



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**ENGENHARIA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**

**DANIEL PEREIRA ARAÚJO DE BRITO CARDOSO**

**INFLUÊNCIA DE MANOBRAS DE VÁLVULAS NA IDENTIFICAÇÃO DA  
RUGOSIDADE DE TUBULAÇÕES EM REDES HIDRÁULICAS COM DADOS  
TRANSIENTES**

**FORTALEZA**

**2021**

DANIEL PEREIRA ARAÚJO DE BRITO CARDOSO

INFLUÊNCIA DE MANOBRAS DE VÁLVULAS NA IDENTIFICAÇÃO DA  
RUGOSIDADE DE TUBULAÇÕES EM REDES HIDRÁULICAS COM DADOS  
TRANSIENTES

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C261i Cardoso, Daniel Pereira Araújo de Brito.  
Influência de manobras de válvulas na identificação da rugosidade de tubulações em redes hidráulicas com dados transientes / Daniel Pereira Araújo de Brito Cardoso. – 2021.  
67 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.
1. Rugosidade. 2. Manobras de válvulas. 3. Transiente hidráulico. 4. Método transiente inverso. 5. Algoritmo genético. I. Título.

CDD 620

---

DANIEL PEREIRA ARAÚJO DE BRITO CARDOSO

INFLUÊNCIA DE MANOBRAS DE VÁLVULAS NA IDENTIFICAÇÃO DA  
RUGOSIDADE DE TUBULAÇÕES EM REDES HIDRÁULICAS COM DADOS  
TRANSIENTES

Monografia apresentada ao curso de Engenharia  
Civil do Centro de Tecnologia da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 29/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Marisete Dantas de Aquino  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Ma. Paula Nobre de Andrade  
Centro Universitário Christus

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me permitir concluir este importante ciclo da minha vida. Além disso, agradeço por Ele ter me dado forças, saúde, paciência e sabedoria para lidar com os inúmeros desafios encontrados por mim durante a minha graduação.

Agradeço também aos meus pais, Benedito e Nelma, por terem me dado todo o amor, conselhos, motivação e críticas não apenas durante a minha graduação, mas também durante toda a minha vida, fato que me permitiu chegar até aqui. Amo vocês mais que tudo nesse mundo.

Agradeço ao meu irmão, Davi, que me acompanhou nessa árdua jornada e que sempre esteve presente por mim.

Agradeço a toda a minha família, em especial aos meus avôs e avós, que torcem e intercedem por mim e que tanto querem o meu bem. Espero poder ajudar todos vocês com meus conhecimentos. Contem comigo para tudo.

Agradeço à minha namorada, Raquel, que nesse momento tão importante de minha vida, trouxe uma leveza e me ajudou a superar todos os desafios. Sem seu apoio, eu não teria conseguido alcançar os meus objetivos.

Agradeço ao meu ilustríssimo orientador, Prof. Dr. John Kenedy de Araújo, que me acolheu de braços abertos. Obrigado, professor, por ter me ensinado tanto e por ter se mostrado um ser humano incrível e digno de admiração imensa! Agradeço também à ilustríssima banca avaliadora, que, com sua presença e notável conhecimento, valorizaram o meu esforço e contribuíram para com o crescimento do meio científico.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará (UFC), a minha segunda casa, que por 5 anos me acolheu e foi fonte de tanto conhecimento, não só sobre engenharia civil, mas também sobre a vida. Obrigado também a todos os professores que marcaram a minha jornada e a todos aqueles que honram a história dessa renomada instituição. Além do mais, devem ser reconhecidos todos os demais funcionários que trabalham arduamente para o funcionamento da UFC.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que fiz nessa fase da minha vida. Obrigado a cada um de vocês por alegrarem os meus 5 anos de estadia na Engenharia Civil. Sem vocês, eu não chegaria até aqui, e nada disso teria feito sentido. Nunca esquecerei vocês.

## RESUMO

Diante do aumento da complexidade das redes hidráulicas presentes nos grandes centros urbanos, análises simplistas do fenômeno físico que ocorre dentro das tubulações podem gerar diversos problemas. O primeiro deles é o subdimensionamento do sistema para possíveis aumentos ou diminuições das pressões dentro dos dutos provocados pelo transiente hidráulico. Outro ponto negligenciado é a qualidade da calibração dos parâmetros fundamentais da rede, tais como a rugosidade absoluta das tubulações, fato que pode levar a um rendimento abaixo do esperado do sistema. Nesse contexto, a fim de tornar a análise mais fidedigna, o processo como um todo se torna bem mais complexo, sendo necessárias novas abordagens para solucionar tais problemas de dimensionamento e calibração. Um deles é o Método Transiente Inverso aliado a um algoritmo genético (MTI-AG), o qual permite a resolução do problema inverso encontrado em redes hidráulicas cujos parâmetros são desconhecidos. Baseando-se em conceitos como transiente hidráulico, Método das Características, otimização e calibração, é possível contornar a complexidade imposta por um problema com tais características. Desse modo, o presente estudo busca entender melhor como se dá a influência das manobras de válvulas, as quais podem ser responsáveis pela ocorrência do transiente hidráulico, no processo de calibração do parâmetro rugosidade absoluta utilizando o MTI-AG. Nessa perspectiva, percebeu-se que, para as manobras e as redes analisadas, os resultados da calibração divergem a depender da velocidade de fechamento da válvula e do tamanho da rede. Contudo, não é possível, baseando-se nesse estudo, afirmar categoricamente qual manobra é a mais indicada para determinada situação. Tal fato se deve à necessidade de se realizar inúmeras outras simulações envolvendo diversos outros tipos de manobras de válvulas e de redes hidráulicas, a fim de se perceber e se estabelecer padrões de resultados.

**Palavras-chave:** calibração; otimização; manobras de válvulas; transiente hidráulico; Método Transiente Inverso; algoritmo genético; Método das Características.

## ABSTRACT

In view of the increasing complexity of the hydraulic networks present in large urban centers, simplistic analyzes of the physical phenomenon that occurs inside the pipes can generate several problems. The first one is the undersizing of the system for possible increases and decreases in pressures inside the ducts caused by the hydraulic transient. Another neglected point is the quality of the calibration of the fundamental parameters of the system, such as the pipes' absolute roughness, a fact that can lead to a lower performance of the system than expected. In this context, in order to make the analysis more reliable, the process as a whole becomes much more complex, requiring new approaches to solve sizing and calibration problems. One of them is the Inverse Transient Method combined with a genetic algorithm (ITM-GA), which allows the resolution of the inverse problem found in hydraulic networks whose parameters are unknown. Based on concepts such as hydraulic transient, Method of Characteristics, optimization and calibration, it is possible to bypass the complexity imposed by a problem with such characteristics. Thus, this study seeks to better understand how the valves maneuvers influence, which are many times responsible for the occurrence of the 'hydraulic transient, in the calibration process of the absolute roughness parameter using the ITM-GA. In this perspective, it was noticed that, for the maneuvers and the networks analyzed, the calibrations' results differ depending on the sealing speed of the valve and the size of the network. However, it is not possible, based on this study, to state categorically which maneuver is the most appropriated for a given situation, since others simulation involving several other types of valves maneuvers and hydraulic networks must be done, in order to perceive and stablish result patterns.

**Keywords:** calibration; Optimization; valves maneuvers; hydraulic transient; Inverse Transient Method; genetic algorithm; Method of Characteristics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de rede ramificada.....	17
Figura 2 - Esquema de rede malhada.....	18
Figura 3 – Esquema de rede mista.....	18
Figura 4 – Valores da rugosidade absoluta equivalente.....	19
Figura 5 - Rugosímetro portátil.....	20
Figura 6 – Fluxograma do método direto.....	21
Figura 7 - Fluxograma do método indireto.....	22
Figura 8 - Definição da malha de discretização do Método das Características.....	27
Figura 9 - Esquema de uma seção interna “s” de uma tubulação “i”.....	29
Figura 10 - Reservatório de nível constante “P” a montante da tubulação “i”.....	30
Figura 11 - Reservatório de nível constante “P” a jusante da tubulação “i”.....	30
Figura 12 - Ilustração de um nó de consumo ligada a duas tubulações.....	31
Figura 13 - Ilustração de uma válvula a jusante de uma tubulação “i”.....	32
Figura 14 - Ilustração de uma manobra de válvula.....	34
Figura 15: Algoritmo genético típico.....	35
Figura 16 - Fluxograma de um algoritmo genético típico.....	43
Figura 17 - Interface do subprograma R1.....	46
Figura 18 - Interface do subprograma R2.....	46
Figura 19 - Interface do subprograma R3.....	47
Figura 20 - Manobra de válvula 1 (brusca).....	48
Figura 21 - Manobra de válvula 2 (lenta).....	48
Figura 22 - Rede Hidráulica 1.....	51
Figura 23 - Rede Hidráulica 2.....	52
Figura 24 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 2).....	54
Figura 25 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 2).....	55
Figura 26 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 3).....	56
Figura 27 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 3).....	56
Figura 28 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 4).....	57
Figura 29 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 4).....	58



Figura 30 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 5). .....	59
Figura 31 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 5). .....	59
Figura 32: Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH2 / NÓ 4). .....	60
Figura 33: EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH2 / NÓ 4). .....	61

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do Algoritmo Genético para a rede 1.....	49
Tabela 2 - Parâmetros do Algoritmo Genético para a rede 2.....	49
Tabela 3 - Características Físicas dos tubos da Rede Hidráulica 1.....	51
Tabela 4 - Condições iniciais permanentes nos tubos da Rede Hidráulica 1.....	51
Tabela 5 - Características Físicas dos tubos da Rede Hidráulica 2.....	53
Tabela 6 - Condições iniciais permanentes nos tubos da Rede Hidráulica 2.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EMR	Erro Médio Relativo
FORTTRAN	FORmula TRANSlation
FO	Função Objetivo
m.c.a.	Metro de Coluna d'Água
MTI-AG	Método Transiente Inverso – Algoritmo Genético
RH1	Rede Hidráulica 1
RH2	Rede Hidráulica 2

## LISTA DE SÍMBOLOS

[L]	Unidade de comprimento
[M]	Unidade de massa
[T]	Unidade de tempo
$\Delta t$	Intervalo de tempo [T]
$\Delta x$	Intervalo de espaço [L]
$a$	Celeridade [ $L.T^{-1}$ ]
$a^*$	Celeridade Fictícia [ $L.T^{-1}$ ]
$H$	Carga Hidráulica [L]
$Q$	Vazão [ $L^3.T^{-1}$ ]
$A$	Área [ $L^2$ ]
$D$	Diâmetro [L]
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta [L]
$f$	Fator de Atrito (adimensional)
$g$	Aceleração da gravidade [ $L.T^{-2}$ ]
$\psi$	Parâmetro que depende das propriedades elásticas da tubulação (adimensional)
$E$	Módulo de Elasticidade de Young [ $M.L^{-1}.T^{-2}$ ]
$K$	Módulo de Elasticidade volumétrica do fluido [ $M.L^{-1}.T^{-2}$ ]
$\rho$	Massa Específica [ $M.L^{-3}$ ]
$e'$	Espessura das paredes das tubulações [L]
$\nu'$	Razão de Poisson (adimensional)
$\lambda$	Operador utilizado no Método das Características
$C^+$	Linha de característica positiva
$C^-$	Linha de característica negativa
%	Taxa percentual
$C_d$	Coefficiente de descarga (adimensional)
$A_v$	Área do orifício [ $L^2$ ]
$H_{0i,N}$	Carga a montante da válvula [L]
$\tau$	Coefficiente de abertura ou fechamento relativo da válvula
$p_1$	Cromossomo pai 1
$p_2$	Cromossomo pai 2
$f_1$	Cromossomo filho 1
$f_2$	Cromossomo filho 2

NB	Número de <i>bits</i>
$p_c$	Probabilidade de cruzamento
$p_m$	Probabilidade de mutação
TS	Duração do transiente hidráulico [T]
$H_{i,m}$	Carga hidráulica medida no tempo “i” [L]
$H_{i,c}$	Carga hidráulica calculada no tempo “i” [L]
NC	Número da população
NG	Número de gerações
NV	Número de variáveis

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1 Contextualização</b> .....	13
<b>1.2 Problemática de pesquisa</b> .....	14
<b>1.3 Justificativa</b> .....	15
<b>1.4 Objetivos</b> .....	16
<i>1.4.1 Objetivo Geral</i> .....	16
<i>1.4.2 Objetivos Específicos</i> .....	16
<b>1.5 Organização da Monografia</b> .....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>2.1 Redes Hidráulicas</b> .....	17
<b>2.2 A rugosidade absoluta equivalente</b> .....	18
<b>2.3 Calibração em sistemas de distribuição de água</b> .....	20
<b>2.4 escoamento transiente em tubulações</b> .....	22
<i>2.4.1 Equações do transiente hidráulico</i> .....	23
<i>2.4.2 Cálculo da Celeridade</i> .....	24
<i>2.4.3 Método das Características</i> .....	25
<i>2.4.4 Condições de contorno</i> .....	28
<b>2.5 Algoritmo Genético</b> .....	34
<i>2.5.1 Introdução aos AGs</i> .....	34
<i>2.5.2 Seleção</i> .....	36
<i>2.5.3 Representação</i> .....	36
<i>2.5.3.1 Binária x Real</i> .....	37
<i>2.5.4 Crossover ou Cruzamento</i> .....	39
<i>2.5.4.1 Cruzamento de Um Ponto</i> .....	39
<i>2.5.4.2 Cruzamento Aritmético</i> .....	40
<i>2.5.5 Mutação</i> .....	40
<i>2.5.5.1 Mutação Simples</i> .....	41
<i>2.5.5.2 Mutação Uniforme</i> .....	41
<i>2.5.6 Função Objetivo</i> .....	41
<i>2.5.7 Fluxograma de um Algoritmo Genético</i> .....	43

<b>3. METODOLOGIA</b> .....	44
<b>3.1 Definição do Problema Inverso com dados transientes</b> .....	44
<b>3.2 Formulação do Problema Inverso</b> .....	44
<b>3.3 Método Transiente Inverso - Algoritmo Genético (MTI-AG)</b> .....	45
<b>3.4 Manobras de Válvulas</b> .....	47
<b>3.5 Parâmetros do Algoritmo Genético</b> .....	48
<b>3.6 Verificação da influência da manobra</b> .....	49
<b>3.7 Redes Hidráulicas</b> .....	50
<i>3.7.1 Rede Hidráulica 1</i> .....	50
<i>3.7.2 Rede Hidráulica 2</i> .....	52
<b>4. RESULTADOS</b> .....	54
<b>4.1 Rede Hidráulica 1</b> .....	54
<i>4.1.1 Válvula no nó 2</i> .....	54
<i>4.1.2 Válvula no nó 3</i> .....	56
<i>4.1.3 Válvula no nó 4</i> .....	57
<i>4.1.4 Válvula no nó 5</i> .....	59
<b>4.2 Rede Hidráulica 2</b> .....	60
<i>4.2.1 Válvula no nó 4</i> .....	60
<b>4.3 Discussão dos resultados</b> .....	62
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	63
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

Historicamente, o ser humano sempre buscou estabelecer-se próximo a fontes de água potável, uma vez que esse recurso natural é imprescindível para a sobrevivência, e pelo fato de não existir, entre os povos mais primitivos, o conhecimento necessário para conduzi-la de forma eficaz e segura para regiões distantes desses corpos de água.

Com o passar dos séculos, tal dependência se tornou cada vez menor, e os conhecimentos difundidos em grandes sociedades da antiguidade, como na romana com os seus aquedutos, foram sendo cada vez mais lapidados. Nesse contexto, a ocupação de novas regiões tornou-se viável do ponto de vista da disponibilidade de água, mas, por outro lado, a dependência das novas civilizações por uma rede de distribuição robusta e confiável aumentou de tal modo que, atualmente, as novas redes hidráulicas se tornaram bastante complexas, visando a atender o máximo possível de usuários.

Nesse contexto, de acordo com Porto (2006), define-se rede de distribuição de água como “o conjunto de tubulações, acessórios, reservatórios, bombas etc., que tem a finalidade de atender, dentro de condições sanitárias, de vazão e de pressão convenientes, a cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade ou setor de abastecimento.” Portanto, a água que circula nesse sistema e que abastece a população está sendo submetida a uma pressão diferente da atmosférica, devendo possuir carga de pressão dinâmica de pelo menos 10 metros de coluna de água (m.c.a.) no ponto mais desfavorecido da rede de acordo com a NBR 12218:2017 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no intuito de garantir o abastecimento do ponto de consumo. Além disso, a água não deve possuir uma carga de pressão estática máxima de 50 m.c.a. em qualquer ponto, de acordo com a mesma norma, a fim de minimizar os riscos de vazamentos nas juntas das tubulações. Todavia, atender à primeira condição citada anteriormente tem sido uma tarefa bastante árdua em alguns centros urbanos, sendo comuns os problemas de abastecimento relacionados com a baixa carga de pressão que a água chega nas residências.

Desse modo, vale ressaltar que a perda de carga dentro de um sistema de abastecimento de água pode ocorrer de diversas formas, tendo como exemplos o atrito nas tubulações e acessórios que compõem a rede, os vazamentos ao longo do sistema, as ligações clandestinas etc. Nessa perspectiva, focando essencialmente a perda de carga causada pelo atrito nas tubulações, é razoável afirmar que tal diminuição provocada por esse fator é considerável,



uma vez que as redes de distribuição de água modernas possuem extensões quilométricas, e por esse motivo, é fundamental conhecer tal característica do sistema.

Por outro lado, devido à existência de acessórios nessas redes de abastecimento, estas estão suscetíveis a um evento chamado de transiente hidráulico. Esse fenômeno é caracterizado pela propagação de ondas de pressão dentro do sistema, as quais alteram as características do escoamento em função do tempo e do espaço, podendo até mesmo provocar o colapso de parte da rede devido ao aumento ou à diminuição da pressão dentro rede hidráulica. Nesse contexto, as causas mais comuns desse fenômeno são: manobras em válvulas, planejadas ou acidentais; parada ou retomada de bombas; variação nas demandas; alteração do nível de um reservatório. Sendo assim, nesse estudo, o foco será dado a manobras em válvulas.

Portanto, sabendo que a rugosidade da tubulação tem uma influência direta na perda de carga existente dentro de um sistema de distribuição de água e que, por esse motivo, está intimamente relacionada ao provimento das condições mínimas de abastecimento, e levando em consideração o transiente hidráulico, estudar-se-á a influência de manobras de válvulas na identificação da rugosidade de tubulações em redes hidráulicas com dados transientes, a fim de buscar um maior entendimento a respeito da viabilidade de se identificar esse parâmetro utilizando métodos inversos indiretos. Vale ressaltar que Araújo (2003) elaborou um estudo de caso no qual foi possível determinar a rugosidade absoluta das tubulações, utilizando-se dados transientes provocados por manobras de válvulas. Entretanto, não foi abordado a fundo a influência dessas manobras na identificação dessa característica, sendo o objetivo do presente estudo colaborar nesse sentido.

## **1.2 Problemática de pesquisa**

Ao tentar modelar uma rede hidráulica, geralmente são utilizadas simplificações que facilitam a análise dos engenheiros responsáveis por criar um modelo que tente representar os fenômenos hidráulicos que ocorrem nas tubulações das redes de distribuição de água. Uma delas é considerar que o escoamento dentro dessas tubulações se dá de forma permanente. Isso por si só simplifica bastante o trabalho de análise dos profissionais envolvidos. Contudo, tal fato provocou, durante muitas décadas, acidentes nessas tubulações (como implosões e rompimentos), uma vez que aspectos cruciais (o aumento e a diminuição da pressão existente dentro das tubulações) eram desconsiderados no momento do dimensionamento das redes hidráulicas, realidade que começou a mudar a partir do entendimento do transiente hidráulico.

Sendo assim, ao considerar o transiente hidráulico, ou seja, o regime de escoamento

não permanente em redes hidráulicas, pode-se afirmar que o modelo adotado gerará dados mais condizentes com a realidade, mas, por outro lado, tornará os processos de análise dos parâmetros que regem o sistema e os de dimensionamento da rede muito mais complexos.

Portanto, diante dessa problemática, e baseando-se em estudos, como o de Araújo (2003), que demonstram a viabilidade da identificação da rugosidade de tubulações utilizando-se, para isso, dados transientes adquiridos a partir de manobras de válvulas, foi motivado o estudo de como essas operações influenciam nessa identificação.

### **1.3 Justificativa**

Levando em conta as considerações feitas até o presente momento, o conteúdo a ser estudado é de fundamental importância, uma vez que ele contribui para um processo de análise de redes hidráulicas mais condizente com a realidade. O efeito transiente, quando não levado em consideração, pode levar a acidentes catastróficos nos sistemas de abastecimento de água, bem como a um serviço de qualidade reduzida. De fato, de acordo com Patrício (2007), o aumento de pressão, que pode ser gerado por esse fenômeno, pode ocasionar o surgimento de diversos pontos de vazamentos. Tais perdas, de acordo com Brasil (2004), podem representar um desperdício de aproximadamente 50% da quantidade de água disponível. Desse modo, o custo de operação do sistema, bem como o custo de manutenção deste, passam a ser bastante elevados.

Contudo, a partir do momento em que se opta por modelar a rede levando em conta um escoamento não permanente, a análise torna-se mais complexa, exigindo ainda mais recursos por parte da equipe técnica responsável pelo sistema. Porém, à medida que o conhecimento nessa área avança, são encontradas formas mais otimizadas de lidar com os empecilhos inerentes desse tipo de escoamento.

Portanto, visando fomentar o conhecimento já existente a respeito das redes hidráulicas suscetíveis a transientes hidráulicos, o estudo foi elaborado buscando contribuir com o meio acadêmico e com a sociedade no que tange ao tema proposto.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo Geral***

Determinar a influência das manobras de válvulas na identificação da rugosidade das tubulações de redes hidráulicas, nas quais é levado em consideração o fenômeno transiente hidráulico.

### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- a) Calcular as cargas permanentes das redes hidráulicas a partir de dados físicos observados dos sistemas, utilizando-se do Método das Características;
- b) Calcular as cargas transientes oriundas das manobras de válvulas propostas para cada uma das redes analisadas, utilizando-se do Método das Características;
- c) Usar o Método do Transiente Inverso associado ao Algoritmo Genético, para estimar as cargas transientes, chegando ao valor estimado das rugosidades das tubulações para cada rede proposta;
- d) Comparar os valores das rugosidades calculadas e as observadas, levando em consideração a manobra de válvula que originou as cargas transientes.
- e) Determinar que combinação apresentou uma melhor aproximação das rugosidades calculadas e observadas.

## **1.5 Organização da Monografia**

A pesquisa foi dividida em 6 capítulos, sendo o primeiro dedicado a introduzir o tema, bem como explicitar a problemática envolvida, a justificativa por trás do trabalho e os objetivos almejados.

O capítulo 2 é referente à revisão bibliográfica, na qual tópicos fundamentais para o entendimento do assunto tratado nessa pesquisa são trazidos.

O capítulo 3 engloba a metodologia empregada para se alcançar o objetivo geral desse estudo.

O capítulo 4 refere-se aos resultados obtidos a partir do emprego do processo metodológico.

O capítulo 5 apresenta a conclusão da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

E por fim, são mostradas as referências utilizadas na elaboração do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

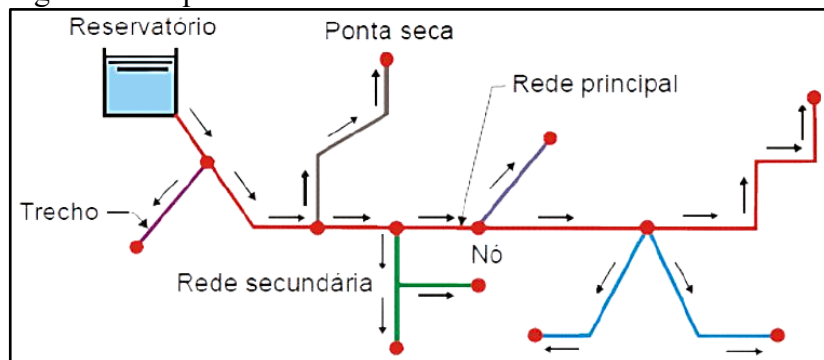
### 2.1 Redes Hidráulicas

Segundo Porto (2006), entende-se como sistema de distribuição de água “o conjunto de tubulações, acessórios, reservatórios, bombas etc., que tem a finalidade de atender, dentro de condições sanitárias, de vazão e pressão convenientes, a cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade ou setor de abastecimento”.

Ainda de acordo com tal autor, o desenho do sistema a ser adotado, então, passa a depender da topografia e do porte da cidade ou da região a ser abastecida, o qual é constituído por condutos que são classificados como principais (troncos) ou secundários. Aqueles possuem um maior diâmetro e são responsáveis por abastecer os condutos secundários. Já estes possuem a função de abastecer diretamente os pontos de consumo do sistema. Portanto, dependendo das disposições dos condutos principais e do sentido de escoamentos existente nas secundárias, as redes hidráulicas podem assumir os seguintes tipos:

- **Rede Ramificada:**

Figura 1 - Esquema de rede ramificada.



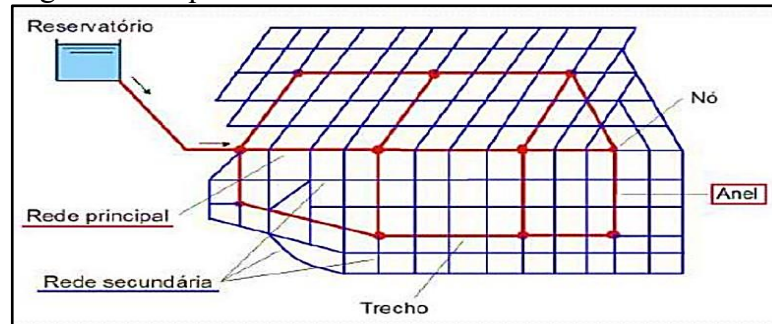
Fonte: Alem Sobrinho, P.; Contrera, R. C. (2013).

Quando o abastecimento se faz a partir de uma tubulação principal, a qual é alimentada por um reservatório a montante ou sob pressão de um bombeamento, e a distribuição é feita diretamente para os condutores secundários, está caracterizado um esquema de rede ramificado, exemplificada na figura 1. Tal tipo é comumente utilizado em pequenas comunidades, sistemas de irrigação por aspersão etc.

A desvantagem desse tipo de sistema é que, devido ao padrão geométrico da rede, em caso de falha no conduto principal, toda a região à jusante do rompimento ficará sem abastecimento.

- **Rede Malhada:**

Figura 2 - Esquema de rede malhada.

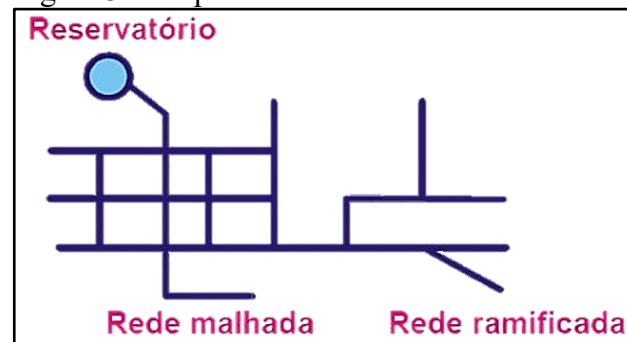


Fonte: Alem Sobrinho, P.; Contrera, R. C. (2013).

Exemplificadas pela figura 2, as redes malhadas são compostas por diversos anéis ou malhas formadas por tubulações tronco, sendo possível a vazão mudar de direção em função da demanda dos pontos de consumo. Nesse contexto, qualquer local do sistema pode ser abastecido de diversas maneiras diferentes, sendo o tipo ideal para abastecer grandes cidades, uma vez que uma interrupção no sistema não acarretará falta de abastecimento necessariamente. Ademais, tal versatilidade permite uma otimização do sistema para satisfazer as demandas do sistema.

- **Rede Mista:**

Figura 3 – Esquema de rede mista.



Fonte: Alem Sobrinho, P.; Contrera, R. C. (2013).

Os sistemas mistos nada mais são do que uma solução que inclui na sua composição tanto regiões de rede ramificada como também áreas de rede malhada. Nesse contexto, a figura 3 ilustra que as características de ambos os tipos apresentados anteriormente estão presentes nesse modelo de rede de abastecimento de água.

## 2.2 A rugosidade absoluta equivalente

Um parâmetro de extrema importância para o dimensionamento das redes hidráulicas é a rugosidade absoluta equivalente das tubulações, uma vez que está relacionada com a perda de carga distribuída ao longo das tubulações, as quais possuem comprimentos

quilométricos.

Nesse contexto, em sistemas de abastecimento de água pressurizados, que é o modelo geralmente encontrado nas cidades modernas, a parede dos dutos possui imperfeições de fabricação, fazendo com que a pressão total diminua ao longo da rede devido à fricção entre a água e parte interna das tubulações, podendo provocar uma qualidade de pressão dinâmica abaixo da recomendada pela norma NBR 12218:2017.

Ademais, de acordo com Porto (2006), as rugosidades absolutas equivalentes dos diversos materiais utilizados na fabricação dessas tubulações são de difícil determinação devido ao processo industrial envolvido, a idade das tubulações etc. Embora exista na literatura valores tabelados para cada uma das matérias-primas usadas, tais medidas estão inseridas em amplas faixas de variação, sendo tal problema agravado ainda mais pelo fato de existirem fontes que divergem entre si, apresentando valores de rugosidade absoluta equivalente diferentes para o mesmo material.

Nesse contexto, o profissional responsável pelo dimensionamento e pela operação desses sistemas de abastecimento encontra-se numa situação delicada, podendo cometer o erro de projetar uma rede inadequada por não possuir parâmetros confiáveis à disposição. Sendo assim, a figura a seguir traz alguns valores desse fator adotados usualmente para diversos materiais:

Figura 4 – Valores da rugosidade absoluta equivalente.

Material	$\epsilon$ (mm) Rugosidade absoluta equivalente
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

Fonte: adaptado de Porto (2006).

Diante dessa certa inconsistência, há métodos que permitem determinar com mais assertividade os valores desse parâmetro. Um deles é a utilização de um aparelho denominado rugosímetro.

Figura 5 - Rugosímetro portátil.



Fonte: Soluções em Ferramentas.

Entretanto, o uso desse equipamento, ilustrado na figura 5, só é viável para o estudo em laboratório de seguimentos menores das tubulações. Nesse contexto, para a verificação da rugosidade absoluta equivalente em redes hidráulicas de abastecimento muito extensas a serem construídas ou já existentes, a utilização do rugosímetro se torna impraticável.

Por outro lado, a calibração é a tentativa de ajustar determinados parâmetros de um modelo para que os dados observados na situação real sejam estimados por ele da forma mais aproximada possível, sendo uma estratégia ideal para estimar a rugosidade absoluta equivalente em sistemas pressurizados de abastecimento.

### **2.3 Calibração em sistemas de distribuição de água**

Para a resolução de um problema de calibração, de acordo com Araújo (2003), existem duas formas de abordagem: a direta e a inversa. No problema direto, sabe-se diversos parâmetros da rede, como diâmetro, fatores de atrito, demanda etc., desejando-se calcular apenas as cargas hidráulicas nos nós da rede e a vazão em cada um dos tubos. Por outro lado, quando se trata do problema inverso, a ideia é observar em campo tais cargas hidráulicas e tais vazões, e, a partir delas, tentar descobrir os parâmetros da rede que agora são desconhecidos.

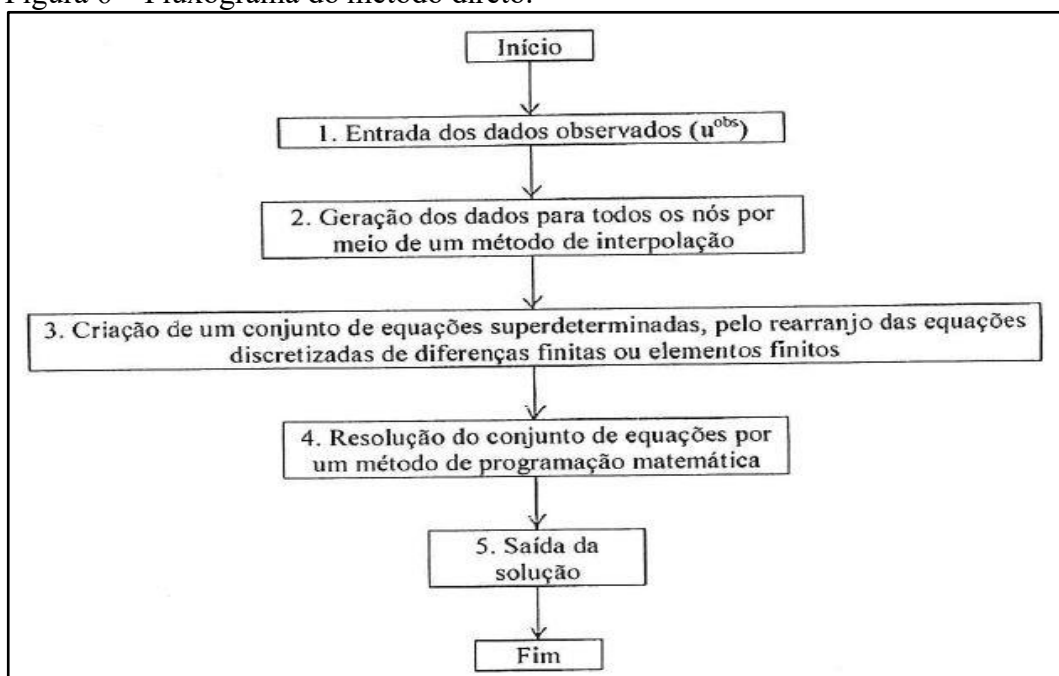
Dentro do campo de estudo do problema inverso, existem métodos de resolução diretos e indiretos. O primeiro tenta, a partir do equacionamento diferencial da situação física

encontrada nas tubulações e nos nós, resolver um sistema de equações que leva aos resultados desconhecidos, considerando os parâmetros das tubulações como variáveis, sendo este um processo matemático bastante complexo. Em contrapartida, o método indireto utiliza-se de processos iterativos nos quais são testados diversos valores para as variáveis, até que sejam encontrados os valores ótimos que reproduzem o cenário observado na rede hidráulica real. Nesse contexto, essa estratégia tem uma tendência a ser mais utilizada, uma vez que possui uma complexidade menor de formulação e evita que um possível erro humano seja cometido durante a fase de entrada de dados.

Sendo assim, vale ressaltar que um grande problema encontrado ao tentar se solucionar um problema pelo método indireto é o de haver uma “instabilidade” nos resultados calculados. Em outras palavras, uma vez que os dados de entrada podem variar de uma simulação para outra e que muitas vezes não se têm dados de campo em grande quantidade, a tendência é nunca se encontrar uma solução única para todas as simulações. Nesse contexto, para contornar tal impasse, adicionando confiabilidade na solução encontrada, uma função objetivo (FO) é adicionada, a qual tem a finalidade de testar se os valores encontrados são suficientemente satisfatórios ao testar a diferença entre o valor calculado e o real. Ademais, a FO afasta a possibilidade de erro humano na fase de decisão de parada do processo iterativo, uma vez que ela própria define tal interrupção de acordo com o critério adotado.

A seguir, nas figuras 5, e 6, são mostrados fluxogramas ilustrando, respectivamente, a aplicação do método direto e do método indireto utilizando uma FO:

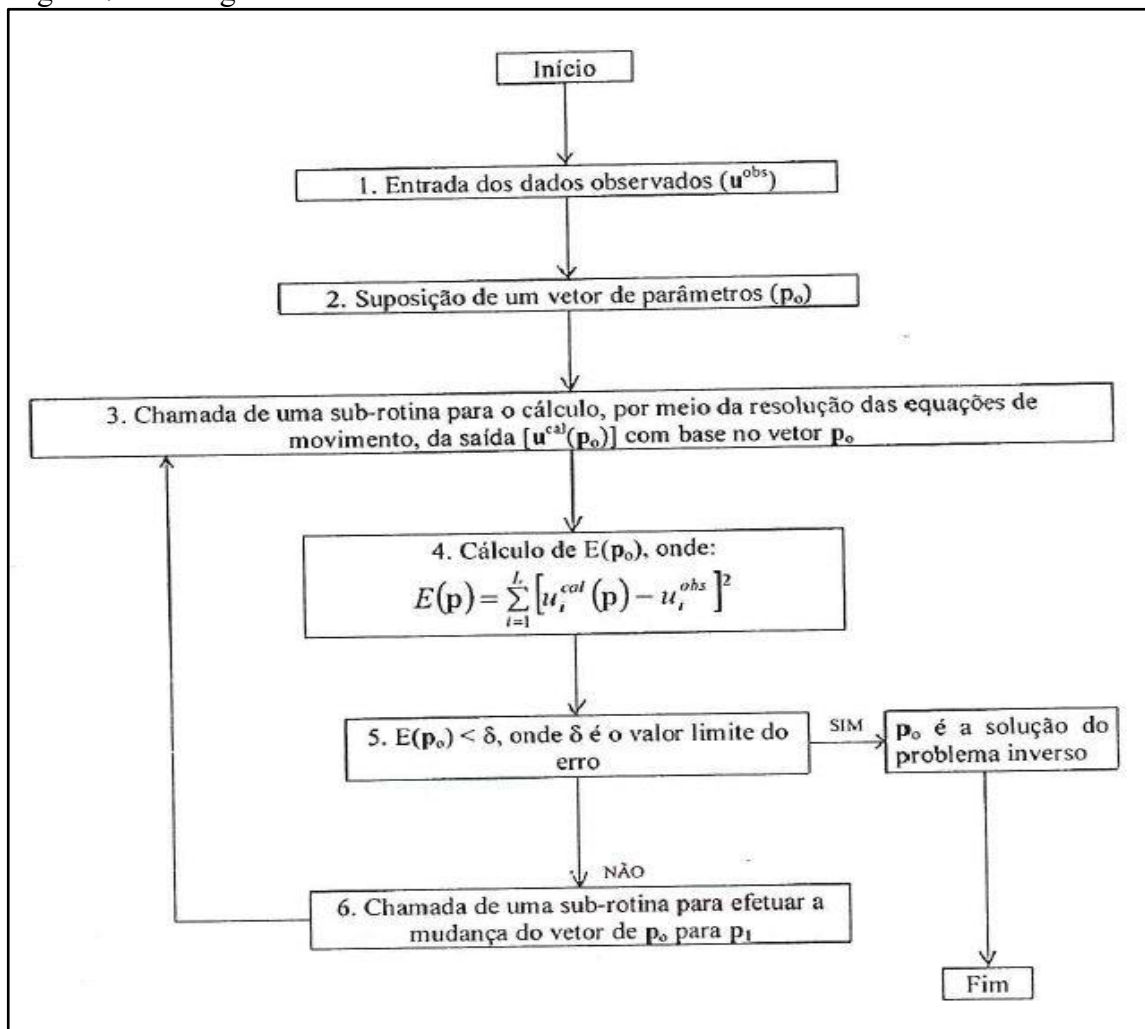
Figura 6 – Fluxograma do método direto.



Fonte: Sun (1994).



Figura 7 - Fluxograma do método indireto.



Fonte: Sun (1994).

## 2.4 Escoamento transiente em tubulações

Transiente ou Transitório hidráulico é o regime variado que ocorre devido a uma perturbação do regime permanente, gerada por qualquer alteração no movimento do fluido, modificando, assim, as características de escoamento deste.

Nesse contexto, esse fenômeno se manifesta através da propagação de ondas por meio do fluido, as quais provocam variação de pressão acima e abaixo dos valores normais de funcionamento da rede. Essas variações são chamadas de golpe de aríete, uma vez que o som rítmico produzido pelo choque dessas ondas com componentes da rede hidráulica assemelha-se com o bater de um aríete, artefato antigo utilizado para derrubar portões de castelos durante invasões na antiguidade. Vale ressaltar que os efeitos negativos do golpe de aríete são diversos, provocando o rompimento de tubulações devido à grande pressão, implosão das tubulações quando a pressão passa a ser negativa, avarias de bombas, de válvulas e de registros etc.

Desse modo, para a análise do fenômeno transiente de maneira mais próxima da realidade física e para o cálculo do golpe de aríete e da cavitação, o modelo a ser adotado é o da coluna elástica, a qual considera como hipótese: fluido compressível, condutos que sofrem deformação elástica e direção unidimensional. Vale ressaltar que, de acordo com Araújo (2003), para situações nas quais a mudança no fluxo é gradual, fato que não provoca grandes desequilíbrios de vazão e pressão, pode-se utilizar o modelo da coluna rígida.

#### 2.4.1 Equações do transiente hidráulico

A análise dos transientes hidráulicos é baseada nas equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, sendo estas equações diferenciais parciais não lineares. Nesse contexto, para a solução delas, diversos métodos numéricos podem ser utilizados. Porém, é comumente utilizado um chamado Método das Características. De acordo com Araújo (2003), esse uso preferencial se deve pelo comportamento de onda que o fenômeno possui, variando em função do tempo (t) e da posição (x), sendo definida ao longo da tubulação através da celeridade (a).

Nessa perspectiva, para a obtenção das equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento, algumas hipóteses são necessárias:

- O escoamento na tubulação é considerado unidimensional;
- O módulo de elasticidade do material da tubulação é constante e as deformações são regidas pela Lei de Hooke;
- O módulo de elasticidade volumétrica do líquido é constante;
- Não há a ocorrência de vaporização;
- Carga cinética desprezível;
- A perda de carga calculada no regime permanente é calculada da mesma forma no regime não permanente.

Desse modo, as equações diferenciais que regem o transiente hidráulico nos condutos forçados são:

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

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

Onde:

**Equação 2.1:** conservação da massa;

**Equação 2.2:** conservação do momento.

**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;

**t:** é o tempo.

#### 2.4.2 Cálculo da Celeridade

De acordo com Halliwell apud CHAUDHRY (1987), considerando a teoria da coluna elástica, a celeridade pode ser calculada da seguinte forma:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\Psi]}} \quad (2.3)$$

Onde:

**a:** é a celeridade da onda de pressão;

**$\Psi$ :** Parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto;

**E:** Módulo de elasticidade de Young da parede do conduto;

**K:** Módulo de elasticidade volumétrica do fluido;

**$\rho$ :** Massa específica do fluido.

Como os condutos serão considerados como elásticos de paredes finas, a expressão para  $\Psi$  é a seguinte:

$$\Psi = \frac{D}{e'}(1 - 0,5\nu') \quad (2.4)$$

Onde:

**D**: Diâmetro do conduto

**e'**: espessura da parede do conduto;

**v'**: razão de Poisson (adimensional);

### 2.4.3 Método das Características

O Método das Características foi proposto pelo Matemático Bernhard Riemann e consiste, segundo Vasconcelos (2008), em determinar linhas no domínio de solução de problemas onde equações diferenciais parciais se transformam em equações diferenciais ordinárias, facilitando bastante o processo de solução. Nesse contexto, a utilização desse método passou a ser amplamente difundido após o surgimento dos computadores e da implementação numérica da técnica, sendo principalmente utilizado para simular escoamentos em redes hidráulicas pressurizadas.

Sendo assim, a seguir, será apresentado o processo de derivação da forma característica das equações para escoamento pressurizados, cuja dedução está presente nos textos de Vasconcelos (2008) e Araújo (2003).

Primeiro define-se as equações (2.1) e (2.2) como sendo:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.5)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

Em posse de  $L_1$  e  $L_2$ , realiza-se a seguinte combinação linear:

$$L = L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (2.7)$$

Desenvolvendo tal equação, tem-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \lambda gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

$$\left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left( \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.9)$$

Nesse contexto, tem-se, como soluções das equações (2.5) e (2.6),  $H = H(x,t)$  e  $Q = Q(x,t)$ . Sendo assim, as derivadas totais são escritas da seguinte forma:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.11)$$

Desse modo, observando a equação (2.9), tem-se que:

$$\lambda a^2 = \frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \pm a \quad (2.12)$$

Continuando o processo, utilizando as equações (2.9), (2.10), (2.11) e (2.12), tem-se que para  $dx/dt = a$ :

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.13)$$

Já para  $dx/dt = -a$ , observa-se:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.14)$$

Desse modo, foram obtidas duas equações dependentes exclusivamente da variável tempo “t”. Representando graficamente as relações  $dx/dt = a$  e  $dx/dt = -a$ , tem-se que, em um plano cartesiano no qual o eixo das abscissas representa “x” e o eixo das ordenadas representa “t”, elas representam duas retas inclinadas cujos coeficientes angulares são  $\pm(1/a)$ . Tais linhas são chamadas de características e elas mostram o “caminho” de propagação da perturbação ocorrida no ponto “ $x_i$ ” e no tempo “t” da tubulação, a qual vai em direção ao ponto “ $x_{i+1}$ ” no intervalo de tempo “ $\Delta t$ ”, criando uma malha de discretização.

Partindo para a solução das equações (2.13) e (2.14), observa-se que, segundo Araújo (2003), a resolução numérica dessas equações é obtida discretizando o eixo das abscissas e o eixo das ordenadas em intervalos de “ $\Delta x$ ” e “ $\Delta t$ ”, respectivamente. Nesse contexto, duas relações podem ser estabelecidas:

$$x_0 = 0; x_n = N\Delta x \quad (2.15)$$

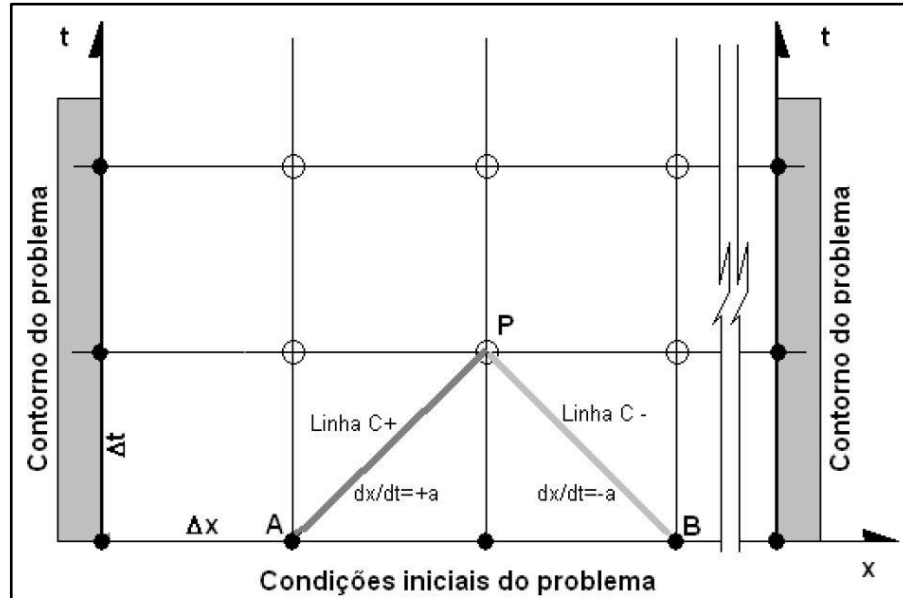
$$t_0 = 0; t_m = M\Delta t \quad (2.16)$$

Outra relação que deve ser incondicionalmente respeitada é:

$$\Delta x = a\Delta t \quad (2.17)$$

Nessa perspectiva, a figura 8 ilustra a malha de discretização do Método das características:

Figura 8 - Definição da malha de discretização do Método das Características.



Fonte: Vasconcelos (2008).

Os pontos A, P e B representam pontos que são localizados no plano “x-t” por meio de um par ordenado  $(x_i, t_j)$ . Sendo assim, a equação (2.13) é utilizada para relacionar os valores de  $H_p$  e  $Q_p$  com os valores de  $H_a$  e  $Q_a$ . Já a equação (2.14) é utilizada para relacionar os valores de  $H_p$  e  $Q_p$  com os valores de  $H_b$  e  $Q_b$ .

Desse modo, pode-se rearranjar tais equações da seguinte forma, multiplicando-se ambas por  $dt$ :

$$C^+: dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = a; \quad (2.18)$$

$$C^-: -dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = -a; \quad (2.19)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{fa}{2gDA^2} \quad (2.21)$$

Integrando-se as equações (2.18) e (2.19) de P a M e de P a J, respectivamente, tem-se:

$$C^+: \int_M^P dH + B \int_M^P dQ + R \int_M^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.22)$$

$$C^-: - \int_J^P dH + B \int_J^P dQ + R \int_J^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.23)$$

Como pode-se observar, os dois primeiros termos das equações são de fácil determinação. Por outro lado, o terceiro é de difícil determinação, uma vez que não se sabe como se dá a variação da vazão em função do tempo. Nesse contexto, a solução encontrada é utilizar uma técnica de primeira ordem sugerida por Wylie; Streeter (1978). Nesse contexto, uma vez que os intervalos de tempo adotados durante a solução das equações (2.22) e (2.23) são pequenos, essa terceira parte referente às perdas por atrito são resolvidas e as equações ganham o seguinte formato:

$$C^+: (H_P - H_M) + B(Q_P - Q_M) + R\Delta t Q_M |Q_M| = 0 \quad (2.24)$$

$$C^-: -(H_P - H_M) + B(Q_P - Q_M) + R\Delta t Q_J |Q_J| = 0 \quad (2.25)$$

Vale ressaltar que esse método é chamado de explícito e possui duas limitações. A primeira é que a técnica de primeira ordem só é válida para perdas de atrito pequenas. A segunda é que a teoria descrita anteriormente só terá validade se o estado transiente não diferir demasiadamente do estado permanente por um longo período.

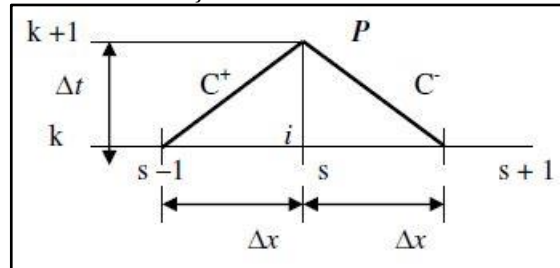
#### 2.4.4 Condições de contorno

Aplicando o Método das Características em uma tubulação qualquer, tem-se que a o trecho é dividido em diversos segmentos que possuem comprimento  $\Delta x$ , havendo duas seções em cada um deles. A primeira e a última seção são regidas por uma condição de contorno e uma das equações características vistas anteriormente. Já nos pontos interiores do trecho, ambas as equações são utilizadas. Nesse contexto, as deduções a seguir foram retiradas de Araújo (2003).

• **Seção Interna:**

Considerando uma seção qualquer “s” interna a um trecho “i” da tubulação. A figura 9 a seguir ilustra o plano cartesiano x-t, bem como as linhas características positivas e negativas:

Figura 9 - Esquema de uma seção interna “s” de uma tubulação “i”.



Fonte: Araújo (2003).

As equações características são:

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

$$C^-: -[H_{i,s}(k+1) - H_{i,s+1}(k)] + B_i [Q_{i,s}(k+1) - Q_{i,s+1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,s+1}(k) |Q_{i,s+1}(k)| = 0 \quad (2.27)$$

Isolando o termo  $Q_{i,s}(k+1)$  em cada uma das equações anteriores e somando-as, obtém-se o seguinte resultado:

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

Substituindo a equação (2.28) na equação (2.27) ou na equação (2.26), o resultado será:

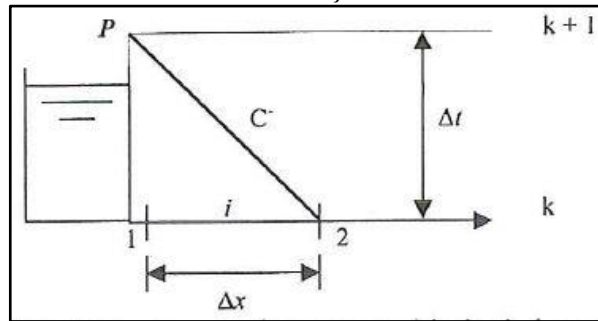
$$H_{i,s}(k+1) = \frac{H_{i,s-1}(k)}{2} + \frac{H_{i,s+1}(k)}{2} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s-1}(k)|]}{2} Q_{i,s-1}(k) - \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s+1}(k)|]}{2} Q_{i,s+1}(k) \quad (2.29)$$

• **Reservatório de Nível Constante a Montante:**

Conforme a figura 10 a seguir, considera-se o esquema de um reservatório de nível constante “P” a montante de uma tubulação “i”.



Figura 10 - Reservatório de nível constante “P” a montante da tubulação “i”.



Fonte: Araújo (2003).

Como está representado, deve-se utilizar a equação característica  $C^-$ :

$$C^-: -[H_{i,1}(k+1) - H_{i,2}(k)] + B_i[Q_{i,1}(k+1) - Q_{i,2}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,2}(k) |Q_{i,2}(k)| = 0 \quad (2.30)$$

A condição de contorno imposta pelo reservatório a montante é:

$$H_{i,1}(k+1) = H_1 = \text{constante} \quad (2.31)$$

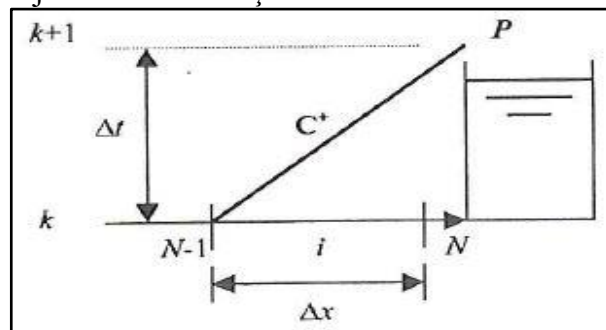
Das equações (2.30) e (2.31), tem-se:

$$Q_{i,1}(k+1) = \frac{H_1}{B_i} - \frac{H_{i,2}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,2}(k)|]}{B_i} Q_{i,2}(k) \quad (2.32)$$

• **Reservatório de Nível Constante a Jusante:**

Conforme 11 a figura a seguir, considera-se o esquema de um reservatório de nível constante “P” a jusante de uma tubulação “i”.

Figura 11 - Reservatório de nível constante “P” a jusante da tubulação “i”.



Fonte: Araújo (2003).

Como está representado, deve-se utilizar a equação característica  $C^+$ :

$$C^+: [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i[Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| = 0 \quad (2.33)$$

A condição de contorno imposta pelo reservatório a montante é:

$$H_{i,N}(k+1) = H_N = \text{constante} \quad (2.34)$$

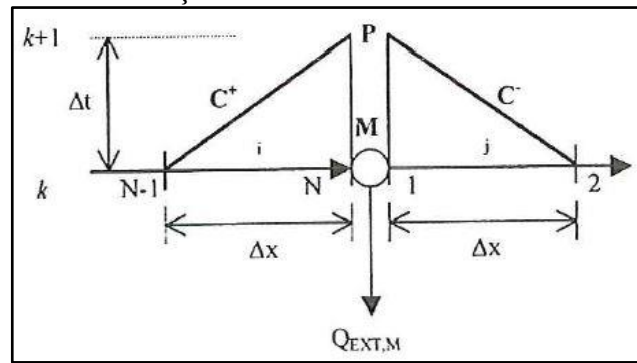
Das equações (2.33) e (2.34), tem-se:

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

- **Nó de Consumo ou Demanda:**

A figura 12 a seguir representa um nó de consumo “M” com vazão de demanda igual a  $Q_{ext,M}$  e duas tubulações “i” e “j”, das quais uma chega ao nó de demanda e é regida pela equação característica positiva. Já a outra tubulação sai do ponto “M” e é regida pela equação característica negativa.

Figura 12 - Ilustração de um nó de consumo ligada a duas tubulações.



Fonte: Araújo (2003).

As equações características são:

$$C^+: [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| = 0 \quad (2.36)$$

$$C^-: -[H_{j,1}(k+1) - H_{j,2}(k)] + B_j [Q_{j,1}(k+1) - Q_{j,2}(k)] + R_j \Delta t Q_{j,2}(k) |Q_{j,2}(k)| = 0 \quad (2.37)$$

As condições de contorno impostas pelo nó de demanda são:

$$\sum_{i \in N_1} Q_{i,N}(k+1) - \sum_{j \in N_2} Q_{j,1}(k+1) - Q_{EXT,M} = 0 \quad (2.38)$$

$$H_{i,N}(k+1) = H_{j,1}(k+1) = H_M(k+1) \quad (2.39)$$

Das equações (2.38) e (2.39), tem-se:

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_{i,N}(k+1)}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (2.40)$$

$$Q_{j,1}(k+1) = \frac{H_{j,1}(k+1)}{B_j} + \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + \frac{[B_j - R_j \Delta t |Q_{j,2}(k)|]}{B_j} Q_{j,2}(k) \quad (2.41)$$

Substituindo as equações (2.40) e (2.41) na equação (2.38) e utilizando (2.39):

$$\begin{aligned}
 H_M(k+1) = & B_M \sum_{i \in N_1} \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + B_M \sum_{j \in N_2} \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + \\
 & + B_M \sum_{i \in N_1} \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) - \\
 & - B_M \sum_{j \in N_2} \frac{[B_j - R_j \Delta t |Q_{j,2}(k)|]}{B_j} Q_{j,2}(k) - B_M Q_{EXT,M}
 \end{aligned}
 \tag{2.42}$$

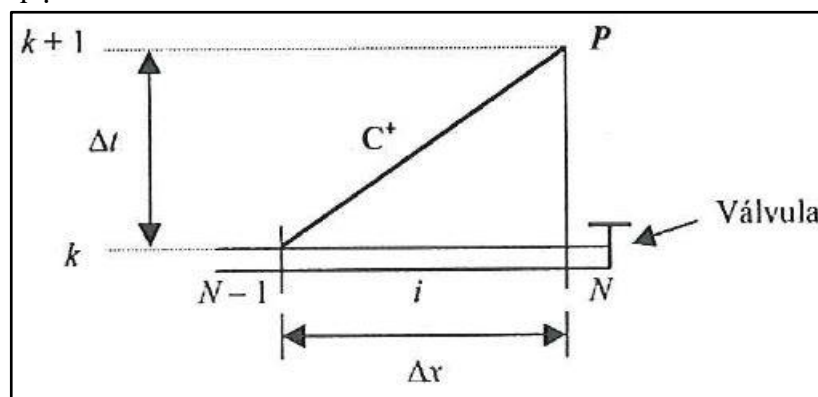
Onde:

$$B_M = \left[ \sum_{i \in N_1} \frac{1}{B_i} + \sum_{j \in N_2} \frac{1}{B_j} \right]^{-1}
 \tag{2.43}$$

• **Válvula a jusante:**

A figura 13 a seguir ilustra uma válvula localizada a jusante de uma tubulação qualquer “i”.

Figura 13 - Ilustração de uma válvula a jusante de uma tubulação “i”.



Fonte: Araújo (2003).

Nesse contexto, temos que a equação utilizada é a positiva:

$$C^+: [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| = 0
 \tag{2.44}$$

Assume-se que o fluxo permanente na tubulação pode ser descrito da seguinte forma:

$$Q_{0_{i,N}} = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_{0_{i,N}}}
 \tag{2.45}$$

Onde:

$\mathbf{0}$ : indica que o parâmetro se refere ao estado permanente;

$C_d$ : coeficiente de descarga;

$H_{0i,N}$ : carga a montante da válvula;

$A_v$ : área do orifício.

Já o fluxo em escoamento transiente, que percorre a válvula, pode ser similarmente descrito de tal modo:

$$Q_{i,N}(k+1) = (C_d A_v) \sqrt{2g H_{i,N}(k+1)} \quad (2.46)$$

Continuando a dedução, divide-se (2.46) por (2.45), elevando-se ambos os lados do resultado ao quadrado, obtendo:

$$Q^2_{i,N}(k+1) = \frac{(Q_{0i,N} \tau)^2}{H_{0i,N}} H_{i,N}(k+1) \quad (2.47)$$

Onde:

$\tau$ : é a abertura ou fechamento da válvula e é equivalente à  $(C_d A_v) / (C_d A_v)_0$ ;

Em seguida, substitui-se o  $H_{i,N}(k+1)$  da equação (2.46) na equação (2.47), adquirindo:

$$Q^2_{i,N}(k+1) + C_v Q_{i,N}(k+1) - C_{P_i} C_v = 0 \quad (2.48)$$

Onde:

$$C_v = \frac{(\tau Q_{0i,N})^2 B_i}{H_{0i,N}} \quad (2.49)$$

$$C_{P_i} = \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + Q_{i,N-1}(k) - \frac{R_i}{B_i} \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| \quad (2.50)$$

Resolvendo a equação (2.48) e eliminando uma das raízes que é negativa, tem-se que:

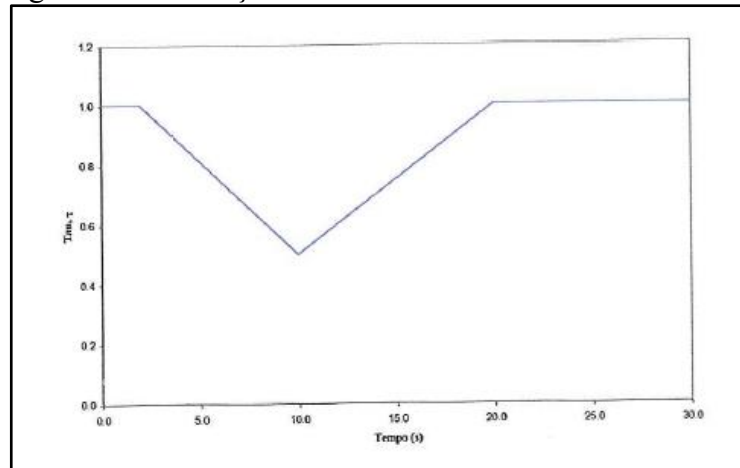
$$Q_{i,N}(k+1) = 0,5 \left( -C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{P_i} C_v} \right) \quad (2.51)$$

Sendo assim, pode-se calcular  $H_{i,N}(k+1)$  por meio da equação (2.44).

Vale ressaltar também que para o cálculo das condições estabelecidas anteriormente, é necessário que haja uma relação entre “ $\tau$ ” e “ $t$ ”. Uma forma de representação é na forma de gráfico onde o valor de  $\tau=1$  indica que a válvula está totalmente aberta e  $\tau=0$

indica que ela está totalmente fechada. A figura 14 a seguir é exibida para exemplificar um tipo de manobra de válvula:

Figura 14 - Ilustração de uma manobra de válvula.



Fonte: Araújo (2003).

## 2.5 Algoritmo Genético

### 2.5.1 Introdução aos AGs

Os algoritmos genéticos, ou simplesmente AGs, são uma estratégia de otimização e busca que se utiliza dos conceitos desenvolvidos pelo biólogo e naturalista Charles Robert Darwin a respeito da evolução de populações de seres vivos. Nesse contexto, tal método foi introduzido pelo pesquisador John Holland (Holland, 1975), sendo popularizado por um de seus alunos, David Goldberg (Goldberg, 1989). A ideia por trás da técnica é justamente selecionar aquelas soluções capazes de satisfazer as exigências impostas pelo programador do algoritmo, prevalecendo, assim, a seleção natural, a sobrevivência do mais apto e a máxima de Darwin: “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao meu ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”.

Sendo assim, como dito anteriormente, os AGs são não apenas uma ferramenta de busca, mas também de otimização, e otimização nada mais é que a busca pela melhor solução de um dado problema. Tal método tem destaque por garantir, ao programador, um amplo espaço de busca e por permitir que haja um critério de avaliação, que é a função objetivo ou função aptidão, para definir qual solução é a mais satisfatória.

Nessa perspectiva, a ideia central da otimização é alcançar a solução que retorne ou o máximo ou o mínimo da função objetivo, a depender da situação analisada. Vale ressaltar que, como será posto posteriormente, o AG é uma técnica que permite alcançar o máximo global da função objetivo, independentemente da existência de diversos outros máximos locais,

característica não compartilhada por diversas outras estratégias de resolução.

A seguir, a figura 15 ilustra um exemplo de um Algoritmo Genético típico:

Figura 15: 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

```

---

Fonte: Lacerda E. e Carvalho A. (1999).

Portanto, o primeiro passo de um AG é a geração de uma população inicial de “cromossomos”, os quais são responsáveis por carregar as informações de possíveis soluções para o problema. Em outras palavras, tal população representa a primeira geração de soluções criadas, na maioria das vezes, aleatoriamente pelo algoritmo. À medida que o programa é executado, pelo ponto de vista do Darwinismo, à medida que ocorre o “processo evolutivo”, a população é avaliada pela função objetivo, e cada cromossomo, ou solução, recebe uma nota, a qual determinará se tal cromossomo está apto ou não a continuar no processo.

Desse modo, seguindo a lógica de Darwin, os mais bem colocados irão continuar a ser avaliados, estando suscetíveis a constantes mudanças em suas características. Já os menos aptos serão descartados ou, caso seja de interesse do programador, eles também sofreram mudanças em suas características. Tais mudanças são realizadas por operadores, como o *crossover* e a mutação, os quais garantem uma maior diversidade para a população descendente de cromossomos. Como ilustrado na figura 15, tal processo se repete até que haja uma solução suficientemente satisfatória. Vale salientar também que a solução encontrada por um algoritmo genético não é determinística, ou seja, mudando-se os dados de entrada, por exemplo, pode-se gerar diversas soluções para um mesmo problema a partir de diferentes simulações.

### 2.5.2 Seleção

Seguindo a lógica do Darwinismo, o próprio Meio Ambiente é o responsável por selecionar os seres vivos mais aptos para sobreviver nas condições naturais existentes, e essa aptidão está totalmente relacionada com as características apresentadas por esses seres. Nesse contexto, voltando para o contexto dos Algoritmos Genéticos, tem-se que os “cromossomos” representam os seres e cada um deles possui uma característica própria. O processo de determinação da aptidão se dá por meio da função objetivo, a qual definirá o quanto aquele “cromossomo” é capaz de “sobreviver” diante da situação imposta pelo problema. Desse modo, o ponto que ainda falta ser definido é como se dará o processo de seleção dos “cromossomos”.

Diante disso, DeJong (1975) propôs um conceito denominado **Elitismo**, o qual define como se dá o procedimento de escolha dos mais aptos dentro da população. Nessa perspectiva, essa estratégia permite transferir os melhores cromossomos de uma geração para outra sem alterações.

Sendo assim, o procedimento de seleção com elitismo proposto 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 de acordo com a função objetivo;
3. Faz-se o ordenamento crescente da aptidão da população (válido para problema de maximização);
4. São selecionados os melhores indivíduos de acordo com tal ordenamento, de forma a criar uma população de  $p_e \times NC$  indivíduos, onde o primeiro termo refere-se à taxa de Elitismo, ou seja, a porcentagem de indivíduos que deverão ser selecionados;
5. O restante da população é formado por uma nova escolha aleatória de indivíduos (dentre os melhores) que irão compor a população de pais.
6. E por fim, é realizada 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, assim, uma probabilidade de sucessão  $p_s = 0,5$ .

### 2.5.3 Representação

De acordo com Lacerda E. e Carvalho A. (1999), um cromossomo é uma estrutura de dados, geralmente vetor ou cadeia de *bits*, que representa uma possível solução do problema a ser otimizado. Nesse contexto, tal estrutura pode assumir diversas configurações, compondo assim o seu espaço de busca. Além disso, este pode possuir “n” dimensões, a depender de

quantos parâmetros de uma determinada função o cromossomo represente. Dito isso, duas formas bem difundidas de simbolizar essa estrutura são: a binária e a real.

### 2.5.3.1 Binária x Real

Para ilustrar o processo de codificação do cromossomo, toma-se o seguinte exemplo:

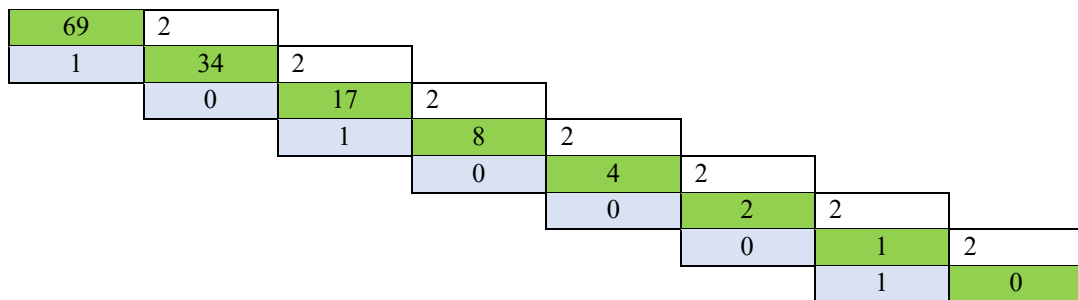
$$s_1 = 1000101$$

Esta estrutura está simbolizada na forma binária, ou seja, é formada por uma cadeia de 7 bits (0 ou 1). Vale ressaltar que, quanto maior o tamanho da cadeia, melhor fica a precisão numérica da solução. Em contrapartida, o processo se torna mais vagaroso.

Então, para decodificar o cromossomo apresentado “s<sub>1</sub>”, converte-se ele da base 2 para a base 10. A conversão é feita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} b_{10} &= 1 \times 2^{(7-1)} + 0 \times 2^{(6-1)} + 0 \times 2^{(5-1)} + 0 \times 2^{(4-1)} + 1 \times 2^{(3-1)} + 0 \times 2^{(2-1)} + 1 \times 2^{(1-1)} \\ b_{10} &= 2^6 + 2^2 + 2^0 = 64 + 4 + 1 = (69)_{decimal} \end{aligned}$$

Para realizar o procedimento inverso, ou seja, de decimal para binário, deve-se proceder da seguinte maneira:



Logo:

$$(69)_{decimal} = 1000101 = s_1$$

Sendo assim, a depender do problema analisado, a solução deve apresentar uma precisão de “n” casas decimais. Nesse caso, assumindo que o domínio da variável “x<sub>j</sub>” seja [a<sub>j</sub>,b<sub>j</sub>], o número “m<sub>j</sub>” de bits necessários para compor o cromossomo será calculado da seguinte forma:

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times 10^n \leq 2^{m_j} \quad (2.52)$$



Como exemplo, usa-se o problema de otimização proposto por Gen; Cheng (1997):

$$\max f(x_1, x_2) = 21,5 + x_1 \text{sen}(4\pi x_1) + x_2 \text{sen}(20\pi x_2)$$

$$-3,0 \leq x_1 \leq 12,1$$

$$4,1 \leq x_2 \leq 5,8$$

Supondo que se deseja uma precisão de 4 casas decimais, tem-se que:

$$(12,1 - (-3,0)) \times 10^4 = 151000$$

$$2^{17} < 151000 \leq 2^{18}, \text{ logo } m_1 = 18$$

$$(5,8 - 4,1) \times 10^4 = 17000$$

$$2^{14} < 17000 \leq 2^{15}, \text{ logo } m_2 = 15$$

$$m = m_1 + m_2 = 18 + 15 = 33$$

Portanto, o cromossomo deverá possuir uma cadeia de 33 *bits*, cujos 18 primeiros serão referentes à variável  $x_1$ , e os 15 últimos serão referentes à variável  $x_2$ .

A outra forma de se codificar um cromossomo é utilizando a forma real. Nessa perspectiva, diante de problemas nos quais o cromossomo deve englobar diversas variáveis e com uma boa precisão numérica, a codificação real se sobressai em relação à binária, uma vez que ela permite a geração de cromossomos menores, além de ser mais facilmente compreendida pelo ser humano. Continuando o desenvolvimento do exemplo apresentado anteriormente e definindo um cromossomo qualquer, tem-se o seguinte processo de representação real:

$$\overbrace{\underbrace{000001010100101001}_{18 \text{ bits}} \underbrace{101111011111110}_{15 \text{ bits}}}_{33 \text{ bits}}$$

$$x_1 = 000001010100101001; b_{10} = 5417$$

$$x_2 = 101111011111110; b_{10} = 24318$$

$$x = a_j + (b_j - a_j) \frac{b_{10}}{2^m - 1} \quad (2.53)$$

$$x_1 = -3 + (12,1 - (-3)) \frac{5417}{2^{18} - 1} = -2,6879$$

$$x_2 = 4,1 + (5,8 - 4,1) \frac{24318}{2^{15} - 1} = 5,3616$$

Logo, a codificação real, também chamada flutuante, das duas variáveis seria um cromossomo representado por um vetor (-2,6879; 5,3616).

#### 2.5.4 Crossover ou Cruzamento

O *crossover* é um dos operadores que confere ao Algoritmo Genético a capacidade de explorar regiões desconhecidas do espaço de busca. Nesse contexto, a ideia por trás desse operador envolve manipular os genes que formam os cromossomos pais, cruzando-os entre si, para formar cromossomos filhos diferentes dos seus progenitores. Caso não haja esse cruzamento, os filhos serão tais quais os pais. Nesse contexto, existem várias estratégias para a aplicação do *crossover*, porém serão analisadas as duas de mais fácil assimilação: Cruzamento de Um Ponto e o Cruzamento Aritmético.

##### 2.5.4.1 Cruzamento de Um Ponto

Nesse tipo de *crossover*, dois cromossomos pais “ $p_1$ ” e “ $p_2$ ” serão cruzados, gerando os cromossomos filhos “ $f_1$ ” e “ $f_2$ ”. Sob essa perspectiva, tem-se que:

$$p_1 = [b_{11}, b_{12}, b_{13}, \dots, b_{1NB}] \quad (2.54)$$

$$p_2 = [b_{21}, b_{22}, b_{23}, \dots, b_{2NB}] \quad (2.55)$$

Desse modo, após a seleção dos cromossomos mais aptos da primeira geração, parte-se para a formação da geração seguinte. Nesse contexto, um número inteiro “ $J_x$ ” é gerado aleatoriamente, com valores variando entre [1, NB-1], onde “NB” é o número de *bits* que compõem os cromossomos pais. Sendo assim, estes serão separados exatamente na posição “ $J_x$ ”, conforme definido por Araújo (2003):

$$p_1 = [b_{11}, b_{12}, b_{13}, \dots, b_{1J_x} | b_{1J_x+1}, \dots, b_{1NB}] \quad (2.56)$$

$$p_2 = [b_{21}, b_{22}, b_{23}, \dots, b_{2J_x} | b_{2J_x+1}, \dots, b_{2NB}] \quad (2.57)$$

Logo, realizando a permutação entre os dois trechos finais, os cromossomos filhos são obtidos:

$$f_1 = [b_{11}, b_{12}, b_{13}, \dots, b_{1J_x} | b_{2J_x+1}, \dots, b_{2NB}] \quad (2.58)$$

$$f_2 = [b_{21}, b_{22}, b_{23}, \dots, b_{2J_x} | b_{1J_x+1}, \dots, b_{1NB}] \quad (2.59)$$

Vale ressaltar que tal valor de “ $J_x$ ” não é o mesmo para todos os pares de pais a serem cruzados. Ou seja, a partir do momento em que haverá a aplicação do *crossover*, “ $J_x$ ” é

gerado aleatoriamente para aquela operação em específico. Além disso, para que seja possível optar-se pela manutenção de soluções da geração ascendente, a taxa de cruzamento “ $p_c$ ” que gerará os cromossomos descendentes, de acordo com Araújo (2003), é um valor entre 60% e 100%.

#### 2.5.4.2 Cruzamento Aritmético

Estabelecido por Michalewicz (1994), é a estratégia de *crossover* ideal para a representação real, uma vez que o Cruzamento de Um Ponto, quando usado nessa codificação, promove apenas a modificação de valores dos genes, não gerando, assim, informações novas (novos números reais). Nesse contexto, o Cruzamento Aritmético consiste em realizar uma combinação linear entre os cromossomos pais, no caso dois vetores. Sendo assim, o procedimento envolve a seguinte ideia:

$$p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1NB}), p_{ij} \in R \quad (2.60)$$

$$p_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2NB}), p_{ij} \in R \quad (2.61)$$

Desse modo, os cromossomos filhos serão gerados da seguinte forma:

$$f_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \quad (2.62)$$

$$f_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2 \quad (2.63)$$

Onde “ $f_1$ ” e “ $f_2$ ”  $\in R$  e  $\beta$  é um número gerado aleatoriamente dentro do intervalo  $[0,1]$ .

#### 2.5.5 Mutação

Outro operador de suma relevância e que garante uma maior diversidade de soluções para o Algoritmo Genético são as mutações. Nesse contexto, a probabilidade de ocorrência desse operador é bem inferior à do operador visto anteriormente, estando por volta de 0,1% a 5%. Sendo assim, aplicada a mutação em um cromossomo filho gerado, este tem alguns genes que o compõem modificados, alterando a informação nele contida. Vale ressaltar que a probabilidade desse operador deve ser baixa, uma vez que, em prol da diversidade da geração descendente, ele destrói parte da informação contida e selecionada nas gerações anteriores.

### 2.5.5.1 Mutaç o Simples

Muito utilizado na codifica o bin rio, essa estrat gia de aplica o de muta o basicamente inverte alguns valores dos *bits* que comp em o cromossomo. Nesse contexto, cada *bit* tem a mesma probabilidade de sofrer muta o.

Antes da Muta o:

$f_1$ : (0011011001)

$f_2$ : (111001011001)

Depois da Muta o:

$f_1$ : (0111011000)

$f_2$ : (111000011001)

### 2.5.5.2 Muta o Uniforme

Essa outra estrat gia de aplica o da muta o   pr pria para cromossomos codificados na forma real. Nessa perspectiva, o operador ir  simplesmente substituir o valor de um gene dentro do cromossomo por um n mero aleat rio. Desse modo, cada gene tem uma probabilidade “ $p_m$ ” de sofrer muta o. Segue o m todo de aplica o do operador, de acordo com Lacerda E. e Carvalho A. (1999), no qual um cromossomo “ $f$ ” tem seu  $j$ - simo gene selecionado para muta o, produzindo, assim, um cromossomo “ $c_i$ ”, tal que:

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i) & \text{se } i = j \\ f_i & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (2.64)$$

Onde “ $U$ ” representa um valor aleat rio de uma distribui o uniforme no intervalo estabelecido; e “ $a_i$ ” e “ $b_i$ ” definem os limites do intervalo permitido para o gene “ $c_i$ ”.

### 2.5.6 Fun o Objetivo

As fun es objetivo tem como finalidade realizar o ajuste entre os par metros medidos e os calculados. Em redes hidr ulicas, dependendo dos par metros envolvidos na situa o, a fun o objetivo pode aglomerar tais vari veis, ponderando-as, visando retornar uma solu o que maximize ou minimize o valor da fun o, sendo bastante  til em processos de otimiza o.

Para o processo de calibra o proposto, no qual ser  comparado os resultados

adquiridos pelo Método Transiente Inverso Indireto com base no algoritmo genético, o parâmetro analisado será o das cargas hidráulicas em um ou mais nós da rede hidráulica. Tal consideração garante a eficiência do processo inverso e simplifica a função objetivo.

Nesse contexto, a função objetivo definida baseia-se basicamente na minimização da soma dos desvios absolutos das cargas hidráulicas medidas e calculadas, sendo expressa da seguinte forma:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{TS} \left( \frac{H_{i,m} - H_{i,c}}{H_{i,m}} \right)^2 \quad (2.65)$$

Onde:

**TS:** duração do transiente;

**H<sub>i,m</sub>:** carga medida no tempo “i”;

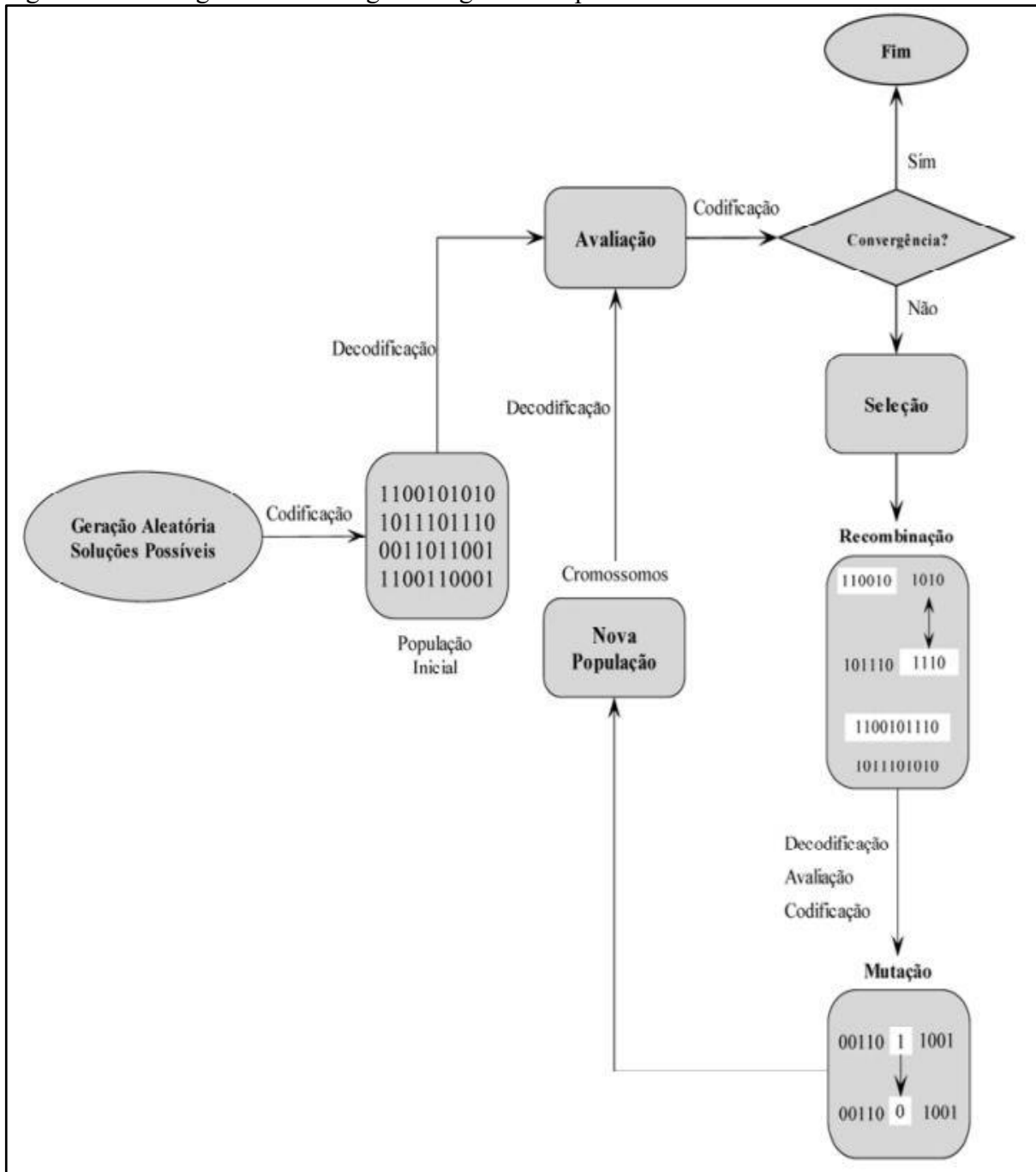
**H<sub>i,c</sub>:** carga calculada no tempo “i”;

**i = 1, 2, ..., TS.**

### 2.5.7 Fluxograma de um Algoritmo Genético

A figura 16 a seguir retrata um fluxograma de um algoritmo genético típico:

Figura 16 - Fluxograma de um algoritmo genético típico.



Fonte: Cheung (2004).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 Definição do Problema Inverso com dados transientes**

Ao tentar se analisar uma rede hidráulica, diversas considerações podem ser feitas, bem como diversas estratégias podem ser traçadas para determinar as soluções do problema. Nesse contexto, a primeira questão a ser averiguada é se os parâmetros da rede são conhecidos. Caso eles sejam, o problema se caracterizará como direto, bastando o cálculo das vazões nos tubos e as pressões hidráulicas nos nós para a solução do problema. Por outro lado, caso tais características não sejam conhecidas, tal situação caracteriza um problema inverso. Em outras palavras, o problema tem de ser resolvido a partir de alguns dados observados de vazão nos tubos e de cargas hidráulicas nos nós, utilizando tais informações para se estimar os parâmetros da rede, os quais agora são tratados como variáveis.

Nesse contexto, diante de um problema inverso, dois caminhos podem ser tomados. O primeiro consiste no Método Direto, no qual equações que regem o fenômeno serão solucionadas considerando os parâmetros desconhecidos do sistema como variáveis dependentes. Sob outra perspectiva, pode-se aplicar o Método Inverso. Este consiste em, por meio de processos iterativos, testar diversos valores para os parâmetros desconhecidos, até que o resultado retornado da simulação seja satisfatoriamente condizente com aqueles observados na rede hidráulica real. Vale ressaltar que esse último método requer uma concepção matemática mais simples em relação ao primeiro método.

Desse modo, caso se deseje trabalhar com dados transientes em um problema inverso, e esse é o cenário ideal, uma vez que tal fato tornaria a modelagem mais fidedigna com a realidade física, a resolução pelo Método Direto se torna bem mais complexo, sendo, nesse caso, mais recomendado empregar o Método Inverso.

#### **3.2 Formulação do Problema Inverso**

Partindo do título dessa pesquisa, tem-se que a identificação do parâmetro rugosidade em redes hidráulicas será um dos objetivos específicos a ser alcançado. Nesse caso, trata-se de um problema de calibração, ou seja, a questão envolve estimar uma variável desconhecida característica das tubulações que compõem o sistema, configurando assim um problema inverso. Além disso, como serão utilizados dados transientes, tem-se que o melhor método a ser adotado para solucionar esse problema inverso é o Método Indireto.

Desse modo, o processo iterativo escolhido para estimar o parâmetro rugosidade foi

o Algoritmo Genético, tendo em vista que ele permite a otimização das soluções, sendo capaz de encontrar o máximo ou o mínimo global de uma função, independentemente da existência de diversos outros máximos locais, graças a sua grande capacidade de ampliar o espaço de busca. Ademais, como dito na seção 2.5.6, a função objetivo que servirá de critério de escolha do AG será a definida pela equação (2.65).

### 3.3 Método Transiente Inverso - Algoritmo Genético (MTI-AG)

O Método Transiente Inverso consiste em um processo de calibração adotado em diversas pesquisas, entre elas Araújo (2003), já tendo sido demonstrada a sua capacidade de estimar diversos parâmetros como: diâmetro, fator de atrito, rugosidade, perdas de água por vazamento etc. Nesse contexto, esse método opera em conjunto com uma ferramenta de otimização, que no caso do estudo aqui apresentado é o Algoritmo Genético.

Sendo assim, a técnica adotada é regida pela seguinte lógica:

1. Definição de alguns parâmetros e dados conhecidos da rede a ser analisada.
2. Cálculo, por meio do Método das Características, do regime permanente no sistema.
3. Cálculo das cargas hidráulicas transientes observadas na rede, as quais são provocadas por um evento que provoque o transiente hidráulico, utilizando o Método das Características (no caso do estudo aqui apresentado, o evento é uma manobra de válvula).
4. Aplicação do Algoritmo Genético, o qual, por meio de iterações, da função objetivo e dos operadores *crossover*, mutação e elitismo, gerará cargas hidráulicas artificiais.
5. Seleção feita pelo AG das cargas hidráulicas transientes artificiais que mais se aproximaram das cargas hidráulicas transientes observadas.
6. Discretização dos parâmetros (no caso a rugosidade) que fizeram o AG chegar a tais resultados.

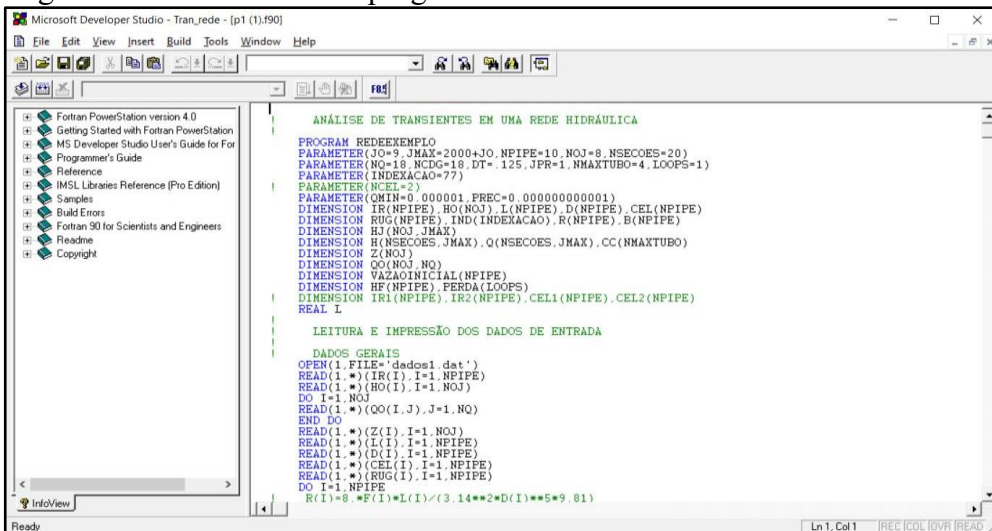
Desse modo, vale ressaltar que todo esse procedimento foi programado por Araújo (2003) na linguagem FORTRAN (*FORmulaTRANslation*), cujo programa foi utilizado para gerar as estimativas de rugosidade absoluta nas redes hidráulicas em estudo, que serão apresentadas posteriormente. Nesse contexto, o programa é dividido em três subprogramas: R1, R2 e R3.

Primeiramente, R1 é responsável por calcular, por meio do Método das Características, o estado permanente de escoamento existente na rede hidráulica analisada, utilizando, como dados de entrada, informações sobre as tubulações que compõem o sistema e as vazões de demanda em cada nó. Como arquivo de saída, ele fornece as cargas hidráulicas de



cada nó da rede hidráulica e as vazões em cada uma das tubulações. Nessa perspectiva, a figura 17 ilustra a interface do subprograma R1.

Figura 17 - Interface do subprograma R1.



```

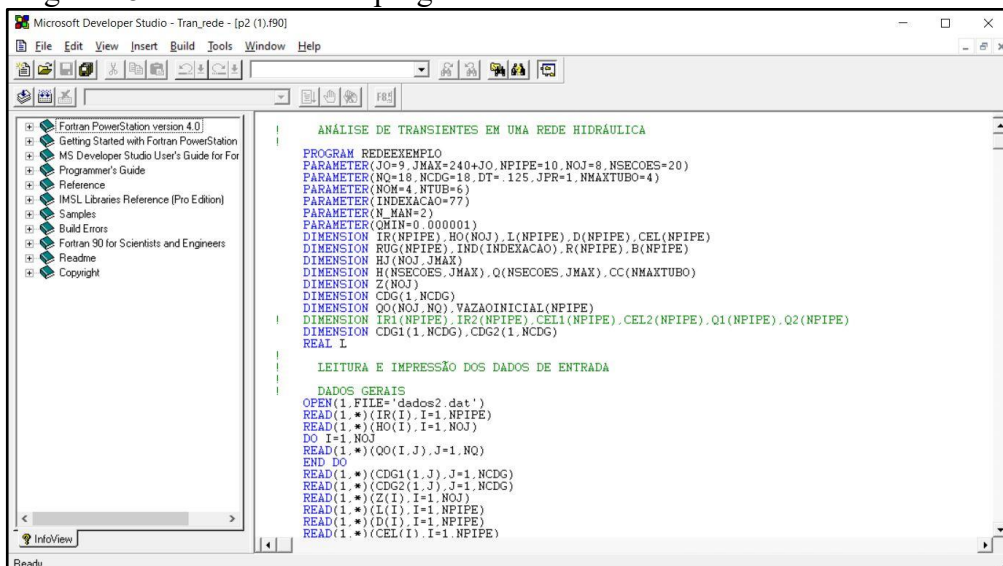
Microsoft Developer Studio - Tran_rede - [p1 (1).f90]
File Edit View Insert Build Tools Window Help
ANÁLISE DE TRANSIENTES EM UMA REDE HIDRÁULICA
PROGRAM REDEEXEMPLO
PARAMETER(JO=9, JMAX=2000+JO, NPIPE=10, NOJ=8, NSECOES=20)
PARAMETER(NQ=18, NCDG=18, DT= .125, JPR=1, NMAXTUBO=4, LOOPS=1)
PARAMETER(INDEXACAO=77)
PARAMETER(NCEL=2)
PARAMETER(QMIN=0.000001, PREC=0.00000000001)
DIMENSION IR(NPIPE), HO(NOJ), L(NPIPE), D(NPIPE), CEL(NPIPE)
DIMENSION RUG(NPIPE), IND(INDEXACAO), R(NPIPE), B(NPIPE)
DIMENSION HJ(NOJ, JMAX)
DIMENSION H(NSECOES, JMAX), Q(NSECOES, JMAX), CC(NMAXTUBO)
DIMENSION Z(NOJ)
DIMENSION OO(NOJ, NQ)
DIMENSION VAZAOINICIAL(NPIPE)
DIMENSION HF(NPIPE), FERDA(LOOPS)
DIMENSION IR1(NPIPE), IR2(NPIPE), CEL1(NPIPE), CEL2(NPIPE)
REAL L
LEITURA E IMPRESSÃO DOS DADOS DE ENTRADA
DADOS GERAIS
OPEN(1, FILE='dados1.dat')
READ(1, *) (IR(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (HO(I), I=1, NOJ)
DO I=1, NOJ
  READ(1, *) (OO(I, J), J=1, NQ)
END DO
READ(1, *) (Z(I), I=1, NOJ)
READ(1, *) (L(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (D(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (CEL(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (RUG(I), I=1, NPIPE)
DO I=1, NPIPE
  R(I)=8.*F(I)*L(I)/(3.14**2*D(I)**5*9.81)

```

Fonte: autoria própria (2021).

Já o subprograma R2, é responsável por calcular as cargas transientes em um determinado nó de interesse ao longo de um intervalo de tempo estabelecido. Nesse contexto, os dados de entrada são as cargas hidráulicas e as vazões calculadas em R1, bem como as características físicas da rede hidráulica analisada. Além disso, é necessário, para o funcionamento do programa, um arquivo de indexação. Esse termo, segundo Wylie; Streeter (1978), refere-se a uma forma de descrever a geometria, o funcionamento e as propriedades do sistema, permitindo, assim, que o programa consiga resolver as condições de contorno. Desse modo, R2 retorna os valores das cargas hidráulicas transientes referidas anteriormente. A seguir, a figura 18 ilustra a interface de R2.

Figura 18 - Interface do subprograma R2.



```

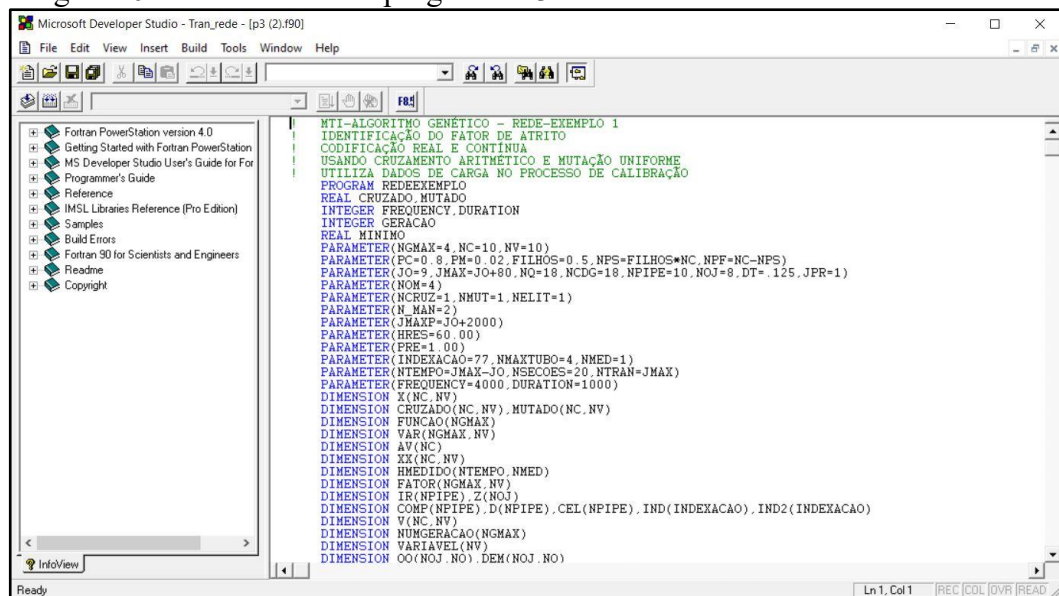
Microsoft Developer Studio - Tran_rede - [p2 (1).f90]
File Edit View Insert Build Tools Window Help
ANÁLISE DE TRANSIENTES EM UMA REDE HIDRÁULICA
PROGRAM REDEEXEMPLO
PARAMETER(JO=9, JMAX=240+JO, NPIPE=10, NOJ=8, NSECOES=20)
PARAMETER(NQ=18, NCDG=18, DT= .125, JPR=1, NMAXTUBO=4)
PARAMETER(NOM=4, NTUB=6)
PARAMETER(INDEXACAO=77)
PARAMETER(N_MAX=2)
PARAMETER(QMIN=0.000001)
DIMENSION IR(NPIPE), HO(NOJ), L(NPIPE), D(NPIPE), CEL(NPIPE)
DIMENSION RUG(NPIPE), IND(INDEXACAO), R(NPIPE), B(NPIPE)
DIMENSION HJ(NOJ, JMAX)
DIMENSION H(NSECOES, JMAX), Q(NSECOES, JMAX), CC(NMAXTUBO)
DIMENSION Z(NOJ)
DIMENSION CDG(1, NCDG)
DIMENSION OO(NOJ, NQ), VAZAOINICIAL(NPIPE)
DIMENSION IR1(NPIPE), IR2(NPIPE), CEL1(NPIPE), CEL2(NPIPE), Q1(NPIPE), Q2(NPIPE)
DIMENSION CDG1(1, NCDG), CDG2(1, NCDG)
REAL L
LEITURA E IMPRESSÃO DOS DADOS DE ENTRADA
DADOS GERAIS
OPEN(1, FILE='dados2.dat')
READ(1, *) (IR(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (HO(I), I=1, NOJ)
DO I=1, NOJ
  READ(1, *) (OO(I, J), J=1, NQ)
END DO
READ(1, *) (CDG1(I, J), J=1, NCDG)
READ(1, *) (CDG2(I, J), J=1, NCDG)
READ(1, *) (Z(I), I=1, NOJ)
READ(1, *) (L(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (D(I), I=1, NPIPE)
READ(1, *) (CEL(I), I=1, NPIPE)

```

Fonte: autoria própria (2021).

Por fim, o subprograma R3 é responsável por aplicar o algoritmo genético para estimar as rugosidades absolutas das tubulações da rede analisada. Nesse contexto, como dados de entrada, tem-se as características físicas do sistema, exceto a rugosidade absoluta das tubulações, as demandas nos nós, as cargas hidráulicas e as vazões do sistema no regime permanente e as cargas hidráulicas transientes calculadas no nó de interesse. Já como dados de saída, tem-se as rugosidades estimadas de todas as tubulações da rede hidráulica analisada. Portanto, a figura 19 ilustra a interface de R3.

Figura 19 - Interface do subprograma R3



```

Microsoft Developer Studio - Tran_rede - [p3 (2).f90]
File Edit View Insert Build Tools Window Help
NTI-ALGORITMO GENÉTICO - REDE-EXEMPLO 1
! IDENTIFICAÇÃO DO FATOR DE ATRITO
! CODIFICAÇÃO REAL E CONTÍNUA
! USANDO CRUZAMENTO ARITMÉTICO E MUTAÇÃO UNIFORME
! UTILIZA DADOS DE CARGA NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO
PROGRAM REDEEXEMPLO
REAL CRUZADO,MUTADO
INTEGER FREQUENCY,DURATION
INTEGER GERACAO
REAL MINIMO
PARAMETER(NGMAX=4,NC=10,NV=10)
PARAMETER(PC=0.8,PM=0.02,FILHOS=0.5,NPS=FILHOS*NC,NPF=NC-NPS)
PARAMETER(JO=9,JMAX=JO+80,NQ=18,NCDG=18,NPIPE=10,NOJ=8,DT=.125,JPR=1)
PARAMETER(NOM=4)
PARAMETER(NCRUZ=1,NMUT=1,NELIT=1)
PARAMETER(N_MAN=2)
PARAMETER(JHAXP=JO+2000)
PARAMETER(HRES=60.00)
PARAMETER(PRE=1.00)
PARAMETER(INDEXACAO=77,NMAXTUBO=4,NMED=1)
PARAMETER(NTEMPO=JMAX-JO,NSECOES=20,NTRAN=JMAX)
PARAMETER(FREQUENCY=4000,DURATION=1000)
DIMENSION Y(NC,NV)
DIMENSION CRUZADO(NC,NV),MUTADO(NC,NV)
DIMENSION FUNCAO(NGMAX)
DIMENSION VAR(NGMAX,NV)
DIMENSION AV(NC)
DIMENSION XX(NC,NV)
DIMENSION HMEDIDO(NTEMPO,NMED)
DIMENSION FATOR(NGMAX,NV)
DIMENSION IR(NPIPE),Z(NOJ)
DIMENSION COMP(NPIPE),D(NPIPE),CEL(NPIPE),IND(INDEXACAO),IND2(INDEXACAO)
DIMENSION V(NC,NV)
DIMENSION NUMGERACAO(NGMAX)
DIMENSION VARIAVEL(NV)
DIMENSION OO(NOJ,NO),DEH(NOJ,NO)

```

Fonte: autoria própria (2021).

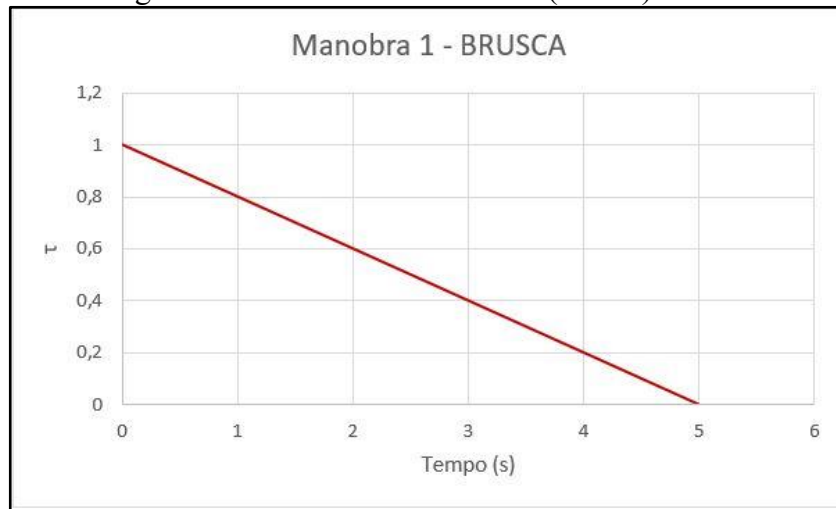
### 3.4 Manobras de Válvulas

Para que o transiente hidráulico seja provocado, é necessário que haja um evento dentro da rede hidráulica que provoque uma alteração no escoamento que percorre o interior das tubulações. Nesse contexto, tal mudança do estado permanente será provocada por uma manobra de válvula, no caso dessa pesquisa específica.

Como dito no final da seção 2.4.4, uma manobra de válvula é definida pela relação entre o coeficiente de abertura ou fechamento “ $\tau$ ” e o tempo “ $t$ ”. Vale ressaltar que manobras diferentes provocam transientes hidráulicos diferentes, o que pode influenciar na forma como o MTI-AG opera.

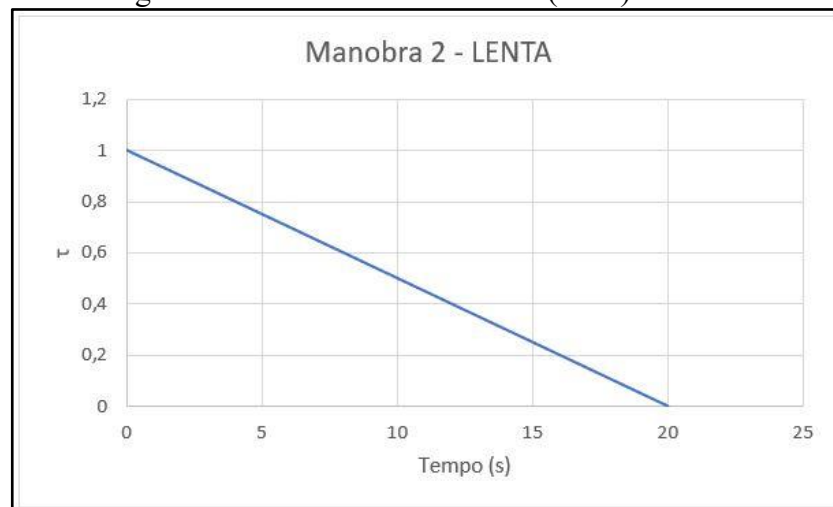
Sendo assim, as figuras 20 e 21 ilustram as manobras de válvulas que serão analisadas.

Figura 20 - Manobra de válvula 1 (brusca).



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 21 - Manobra de válvula 2 (lenta).



Fonte: autoria própria (2021).

### 3.5 Parâmetros do Algoritmo Genético

Tendo em vista que o presente estudo não tinha como foco a influência dos parâmetros do algoritmo genético no processo de calibração, foram analisados estudos feitos por demais pesquisadores, principalmente por Araújo (2003), a fim de se definir parâmetros que não são necessariamente os ideais para as situações analisadas, mas que são capazes de proporcionar uma calibração razoável dos cenários. Nesse contexto, chegou-se aos seguintes parâmetros do algoritmo genético para a calibração da rugosidade absoluta nas duas redes hidráulicas:

Tabela 1 - Parâmetros do Algoritmo Genético para a rede 1.

Representação dos parâmetros:	Real
Função Objetivo:	Equação (2.65)
Número da População (NC):	100
Número de Gerações (NG):	50
Número de Variáveis (NV):	5
Cruzamento:	1 (Aritmético)
Taxa de Cruzamento (PC):	80%
Mutação:	1 (Uniforme)
Taxa de Mutação (PM):	2%
Elitismo:	1 (escolha aleatória dos cromossomos pais restantes)
Taxa de Elitismo (FILHOS):	50%
Intervalo de tempo transiente ( $\Delta t$ ):	0,1 segundos
Tempo Transiente (NTEMPO):	30 segundos

Fonte: autoria própria (2021).

Tabela 2 - Parâmetros do Algoritmo Genético para a rede 2.

Representação dos parâmetros:	Real
Função Objetivo:	Equação (2.65)
Número da População (NC):	100
Número de Gerações (NG):	50
Número de Variáveis (NV):	10
Cruzamento:	1 (Aritmético)
Taxa de Cruzamento (PC):	80%
Mutação:	1 (Uniforme)
Taxa de Mutação (PM):	2%
Elitismo:	1 (escolha aleatória dos cromossomos pais restantes)
Taxa de Elitismo (FILHOS):	50%
Intervalo de tempo transiente ( $\Delta t$ ):	0,125 segundos
Tempo Transiente (NTEMPO):	30 segundos

Fonte: autoria própria (2021).

### 3.6 Verificação da influência da manobra

Ao final do processo iterativo do MTI-AG, foram adquiridos dados, para as duas redes, das rugosidades absolutas nas tubulações. A comparação entre as duas manobras de válvula dar-se-á, primeiramente, na observação da Função Objetivo. Nesse contexto, será observado qual manobra está atrelada aos resultados do MTI-AG que mais conseguiram se aproximar das cargas hidráulicas transientes observadas, sendo tal comparação realizada nas duas redes e em todos os processamentos do MTI-AG.

O segundo método de comparação e verificação da influência da manobra será o de determinação do Erro Médio Relativo (EMR) relacionado às rugosidades absolutas geradas pelos processamentos do AG (para cada rede, verificando qual manobra está atrelada aos resultados).

Nesse contexto, o EMR será utilizado como forma de medida de eficiência da calibração, o qual é apresentado a seguir:

$$EMR(\%) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{|w_i^{real} - w_i^{estimado}|}{w_i^{real}} \times 100 \right] \quad (3.1)$$

Onde:

**w**: representa a rugosidade absoluta “ $\epsilon$ ”;

**i**: número do tubo

**n**: número total de tubos na rede.

Dessa forma, é possível comparar e mensurar as influências das manobras de válvulas na identificação da rugosidade absoluta nas redes hidráulicas propostas. Além disso, outros parâmetros serão também verificados como uma forma de corroborar qual manobra apresentou melhores resultados.

### 3.7 Redes Hidráulicas

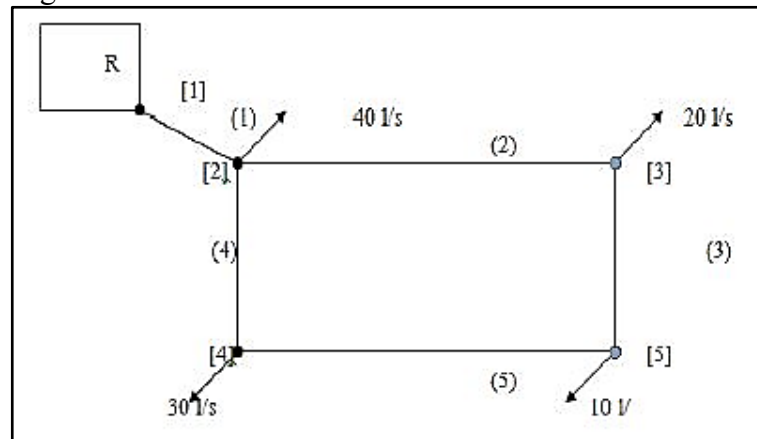
Para o presente estudo, o ideal era que fossem coletados dados de redes hidráulicas reais. Entretanto, por impossibilidade de coleta desses dados, duas redes hidráulicas fictícias de características divergentes foram utilizadas para a aplicação do MTI-AG, visto que ele não possui limitação quanto ao tamanho do sistema estudado.

#### 3.7.1 Rede Hidráulica 1

A rede hidráulica 1 (RH1) é composta por 1 anel de tubulações, 1 reservatório de carga constante a montante, 4 pontos de consumo (2, 3, 4 e 5) e uma válvula. Para o caso desse sistema, 4 processos iterativos serão realizados utilizando o MTI-AG, e a diferença entre eles será justamente a posição dessa válvula, a qual se situará, de cada vez, em um dos nós de consumo citados acima.

Nesse contexto, ao fim do processamento do AG, serão realizadas 4 comparações de resultado entre as manobras de válvula 1 e 2. A figura 22 a seguir ilustra RH1:

Figura 22 - Rede Hidráulica 1.



Fonte: Souza (2016).

Onde:

( ): representa o número do tubo.

[ ]: representa o nó de demanda e as 4 posições possíveis da válvula.

Assim, as características físicas dos tubos são:

Tabela 3 - Características Físicas dos tubos da Rede Hidráulica 1.

Tubo	L (m)	D (m)	Esp. (mm)	$\nu$ (Poisson)	E (GPa)	K (GPa)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
1	500,0	0,250	10	0,25	120	2,19	999
2	700,0	0,200	10	0,25	120	2,19	999
3	800,0	0,150	10	0,25	120	2,19	999
4	800,0	0,150	10	0,25	120	2,19	999
5	700,0	0,150	10	0,25	120	2,19	999

Fonte: autoria própria (2021).

Já as condições iniciais permanentes nos tubos produzidas pela primeira parte do Método Transiente Inverso, as quais serão consideradas como observadas ou reais, são:

Tabela 4 - Condições iniciais permanentes nos tubos da Rede Hidráulica 1.

Tubo	a (m/s)	a* (m/s)	$\varepsilon$ (mm)	Qinicial (m <sup>3</sup> /s)	Ho (m)
1	1104,1	1250,0	0,0500	0,100001	453,00
2	1251,7	1400,0	0,0500	0,036110	446,45
3	1156,6	1333,3	0,0500	0,023890	442,39
4	1217,4	1333,3	0,0500	0,016110	437,52
5	1217,4	1400,0	0,0500	0,006110	438,14

Fonte: autoria própria (2021).

Os valores apresentados na Tabela anterior para a celeridade “a” nos tubos não podem ser utilizados durante o método, uma vez que o intervalo de tempo que a onda percorre as tubulações deve ser o mesmo para todas elas. Nesse contexto, a fim de que as condições de contorno para junções possam ser usadas, Chaudhry (1987) recomenda o uso da seguinte equação:

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (1 \text{ até } N) \quad (3.2)$$

Onde:

**N**: é um número inteiro e igual ao número de trechos no qual o i-ésimo conduto é dividido;

**L<sub>i</sub>**: é o comprimento do i-ésimo conduto;

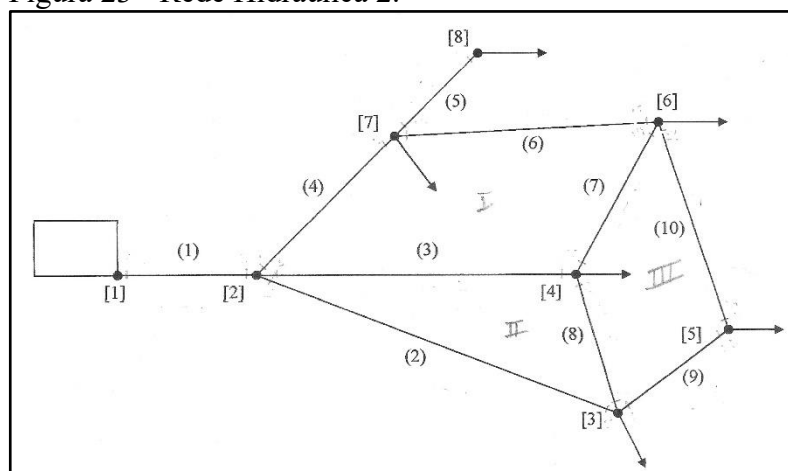
**a**: é a celeridade do i-ésimo conduto e N é o número de tubos no sistema.

### 3.7.2 Rede Hidráulica 2

A rede hidráulica 2 (RH2) é composta por 3 anéis de tubulações, 1 tubulação ramificada, 1 reservatório de carga constante a montante, 6 pontos de consumo (3, 4, 5, 6, 7 e 8) e uma válvula. Para o caso desse sistema, 1 processo iterativo será realizado no Algoritmo Genético, e a posição da válvula será no nó 4, visto que é o ponto de mais conexões da rede.

Nesse contexto, ao fim do processamento do MTI-AG, será realizada 1 comparação de resultado entre as manobras de válvula 1 e 2. A figura 23 a seguir ilustra RH2:

Figura 23 - Rede Hidráulica 2.



Fonte: Andrade (2017).

Onde:

( ): representa o número do tubo.

[ ]: representa o nó de demanda e as 4 posições possíveis da válvula.

Assim, as características físicas dos tubos são:

Tabela 5 - Características Físicas dos tubos da Rede Hidráulica 2.

Tubo	L (m)	D (m)	Esp. (mm)	$\nu$ (Poisson)	E (GPa)	K (GPa)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
1	700,0	0,500	10	0,25	120	2,19	999
2	1800,0	0,250	10	0,25	120	2,19	999
3	1520,0	0,400	10	0,25	120	2,19	999
4	1220,0	0,300	10	0,25	120	2,19	999
5	600,0	0,300	10	0,25	120	2,19	999
6	1220,0	0,200	10	0,25	120	2,19	999
7	920,0	0,250	10	0,25	120	2,19	999
8	300,0	0,150	10	0,25	120	2,19	999
9	600,0	0,200	10	0,25	120	2,19	999
10	1220,0	0,100	10	0,25	120	2,19	999

Fonte: autoria própria (2021).

Já as condições iniciais permanentes nos tubos produzidas pela primeira parte do Método Transiente Inverso, as quais serão consideradas como observadas ou reais, são:

Tabela 6 - Condições iniciais permanentes nos tubos da Rede Hidráulica 2.

Tubo	a (m/s)	a* (m/s)	$\varepsilon$ (mm)	Qinicial (m <sup>3</sup> /s)	Ho (m)
1	1104,1	1400,0	0,0500	0,414966	60,00
2	1251,7	1600,0	0,0500	0,056819	55,76
3	1156,6	1520,0	0,0500	0,209041	47,71
4	1217,4	1394,3	0,0500	0,149137	48,05
5	1217,4	1600,0	0,0500	0,075010	44,59
6	1289,0	1394,3	0,0500	0,014141	40,85
7	1251,7	1472,0	0,0500	0,076770	42,09
8	1329,9	1200,0	0,0500	0,007269	40,27
9	1289,0	1600,0	0,0500	0,034092	60,00
10	1374,9	1394,3	0,0500	0,004091	55,76

Fonte: autoria própria (2021).

Os valores apresentados na Tabela anterior para a celeridade “a” nos tubos não podem ser utilizados durante o método, uma vez que o intervalo de tempo que a onda percorre as tubulações deve ser o mesmo para todas elas. Nesse contexto, a fim de que as condições de contorno para junções possam ser usadas, a recomendação de Chaudhry (1987) será novamente adotada.



## 4. RESULTADOS

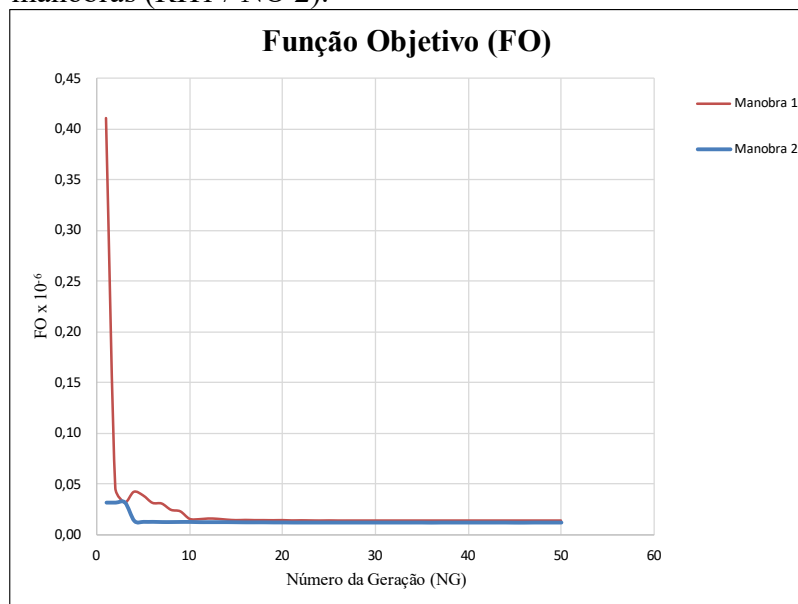
### 4.1 Rede Hidráulica 1

A seguir, seguem os resultados encontrados para a rede RH1. Vale lembrar que foram realizados 4 processos iterativos, nos quais a posição da válvula variava. Nesse contexto, tentou-se analisar todas as condições possíveis de configuração, a fim de verificar com mais segurança a influência das manobras nos resultados produzidos.

#### 4.1.1 Válvula no nó 2

De acordo com a figura 24, a manobra de válvula que apresentou um menor valor para a função objetivo foi a 2.

Figura 24 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 2).

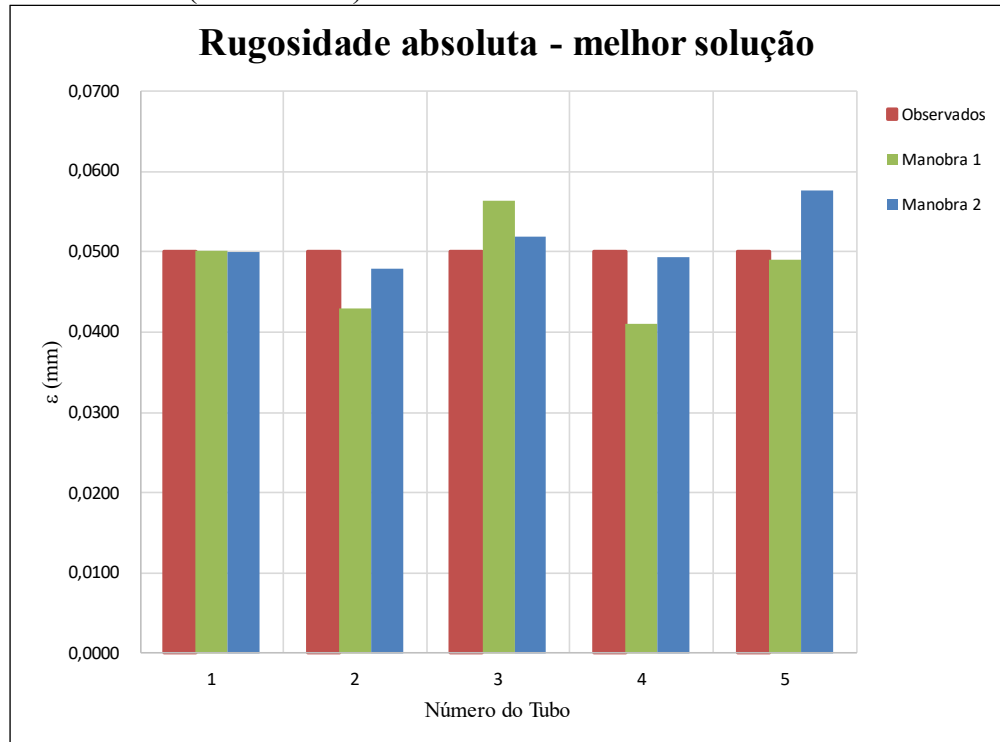


Min FO (x 10 <sup>-6</sup> )	
Man. 1	Man. 2
0,013300	0,011800

Fonte: autoria própria (2021).

De acordo com a figura 25, a manobra de válvula 2 apresentou um menor Erro Médio Relativo para o parâmetro rugosidade absoluta.

Figura 25 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 2).



Rugosidade absoluta (mm)						
Tubo	Observado	Estimado		Erro Relativo (%)		Min E.R.
		Man. 1	Man. 2	Man. 1	Man. 2	
1	0,0500	0,0501	0,0500	0,20	0,00	0,00
2	0,0500	0,0429	0,0479	14,20	4,20	4,20
3	0,0500	0,0564	0,0519	12,80	3,80	3,80
4	0,0500	0,0411	0,0494	17,80	1,20	1,20
5	0,0500	0,0490	0,0576	2,00	15,20	2,00

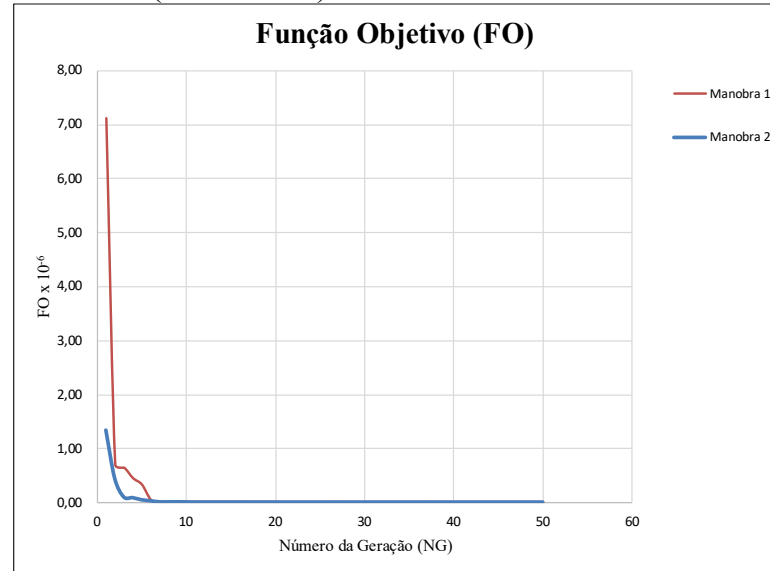
Erro Médio Relativo (%)	
Manobra 1	Manobra 2
9,40	4,88

Fonte: autoria própria (2021).

### 4.1.2 Válvula no nó 3

De acordo com a figura 26, a manobra de válvula que apresentou um menor valor para a função objetivo foi a 2.

Figura 26 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 3).

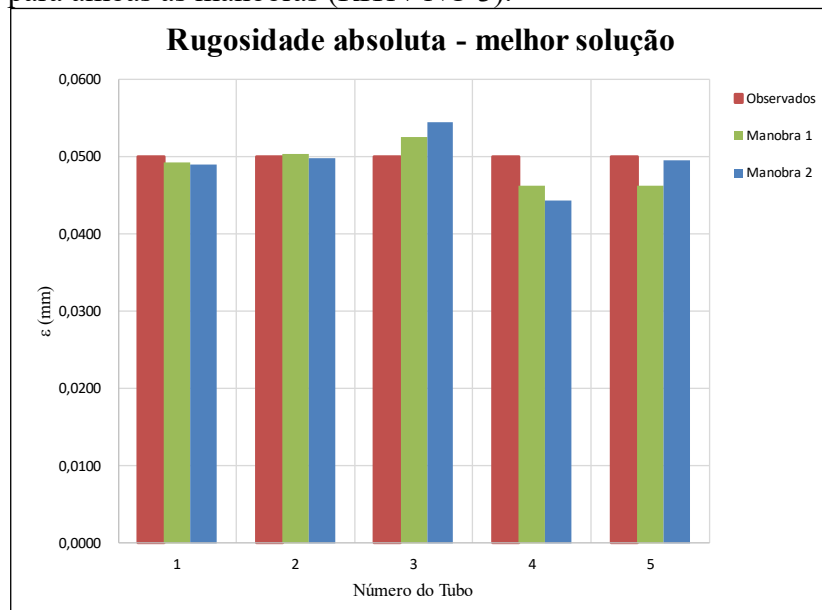


Min FO ( $\times 10^{-6}$ )	
Man. 1	Man. 2
0,016200	0,013500

Fonte: autoria própria (2021).

De acordo com a figura 27, a manobra de válvula 1 apresentou um menor Erro Médio Relativo para o parâmetro rugosidade absoluta.

Figura 27 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 3).



Rugosidade absoluta (mm)						
Tubo	Observado	Estimado		Erro Relativo (%)		Min E.R.
		Man. 1	Man. 2	Man. 1	Man. 2	
1	0,0500	0,0492	0,0490	1,60	2,00	1,60
2	0,0500	0,0504	0,0498	0,80	0,40	0,40
3	0,0500	0,0526	0,0544	5,20	8,80	5,20
4	0,0500	0,0462	0,0444	7,60	11,20	7,60
5	0,0500	0,0463	0,0495	7,40	1,00	1,00

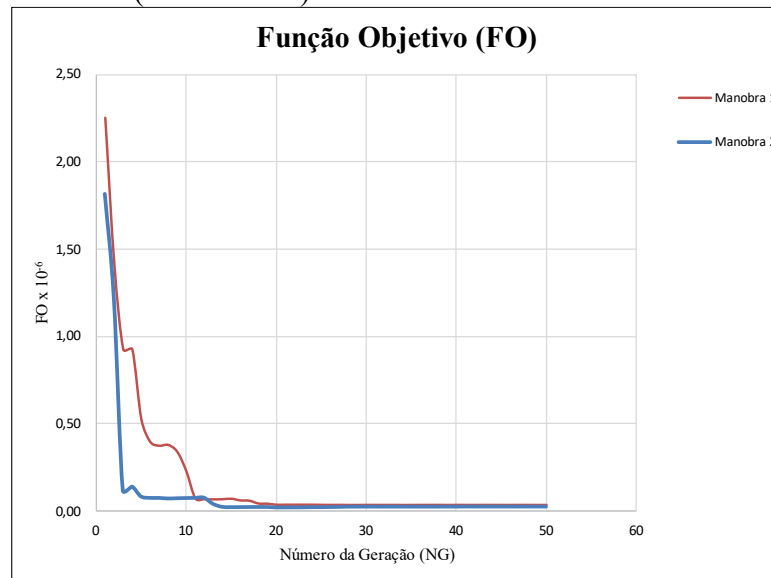
Erro Médio Relativo (%)	
Manobra 1	Manobra 2
4,52	4,68

Fonte: autoria própria (2021).

#### 4.1.3 Válvula no nó 4

De acordo com a figura 28, a manobra de válvula que apresentou um menor valor para a função objetivo foi a 2.

Figura 28 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 4).

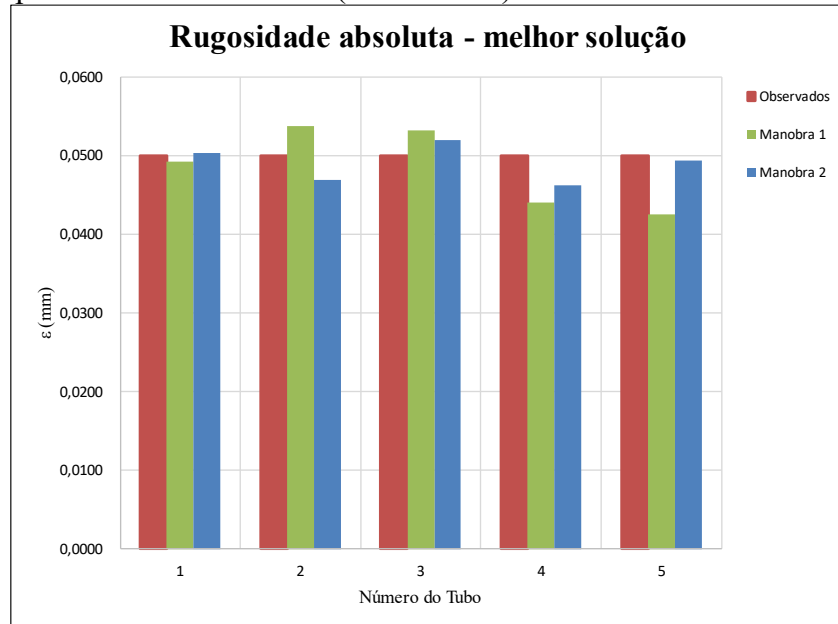


Mín FO (x 10 <sup>-6</sup> )	
Man. 1	Man. 2
0,036500	0,020600

Fonte: autoria própria (2021).

De acordo com a figura 29, a manobra de válvula 2 apresentou um menor Erro Médio Relativo para o parâmetro rugosidade absoluta.

Figura 29 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 4).



Rugosidade absoluta (mm)						
Tubo	Observado	Estimado		Erro Relativo (%)		Min E.R.
		Man. 1	Man. 2	Man. 1	Man. 2	
1	0,0500	0,0492	0,0504	1,60	0,80	0,80
2	0,0500	0,0538	0,0469	7,60	6,20	6,20
3	0,0500	0,0532	0,0520	6,40	4,00	4,00
4	0,0500	0,0440	0,0462	12,00	7,60	7,60
5	0,0500	0,0426	0,0494	14,80	1,20	1,20

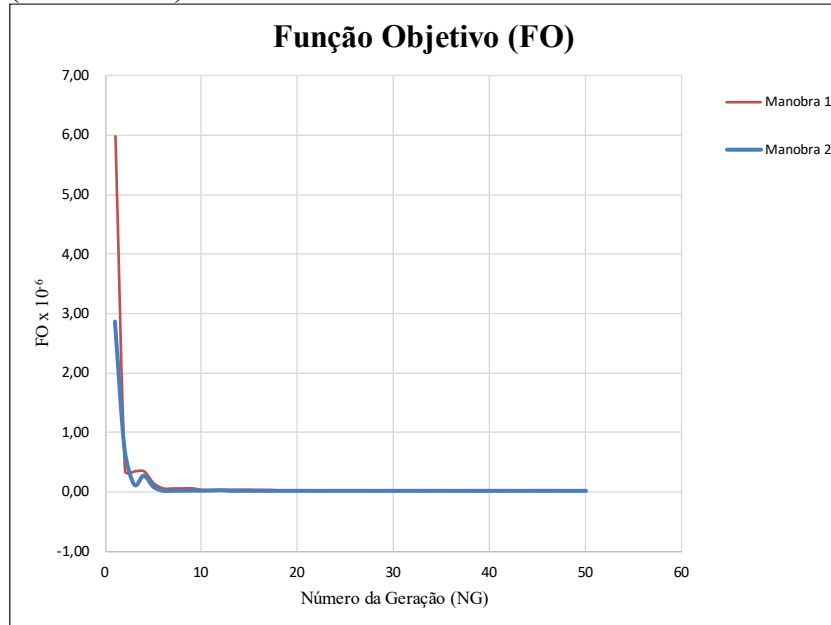
Erro Médio Relativo (%)	
Manobra 1	Manobra 2
8,48	3,96

Fonte: autoria própria (2021).

#### 4.1.4 Válvula no nó 5

De acordo com a figura 30, a manobra de válvula que apresentou um menor valor para a função objetivo foi a 2.

Figura 30 - Funções Objetivo mínimas para ambas as manobras (RH1 / NÓ 5).

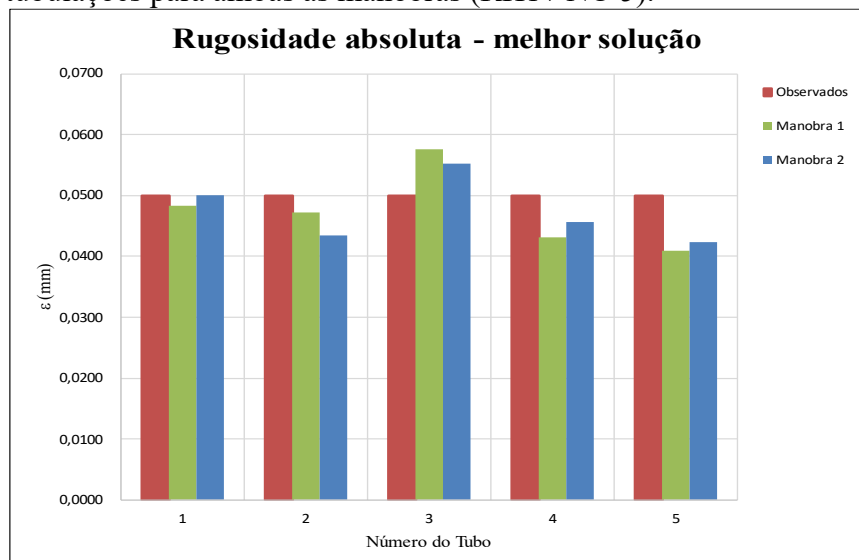


Min FO (x 10 <sup>-6</sup> )	
Man. 1	Man. 2
0,021800	0,013200

Fonte: autoria própria (2021).

De acordo com a figura 31, a manobra de válvula 2 apresentou um menor Erro Médio Relativo para o parâmetro rugosidade absoluta.

Figura 31 - EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH1 / NÓ 5).



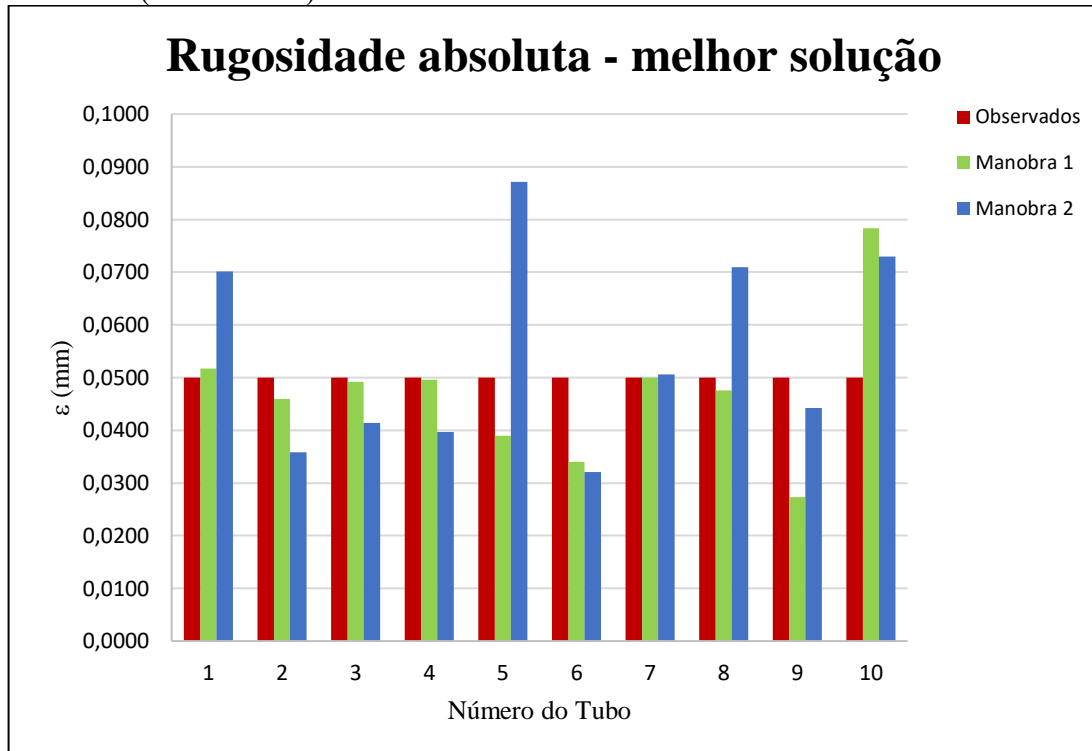


Min FO ( $\times 10^{-6}$ )	
Man. 1	Man. 2
0,069841	0,004908

Fonte: autoria própria (2021).

De acordo com a figura 33, a manobra de válvula 1 apresentou um menor Erro Médio Relativo para o parâmetro rugosidade absoluta.

Figura 33: EMRs referentes à rugosidade absoluta das tubulações para ambas as manobras (RH2 / NÓ 4).



Rugosidade absoluta (mm)						
Tubo	Observado	Estimado		Erro Relativo (%)		Min E.R.
		Man. 1	Man. 2	Man. 1	Man. 2	
1	0,0500	0,0517	0,0701	3,40	40,20	3,40
2	0,0500	0,0459	0,0358	8,20	28,40	8,20
3	0,0500	0,0492	0,0414	1,60	17,20	1,60
4	0,0500	0,0496	0,0397	0,80	20,60	0,80
5	0,0500	0,0390	0,0871	22,00	74,20	22,00
6	0,0500	0,0340	0,0321	32,00	35,80	32,00
7	0,0500	0,0500	0,0506	0,00	1,20	0,00
8	0,0500	0,0476	0,0709	4,80	41,80	4,80
9	0,0500	0,0273	0,0442	45,40	11,60	11,60
10	0,0500	0,0783	0,0730	56,60	46,00	46,00

Erro Médio Relativo (%)	
Manobra 1	Manobra 2
17,48	31,70

Fonte: autoria própria (2021).



### 4.3 Discussão dos resultados

Em posse de todos os resultados, pode-se constatar que a Manobra de Válvula 2, ou seja, a mais lenta, apresentou valores da Função Objetivo menores em todas as ocasiões, tanto na Rede Hidráulica 1, quanto na Rede Hidráulica 2. Além disso, em 3 das 4 simulações feitas utilizando os parâmetros de RH1, obteve-se um EMR menor para os valores de rugosidade absoluta nas tubulações quando foi utilizada a segunda manobra. Vale ressaltar que, nessa determinada ocasião na qual os resultados melhores estão atrelados à primeira manobra, ambas tiveram uma qualidade de calibração quase idêntica.

Por outro lado, os resultados de EMR na RH2 demonstram que possivelmente a metodologia adotada não está bem adaptada para redes hidráulicas maiores. Outra hipótese que justificaria erros maiores de 15% comparando-se as cargas hidráulicas observadas e calculadas na rede de número 2 seria a de haver a necessidade de se coletar mais dados da RH2, realizando medições em diversos nós simultaneamente, para que o processo iterativo realizado pelo Algoritmo Genético possa ter dados mais direcionados para operar. Fato é que os resultados de EMR apresentados para RH2 não dão segurança de que o MTI-AG definiu bem a situação, não sendo possível determinar com clareza a influência das manobras nesse caso.

## 5. CONCLUSÃO

Diante do que foi exposto nas seções anteriores, evidencia-se que o trabalho apresentado tem como base o processo de calibração de redes hidráulicas com dados transientes, buscando entender melhor como se dá a influência das manobras de válvula nos resultados estimados por tais estratégias de solução de sistemas de abastecimento de água.

Nesse contexto, estudou-se primeiramente quais são os critérios a serem observados para definir a melhor forma de resolução de problemas envolvendo redes hidráulicas. Dito isso, definiu-se que, para situações nas quais os parâmetros fundamentais da rede são desconhecidos e para situações em que o transiente hidráulico é levado em consideração, o Método Transiente Inverso (MTI) aliado a uma ferramenta de otimização seria a melhor forma de estimar as soluções. Como ferramenta de otimização se escolheu o Algoritmo Genético (AG), uma vez que ele permite encontrar ou o máximo ou o mínimo global de uma função objetivo de uma forma mais eficaz, uma vez que seu funcionamento permite ampliar consideravelmente o espaço de busca inicial. Ademais, estudou-se o procedimento adotado pelo Método Transiente Inverso, o qual utiliza o Método das Características para calcular o estado permanente e o estado transiente na rede hidráulica analisada.

Desse modo, para a verificação da influência das manobras de válvula na calibração feita pelo MTI-AG, foram usadas 2 redes hidráulicas e 2 manobras, que juntas forneceram dados importantes a respeito do assunto em questão. Na primeira rede, percebe-se uma tendência da manobra lenta de fornecer estimativas mais próximas da realidade. Contudo, ao analisar os resultados da segunda rede, percebe-se que tal tendência desaparece abruptamente, havendo uma discrepância entre os valores de rugosidade absoluta estimados. Nesse caso, o Erro Médio Relativo (EMR) da manobra 1 foi de 17,48% e o EMR da manobra 2 foi de 31,70%, uma diferença de 14,22%. Tal fato levanta 2 hipóteses:

- A manobra de válvula 2, a partir do momento em que se aumenta o tamanho da rede, influencia a o MTI-AG a achar estimativas piores que caso ele usasse a manobra 1.
- A rede hidráulica 2 apresenta dados não representativos, uma vez que houve uma grande discrepância entre as rugosidades absolutas observadas e estimadas. Como dito anteriormente, tal fato pode ter sido acarretado pela coleta insuficiente de dados referentes ao funcionamento da rede nos seus diversos pontos, fato que dificultou a processo iterativo realizado pelo AG.

Portanto, conclui-se que o trabalho alcançou seu objetivo, uma vez que, de fato, foi comprovado que cada manobra induz à obtenção de resultados diferentes, caracterizando uma

influência. Além disso, foi possível comparar qual manobra colaborou para a aquisição de dados mais condizentes com os reais. Vale ressaltar que, os resultados obtidos nessa pesquisa não estabelecem qual manobra é a mais indicada para determinada situação, uma vez que, para a realização de tal feito, são necessárias inúmeras simulações, com inúmeras manobras e inúmeras redes para se perceber e se estabelecer padrões.

Por fim, o método de análise e de estimativa MTI-AG foi aplicado com sucesso, comprovando mais uma vez a sua eficácia na resolução desse tipo de problema envolvendo redes hidráulicas. Todavia, vale lembrar que sua exatidão está relacionada com os dados de entrada. Portanto, quanto mais informações coletadas em campo, melhor será o retorno do método.

## REFERÊNCIAS

- ALEM SOBRINHO, P.; CONTRERA, R. C. **Redes de Distribuição de Água (1/2)**. Apresentação da disciplina de Saneamento II. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.
- ANDRADE, Paula Nobre de. **Estudo comparativo da calibração de rugosidades em redes de distribuição de água submetidas a regimes de escoamento transiente rápido e lento** / Paula Nobre de Andrade. – 2017. 98 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BRASIL, Ministério da Cidades. **DTA – Documento de Apoio Técnico nº A2. Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água**. 2004.
- CHAUDHRY, M. H. *Applied hydraulic transientes*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.
- CHEUNG, Peter Batista. **Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento via Algoritmo Genéticos Multiobjetivo**. 2004, 288 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- DEJONG, K. *The analysis and behavior of a class of genetic adaptive systems*. University of Michigan, 1975. (PhD thesis).
- GEN M.; CHENG, R. *Genetic algorithms and engineering design*. Wiley Series in Engineering Design and Automation, John Wiley & Sons, 1997.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley, 1989.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, 1975.
- LACERDA E. e CARVALHO A.: **Introdução aos Algoritmos Genéticos, Sistemas Inteligentes - Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais**, C. Galvão e M. Valença (Editores), Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, páginas 99-150, Vol. 7, Coleção Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH, Porto Alegre, dezembro 1999.
- MICHALEWICZ, Z. – *Genetic algorithms + data structures = evoluiton programs*, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.

PATRÍCIO, Robinson José de Oliveira. **Análise de perdas de rede de distribuição de água em um subsetor da cidade de Presidente Prudente – SP** / Robinson José de Oliveira Patrício. Ilha Solteira: [s.n.], 2007. 131 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ilha Solteira.

PORTO, RODRIGO DE MELO. **Hidráulica Básica** / Rodrigo de Melo Porto. – 4. ed. – São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.

PWT DISTRIBUIDORA DE FERRAMENTAS LTDA. **Soluções em Ferramentas**, 2021. Instrumentos de Testes e Medição.

Disponível em: <<https://www.solucoesemferramentas.com.br/rugosimetro-portatil-sj-210-surfrest-178-561-02a-mitutoyo-pr-2375-308619.htm>>. Acesso em: 20 de mar. De 2021.

SOUZA, Antonio Carlos de. **Influência de manobras de válvulas na identificação de vazamentos em redes de distribuição de água utilizando dados transientes e algoritmo genético**. 2016. 109 p. 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, 2016.

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

VASCONCELOS, J. G. **Hidráulica Transiente Aplicada a Saneamento**. – 1. ed. – Brasília, 2008. 130 p.

VIANA, Francisco Marques. **A influência de manobras de válvulas na identificação do fator de atrito em tubulações de rede de distribuição de água**. 2014. 83 p. 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.

WYLIE, Evan B.; STREETER, Victor L. *Fluid transients*. New York: McGraw-Hilli, 1978.