que determina os parâmetros pela minimização dos desvios entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas, para a calibração das fator de atritos em redes hidráulicas, observando dados tanto em regime permanente como em regime transiente. Durante o transiente, fenômeno que ocorre quando há uma variação da pressão e vazão devido a algum distúrbio como a abertura ou fechamento de válvula, é possível obter-se uma quantidade muito maior de informações no tempo, com um menor número de locais observados que no escoamento permanente. Liggett e Chen (1994) fizeram o ajuste entre cargas medidas e calculadas, aplicando o MTI em conjunto com o método de Levenberg-Marquardt. Goldberg (1989) e

Michalewicz (1994) usaram outros métodos de ajuste de parâmetros que incluíram como algoritmo estocástico o genético (AG).

Silva (2006) definiu Métodos Explícitos como sendo aqueles em que os parâmetros de equilíbrio da rede a serem calculados pelos modelos matemáticos, são determinados por meio da resolução analítica do sistema de equações não lineares; onde o número de medidas de pressão e/ou vazão é igual ao número de parâmetros. Já o método implícito, desenvolvido por Ormsbee (1989) que utiliza uma técnica não linear para calibração da fator de atrito de tubulações baseado em condições de carga em regime permanente, consiste em minimizar uma função objetiva que geralmente é o módulo da diferença entre os valores observados e calculados de pressão e/ou vazão.

Um modelo matemático representa uma descrição matemática das características de um sistema. O primeiro passo na análise de um sistema dinâmico é obter o seu modelo. Na descrição da maioria dos sistemas dinâmicos, sejam mecânicos, elétricos ou hidráulicos, utilizam-se, normalmente, equações diferenciais. A resolução dessas equações diferenciais permite que se tenha uma dada resposta do sistema. Nem sempre é possível resolver diretamente as equações diferenciais para a obtenção da resposta, é prática comum lançar mão de um modelo numérico para fins de análise.

Este capítulo apresenta o modelo hidráulico adotado para a análise do transitório hidráulico. As equações parciais diferenciais não lineares são transformadas em equações diferenciais ordinárias de modo a facilitar a compreensão do transitório e da sua aplicação.

## **2.4. Estudo do método do Algoritmo Genético como ferramenta de otimização**

### **2.4.1 – Histórico da Teoria Evolutiva**

No decorrer da história, os homens têm construído uma vasta rede de conhecimento que os habilita a prever, com certo grau de variação, o clima, o movimento dos planetas, os eclipses solar e lunar, as fontes das doenças, a subida e descida dos indicadores econômicos, os estágios de desenvolvimento da linguagem das crianças, e um vasto panorama de outros fenômenos naturais, sociais e culturais. Mais recentemente, a ciência compreendeu alguns limites de sua capacidade em prever estes fenômenos, devido sobretudo à alta complexidade dos mesmos. A interação com a natureza tem permitido um aprendizado mais adequado: existe um grau de controle para entender determinado fenômeno, ou melhor, há fenômenos que são guiados pela aleatoriedade.

O advento dos computadores foi, provavelmente, a maior e melhor ferramenta na história da ciência e tecnologia. Essa revolução tecnológica permitiu aumentar a capacidade de previsão dos fenômenos naturais e também impulsionou o surgimento de um novo fenômeno: a inteligência artificial.

Os cientistas mais modernos da área de computação como Alan Turing, John von Neumann, Norbert Wiener foram motivados por visões de programas de computador com inteligência e com capacidade adaptativa de aprender e controlar o seu meio-ambiente. Esses pesquisadores da ciência computacional estavam interessados tanto em biologia e psicologia quanto em eletrônica. Não deverá ser uma surpresa que os computadores de hoje possam não somente calcular, por exemplo, a trajetória de um míssil, mas também que possam modelar o cérebro humano e simular a evolução biológica. Estas atividades estão se desenvolvendo em três frentes: no campo das redes neurais, no aprendizado das máquinas e no campo do cálculo evolucionário, dos quais os algoritmos genéticos são os exemplos mais evidentes.

Nas décadas de 1950 e 1960 vários cientistas estudaram sistemas evolucionários com a idéia de que os mecanismos da evolução natural das espécies poderiam servir de base para uma nova ferramenta de otimização nos problemas de engenharia. A idéia era fazer evoluir uma população de possíveis soluções usando operadores inspirados na genética e na seleção natural.

Na década de 1960, foram introduzidas as *estratégias de evolução* em um método para otimizar aerofólios de aeronaves. O campo das estratégias de evolução permanece em atividade independentemente do campo dos algoritmos genéticos. Posteriormente, desenvolveu-se as primeiras técnicas da *programação evolutiva*: uma técnica em que as possíveis soluções de um problema eram modificadas por mutação aleatória (MITCHELL, 1996). Juntos, as estratégias de evolução, a programação evolutiva, e os algoritmos genéticos formam o campo da computação evolutiva.

Os algoritmos genéticos foram introduzidos por John Holland (HOLLAND, 1975) e popularizados por um de seus alunos, David Goldberg (GOLDBERG, 1989). Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarado em 1859 pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin, “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”. Em contraste com as estratégias de evolução e a programação evolutiva, o objetivo original de Holland não foi o de projetar algoritmos visando resolver problemas específicos, mas estudar os fenômenos de adaptação como ocorrem na natureza. Holland apresentou o algoritmo genético como uma abstração da evolução biológica e forneceu as bases teóricas para a sua aplicação.

O algoritmo genético de Holland é um método de evolução a partir de uma população inicial de *cromossomos* (isto é, *strings* de uns e zeros, também chamados de *bits*) gerando uma nova população, imitando os mecanismos seleção naturais e operadores genéticos de cruzamento e mutação. Cada cromossomo consiste de *genes*, cada gene assumindo o valor 0 ou 1. O operador seleção escolhe aqueles cromossomos em uma população que irão se reproduzir. Os cromossomos mais aptos irão produzir mais filhos do que os menos aptos. O cruzamento troca partes de dois cromossomos de maneira análoga ao que ocorre nos organismos biológicos.

A ideia de Holland de trabalhar com uma população inicial para gerar outras populações usando o cruzamento e a mutação é a principal inovação com relação às estratégias de evolução. Holland foi o primeiro a tentar introduzir a evolução computacional com uma base teórica sólida. Antes da idéia de Holland, a noção de *esquemas* era base de quase todo o desenvolvimento teórico dos algoritmos genéticos.

Nos últimos anos tem havido uma interação entre os vários métodos computacionais usando a teoria evolutiva. Atualmente, os pesquisadores usam o termo algoritmo genético para descrever algo mais do que a ideia original de Holland.

#### **2.4.2 – Terminologia Biológica**

Na biologia, a teoria da evolução diz que o meio ambiente seleciona, em cada geração, os seres vivos mais aptos de uma população para sobrevivência. Como resultado, somente os mais aptos conseguem se reproduzir, uma vez que os menos adaptados geralmente são eliminados antes de gerarem descendentes. Durante a reprodução, ocorrem fenômenos como mutação e cruzamento, entre outros, que atuam sobre o material genético armazenado nos cromossomos. Estes fenômenos conduzem à variabilidade dos seres vivos na população. Sobre esta população diversificada age a seleção natural, permitindo a sobrevivência apenas dos seres mais adaptados.

Um algoritmo genético é a metáfora desses fenômenos, o que explica porque AG's possuem muitos termos originados da biologia. A lista apresentada a seguir descreve os principais termos encontrados na literatura.

- Cromossomo e Genoma: na biologia, genoma é o conjunto completo de genes de um organismo. Um genoma pode ter vários cromossomos. Nos AG's, os dois representam a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, ou seja, um cromossomo ou genoma representa um simples ponto no espaço de busca.

- Gene: na biologia, é a unidade de hereditariedade que é transmitida pelo cromossomo e que controla as características do organismo. Nos AG's, é um parâmetro codificado que representa uma variável de decisão no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o cromossomo.
- Indivíduo: um simples membro da população. Nos AG's, um indivíduo é uma possível solução para o problema.
- Genótipo: na biologia, representa a composição genética contida no genoma. Nos AG's, representa a informação contida no cromossomo ou genoma.
- Fenótipo: nos AG's, representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo. É o cromossomo decodificado. Por exemplo, considere que o cromossomo codifica parâmetros como as dimensões das vigas em um projeto de construção de um edifício, ou as conexões e pesos de uma Rede Neural. O fenótipo seria o edifício construído ou a Rede Neural.
- Alelo: na biologia, representa uma das formas alternativas de um gene. Nos AG's, representa os valores que o gene pode assumir. Por exemplo, um gene que representa o parâmetro cor de um objeto poderia ter o alelo azul, preto, verde, etc.
- Epistasia: interação entre genes do cromossomo, isto é, quando um valor de gene influencia o valor de outro gene. Problemas com alta Epistasia são de difícil solução por AG's.

### 2.4.3 – Estrutura dos Algoritmos Genéticos

Otimização é a busca da melhor solução para um dado problema. Consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida neste processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores. As técnicas de otimização por busca, geralmente, apresentam:

- Um espaço de busca, onde estão todas as possíveis soluções do problema;
- Uma função objetivo (algumas vezes chamada de função de aptidão na literatura de AG's), que é utilizada para avaliar as soluções produzidas, associando a cada uma delas um valor.

Em termos matemáticos, a otimização consiste em achar a solução que corresponda ao ponto de máximo ou mínimo da função objetivo.

As técnicas de otimização convencional por busca (por exemplo, os métodos do gradiente) apresentam dificuldades em localizar o ponto de máximo global de uma função com múltiplos pontos de máximo.

O primeiro passo de um AG típico é a geração de uma “população inicial de cromossomos” que é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam possíveis soluções do problema a ser resolvido. Durante o “processo evolutivo”, esta população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota (denominada de “aptidão” no jargão da literatura de AG’s), refletindo a qualidade da solução que ele representa. Em geral, os cromossomos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados (Darwinismo). Os “membros” selecionados podem sofrer modificações em suas características fundamentais através dos “operadores” de *crossover* (cruzamento ou recombinação) e “mutação”, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada. A tabela 4.1 ilustra este procedimento através de um algoritmo.

TABELA 1 – Algoritmo Genético típico

---

Seja  $S(t)$  a população de cromossomos na geração  $t$ .

$t \rightarrow 0$

inicializar  $S(t)$

avaliar  $S(t)$

enquanto o critério de parada não for satisfeito faça

$t \rightarrow t + 1$

selecionar  $S(t)$  a partir de  $S(t-1)$

aplicar cruzamento sobre  $S(t)$

aplicar mutação sobre  $S(t)$

avaliar  $S(t)$

fim enquanto

---

Um AG processa populações de “cromossomos”. Um cromossomo é uma estrutura de dados, geralmente vetor ou cadeia de bits (cadeia de bits é a estrutura mais tradicional, porém nem sempre é a melhor), que representa uma possível solução do problema a ser otimizado.

Em geral, um cromossomo representa um conjunto de parâmetros da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada. O conjunto de todas as configurações que o

cromossomo pode assumir forma o seu “espaço de busca”. Se o cromossomo representa  $n$  parâmetros de uma função, então o espaço de busca é um espaço com  $n$  dimensões. Para funções objetivos com múltiplas variáveis de decisão, tais variáveis são representadas na mesma cadeia de bit, com cada uma ocupando uma parte da cadeia. A cada cromossomo  $s_i$  é atribuída uma aptidão  $f_i$ . Aptidão é um valor que avalia quão boa é a solução codificada em  $s_i$ .

Um Algoritmo Genético começa com uma “população inicial” de  $N$  cromossomos, geralmente gerada aleatoriamente. Após a geração da população inicial, o AG aplica os operadores de cruzamento e mutação aos melhores cromossomos da população inicial para gerar cromossomos filhos. Os melhores cromossomos são escolhidos por meio de um processo de seleção. Os operadores de cruzamento e mutação são os principais mecanismos dos AG's para explorar regiões desconhecidas do espaço de busca.

A estrutura do AG (com todos os seus operadores) aqui adotado foi definida com base em testes realizados durante todo o processo de revisão bibliográfica.

#### 2.4.3.1 - Seleção

A seleção é um processo através do qual os cromossomos são escolhidos de acordo com os valores da função objetivo. A função objetivo representa uma medida de benefício, utilidade ou vantagem que se deseja maximizar. Os cromossomos com um alto valor desses benefícios têm maior probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes na próxima geração. Este operador, logicamente, é uma versão artificial da seleção natural de Darwin. Em populações naturais, a aptidão é determinada pela habilidade do ser vivo sobreviver aos predadores, às doenças e a outros obstáculos para a idade adulta e a subsequente reprodução. Nos esquemas artificiais, a função objetivo é o árbitro final que decide se o cromossomo deve viver ou morrer.

Há diversas maneiras de proceder-se na escolha dos cromossomos mais aptos. Para o presente trabalho será adotado um procedimento de seleção proporcional à aptidão baseado na ideia do *Elitismo*. O *Elitismo* foi proposto por DEJONG (1975) e é uma estratégia que permite transferir os melhores cromossomos de uma geração para outra sem alterações. Isto ocorre devido ao corte do cruzamento ou à ocorrência de mutação.

O procedimento de seleção com elitismo adotado aqui é o seguinte:

1. Seja a população de  $NC$  indivíduos  $(a_1, a_2, \dots, a_{NC})$ ;

2. A aptidão,  $F_{obj}(a_i)$ , de cada indivíduo é calculada conforme o valor da função objetivo;
3. Faz-se o ordenamento decrescente da aptidão (para problema de maximização);
4. Selecionam-se os melhores indivíduos deste ordenamento de maneira a formar uma população de  $p_e \times NC$  indivíduos, onde  $p_e$  está sendo definido como taxa de elitismo;
5. Forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos (dentre os melhores) que irão compor a população de pais.
6. Finalmente vem a sucessão. A população de indivíduos para a próxima geração é formada de 50% dos cromossomos dos pais e 50% dos cromossomos dos filhos, dentre aqueles de melhor aptidão. Estabelece-se, então, uma probabilidade de sucessão:  $p_s = 0,5$ .

Este procedimento visa melhorar o desempenho do AG.

### 2.4.3.2 – Representação dos Parâmetros

Os algoritmos genéticos costumam trabalhar com codificação dos parâmetros do problema. Esta codificação tem o objetivo de adaptar os parâmetros para o devido manuseio dos operadores genéticos.

- **Representação Binária**

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

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (2.51)$$

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

As operações com números binários podem ser entendidas da seguinte forma

#### Representação de um número na base dois

Escrever um número inteiro em binário, isto é, na base dois, não apresenta problema. Cada posição digital representará uma potência de dois, da mesma forma que nos números decimais cada posição, uma potência de dez. Assim, o número 23457 significa:

$$2 \times 10^4 + 3 \times 10^3 + 4 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 7 \times 10^0.$$

Na base dois, a base usada nos computadores binários, o número 1 1 0 1 0 1 representa:

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

- ***Conversão Decimal - Binário***

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

O importante é observar se o número é par ou ímpar. Em binário, o número par termina em 0 e o ímpar em 1. Assim, determina-se o algarismo da direita, pela simples divisão do número por 2; se o resto for 0 (número par) o algarismo da direita é 0; se for 1 (número ímpar) o algarismo da direita é 1. Como exemplo, o número 25 pode ser convertido para binário da seguinte forma:

$$\begin{array}{r|l}
 25 & 2 \\
 \hline
 1 & 12 \\
 & 0 \\
 & 6 \\
 & 0 \\
 & 3 \\
 & 1 \\
 & 1 \\
 & 1 \\
 & 0
 \end{array}$$

$$25 = 11001$$

Na representação binária em um algoritmo genético, o comprimento do cromossomo depende da precisão desejada. Por exemplo: o domínio da variável  $x_j$  é  $[a_j, b_j]$  e a precisão desejada é de 5 casas decimais. A precisão implica que o intervalo do domínio de cada

variável possa ser dividido no mínimo por  $(b_j - a_j) \times 10^5$  intervalos. Dessa forma, o número de bits necessários para uma variável pode ser calculado como segue:

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

onde  $m_j$  = número de bits necessários em um cromossomo. O exemplo a seguir mostra como se determina  $m_j$ .

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

$$x_j = a_j + \text{decimal}(\text{indivíduo}_j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (2.52)$$

onde: decimal (indivíduo<sub>j</sub>) representa o valor decimal do cromossomo  $j$  para a variável de decisão  $x_j$ .

Exemplo: Considere o seguinte problema de otimização (GEN & CHEN, 1997):

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

Supor que a precisão desejada seja de 4 casas decimais. Os bits necessários para as variáveis  $x_1$  e  $x_2$  são calculados da equação (4.2):

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

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

$$\overbrace{000001010100101001}^{18 \text{ bits}} \overbrace{101111011111110}^{15 \text{ bits}}$$

Os valores correspondentes para as variáveis  $x_1$  e  $x_2$  são:

	Número Binário	Número Decimal
$x_1$	000001010100101001	5417
	1	
$x_2$	101111011111110	24318

A representação binária é historicamente importante, uma vez que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de HOLLAND (1975). É a representação tradicional, sendo fácil de utilizar e manipular, como também é simples de analisar teoricamente. Contudo, se um problema tem parâmetros contínuos e o usuário quer trabalhar com boa precisão numérica, ele precisará armazenar cromossomos longos na memória. Para cada ponto decimal acrescentado na precisão, é necessário adicionar 3,3 bits na cadeia. Se 8 casas decimais forem necessárias,  $8 \times 3,3 \approx 27$  bits serão utilizados para cada parâmetro. Quando há muitos parâmetros, obtêm-se cadeias de bits que podem fazer o algoritmo convergir vagarosamente. Por exemplo, mutação nos primeiros bits do gene afeta mais a aptidão que mutação nos últimos bits do gene.

- **Representação Real**

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

$$\frac{(2^l - 1)V}{(V_{max} - V_{min})} \quad (2.53)$$

A representação real, ou com ponto flutuante, gera cromossomos menores e é compreendida mais naturalmente pelo ser humano do que a cadeia de bits. No exemplo anterior referente à codificação binária, o cromossomo em questão seria representado por um vetor, (-2.687969; 5.361653), de dois números com ponto flutuante conforme a eq. 2.53:

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

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

Outra vantagem da representação real é a facilidade de criar novos operadores.

### 2.4.3.3 - Cruzamento

O operador cruzamento permite a criação de uma nova geração. Ele é considerado o principal mecanismo de busca dos AG's para explorar regiões desconhecidas do espaço de busca. Há inúmeros tipos de cruzamento na literatura especializada, tanto para codificação binária quanto codificação real. Neste trabalho, o operador cruzamento será limitado a dois tipos: cruzamento de um ponto (para codificação binária) e cruzamento aritmético (codificação real).

- **Cruzamento de Um Ponto**

O operador cruzamento é aplicado a cada par de cromossomos pais gerando dois cromossomos filhos com uma probabilidade  $p_c$ . Seja  $a_p = (b_1, b_2, \dots, b_{NB})$  o primeiro pai e  $a'_p = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{NB})$  o segundo pai. Um número inteiro  $J_x$  é gerado aleatoriamente entre  $1$  e  $NB - 1$  ( $NB$  é o número de bits no cromossomo) e os *strings* dos pais são separados na posição  $J_x$ :

$$a_p = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.54)$$

$$a'_p = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{J_x} | b'_{J_x+1}, \dots, b'_{NB}) \quad (2.55)$$

Produzindo, pela troca da segunda parte, os dois filhos  $a_f$  e  $a'_f$ :

$$a_f = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b'_{J_x+1}, \dots, b'_{NB}) \quad (2.56)$$

$$a'_f = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.57)$$

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

- **Cruzamento Aritmético**

Os operadores convencionais de cruzamento (cruzamento de  $n$  pontos e uniforme) são resultados das adaptações dos operadores utilizados para representação binária. Estes operadores funcionam bem na representação binária, mas na representação real eles basicamente trocam valores dos genes e, portanto, não criam informações novas (i.e., novos números reais). Melhor então é usar operadores aritméticos.

Os operadores aritméticos realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais. Dentre os vários tipos de cruzamento existentes na literatura de AG's, este trabalho adota o cruzamento aritmético. O cruzamento aritmético foi proposto por MICHALEWICZ (1994) e é uma combinação linear entre dois vetores.

Sejam  $p_1$  e  $p_2$  os cromossomos pais representados por:

$$p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l}) \quad (2.58)$$

$$p_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2l}) \quad (2.59)$$

onde:  $p_{ij} \in \mathfrak{R}$ .

Os cromossomos filhos  $c_1$  e  $c_2$  são produzidos da seguinte forma:

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \quad (2.60)$$

$$c_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2 \quad (2.61)$$

onde  $c_i \in \mathfrak{R}$  e  $\beta$  é um número aleatoriamente gerado no intervalo  $[0,1]$ .

#### 2.4.3.4 - Mutação

Após a operação de cruzamento, o operador de mutação é aplicado, com uma probabilidade  $p_m$ , em cada cromossomo filho gerado. A mutação consiste em fazer alterações, geralmente pequenas, nos valores de um ou mais genes num dado cromossomo. A mutação

melhora a diversidade dos cromossomos na população, por outro lado, destrói informação contida no cromossomo, logo, deve ser utilizada uma probabilidade de mutação pequena, mas suficiente para assegurar a diversidade. Esta probabilidade geralmente está no intervalo  $p_m \in [0,001; 0,05]$

- **Mutação Simples**

Em cromossomos binários a mutação simples inverte os valores de bits, ou seja, muda o valor de um dado bit de 1 para 0 ou de 0 para 1. A figura 4.1 apresenta um exemplo em que dois bits do primeiro filho e um bit do segundo sofrem mutação (bits estes que passaram no teste de probabilidade).

Antes	<i>filho<sub>1</sub></i>	(0010101011010010101100)
	<i>filho<sub>2</sub></i>	(0011111010100000111111)
Depois	<i>filho<sub>1</sub></i>	(0010 <u>0</u> 010110100101 <u>1</u> 1100)
	<i>filho<sub>2</sub></i>	(0011111010 <u>0</u> 000000111111)

- **Mutação Uniforme**

A mutação uniforme é um dos vários tipos de operadores de mutação existentes aplicados a cromossomos de representação real. A mutação uniforme é a simples substituição de um gene individual por um número aleatório. A mutação é aplicada para cada gene individual com uma probabilidade  $p_m$ . Dado um cromossomo  $p$ , com o  $j$ -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo  $c$  da seguinte forma:

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ p_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.62)$$

onde  $a_i$  e  $b_i$  representam os limites do intervalo permitido para o gene  $c_i$ ; e  $U(a_i, b_i)$  representa um número aleatório de uma distribuição uniforme no intervalo  $[a_i, b_i]$ .

#### 2.4.4 – Função Objetivo

Há na literatura inúmeras formas de proceder-se ao ajuste entre os parâmetros medidos e calculados. Há funções objetivos que levam em consideração várias medidas tais como: cargas hidráulicas, vazões nos tubos, demandas e custos. Estas medidas são aglomeradas na função objetivo através da definição de pesos que servem como indicadores dos respectivos graus de influência da medida no processo de otimização.

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

A identificação dos parâmetros é baseada na minimização da soma dos desvios absolutos e pode ser expressa pelo erro quadrático  $F$  :

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (2.63)$$

onde:  $TS$  = duração do transitório,  $NL$  = número de locais de medida na rede,  $H_{i,j}^m$  = carga hidráulica medida,  $H_{i,j}^c$  = carga hidráulica calculada,  $i = 1, 2, \dots, NL$  e  $j = 1, 2, \dots, TS$ . Dessa maneira, pode-se definir a função objetivo como o negativo do erro quadrático:

$$F_{obj} = -F \quad (2.64)$$

Portanto, durante a calibração dos diversos parâmetros da rede hidráulica, a otimização compreende maximizar a função objetivo.

#### 2.4.5 – Algoritmos Genéticos e Otimização Convencional

Visando situar Algoritmos Genéticos no contexto das ferramentas de otimização em geral, considerem-se algumas das principais classes de métodos de otimização:

- Gerar-e-Testar: O algoritmo Gerar-e-Testar (também conhecido como método de busca exaustiva ou aleatória) é uma abordagem da força bruta. Emprega dois

módulos: o módulo de geração, que enumera possíveis soluções sistematicamente ou aleatoriamente, e o módulo de teste, que avalia cada possível solução podendo aceitá-la ou rejeitá-la. O módulo gerador pode produzir todas as possíveis soluções antes do módulo de teste começar a agir. O mais comum é o uso intercalado destes dois módulos. O método pode encerrar sua execução quando uma solução satisfatória for encontrada, depois de encontrar um número de soluções satisfatórias ou continuar até que todas as possíveis soluções sejam achadas;

- **Métodos Analíticos:** Os métodos analíticos utilizam técnicas do Cálculo Diferencial para determinar os pontos extremos de uma função e apresentam várias desvantagens: não informam se o ponto encontrado é um ponto de mínimo local ou global, requerem funções com derivadas e, além disso, quando existe grande número de parâmetros torna-se difícil encontrar, analiticamente, todos os pontos de mínimo e máximo. Isto torna estes métodos impraticáveis para otimizar diversos problemas do mundo real;
- **Subida de Encosta:** Os métodos de Subida de Encosta (*hill climbing*) investigam os pontos adjacentes do espaço de busca e movem-se na direção do melhor valor da função objetivo. Pode ser observado, portanto, que para funções com muitos ótimos locais, este método apresenta dificuldade em localizar qual “encosta” leva ao ótimo global. O uso de Métodos de Subida de Encosta também é complicado quando existem planícies ou platôs na superfície de busca. Contudo, estes métodos são geralmente rápidos. Um grande número de técnicas importantes de otimização segue os princípios da Subida de Encosta. Um exemplo é o método do gradiente.

Os Algoritmos Genéticos têm sido empregados em problemas complicados de otimização, em que, muitas vezes, os métodos de busca convencional falham. Algumas vantagens dos AG's são:

- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou uma combinação deles;
- Realizam pesquisas 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 e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Adaptam-se bem a computadores paralelos;
- Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- São fáceis de serem implementados em computadores;
- São modulares e portáteis, ou seja, o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Assim, eles podem ser transferidos de um problema para outro;
- São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- São também facilmente hibridizados com outras técnicas e heurísticas.

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

As técnicas de otimização estão desempenhando um papel fundamental na análise de sistemas de distribuição de água, principalmente devido ao efeito do crescimento populacional e industrial. A ligação entre um modelo hidráulico e uma técnica de otimização é uma maneira eficiente de se obter valores das variáveis de decisão com sucesso, minimizando ou maximizando uma função objetivo.

Os algoritmos genéticos foram introduzidos por John Holland (HOLLAND, 1975) e popularizados por um de seus alunos, David Goldberg (GOLDBERG, 1989). Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarado em 1859 pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin, "Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes". Em contraste com as estratégias de evolução e a programação evolutiva, o objetivo original de Holland não

foi o de projetar algoritmos visando resolver problemas específicos, mas estudar os fenômenos de adaptação como ocorrem na natureza. Holland apresentou o algoritmo genético como uma abstração da evolução biológica e forneceu as bases teóricas para a sua aplicação.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Formulação do Problema Inverso e Estratégias de Solução**

##### **3.1.1 Definição do Problema Inverso**

Os vários métodos aplicados na análise de redes de distribuição de água visando não apenas à calibração, mas outras finalidades, enquadram-se sob duas formas de abordagem, o problema direto e o problema inverso. No problema direto, por exemplo, as demandas e as demais características físicas da rede são conhecidas e desejam-se calcular as cargas hidráulicas nos nós e as vazões nos tubos. Este é o caso clássico de projeto. No problema inverso, diferentemente do problema direto, não se dispõe das referidas informações. Há alguns dados disponíveis de carga hidráulica em poucos nós e desejam-se calcular ou estimar alguns parâmetros da rede, tais como os fatores de atrito. O problema inverso, portanto, trata as características da rede como variáveis.

No estudo de redes hidráulicas em regime permanente, os problemas inversos têm sido aplicados de diferentes formas, incluindo operação, calibração (ORMSBEE & WOOD – 1986a, b; BHAVE – 1988) e identificação de vazamentos (PUDAR & LIGGETT – 1992).

Em geral, a resolução dos problemas inversos é feita por meio de métodos diretos e indiretos. Os métodos inversos diretos buscam resolver diretamente o sistema de equações diferenciais considerando os parâmetros como variáveis dependentes. Por outro lado, os métodos inversos indiretos utilizam um processo iterativo em que os parâmetros variam e a simulação é repetida até conseguir-se reproduzir de forma satisfatória a resposta do sistema. Os métodos indiretos são os mais utilizados devido à simplicidade de sua formulação matemática e ao fato de serem menos sensíveis a erros nos dados de entrada.

##### **3.1.2. Formulação do Problema Inverso e Resolução**

O problema inverso tratado neste trabalho pode, então, ser formulado como segue: dadas medidas de cargas hidráulicas transientes em um nó de uma rede hidráulica, obter os valores de parâmetros de forma a lograr um ótimo ajuste entre os valores observados e calculados destas cargas.

A resolução do problema inverso segue o procedimento indireto com a minimização da diferença quadrática entre os resultados observados e calculados. A descrição formal pode ser posta da seguinte forma:

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2$$

onde:  $TS$  = duração do transiente;  $NL$  = número de locais de medida na rede;  $H_{i,j}^m$  = carga medida;  $H_{i,j}^c$  = carga calculada;  $i = 1, 2, \dots, NL$ ; e  $j = 1, 2, \dots, TS$ .

O método inverso proposto neste trabalho deve ser validado adequadamente para que seja útil em casos reais. O procedimento correto seria adquirir medições de campo e ainda dados observados sobre variação temporal da carga hidráulica e, utilizando tais dados, resolver o problema inverso realizando um confronto entre as cargas hidráulicas coletadas e estimadas. Neste estudo, submete-se a metodologia de estimação de parâmetros a testes de validação com dados sintéticos. Neste procedimento, as cargas hidráulicas transientes em uma rede hidráulica de parâmetros reais conhecidos são geradas e consideradas como sendo “observações” de campo. Ressalta-se que no método inverso, tais parâmetros são considerados desconhecidos sendo objeto de busca no problema de calibração. Só posteriormente à calibração, os parâmetros reais serão comparados com os estimados.

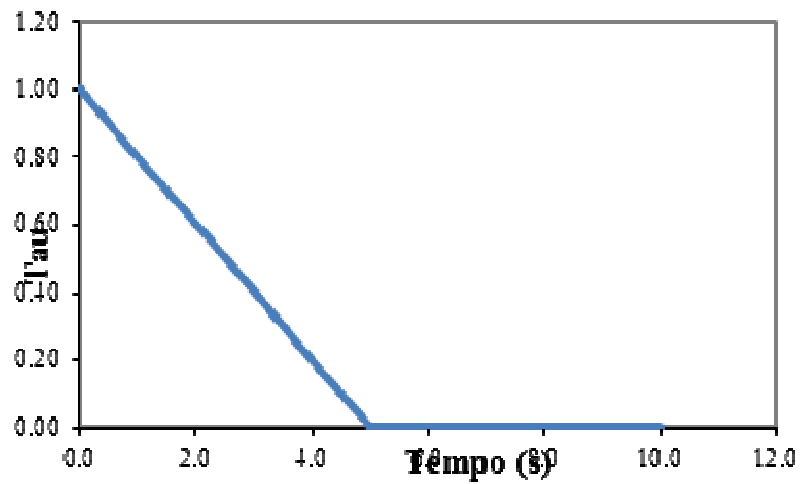
As cargas hidráulicas transientes sintéticas são frutos de um evento transiente provocado pela manobra de uma válvula localizada em um dos nós da rede hidráulica. Duas manobras de válvula, uma suave e outra brusca, são utilizadas como forma de análise dos efeitos na calibração dos parâmetros. Estas cargas transientes são coletadas em apenas um nó (onde se encontra a válvula) e usadas em todo o processo de identificação dos parâmetros.

### 3.1.3. Manobras de Válvula

Com o objetivo de analisar o efeito da severidade do transiente na identificação dos parâmetros, foram selecionadas quatro manobras de válvula. Uma manobra de válvula é caracterizada pela relação entre o coeficiente de abertura (ou fechamento) relativo,  $\tau$ , em função do tempo  $t$ .

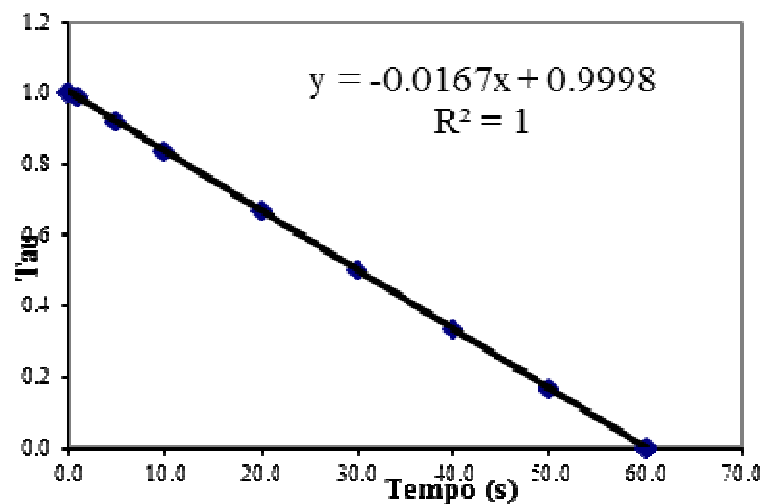
Na primeira manobra, a válvula de controle encontra-se inicialmente aberta ( $\tau = 1$ ), a válvula fecha-se linearmente até o tempo  $t=5,0s$  onde, a partir deste tempo, permanecendo fechada.

**Figura 13 - Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 1**



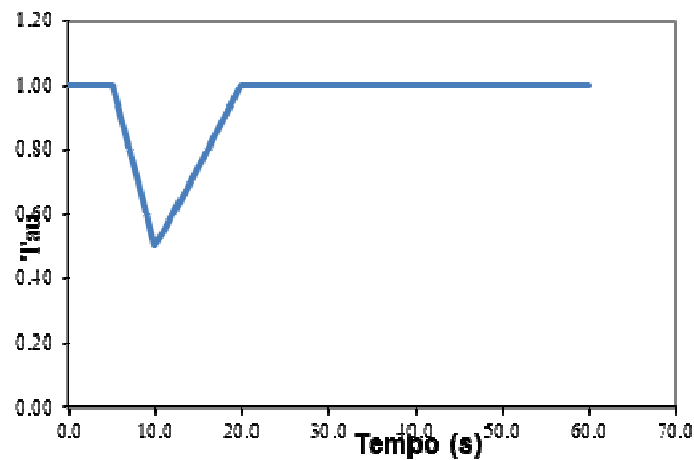
Na segunda manobra, a válvula encontra-se inicialmente aberta ( $\tau = 1$ ), a válvula fecha-se linearmente até o tempo  $t=60,0s$ . A figura 14 mostra esta manobra.

**Figura 14 - Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 2**



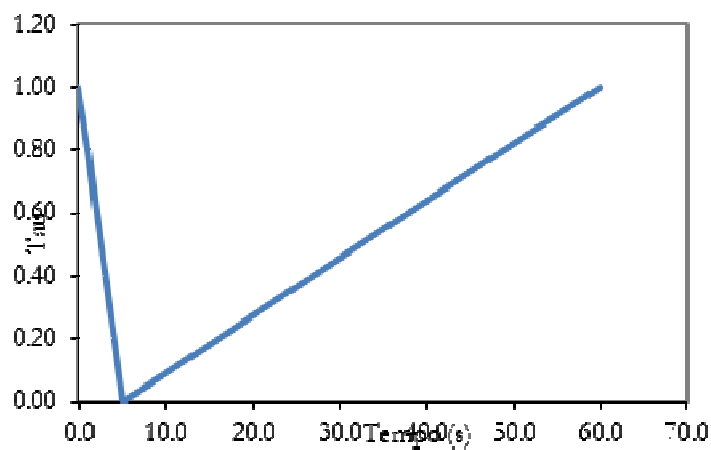
Na terceira manobra, a válvula encontra-se inicialmente aberta ( $\tau = 1$ ) permanece aberta até o tempo de  $t=2,0s$ , a válvula fecha-se linearmente até o tempo de  $t=10,0s$ . Depois disso, abre-se até a posição original no tempo  $t=20,0s$ . A figura 15 mostra esta manobra.

**Figura 15 - Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 3**



Na quarta manobra, a válvula encontra-se inicialmente aberta ( $\tau = 1$ ), a válvula fecha-se linearmente até o tempo  $t=5,0s$ . Depois disso, abre-se até a posição original no tempo  $t=60,0s$ . A figura 16 mostra esta manobra.

**Figura 16 - Lei de Fechamento da Válvula – Manobra 4**



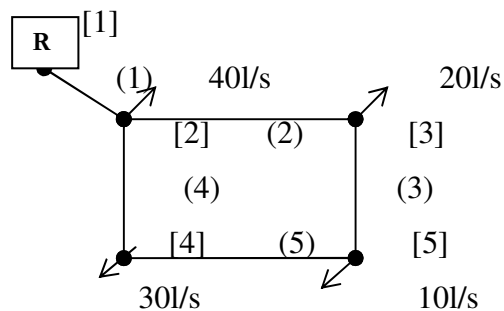
### 3.1.4. Estudo de Caso 1

Para fazermos as simulações, foram utilizados dois programas desenvolvidos por Araújo (2003), onde o primeiro calcula o transiente pelo Método das Características e o segundo gera resultados para a calibração do fator de atrito, através de algoritmo genético, trabalhando junto com o primeiro programa. Sendo assim, é possível para cada avaliação da função objetiva, o cálculo do transiente da rede e uma auto-correção das condições do estado

permanente.

A rede exemplo A, Figura 17, do exemplo criado por Araújo para aplicação de sua técnica. Nesses casos as calibrações foram realizadas considerando o estado permanente. Neste trabalho usaremos o método transiente inverso e o Algoritmo Genético para identificação não só do fator de atrito previamente determinado a partir de características físicas conhecidas e corretas, denominadas aqui por reais (ou observadas), mas também para a obtenção dos valores das forças de atritos após a calibração, aqui denominadas estimadas (ou calculadas). Os indicadores básicos de eficiência do procedimento da calibração serão o Erro Médio Relativo (EMR), o Erro Relativo (ER) e a Função Objetiva (F.O.), entre fatores de atritos reais e estimadas. A rede contém 05 tubos, 1 reservatório, 4 nós de demandas conforme Figura 17. O reservatório terá cota da linha piezométrica de 65 m, os nós estarão na mesma cota topográfica (elevação igual a zero). As demandas (litro por segundo) dos nós, será de acordo com a Figura 17.

**Figura 17: Rede A**



Legenda:

( ) nº do tubo

[ ] nº do nó

Todas as variáveis do problema, tais como: topografia, diâmetro (D), comprimento (L) e fator de atrito das tubulações, demandas nodais e nível do reservatório que abastece o sistema da rede de abastecimento de água estudada, serão conhecidas. As características físicas da rede estão apresentadas na Tabela 2, a seguir:

**Tabela 2 - Características físicas dos tubos.**

Tubo	L (m)	D (m)	Esp (mm)	Poison	E (GPa)	K (GPa)	Dens (kg/m <sup>3</sup> )	a (m/s)
1	300.0	0.40	10	0.25	120	2.19	999	1156.6
2	305.0	0.10	10	0.25	120	2.19	999	1374.9
3	215.0	0.30	10	0.25	120	2.19	999	1217.4
4	215.0	0.10	10	0.25	120	2.19	999	1374.9
5	215.0	0.25	10	0.25	120	2.19	999	1251.7

Os valores apresentados na Tabela 2 para  $a$  (celeridade) nos tubos, não atendem a exigência de que o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$  seja usado para todos os condutos a fim de que as condições de contorno para junções possam ser usadas. Para evitar interpolações no cálculo de  $\Delta t$ , a seguinte equação (Chaudhry, 1987) deve ser adotada:

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (1 \text{ até } N)$$

onde  $n$  é um número inteiro e igual ao número de trechos no qual o  $i$ -ésimo conduto é dividido;  $L_i$  é o comprimento do  $i$ -ésimo conduto;  $a$  é a celeridade do  $i$ -ésimo conduto e  $N$  é o número de tubos no sistema. Como a celeridade não é conhecida de forma precisa, aceita-se ajustes menores nos seus valores. Para os casos da Tabela 2, foram ajustados para  $a$

As condições iniciais do modelo permanente, vazão das tubulações e cargas dos nós, equivalentes aos fatores de atrito considerados reais ou observados foram determinadas através do modelo computacional que calcula o transiente pelo método das características. Para a rede estudada, foram encontrados os seguintes dados:

**Tabela 3 – Vazões iniciais para condições permanentes consideradas reais.**

Tubo	$Q_{\text{inicial}}(\text{L/s})$
1	100.000
2	27.383
3	7.383
4	32.617
5	2.617

**Tabela 4 – Cargas hidráulicas iniciais para condições permanentes consideradas reais.**

Nó	HO(m)
1	65.00
2	64.52
3	26.68
4	26.68
5	26.68

De posse destes dados, um modelo hidráulico que usa o método das características foi utilizado para calcular as cargas transientes para o(s) nó(s) monitorado(s). Inicialmente foi considerada uma variação brusca, variações estas nas demandas do(s) nó(s) monitorado(s) duraram 10 s, com intervalo de tempo (DT) de 0.1 segundos. Estes resultados serão considerados reais ou observados, e utilizados pela função objetiva para calcular a eficiência de cada solução gerada, comparando com as respectivas cargas hidráulicas transientes, a partir de alterações dos parâmetros do algoritmo genético conforme relacionadas abaixo.

Primeiramente foi considerado variações no número de gerações (NG), número de cromossomos (NC) – Tabela 5, totalizando 4 casos. Para esta primeira análise será considerado um tempo de 10s do transiente, sendo o nó monitorado (NM) o nó 5 .

**Tabela 5 – Parâmetros do Algoritmo Genético.**

Representação dos Parâmetros	Binária
Número de Cromossomos, NC	10 e 20
Número de Gerações, NG	20 e 40
Tipo de Cruzamento	De um ponto
Tipo de Mutação	Simplex
Taxa de Elitismo, Pe	0% e 50%
Taxa de Sucessão	50%
Probabilidade de Cruzamento, Pc	100%
Probabilidade de Mutação, Pm	0,5%

Será considerado o conjunto de parâmetros que apresentar o menor valor da função objetiva (F.O.).

Para esta análise, foram consideradas:

- Representação binária;
- Um percentual de cruzamento de 100%, onde a recombinação dos cromossomos ocorre de dois a dois, pelo método de cruzamento de um ponto.
- A mutação adotada será a simples, única adequada a representação binária.
- Elitismo de 50% e sem Elitismo
- Para cada caso simulado, dez processamentos serão criadas, ou seja, dez populações serão criadas pelo programa, gerando no final dez soluções. A solução para o fator de atrito dos tubos de cada caso será a o menor valor da função objetiva.

### 3.1.4.1 RESULTADOS

Os resultados das simulações previstas dos procedimentos metodológicos serão apresentados no formato de tabelas e gráficos, sendo brevemente comentados ao longo deste trabalho. A seguir as Tabelas 6 mostra os resultados de F.O. dos casos simulados para cada manobra:

**Tabela 6 - Valores dos fatores de atritos para F.O.**

Tubo	freal	Manobra 1		Manobra 2		Manobra 3		Manobra 4	
		c/elit	s/elit	c/elit	s/elit	c/elit	s/elit	c/elit	s/elit
<b>1</b>	<b>0.0200</b>	0.03900	0.01100	0.06000	0.01600	0.06000	0.01600	0.06000	0.01600
<b>2</b>	<b>0.0200</b>	0.01700	0.01700	0.03600	0.01900	0.03600	0.01900	0.03600	0.01900
<b>3</b>	<b>0.0200</b>	0.04000	0.02500	0.02500	0.03700	0.02500	0.03700	0.02500	0.03700
<b>4</b>	<b>0.0200</b>	0.02300	0.02400	0.01300	0.02100	0.01300	0.02100	0.01300	0.02100
<b>5</b>	<b>0.0200</b>	0.02600	0.04700	0.02400	0.04300	0.02400	0.04300	0.02400	0.04300
<b>F.O.</b>	-	33.8255	33.585	19.509	3.8264	9.6573	<b>0.52604</b>	20.6276	3.5793

A Tabela 7 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 1 com elitismo, com funções objetivas da simulação:

**Tabela 7 - Resultados dos fatores de atrito por processamento simulado (Caso04).**

Tubo	Processamentos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.01600	0.01100	0.01000	0.04400	0.02200	0.02600	0.03900	0.01900	0.02700	0.04400
2	0.01700	0.01900	0.02000	0.01200	0.01800	0.02500	0.01700	0.05700	0.02000	0.02800
3	0.03700	0.02300	0.03900	0.03400	0.01500	0.06100	0.04000	0.02500	0.04600	0.02800
4	0.03400	0.02600	0.01400	0.03300	0.05000	0.01700	0.02300	0.01000	0.02100	0.02600
5	0.01300	0.04600	0.01400	0.01600	0.01100	0.02400	0.02600	0.03000	0.04000	0.05000
FO	539.184	303.912	551.819	140.337	1277.55	34.1092	<b>33.826</b>	293.803	78.7253	988.514

A seguir a Tabela 8, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 1 com elitismo.

**Tabela 8 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.0200	0.0258	0.0058	29.0	71.0
2	0.0200	0.0233	0.0033	16.5	83.5
3	0.0200	0.0348	0.0148	74.0	26.0
4	0.0200	0.0254	0.0054	27.0	73.0
5	0.0200	0.0270	0.0070	35.0	65.0
			EMR (%)	<b>36.3</b>	-
			IMA (%)	-	63.7

A Tabela 9 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 1 sem elitismo, com funções objetivas da simulação:

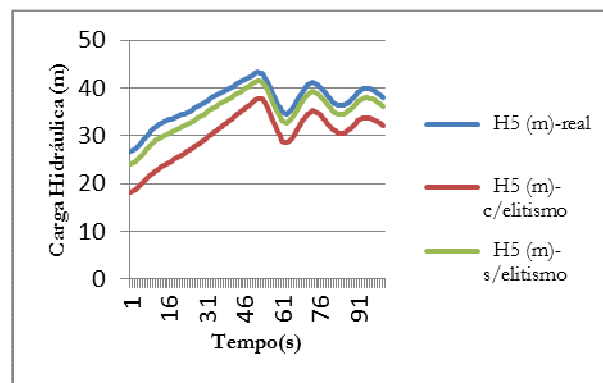
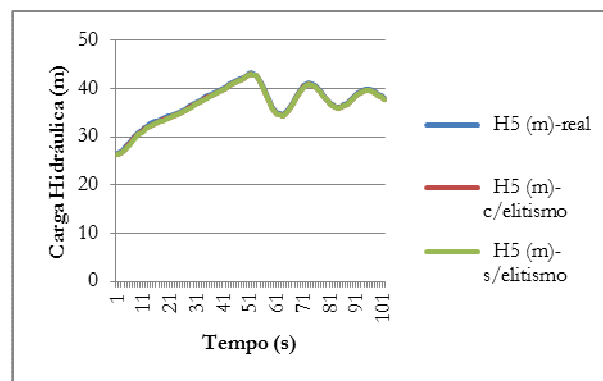
**Tabela 9 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).**

Tubo	Sementes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.03400	0.05600	0.03200	0.01600	0.01100	0.02000	0.01300	0.06200	0.02100	0.01600
2	0.01700	0.01900	0.03000	0.01700	0.01700	0.02500	0.02200	0.03200	0.02000	0.03500
3	0.03000	0.01500	0.02300	0.03800	0.02500	0.04000	0.01600	0.03900	0.02500	0.03900
4	0.02300	0.02000	0.01500	0.02400	0.02400	0.01700	0.01900	0.01400	0.02000	0.01400
5	0.04600	0.02800	0.02300	0.01400	0.04700	0.01900	0.06200	0.04900	0.04400	0.03300
FO	36.2083	41.8501	34.9726	39.5371	<b>33.586</b>	37.0852	33.6314	35.2792	41.45	34.7935

A seguir a Tabela 10, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 1 com elitismo.

**Tabela 10 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 01).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.0200	0.0332	0.0132	66.0	34.0
2	0.0200	0.0275	0.0075	37.5	62.5
3	0.0200	0.0261	0.0061	30.5	69.5
4	0.0200	0.0175	0.0025	12.5	87.5
5	0.0200	0.0252	0.0052	26.0	74.0
			EMR (%)	<b>34.5</b>	-
			IMA (%)	-	65.5

**Figura 18 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 1****Figura 19 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para F.O. – Manobra 1**

A Tabela 11 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 2 com elitismo, com funções objetivas, EMR(%) da simulação:

**Tabela 11 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).**

Tubo	Processamentos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.01600	0.01100	0.01000	0.04400	0.02200	0.06000	0.03900	0.01900	0.02700	0.04400
2	0.01700	0.01900	0.02000	0.01200	0.01800	0.03600	0.01700	0.05700	0.01200	0.02800
3	0.03700	0.02300	0.03900	0.03400	0.01500	0.02500	0.03600	0.02500	0.04600	0.02800
4	0.03400	0.02600	0.01400	0.03300	0.05000	0.01300	0.02300	0.01000	0.03400	0.02600
5	0.01300	0.04600	0.01400	0.01500	0.01100	0.02400	0.02600	0.03000	0.04000	0.05000
FO	3411.23	1958.12	3384.3	238.623	7784.2	<b>19.509</b>	159.64	1364.98	236.822	6047.59

A seguir a Tabela 12, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 2 com elitismo.

**Tabela 12 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.02000	0.02920	0.00920	46.0	54.0
2	0.02000	0.02360	0.00360	18.0	82.0
3	0.02000	0.03080	0.01080	54.0	46.0
4	0.02000	0.02630	0.00630	31.5	68.5
5	0.02000	0.02690	0.00690	34.5	65.5
			EMR (%)	<b>36.8</b>	-
			IMA (%)	-	63.2

A Tabela 13 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 2 sem elitismo, com funções objetivas, EMR(%) da simulação:

**Tabela 13 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 03).**

Tubo	Sementes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.04100	0.02600	0.04700	0.03600	0.01700	0.03700	0.02400	0.01600	0.02400	0.03900
2	0.01600	0.03000	0.01800	0.02900	0.03400	0.03300	0.01700	0.01900	0.03900	0.02900
3	0.04000	0.03100	0.03400	0.02200	0.05600	0.06300	0.02900	0.03700	0.04900	0.03500
4	0.02400	0.01500	0.02100	0.01500	0.01400	0.01400	0.02300	0.02100	0.01300	0.01500
5	0.06900	0.06700	0.03900	0.03600	0.01500	0.04300	0.01300	0.04300	0.03300	0.04000
FO	30.7441	66.9309	74.9528	38.7804	29.7363	33.6055	20.278	<b>3.8265</b>	17.9071	6.42666

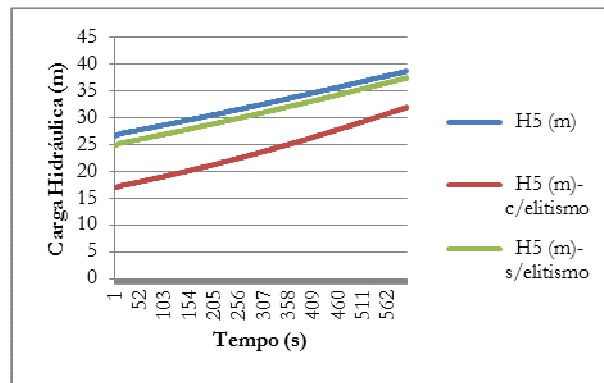
A seguir a Tabela 14, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 2 sem elitismo.

**Tabela 14 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.0200	0.0280	0.0080	40.0	60.0
2	0.0200	0.0298	0.0098	49.0	51.0
3	0.0200	0.0220	0.0020	10.0	90.0
4	0.0200	0.0161	0.0039	19.5	80.5
5	0.0200	0.0278	0.0078	39.0	61.0
			EMR (%)	<b>31.5</b>	-
			IMA (%)	-	68.5

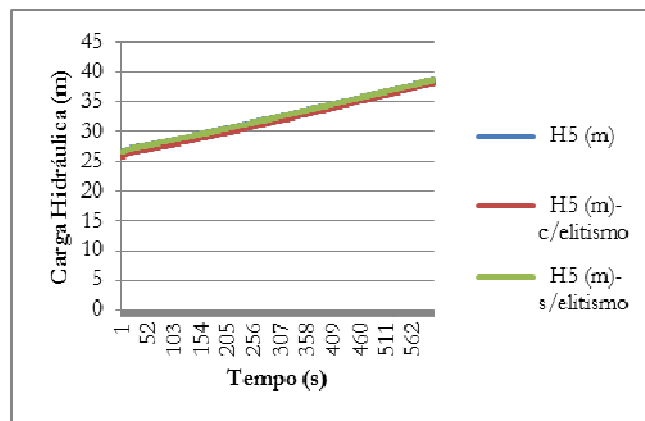
**Figura 20 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR**

**Manobra 2**

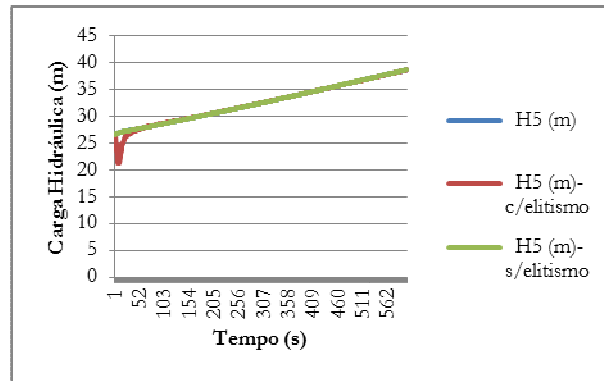


**Figura 21 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para ER**

**Manobra 2**



**Figura 22 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para F.O. – Manobra 2**



A Tabela 15 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 3 com elitismo, com funções objetivas, EMR(%) da simulação:

**Tabela 15 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).**

Tubo	Processamentos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.01600	0.01100	0.01000	0.04400	0.02200	0.06000	0.03900	0.01900	0.02700	0.04400
2	0.01700	0.01900	0.02000	0.01200	0.01800	0.03600	0.01700	0.05700	0.01200	0.02800
3	0.03700	0.02300	0.03900	0.03400	0.01500	0.02500	0.03600	0.02500	0.04600	0.02800
4	0.03400	0.02600	0.01400	0.03300	0.05000	0.01300	0.02300	0.01000	0.03400	0.02600
5	0.01300	0.04600	0.01400	0.01500	0.01100	0.02400	0.02600	0.03000	0.04000	0.05000
FO	1148.52	664.12	1166.88	142.368	2572.18	<b>9.6573</b>	51.9245	495.64	141.634	2001.78

A seguir a Tabela 16, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 3 com elitismo.

**Tabela 16 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.02000	0.02920	0.00920	46.0	54.0
2	0.02000	0.02360	0.00360	18.0	82.0
3	0.02000	0.03080	0.01080	54.0	46.0
4	0.02000	0.02630	0.00630	31.5	68.5
5	0.02000	0.02690	0.00690	34.5	65.5
			EMR (%)	<b>36.8</b>	-
			IMA (%)	-	63.2

A Tabela 17 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 3 sem elitismo, com funções objetivas, EMR(%) da simulação:

**Tabela 17 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 03).**

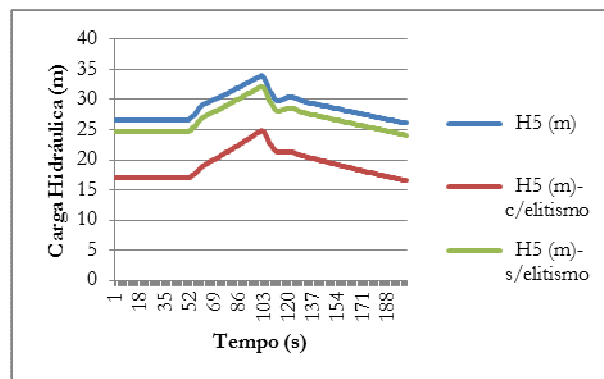
Tubo	Sementes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.02200	0.02600	0.04700	0.03600	0.01700	0.03700	0.02400	0.01600	0.01600	0.03900
2	0.01700	0.03000	0.01800	0.02900	0.03400	0.03300	0.01700	0.01900	0.01800	0.02900
3	0.06700	0.03100	0.03400	0.02200	0.05600	0.06300	0.02900	0.03700	0.02400	0.03500
4	0.02300	0.01500	0.02100	0.01500	0.01400	0.01400	0.02300	0.02100	0.02200	0.01500
5	0.01300	0.06700	0.03900	0.03600	0.01500	0.04300	0.01300	0.04300	0.07000	0.04000
FO	12.9719	24.1343	29.8136	14.7389	8.14351	10.9064	6.94216	<b>0.526</b>	8.10909	2.67254

A seguir a Tabela 18, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 3 sem elitismo.

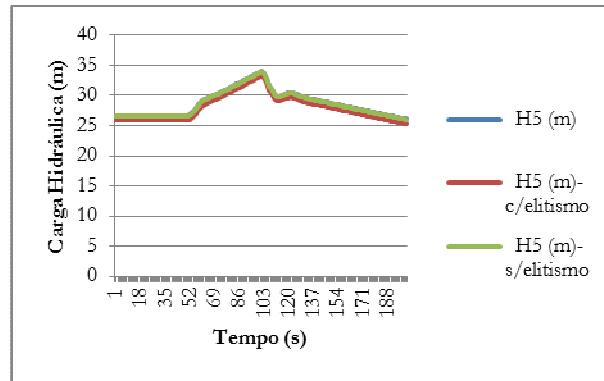
**Tabela 18 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.0200	0.0245	0.0045	22.5	77.5
2	0.0200	0.0304	0.0104	52.0	48.0
3	0.0200	0.0230	0.0030	15.0	85.0
4	0.0200	0.0161	0.0039	19.5	80.5
5	0.0200	0.0264	0.0064	32.0	68.0
			EMR (%)	28.2	-
			IMA (%)	-	71.8

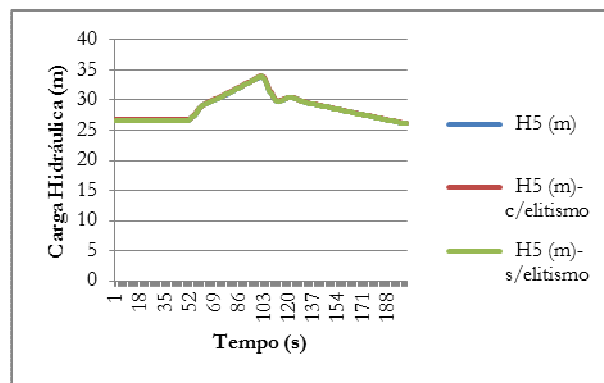
**Figura 23 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 3**



**Figura 24 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR por processamento – Manobra 3**



**Figura 25 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para F.O. – Manobra 3**



A Tabela 19 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 4 com elitismo, com funções objetivas, EMR(%) da simulação:

**Tabela 19 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 04).**

Tubo	Processamentos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.01600	0.01100	0.01000	0.04400	0.02200	0.06000	0.03900	0.01900	0.02700	0.04400
2	0.01700	0.01900	0.02000	0.01200	0.01800	0.03600	0.01700	0.05700	0.01200	0.02800
3	0.03700	0.02300	0.03900	0.03400	0.01500	0.02500	0.03600	0.02500	0.04600	0.02800
4	0.03400	0.02600	0.01400	0.03300	0.05000	0.01300	0.02300	0.01000	0.03400	0.02600
5	0.01300	0.04600	0.01400	0.01500	0.01100	0.02400	0.02600	0.03000	0.04000	0.05000
FO	3387.89	1944.05	3358.12	232.659	7718.23	<b>20.628</b>	160.383	1340.55	227.114	5997.6
EMR (%)	45.0	45.0	<b>41.0</b>	64.0	48.0	72.0	47.0	63.0	75.0	76.0

A seguir a Tabela 20, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 4 com elitismo.

**Tabela 20 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.02000	0.02920	0.00920	46.0	54.0
2	0.02000	0.02360	0.00360	18.0	82.0
3	0.02000	0.03080	0.01080	54.0	46.0
4	0.02000	0.02630	0.00630	31.5	68.5
5	0.02000	0.02690	0.00690	34.5	65.5
			EMR (%)	<b>36.8</b>	-
			IMA (%)	-	63.2

A Tabela 21 mostra a melhor combinação de fatores de atrito encontrados para cada processamento gerada na manobra 4 sem elitismo, com funções objetivas, EMR(%) da simulação:

**Tabela 21 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 03).**

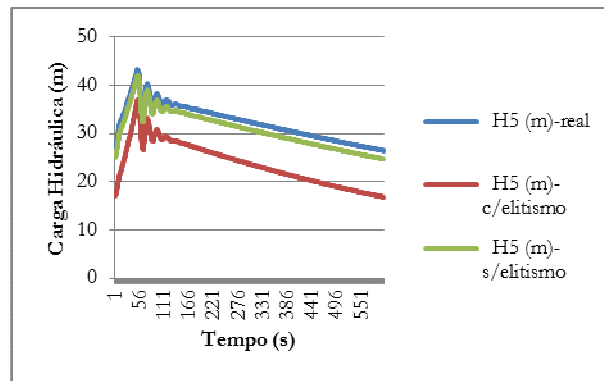
Tubo	Sementes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.04100	0.02600	0.04700	0.03600	0.01700	0.03700	0.02400	0.01600	0.01600	0.03900
2	0.01600	0.03000	0.01800	0.02900	0.03400	0.03300	0.01700	0.01900	0.01800	0.02900
3	0.04000	0.03100	0.03400	0.02200	0.05600	0.06300	0.02900	0.03700	0.02400	0.03500
4	0.02400	0.01500	0.02100	0.01500	0.01400	0.01400	0.02300	0.02100	0.02200	0.01500
5	0.06900	0.06700	0.03900	0.03600	0.01500	0.04300	0.01300	0.04300	0.07000	0.04000
FO	35.6255	68.3346	73.3767	36.6156	25.5112	38.0184	18.2267	<b>3.5793</b>	26.8801	6.88961

A seguir a Tabela 22, que apresenta os fatores de atritos reais e ao estimados (ou calculados), determinados a partir da média dos fatores de atrito de cada processamento para respectiva tubulação na manobra 4 sem elitismo.

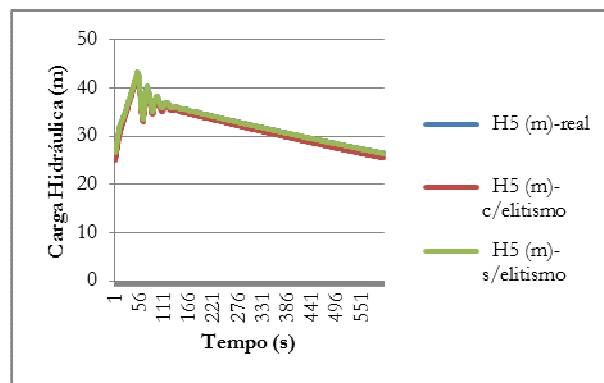
**Tabela 22 - Resultados do fator de atrito médio estimado (Caso 02).**

Tubo	freal	festimado	EA	ER (%)	IA (%)
1	0.0200	0.0276	0.0076	38.0	62.0
2	0.0200	0.0298	0.0098	49.0	51.0
3	0.0200	0.0220	0.0020	10.0	90.0
4	0.0200	0.0161	0.0039	19.5	80.5
5	0.0200	0.0254	0.0054	27.0	73.0
			EMR (%)	<b>28.7</b>	-
			IMA (%)	-	71.3

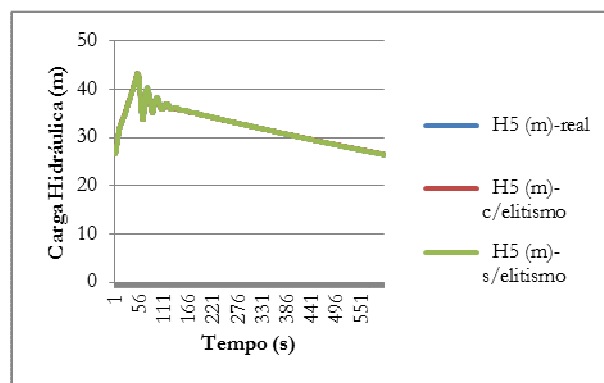
**Figura 26 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 4**



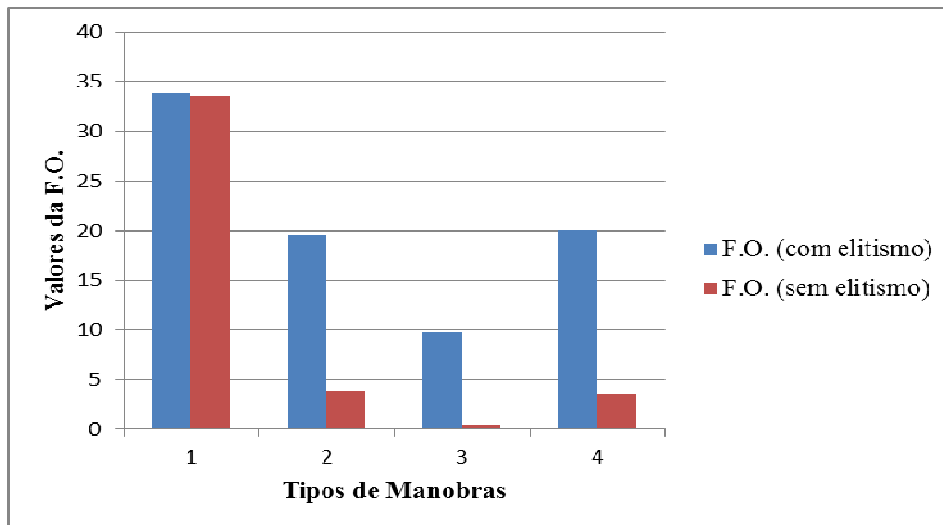
**Figura 27 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR por processamento – Manobra 4**



**Figura 28 - Carga Hidráulica observadas e estimadas para EMR – Manobra 4**



**Figura 29 – Resultados da F.O para todas as Manobras**

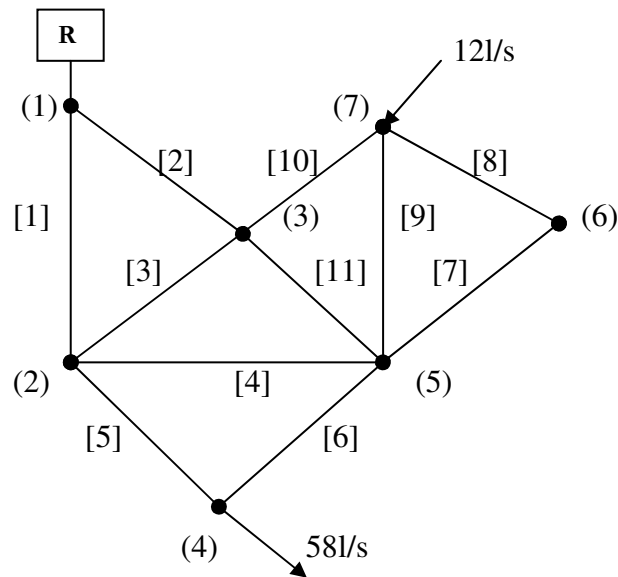


A Função Objetivo (F.O.) apresentou para na manobra 3 uma melhor solução em seus valores, levando a uma boa calibração entre a quatro manobras, ou seja, os resultados foram conclusivos.

### 3.1.4. Estudo de Caso 2

A rede exemplo B, Figura 30, do exemplo criado por Araújo para aplicação de sua técnica. Nesses casos as calibrações foram realizadas considerando o estado permanente. Neste trabalho usaremos o método transiente inverso e o Algoritmo Genético para identificação não só do fator de atrito previamente determinado a partir de características físicas conhecidas e corretas, denominadas aqui por reais (ou observadas), mas também para a obtenção dos valores das forças de atritos após a calibração, aqui denominadas estimadas (ou calculadas). Os indicadores básicos de eficiência do procedimento da calibração serão o Erro Médio Relativo (EMR), o Erro Relativo (EMR) por processamento e a Função Objetiva (F.O.), entre fatores de atritos reais e estimadas. A rede contém 11 tubos, 1 reservatório, 7 nós de demandas conforme Figura 30. O reservatório terá cota da linha piezométrica de 30 m, os nós estarão na mesma cota topográfica (elevação igual a zero). As demandas (litro por segundo) dos nós serão de acordo com a Figura 30.

Figura 30 - Rede B



Legenda:

( ) nº do tubo

[ ] nº do nó

Todas as variáveis do problema, tais como: topografia, diâmetro (D), comprimento (L) e fator de atrito das tubulações, demandas nodais e nível do reservatório que abastece o sistema da rede de abastecimento de água estudada, serão conhecidas. As características físicas da rede estão apresentadas na Tabela 23, a seguir:

**Tabela 23 - Características físicas dos tubos.**

Tubo	L (m)	D (m)	esp(mm)	Poison	E(GPa)	K (GPa)	dens(kg/m <sup>3</sup> )	a (m/s)
1	305.0	0.250	10	0.25	120	2.19	999	1251.7
2	215.0	0.250	10	0.25	120	2.19	999	1251.7
3	215.0	0.200	10	0.25	120	2.19	999	1289.0
4	305.0	0.200	10	0.25	120	2.19	999	1289.0
5	215.0	0.250	10	0.25	120	2.19	999	1251.7
6	215.0	0.250	10	0.25	120	2.19	999	1251.7
7	215.0	0.200	10	0.25	120	2.19	999	1289.0
8	215.0	0.150	10	0.25	120	2.19	999	1329.9
9	305.0	0.250	10	0.25	120	2.19	999	1251.7
10	215.0	0.150	10	0.25	120	2.19	999	1329.9
11	215.0	0.250	10	0.25	120	2.19	999	1251.7

Os valores apresentados na Tabela 23 para  $a$  (celeridade) nos tubos, não atendem a exigência de que o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$  seja usado para todos os condutos a fim de que as condições de contorno para junções possam ser usadas. Para evitar interpolações no cálculo de  $\Delta t$ , a seguinte equação (Chaudhry, 1987) deve ser adotada:

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (1 \text{ até } N)$$

onde  $n$  é um número inteiro e igual ao número de trechos no qual o  $i$ -ésimo conduto é dividido;  $L_i$  é o comprimento do  $i$ -ésimo conduto;  $a$  é a celeridade do  $i$ -ésimo conduto e  $N$  é o número de tubos no sistema. Como a celeridade não é conhecida de forma precisa, aceita-se ajustes menores nos seus valores. Para os casos da Tabela 23, foram ajustados para  $a$

As condições iniciais do modelo permanente, vazão das tubulações e cargas dos nós, equivalentes as fator de atritos consideradas reais ou observadas foram determinadas através do modelo computacional que calcula o transiente pelo método das características. Para a rede estudada, foram encontrados os seguintes dados:

**Tabela 24 – Vazões iniciais para condições permanentes consideradas reais.**

<b>Tubo</b>	<b>Q<sub>inicial</sub>(L/s)</b>
1	22.669
2	23.331
3	7.778
4	1.377
5	29.071
6	28.929
7	3.142
8	3.142
9	10.524
10	1.667
11	13.887

**Tabela 25 – Cargas hidráulicas iniciais para condições permanentes consideradas reais.**

<b>Nó</b>	<b>HO(m)</b>
1	30.00
2	29.73
3	29.80
4	29.43
5	29.73
6	29.74
7	29.79

De posse destes dados, um modelo hidráulico que usa o método das características foi utilizado para calcular as cargas transientes para o(s) nó(s) monitorado(s). Inicialmente foi considerada uma variação brusca, variações estas nas demandas do(s) nó(s) monitorado(s) duraram 10 s, com intervalo de tempo (DT) de 0.1 segundos. Estes resultados serão considerados reais ou observados, e utilizados pela função objetiva para calcular a eficiência de cada solução gerada, comparando com as respectivas cargas hidráulicas transientes, a partir de alterações dos parâmetros do algoritmo genético conforme relacionadas abaixo.

Primeiramente foi considerado variações no número de gerações (NG), número de cromossomos (NC) – Tabela 13, totalizando 4 casos. Para esta primeira análise será considerado um tempo de 10s do transiente, sendo os nó monitorados (NM) o nó 4 e nó 7 .

**Tabela 26 – Parâmetros do Algoritmo Genético.**

Representação dos Parâmetros	Binária
Número de Cromossomos, NC	10 e 20
Número de Gerações, NG	20 e 40
Tipo de Cruzamento	De um ponto
Tipo de Mutação	Simplex
Taxa de Elitismo, Pe	0% e 50%
Taxa de Sucessão	50%
Probabilidade de Cruzamento, Pc	100%
Probabilidade de Mutação, Pm	0,5%

Será considerado o conjunto de parâmetros que apresentar o menor valor da função objetiva (F.O.).

Para esta análise, foram consideradas:

- Representação binária;
- Um percentual de cruzamento de 100%, onde a recombinação dos cromossomos ocorre de dois a dois, pelo método de cruzamento de um ponto.
- A mutação adotada será a simples, única adequada a representação binária.
- Elitismo de 50% e sem Elitismo
- Para cada caso simulado, dez processamentos serão criadas, ou seja, dez populações

serão criadas pelo programa, gerando no final dez soluções. A solução para o fator de atrito dos tubos de cada caso será a média dos valores encontrados para cada processamento, o erro médio e a função objetiva.

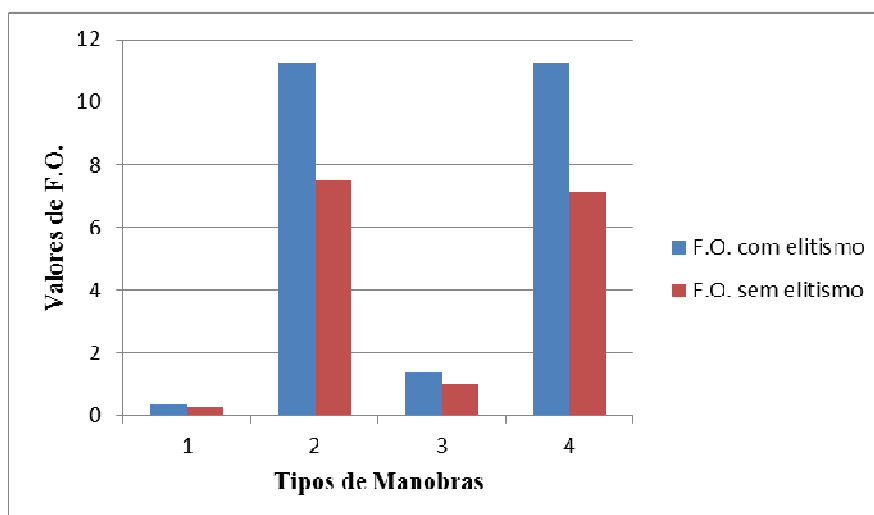
### 3.1.5.1 RESULTADOS

Os resultados das simulações previstas dos procedimentos metodológicos serão apresentados no formato de tabelas e gráficos, sendo brevemente comentados ao longo deste trabalho. A seguir as Tabelas 27 a 28 mostram os resultados (EMR), EMR por processamento e F.O. dos casos simulados para cada manobra:

**Tabela 27 - Valores dos fatores de atritos para F.O. (1 Nó Monitorado)**

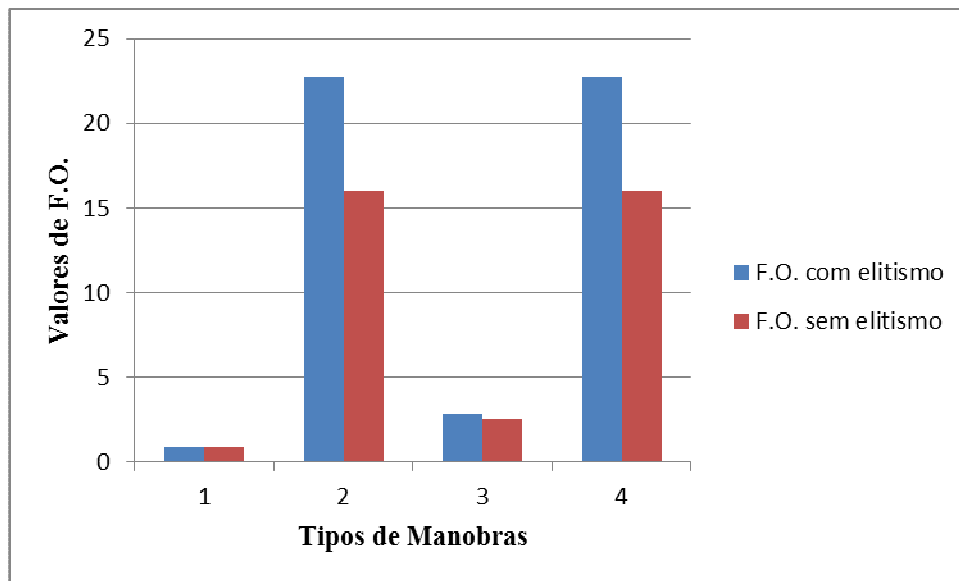
Tubo	freal	Manobra 1		Manobra 2		Manobra 3		Manobra 4	
		c/elitismo	s/elitismo	c/elitismo	s/elitismo	c/elitismo	s/elitismo	c/elitismo	s/elitismo
1	0.020	0.018	0.019	0.018	0.019	0.025	0.011	0.019	0.011
2	0.020	0.021	0.014	0.021	0.014	0.013	0.012	0.016	0.012
3	0.020	0.018	0.046	0.018	0.046	0.027	0.009	0.02	0.009
4	0.020	0.03	0.027	0.03	0.027	0.014	0.05	0.016	0.05
5	0.020	0.017	0.019	0.017	0.019	0.028	0.024	0.041	0.024
6	0.020	0.023	0.022	0.023	0.022	0.016	0.031	0.046	0.031
7	0.020	0.022	0.03	0.022	0.03	0.018	0.015	0.037	0.015
8	0.020	0.039	0.062	0.039	0.062	0.043	0.021	0.021	0.021
9	0.020	0.025	0.01	0.025	0.01	0.015	0.011	0.015	0.011
10	0.020	0.01	0.039	0.01	0.039	0.033	0.044	0.025	0.044
11	0.020	0.024	0.043	0.024	0.043	0.025	0.045	0.034	0.045
<b>F.O.</b>		<b>0.342856</b>	<b>0.27749</b>	<b>0.864681</b>	<b>0.86802</b>	<b>11.22676</b>	<b>7.1497</b>	<b>22.7622</b>	<b>16.00031</b>

**Figura 31 – Resultados da F.O para todas as Manobras - (1 nó monitorado)**



**Tabela 20 - Valores dos fatores de atritos para F.O. (2 Nós Monitorado)**

Tubo	freal	Manobra 1		Manobra 2		Manobra 3		Manobra 4	
		c/elitismo	s/elitismo	c/elitismo	s/elitismo	c/elitismo	s/elitismo	c/elitismo	s/elitismo
<b>1</b>	0.020	0.018	0.013	0.018	0.02	0.025	0.011	0.019	0.011
<b>2</b>	0.020	0.021	0.022	0.021	0.011	0.013	0.012	0.016	0.012
<b>3</b>	0.020	0.018	0.009	0.018	0.035	0.027	0.009	0.02	0.009
<b>4</b>	0.020	0.03	0.026	0.03	0.01	0.014	0.05	0.016	0.05
<b>5</b>	0.020	0.017	0.026	0.017	0.028	0.028	0.024	0.041	0.024
<b>6</b>	0.020	0.023	0.021	0.023	0.017	0.016	0.031	0.046	0.031
<b>7</b>	0.020	0.022	0.049	0.022	0.063	0.018	0.015	0.037	0.015
<b>8</b>	0.020	0.039	0.035	0.039	0.032	0.043	0.021	0.021	0.021
<b>9</b>	0.020	0.025	0.017	0.025	0.012	0.015	0.011	0.015	0.011
<b>10</b>	0.020	0.01	0.023	0.01	0.032	0.033	0.044	0.025	0.044
<b>11</b>	0.020	0.024	0.014	0.024	0.049	0.025	0.045	0.034	0.045
<b>F.O.</b>		<b>1.376596</b>	<b>0.99574</b>	<b>2.879232</b>	<b>2.59493</b>	<b>11.22676</b>	<b>7.1497</b>	<b>22.7622</b>	<b>16.00031</b>

**Figura 33 – Resultados da F.O para todas as Manobras – (2 nós monitorados)**

As tabelas de 14 a 21 mostram os fatores de atrito reais e estimados pela calibração via MTI-AG referente às quatro manobras de válvulas adotadas para os casos selecionados. Os valores apresentam para os valores da F.O. houve uma variação de 22,76 nas manobras 2 e 4 para 0,86 na manobra 1.

#### 4. CONCLUSÃO

No problema exposto, o objetivo era identificar os fatores de atritos das tubulações a partir das cargas calculadas para várias soluções geradas pelo algoritmo genético, onde dois programas trabalharam conjuntamente. Um calcula o transiente e o outro aplica o algoritmo genético para calcular as soluções aproximadas. Na busca de resultados ótimos, parâmetros do algoritmo genético foram alterados. A eficiência de cada solução encontrada foi medida por meio da Função Objetiva (F.O.) que consiste no menor valor, para determinada solução encontrada.

Inicialmente foi considerada a geração de dez processamentos, ou seja, para cada procedimento adotado, dez populações foram criadas de forma aleatória, seguindo os mesmos parâmetros estabelecidos para a simulação, onde a solução do caso para os fatores de atritos estimados (ou calculados), foi a média dos melhores resultados de cada processamento.

A primeira fase do trabalho consistiu em identificar quais combinações de parâmetros iriam apresentar os melhores resultados para esta rede. Em vista disto, foi considerada uma variação brusca de demanda de dez segundos no nó monitorado, que foi o nó 5 da rede A e os nós 4 e 7 da rede B. Com os fatores de atritos reais calcularam-se as cargas transitórias reais, onde o tempo de transiente monitorado foi de dez segundos. De posse destes dados, o programa identificador de fator de atrito via algoritmo genético, calcula a função objetiva de cada solução criada, onde no final das gerações mostra aquela com menor valor.

Para a primeira fase optou-se por variações no número de cromossomos, no número de gerações e na taxa de mutação. O que se observou é que não basta simplesmente aumentar os valores para estes parâmetros, pois isso não assegura que um melhor resultado será encontrado. Uma série de combinações (casos) foi feita, objetivando identificar o melhor resultado.

Ao analisar os gráficos de comparação das cargas transientes nos nós observados (ou reais) e calculados (ou estimados), percebe-se que os valores das cargas estão bem próximos em vários casos, mesmo estes casos apresentando resultados diferentes. Este fato nos faz crer, que para as cargas transientes observadas nos nós para a situação real, o método através do algoritmo genético encontra uma combinação de resultados para os fatores de atritos dos tubos, que apesar de diferentes do real, geram uma variação de cargas bem

próximas das observadas (ou reais). Este fenômeno se deve ao método inverso indireto adotado.

Considerando que as respostas obtidas de forma geral são boas para a rede em estudo considerando a fase do trabalho. Entretanto, como aprendizado algumas sugestões deverão ser seguidas ao trata-se de redes reais de grande porte.

Desta forma, o presente trabalho serviu com base para as pesquisas previstas enfocando as redes de distribuição de água reais.

Podemos concluir que para uma melhor calibração através de um método transiente inverso, é necessário o monitoramento de todos os nós, evidentemente este fato aumenta a dificuldade da análise de redes maiores. Pelo fato de as cargas hidráulicas calculadas apresentarem valores bem próximos das cargas hidráulicas reais, isto não nos garante que os valores encontrados para o fator de atrito são os correspondentes as fatores de atritos reais (ou observadas). O tempo utilizado para as simulações, também é outro fator complicador do método, confirmando a tendência de lentidão do AG.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA A. B., KOELLE E. - **Fluid transients in pipe networks**. Elsevier Appl. Science, Mech. Publ., 1993. 564p.
- ARAÚJO, J. K. - **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicada à escoamento transiente**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H.- **Incertezas na calibração de redes de distribuição de água com dados transientes**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, 2001.
- BOULOS, P. F., WOOD, D. J. - Explicit calculation of pipe-network parameters. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.
- BHAVE, P. R. - Calibrating water distribution network models. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, v. 114, n. 1, p. 120-136, 1988.
- CARRERA, J., NEUMAN, S. P. - Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. maximum likelihood method incorporating prior information. Water Resources Research, v. 22, n. 2, p. 199-210, 1986a.
- CAMARGO, L. A. - O golpe de aríete em condutos. Análise pelo método das características. Encontro de engenheiros de assintencia técnica. Joinville , 1991.
- CESARIO, A. L.; DAVIS, J. O.- Calibrating Water System Models. Journal of american water works association, 1984.
- CHAUDHRY, M. H. - **Applied hydraulic transients**. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- GALVÃO, C. O. et al. – **Sistemas inteligentes – aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. ABRH, 1999.
- GAMBALE, S. R. – **Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água**. São Paulo. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- GEN, M., CHENG, R. – **Genetic algorithms and engineering design**. John Wiley & Sons, INC, 1997.
- GOLDBERG, D. E. – **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**, 412 pp., Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.
- CHEUNG, P. B.; SOUZA, R. S. - Influencia do zoneamento de uma rede hidráulica na acurácia de um modelo de calibração. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa , 2001.
- DAVIS, L. - Handbook of genetic algorithm. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991

- EGGENER , C. L. ; POLKOWSKI, L. B. - Network models and the impact of modeling assumptions. Journal of AWMA, 1976.
- FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBIOLO, A. Calibration of roughness in water distribution networks. In :MILLER, D.S. (ed.):2<sup>nd</sup> International Conference on Water Pipeline System, BHR Group Conference Series. Edinburgh, Scotland, 1994.
- GAMBALE, S. R. - Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água. São Paulo. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- GARCIA-SERRA, J. - Estudio y mejora de las técnicas de calibración de modelos de redes hidráulicas . Tese de doutorado. Universidade Politécnica de Valencia, 1988.
- HOLLAND, J. H. – **Adaptation in natural and artificial systems**. MIT Press, 1975.
- KARNEY, B. W., MCINNIS, D. - Transient analysis of water distribution systems. **Journal of the American Water Works Association**, v. 82, n. 7, p. 62-70, 1990.
- LIGGETT, J. A., CHEN, L-C. - Inverse transient analysis in pipe networks. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 120, n. 8, p. 934-955, 1994.
- LINDEN, R., Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional. Rio de Janeiro, Brasport, 2006. 348 pp.
- MICHALEWICZ, Z. - Genetic algorithms + data structures = evolution programs, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.
- MITCHELL, M. - Introduction to genetic algorithms. Cambridge: Mit, 1996.
- MOTA, H.J.S. - Dimensionamento econômico de redes de distribuição de água aplicando algoritmo genético. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2007.
- NEUMAN, S. - Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. Water Resources Research, v. 9, n. 4, p. 1006-1021,1973.
- ORMSBEE, L. E. - Implicit network calibration. Journal of the Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.
- PORTO, R. M. – **Hidráulica básica**. EESC-São Carlos-SP. 1998. 540p.
- PUDAR, R. S., LIGGETT, J. A - Leaks in pipe networks. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 118, n. 7, p. 1031-1046, 1992.
- RIGHETTO, A. M. - **Cálculo hidráulico de rede de distribuição de água a partir de condições transitórias: adequação e estudo de casos**. São Carlos. Tese de Livre Docência - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

- SAVIC, D. A., WALTERS, G. A. – Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.
- SHAMIR, U., HOWARD, C. D. D. - Engineering analysis of water-distribution systems. *Journal American Water Works Association*, v. 69, nº 9, p. 510-514, 1977.
- SIMPSON, A., VÍTKOVSKY, J., LAMBERT, M. – Transients for calibration of pipe roughnesses using genetic algorithms. **8<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems**. BHR Groups. Publications n. 39, p. 587-597, 2000.
- SHARP, W. W.; WALSKI, T. M. - Predicting internal roughness in water mains . *Journal of AWMA* , 1988.
- SILVA, A.C.A. - Calibração automática de fator de atrito de tubulações em sistema de distribuição de água com algoritmos genéticos. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2006
- SUN, N. Z. - Inverse problems in groundwater modeling. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- SWAMEE, P. K. - Design of a submarine pipeline. *J. Transp Eng., ASCE*, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.
- WALSKI, T. M. - Technique for calibrating network models. *Journal of the Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.
- WALSKI, T. M. - Case study: pipe network model calibration issues. *Journal of the Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 112, n. 2, p. 238-249, 1986.
- WYLIE, E. B., STREETER, V. L. - **Fluid transients**. New York, McGraw-Hill, 1978, 384p.