



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

**BÁRBARA CRISTINA ALVES DA COSTA**

**A INFLUÊNCIA DE ERROS DE MEDIÇÃO DE CARGA NA CALIBRAÇÃO DE  
FATOR DE ATRITO EM TUBULAÇÕES DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
ATRAVÉS DO MÉTODO TRANSIENTE INVERSO E ALGORITMO GENÉTICO**

**FORTALEZA**

**2014**

**BÁRBARA CRISTINA ALVES DA COSTA**

**A INFLUÊNCIA DE ERROS DE MEDIÇÃO DE CARGA NA CALIBRAÇÃO DE FATOR DE ATRITO EM TUBULAÇÕES DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO MÉTODO TRANSIENTE INVERSO E ALGORITMO GENÉTICO**

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

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy Araújo.

**FORTALEZA**

**2014**

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

---

C87i

Costa, Bárbara Cristina Alves da.

A Influência de erros de medição de carga na calibração de fator de atrito em tubulações de redes de distribuição de água através do método transiente inverso e algoritmo genético / Bárbara Cristina Alves da Costa. – 2014.

108 f. : il. , enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2014.

Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

1. Recursos hídricos. 2. Rede hidráulica. 3. Transiente hidráulico. I. Título.

---

CDD 627


**BÁRBARA CRISTINA ALVES DA COSTA**

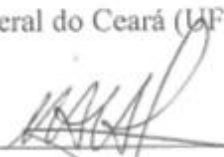
**A INFLUÊNCIA DE ERROS DE MEDIÇÃO DE CARGA NA CALIBRAÇÃO DE FATOR DE ATRITO EM TUBULAÇÕES DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO MÉTODO TRANSIENTE INVERSO E ALGORITMO GENÉTICO**


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

Aprovada em: 10/11/2014.

**BANCA EXAMINADORA**

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

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

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luís Henrique Magalhães Costa  
Universidade Estadual do Vale do Acaraú (UVA-CE)

A Deus, criador de todas as coisas e Pai misericordioso.

A minha mãe, Maria Raimunda Alves, com quem aprendo continuamente, a quem amo com todas as forças do meu coração, por quem eu insisto e persisto em ir cada vez mais longe.

## AGRADECIMENTO

Ao Instituto Federal do Piauí, na pessoa do reitor, Paulo Henrique de Lima e ex-reitor, Francisco das Chagas Santana, à professora Isaura, ao professor Marcelo Guerra, ao pró-reitor de pesquisa e inovação Airton Brandim, aos meus chefes Antônio Filho e Anderson Lopes e à diretora Ana Lima, pela parcela de contribuição dada por cada um.

Ao Prof. Dr. John Kenedy Araújo, pela excelente orientação, por todo conhecimento compartilhado, pela paciência, atenção concedida e pelo crédito.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro e Prof. Dr. Luís Henrique Magalhães Costa pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores do mestrado, Assis, Capelo, Iran, Nilson e Ticiania, pela colaboração de cada um, e aos funcionários da UFC, em especial a Shirley, pela atenção.

À minha amiga, Gabriela Celso e ao seu esposo e meu amigo Lucas, por todo apoio, incentivo, paciência e acima de tudo amizade dedicada durante todo esse período, sem a qual, sinceramente, não sei como teria sido essa caminhada.

Aos demais colegas da turma do mestrado, Viana, Joãosué, Hércules, Maria José, Wagner, pela colaboração fossem com dicas, sugestões ou palavras de incentivo.

Ao meu esposo, Wilson Francisco, pelo amor, carinho, paciência e valorização.

Às minhas irmãs, Lourdinha, Silvinha, pelo exemplo de luta, aos meus sobrinhos Kaio, Iago, Igor e Marie, pelo carinho e por serem o motivo de todo esse esforço.

À minha prima, Nazaré Alves, por ter sido uma irmã pra mim, sempre.

Ao amigo, Francisco das Chagas Fontenelle, pelos ensinamentos de toda a vida.

Aos meus amigos, Luzana Brasileiro, grande inspiração de dedicação, disciplina e entusiasmo, pelas dicas e ajuda na construção desse trabalho, ao Franciéric pelo incentivo, a Dário, Camila, Eliane, Rogério, Danilo, Cassandra, Alexandre, Humberto, Edson, Zózimo e Samuel, pelos momentos de descontração, pelo carinho, paciência com minhas lamentações, momentos de risada, e aos demais amigos que de alguma forma fizeram parte da construção deste trabalho pela declarada torcida para que tudo desse certo.

A Sra. Amadea e a sua família por terem me acolhido sempre que estive em Fortaleza, pelo carinho e cuidado imensos.

Ao Prof. Dr. Fábio Britto, pela ajuda valorosa na reta final deste trabalho.

“Lata d’água na cabeça,  
Lá vai Maria. Lá vai Maria:  
Sobe o morro e não se cansa.  
Pela mão leva a criança.  
Lá vai Maria.  
Maria, lava roupa lá no alto  
Lutando pelo pão de cada dia,  
Sonhando com a vida do asfalto  
Que acaba onde o morro principia.”

*Lata d’água* na cabeça por Candeias

## RESUMO

O estudo de redes hidráulicas para fins de operação ou análise de viabilidade para ampliação ou recuperação das mesmas é iniciado pela calibração, neste contexto, entendida como identificação de parâmetros tais como: fator de atrito, rugosidade e diâmetro. O Método Transiente Inverso em conjunto com Algoritmo genético se mostra eficiente nessa tarefa. O referido método emprega o Método das Características na solução das equações de movimento para escoamento transiente em tubos de redes e a otimização das soluções é baseada na Teoria Evolutiva e avaliada por uma função objetivo, que neste estudo é o somatório do módulo da diferença entre as cargas medidas e calculadas pelo modelo para cada conjunto de soluções. Considerando que o objetivo do desenvolvimento de modelos matemáticos para a calibração de redes hipotéticas é a utilização dos mesmos em redes reais, e que nessas, a coleta de dados de carga está sujeita a erros de medição, seja devido a defeitos nos equipamentos seja por condições ambiente desfavoráveis ou outros efeitos aleatórios e tendo em vista a relevância dos fatores de atrito nas tubulações, pela sua relação com perdas de carga que devem ser controladas para um ótimo funcionamento de redes, garantindo um abastecimento contínuo em quantidade e condições de funcionamento adequados, este trabalho propõe-se a verificar a interferência da presença de erros de medição de carga transiente na identificação dos fatores de atrito em duas redes hidráulicas hipotéticas. As mesmas são de portes diferentes com relação ao número de anéis, nós e tubos. Ambas são alimentadas por um reservatório cada. As condições transientes são atribuídas a uma manobra de válvula instalada em um dos nós de cada rede. A coleta de dados de carga é restrita a 20% dos nós de cada rede, sendo que um deles é o nó onde se encontra a válvula. O tempo de observação do transiente hidráulico é restrito ao tempo da manobra de válvula, 20s, e ocorre em intervalos de 0,1s, resultando em 200 registros de carga. A condição permanente das redes é inicialmente desconhecida o conhecimento acerca da mesma é restrito a carga nos reservatórios e demandas nos nós, bem como diâmetros dos tubos, os fatores de atrito são inicialmente estipulados. A determinação das condições permanente e transiente bem como a identificação dos fatores de atrito é realizada com a utilização de um modelo hidráulico e geram cargas transientes que são consideradas convencionalmente verdadeiras, essas então recebem incrementos de diversos erros sistemáticos e aleatórios, que geram novas cargas e essas são consideradas coletadas com erros de medição. A partir dessas novas cargas são realizadas identificações de fatores de atrito, os quais são comparados com os que foram obtidos considerando um caso ideal de cargas sem erros de medição. A referida comparação é



realizada através do Erro Médio Relativo e da Função Objetivo ótima. Os resultados encontrados demonstram que os erros de medição interferem na identificação dos fatores de atrito apesar de não ser possível delinear uma relação entre os mesmos.

**Palavras-chave:** Análise de rede hidráulica. Problema inverso. Perda de carga. Transiente hidráulico. Incerteza de medição.

## ABSTRACT

The study of hydraulic networks for operation or analysis of the feasibility for enlarging or recovering is started by calibration. In this context, calibration can be interpreted as the identification of parameters such as friction factor, roughness and diameter. The Inverse Transient Method in combination with genetic algorithm is an efficient technique to accomplish this task. It employs the Method of Characteristics to solve the equations of motion for transient flow in pipe networks. The optimization of solutions is based on the Evolutionary Theory and evaluates an objective function, which, in this study, is the sum of the module differences between the calculated loads measured by the model for each set of solutions. The goal of the development of mathematical models for the calibration of hypothetical networks is their use in real networks. Thus, the collection of load data are subject to measurement errors, either due to defects in the equipment or by unfavorable environmental conditions. Should also be considered other random effects taking into account the relevance of friction factors in pipes, through its relationship to loss of cargo that must be controlled for optimal functioning of networks. Together, these factors guarantee a continuous supply of adequate quantity and conditions of operation. This study aims to verify the interference of errors in transient load measurements in the identification of friction factors in two hypothetical hydraulic networks. They are both different with respect to the number of rings, knots and tubes. Both are fed by a single reservoir. Transient conditions are assigned to a maneuver valve installed on each node of the network. The load data collection is restricted to 20% of the nodes of each network and, one of these, is the node where the valve is present. The observation time of the hydraulic transient is restricted to the time of maneuvering valve, 20s, and occurs in intervals of 0.1 s, resulting in 200 load records. The permanent condition of the network is initially unknown. The knowledge about the same is restricted to load in reservoirs and demands on nodes as well as tube diameters. The friction factors are initially stipulated. The determination of the permanent and transient conditions and the identification of friction factors are made using a hydraulic model to generate transient loads, which are conventionally considered to be true. Then these loads receive systematic and random errors, which generate these new loads and are considered collected with measurement errors. From these new loads, friction factors are identified and compared with those obtained considering an ideal case with no measurement error loads. This comparison is performed using the mean relative error and optimal Objective Function. The results show that measurement errors

affect the identification of friction factors, although it is not possible to draw a relationship between them.

**Keywords:** Hydraulic network analysis. Opposite problem. Loss of load. Hydraulic transient. Uncertainty of measurement.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Linha de energia e linha piezométrica em escoamento permanente .....	26
Figura 2 – Linhas Características no plano x-t. ....	33
Figura 3 – Exemplo de Abertura ou fechamento total de válvula .....	34
Figura 4 – Algoritmo Genético típico.....	42
Figura 5 – Rede Exemplo A .....	56
Figura 6 – Rede Exemplo B.....	57
Figura 8 – Cruzamento ponto a ponto com representação binária .....	59
Gráfico 1- Manobra de Válvula .....	58
Gráfico 2– Cargas transientes estimadas – nó 5 – Rede exemplo A .....	62
Gráfico 3– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 1- Rede exemplo A - SE.....	64
Gráfico 4– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 2 - Rede exemplo A - SE.....	64
Gráfico 5– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 3 - Rede exemplo A - SE.....	64
Gráfico 6 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 4 - Rede exemplo A - SE.....	65
Gráfico 7– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 5 - Rede exemplo A - SE.....	65
Gráfico 8– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 6 - Rede exemplo A - SE.....	65
Gráfico 9– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 7 - Rede exemplo A - SE.....	66
Gráfico 10– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 8 - Rede exemplo A - SE.....	66
Gráfico 11– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 9 - Rede exemplo A - SE.....	66
Gráfico 12– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 10 - Rede exemplo A – SE .....	67
Gráfico 13 – EMR – Rede Exemplo A – Casos de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SE.....	68
Gráfico 14 – EMR – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE .....	69
Gráfico 15 –FO <sub>ótima</sub> – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SE.....	69
Gráfico 16– FO <sub>ótima</sub> – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE .....	70
Gráfico 17– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 1 - Rede exemplo A – CE.....	71
Gráfico 18 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 2 - Rede exemplo A – CE.....	72
Gráfico 19– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 3 - Rede exemplo A – CE.....	72
Gráfico 20 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 4 - Rede exemplo A – CE.....	72
Gráfico 21 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 5 - Rede exemplo A – CE.....	73

Gráfico 22 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 7 - Rede exemplo A – CE.....	73
Gráfico 23 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 8 - Rede exemplo A – CE.....	74
Gráfico 24 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 9 - Rede exemplo A – CE.....	74
Gráfico 25 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 10 - Rede exemplo A – CE.....	74
Gráfico 26 – EMR – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE.....	76
Gráfico 27 – EMR – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE.....	77
Gráfico 28 – $FO_{ótima}$ – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE.....	77
Gráfico 29 – $FO_{ótima}$ – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE.....	78
Gráfico 30 – Comparação $FO_{ótima}$ para todos os cenários de medição de carga – Rede exemplo A – SE.....	79
Gráfico 31– Comparação entre $FO_{ótima}$ para todos os cenários de medição de carga – Rede A – CE.....	79
Gráfico 32 – Cargas transientes estimadas – nó 4 e nó 7 – Rede exemplo B.....	80
Gráfico 33 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 1 – Rede exemplo B – Sem Elitismo.....	82
Gráfico 34 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 2 - Rede exemplo B – SE .	82
Gráfico 35 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 3 - Rede exemplo B – SE .	83
Gráfico 36– Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 4 - Rede exemplo B – SE ..	83
Gráfico 37 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 5 - Rede exemplo B – SE .	83
Gráfico 38 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 6 - Rede exemplo B – SE .	84
Gráfico 39 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 7 - Rede exemplo B – SE .	84
Gráfico 40 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 8 - Rede exemplo B – SE .	84
Gráfico 41 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 9 - Rede exemplo B – SE .	85
Gráfico 42 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 10 - Rede exemplo B – SE	85
Gráfico 43 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SE.....	88
Gráfico 44 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE.....	88
Gráfico 45 – $FO_{ótima}$ – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SE.....	89

Gráfico 46 – FO <sub>ótima</sub> – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE .....	89
Gráfico 47 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 1 – Rede exemplo B – CE	91
Gráfico 48 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 2 - Rede exemplo B –CE ..	91
Gráfico 49 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 3 - Rede exemplo B – CE.	92
Gráfico 50 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 4 - Rede exemplo B – CE.	92
Gráfico 51 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 5 - Rede exemplo B – CE.	92
Gráfico 52 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 6 - Rede exemplo B – CE.	93
Gráfico 53 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 7 - Rede exemplo B – CE.	93
Gráfico 54 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 8 - Rede exemplo B– CE..	93
Gráfico 55 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 9 - Rede exemplo B – CE.	94
Gráfico 56 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 10 - Rede exemplo B – CE .....	94
Gráfico 57 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE .....	97
Gráfico 58 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE.....	97
Gráfico 59 – FO <sub>ótima</sub> – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE .....	98
Gráfico 60 – FO <sub>ótima</sub> – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE.....	98
Gráfico 61 – Comparação entre os resultados de FO <sub>ótima</sub> para todos os cenários – Rede Exemplo B – SE.....	99
Gráfico 62 – Comparação entre os resultados de FO <sub>ótima</sub> para todos os cenários – Rede Exemplo B – CE .....	100
Gráfico 63 – Comparação entre os resultados de EMR para todos os cenários – SE.....	100
Gráfico 64 – Comparação entre os resultados de EMR para todos os cenários – Rede Exemplo B – CE.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Características físicas dos tubos – Rede Exemplo A.....	57
Tabela 2– Características físicas dos tubos – Rede Exemplo B .....	58
Tabela 3– Vazões e cargas iniciais - regime permanente - Rede Exemplo A.....	62
Tabela 4 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo A – SE.....	63
Tabela 5 – Novas Vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo A – SE....	63
Tabela 6 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 2, 3 e 4 – Rede Exemplo A – SE.....	67
Tabela 7 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 5, 6 e 7 – Rede Exemplo A – SE.....	67
Tabela 8 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 8, 9 e 10 – Rede Exemplo A – SE.....	68
Tabela 9 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo A– CE.....	70
Tabela 10 – Novas vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo A – CE ..	71
Tabela 11 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 2, 3 e 4 – Rede Exemplo A – CE .....	75
Tabela 12 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 5, 6 e 7 – Rede Exemplo A – CE .....	75
Tabela 13– Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 8, 9 e 10 – Rede Exemplo A – CE .....	75
Tabela 14 – Vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo B .....	80
Tabela 15 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo B – SE.....	81
Tabela 16 – Novas vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo B – SE ...	81
Tabela 17 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 2, 3 e 4 – Rede Exemplo B – SE.....	86
Tabela 18 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 5, 6 e 7 – Rede Exemplo B – SE.....	86
Tabela 19 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 8, 9 e 10 – Rede Exemplo B – SE.....	87
Tabela 20 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo B – CE .....	90
Tabela 21 – Novas vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo B – CE...	90
Tabela 22 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 2, 3 e 4 – Rede Exemplo B – CE .....	95
Tabela 23 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 5, 6 e 7 – Rede Exemplo B – CE .....	95
Tabela 24 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 8, 9 e 10 – Rede Exemplo B – CE .....	96

## LISTA SÍMBOLOS

[L]	Dimensão de Comprimento
[M]	Dimensão de Massa
[T]	Dimensão de tempo
[F]	Dimensão de Força
m	metro - unidade de comprimento (SI)
kg	kilograma - unidade de massa (SI)
s	segundo - unidade de tempo (SI)
N	newton - unidade de força (SI)
Re	Número de Reynolds
$v$	Velocidade média de escoamento do fluido
$D$	Diâmetro da seção transversal do tubo
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\nu'$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Massa específica do fluido
$A$	Área da seção transversal do tubo
$Q$	Vazão volumétrica
$\Delta H$	Perda de carga
$p$	Pressão na seção do tubo
$\gamma$	Peso específico do fluido
$z$	Altura de elevação da massa fluida em relação a um nível de referência
$g$	Aceleração da gravidade
$f$	Fator de atrito de Darcy-Weibach em regime permanente
$L$	Comprimento de trecho de escoamento
$H$	Carga Hidráulica
$a$	Celeridade da onda de pressão
$a_j$	Celeridade corrigida
$x$	Distância
$\Delta x$	Comprimento de trecho
$t$	Tempo
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\psi$	Parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto
$E$	Módulo de elasticidade de Young da parede do tubo



$K$	Módulo de elasticidade do fluido
$e$	Espessura da parede do tubo
$\tau$	Lei de abertura ou fechamento de válvula
$FO$	Função Objetivo
$TS$	Duração observação do transiente
$NL$	Número de locais de medida na rede
$H^m$	Carga medida (sintética)
$H^c$	Carga calculada
$N$	Número de tubos
$n$	Número de trechos
$\Sigma$	Somatório
$\partial$	Derivada parcial
$d$	Derivada total

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
Cte.	Constante
CE	Com Elitismo
EA	Erro Aleatório
EMR	Erro Médio Relativo
ES	Erro Sistemático
MTI	Método Transiente Inverso
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
ONU	Organização Nacional das Nações Unidas
SE	Sem Elitismo
SI	Sistema Internacional de Unidades

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>1.1</b>	<b>Generalidades</b> .....	19
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	20
<b>1.3</b>	<b>Objetivo</b> .....	21
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da dissertação</b> .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	23
<b>2.1</b>	<b>Redes de distribuição de água</b> .....	23
<b>2.2</b>	<b>Escoamentos em tubulações de redes de distribuição de água</b> .....	24
<b>2.2.1</b>	<i>Regime permanente</i> .....	25
<b>2.2.2</b>	<i>A Perda de Carga e o Fator de Atrito</i> .....	27
<b>2.2.3</b>	<i>Regime transiente</i> .....	29
<b>2.2.4</b>	<i>Método das Características</i> .....	32
<b>2.3</b>	<b>Métodos de Calibração</b> .....	34
<b>2.3.1</b>	<i>Conceitos</i> .....	34
<b>2.3.2</b>	<i>Método iterativo</i> .....	34
<b>2.3.3</b>	<i>Método explícito</i> .....	35
<b>2.3.4</b>	<i>Método implícito</i> .....	36
<b>2.4</b>	<b>Método Transiente Inverso</b> .....	38
<b>2.5</b>	<b>Algoritmo Genético</b> .....	39
<b>2.5.1</b>	<i>Considerações gerais</i> .....	41
<b>2.5.2</b>	<i>Representação da população</i> .....	42
<b>2.5.3</b>	<i>Seleção</i> .....	43
<b>2.5.4</b>	<i>Operadores genéticos</i> .....	44
<b>2.5.5</b>	<i>Técnicas de reprodução</i> .....	44
<b>2.5.6</b>	<i>Vantagens dos Algoritmos Genéticos</i> .....	46
<b>2.5.7</b>	<i>Aplicações recentes dos Algoritmos Genéticos como técnica de Otimização</i> .....	46
<b>2.6</b>	<b>Erros de Medição</b> .....	50
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	53
<b>3.1</b>	<b>Formulação e Solução do Problema Inverso</b> .....	53
<b>3.2</b>	<b>Dados das Redes Exemplos</b> .....	55
<b>3.2.1</b>	<i>Rede Exemplo A</i> .....	56

3.2.2	<i>Rede Exemplo B</i> .....	57
3.3	Manobra de Válvula.....	58
3.4	Parâmetros de Algoritmo Genético.....	59
3.5	Cenários de medição .....	60
3.6	Medidas de avaliação de interferência dos erros de medição nas calibrações.....	61
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	62
4.1	Rede Exemplo A .....	62
4.1.1	<i>Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Sem Elitismo</i> .....	63
4.1.2	<i>Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Com Elitismo</i> .....	70
4.1.3	<i>Comparações entre os resultados de Algoritmos com Elitismo e sem Elitismo</i> .....	79
4.2	Rede Exemplo B .....	80
4.2.1	<i>Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Sem Elitismo</i> .....	81
4.2.2	<i>Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Com Elitismo</i> .....	90
4.2.3	<i>Comparações entre os resultados de Algoritmos com Elitismo e sem Elitismo</i> .....	99
5	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	102
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	104

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Generalidades

O acesso a água em quantidade e qualidade adequada tem impacto direto no desenvolvimento socioeconômico, sendo fundamental para a redução da pobreza e desenvolvimento sustentável.

O uso desse recurso hídrico pelo homem depende da sua disponibilidade. Os principais usos da água são: abastecimento público (o uso mais nobre), industrial, comercial, agrícola e pecuário, recreação, geração de energia e saneamento.

Segundo a ONU (2014) uma crise global se estabeleceu pela crescente demanda de recursos hídricos para atender as necessidades agrícolas e comerciais da humanidade além da também crescente necessidade de saneamento básico. Estima-se que um bilhão de pessoas no mundo carece de acesso a abastecimento de água em quantidade suficiente a uma distância adequada. As fontes de acesso a água são basicamente: sistemas de abastecimento, fontes públicas, poços, nascentes e cisternas (coleta de água pluvial).

Um sistema de abastecimento público de água pode ser entendido como a solução coletiva mais econômica e definitiva para o abastecimento de uma comunidade. (SANEAMENTO, 2014).

Segundo Azevedo Netto (1998) um sistema de abastecimento público é composto por unidade de captação, adução, tratamento, reservatórios, redes de distribuição, além de estações elevatórias. E as redes de distribuição de são responsáveis por levar a água aos pontos de consumo através de tubulações e acessórios, dispostos de forma a manter uma distribuição contínua em quantidade e pressão recomendadas.

Com o aumento populacional e o crescimento das cidades os sistemas de abastecimento estão se tornando mais complexos, devido a medidas de criação de novas estruturas ou ampliação das estruturas existentes.

Altos investimentos são necessários para reabilitar os sistemas existentes de forma a assegurar níveis operacionais adequados. Nota-se que pesquisas vêm recebendo investimentos por parte de empresas interessadas em ter a disposição recursos de análise e apoio para tomada de decisão, como modelos matemáticos de otimização e simulação hidráulica. (VENTURINI, 2003)

## 1.2 Justificativa

A análise de sistemas de distribuição de água é constituída dos seguintes procedimentos: calibração, operação e controle, projeto e otimização, *design* das redes. (SHAMIR; HOWARD, 1977)

Segundo Venturini (2003) a operação de sistemas de distribuição vem se tornando muito complexa considerando que devido a uma demanda que cresce constantemente, algumas medidas de ampliação ou criação de novas estruturas são comumente adotadas, sem respeitar as condições de projeto previstas inicialmente.

O procedimento de calibração é o primeiro passo a ser dado quando o objetivo é analisar uma rede de distribuição de água com o objetivo de ampliá-la, reabilitá-la ou operá-la, considerando que em redes existentes as características operacionais previstas em projeto mudam continuamente.

Característica como a rugosidade da tubulação de uma rede muda com o tempo, principalmente em se tratando de tubulações de ferro fundido e de aço sem revestimento especial, o que reduz a capacidade de transporte da água nessas tubulações. (AZEVEDO NETTO, 1998). Outro fator que interfere no comportamento das redes é o surgimento de vazamentos, e esses também podem ser identificados em um processo de calibração.

Nas últimas décadas vêm sendo desenvolvidos métodos de calibração de redes de distribuição através de modelagem matemática e com uso de programas de computador, o destaque é dado ao Método Transiente Inverso, auxiliado por um método de otimização, que utiliza dados de carga transientes na determinação de variáveis (fator de atrito, rugosidade, vazamentos dentre outros). Considerando que as cargas são resultado de medições e estas são cercadas de incertezas devido a razões previsíveis ou não, uma análise quanto a interferência da presença de erros, resultantes dessas incertezas, na coleta de cargas e os resultados das calibrações se faz necessária.

O interesse na calibração do fator de atrito, que é uma função do número de Reynolds ( $Re$ ) e da rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ), deve-se a existência de uma relação com a perda de carga ( $\Delta H$ ) ocorrida nos escoamentos e estabelecida através da fórmula de Darcy-Weisbach. O fator de atrito tem uma natureza variável considerando que mudanças nas condições de escoamento, como a diminuição ou aumento na vazão, provocam alterações em seu valor.

Simpson, Vítkovský e Lambert (2000) realizam calibrações de fator de atrito através do Método Transiente Inverso, com a utilização do Algoritmo Genético, método de otimização, considerando diversos cenários, dentre eles a presença de erros de medição de cargas transientes e erros em dados de medidas das tubulações da rede de distribuição em estudo.

Araújo (2003) afirma que o Método Transiente Inverso com o auxílio da ferramenta de otimização Algoritmo Genético se mostra eficiente na calibração de rugosidades absolutas, fatores de atrito, diâmetros e identificação de vazamentos. E realiza uma análise de incertezas considerando erros de medição que podem ocorrer na coleta dos dados de carga transiente na calibração de fatores de atrito.

### **1.3 Objetivo**

Considerando o sucesso dos métodos de calibração desenvolvidos nos últimos anos, o objetivo deste trabalho é calibrar, através do Método Transiente Inverso (MTI) em conjunto com Algoritmos Genéticos (AG), os fatores de atrito de duas redes de distribuição de água hipotéticas e de portes diferentes (número de nós, tubos e anéis) considerando um conhecimento restrito das mesmas em termos de dados de carga e demandas nos nós, a possibilidade de erros de medição de carga supostamente ocorridos na coleta de dados em campo, o uso do Elitismo, como processo de substituição de soluções, dentro dos processamentos de AG. Ao final comparar as calibrações de fator de atrito realizadas com dados sem erros de medição (condições ideais) com as calibrações que tomaram cargas transientes incrementadas por erros de medição e então é realizada a análise da interferência desses nas calibrações de fatores de atrito. Os parâmetros de comparação entre as calibrações são o Erro Médio Relativo (EMR) e o valor da Função Objetivo (FO)

### **1.4 Estrutura da dissertação**

Capítulo 2 é a revisão de literatura que traz conceitos e tipos de escoamento em tubulações sob pressão de redes de distribuição de água, equações do regime permanente e transiente, o Métodos das Características (MOC) auxiliar na resolução de equações do regime transiente, definição e tipos de calibração desenvolvidos nos últimos anos, o Algoritmo Genético (AG) como ferramenta de otimização, o Método Transiente Inverso (MTI) como um

caso particular de método implícito de calibração bem como os conceitos relativos a medições e seus erros e incertezas.

Capítulo 3 aborda a metodologia utilizada nas calibrações apresentando as redes estudadas neste trabalho e as diversas considerações feitas quanto a condições iniciais das mesmas, dados disponíveis de carga e demandas, parâmetros do Algoritmo Genético (AG) como o número de gerações, populações e outros, além da a manobra da válvula imposta às redes.

Capítulo 4 apresenta os resultados de carga hidráulica medidas através do programa utilizado bem como as cargas com erros, os resultados das calibrações, comparação entre os mesmos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da dissertação e sugestões para estudos posteriores.



## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Redes de distribuição de água**

Rede de distribuição de água é “parte do sistema de abastecimento formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994)

Recomendações de pressões mínimas e máximas, bem como velocidades ideais para cada caso são encontradas na NBR 12218/1994 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Segundo Porto (2006) uma rede de distribuição é composta de condutos principais (de maior diâmetro) e condutos secundários sendo estes abastecidos pelos primeiros e responsáveis por abastecer diretamente os pontos de consumo. De acordo com a disposição dos condutos principais e sentidos dos condutos secundários as redes se dividem quanto ao tipo em: rede ramificada e rede malhada.

Em redes ramificadas o abastecimento é realizado a partir dos condutos principais sendo que as mesmas são alimentadas por reservatório a montante ou sob pressão de um bombeamento. Sua utilização é comum em pequenas comunidades, granjas, sistemas de irrigação por aspersão, dentre outros. Já em redes malhadas as tubulações principais formam anéis ou malhas, onde há a possibilidade de reversão do sentido das vazões, o que permite o abastecimento de um ponto por mais de um caminho, é portanto mais flexível quanto ao atendimento de demandas, e a manutenção pode ser realizada sem que sejam necessárias muitas interrupções no fornecimento de água.

Araújo (2003) afirma que durante algum tempo a atenção de pesquisadores esteve voltada para o desenvolvimento de modelos hidráulicos com a finalidade de dimensionar redes de distribuição, cálculo de diâmetros e vazões, observando critérios econômicos, pois com o crescimento populacional os sistemas requeriam otimização.

De acordo com Silva (2006) a simulação hidráulica de uma rede de distribuição é relevante não somente na elaboração de projetos como também na sua operação, considerando que fornece resultados que indicam se o sistema atende, respeitando as pressões recomendadas, às condições operacionais diversas.

Tomando por base os regimes de escoamento, permanente e transiente, pesquisadores desenvolveram métodos de resolução de sistemas hidráulicos.

## 2.2 Escoamentos em tubulações de redes de distribuição de água

De acordo com Porto (2006) na hidráulica os escoamentos recebem diversas conceituações em função de suas características, podendo ser: laminar ou turbulento quando a característica comum é a forma que as partículas se deslocam. Com relação ao contato da superfície do fluido com a atmosfera o escoamento pode ser livre ou forçado. Se o comportamento das propriedades e características hidráulicas em cada ponto do espaço não variar com o tempo, o regime de escoamento será permanente, do contrário será chamado não permanente ou transiente.

O número de Reynolds ( $Re$ ), grandeza adimensional, e função da velocidade do fluido ( $v$ ), Diâmetro da seção transversal do tubo ( $D$ ) e viscosidade cinemática ( $\nu$ ), é parâmetro para a classificação de escoamentos quanto à forma que as partículas se movem dentro da tubulação conforme apresentada na equação (1):

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

onde:  $v$  = velocidade média de escoamento do fluido  $[L][T]^{-1}$ ;  $D$  = diâmetro da seção transversal do tubo  $[L]$  e  $\nu$  = viscosidade cinemática  $[L]^2[T]^{-1}$ .

Se  $Re < 2000$  o é escoamento laminar, se  $Re > 4000$  o escoamento é turbulento, e se  $2000 \leq Re \leq 4000$  é considerada uma zona crítica. (AZEVEDO NETTO, 1998)

Em redes de distribuição, devido à baixa viscosidade da água o escoamento é sempre turbulento. Escoamento laminar acontece para baixas velocidades e/ou para fluidos viscosos.

Ainda segundo Porto (2006) o escoamento de água em tubulações de redes de distribuição é do tipo forçado, pois a água não está em contato com a atmosfera e ocupa toda a área geométrica. A pressão exercida pela água sobre a parede da tubulação é diferente da atmosférica e para qualquer perturbação do regime em determinada seção poderá ocorrer variações de velocidade e pressão nos diversos pontos da rede sem que haja a modificação da seção transversal da tubulação. O escoamento forçado pode ocorrer pela ação da gravidade ou através de bombeamento.

Soares (2007) afirma que devido à massa específica e módulo de elasticidade altos da água a mesma é caracterizada por ser pesada e ter baixa compressibilidade. Considerando esses fatores e ainda que as tubulações sejam longas os sistemas transportam grande quantidade de massa e energia cinética. Além disso, elevadas alterações na pressão interna acontecem provocadas por perturbações sobre o escoamento.

O escoamento em redes de distribuição de água é, portanto, turbulento, forçado e pode estar no regime permanente ou transiente.

Quanto à solução de sistemas hidráulicos Araújo (2003) menciona:

Existem vários métodos de resolução do sistema hidráulico correspondente às redes sob regime permanente de escoamento. A solução é obtida quando as vazões satisfazem as equações da continuidade em cada nó e as equações da energia nos diversos elementos. [...] Diferentemente dos modelos desenvolvidos em regime permanente, nos modelos em regime não-permanente as equações de Bernoulli e da continuidade não se aplicam diretamente em sua forma algébrica, pois há uma variação de pressão e vazão em função do tempo.

### 2.2.1 Regime permanente

Brunetti (2008) entende por regime permanente aquele no qual as propriedades do fluido não variam em cada ponto com o passar do tempo. As propriedades do fluido podem variar ponto a ponto desde que não haja variação com o tempo. O escoamento em regime permanente caracteriza-se pela conservação de massa no sistema em estudo considerando que para as propriedades se manterem constantes a quantidade de massa que entra no sistema deve ser igual à quantidade que sai. Conforme a equação da continuidade (2) para um fluido qualquer:

$$\rho \cdot v \cdot A = cte \quad (2)$$

Sendo:  $\rho$  = massa específica do fluido  $[M][L]^{-3}$ ;  $v$  = velocidade média de escoamento do fluido  $[L][T]^{-1}$ ;  $A$ : área da seção transversal do tubo  $[L]^2$ ;  $cte$  = constante.

Para o escoamento da água considerando a invariabilidade da sua massa específica ao longo de um escoamento permanente tem-se, na equação (3) que:

$$Q = v \cdot A = cte \quad (3)$$

onde:  $Q$  = vazão volumétrica  $[L]^3[T]^{-1}$ .

Pelo exposto conclui-se que o regime permanente de escoamento em redes de distribuição de água é caracterizado pela invariabilidade de vazão com o tempo nos trechos de tubulações.

Segundo Saad et al. (1994, *apud* ROSAL, 2007) em uma rede de distribuição os nós de demanda respeitam a equação da continuidade verificando-se que o somatório das vazões que entram em um determinado nó se iguala ao somatório de todas as vazões que saem deste nó.

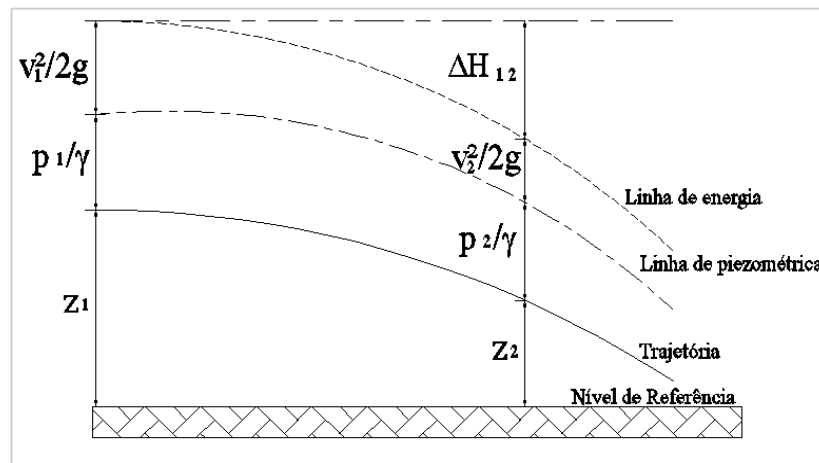
Segundo Brunetti (2008), assim como ocorre com as massas que se conservam ao longo de um escoamento em regime permanente, a energia, que não pode ser criada nem destruída apenas transformada, é também conservada, então é possível construir uma equação que fará o balanço das energias.

Porto (2006) afirma que através da linha de corrente e linha piezométrica em regime permanente pode-se escrever a equação da conservação da energia (4) como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (4)$$

Esta equação, pelo fato de cada parcela representar energia por unidade de peso, admite uma interpretação geométrica de importância prática, conforme a figura 1.

Figura 1 - Linha de energia e linha piezométrica em escoamento permanente



Fonte: Adaptada de Hidráulica Básica - Porto (2006)

As parcelas da equação são:  $p/\gamma$  = carga de pressão [L];  $z$  = energia potencial [L];  $v^2/2g$  = carga cinética [L];  $\Delta H$  = perda de carga [L].

Onde:  $p$  = pressão na seção do tubo [F][L]<sup>-2</sup>;  $\gamma$  = peso específico do fluido [F][L]<sup>-3</sup>;  $z$  = altura de elevação da massa fluida em relação a um nível de referência [L];  $v$  = velocidade média de escoamento do fluido [L][T]<sup>-1</sup>;  $g$ : aceleração da gravidade [L][T]<sup>-2</sup>.

No caso de fluidos reais em escoamento permanente a carga total diminui ao longo da trajetória no sentido do movimento como consequência do trabalho realizado pelas forças resistentes. (PORTO, 2006)

### 2.2.2 A Perda de Carga e o Fator de Atrito

As considerações feitas nesta seção com relação a fator de atrito e perda de carga foram retiradas de Azevedo Netto (1998) que afirma que quando um líquido flui de uma posição (1) para uma posição (2), conforme a figura 1, parte da energia inicial se dissipa sob a forma de calor então a soma das três cargas iniciais não se iguala a carga total em (1). A diferença de carga  $\Delta H_{12}$  se denomina perda de carga e é de grande importância em problemas de engenharia, sendo objeto de muitas investigações.

Os fatores que contribuem para que a perda de carga ocorra são muitos, dentre eles: perda por atrito, variação da velocidade dentro das tubulações desde a parede do conduto até o eixo de escoamento, viscosidade, rugosidade da parede dos tubos que contribuem para a turbulência.

As perdas de carga são classificadas em perda de carga contínua e perda de carga local, a primeira é perda por resistência ao longo dos condutos e a segunda é provocada pelas peças especiais (conexões, por exemplo) e demais singularidades de uma instalação.

Darcy e outros investigadores considerando experimentos em tubos de seção circular concluem que a resistência ao escoamento da água (fluido de baixa viscosidade) é:

- diretamente proporcional ao comprimento da tubulação;
- inversamente proporcional a uma potência do diâmetro;
- função de uma potência da velocidade;
- variável com a rugosidade das paredes do conduto;
- independe da posição do tubo;
- independe da pressão interna sob a qual a água escoar;
- função de uma potência da viscosidade cinemática do fluido.

A perda de carga,  $\Delta H$ , pode ser dada então pela fórmula Universal ou fórmula de Darcy-Weisbach (5):

$$\Delta H = f \frac{Lv^2}{D2g} \quad (5)$$

onde:  $\Delta H$  = perda de carga [L];  $f$ : fator de atrito de Darcy-Weisbach – em regime permanente (adimensional);  $L$  = comprimento do trecho de escoamento [L];  $v$  = velocidade média de escoamento do fluido [L][T]<sup>-1</sup>;  $D$  = diâmetro da seção transversal do tubo [L];  $g$  = aceleração da gravidade [L][T]<sup>-2</sup>.

A fórmula de Darcy-Weisbach oferece dificuldades no caso de escoamentos turbulentos, que é o caso do escoamento forçado de água, pois a perda de carga não varia exatamente com o quadrado da velocidade, mas com um a potência que varia entre 1,75 e 2. O valor de  $f$  é então corrigido para contornar essa dificuldade. Têm-se também que considerando que a vazão  $Q = v.A$ , o comprimento  $L$  e o fator de atrito  $f$  são conhecidos a perda de carga  $\Delta H$  seria inversamente proporcional a 5ª potência de  $D$ , o que não se confirma na prática, experimentos demonstram que o expoente de  $D$  é em torno de 5,25, então mais uma vez o fator de atrito  $f$  deverá ser ajustado.

Pelo exposto conclui-se que o fator de atrito  $f$  é função da rugosidade do tubo, da viscosidade absoluta e da massa específica do fluido, da velocidade do escoamento e do diâmetro do conduto e apesar de todas as pesquisas já realizadas não teve seu valor estabelecido através de uma fórmula, sendo sempre obtido através de gráficos e tabelas elaborados após experimentações. Muitas fórmulas vêm ao longo dos anos sendo desenvolvidas com base em experimentos realizados, porém essas fórmulas só valem para os correspondentes experimentos.

Andrade e Carvalho (2000) afirmam que o sucesso de implantação da agricultura irrigada depende da otimização do projeto hidráulico, buscando sempre menor soma de custos fixos e variáveis. Neste caso o parâmetro mais importante é a perda de carga, a qual deve ser determinada com precisão, resultando no sistema de recalque mais econômico. Essa consideração pode ser estendida para os diversos projetos hidráulicos, dentre eles os de redes de distribuição de água. Realizam análise da equação de Swamee-Jain nas mais variadas situações de condução de água em sistemas pressurizados, para isto desenvolvem um aplicativo computacional para realizar simulações variando o diâmetro interno do tubo, a velocidade de escoamento e a rugosidade absoluta das paredes da tubulação. A base de comparação do estudo é a equação universal de Darcy-Weisbach no cálculo do fator de atrito, respeitando-se seus respectivos regimes de escoamento e limitações. A partir de então, concluem que, para o regime turbulento em conduto liso, a equação de Swamee-Jain apresentou diferenças de valores de  $f$  (fator de atrito) em relação às equações específicas

requerendo, para melhor precisão, um fator de correção. Para os outros tipos de escoamento a concordância foi considerada satisfatória.

Kamand (1988) afirma que a perda de carga em tubulações afeta diretamente o equilíbrio das redes hidráulicas. As equações desenvolvidas para determinação dos fatores de atrito acumulam incertezas considerando o desconhecimento da rugosidade do interior da tubulação e das reais condições de vazão.

Considerando que as naturezas das paredes das tubulações (rugosidades) utilizadas em redes de distribuição de água são diversas entende-se que a dificuldade ao escoamento se apresentam maiores (maior fator de atrito) em tubulações de ferro fundido que em tubulações de PVC por exemplo. Levando em consideração que com o passar do tempo as tubulações envelhecem e com isso aumenta-se a rugosidade, especialmente em tubos metálicos, o fator de atrito é afetado por consequência o que acarreta em um prejuízo quanto a perda de carga e velocidade do escoamento.

Ligget e Chen (1994), Nash e Karney (1999), Simpson, Vitkovský e Lambert (2000) e Araújo (2003) realizam a identificação de fatores de atrito em redes de distribuição de água através de um método inverso considerando a importância desse parâmetro dentro do estudo de sistemas de distribuição.

### ***2.2.3 Regime Transiente***

Baptista e Lara (2003) afirmam que o termo transiente se refere a uma situação em que o escoamento varia com o tempo em termos de mudança de velocidade o que torna o escoamento transiente mais complexo que o escoamento permanente, uma vez que o envolvimento da variável “tempo” requer a utilização de equações diferenciais, cujas soluções só podem ser encontradas através de métodos numéricos ou gráficos. Considera que se a variação de velocidade for lenta não afeta significativamente o escoamento, já se a referida variação for rápida uma onda de pressão é criada e percorre a tubulação a velocidade do som.

Segundo Chaudhry (1987) dependendo das condições em que ocorrem os transientes os mesmos podem ser classificados como: transientes em condutos fechados, transientes em canais abertos, ou transientes em sistemas combinados entre parte aberta e parte pressurizada. Afirma que algumas causas dos transientes podem ser: a abertura ou fechamento de válvulas, partida ou para de uma bomba, em sistemas de bombeamento.

Segundo Araújo (2003), Driels em 1975 estudou os eventos transientes no tocante a realização de simulações em sistemas hidráulico, Wylie em 1983 apresentou conceitos relativos a uso de computadores no estudo dos transientes, Shimada e Okushima em 1984 desenvolveram dois modelos para o cálculo dos transientes em sistemas de tubos: o método de solução em série e um método de Newton-Raphson modificado, Onizuka em 1986 apresentou um método de análise, baseado na teoria da coluna rígida, para transientes lentos e escoamentos permanentes em redes. Shimada em 1988 desenvolveu a aproximação “time marching” (TMA) visando a determinação do fluxo em estado permanente como um limite assintótico do fluxo transiente em tubulações e em 1989 propôs um método, baseado na teoria da coluna rígida, para a análise de transientes lentos em redes.

Karney e McInnis (1990) apresentam uma discussão do fenômeno transiente em redes. Afirmam que não se deve desprezar o efeito transiente ao estudar redes de distribuição sob pena de comprometer sua estrutura física e o seu custo. Afirmaram ainda que os estudos de transientes são negligenciados em decorrência de simplificações como por exemplo de que o efeito de transientes em redes, malhadas ou ramificadas, são menores que os produzidos em um conjunto simples composto por reservatório válvula e tubo, sem que para isso tenha havido uma maior compreensão dos efeitos dos fenômenos transientes. Além dessa simplificação tem-se também o entendimento de que uma máxima velocidade no regime permanente produz uma máxima variação de pressão e que se um dispositivo de proteção é bom então dois ou mais são melhores ainda. Essas três ideias não têm sustentação científica e são questionadas pelos autores.

Karney (1990) estuda a energia de transientes em condutos fechados, e seus componentes: a energia cinética devida a velocidade de escoamento, energia interna associada a compressibilidade do fluido, energia dissipada pelo atrito e o trabalho feito nas extremidades do tubo. Define um índice de compressibilidade que relaciona a energia interna total com energia cinética total, que classifica a relevância dos efeitos de compressibilidade na análise do escoamento transiente.

Karney e McInnis (1992) trabalham com uma extensão do método das características convencional na análise os transientes em uma rede de tubos, que permite manusear as condições de contorno como a topologia da rede de uma forma generalizada, o que facilita a solução de muitas combinações de dispositivos hidráulicos.

Souza (1998 *apud* ARAÚJO, 2003) afirma que a análise em regime transiente em redes tem sido realizada principalmente de duas maneiras, ou usando modelos de coluna



elástica na predição de transientes rápidos com altas frequências ou usando modelos de coluna rígida na predição de transientes lentos com baixas frequências.

As equações do escoamento transiente foram introduzidas e demonstradas por Wylie e Streeter (1978) e Chaudhry (1987) e o método de resolução das equações proposto foi o método das características. Entende-se que no regime transiente o escoamento em condutos forçados a vazão é alterada e ocorre conversão de energia principalmente se o fluido em questão for de baixa compressibilidade, como é o caso da água, logo as fórmulas matemáticas que regem essas transformações de energia são baseadas na equação conservação quantidade de movimento (6) e na equação de conservação de massa (7):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (7)$$

onde:  $H$  = carga Hidráulica [L];  $Q$  = vazão volumétrica [L]<sup>3</sup>[T]<sup>-1</sup>;  $A$  = área da seção transversal do tubo [L]<sup>2</sup>;  $a$  = celeridade da onda de pressão [L][T]<sup>-1</sup>;  $D$  = diâmetro da seção transversal do tubo [L];  $f$  = fator de atrito de Darcy-Weisbach (em regime permanente);  $g$  = aceleração da gravidade [L][T]<sup>-2</sup>;  $x$  = distância [L] e  $t$  = tempo [T].

Araújo (2003) afirma que essas duas equações diferenciais permitem calcular os valores da vazão  $Q$  e da carga hidráulica  $H$  ao longo da tubulação  $x$  e do tempo  $t$ .

Segundo Chaudhry (1987) a velocidade de onda de pressão depende do material do tubo onde ocorre o escoamento e das propriedades do fluido em escoamento.

Halliwell (1963, *apud* CHAUDHRY,1987) apresenta uma expressão geral para o cálculo da velocidade da onda na equação (8):

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad (8)$$

onde:  $\psi$  = parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto;  $E$  = módulo de elasticidade de Young da parede do tubo [F][L]<sup>-2</sup>;  $K$  = módulo de elasticidade do fluido [F][L]<sup>-2</sup>;  $\rho$  = massa específica do fluido [M][L]<sup>-3</sup>.

Existem várias expressões que calculam o parâmetro  $\psi$  para diferentes condições dos condutos. Para condutos rígidos tem-se a equação (9) e os condutos serão considerados como elásticos de paredes finas, caso especial deste trabalho se usa a equação (10).

$$\psi = 0 \quad (9)$$

$$\psi = \frac{D}{e}(1 - 0,5\nu') \quad (10)$$

Onde:  $D$  = diâmetro da seção transversal do tubo [L];  $e$  = espessura da parede do tubo [L];  $\nu'$  = coeficiente de Poisson (adimensional).

Wylie e Streeter (1978) afirmam que a solução geral das equações diferenciais parciais não está disponível, no entanto, as mesmas podem ser transformadas pelo método das características em equações diferenciais totais (ordinárias). E resolvem essas equações através de diferenças finitas.

Chaudhry (1987) demonstra que as equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo em regime transiente em condutos fechados são hiperbólicas, discute vários métodos disponíveis para a sua solução. Através do método de características as equações para simular um canal são derivadas, e são desenvolvidas as condições de contorno para uma série de condições finais simples. Os critérios de estabilidade e convergência para a análise do esquema de diferenças finitas são então apresentados, e um procedimento para a análise de sistemas de tubulação está delineado.

#### ***2.2.4 Método das Características***

Araújo (2003) afirma que o método das características (MOC), método numérico, para solução de equações diferenciais parciais que regem o escoamento transiente conduz a uma análise abrangente dos mecanismos de operação de transientes e mostra que o cálculo do transitório hidráulico em uma rede é facilmente realizado por meio de equações explícitas (equações características) que fornecem diretamente os valores das cargas nos nós e vazões nas tubulações da rede em cada passo de tempo em função dos respectivos valores no passo de tempo anterior.

Para o equacionamento do modelo hidráulico com vistas à calibração de uma rede de distribuição de água devem-se apresentar as condições de contorno.

As equações características (11) e (12), introduzidas por Wylie e Streeter (1978) e Chaudhry (1987), tem suas demonstrações bem como as condições de contorno para suas resoluções apresentadas em suas respectivas publicações.

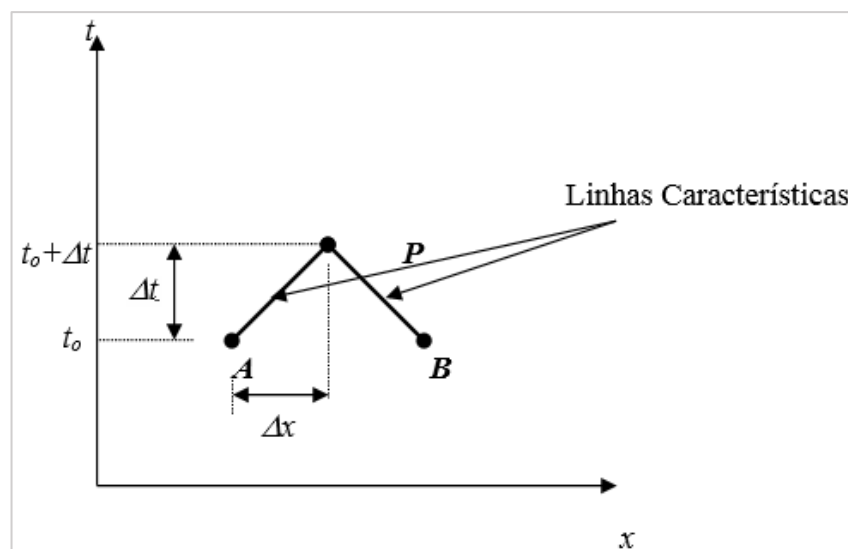
$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = a \quad (11)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (12)$$

A equação (11) é válida para  $(dx/dt) = a$ , e que a equação (12) é válida para  $(dx/dt) = -a$ . Logo, elimina-se a variável independente  $x$ , as equações são convertidas em equações diferenciais parciais (6) e (7) em equações diferenciais ordinárias na variável independente  $t$ .

No plano  $x-t$  estas relações representam duas linhas retas tendo inclinações  $\pm 1/a$ . Essas linhas são chamadas linhas características. Matematicamente, essas linhas dividem o plano  $x-t$  em duas regiões. Por exemplo, um distúrbio no ponto  $A$ , na figura 2, em  $t_0$  alcançaria o ponto  $P$  depois de um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

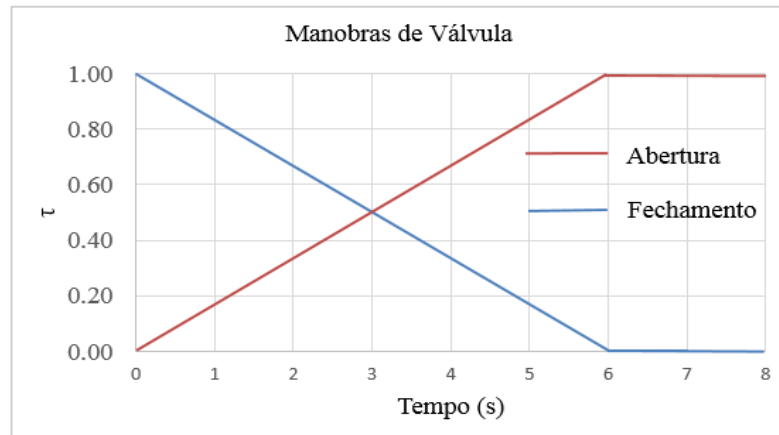
Figura 2– Linhas Características no plano  $x-t$ .



Fonte: Araújo (2003) adaptado de Chaudhry (1987)

Para a determinação das condições transientes provocadas pela manobra de uma válvula, uma relação entre  $\tau$  (lei de abertura ou fechamento de válvula) e tempo deve ser estabelecida. Geralmente esta relação apresenta-se sob forma gráfica. A figura 3 ilustra exemplo de abertura e fechamento de uma válvula. Nota-se quando  $\tau$  é igual a 1,00 a válvula está completamente aberta e quando  $\tau$  é igual a 0,00 a válvula está completamente fechada.

Figura 3– Exemplo de Abertura ou fechamento total de válvula



Fonte: Adaptada de Araújo (2003)

## 2.3 Métodos de Calibração

### 2.3.1 Conceitos

Calibração, também denominada identificação, é a determinação das características físicas e operacionais de um sistema de distribuição existente e a determinação dos dados de entrada para o modelo de computador de forma a produzir resultados próximos da realidade. (SHAMIR; HOWARD, 1977)

Harris (1984, *apud* CHEUNG, 2001) define a calibração como sendo uma técnica de determinação dos parâmetros variáveis da rede, coeficiente de rugosidade e demandas nos nós, através de medições (energia ou vazão) em pontos estratégicos dos sistemas de distribuição de águas.

Desde a década de 1970 vêm sendo desenvolvidos muitos métodos de calibração. De uma forma geral esses podem ser divididos em três categorias: método iterativo (tentativa e erro), método explícito (simulação hidráulica) e método implícito (otimização). (SAVIC; KAPELAN; JONKERGOUW, 2009)

### 2.3.2 Método Iterativo

De acordo com Silva (2003) o procedimento iterativo geralmente é baseado em tentativa e erro. Os parâmetros de calibração são ajustados a cada iteração usando comparações entre pressões e vazões medidas e simuladas.

Walski (1983) propôs uma forma iterativa para ajuste de fator C de Hazen-Williams (coeficiente de rugosidade de tubos) e demandas de nós usando uma rede exemplo. Concluiu neste trabalho que a chave para usar as fórmulas propostas consistia na coleta de pressões em situações de alto e baixo consumo de água e que poderiam ser feitos testes em redes de hidrantes.

Alguns anos depois utilizando o método iterativo Bhave (1988) propôs uma técnica simples que ajustava sucessivamente o coeficiente de rugosidade dos tubos e demandas dos nós, assim como proposto por Walski (1983), contudo, nesta técnica as demandas dos nós e por consequência as vazões de entrada do nó de origem aumentavam ou diminuíaam dependendo do fator de ajuste de demandas, já na proposta de Bhave (1988) é assumido que as vazões podem ser calculadas ou medidas com alguma precisão, assim permanecendo fixas durante a calibração.

Cheung, Soares e Souza (2000) fizeram um reexame das técnicas de calibração disponíveis de Walski (1983) e Bhave(1988) e propuseram um outro método analítico (iterativo), que considera assim como Walski (1983) as vazões variáveis e dependentes do fator de ajuste de demanda, com a diferença que enquanto no método de Walski (1983) alguns coeficientes calculados através de estimativas iniciais do Fator C e de consumos de nós afetados pelos testes, permaneciam fixos durante a calibração, na sua proposta esses variam através de iterações. E concluíram que para a rede estudada o método proposto mostrou-se ligeiramente mais eficiente que o método convencional de Walski (1983), já o método de Bhave (1988) apresentou resultados relativamente divergentes dos valores reais.

### ***2.3.3 Método Explícito***

Os métodos explícitos resolvem um sistema de  $n$  equações não-lineares que descrevem a hidráulica da rede para um conjunto de  $n$  desconhecidos, os quais podem incluir os parâmetros a serem estimados. (SOARES, 2003)

Pioneiros no desenvolvimento de um método explícito Ormsbee e Wood (1986) a fim de melhorar a confiabilidade de modelos de rede hidráulica bem como eliminar a necessidade da utilização de métodos de tentativa e erro propuseram um algoritmo. A formulação do então novo método de calibração é feita em termos de equações fundamentais de resolução de rede hidráulica, conservação de massa e conservação de energia, as referidas equações são resolvidas explicitamente para ajustar perdas de carga considerando uma ou

mais medições disponíveis ou vazões para diferentes estados de carga da rede ou sistema operacional. Para demonstrar a viabilidade do método foi usada uma rede exemplo para o ajuste de perda de carga e coeficiente de rugosidade. Os autores destacam que o sucesso desse método assim como de qualquer método de calibração depende da qualidade dos dados de medição bem como da descrição das condições de operação.

Boulos e Wood (1990) apresentaram um novo método explícito para a determinação de variáveis de projeto, calibração e operação de redes hidráulicas, o método baseia-se na reformulação das equações do regime permanente. Como estas equações são não-lineares o método de Newton-Raphson é utilizado como o procedimento básico de resolução. Um conjunto de variáveis contínuas é considerado para diversos parâmetros que são selecionados para satisfazer os requisitos declarados de pressão e demandas em pontos críticos e vazões ao longo dos tubos e ao longo dos sistemas de distribuição para uma série de condições de funcionamento. Como os parâmetros podem ser calculados exatamente para atender as condições de pressão e demandas especificadas o método explícito oferece base para determinar valores ótimos para vários projetos, parâmetros de funcionamento e de calibração. Através de uma rede exemplo demonstraram a viabilidade e flexibilidade da abordagem proposta.

Cheung e Souza (2002) investigaram dois métodos de calibração implementados e comparados através de ajuste das demandas dos nós e coeficiente de rugosidade de uma rede teórica com o objetivo de comparar e analisar a eficiência do método iterativo, proposto por Bhave (1988) e o método explícito, de Boulos e Wood (1990). Verificaram que o método iterativo (analítico) apresentou menores desvios considerando o somatório das diferenças entre valores observados e os valores reais. Já o método explícito apresentou maiores desvios, porém sua formulação permite a inclusão de outras variáveis de decisão de calibração, operação, projeto e componentes hidráulicos.

### ***2.3.4 Método Implícito***

Soares (2003) afirma que partindo de alguns dados de carga e vazão de uma rede de distribuição de água, os métodos implícitos usam uma função objetivo para aproximação do problema inverso que consiste em minimizar a referida função através da redução do somatório das diferenças dos valores das variáveis de carga e vazão medidas e calculadas, onde as variáveis de decisão são os parâmetros desconhecidos do modelo.

Ormsbee (1989) desenvolve um modelo matemático implícito para calibração de redes hidráulicas. O mesmo usa um algoritmo de otimização não-linear em conjunto com um solucionador para ajuste de parâmetros em estado permanente da rede. Os parâmetros ajustados foram a rugosidade da tubulação, as classes de origem e as demandas nos nós.

Segundo Vieira (2008) no método implícito a cada iteração um conjunto de parâmetros que representam o sistema no modelo são encontrados. Com estes valores o modelo gera outros valores como resposta de vazões nos trechos de tubulações e cargas nos nós de toda a rede e estes então são comparados com valores medidos, caso as diferenças dos valores calculados com os valores medidos não estejam dentro de faixas pré-determinadas os parâmetros iniciais devem ser modificados e o processo repetido.

Araújo (2003) afirma que no problema inverso, aplicado a regime de escoamento permanente ou não-permanente, os parâmetros do sistema como rugosidades e diâmetros dos tubos bem como fator de atrito, são tratados como variáveis e são encontradas através de dados de carga hidráulica e/ou vazão.

As técnicas de otimização estão desempenhando um papel fundamental na análise de sistemas de distribuição de água, principalmente devido ao efeito do crescimento populacional e industrial. A ligação entre um modelo hidráulico e uma técnica de otimização é uma maneira eficiente de se obter valores das variáveis de decisão com sucesso, minimizando ou maximizando uma função objetivo. (ARAÚJO,2003).

Silva e Reis (2002) consideram que os procedimentos mais promissores de calibração são baseados em técnicas de otimização, porém afirma que técnicas clássicas requerem muitas simplificações e tendem a produzir resultados distorcidos da realidade. E utilizam para a calibração de uma rede hipotética o problema inverso através do algoritmo genético (AG) como ferramenta de otimização.

Diversos autores utilizam o método implícito, ou inverso, para a solução de redes de distribuição de água, em alguns casos os dados de carga hidráulica utilizados são cargas geradas em regime permanente, dentre eles: estão Lansey e Basnet (1991), Pudar e Ligget (1992), Savic e Walters (1997), F. Silva (2003), Soares (2003), A. Silva (2006); em outros estudos o regime transiente é considerado, então surge o método transiente inverso, e se destacam nesse estudo: Ligget e Chen (1994), Nash e Karney (1999), Simpson, Vitkovský e Lambert (2000), Araújo (2003), Soares (2007). Recentemente o problema inverso vem sendo utilizado para calibração de redes através de medidas realizadas em redes reais onde se destacam: Vieira (2008) e Santos (2010).

## 2.4 Método Transiente Inverso

Entende-se o Método Transiente Inverso como um método de calibração do tipo implícito que lança mão de dados disponíveis de carga hidráulica transiente para a identificação de parâmetros físicos da rede a ser calibrada ou ainda para a detecção de vazamentos e demandas nos nós, de forma a obter um ótimo ajuste entre os valores observados e calculados das referidas cargas através de técnicas de otimização e para isso deve-se utilizar uma função objetivo. (ARAÚJO, 2003)

No Método Transiente Inverso desenvolvido por Ligget e Chen (1994) os dados transientes podem ser coletados em poucos locais da rede em estudo com o objetivo de realizar a calibração da mesma. Determinam vazamentos e fatores de atrito através da utilização de uma função objetivo que minimiza as diferenças quadráticas entre os dados medidos e calculados e é resolvida pelo método de otimização (ajuste de parâmetros) de Levenberg-Marquardt que usa derivadas generalizadas por meio de análises conjuntas. Os dados transientes são determinados com o uso do método das características para a solução das equações diferenciais parciais que regem o escoamento transiente.

Nash e Karney (1999) utilizam cargas hidráulicas transientes geradas a partir de uma manobra de válvula para calibrar os fatores de atrito de um sistema de oleoduto dotado de tubos em série que unem dois reservatórios. A calibração é realizada através da minimização da diferença direta entre os valores simulados e observados no evento transiente do sistema. O evento transiente é modelado utilizando o método das características. Realizam uma análise de sensibilidade dos resultados da calibração, quanto a quantidade de dados incluídos na calibração, as estimativas iniciais de fator de atrito bem como dos erros de medição produzidos a cada passo da calibração.

Tang et al. (1999, *apud* SOARES, 2007) combinam a tecnologia dos algoritmos genéticos ao processo de calibração. Realizam coleta de dados transientes de em campo através de equipamentos especiais em cidades no Canadá. Concluem que o desempenho da calibração no escoamento transiente é muito boa.

Simpson, Vitkovský e Lambert (2000) aplicam o Método Transiente Inverso para a calibração de fatores de atrito usando um modelo combinado de Método das Características para determinação das cargas transientes e Algoritmos Genéticos para otimização do problema através da minimização do módulo da diferença entre as cargas calculadas e sintéticas.



Kapelan et al. (2002 *apud* SOARES, 2007) propõem um algoritmo para a calibração de fatores de atrito e detecção de vazamentos de uma rede de distribuição de água operando em escoamento transiente. Utilizam um modelo híbrido (algoritmos genéticos com método de Levenberg-Marquardt) melhorou a desempenho computacional do método, além de refinar o grau de precisão da solução final.

Araújo (2003) desenvolve uma metodologia associando o Método Transiente Inverso e os Algoritmos Genéticos empregando o método das características na solução das equações do movimento para escoamento transiente em redes de tubos. O objetivo é estimar os parâmetros físicos da rede hidráulica como: fatores de atrito, rugosidades absolutas, diâmetros, além da identificação e quantificação de vazamentos, que são grandezas desconhecidas. As calibrações são realizadas a partir de dados observados de cargas hidráulicas transientes. A resolução do problema inverso segue o procedimento indireto com a minimização da diferença quadrática entre os resultados de carga observados e calculados.

Soares (2007) faz o estudo dos transitórios hidráulicos visando a calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas de distribuição de água. Para isso utiliza dados de redes hipotéticas e de laboratório, e os modelos inversos são resolvidos com métodos de busca global (Algoritmo Genético) e local (método Levenberg-Marquardt e método Nelder-Mead). Na rede de laboratório são utilizados tubos de plástico e o clássico modelo de coluna elástica se mostrou ineficiente na reprodução do comportamento hidráulico do sistema. Os resultados então são satisfatórios quando se considera o comportamento viscoelástico dos materiais dos tubos da rede experimental.

Araújo e Chaudhry (2001) afirmam que durante um evento transiente um distúrbio é transmitido à rede. Ondas transientes podem se deslocar com velocidades superiores a 1000 m/s. Essas ondas refletem-se nas junções, válvulas e contornos do sistema. Tem-se então que a coleta de informações através dessa propagação de onda transiente é a razão de que o Método Transiente Inverso oferece maior potencial quando comparado às técnicas de calibração em estado permanente.

## **2.5 Algoritmo Genético**

“Otimização é a busca da melhor solução para um dado problema. Consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida neste processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores” (LACERDA e CARVALHO, 1999)

Ainda de acordo com Lacerda e Carvalho (1999) as técnicas de busca e otimização apresentam um espaço de busca e uma função objetivo. Sendo o espaço de busca onde estão as possíveis soluções do problema e a função objetivo utilizada para avaliar as soluções do problema, atribuindo a cada uma delas uma nota.

Segundo Araújo (2003) o advento do uso de computadores permitiu o surgimento do fenômeno: inteligência artificial. Nas décadas de 1950 e 1960 cientistas estudaram sistemas evolucionários com a ideia de que os mecanismos da evolução natural das espécies poderiam servir de base para uma nova ferramenta de otimização nos problemas de engenharia. A ideia era fazer evoluir uma população de possíveis soluções usando operadores inspirados na genética e na seleção natural.

Pacheco (1999) afirma que “A Inteligência Computacional é uma área da ciência que busca, através de técnicas inspiradas na Natureza, o desenvolvimento de sistemas inteligentes que imitam aspectos do comportamento humano, tais como: aprendizado, percepção, raciocínio, evolução e adaptação.” As técnicas computacionais inteligentes são basicamente: Redes Neurais, Algoritmos Genéticos, Lógica Fuzzy e Sistemas Especialistas que se inspiram, respectivamente, nos neurônios humanos, evolução biológica, processamento linguístico e inferência humana.

Dianati, Song, Treiber (2002) afirmam que Algoritmos Genéticos (AG) foram inicialmente desenvolvidos por Bremermann em 1958, mas popularizado por John Holland, que aplicou AG de forma a verificar a seleção natural para efeito da aplicação dos mecanismos em ciência da computação. Isso levou a produção de um trabalho para o desenvolvimento da Teoria dos Esquemas a partir de 1968, que foi explicado em detalhes em seu Livro de 1975 “*Adaptação em Sistemas Naturais e Artificiais*”. Um avanço do trabalho de Holland, foi realizado por Goldberg em 1989, quando levanta a hipótese de que o cruzamento é a principal fonte do desempenho do AG, contrariando o a teoria do Esquema que se volta principalmente ao comportamento destrutivo do cruzamento e da mutação.

Goldberg e Kuo (1987) utilizam a técnica de algoritmo genético na otimização de um gasoduto líquido em estado permanente. O problema do gasoduto considerado é delineado. Em seguida, o mecanismo e efeito de um algoritmo genético simples são examinados. Os resultados do computador mostram que o algoritmo genético fornece soluções muito perto do ideal, explorando um pequeno número de alternativas de funcionamento.

O princípio da seleção natural foi proposto no século XIX por Charles Darwin. Para Darwin (1859) as características favoráveis do indivíduo tendem a ser preservadas em seus descendentes, enquanto as desfavoráveis não. E como a seleção natural atua para o bem do indivíduo todas as suas qualidades tendem a progredir até que chegue à perfeição. Afirma ainda um alto grau de variabilidade hereditária e diversificada é favorável à seleção natural, porém meras diferenças individuais já seriam suficientes. Então um grande número de indivíduos, proporcionando maior probabilidade para o surgimento de variações proveitosas num determinado espaço de tempo, compensariam um menor grau de variabilidade individual e isso constitui um fator de extrema importância para o sucesso da atuação da seleção natural.

Em 1965 Gregor Mendel (pai da genética) apresenta experimentos do cruzamento genético de ervilhas e a partir da conceituação integrada da seleção natural com a genética a Teoria da Evolução é iniciada.

### ***2.5.1 Considerações Gerais***

“Um algoritmo genético pode ser descrito como um processo contínuo que repete ciclos de evolução controlados por um critério de parada.” (PACHECO, 1999)

Segundo Lacerda e Carvalho (1999) a técnica de algoritmo genético é uma metáfora do fenômeno de seleção natural e por isso muitos dos termos utilizados são oriundos da biologia. São apresentados os termos que autores destacam:

- Cromossomo e Genoma: estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, é um simples ponto no espaço de busca;
- Gene: é um parâmetro codificado no cromossomo;
- Indivíduo: é um indivíduo formado pelo cromossomo e sua aptidão;
- Genótipo: Informação contida no cromossomo;
- Fenótipo: é o cromossomo decodificado;
- Alelo: representa os valores que o gene pode assumir.

Pacheco (1999) afirma que em um algoritmo genético, vários parâmetros controlam o processo evolucionário:

Tamanho da População (NC): é número de cromossomos do espaço de busca sendo considerados em paralelo a cada ciclo;

- Taxa de Cruzamento (pc): probabilidade de um indivíduo ser recombinado com outro;

- Taxa de Mutação (pm): probabilidade do conteúdo de uma posição/gene do cromossomo ser alterado;
- Número de Gerações (NG): total de ciclos de evolução de um AG;
- Total de Indivíduo: total de tentativas em um experimento (tamanho da população x número de gerações).

Os dois últimos parâmetros são em geral empregados como critério de parada de um algoritmo genético.

Tem-se que o primeiro passo de um Algoritmo Genético típico é geração de uma população inicial de cromossomos formada aleatoriamente. Durante o processo essa população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota, denominada aptidão, o que reflete a qualidade da solução que ele representa. É realizada uma seleção geralmente dos melhores resultados, ditos mais aptos. Podendo os selecionados sofrer modificações através de operadores genéticos (mutação e/ou cruzamento). Tal processo gera “descendentes” para a próxima “geração”. O processo é ilustrado na Figura 4.

Figura 4– Algoritmo Genético típico

---

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

---

```

t ← 0
inicializar  $S(t)$ 
avaliar  $S(t)$ 
enquanto o critério de parada não for satisfeito faça

    t ← 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 Carvalho (1999)

### 2.5.2 Representações da população

Lacerda e Carvalho (1999) afirmam que o AG processa populações de cromossomos que tradicionalmente são representados por uma cadeia de bits (representação binária), porém nem sempre é a melhor forma de representação.

A representação binária é simples, fácil de manipular cromossomas através dos operadores genéticos, fácil de ser transformada em inteiro ou real e, ainda, facilita a prova de alguns teoremas. Todavia, a representação por números reais (ponto flutuante) oferece melhor desempenho. (PACHECO,1999)

Segundo Lacerda e Carvalho (1999) representação binária é historicamente importante considerando que foi utilizada em trabalhos pioneiros como o de John Holland em 1975. Caracterizada por ser de fácil utilização e manipulação, bem como análise teórica. Para problemas de parâmetros contínuos e em que uma boa precisão numérica é requerida, eles precisarão armazenar cromossomos longos na memória, o que faz com que o algoritmo converja vagorosamente. Já a representação real gera cromossomos menores e é mais compreendida naturalmente pelo ser humano que a binária.

Michalewicz e Haupt (1994, 1998 *apud* LACERDA E CARVALHO, 1999) e Araújo (2003) têm discutido qual a melhor representação, se binária ou real, e os resultados demonstram que a representação real retorna resultados melhores.

Araújo (2003) demonstra através de calibrações de rugosidade utilizando a representação real e a binária que o desempenho da função objetivo a partir de 10 gerações se mostra ligeiramente melhor para a representação real com relação a representação binária. O erro médio relativo (EMR) se mostrou menor para a representação real bem como o tempo de processamento computacional.

### 2.5.3 Seleção

Pacheco (1999) afirma que processo de seleção em algoritmos genéticos seleciona indivíduos para a reprodução. A seleção é baseada na aptidão dos indivíduos: indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para reprodução.

Lacerda e Carvalho (1999) afirmam que geralmente os pais são selecionados com probabilidade proporcional a sua aptidão (roda de roleta). Portanto, a probabilidade de seleção  $p_i$ , de um cromossomo  $s_i$ , com aptidão  $f_i$  é dada por (13):

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (13)$$

Afirmam ainda que o Roda de Roleta não funciona com aptidões negativas, então o mesmo pode ser substituído pela Seleção por Torneio, neste caso são escolhidos,

aleatoriamente, ou seja, com probabilidades iguais e não mais proporcionais n cromossomos da população, então o cromossomo com maior aptidão é selecionado para a população seguinte.

Silva (2006) afirma que os principais mecanismos de seleção são: torneio, roda de roleta, amostragem estocástica universal, amostragem determinística, *Remainder Stochastic Sampling*, sendo que os três últimos são tipos especiais do método Roda de Roleta.

#### **2.5.4 Operadores genéticos**

Os principais mecanismos de busca dos Algoritmos genéticos são os operadores *crossover* e a mutação.

O *crossover* é aplicado a um par de cromossomos retirados de uma população intermediária e gera dois cromossomos filhos. O *crossover* é aplicado a uma dada probabilidade a cada par de cromossomos selecionados e a essa probabilidade nomeia-se taxa de *crossover* ou probabilidade de cruzamento. Os tipos de *crossover* mais conhecidos são de cadeia de bits com n pontos e uniforme (de um ponto).. O desempenho desses tipos de *crossover* em AGs é o mesmo, em processos de otimização. (Lacerda e Carvalho, 1999)

Araújo (2003) restringe em seu trabalho os operadores de *crossover* ou cruzamento a dois tipos: cruzamento de um ponto, para representação binária e cruzamento aritmético para representação real. E afirma que a probabilidade de cruzamento deve estar entre 60% e 100%.

Ainda de acordo com Lacerda e Carvalho (1999) após a operação de *crossover*, o operador de mutação é aplicado, com dada probabilidade de mutação, em cada bit dos dois filhos. Sendo que este operador inverte os valores dos bits. A mutação melhora a diversidade dos cromossomos na população, porém destrói informação contida no cromossomo, portanto deve-se utilizar baixas *taxas de mutação* (probabilidade de mutação) de preferência de 0,1% a 5%.

#### **2.5.5 Técnicas de Reprodução**

Pacheco (1999) afirma que as técnicas de reprodução são técnicas determinam o critério de substituição dos cromossomos de uma determinada população para a próxima

geração. E que existem basicamente os métodos de troca de toda a população, de troca de toda a população com elitismo, troca parcial da população (*steady state*)

- Troca de toda população: A cada geração,  $n$  novos cromossomos são criados substituindo a população anterior:  $n/2$  pares são escolhidos para o cruzamento (crossover), gerando  $n$  descendentes.

- Troca de toda a população com elitismo: Todos os cromossomos são substituídos, sendo o cromossomo mais apto da população atual copiado na população seguinte.

- Troca parcial da população (*steady state*): Gera  $m$  cromossomos ( $m < n$ ), que substituem os piores indivíduos da população atual. Técnica elitista que mantém população mais estática, permitindo, portanto, a utilização de operadores menos conservadores como o crossover uniforme.

Segundo Soares (2003) e Silva (2006) os processos de substituição de cromossomos podem ser classificados como geracionais ou *steady state*, sendo que os primeiros podem ser com elitismo ou sem elitismo.

Pelo exposto entende-se que o modo de substituição geracional é o mesmo que trocar toda a população.

O elitismo é definido por Lacerda e Carvalho (1999) como uma técnica de transferência do melhor cromossomo de uma geração para a geração seguinte sem alteração. E afirmam que o elitismo foi proposto por Jong em 1975 em um dos primeiros trabalhos sobre algoritmos genéticos.

Segundo Araújo (2003) a transferência de cromossomos por elitismo ocorre devido ao corte do cruzamento ou à ocorrência de mutação com a finalidade de melhorar o desempenho do Algoritmo Genético. E adota o seguinte procedimento de seleção com elitismo:

1. Seja a população de  $NC$  indivíduos  $(a_1, a_2, \dots, a_{NC})$ ;
2. A aptidão,  $F_{obj}(a_i)$ , de cada indivíduo é calculada conforme o valor da função objetivo;
3. Faz-se o ordenamento decrescente da aptidão (para problema de maximização);
4. Selecionam-se os melhores indivíduos deste ordenamento de maneira a formar uma população de  $p_e \times NC$  indivíduos, onde  $p_e$  está sendo definido como taxa de elitismo;
5. Forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos (dentre os melhores) que irão compor a população de pais.

6. Finalmente vem a sucessão. A população de indivíduos para a próxima geração é formada de 50% dos cromossomos dos pais e 50% dos cromossomos dos filhos, dentre aqueles de melhor aptidão. Estabelece-se, então, uma probabilidade de sucessão:  $p_s = 0,5$ .

### ***2.5.6 Vantagens dos Algoritmos Genéticos***

Lacerda e Carvalho (1999) apresentam algumas vantagens da utilização dos algoritmos genéticos, e vale ressaltar que:

- Funcionam com parâmetros contínuos ou discretos ou ainda uma combinação dos mesmos;
- Realizam pesquisas simultâneas em várias regiões do espaço de busca;
- Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas;
- Otimizam um número grande de variáveis;
- Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- Implementam-se facilmente em computadores;
- São modulares e portáteis, ou seja, o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Assim, eles podem ser transferidos de um problema para outro;
- São também facilmente hibridizados com outras técnicas e heurísticas.

Em problemas complexos os Algoritmos Genéticos se destacam sobre os métodos de busca convencionais.

### ***2.5.7 Aplicações recentes do Algoritmo Genético como técnica de Otimização***

Dentre as técnicas de otimização aplicadas a análise, iniciada pela calibração, de redes hidráulicas o Algoritmo Genético vem se destacando nos últimos anos.



Simpson, Dandy e Murphy (1994) apresentam uma metodologia para otimizar redes de tubulação utilizando Algoritmos Genéticos. Variáveis de decisão desconhecidas são codificadas como *strings* binárias. Investigam um Algoritmo Genético com três operadores compreendendo reprodução, cruzamento e mutação. Os resultados são comparados com as técnicas de programação completa enumeração e não linear. Aplicam as técnicas de otimização para a rede de tubulação em um estudo de caso.

Savic e Waters (1997) desenvolvem um modelo de computador que envolve a aplicação de Algoritmos genéticos para o problema de projetos de custo mínimo de redes de distribuição de água. Afirmam que os AGs representam um método de busca eficiente para a otimização não linear de problemas. Apontam como qualidade dos algoritmos genéticos o fato de considerar amostragem global e não local o que reduz a tendência de ficar preso a um mínimo local e evitar a dependência de um ponto de partida.

Simpson, Vítkovský e Lambert (2000) abordam o algoritmo genético para calibração fator de atrito em condições transientes uma rede de distribuição de água. Afirmando que a implementação computacional de um algoritmo genético trata da evolução de uma população de possíveis soluções. Utiliza duas codificações de parâmetros, discreta e contínua, considerando que esquema de codificação discreta tem sido tradicionalmente usada para a aplicação de algoritmos genéticos na otimização. Os resultados a partir de uma rede exemplo de onze tubos são usados para comparar a eficácia dos dois esquemas de codificação. Obtendo melhores resultados para a codificação discreta.

Silva e Reis (2002) apresentam um modelo de calibração de redes de distribuição de água que considera os vazamentos, cujas variáveis de decisão são as rugosidades nos trechos da rede. Os Algoritmos Genéticos foram as ferramentas utilizadas para a determinação das variáveis do problema de otimização, cuja aplicação é feita para uma rede hipotética, constituindo etapa preliminar de um estudo completo realizado para redes reais da Cidade de São Carlos – S.P. A análise dos resultados obtidos mostra que eles podem ser considerados promissores.

Wu et al (2002) propõem um quadro abrangente e flexível para uma calibração de um modelo de rede hidráulica implícita e de otimização não linear, o que é resolvido através de Algoritmo Genético. Soluções de calibração são obtidos através da minimização da discrepância entre o modelo previsto e do campo observado valores cargas nos nós e vazões nos tubos. Apresentam um exemplo de aplicação com a finalidade de demonstrar a robustez da metodologia baseada na genética para calibrar um modelo de rede de distribuição de água.

Araújo (2003) desenvolve uma metodologia associando o Método Transiente Inverso (MTI) e os Algoritmos Genéticos (AG) para estimar os parâmetros de uma rede hidráulica a partir de dados observados de cargas hidráulicas transientes. Os parâmetros físicos da rede como fatores de atrito, rugosidades absolutas, diâmetros e a identificação e quantificação de vazamentos são as grandezas desconhecidas. Analisa o desempenho do algoritmo genético utilizando o código binário como representação dos parâmetros no processo de busca da solução ótima e comparando-o com o algoritmo genético real. A comparação entre as duas representações será feita mediante a calibração das rugosidades absolutas. Para avaliar a confiabilidade do MTI-AG desenvolvido, uma rede-exemplo é usada para os vários problemas de calibração propostos.

Soares (2003) desenvolve uma rotina computacional considerando perdas por vazamento e a dependência com a demanda e pressões acoplada ao simulador hidráulico EPANET, e utiliza dados de rede hipotética com vistas a calibração em termos de rugosidades absolutas, demandas, diâmetros, cotas topográficas e parâmetros do modelo de vazamentos e a localização de componentes hidráulicos da rede. Para isso utiliza modelo inverso resolvido com o suporte da tecnologia dos Algoritmos Genéticos e um procedimento híbrido. A representação dos parâmetros utilizada foi a representação real.

Silva (2006) desenvolve uma rotina computacional com a finalidade de calibrar a rugosidade ou o coeficiente de *Hazen-Williams* de rede hidráulicas, utilizando os algoritmos genéticos como técnica de otimização. O modelo de calibração proposto permite a escolha de parâmetros de cálculo de algoritmos genéticos possibilitando uma análise comparativa entre métodos de substituição de indivíduos (geracional com ou sem elitismo e *steady state*), operadores de seleção mutação e recombinação (*crossover*), assim como a influência da quantidade de indivíduos na população inicial na qualidade das soluções encontradas.

Soares (2007) estuda os transitórios hidráulicos para a calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistema de distribuição de água e usa dados de rede hipotéticas e de laboratório, os modelos inversos são resolvidos por método de busca global (algoritmos genéticos) e local.

Neves (2007) desenvolve um algoritmo de calibração utilizando problema inverso, simulador hidráulico de escoamento de água em regime permanente e Algoritmos Genéticos como técnica de otimização. O programa foi testando usando valores diferentes de parâmetros de entrada com o objetivo de avaliar a influência desses valores na eficácia do algoritmo proposto.

Vieira (2008) desenvolve uma técnica de calibração inversa baseada nos algoritmos genéticos como ferramenta de otimização fazendo uso de objetivos múltiplos: pressão e vazão. Ajusta os coeficientes de rugosidade e perdas por vazamentos. Para avaliar a metodologia proposta a mesma usa primeiramente uma rede teórica, e logo após uma rede real localizada na cidade de Campo Grande – MS. Os resultados encontrados foram satisfatórios.

Galiza (2009) utiliza o método transiente inverso aplicado com algoritmo genético, proposto por Araújo (2003) para a calibração de rugosidades das tubulações de uma rede de distribuição de água por meio de simulações a partir de diversos cenários com a variação de parâmetros como: percentual de mutação, número de cromossomos (tamanho da população), número de gerações, quantidades de nós de medida e monitoramento, tempo de observação do transiente e tipo de manobra imposta na válvula, lenta ou brusca. De forma a encontrar uma combinação ótima de parâmetros de Algoritmo Genético.

Santos (2010) aplica a metodologia de calibração proposta por Soares (2003) uma um sistema de distribuição na cidade de Itajubá-MG, realizando o ajuste dos valores de rugosidade a partir de pressões medidas e simuladas. Os resultados mostram-se coerentes em termos de parâmetros ajustados e valores de pressão e vazão.

Costa, Holanda e Ramos (2010) verificam que inúmeros trabalhos foram desenvolvidos no Brasil utilizando o Algoritmo Genético como principal ferramenta de modelo de otimização. Como é possível constatar. E afirmam que isso se deve ao fato de o AG propiciar uma grande flexibilidade na exploração do espaço de busca e permitir facilmente sua conectividade com modelos de simulação.

Salvino (2012) desenvolve um modelo computacional visando à calibração multivariada de modelos hidráulicos de sistemas de distribuição de água, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades como: vazamentos, obstruções nas tubulações, válvulas inoperantes ou estranguladas e incompatibilidades na modelagem referente aos dados reais. O modelo desenvolvido utiliza Algoritmo Iterativo e o Algoritmo Genético multiobjetivo. O processo de calibração proposto permite utilizar até sete variáveis: a rugosidade, a demanda, a perda de carga singular, a cota topográfica, vazamentos, diâmetros e válvulas, simultaneamente, ou qualquer combinação delas.

Cheung (2004) apresenta contribuições às análises múltiobjetivo via algoritmos genéticos. Realiza investigação dos operadores de recombinação e mutação. Do ponto de vista hidráulico introduz perdas por vazamentos como uma demanda variável sob pressão. Estuda redes hipotéticas e um sistema real.

Algoritmos Genéticos também são utilizados para a otimização em projetos de redes de distribuição de água objetivando elevada eficiência e custos reduzidos.

Franca Alencar e Holanda (2004) aplicam o método de Algoritmos Genéticos (AG), através de um programa computacional especialmente desenvolvido para este propósito, ao projeto de uma rede de distribuição de água previamente abordada por outros métodos numéricos, com a devida calibração e discussão dos parâmetros envolvidos na perspectiva de comparação dos resultados. O AG se mostrou satisfatório, com convergência rápida para uma solução sub ótima, tendo analisado uma fração mínima do espaço de busca. Sua capacidade de refino para melhora da solução, porém, se mostrou pobre necessitando maior aprofundamento.

Maia Júnior (2012) apresenta um modelo computacional para o dimensionamento otimizado de mínimo custo em redes de distribuição de água. O modelo utiliza a técnica dos Algoritmos Genéticos. Realiza várias simulações variando individualmente cada parâmetro do algoritmo para se obter um melhor desempenho em termos de convergência, tempo de processamento e qualidade final das soluções. O modelo proposto se mostrou satisfatório para o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água.

## 2.6 Erros de medição

Conceitua-se medição como processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza (INMETRO, 2012)

Por mais cuidado que se tenha para realizar uma medição e mesmo que sejam utilizados equipamentos sofisticados e em condições ambiente controlados os resultados obtidos são afetados por diversos erros.

Vale ressaltar que erro e incerteza são conceitos diferentes e não devem ser confundidos. INMETRO, CICMA e SEPIN (2012), na publicação GUM – Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição, apresentam algumas definições quanto a incertezas e erros como segue.

“O conceito de *incerteza* como um atributo quantificável é relativamente novo na história da medição, embora *erro* e *análise de erro* tenham sido, há muito, uma parte da prática da ciência da medição ou metrologia.”.

Em geral uma medição é cercada de imperfeições as quais dão origem a um erro no seu resultado, geralmente o erro é visto como tendo dois componentes que são: um componente aleatório e um componente sistemático.

O erro aleatório como o próprio nome sugere pode ser originado de variações temporais ou espaciais, estocásticos ou imprevisíveis, de grandezas de influência. O referido erro não pode ser compensado tão pouco eliminado, podendo somente ser reduzido considerando um aumento do número de observações.

Os erros aleatórios estão associados à natural variabilidade dos processos físicos o que levam a flutuações (para cima ou para baixo) nos valores medidos. E devem ser abordados com métodos estatísticos, como por exemplo o desvio-padrão.

O erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência, assim como o erro aleatório não pode ser eliminado mas pode ser reduzido. É exemplo de uma grandeza de influência nesta definição a má calibração de um equipamento de medição que gerará uma alteração de mesmo valor e sentido, para mais ou para menos, no valor medido.

Já incerteza de medição reflete a falta de conhecimento exato do valor a ser medido. O resultado de uma medição mesmo após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos é uma mera estimativa do valor da grandeza a ser medida, considerando os efeitos aleatórios e a correção imperfeita de efeitos sistemáticos.

Ormsbee (1989) afirma que o sucesso de modelos matemáticos na análise e projeto de sistemas de distribuição é altamente dependente da precisão dos dados de entrada necessários.

Araújo e Lansey (1991) colocam que a calibração de redes de distribuição de água é normalmente realizada com um pequeno número de medições de campo e estimativas de medidas consideradas como reais porém tanto as medições de campo como as estimativas iniciais podem ter algum erro, o que pode gerar resultado de calibrações impróprios.

Lansey e Basnet (1991) afirmam que a calibração de uma rede de distribuição de água é uma tarefa tediosa e demorada, sem garantia de determinar os parâmetros do sistema apropriadamente. Desenvolvem um modelo computacional com o objetivo de minimizar uma função objetivo, chegando a zero com dados de exatos. No entanto, os parâmetros estimados (rugosidades, coeficientes de atrito, cargas e demandas nodais, diâmetros dentre outros) nem sempre são os verdadeiros valores, o que aponta para a necessidade de recolher quantidades suficientes de dados de alta qualidade.

Simpson, Vítkovský e Lambert (2000) realizando a calibração de fatores de atrito e considerando que em condições reais os dados de entrada podem conter erros, implementam erros de medição em termos de desvio padrão nas cargas medidas nos nós da rede em estudo o que resulta em erros médios relativos maiores que quando realizam a calibração com as cargas sem erros, realizam ainda outras identificações considerando a presença de erros nos comprimentos de tubos e verificam alterações também nos erros médios relativos.

Lansey et al (2001) realizam a avaliação de calibração e coleta de dados por entender que calibração de redes de distribuição de água visa desenvolver um modelo que imite condições de campo sob uma variedade de distribuições de demanda. Desenvolvem um processo de calibração de três etapas e considera as incertezas nas medidas e cálculo e fornece uma medida de qualidade da calibração.

Wendland e Rabelo (2010) afirmam que valores de medição verdadeiros são indetermináveis por natureza o que leva a se recorrer a valores convencionalmente verdadeiros. E relatam que algumas circunstâncias que são significativas na medição de cargas hidráulicas das quais se destacam as de ordem experimental que são devidas aos instrumentos de medição.

Araújo (2003) afirma que no processo de calibração é importante que os dados de medição sejam de boa qualidade, e que o cenário ideal seria aquele em que o erro fosse nulo. Como isso é praticamente impossível o mesmo faz uma análise que tem como proposta avaliar a influência dos erros de medição no processo de calibração dos fatores de atrito. Altera os dados de carga transiente geradas pelo modelo através de erros aleatórios e realiza a calibração dos fatores de atrito verificando a alteração nos erros médios relativos com relação aos encontrados nas identificações realizadas com cargas ideais, ou seja, sem erros.

### 3 METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado o Método Transiente Inverso (MTI) cuja otimização foi realizada através de Algoritmos Genéticos (AG), com a finalidade de identificar fatores de atrito nos trechos de tubulações de duas redes hidráulicas a partir de dados de carga transientes medidas em condições ideais e cargas transientes medidas considerando a presença de erros de medição (sistemáticos e aleatórios), o que representaria uma medição de campo.

O procedimento ideal seria realizar medições de carga hidráulica em campo e utilizar os dados coletados para resolver o problema inverso com um confronto entre as cargas coletadas (medidas) e as cargas calculadas pelo modelo hidráulico. Nesta pesquisa as calibrações utilizaram dados sintéticos. Neste procedimento, as cargas hidráulicas transientes nas redes hidráulicas de características reais conhecidas foram geradas e consideradas como sendo medidas em campo.

Utilizou-se três programas desenvolvidos por Araújo (2003), o primeiro para a determinação das condições permanentes, o segundo para a determinação das cargas transientes e o terceiro para identificação dos fatores de atrito através de Algoritmo Genético.

O Método Transiente Inverso (MTI) com um Algoritmo Genético (AG) empregou o método das características (MOC) na solução das equações de movimento para escoamento transiente em redes hidráulicas.

Planilhas eletrônicas foram utilizadas como auxiliares para cálculo de dados de entrada nos programas e para o incremento de erros de medição nas cargas transientes.

#### 3.1 Formulação e solução do Problema Inverso

A formulação do problema inverso deste trabalho foi: identificar fatores de atrito nas tubulações de redes hidráulicas (variáveis do problema) através de dados de carga transientes medidas em certo número de nós das redes em estudo, durante certo intervalo de tempo, considerando cargas medidas sem erros e com erros, de forma a obter um ótimo ajuste entre as cargas medidas e as cargas calculadas.

A solução do problema inverso segue o processo indireto com a minimização da diferença entre os resultados de carga transiente medidas e calculados, através de uma Função Objetivo -  $FO$  (14).

$$FO = - \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} |H_{i,j}^m - H_{i,j}^c| \quad (14)$$

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

Os critérios de parada da função objetivo são a convergência do módulo da diferença entre a carga medida e a carga calculada a 0,1m ou o AG atingir o número de gerações estipuladas.

As cargas hidráulicas transientes foram resultado de um evento transiente provocado por uma manobra de válvula. Para que fossem medidas as referidas cargas, as condições permanentes tiveram que ser determinadas previamente, pois eram desconhecidas, e os dados disponíveis eram restritos sendo: tipo de material do qual eram compostas as redes, dados de carga no reservatório e demandas nos nós das redes em estudo, diâmetros e comprimentos dos trechos, bem como de fatores de atrito inicialmente estipulados. Para tanto, utilizou-se um dos programas desenvolvidos por Araújo (2003) para a determinação das condições permanentes desconhecidas.

Com as condições permanentes determinadas, as vazões nos trechos e cargas nos nós foram os dados de entrada para o modelo hidráulico transiente. O evento transiente utilizado no referido modelo foi gerado por uma manobra de válvula. E com programa destinado a determinação de condições transientes, as mesmas foram determinadas com a medição de cargas hidráulicas em certo número de nós, sendo que um deles foi o nó onde se encontrava a válvula; e em um determinado espaço de tempo ( $ts$ ) e intervalo de tempo ( $dt$ ), em cada rede. O número de registros de carga corresponde à relação  $ts/dt$ .

Segundo Araújo (2003) o tempo de observação do evento transiente não demonstrou diferenças significativas nos resultados de suas calibrações. Com isso o tempo de observação do transiente aqui neste trabalho coincidiu com o tempo de manobra de válvula.

Considerando que o Método Transiente Inverso (MTI) foi desenvolvido por Liggett e Chen (1994) para uma calibração de redes hidráulicas utilizando dados restritos de carga hidráulica, nas duas redes estudadas as medições de carga ocorreram somente em 20% dos seus nós.

A identificação dos fatores de atrito realizou-se através de Algoritmos Genéticos (AG), utilizando outro programa também desenvolvido por Araújo (2003), os dados de entrada neste programa foram dados de carga hidráulica transiente e parâmetros do AG, como: número de gerações, número de cromossomos, probabilidades de *crossver*, mutação e



sucessões, de forma a alcançar um ótimo ajuste entre as cargas medidas e as cargas calculadas pretendido, isto foi feito com a utilização da Função Objetivo (14).

Todo o processo foi realizando tomando por base dados disponíveis das redes em estudo e fatores de atrito estipulados. E a partir desses, fatores de atrito foram identificados e considerados como os valores reais, foram então determinadas novamente as condições permanentes e transientes das redes em estudo, e novas cargas transientes foram então medidas. Essas cargas foram tomadas como as cargas medidas convencionalmente verdadeiras, ou simplesmente, cargas medidas.

A partir daí iniciou-se o processo de incrementos de erros de medição nas cargas transientes medidas, de forma a tentar reproduzir os dados de uma medição real exposta a diversas possibilidades de erros. E com o conjunto de cargas medidas com erro e sem erro, realizaram-se novas calibrações de fator de atrito das redes.

### 3.2 Dados das Redes Exemplo

As redes exemplo estudadas são de tamanhos e complexidades diferentes, quanto ao número de nós, trechos e anéis. Segundo Araújo (2003) a aplicação do procedimento MTI-AG não impõe restrição no tamanho do sistema.

O material da tubulação das redes estudadas é o mesmo, o ferro fundido, e tem as seguintes características: espessura da parede do tubo,  $e = 10$  mm; coeficiente de Poisson,  $\nu = 0,25$ ; módulo de elasticidade de Young da parede do conduto,  $E = 120$  GPa.

As propriedades da água importantes para o estudo foram: módulo de elasticidade da água,  $K = 2,19$  GPa; massa específica,  $\rho = 999$  kg/m<sup>3</sup>, a 15° C de temperatura.

Os valores de celeridades iniciais correspondem às características do material da rede e do fluido em escoamento.

Para um sistema de dois ou mais condutos, é necessário que o mesmo intervalo de tempo seja usado para todos os condutos tal que as condições de contorno nas junções possam ser usadas. Este intervalo de tempo deverá ser selecionado de forma a obedecer a condição de estabilidade de Courant ( $\Delta x > a\Delta t$ ). Entretanto, para evitar interpolação,  $\Delta t$  deve ser escolhido de maneira a satisfazer a seguinte equação (15) (CHAUDHRY, 1987).

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (15)$$

Onde:  $n_i$  é um número inteiro e igual ao número de trechos no qual o  $i$ -ésimo tubo é dividido;  $L_i$  é o comprimento do  $i$ -ésimo tubo;  $a_i$  é a celeridade do  $i$ -ésimo tubo. Como a celeridade não é precisamente conhecida, ajustes menores nos seus valores são aceitáveis.

Os nós onde as válvulas foram instaladas foram para a Rede Exemplo A o nó 5 e para a Rede Exemplo B o nó 4.

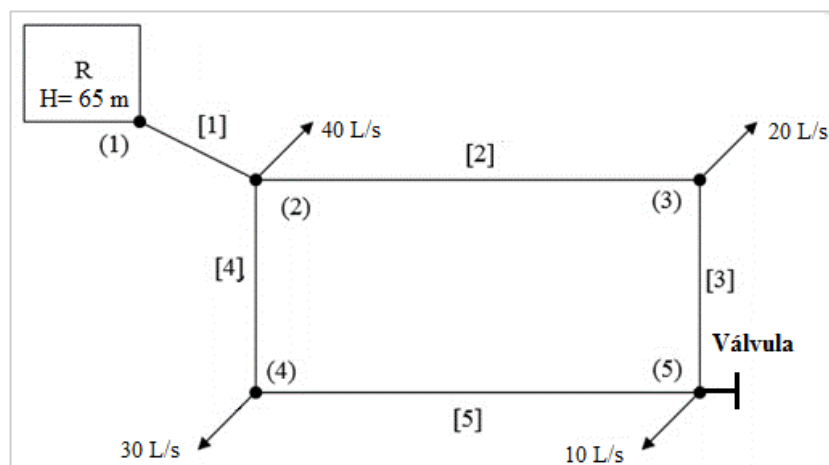
A condição transiente nas redes foi causada por uma manobra de válvula que teve duração de 20 s. O tempo de observação do transiente hidráulico foi também 20 s em intervalos de tempo, para a simulação computacional de  $\Delta t=0,1s$ . Com este intervalo de tempo selecionado, os tubos foram discretizados em trechos, cada um com  $\Delta x=150m$ .

### 3.2.1 Rede Exemplo A

A Rede Exemplo A é caracterizada por ter 1 anel, 5 trechos e 5 nós e alimentada por um reservatório conforme figura 5. Foi adaptada do livro de Porto (2006).

Os nós da rede apresentam demandas constantes indicadas na figura 5 e a carga no reservatório é de 65 m. Não foram consideradas diferenças de nível entre os nós da rede. Foi considerada a restrição de medição de cargas transientes em 20% dos nós da rede, ou seja, um nó, e este foi o nó da válvula (nó 5).

Figura 5– Rede Exemplo A



Fonte: Adaptada de Porto (2006)

Legenda: [ ] n° do tubo; ( ) n° do nó; R é Reservatório

As características físicas da rede exemplo A são apresentadas na tabela 1 onde a coluna (1) consta a numeração do tubo; coluna (2) consta o comprimento do tubo; coluna (3) consta o diâmetro do tubo; coluna (4) apresenta os valores iniciais da celeridade nos tubos; coluna (5) apresenta os valores ajustados da celeridade nos tubos (celeridade corrigida).

Tabela 1– Características físicas dos tubos – Rede Exemplo A

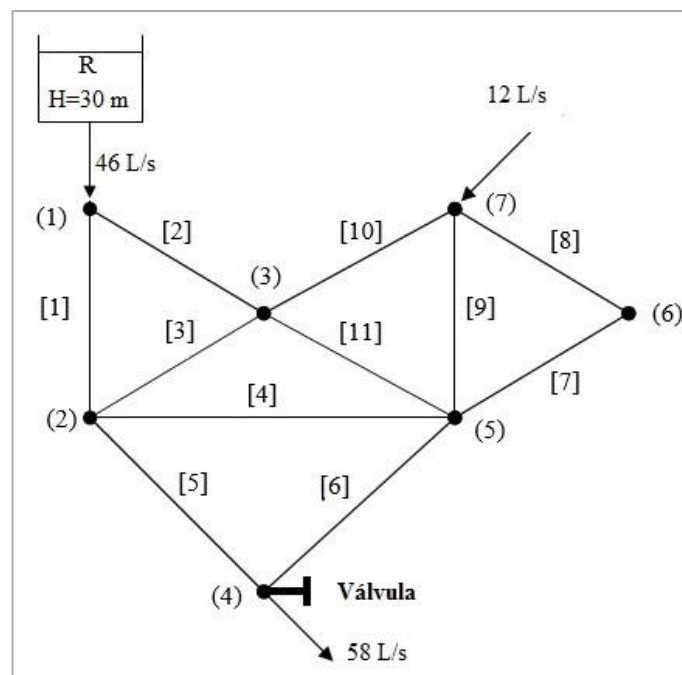
Tubo	L (m)	D (m)	a (m/s)	$a_j$ (m/s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	300	0,400	1156,6	1500,0
2	305	0,100	1374,9	1525,0
3	215	0,300	1217,4	2150,0
4	215	0,100	1374,9	2150,0
5	215	0,250	1251,7	2150,0

### 3.2.2 Rede Exemplo B

A Rede Exemplo B é caracterizada por ter 5 anéis, 11 trechos e 7 nós e alimentada por um reservatório conforme figura 6. O seu material é o ferro fundido. Não foram consideradas diferenças de nível entre os nós da Rede. Foi utilizada em diversos trabalhos no estudo de calibração por Pudar e Ligget (1992); Ligget e Chen (1994); Simpson, Vítkovský e Lambert (2000); Araújo (2003) e Soares (2007).

Os nós da rede apresentam demandas constantes indicadas na figura 6 e a carga no reservatório é 30 m. Não foram consideradas diferenças de nível entre os nós da Rede. Foi considerada a restrição de medição de cargas transientes em 20% dos nós da Rede, ou seja, dois nós, e estes foram o nó onde se encontrava a válvula (nó 4) e um nó de demanda (nó 7).

Figura 6– Rede Exemplo B



Fonte: Adaptada de Ligget e Chen (1994)  
 Legenda: [ ] nº do tubo; ( ) nº do nó; R é Reservatório

As características físicas da rede exemplo B são apresentadas na tabela 2 onde a coluna (1) consta a numeração do tubo; coluna (2) consta o comprimento do tubo; coluna (3) consta o diâmetro do tubo; coluna (4) apresenta os valores iniciais da celeridade nos tubos; coluna (5) apresenta os valores ajustados da celeridade nos tubos (celeridade corrigida).

Tabela 2– Características físicas dos tubos – Rede Exemplo B

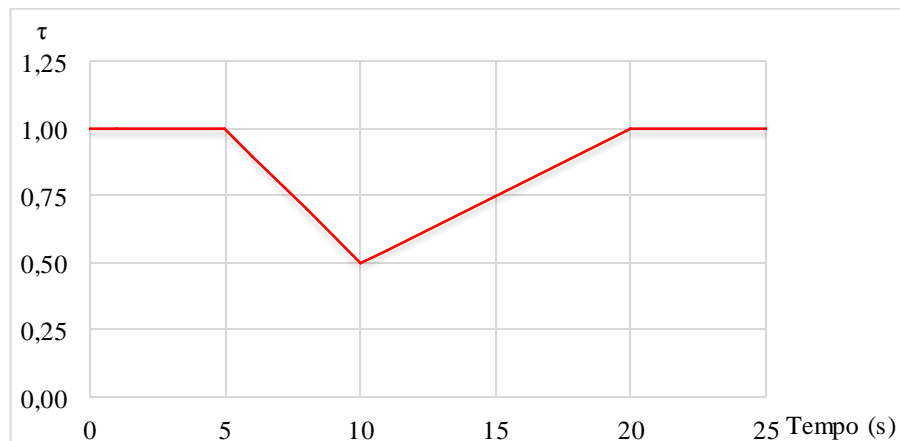
<b>Tubo</b>	<b>L (m)</b>	<b>D (m)</b>	<b>a (m/s)</b>	<b>a<sub>j</sub> (m/s)</b>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	305	0,250	1251,7	1525,0
2	215	0,250	1251,7	2150,0
3	215	0,200	1289,0	2150,0
4	305	0,200	1289,0	1525,0
5	215	0,250	1251,7	2150,0
6	215	0,250	1251,7	2150,0
7	215	0,200	1289,0	2150,0
8	215	0,150	1329,9	2150,0
9	305	0,250	1251,7	1525,0
10	215	0,150	1329,9	2150,0
11	215	0,250	1251,7	2150,0

### 3.3 Manobras de Válvula

Segundo Araújo (2003) uma manobra de válvula é caracterizada pela relação entre a lei de abertura ou fechamento relativo  $\tau$ , em função do tempo [T].

A manobra de válvula imposta às redes estudadas tem seu comportamento apresentado no gráfico 1.

Gráfico 1- Manobra de Válvula

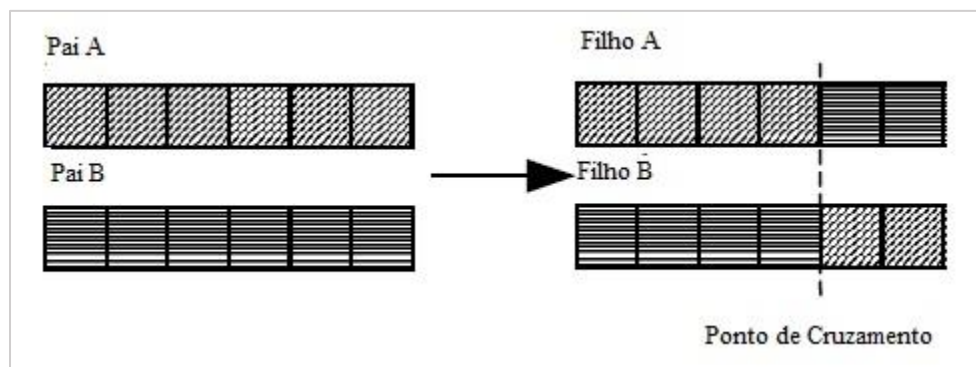


A manobra apresentada é assim descrita: inicialmente a válvula encontra-se aberta e dessa forma permanece por 5 s, inicia-se o fechamento linear da mesma até que  $\tau = 0,50$  seja atingido, o que vem a acontecer em 5 s, a partir desse instante a válvula volta a ser aberta, também linearmente, até atingir  $\tau=1,00$ , em 10 s, totalizando o tempo de manobra em 20 s. Vale ressaltar que as variações temporais de fechamento e abertura da válvula são diferentes.

### 3.4 Parâmetros de Algoritmo Genético

As calibrações realizadas tiveram os operadores de *crossover* (cruzamento) ponto a ponto (figura 7), mutação simples, as formas de substituição dos cromossomos ocorreram com elitismo e sem elitismo. E a representação dos fatores de atrito binária (discreta)

Figura 7 - Cruzamento ponto a ponto com representação binária



Fonte: Adaptada de Simpson; Vítkovsky e Lambert (2000)

Os parâmetros do AG aplicado para o processo de calibração foram os mesmos utilizados por Araújo (2003) considerando os ótimos resultados obtidos em seu estudo, quais sejam:

- Número de Gerações (NG) – 100;
- Número de cromossomos (NC) – 100;
- Probabilidade de *crossover* ( $p_c$ )– 100%;
- Probabilidade de mutação ( $p_m$ )– 0,50%;

No caso particular de calibrações em que a substituição dos cromossomos foi realizada com elitismo os parâmetros foram:

- Taxa de elitismo ( $p_e$ ) – 50%;
- Taxa de sucessão ( $p_s$ ) – 50%.

As estimativas das variáveis (fatores de atrito) consistiram de uma média de 10 (dez) processamentos do AG, ou seja, 10 (dez) conjuntos de resultados (16).

$$f_i^{calibrado} = \frac{\sum_{semente=1}^{10} f_i^{semente}}{10} \quad (16)$$

Onde:  $f_i^{calibrado}$  é o fator de atrito calibrado para um determinado tubo;  $f_i^{semente}$  é o fator de atrito da semente gerada para um determinado tubo;  $i$  é número do tubo.

### 3.5 Cenários de medição

A identificação dos fatores de atrito dos trechos de redes hidráulicas foi realizada a partir de cargas transientes simuladas com a presença de erros (sistemáticos e aleatórios, situação real) e sem a presença de erros (cargas ideais). Entendendo que medições não acontecem sem qualquer interferência de erros, por menores que sejam, necessitou-se adotar dados de cargas transientes simuladas a partir de fatores de atrito calibrados, como convencionalmente verdadeiras, ou seja, sem a presença de erros (cargas ideais).

As cargas transientes, consideradas obtidas com erros de medição de campo, foram determinadas a partir de incrementos de erros aleatórios e sistemáticos às cargas simuladas (cargas ideais). Isso feito com o auxílio de planilha eletrônica.

Os erros que incrementaram as cargas simuladas, para as duas redes, foram erros sistemáticos (ES) positivos e erros aleatórios (EA), considerando que os erros aleatórios podem ser positivos ou negativos e são flexíveis, acontecendo em intervalos de zero até mais ou até menos o valor assumido para EA. Os cenários de medições considerados foram dez, sendo:

- Cenário 1: ES = 0 m e EA =0%;
- Cenário 2: ES = 1 m e EA =1%;
- Cenário 3: ES = 1 m e EA =5%;
- Cenário 4: ES = 1 m e EA =10%;
- Cenário 5: ES = 5 m e EA =1%;
- Cenário 6: ES = 5 m e EA =5%;
- Cenário 7: ES = 5 m e EA =10%;
- Cenário 8: ES = 10 m e EA =1%;
- Cenário 9: ES = 10 m e EA =5%;
- Cenário 10: ES = 10 m e EA =10%.

### 3.6 Medidas de avaliação de interferência dos erros de medição nas calibrações

Após as calibrações dos fatores de atrito realizadas, a interferência de erros de medição nas mesmas foi avaliada considerando os resultados de erro médio relativo (EMR) e através da Função Objetivo ótima ( $FO_{ótima}$ ), que é a menor (em módulo) das dez FO correspondentes aos processamentos de AG.

O Erro Médio Relativo (EMR) é a média aritmética dos erros médios entre os fatores de atrito estipulados, ou reais, e os identificados (calibrados) através do MTI-AG, de acordo com a equação 17.

$$EMR = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{|f_i^{real} - f_i^{calibrado}|}{f_i^{real}} \times 100 \right] \quad (17)$$

onde:  $f$  = fator de atrito de Darcy-Weibach em regime permanente (adimensional);  $i$  é número do tubo e  $N$  é o número de tubos.

A Função Objetivo -  $FO$  (14) representa a diferença entre os resultados de carga transiente medidas e calculados, que o processo de calibração busca minimizar. Com isso entende-se que é um bom parâmetro de medida de eficiência de calibração.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os procedimentos para a identificação dos fatores de atrito seguiram o indicado na metodologia quanto à formulação e solução do problema inverso, bem como dados das redes exemplo, manobra de válvula e parâmetros de AG.

Os resultados de todas as determinações realizadas para as redes exemplo bem como seus parâmetros de eficiência de calibração são apresentadas em tabelas. E as cargas hidráulicas transientes e as comparações dos resultados são apresentadas em gráficos.

### 4.1 Rede Exemplo A

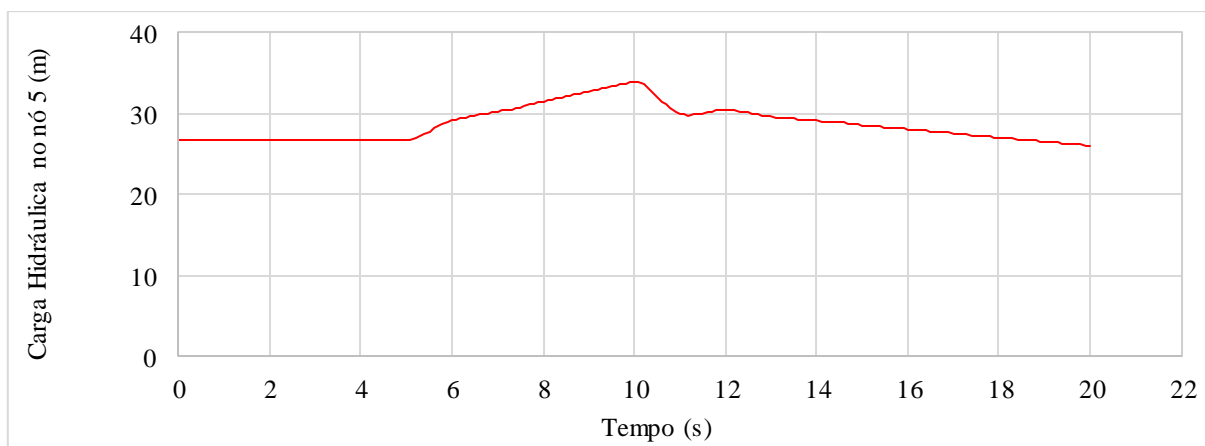
Aplicando o procedimento para estabelecer cargas ( $H$ ) e vazões ( $Q$ ) no regime permanente, através do MOC-Permanente, utilizando  $f=0,020$  (para todos os tubos) chegou-se aos seguintes resultados na tabela 3.

Tabela 3– Vazões e cargas iniciais - regime permanente - Rede Exemplo A

Tubo	$Q$ (L/s)	Nó	$H$ (m)
1	100,000	1	65,00
2	27,383	2	64,52
3	7,383	3	26,68
4	32,617	4	26,68
5	2,617	5	26,68

As cargas hidráulicas transientes estimadas, no nó 5 (H5), obtidas com a manobra de válvula em um período de 20 s em intervalos de 0.1s, estão no gráfico 2.

Gráfico 2– Cargas transientes estimadas – nó 5 – Rede exemplo A





#### 4.1.1 Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Sem Elitismo

Com os dados de carga transientes obtidas no nó 5 (H5), e considerando a substituição de cromossomos sem elitismo (SE), e todos os parâmetros de AG citados na metodologia, realizou-se a primeira calibração de fatores de atrito que é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo A – SE

<b>Tubo</b>	$f_{estipulado}$	$f_{real}$
1	0,020	0,030
2	0,020	0,024
3	0,020	0,036
4	0,020	0,018
5	0,020	0,041
<b>EMR (%)</b>	-	<b>51,10</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,84</b>

A partir dos fatores de atrito reais ( $f_{real}$ ) e aplicando o procedimento para estabelecer novas cargas e vazões no regime permanente, através do MOC-Permanente, chegou-se aos seguintes resultados da tabela 5.

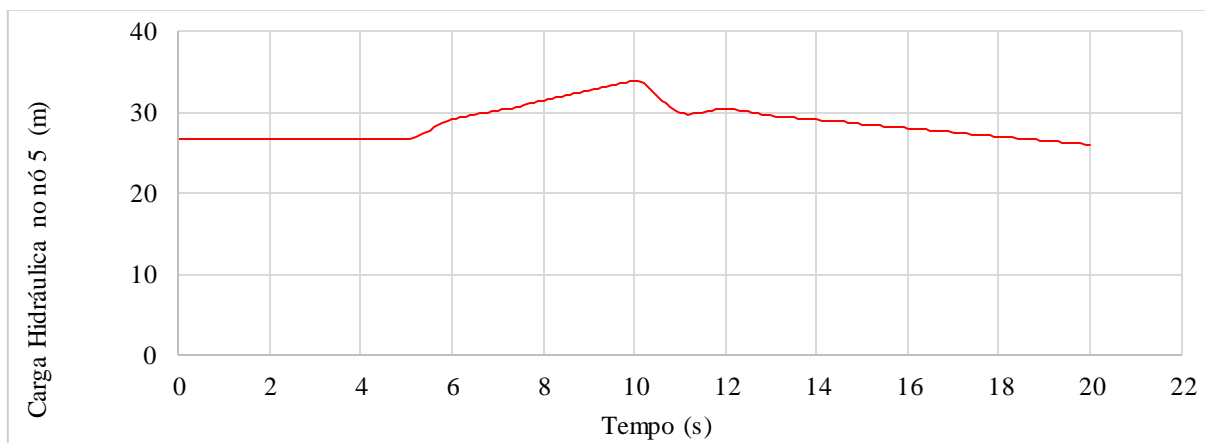
Tabela 5 – Novas Vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo A – SE

<b>Tubo</b>	$Q$ (L/s)	<b>Nó</b>	$H$ (m)
1	100,000	1	65,00
2	25,456	2	64,29
3	5,456	3	25,87
4	34,544	4	25,88
5	4,544	5	25,86

Os valores de vazão e carga no regime permanente foram alterados devido à utilização dos fatores de atrito, considerados reais, que interferem e são interferidos pelas condições de fluxo da água em escoamento.

As cargas hidráulicas transientes medidas, no nó 5 (H5), obtidas com a manobra de válvula e usando os fatores de atrito reais, em um período de 20 s em intervalos de 0,1s, estão no gráfico 3.

Gráfico 3– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 1- Rede exemplo A - SE



Com as cargas hidráulicas transientes medidas, no nó 5 (H5), apresentadas através do gráfico 3, foram realizados os incrementos de erros de medição, para os diversos cenários citados no capítulo 3, e são apresentados nos gráficos 4 a 12.

Gráfico 4– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 2 - Rede exemplo A - SE

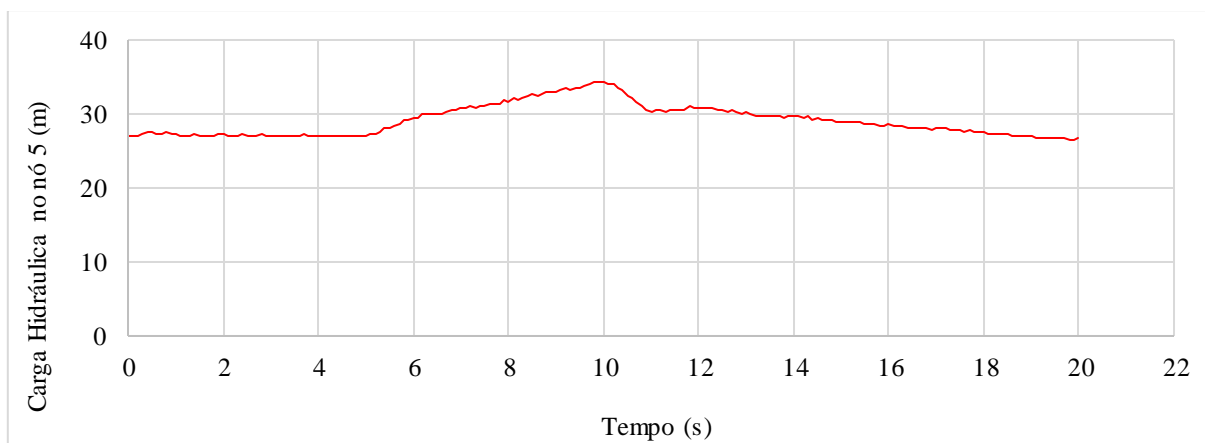


Gráfico 5– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 3 - Rede exemplo A - SE

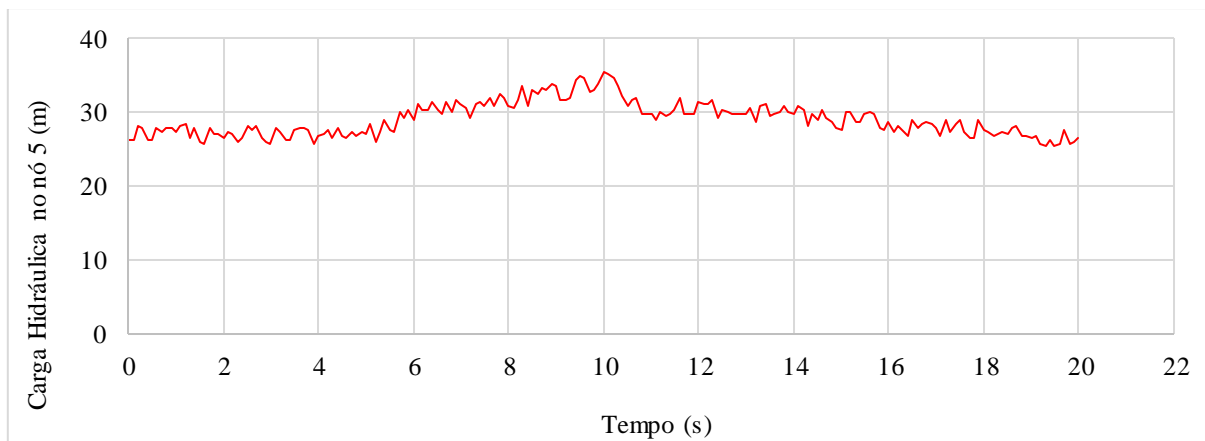


Gráfico 6 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 4 - Rede exemplo A - SE

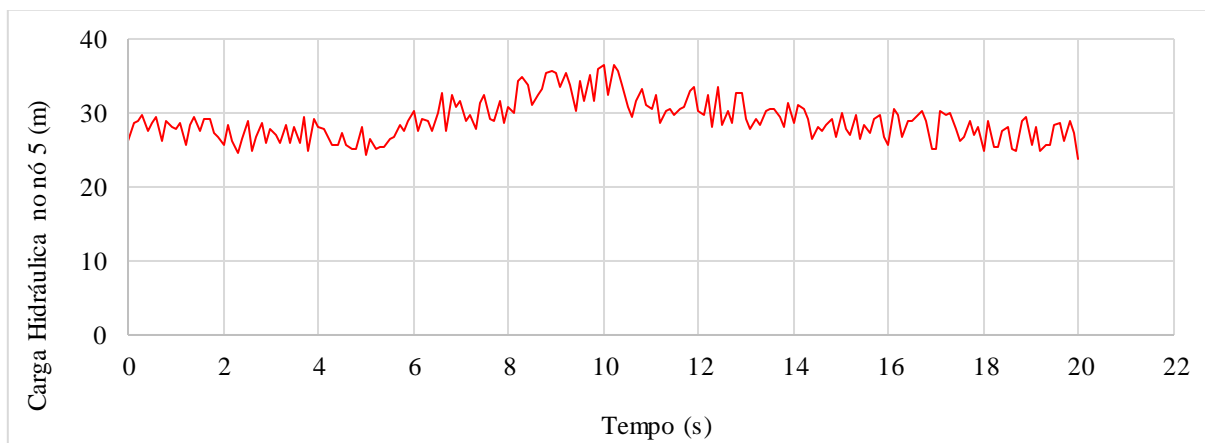


Gráfico 7 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 5 - Rede exemplo A - SE

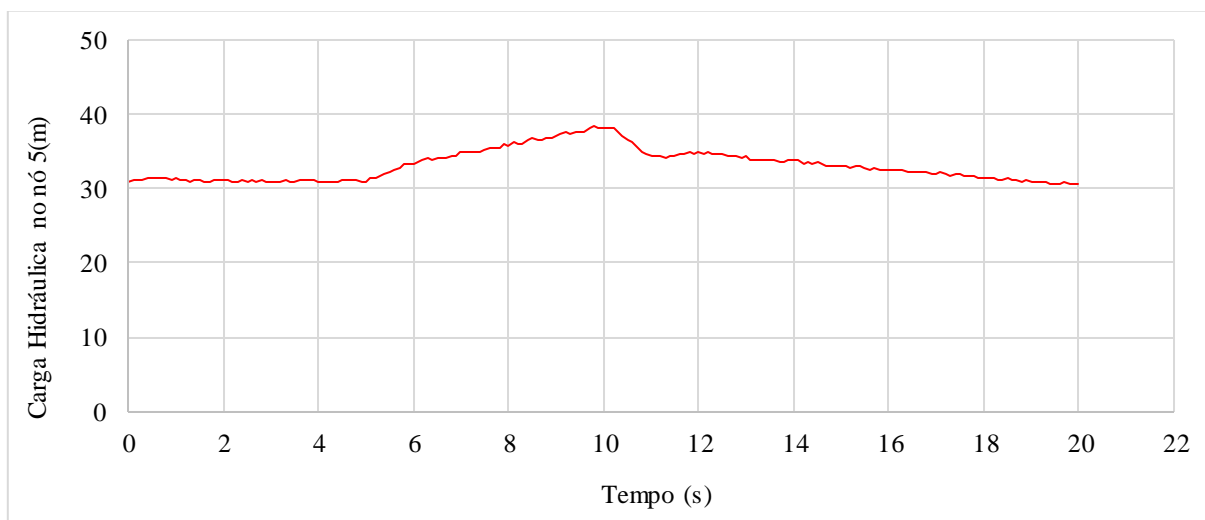


Gráfico 8 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 6 - Rede exemplo A - SE

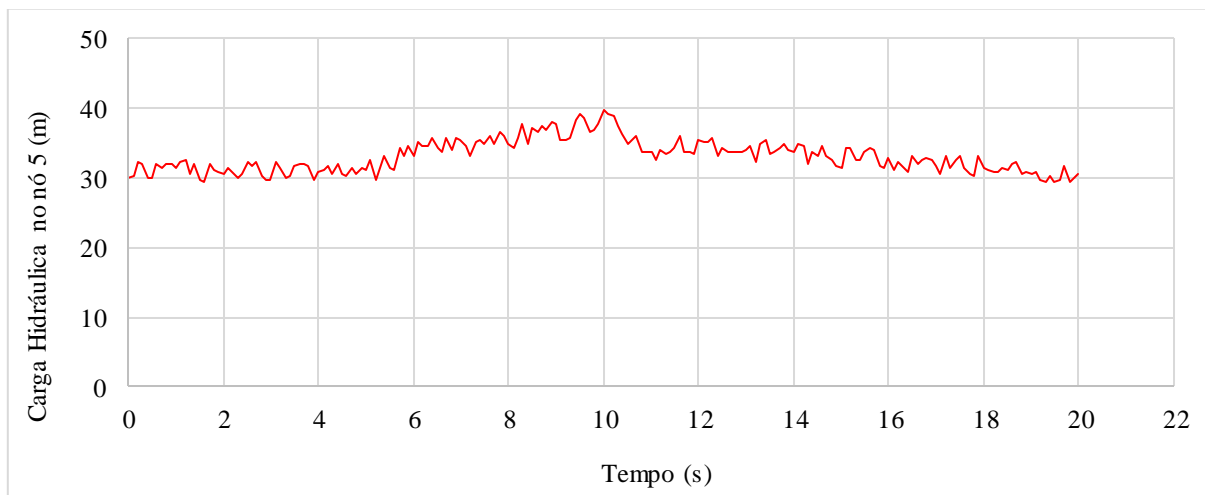


Gráfico 9– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 7 - Rede exemplo A - SE

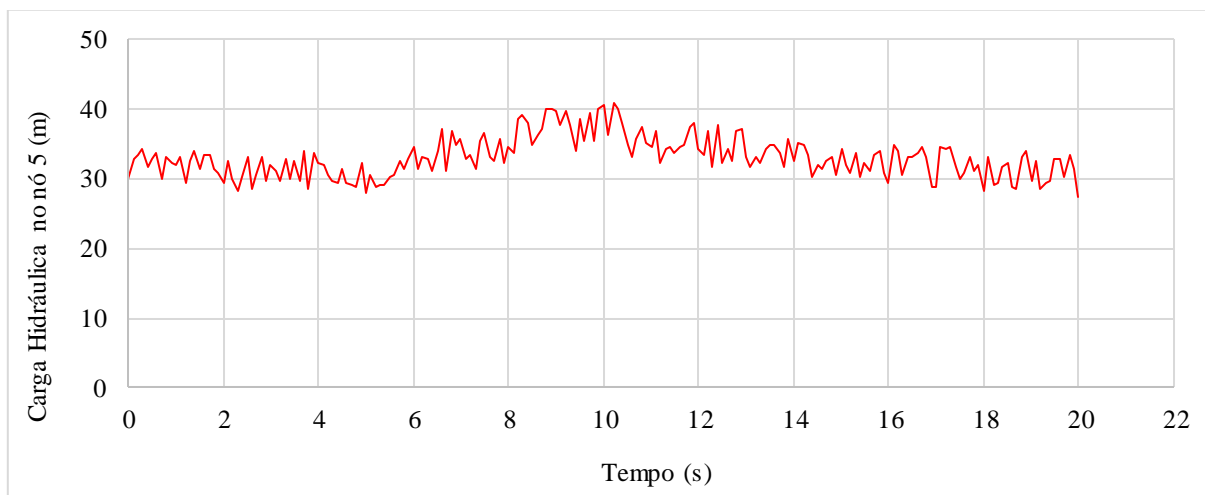


Gráfico 10– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 8 - Rede exemplo A - SE

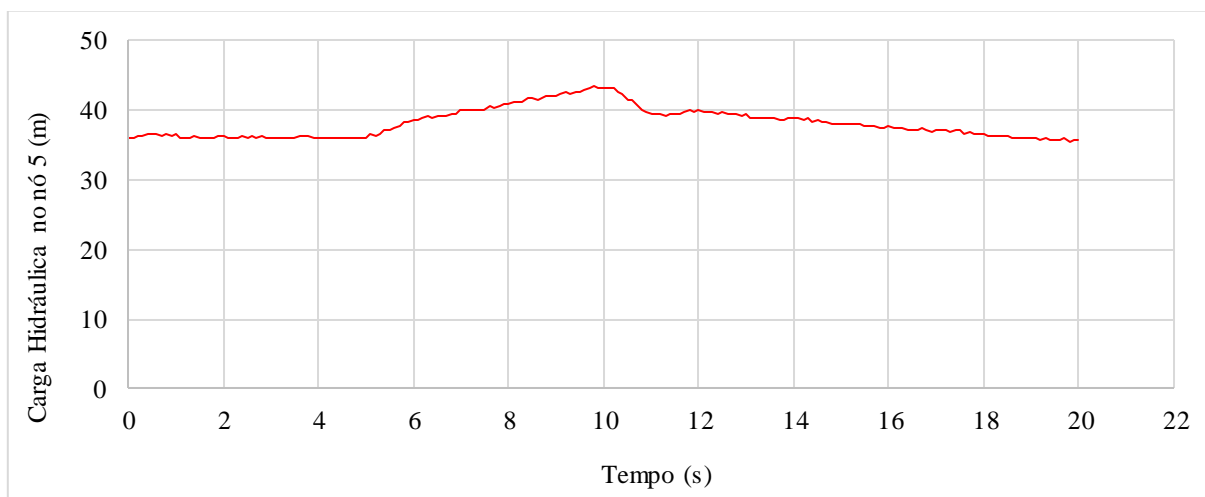


Gráfico 11– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 9 - Rede exemplo A - SE

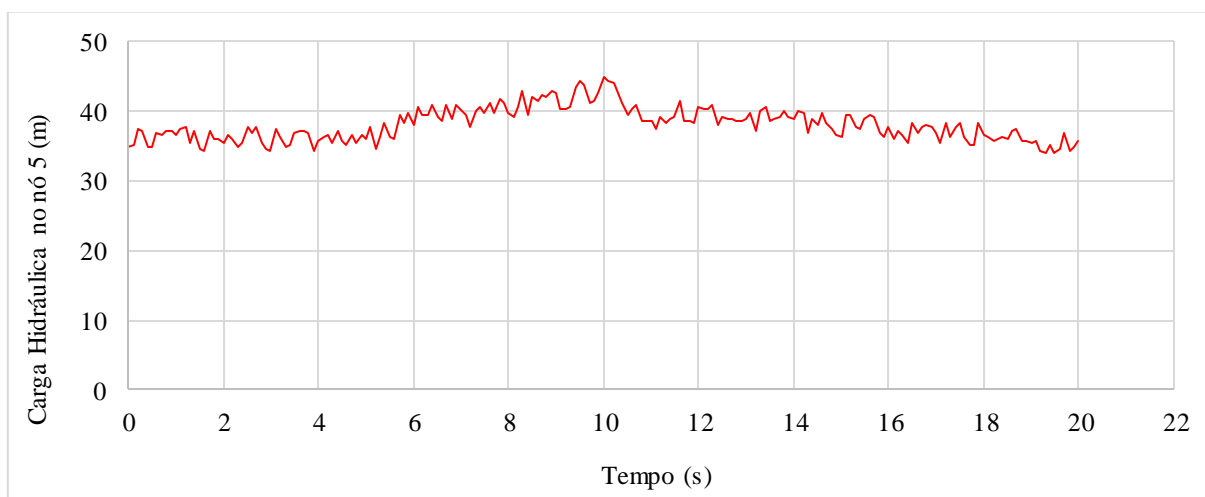
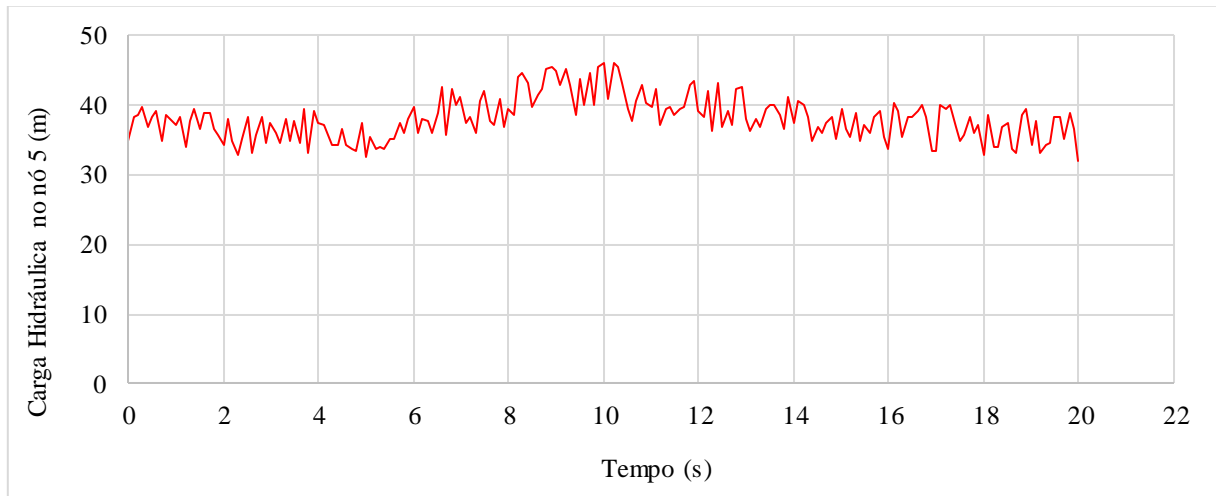


Gráfico 12– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 10 - Rede exemplo A – SE



Com a utilização das cargas hidráulicas apresentadas através dos gráficos foram realizadas as identificações de fator de atrito para as cargas medidas sem erro (cenário 1) e as cargas medidas com erro. Essas identificações são apresentadas nas tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 2, 3 e 4 – Rede Exemplo A – SE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =10%;</i>
1	0,030	0,033	0,019	0,051	0,029
2	0,024	0,024	0,023	0,027	0,020
3	0,036	0,024	0,036	0,031	0,031
4	0,018	0,018	0,018	0,016	0,022
5	0,041	0,031	0,037	0,032	0,030
<b>EMR (%)</b>	-	<b>14,6</b>	<b>9,9</b>	<b>27,0</b>	<b>15,1</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,75</b>	<b>-19,41</b>	<b>-142,33</b>	<b>-290,97</b>

Tabela 7 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 5, 6 e 7 – Rede Exemplo A – SE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =10%;</i>
1	0,030	0,033	0,022	0,027	0,020
2	0,024	0,024	0,022	0,019	0,032
3	0,036	0,024	0,032	0,030	0,040
4	0,018	0,018	0,015	0,016	0,012
5	0,041	0,031	0,036	0,031	0,033
<b>EMR (%)</b>	-	<b>14,6</b>	<b>14,4</b>	<b>15,4</b>	<b>26,9</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,75</b>	<b>-49,62</b>	<b>-168,57</b>	<b>-344,44</b>

Tabela 8 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 8, 9 e 10 – Rede Exemplo A – SE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA = 0%;</i>	<i>ES = 10 m e EA = 1%;</i>	<i>ES = 10 m e EA = 5%;</i>	<i>ES = 10 m e EA = 10%;</i>
1	0,030	0,033	0,023	0,021	0,012
2	0,024	0,024	0,020	0,019	0,011
3	0,036	0,024	0,040	0,036	0,030
4	0,018	0,018	0,011	0,012	0,018
5	0,041	0,031	0,049	0,044	0,030
<b>EMR (%)</b>	-	<b>14,6</b>	<b>21,8</b>	<b>18,7</b>	<b>30,8</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,75</b>	<b>-100,88</b>	<b>-209,94</b>	<b>-415,84</b>

Foram comparados os cenários em que se mantinha o erro sistemático e o erro aleatório variava (gráfico 13) com os cenários onde se mantinha o erro aleatório e o erro sistemático variava (gráfico 14). Onde foi possível observar que o erro médio relativo (EMR) foi máximo para o cenário 10, em que os erros tanto sistemáticos quanto aleatórios foram os máximos neste estudo. Contudo não foi possível estabelecer uma relação entre a variação do EMR e a variação dos erros de medição. Já para os gráficos 15 e 16 observou-se que os valores da função objetivo ótima (FO<sub>ótima</sub>) crescem em módulo à medida que os erros de medição crescem sejam eles sistemáticos ou aleatórios.

Gráfico 13 – EMR – Rede Exemplo A – Casos de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SE

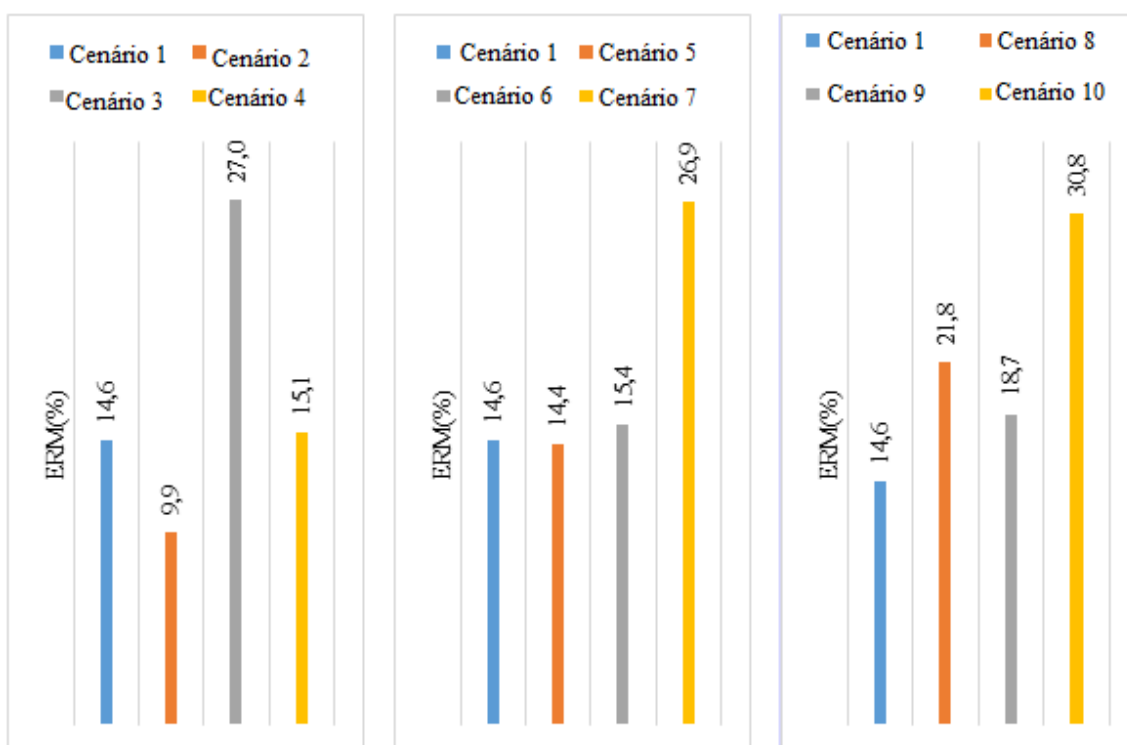


Gráfico 14 – EMR – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE

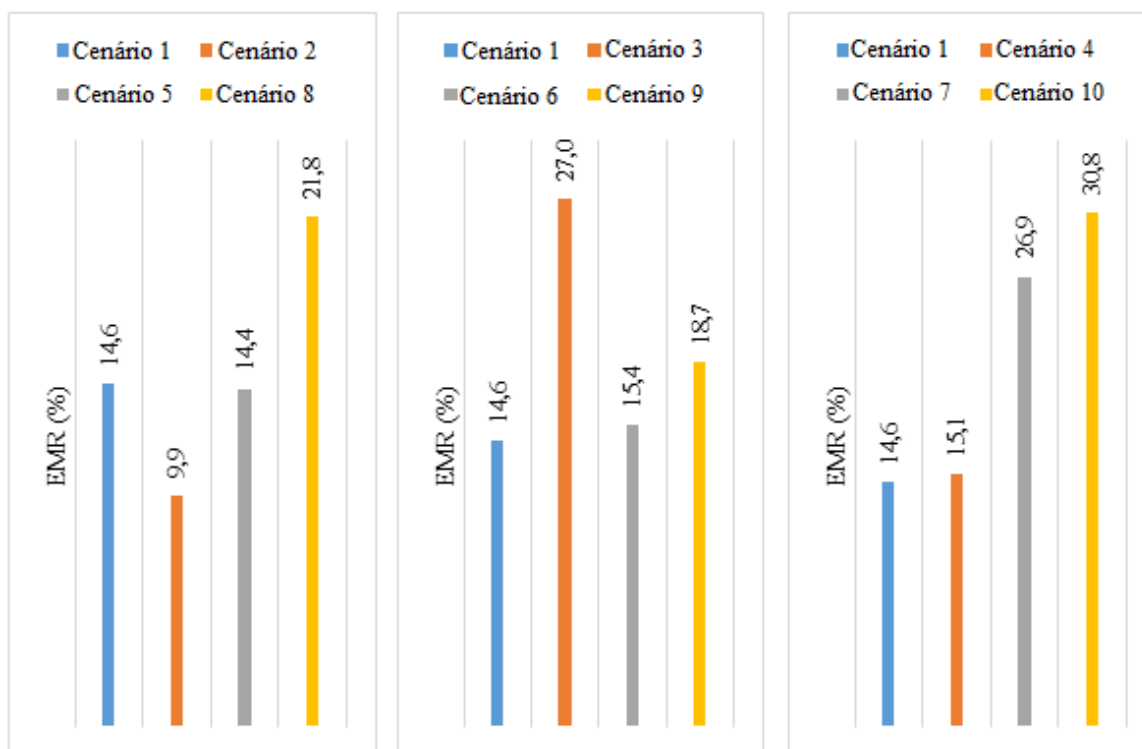
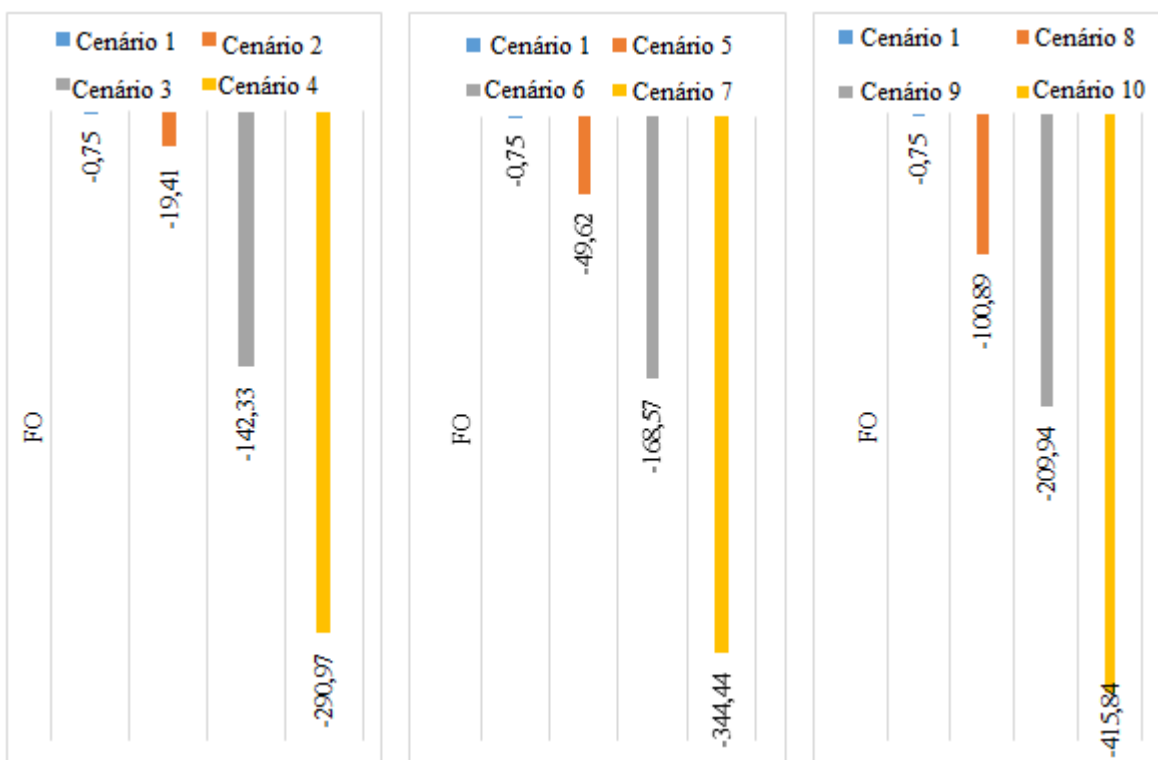
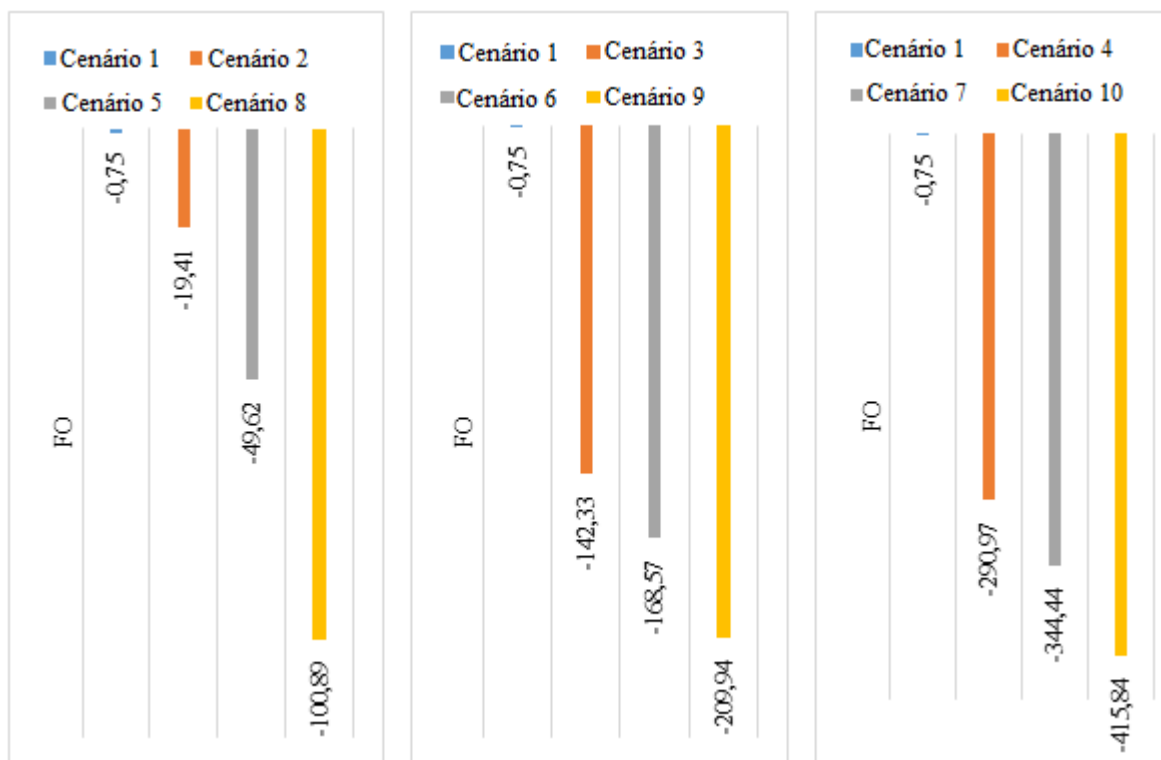
Gráfico 15 – FO<sub>ótima</sub> – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SE

Gráfico 16– FO<sub>ótima</sub> – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE

#### 4.1.2 Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Com Elitismo

Com os dados de carga transientes obtidas no nó 5 (H5), e considerando a substituição de cromossomos com elitismo (CE), e todos os parâmetros de AG citados na metodologia, realizou-se a primeira calibração de fatores de atrito que é apresentada na tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo A– CE

Tubo	$f_{estipulado}$	$f_{real}$
1	0,020	0,033
2	0,020	0,023
3	0,020	0,027
4	0,020	0,018
5	0,020	0,031
<b>EMR (%)</b>	-	<b>35,5</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,17</b>

A partir dos fatores de atrito reais ( $f_{real}$ ) e aplicando o procedimento para estabelecer novas cargas e vazões no regime permanente, através do MOC-Permanente, chegou-se aos seguintes resultados na tabela 10.

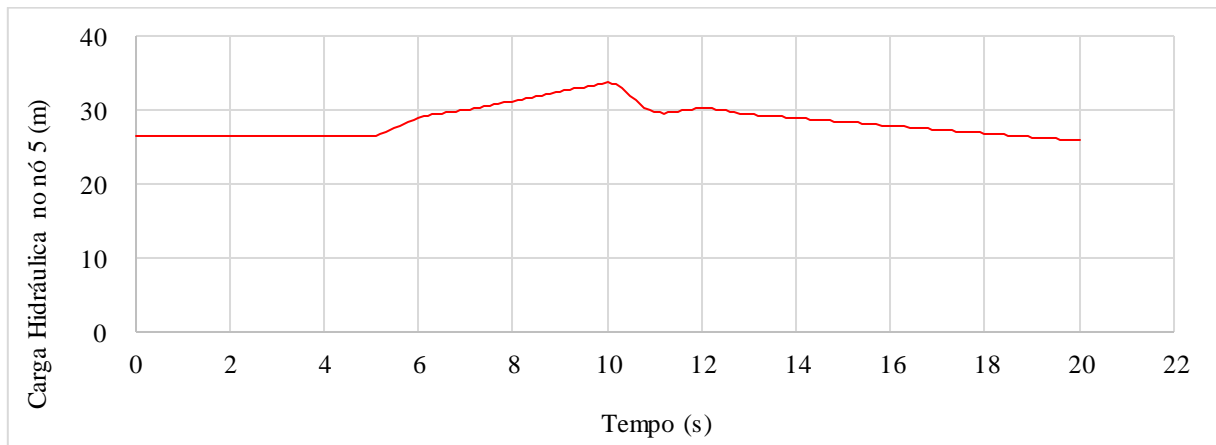


Tabela 10 – Novas vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo A – CE

Tubo	$Q$ (L/s)	Nó	$H$ (m)
1	100,000	1	65,00
2	25,564	2	64,20
3	5,564	3	26,45
4	34,436	4	26,45
5	4,436	5	26,44

As cargas hidráulicas transientes medidas, no nó 5 (H5), obtidas com a manobra de válvula e usando os fatores de atrito reais, em um período de 20 s em intervalos de 0,1s, estão no gráfico 17.

Gráfico 17– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 1 - Rede exemplo A – CE



Percebe-se que as cargas transientes apresentadas nos gráficos 3 e 17 se assemelham, independente de os fatores de atrito terem sido calibrados com ou sem elitismo, demonstrando que os resultados alcançados são confiáveis.

Com as cargas hidráulicas transientes medidas, no nó 5 (H5), apresentadas através do gráfico 17, foram realizados os incrementos de erros de medição, para os diversos cenários citados no capítulo 3, e são apresentados nos gráficos 18 a 26.

Gráfico 18 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 2 - Rede exemplo A – CE

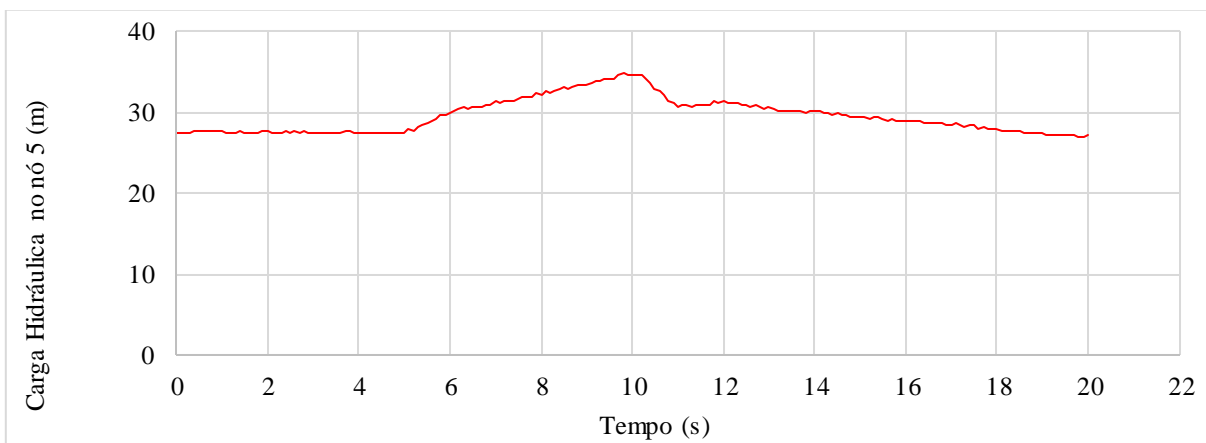


Gráfico 19– Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 3 - Rede exemplo A – CE

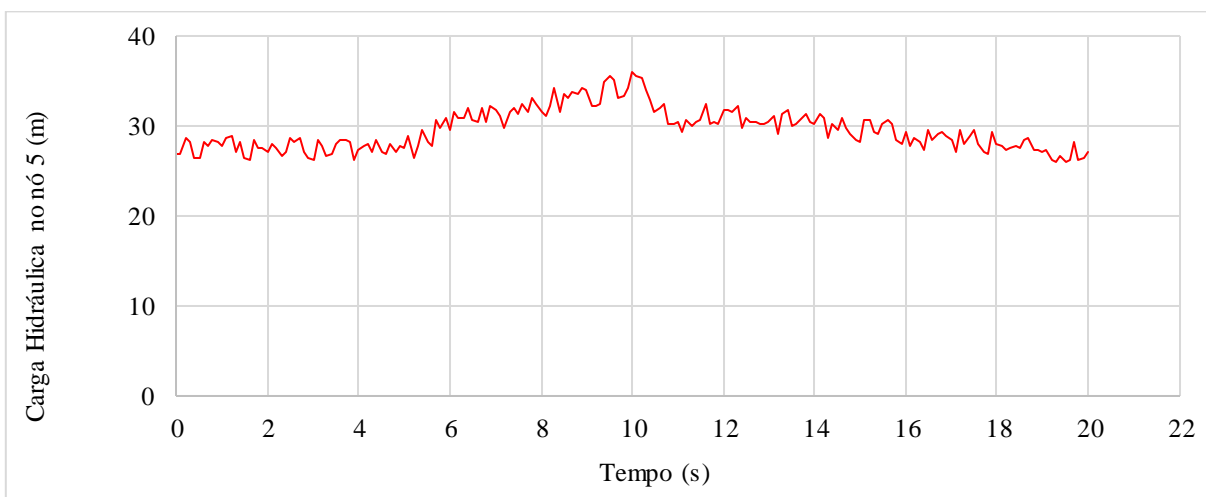


Gráfico 20 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 4 - Rede exemplo A – CE

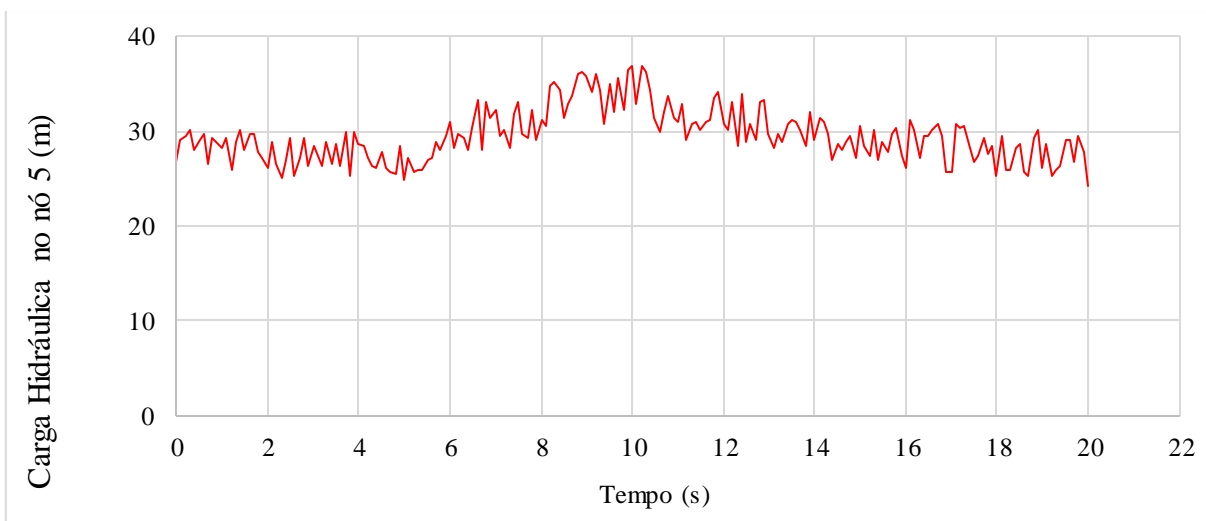


Gráfico 21 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 5 - Rede exemplo A – CE

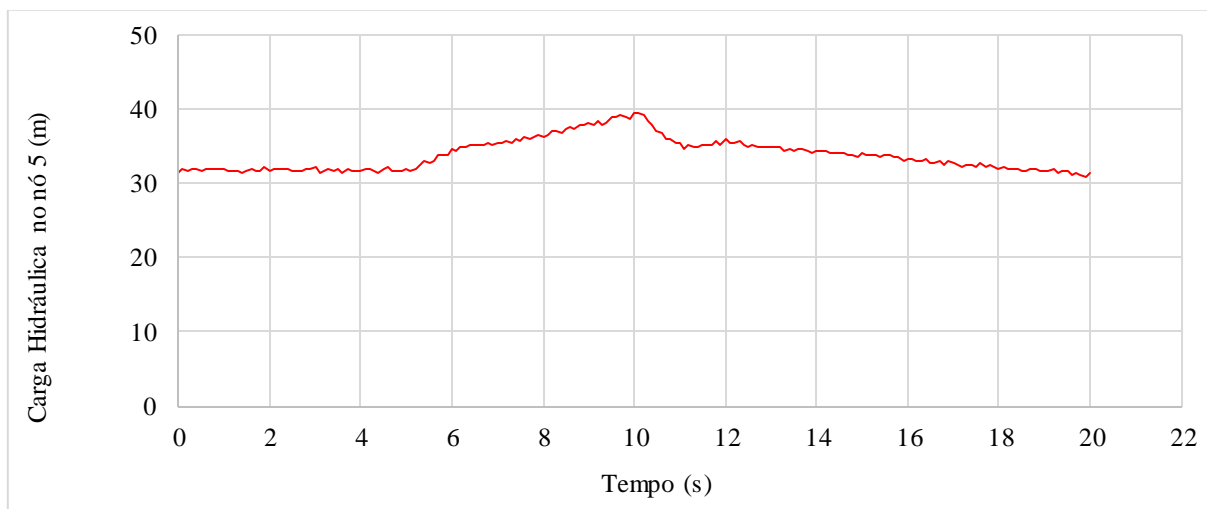


Gráfico 22 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 6 - Rede exemplo A – CE

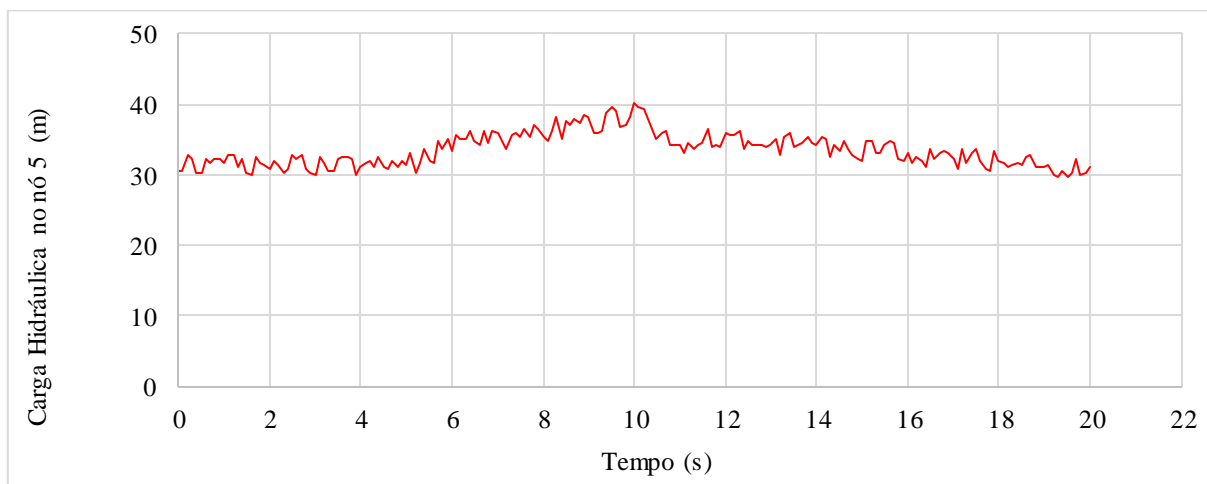


Gráfico 22 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 7 - Rede exemplo A – CE

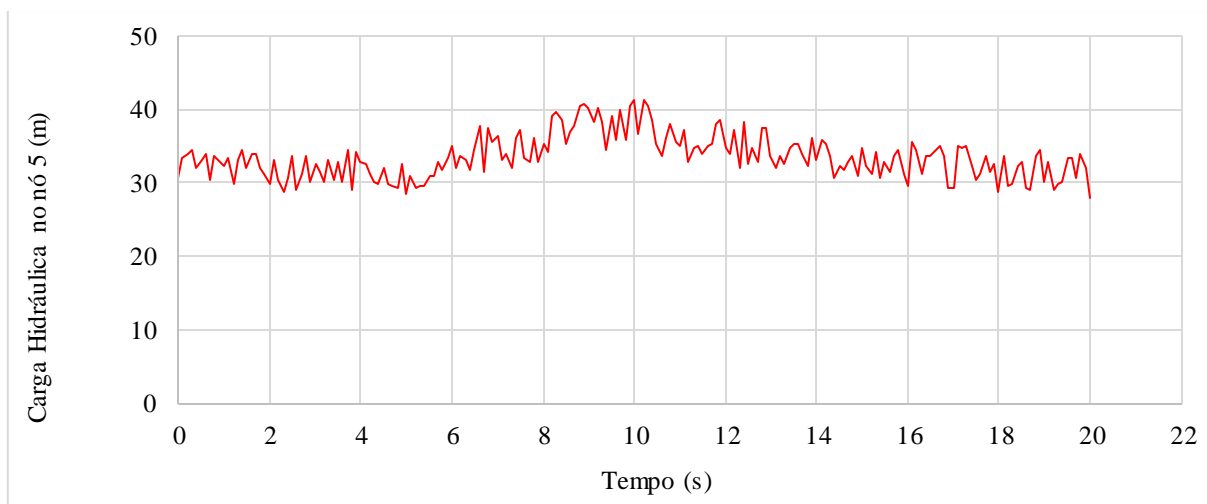


Gráfico 23 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 8 - Rede exemplo A – CE

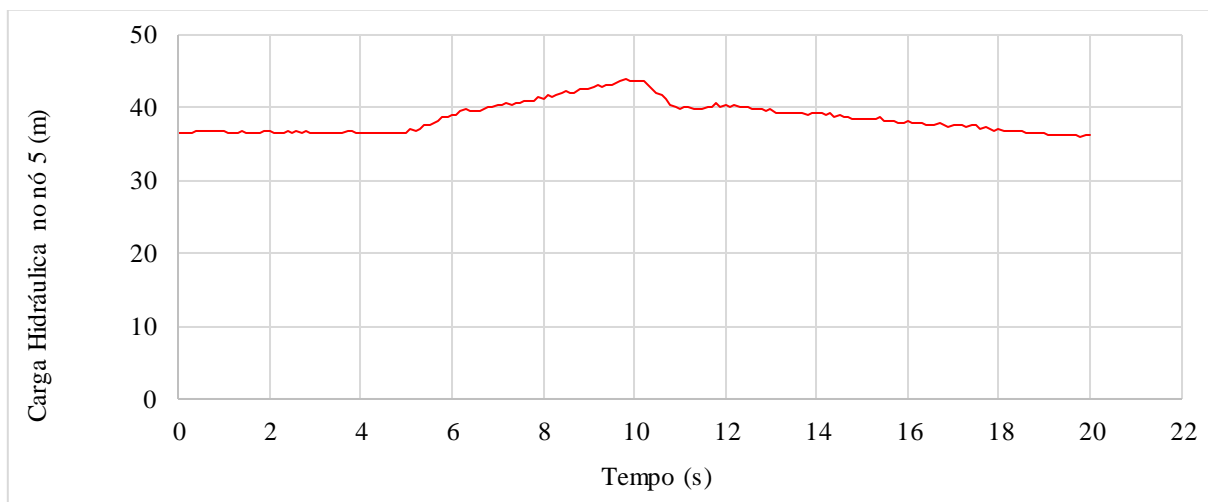


Gráfico 24 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 9 - Rede exemplo A – CE

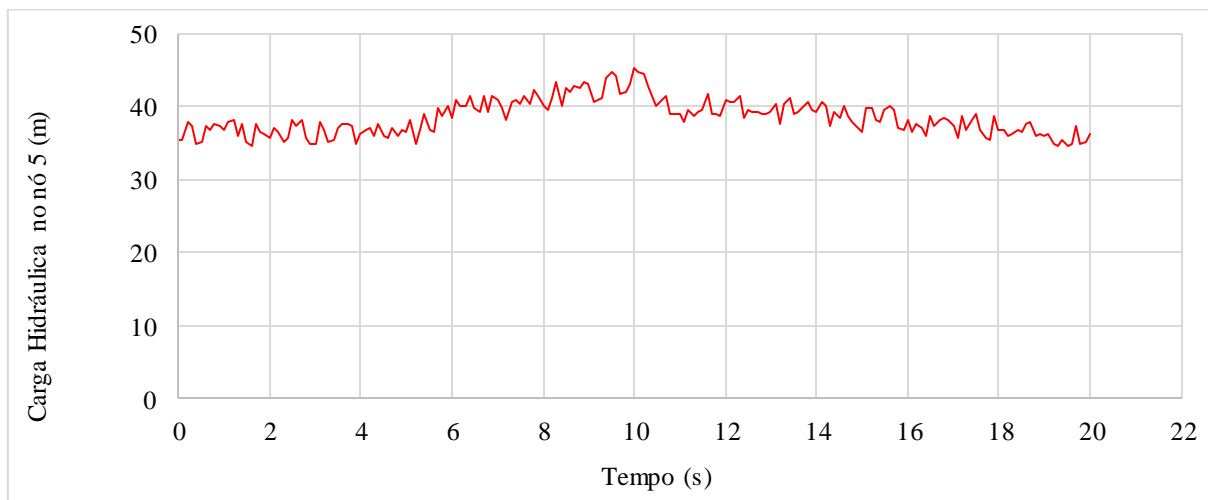
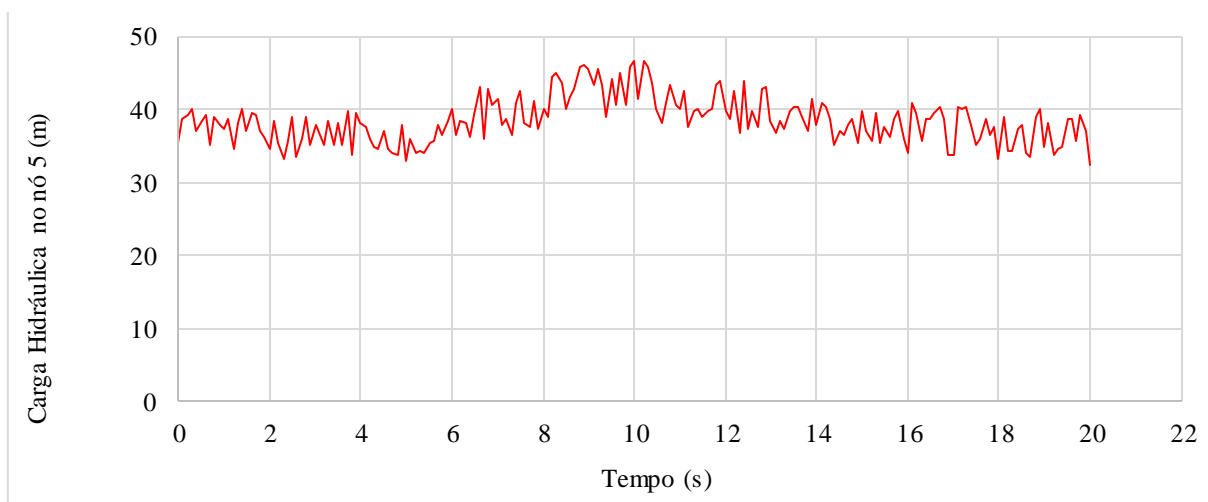


Gráfico 25 – Cargas transientes medidas – nó 5 – Cenário 10 - Rede exemplo A – CE



Com a utilização das cargas hidráulicas apresentadas através dos gráficos anteriores foram realizadas as identificações de fator de atrito para as cargas medidas sem erro (Cenário 1) e medidas com erro. Essas identificações são apresentadas nas tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 2, 3 e 4 – Rede Exemplo A – CE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =10%;</i>
1	0,033	0,034	0,037	0,048	0,038
2	0,023	0,026	0,024	0,025	0,027
3	0,027	0,042	0,031	0,028	0,032
4	0,018	0,018	0,018	0,016	0,017
5	0,031	0,034	0,040	0,032	0,041
<b>EMR (%)</b>	-	<b>16,6</b>	<b>12,9</b>	<b>14,5</b>	<b>17,4</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,39</b>	<b>-19,88</b>	<b>-144,57</b>	<b>-295,74</b>

Tabela 12 – Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 5, 6 e 7 – Rede Exemplo A – CE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =10%;</i>
1	0,033	0,034	0,023	0,038	0,029
2	0,023	0,026	0,024	0,021	0,027
3	0,027	0,042	0,025	0,029	0,041
4	0,018	0,018	0,014	0,015	0,013
5	0,031	0,034	0,045	0,030	0,046
<b>EMR (%)</b>	-	<b>16,6</b>	<b>21,1</b>	<b>10,5</b>	<b>32,7</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,39</b>	<b>-50,69</b>	<b>-170,83</b>	<b>-349,24</b>

Tabela 13– Fatores de atrito calibrados – Cenários 1, 8, 9 e 10 – Rede Exemplo A – CE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 10 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 10 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 10 m e EA =10%;</i>
1	0,033	0,034	0,031	0,036	0,022
2	0,023	0,026	0,020	0,018	0,020
3	0,027	0,042	0,023	0,036	0,027
4	0,018	0,018	0,011	0,012	0,012
5	0,031	0,034	0,040	0,026	0,046
<b>EMR (%)</b>	-	<b>16,6</b>	<b>20,2</b>	<b>22,3</b>	<b>25,0</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,39</b>	<b>-102,46</b>	<b>-212,66</b>	<b>-422,11</b>

Mais uma vez para permitir uma análise, são apresentados gráficos 26 a 29, onde foram comparados os cenários em que se mantinha o erro sistemático e o erro aleatório variava (gráfico 26) e os cenários onde se mantinha o erro aleatório enquanto o erro sistemático variava (gráfico 27), onde foi possível observar que o erro médio relativo (EMR) foi máximo para o cenário 6. Para os cenários 8, 9 e 10 em que o erro sistemático é o mesmo, e o máximo valor considerado neste estudo, e o erro aleatório variava observou-se que os valores de EMR se apresentaram sem grandes variações entre si. Apesar dessas considerações não foi possível estabelecer, para estes cenários, uma relação entre a variação do EMR e a variação dos erros de medição. Já para os gráficos 28 e 29 observou-se que os valores da função objetivo ótima ( $FO_{ótima}$ ) crescem em módulo à medida que os erros de medição crescem sejam eles sistemáticos ou aleatórios.

Gráfico 26 – EMR – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE

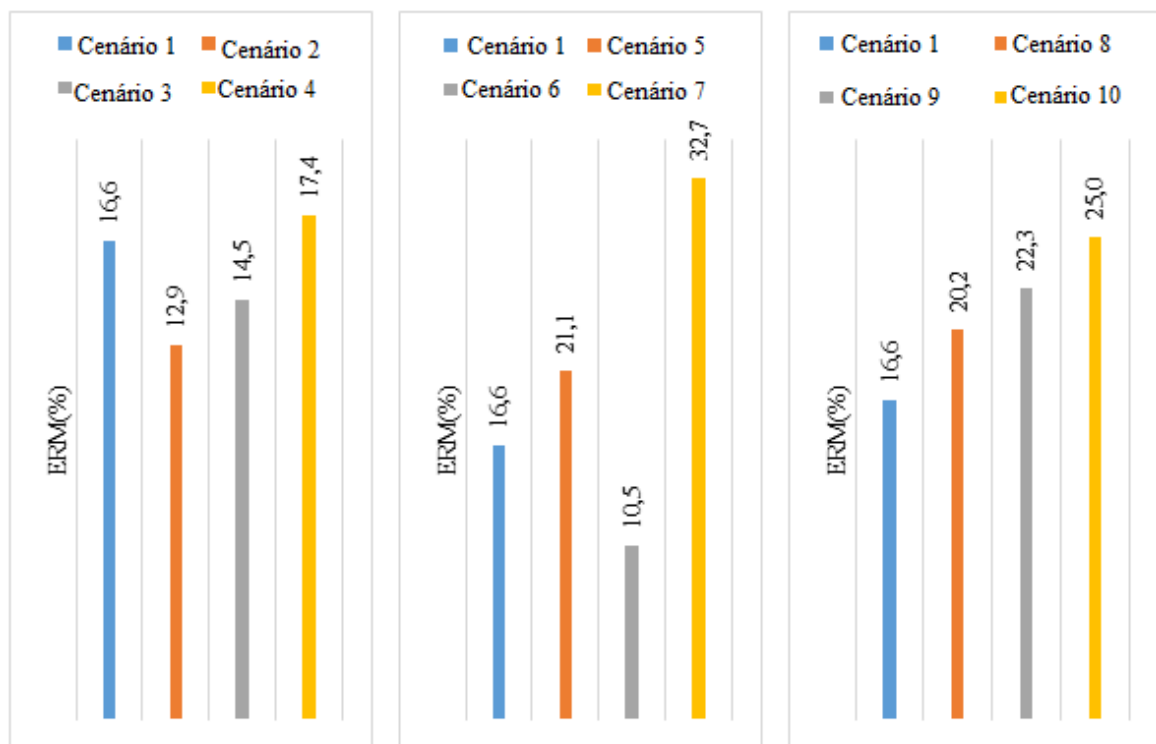


Gráfico 27 – EMR – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE

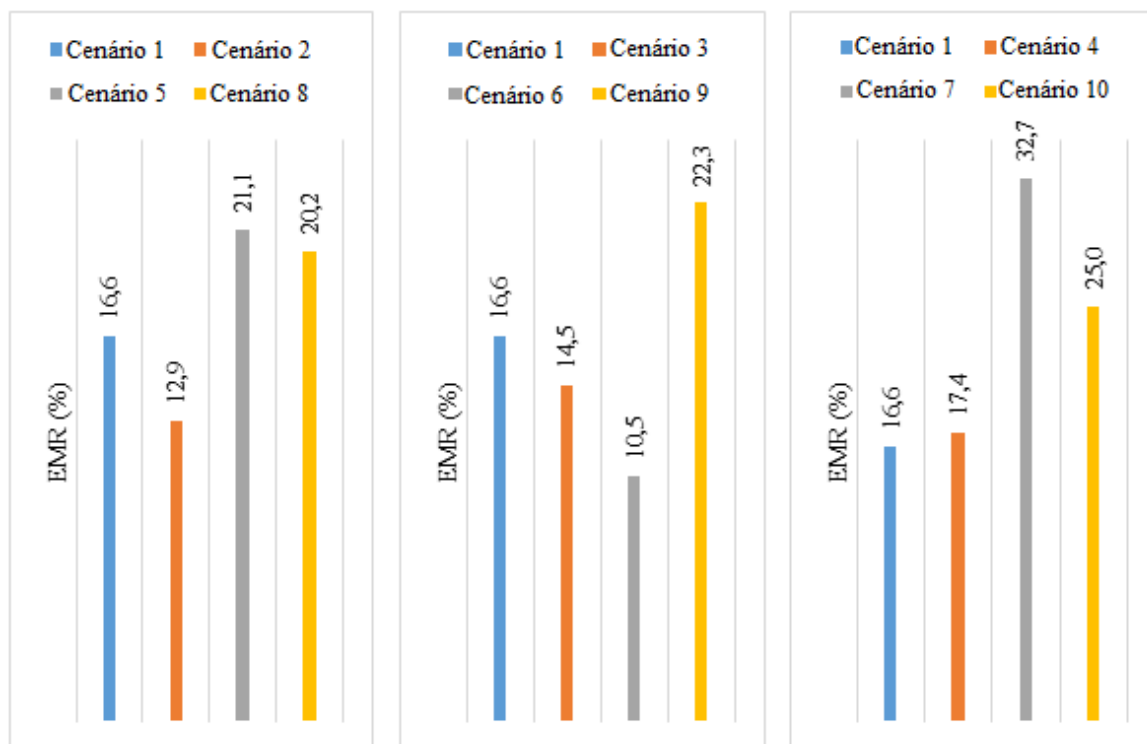
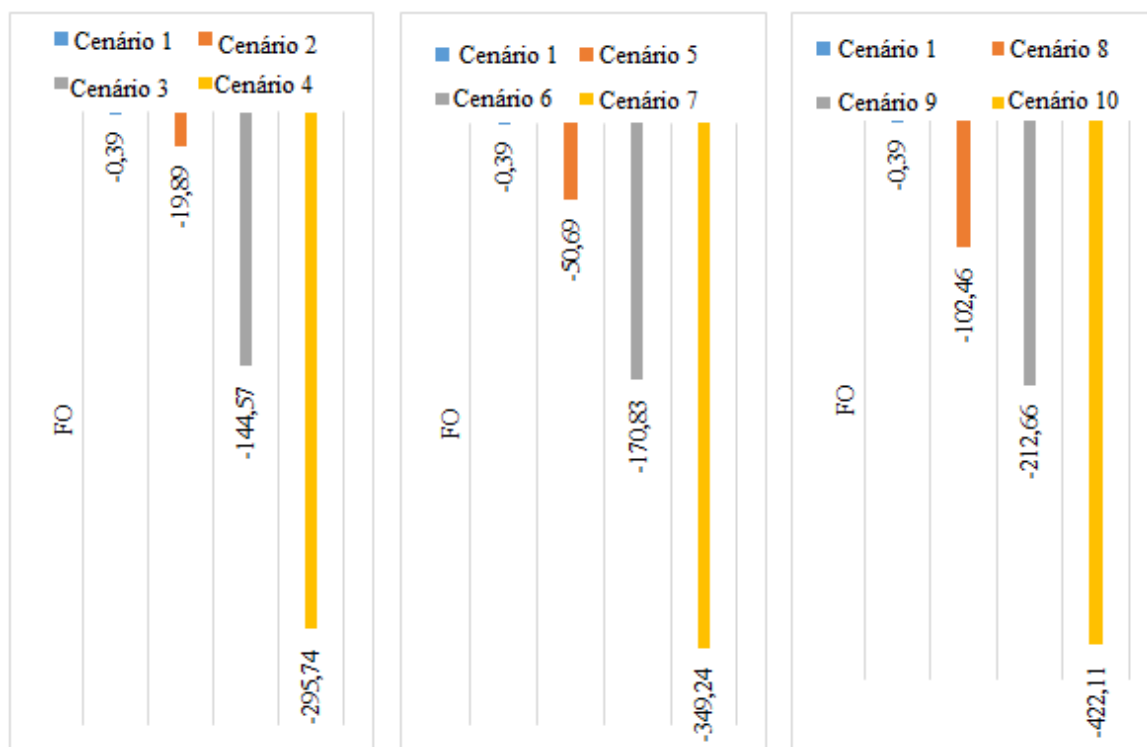
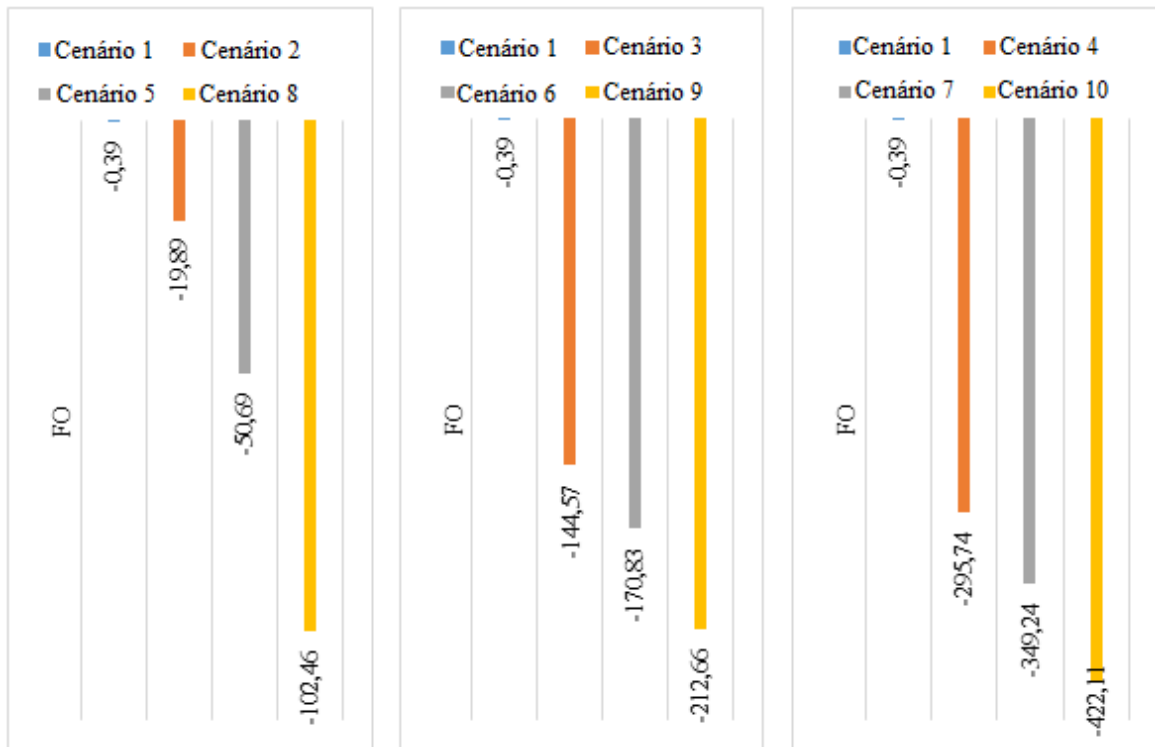
Gráfico 28 – FO<sub>ótima</sub> – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE

Gráfico 29 –  $FO_{ótima}$  – Rede Exemplo A – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE

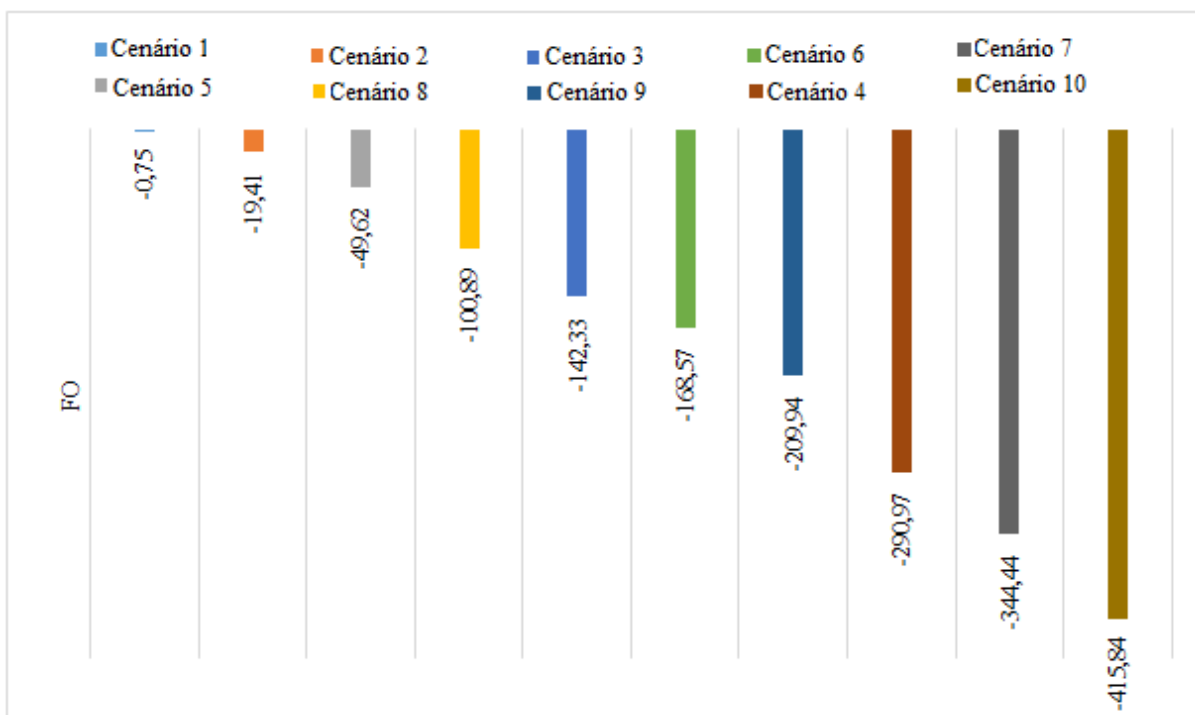
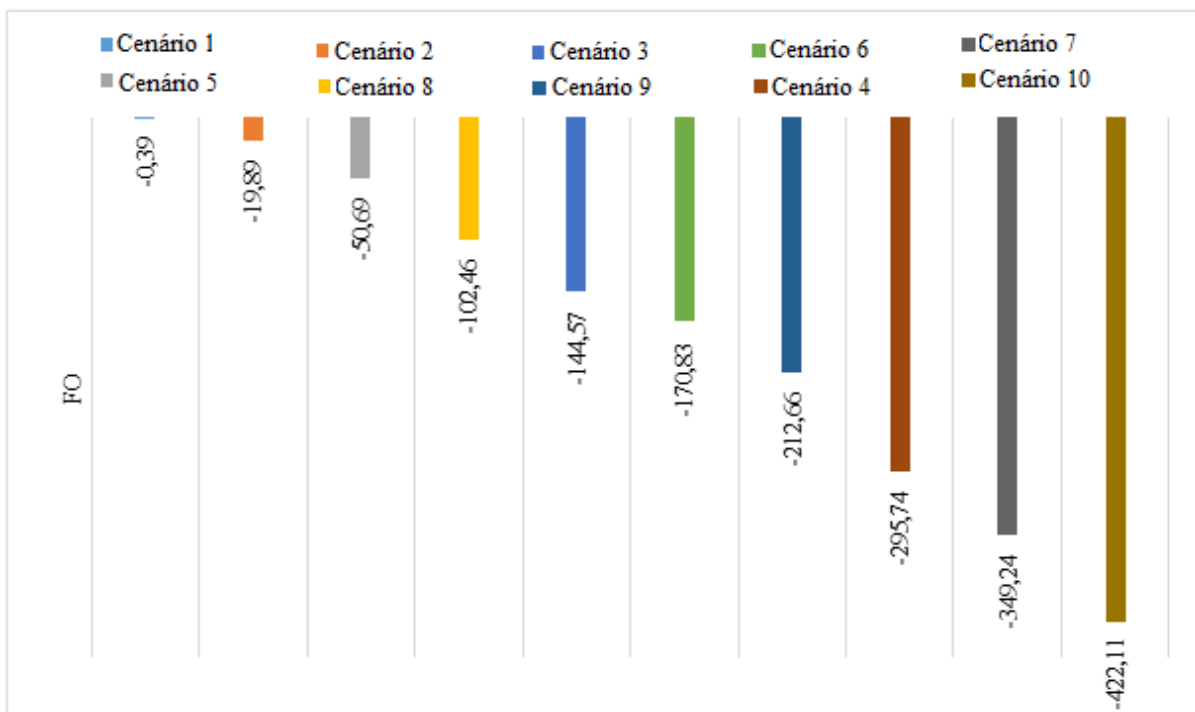
#### 4.1.3 Comparações entre os resultados de Algoritmos com Elitismo e sem Elitismo

Comparando as calibrações realizadas considerando o Elitismo com as que não o consideraram verifica-se que os valores da  $FO_{ótima}$ , para os mesmos cenários, são muito próximos.

Verifica-se que para a Rede Exemplo A o parâmetro de comparação que melhor detecta a presença de erros de medição é a Função Objetivo ótima, que se mostra bastante sensível aos erros aleatórios, tendo em vista as comparações realizadas, em que para erros sistemáticos iguais e aleatórios diferentes a função objetivo cresce em maior proporcionalidade que na situação contrária, onde os erros aleatórios são iguais e os erros sistemáticos são diferentes.

Apresentam-se os gráficos 30 e 31 para demonstrar o avanço crescente de  $FO$  em todos os cenários estudados, separados para os cenários com Elitismo e sem Elitismo. É possível observar que o crescimento ocorre à medida que se aumentam os erros sistemáticos se mantendo os erros aleatórios.



Gráfico 30 – Comparação FO<sub>ótima</sub> para todos os cenários de medição de carga – Rede exemplo A – SEGráfico 31– Comparação entre FO<sub>ótima</sub> para todos os cenários de medição de carga – Rede A – CE

## 4.2 Rede Exemplo B

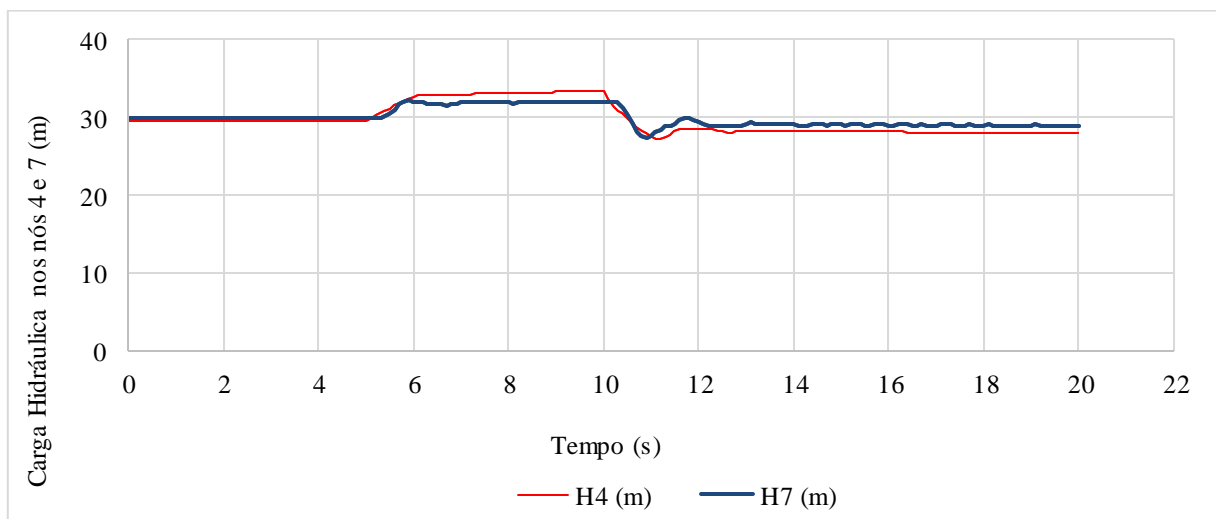
Para a obtenção dos resultados da Rede Exemplo B a metodologia foi a mesma utilizada para a Rede Exemplo A, assim os resultados são apresentados na mesma sequência. Aplicando o procedimento para estabelecer cargas ( $H$ ) e vazões ( $Q$ ) no regime permanente, utilizando  $f=0,020$  (para todos os tubos) chegou-se aos seguintes resultados na tabela 14.

Tabela 14 – Vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo B

Tubo	$Q$ (L/s)	Nó	$H$ (m)
1	22,669	1	30,00
2	23,331	2	29,73
3	7,778	3	29,80
4	1,377	4	29,43
5	29,071	5	29,73
6	28,929	6	29,74
7	3,142	7	29,79
8	3,142		
9	10,524		
10	1,667		
11	13,887		

As cargas hidráulicas transientes estimadas, no nó 4 (H4) e no nó 7 (H7), o nó da válvula e de demanda, respectivamente, obtidas com a manobra de válvula em um período de 20 s em intervalos de 0,1s, estão no gráfico 32, e demonstram que o nó 4, apresenta maiores valores de carga, quando do fechamento e menores quando da abertura da válvula, tendo um maior reflexo do transiente provocado pela manobra de válvula.

Gráfico 32 – Cargas transientes estimadas – nó 4 e nó 7 – Rede exemplo B



#### 4.2.1 Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Sem Elitismo

Com os dados de carga transientes obtidas nos nós 4 (H4) e 7 (H7), e considerando a substituição de cromossomos sem elitismo, bem como todos os parâmetros de AG citados na metodologia, realizou-se a primeira calibração de fatores de atrito que é apresentada na tabela 15.

Tabela 15 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo B – SE

<b>Tubo</b>	$f_{estipulado}$	$f_{real}$
1	0,020	0,013
2	0,020	0,036
3	0,020	0,034
4	0,020	0,038
5	0,020	0,018
6	0,020	0,025
7	0,020	0,036
8	0,020	0,032
9	0,020	0,020
10	0,020	0,033
11	0,020	0,036
<b>EMR (%)</b>	-	<b>53,70</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,48</b>

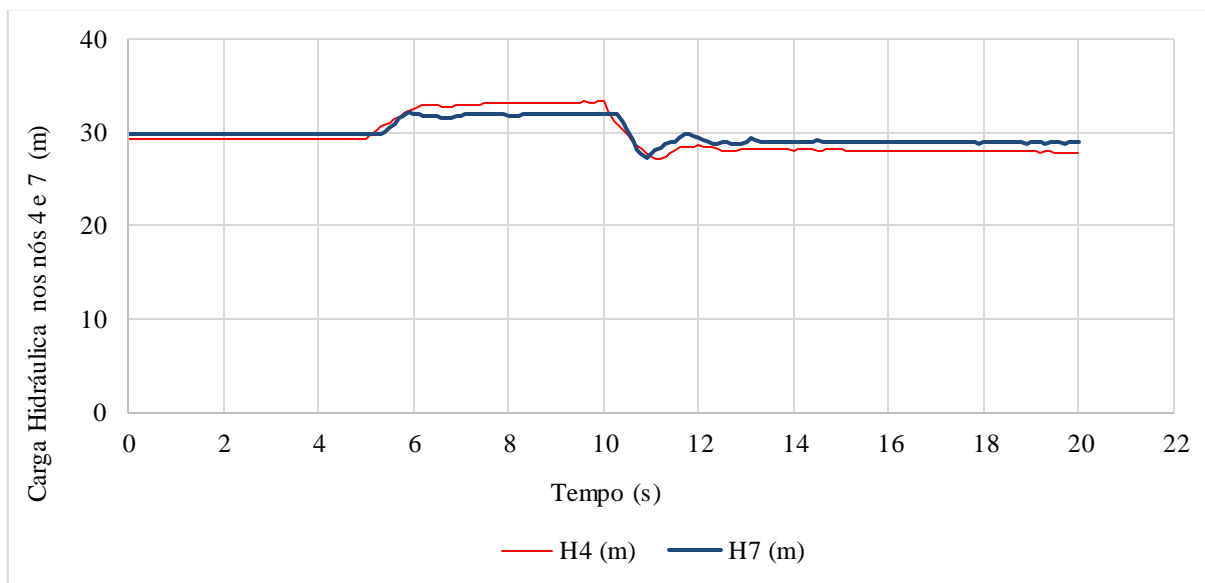
A partir dos fatores de atrito reais ( $f_{real}$ ) e aplicando o procedimento para estabelecer novas cargas e vazões no regime permanente, chegou-se aos seguintes resultados na tabela 16.

Tabela 16 – Novas vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo B – SE

<b>Tubo</b>	$Q$ (L/s)	<b>Nó</b>	$H$ (m)
1	28,132	1	30,00
2	17,868	2	29,73
3	5,667	3	29,79
4	2,216	4	29,40
5	31,582	5	29,72
6	26,418	6	29,72
7	2,507	7	29,78
8	2,507		
9	10,916		
10	1,423		
11	10,779		

As cargas hidráulicas transientes medidas, nos nós 4 (H4) e 7 (H7), obtidas com a manobra de válvula e usando os fatores de atrito reais, em um período de 20 s em intervalos de 0,1s, estão no gráfico 33.

Gráfico 33 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 1 – Rede exemplo B – Sem Elitismo



Com as cargas hidráulicas transientes medidas, no nó 4 (H4) e no nó 7 (H7), apresentadas através no gráfico 34, foram realizados os incrementos de erros de medição, para os diversos cenários citados no capítulo 3, e são apresentados nos gráficos 34 a 42.

Gráfico 34 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 2 - Rede exemplo B – SE

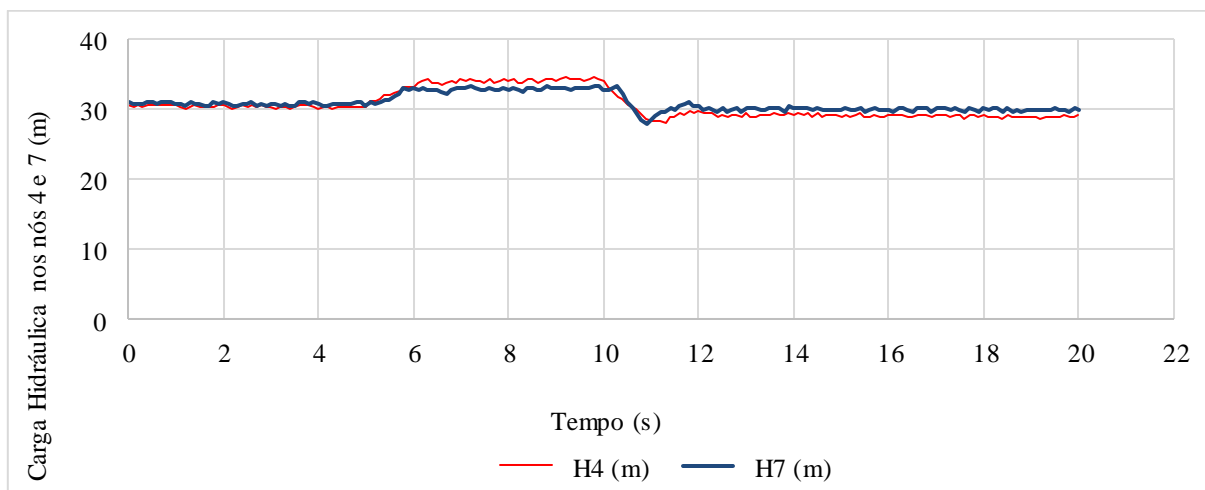


Gráfico 35 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 3 - Rede exemplo B – SE

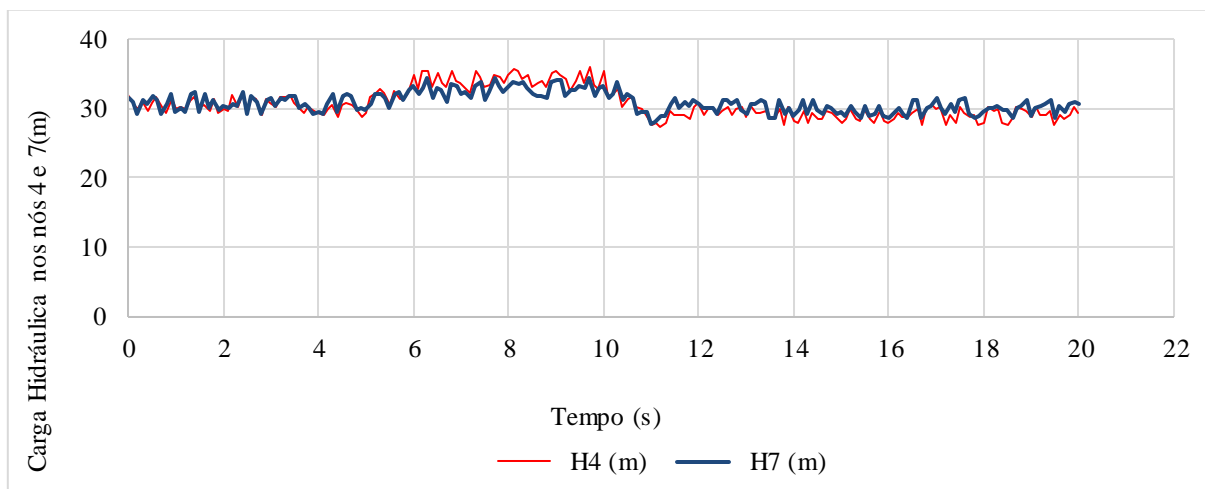


Gráfico 36 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 4 - Rede exemplo B – SE

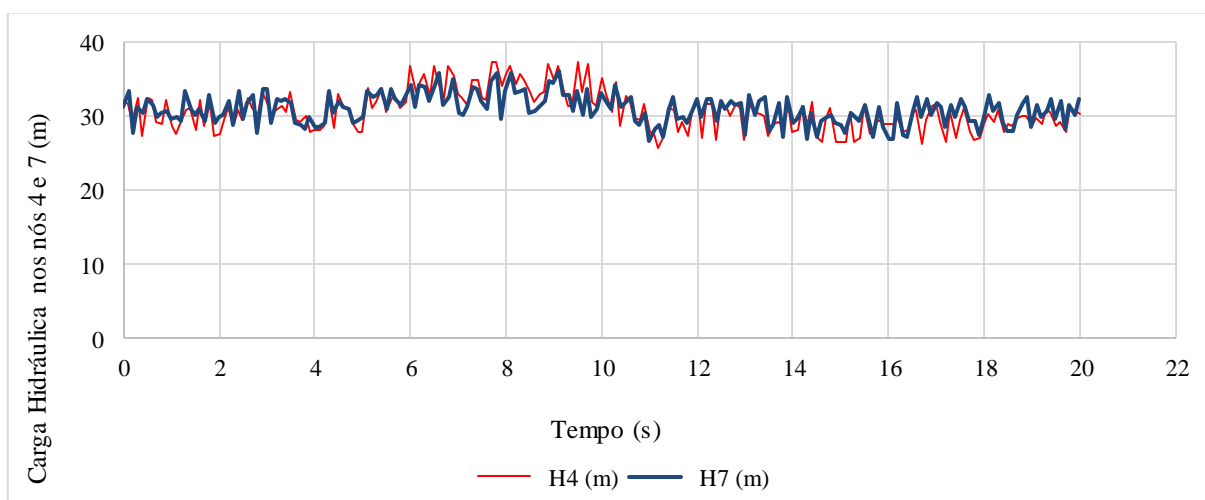


Gráfico 37 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 5 - Rede exemplo B – SE

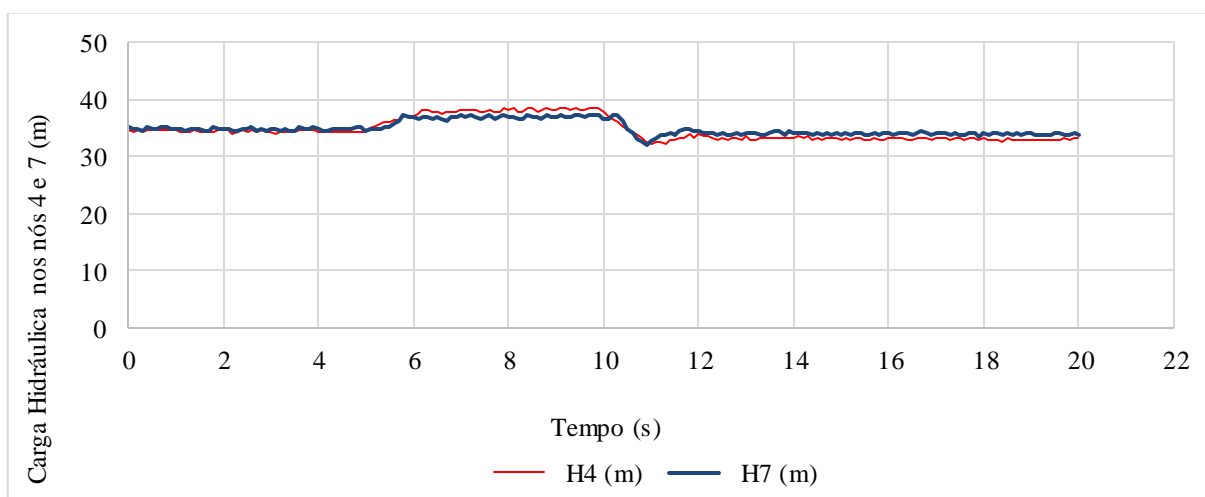


Gráfico 38 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 6 - Rede exemplo B – SE

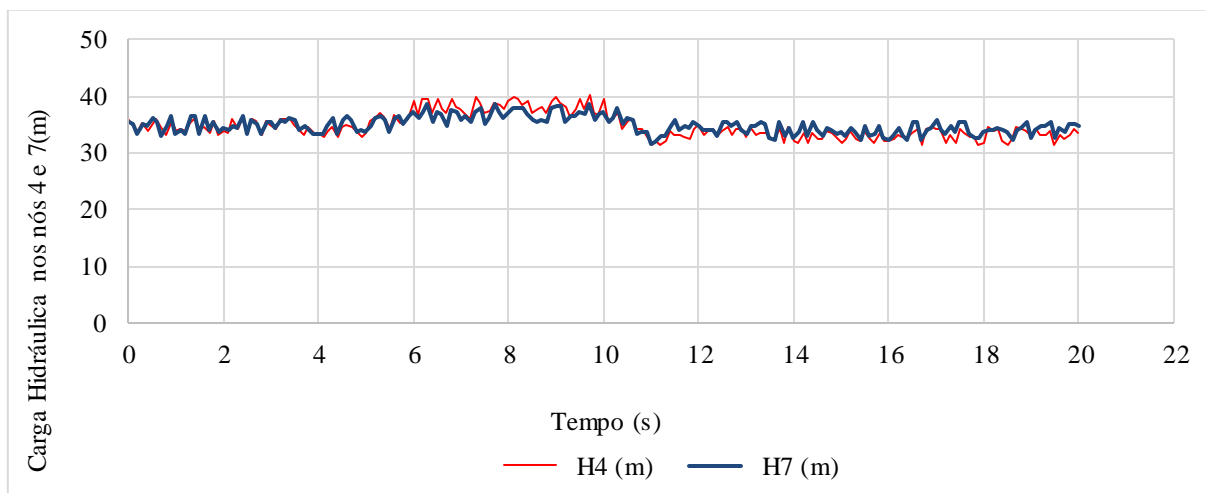


Gráfico 39 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 7 - Rede exemplo B – SE

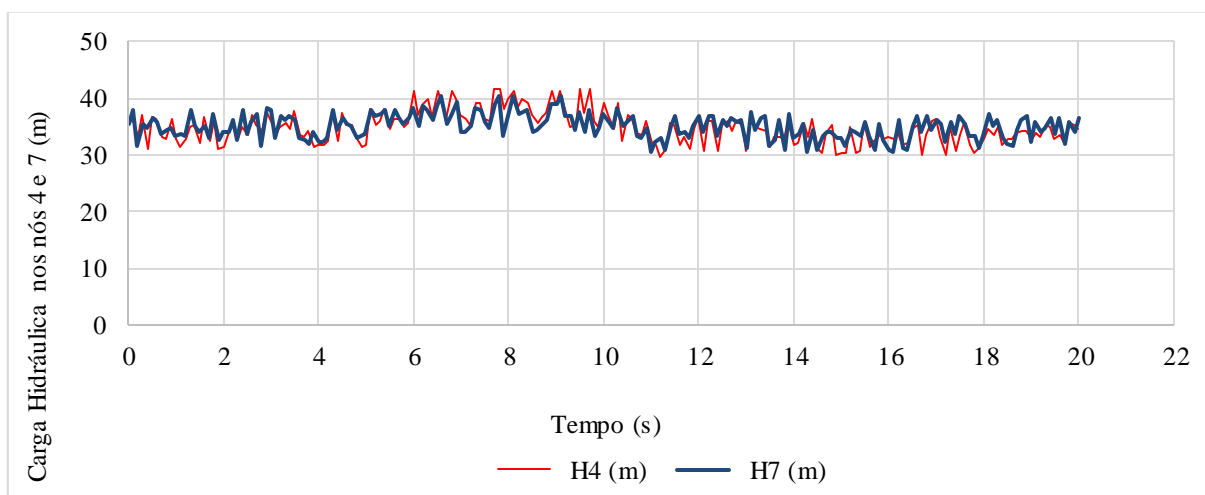


Gráfico 40 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 8 - Rede exemplo B – SE

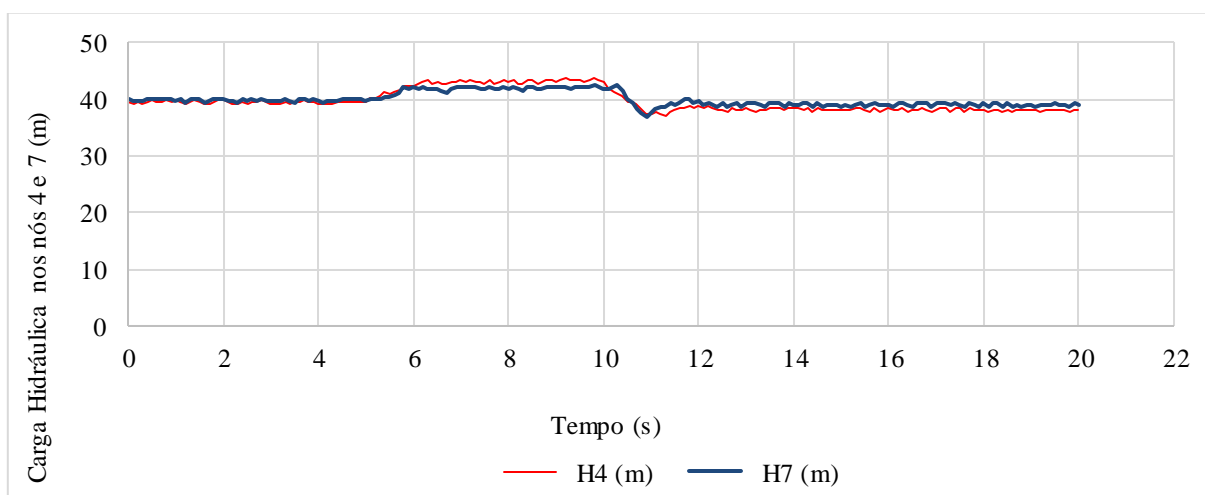


Gráfico 41 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 9 - Rede exemplo B – SE

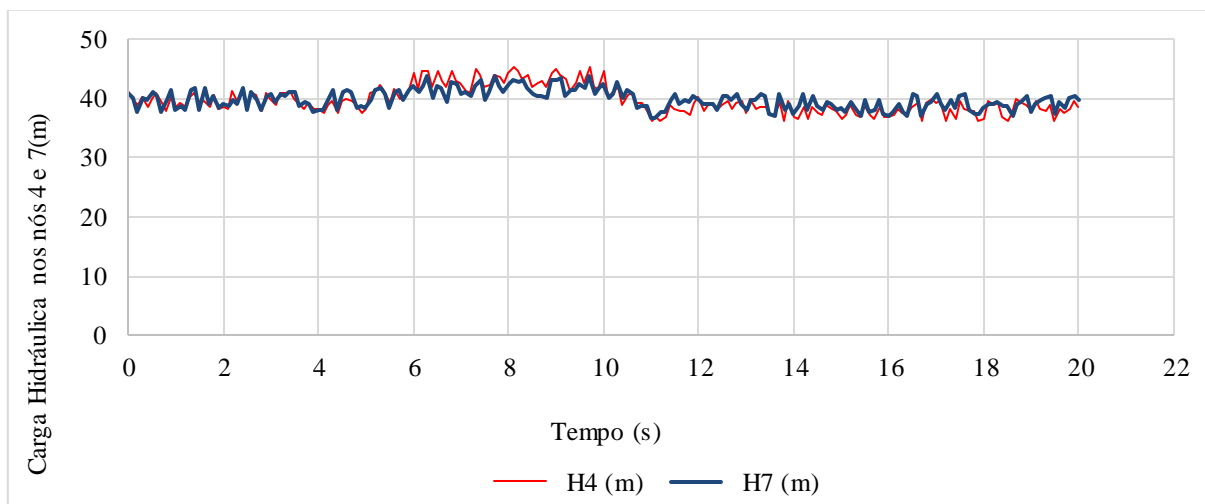
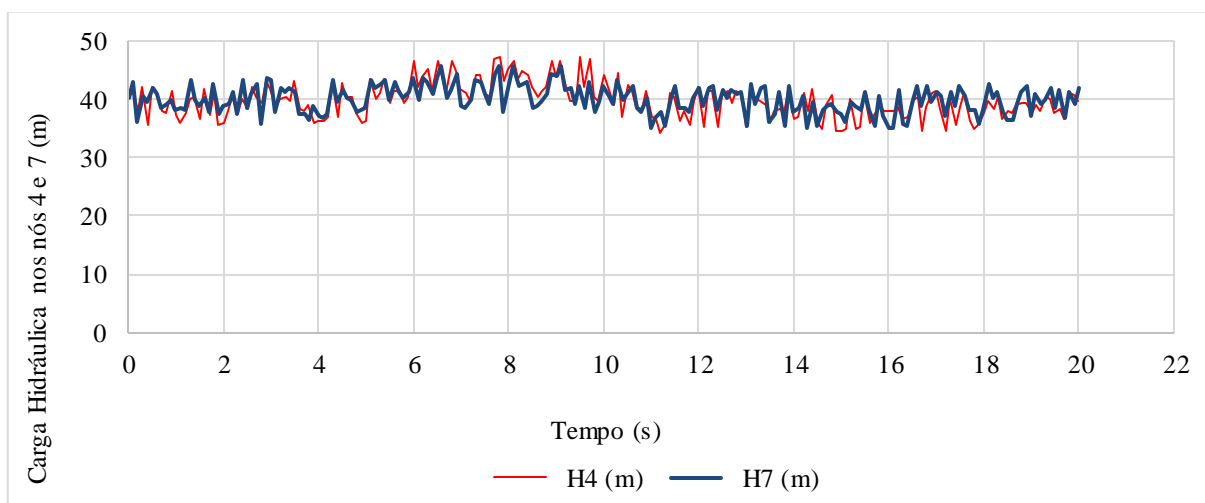


Gráfico 42 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 10 - Rede exemplo B – SE



Observa-se que os erros aleatórios que afetam as duas cargas são diferentes, porém o erro sistemático é o mesmo, considerando que o erro sistemático, neste cenário se deve a um equipamento com defeito.

Com a utilização das cargas hidráulicas apresentadas através dos gráficos apresentados foram realizadas as identificações de fator de atrito para as cargas medidas sem erro (Cenário 1) e medidas com erro. Essas identificações são apresentadas nas tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 17 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 2, 3 e 4 – Rede Exemplo B – SE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 1 m e EA =10%;</i>
1	0,013	0,016	0,011	0,011	0,011
2	0,036	0,030	0,011	0,011	0,011
3	0,034	0,035	0,033	0,036	0,036
4	0,038	0,037	0,040	0,037	0,037
5	0,018	0,023	0,011	0,012	0,012
6	0,025	0,023	0,012	0,012	0,012
7	0,036	0,021	0,023	0,031	0,031
8	0,032	0,024	0,036	0,037	0,037
9	0,020	0,022	0,037	0,036	0,036
10	0,033	0,043	0,042	0,033	0,033
11	0,036	0,034	0,028	0,033	0,033
<b>EMR (%)</b>	-	<b>17,1</b>	<b>32,1</b>	<b>35,8</b>	<b>35,8</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,43</b>	<b>-356,64</b>	<b>-416,75</b>	<b>-672,24</b>

Tabela 18 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 5, 6 e 7 – Rede Exemplo B – SE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 5 m e EA =10%;</i>
1	0,013	0,016	0,010	0,010	0,010
2	0,036	0,030	0,013	0,012	0,013
3	0,034	0,035	0,034	0,035	0,033
4	0,038	0,037	0,048	0,049	0,050
5	0,018	0,023	0,011	0,011	0,011
6	0,025	0,023	0,016	0,016	0,015
7	0,036	0,021	0,030	0,028	0,033
8	0,032	0,024	0,039	0,042	0,042
9	0,020	0,022	0,052	0,049	0,049
10	0,033	0,043	0,039	0,038	0,041
11	0,036	0,034	0,019	0,018	0,019
<b>EMR (%)</b>	-	<b>17,1</b>	<b>46,4</b>	<b>46,4</b>	<b>48,8</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,43</b>	<b>-1942,23</b>	<b>-1937,88</b>	<b>-1985,40</b>



Tabela 19 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 8, 9 e 10 – Rede Exemplo B – SE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e EA =0%;</i>	<i>ES = 10 m e EA =1%;</i>	<i>ES = 10 m e EA =5%;</i>	<i>ES = 10 m e EA =10%;</i>
1	0,013	0,016	0,011	0,011	0,010
2	0,036	0,030	0,016	0,015	0,014
3	0,034	0,035	0,037	0,037	0,033
4	0,038	0,037	0,044	0,045	0,045
5	0,018	0,023	0,011	0,011	0,011
6	0,025	0,023	0,027	0,026	0,027
7	0,036	0,021	0,040	0,037	0,040
8	0,032	0,024	0,047	0,047	0,043
9	0,020	0,022	0,059	0,059	0,056
10	0,033	0,043	0,028	0,029	0,033
11	0,036	0,034	0,014	0,014	0,014
<b>EMR (%)</b>	-	<b>17,1</b>	<b>57,5</b>	<b>56,3</b>	<b>54,2</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,43</b>	<b>-3937,61</b>	<b>-3926,57</b>	<b>-3982,81</b>

São apresentados nos gráficos 43 a 46, onde foram comparados os cenários em que se mantinha o erro sistemático (ES) e o erro aleatório (EA) variava (gráfico 43) e os cenários onde se mantinha o erro aleatório (EA) enquanto o erro sistemático (ES) variava (gráfico 44). Foi possível então observar que o erro médio relativo (EMR) assumiu seu maior valor para o cenário 8, contudo esse valor é muito próximo aos dos cenários 9 e 10. Observou-se que para os cenários de mesmo erro sistemático, o erro aleatório não teve relevante interferência para os resultados de EMR. Porém quando se manteve o erro aleatório e variou-se o erro sistemático ocorreu um aumento nos valores de EMR, na mesma proporção e quase linearmente. Os valores da função objetivo (FO) para os cenários 2, 3 e 4 variaram a medida que o erro aleatório aumentava porém sem seguir uma proporcionalidade, já nos outros cenários em que erro sistemático se mantinha enquanto o erro aleatório variava, a função objetivo assumiu valores quase constantes. Nos cenários em que o erro sistemático variava e o erro aleatório se mantinha constante, os valores de FO aumentaram progressivamente, chegando a duplicar quando o valor do erro sistemático duplicava (cenários 6 e 9, 7 e 10). Como é possível observar nos gráficos 45 e 46.

Gráfico 43 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SE

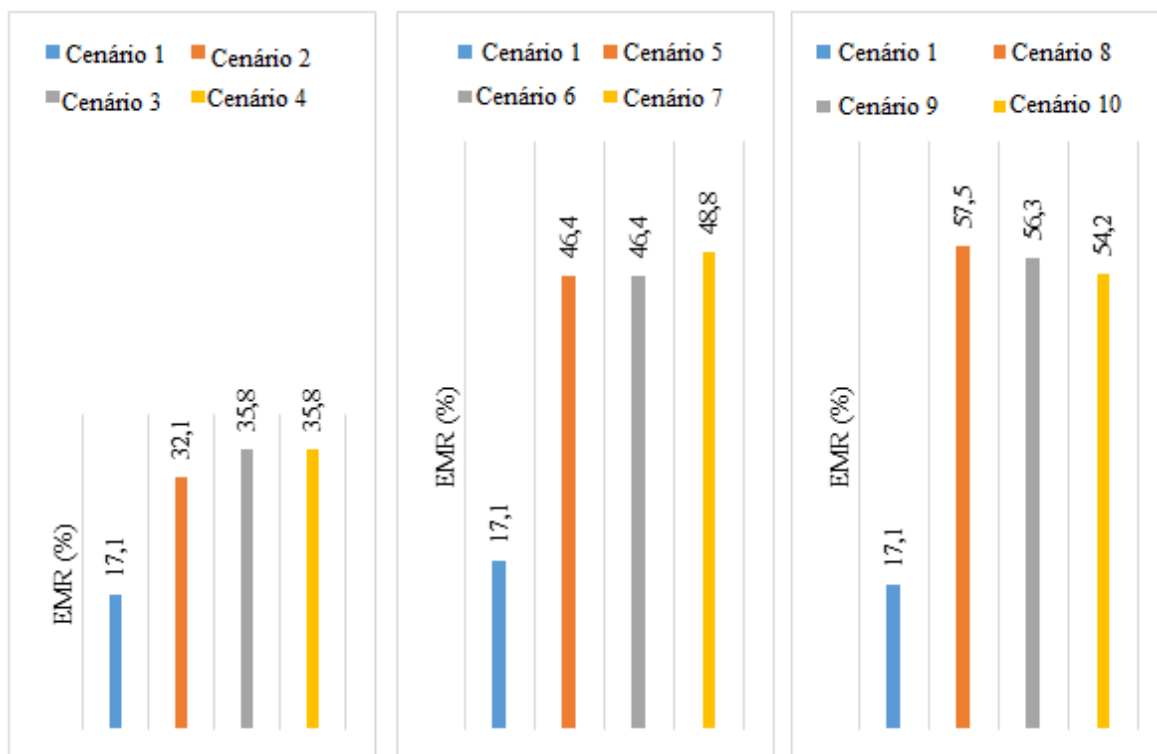


Gráfico 44 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE

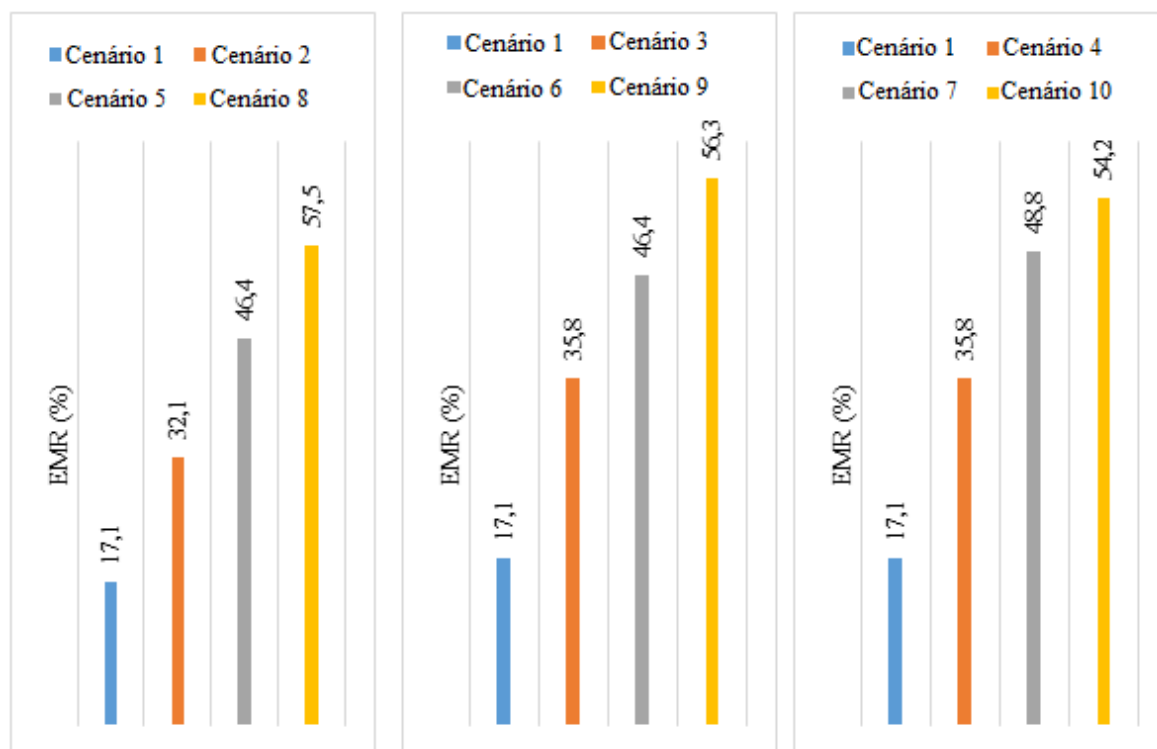
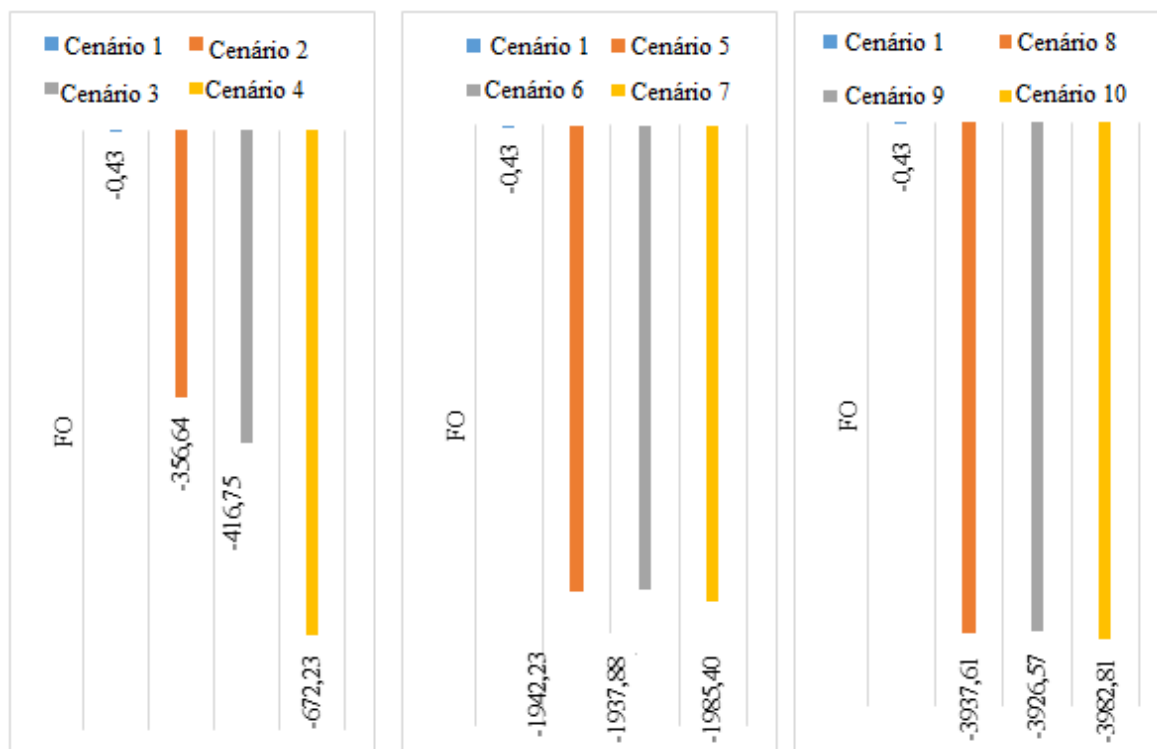
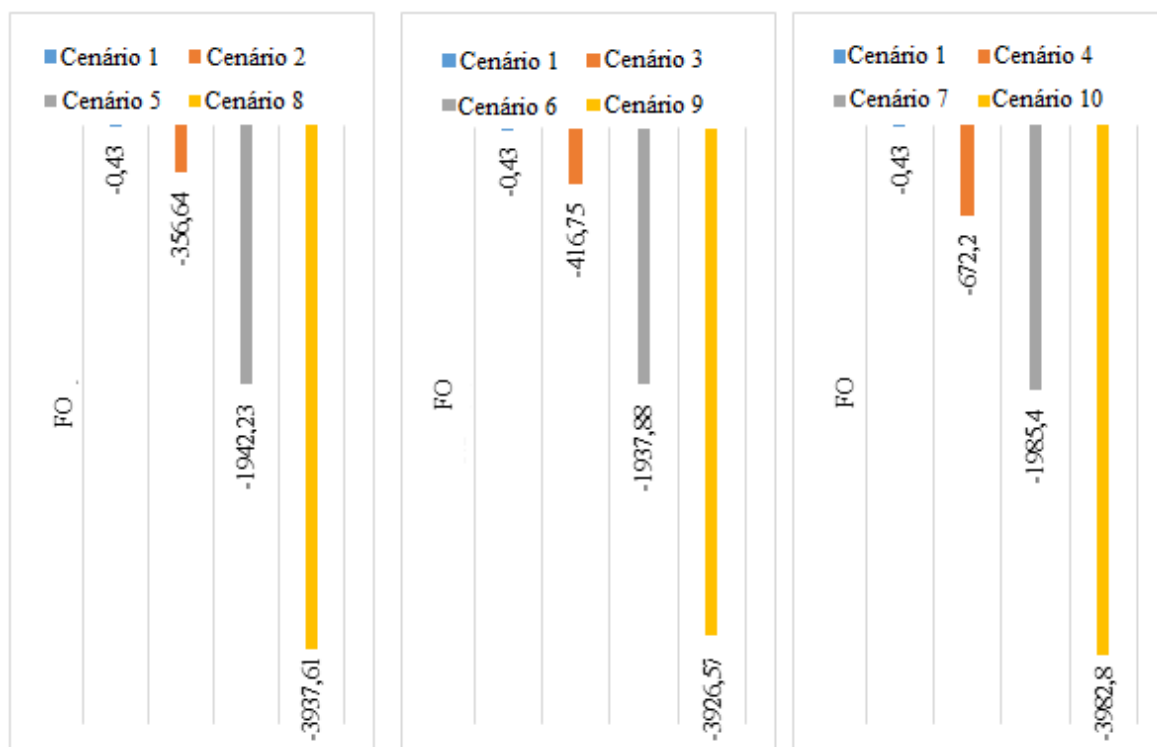


Gráfico 45 – FO<sub>ótima</sub> – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – SEGráfico 46 – FO<sub>ótima</sub> – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – SE

#### 4.2.2 Identificações de fator de atrito com Algoritmo Genético Com Elitismo

Com os dados de carga transientes obtidas nos nós 4 (H4) e 7 (H7), e considerando a substituição de cromossomos com elitismo (CE), bem como todos os parâmetros de AG citados na metodologia, realizou-se a primeira calibração de fatores de atrito que é apresentada na tabela 20.

Tabela 20 – Fatores de atrito reais – Rede Exemplo B – CE

<b>Tubo</b>	$f_{estipulado}$	$f_{real}$
1	0,020	0,019
2	0,020	0,029
3	0,020	0,027
4	0,020	0,033
5	0,020	0,019
6	0,020	0,022
7	0,020	0,030
8	0,020	0,032
9	0,020	0,028
10	0,020	0,037
11	0,020	0,040
<b>EMR (%)</b>	-	<b>44,8</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-1,38</b>

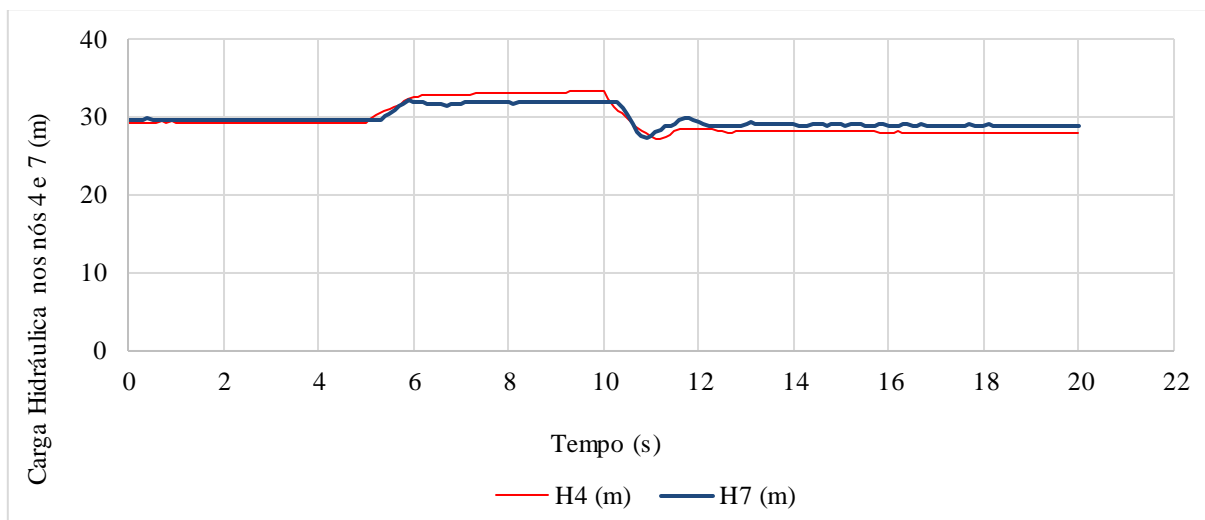
A partir dos fatores de atrito reais ( $f_{real}$ ) e aplicando o procedimento para estabelecer novas cargas e vazões no regime permanente, chegou-se aos seguintes resultados na tabela 21.

Tabela 21 – Novas vazões e cargas iniciais – regime permanente – Rede Exemplo B – CE

<b>Tubo</b>	$Q$ (L/s)	<b>Nó</b>	$H$ (m)
1	25,098	1	30,00
2	20,903	2	29,73
3	7,593	3	29,80
4	2,321	4	29,43
5	30,369	5	29,73
6	27,631	6	29,74
7	2,987	7	29,79
8	2,987		
9	10,515		
10	1,502		
11	11,808		

As cargas hidráulicas transientes medidas, nos nós 4 (H4) e no nó 7 (H7), obtidas com a manobra de válvula e usando os fatores de atrito reais, em um período de 20 s em intervalos de 0,1s, estão no gráfico 47.

Gráfico 47 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 1 – Rede exemplo B – CE



Com as cargas hidráulicas transientes medidas, no nó 4 (H4) e no nó 7 (H7), apresentadas através do gráfico 47, foram realizados os incrementos de erros de medição, para os diversos cenários citados no capítulo 3, e são apresentados nos gráficos 48 a 56.

Gráfico 48 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 2 - Rede exemplo B – CE

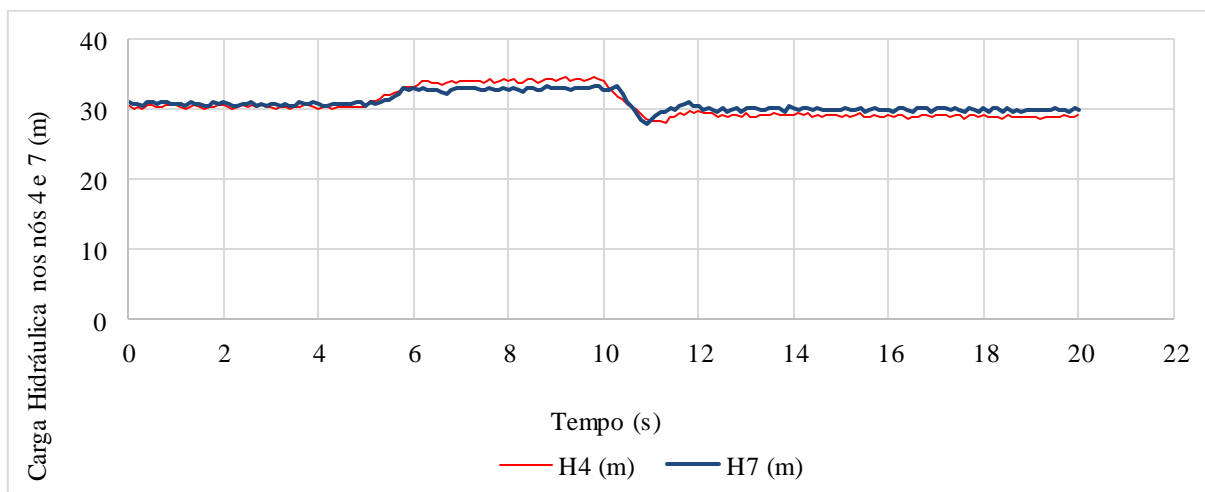


Gráfico 49 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 3 - Rede exemplo B – CE

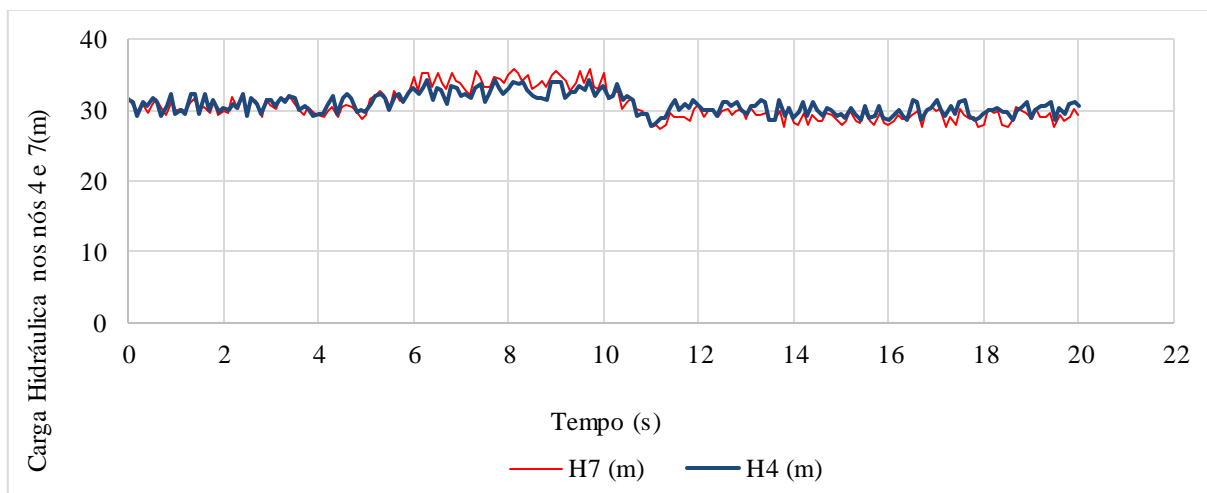


Gráfico 50 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 4 - Rede exemplo B – CE

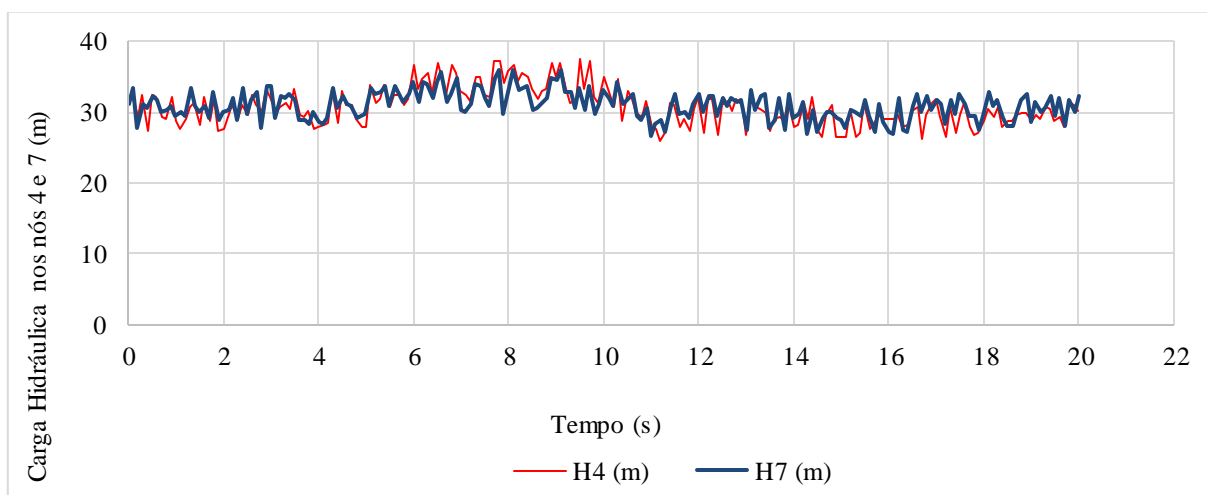


Gráfico 51 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 5 - Rede exemplo B – CE

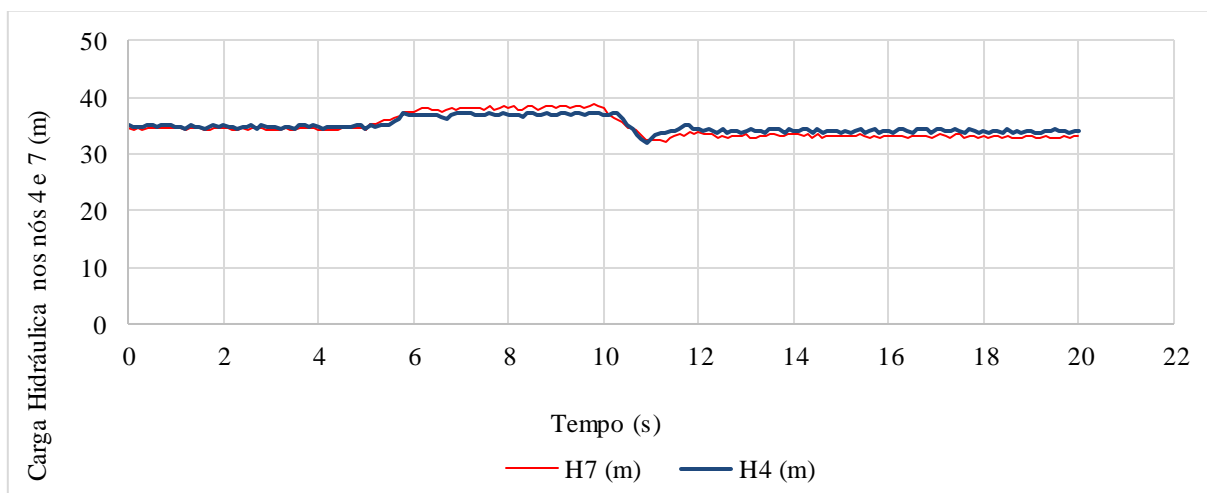


Gráfico 52 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 6 - Rede exemplo B – CE

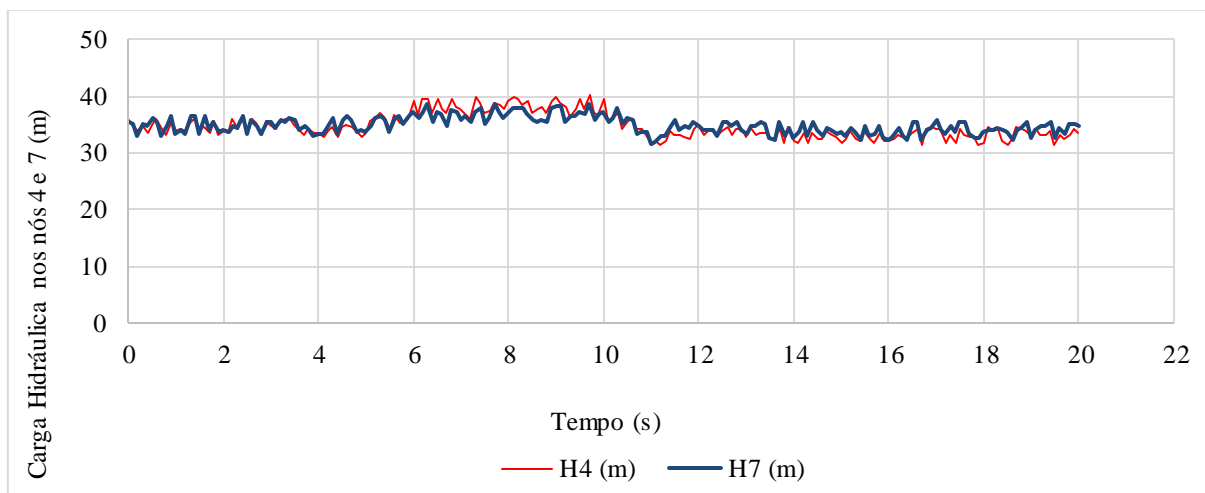


Gráfico 53 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 7 - Rede exemplo B – CE

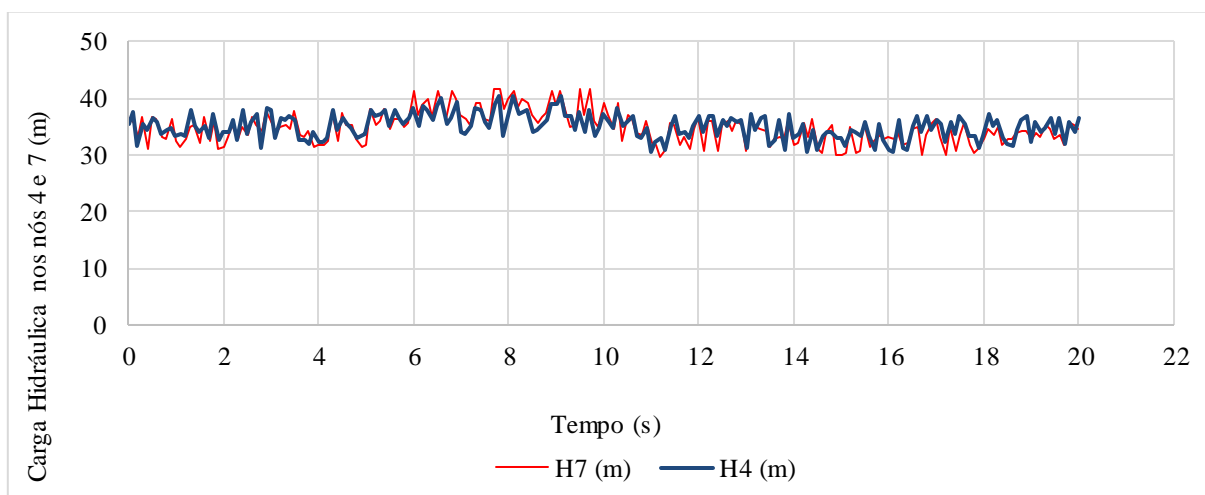


Gráfico 54 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 8 - Rede exemplo B – CE

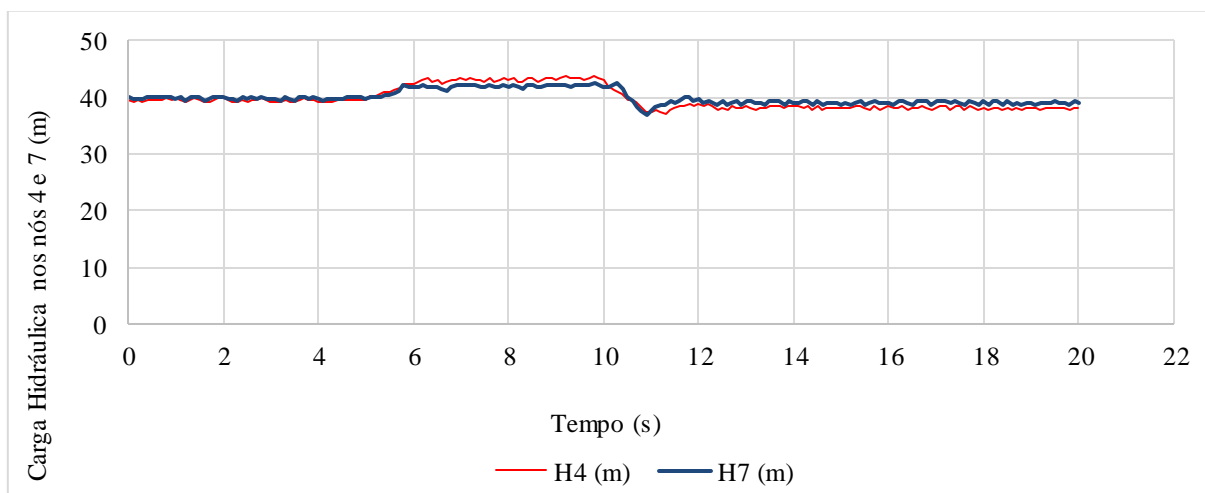


Gráfico 55 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 9 - Rede exemplo B – CE

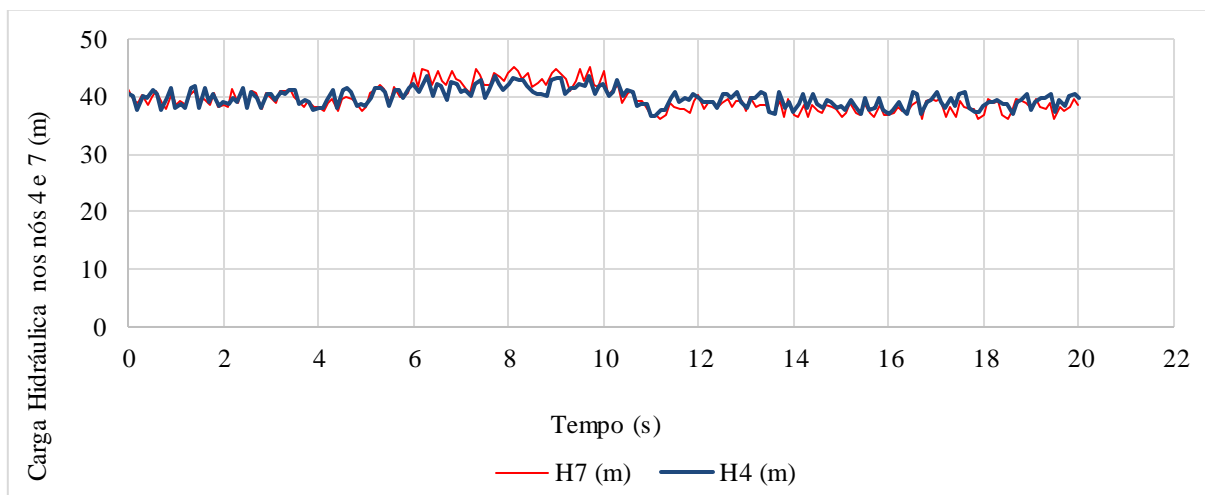
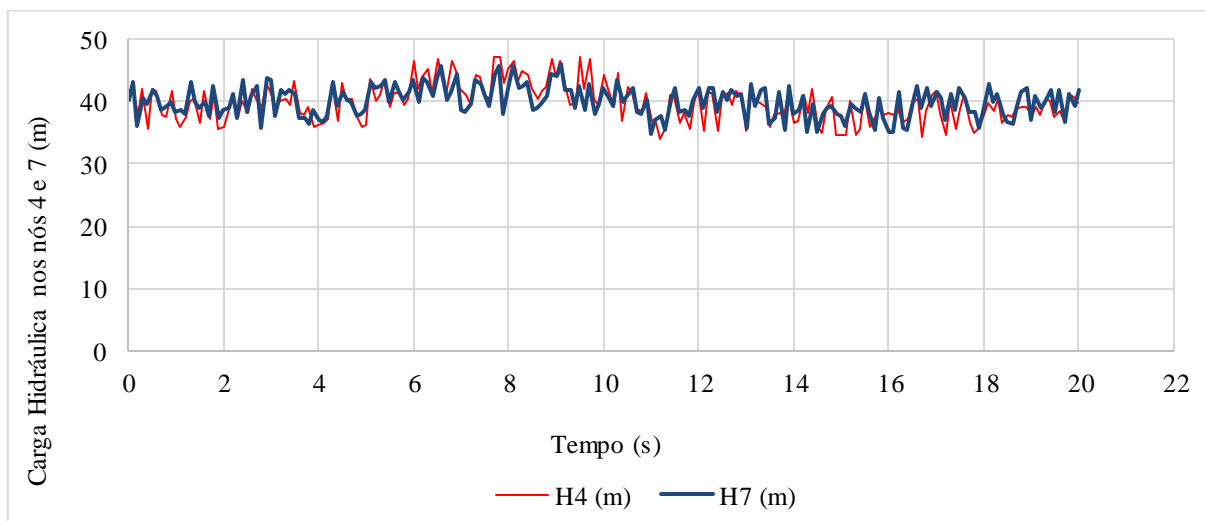


Gráfico 56 – Cargas transientes medidas – nó 4 e nó 7 – Cenário 10 - Rede exemplo B – CE



Com a utilização das cargas hidráulicas apresentadas através dos gráficos foram realizadas as identificações de fator de atrito para as cargas medidas sem erro (Cenário 1) e medidas com erro. Essas identificações são apresentadas nas tabelas 22, 23 e 24.



Tabela 22 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 2, 3 e 4 – Rede Exemplo B – CE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e</i> <i>EA =0%;</i>	<i>ES = 1 m e</i> <i>EA =1%;</i>	<i>ES = 1 m e</i> <i>EA =5%;</i>	<i>ES = 1 m e</i> <i>EA =10%;</i>
1	0,019	0,020	0,012	0,013	0,012
2	0,029	0,027	0,012	0,013	0,013
3	0,027	0,029	0,044	0,045	0,052
4	0,033	0,039	0,040	0,033	0,030
5	0,019	0,030	0,019	0,019	0,021
6	0,022	0,018	0,011	0,012	0,013
7	0,030	0,026	0,041	0,041	0,038
8	0,032	0,037	0,042	0,040	0,040
9	0,028	0,024	0,036	0,037	0,042
10	0,037	0,027	0,028	0,027	0,032
11	0,040	0,035	0,034	0,033	0,030
<b>EMR (%)</b>	-	<b>17,1</b>	<b>32,9</b>	<b>30,8</b>	<b>35,1</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,92</b>	<b>-353,08</b>	<b>-416,12</b>	<b>-671,40</b>

Tabela 23 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 5, 6 e 7 – Rede Exemplo B – CE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e</i> <i>EA =0%;</i>	<i>ES = 5 m e</i> <i>EA =1%;</i>	<i>ES = 5 m e</i> <i>EA =5%;</i>	<i>ES = 5 m e</i> <i>EA =10%;</i>
1	0,019	0,020	0,013	0,013	0,010
2	0,029	0,027	0,019	0,019	0,021
3	0,027	0,029	0,030	0,035	0,030
4	0,033	0,039	0,041	0,041	0,043
5	0,019	0,030	0,013	0,015	0,015
6	0,022	0,018	0,019	0,019	0,021
7	0,030	0,026	0,031	0,026	0,037
8	0,032	0,037	0,032	0,032	0,036
9	0,028	0,024	0,050	0,051	0,054
10	0,037	0,027	0,036	0,035	0,037
11	0,040	0,035	0,026	0,027	0,029
<b>EMR (%)</b>	-	<b>17,1</b>	<b>23,6</b>	<b>26,1</b>	<b>26,8</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,92</b>	<b>-1943,11</b>	<b>-1933,89</b>	<b>-1987,10</b>

Tabela 24 – Fatores de atrito calibrados – Cenário 1 e os cenários 8, 9 e 10 – Rede Exemplo B – CE

Tubo	$f_{real}$	$f_{calibrado}$			
		<i>ES = 0 m e</i> <i>EA =0%;</i>	<i>ES = 10 m e</i> <i>EA =1%;</i>	<i>ES = 10 m e</i> <i>EA =5%;</i>	<i>ES = 10 m e</i> <i>EA =10%;</i>
1	0,019	0,020	0,013	0,013	0,013
2	0,029	0,027	0,019	0,019	0,019
3	0,027	0,029	0,035	0,035	0,035
4	0,033	0,039	0,044	0,044	0,044
5	0,019	0,030	0,013	0,013	0,013
6	0,022	0,018	0,022	0,022	0,022
7	0,030	0,026	0,027	0,027	0,027
8	0,032	0,037	0,031	0,031	0,031
9	0,028	0,024	0,050	0,050	0,050
10	0,037	0,027	0,041	0,041	0,041
11	0,040	0,035	0,020	0,020	0,020
<b>EMR (%)</b>	-	<b>17,1</b>	<b>28,6</b>	<b>28,6</b>	<b>28,6</b>
<b>FO<sub>ótima</sub></b>	-	<b>-0,92</b>	<b>-3932,36</b>	<b>-3921,33</b>	<b>-3977,22</b>

Para este último estudo são apresentados os gráficos 57 a 60, onde foram comparados os cenários em que se mantinha o erro sistemático e o erro aleatório variava (gráfico 57) e os cenários onde se mantinha o erro aleatório enquanto o erro sistemático variava (gráfico 58). Foi possível observar que o EMR assumiu seu maior valor para o cenário 4, contudo esse valor é muito próximo aos dos cenários 2 e 3. Para os cenários 5, 6 e 7 os EMR também apresentaram valores também muito próximos, mas em uma escala crescente. Já os cenários 8, 9 e 10 apresentaram os mesmos valores para o erro médio relativo (EMR), demonstrando que o erro aleatório não interferiu nos resultados. Para as comparações entre os cenários de mesmo erro aleatório e erro sistemático variado os resultados de EMR não apresentaram correlação portanto não permitindo que fosse estabelecida uma relação entre os mesmos. Quanto a função objetivo, assim como nas calibrações sem Elitismo, para os cenários 2, 3 e 4 FO variou porém sem seguir uma proporcionalidade a medida que o erro aleatório aumentava, e nos outros cenários em que erro sistemático se mantinha enquanto o erro aleatório variava, FO assumiu valores quase constantes, como é possível observar no gráfico 59. Já nos cenários em que o erro sistemático variava e o erro aleatório se mantinha constante, os valores de FO aumentaram progressivamente, chegando a duplicar quando o valor do erro sistemático duplicava (cenários 6 e 9, 7 e 10), o que pode ser visto no gráfico 60.

Gráfico 57 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE

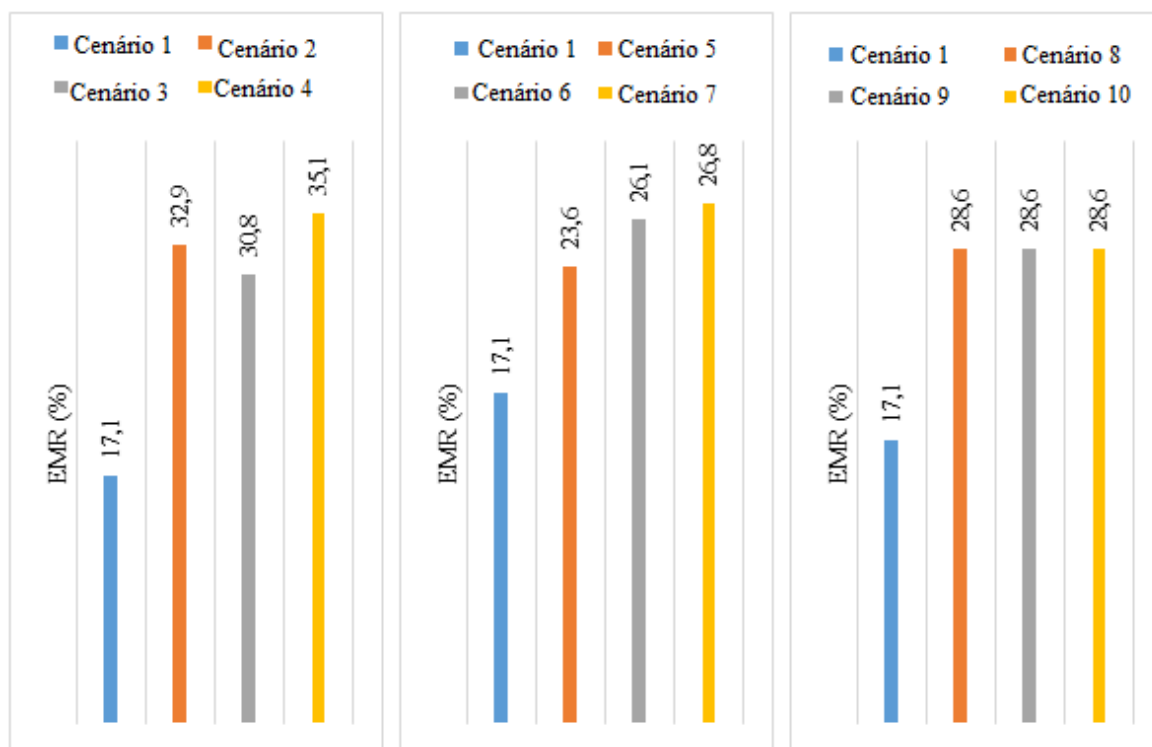


Gráfico 58 – EMR – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE

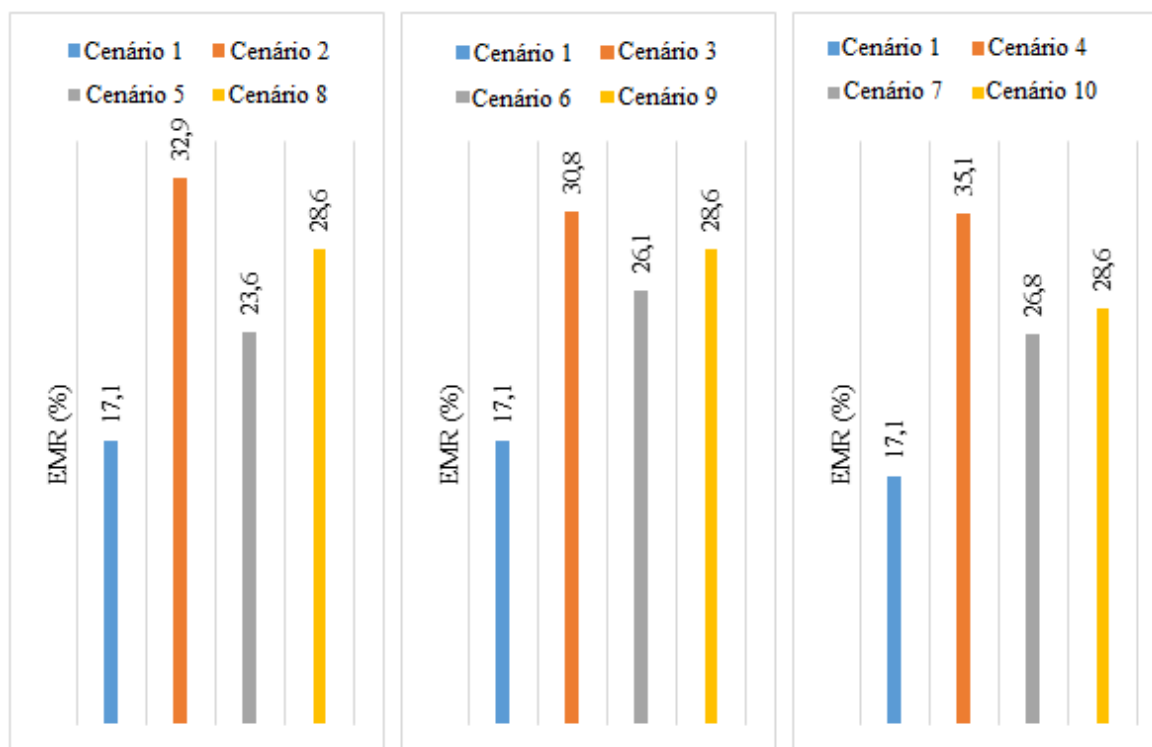


Gráfico 59 –  $FO_{ótima}$  – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Sistemático constante e Erro Aleatório variado – CE

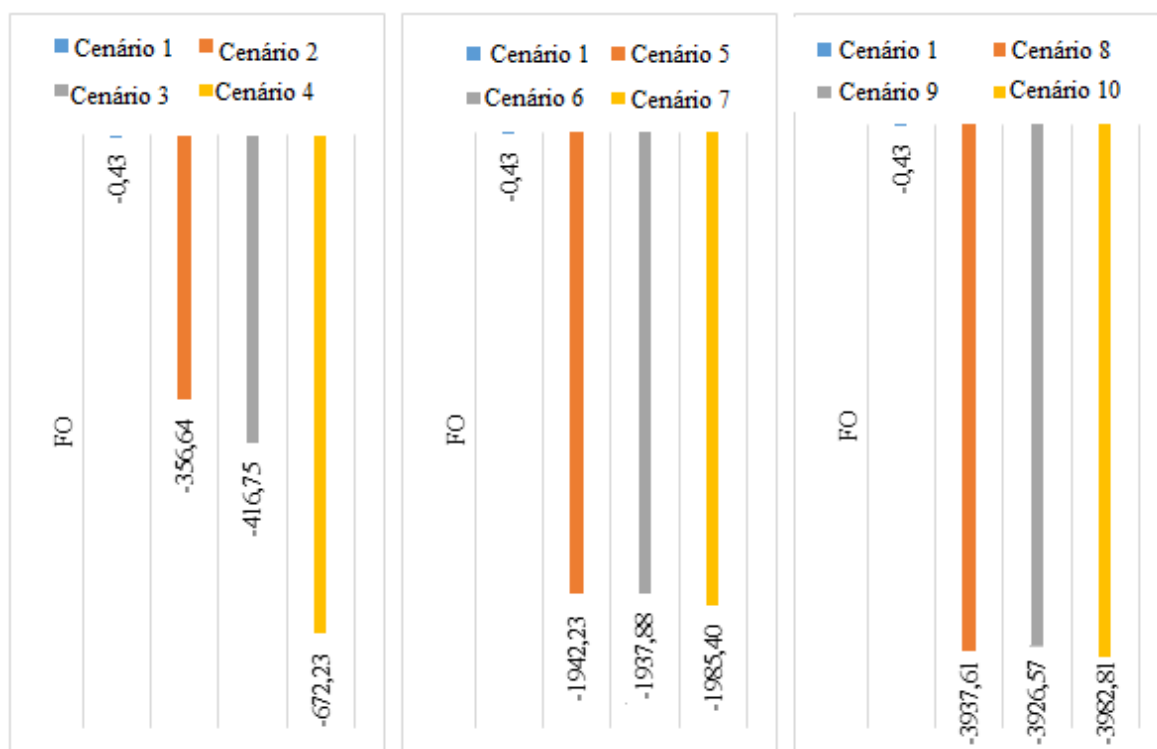
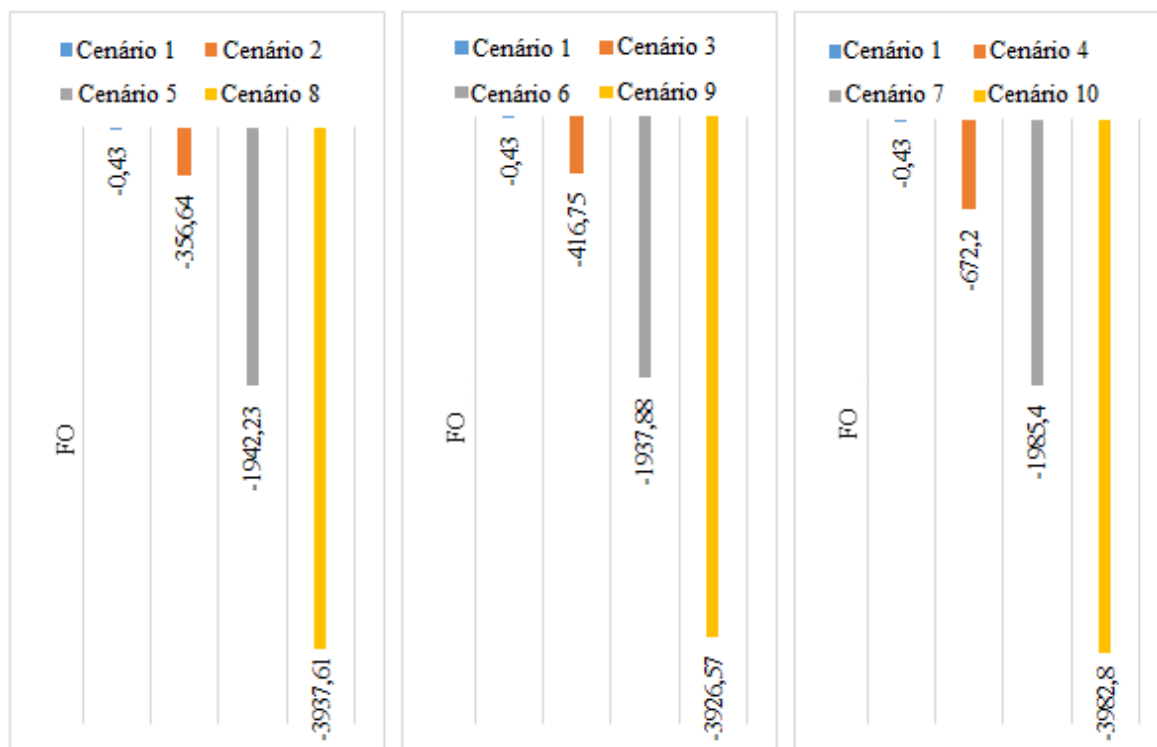


Gráfico 60 –  $FO_{ótima}$  – Rede Exemplo B – Cenários de Erro Aleatório constante e Erro Sistemático variado – CE



#### 4.2.3 Comparações entre os resultados de Algoritmos com Elitismo e sem Elitismo.

Comparando-se as calibrações realizadas considerando o Elitismo com as que não o consideraram verifica-se que os valores da  $FO_{ótima}$ , desenvolveram comportamentos semelhantes para os mesmos cenários de erros de medição, como pode ser observado nos gráficos 61 e 62.

Já os valores de EMR desenvolveram comportamentos diferentes para as calibrações realizadas sem Elitismo e com Elitismo, como pode ser observado nos gráficos 63 e 64.

Quando o Elitismo não foi considerado para as calibrações os resultados de EMR permitem uma percepção maior quanto à presença de erros nas medições quando são comparados com as calibrações sem erro de medição, Cenário 1.

Verifica-se que para a Rede exemplo B tanto a Função Objetivo como o Erro Médio Relativo são uma boa medida de eficiência quanto a detecção de erros de medição, principalmente quando o Elitismo não é considerado.

Gráfico 61 – Comparação entre os resultados de  $FO_{ótima}$  para todos os cenários – Rede Exemplo B – SE

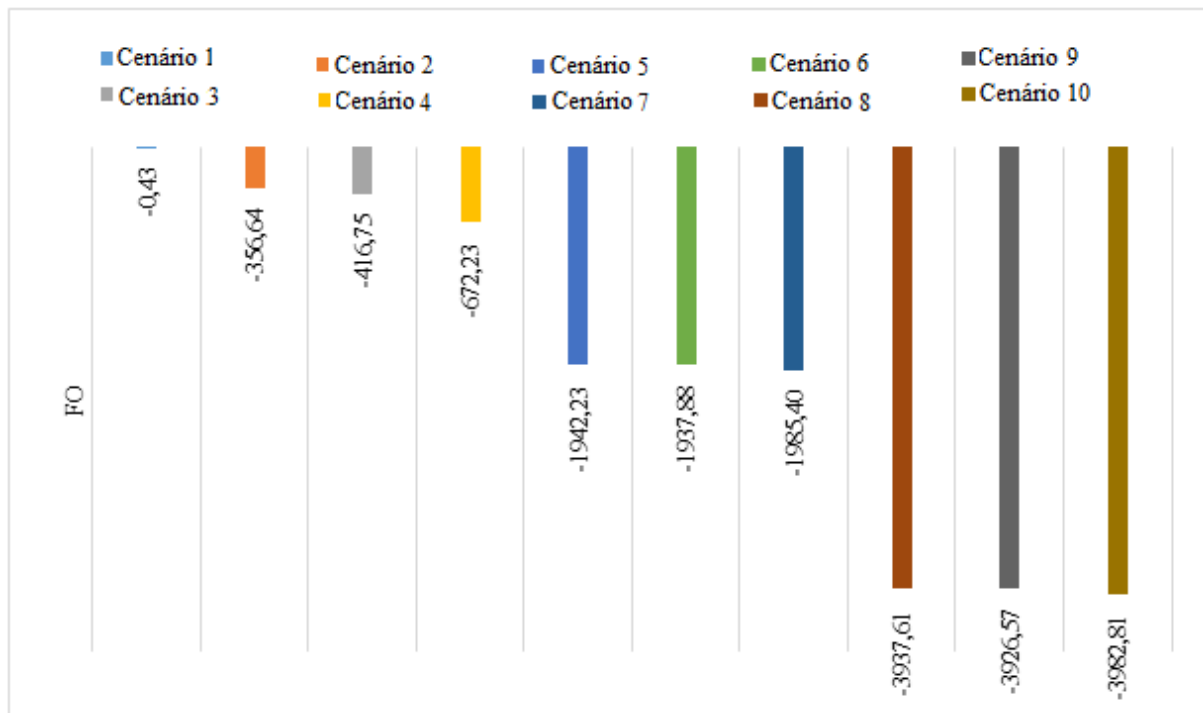


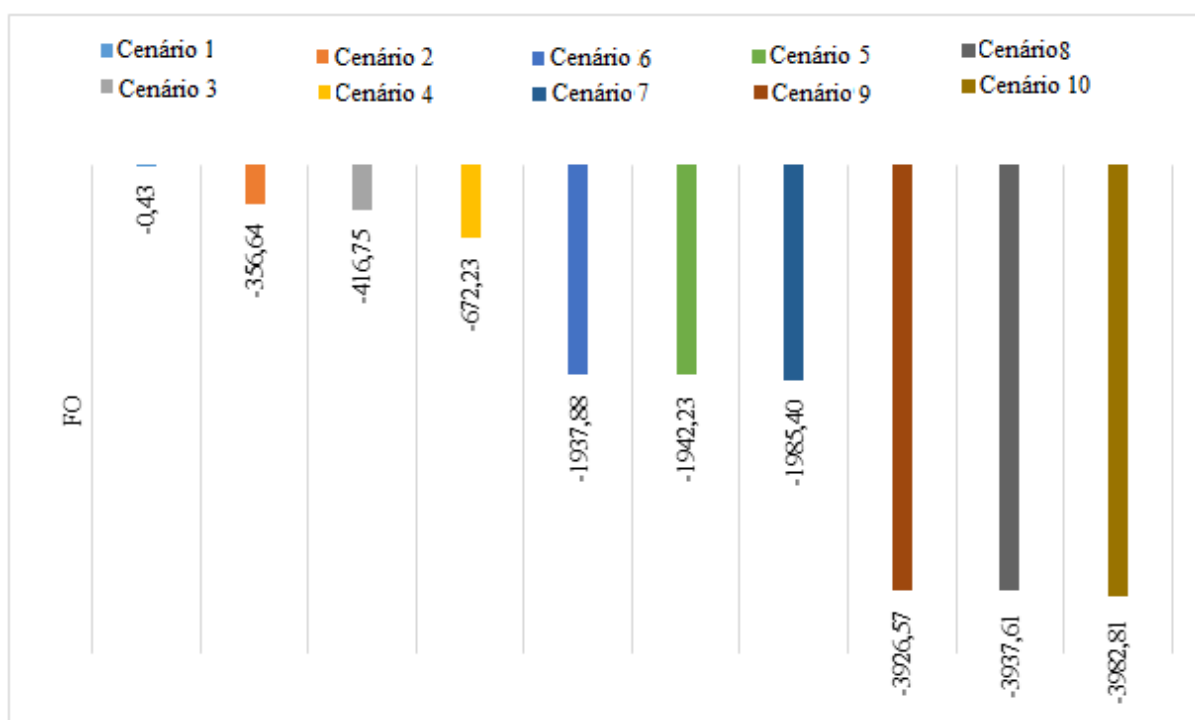
Gráfico 62 – Comparação entre os resultados de FO<sub>ótima</sub> para todos os cenários – Rede Exemplo B – CE

Gráfico 63 – Comparação entre os resultados de EMR para todos os cenários – SE

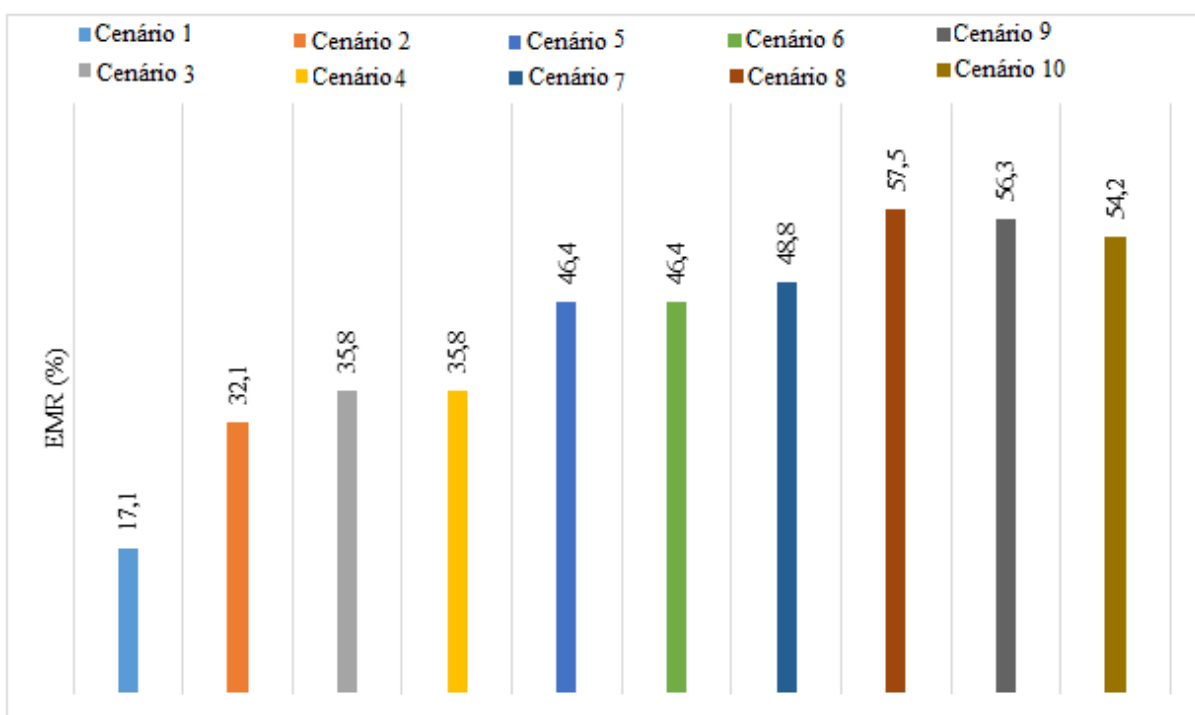
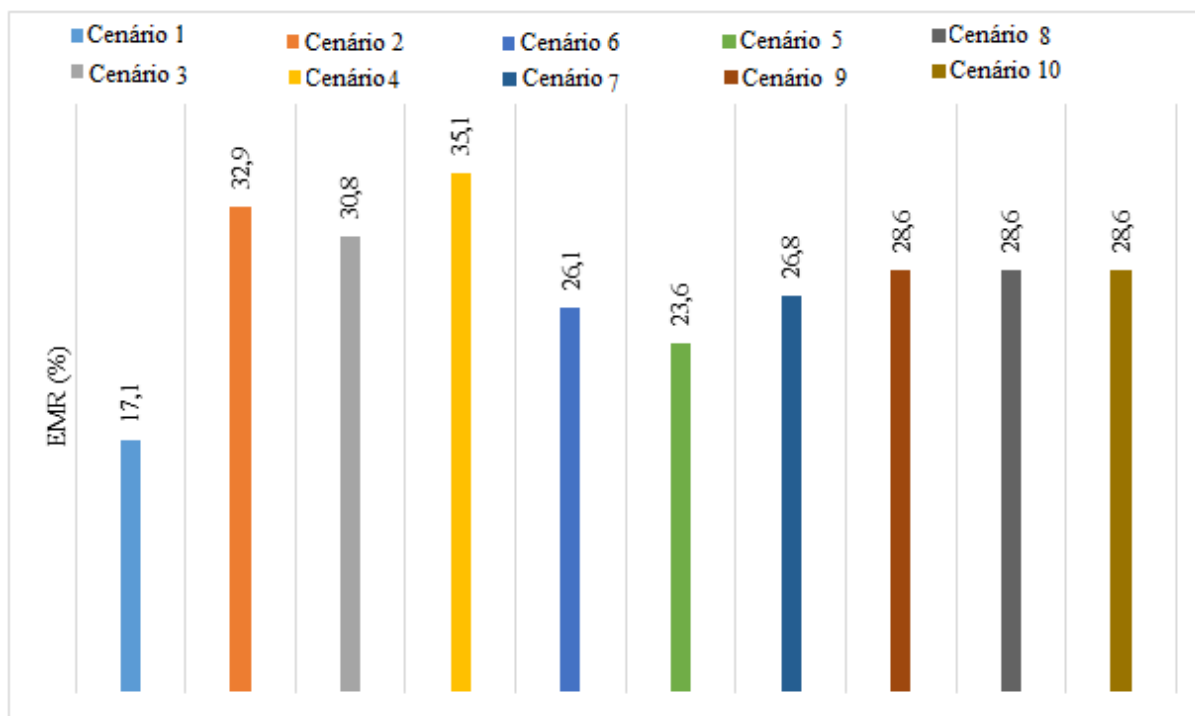


Gráfico 64 – Comparação entre os resultados de EMR para todos os cenários – Rede Exemplo B – CE



## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O desenvolvimento de modelos matemáticos para a calibração de variáveis em redes hidráulicas hipotéticas objetiva a sua utilização em redes hidráulicas reais. Tendo em vista a relevância do conhecimento dos valores dos fatores de atrito em tubulações e que a ocorrência de erros de medição é uma realidade devido a presença de falhas em equipamentos, erros humanos, interferência de efeitos atmosféricos dentre outros, a proposta deste trabalho foi verificar a interferência de erros de medição de carga hidráulica transiente, simuladas como realizadas em campo, em calibrações de fator de atrito utilizando o Método Transiente Inverso em conjunto com o Algoritmo Genético (MTI-AG) desenvolvido por Araújo (2003), já que esse método utiliza dados de carga hidráulica transiente na identificação de variáveis de tubulações de redes.

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 4 chegou-se às seguintes conclusões: o tamanho da rede estudada interferiu na sensibilidade quanto ao crescimento do valor em módulo de  $FO_{ótima}$  à medida que os erros de medição simulados aumentavam, onde para a rede exemplo A, de um só anel, esse crescimento foi visualizado com bastante notoriedade, além de apresentar uma tendência quase linear, enquanto que para a rede exemplo B, isso só se configurou para pequenos erros sistemáticos. Já com relação ao EMR a rede menor não apresentou resultados que possibilitassem o estabelecimento de uma relação entre o crescimento dos erros de medição com o EMR. No caso particular da rede exemplo B quando a utilização de substituição de soluções no AG foi realizada sem elitismo, foi possível verificar que à medida que os erros aleatórios aumentavam ocorria um crescimento de EMR, já para a substituição de soluções no AG com elitismo o comportamento de EMR não foi o mesmo, não permitindo mais uma vez o estabelecimento de uma relação entre o crescimento dos erros de medição e EMR. Foi possível também observar que os valores de  $FO_{ótima}$  para a rede maior foram sensíveis aos erros de medição sistemáticos de 5 m e 10 m, porém os erros aleatórios não interferiram nesses resultados.

Foi analisada a interferência dos erros de medição nos resultados de fator de atrito por tubo de cada rede exemplo, onde, para a rede menor, os tubos mais afetados foram: um daqueles ligados ao nó onde se encontrava a válvula, na qual foi realizada a manobra que originou as cargas transientes, e se realizou suas medições, e o outro tubo mais afastado e em contato com o reservatório da rede. Para a análise da rede maior o tubo mais afetado pela



presença dos erros nas cargas foi um tubo ligado a um dos nós de medição de carga, isso ocorrendo tanto para as calibrações sem elitismo quanto com elitismo.

Conclui-se que a presença de erros de medição de carga hidráulica interfere nos resultados das calibrações de fator de atrito fornecidas pelo modelo hidráulico desenvolvido por Araújo (2003), apesar de não ser possível estabelecer uma relação entre os mesmos, dentro desse estudo. Isso pode se dever a natureza do fator de atrito já que é uma grandeza de difícil mensuração e identificação, ou à natureza do AG que é aleatória.

Considerando os resultados apresentados nesta pesquisa, e reiterando a importância na identificação de fator de atrito em redes hidráulicas existentes, este trabalho não pretende esgotar os estudos relativos a esse assunto, tanto com relação às incertezas que cercam a identificação do fator de atrito bem como outras variáveis de redes hidráulicas que são fonte de tomadas de decisão quando da operação e possível ampliação, ou até mesmo a troca de tubulações de redes hidráulicas.

Por fim, sugere-se, para estudos posteriores, uma análise a ser realizada em uma rede física em laboratório, em que se realizem medições com a utilização de manômetros, verificar as mesmas na calibração de fator de atrito e compará-las com as previstas em modelo computacional. Estudar, ainda, como os parâmetros de AG interferem nas incertezas dos resultados de medição do modelo hidráulico, quando comparados com os resultados obtidos com a rede física, de forma a escolher um conjunto ótimo de parâmetros a utilizar nas simulações computacionais.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L.; CARVALHO, J.A. Análise da Equação de Swamme-Jain para o cálculo do fator de atrito. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.3, p.554-557, 2001.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicada a escoamento transiente**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H. Incertezas na Calibração de Redes de Distribuição de Água com Dados Transientes. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2001, Aracajú, SE. Anais do XIV SBRH, CD ROM, 16p. Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.
- ARAÚJO, J.; LANSEY, K. Uncertainty Quantification in Water Distribution Parameter Estimation, presented at the 1991 **National Hydraulic Engineering Conference**, ASCE, Nashville, TN, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218**. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994.
- AZEVEDO NETTO, J. M., et al. **Manual de Hidráulica**, Ed. Edgard Blucher Ltda, 8ª Edição, São Paulo, 1998.
- BAPTISTA, M. LARA, M. **Fundamentos da Engenharia Hidráulica**. Ed. UFMG, 2ª Edição, Belo Horizonte, 2003.
- BHAVE, P. R. Calibrating Water Distribution Network Models. **Journal of Environmental Engineering**, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb, 1988.
- BOULOS, P. F.; WOOD, D. J. Explicit calculation of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**, Ed. Pearson Prentice, 2ª Edição revisada, São Paulo, 2008.
- CHAUDHRY, M. H. **Applied hydraulic transients**. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- CHEUNG, P.B. **Investigação dos métodos clássicos de calibração de redes hidráulicas**. Campo Grande. 132 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2001.
- CHEUNG, P.B.; SOARES, A.K.; SOUZA, R.S. Implementação e investigação de um método analítico de calibração de redes hidráulicas. In: **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2000, Porto Alegre. Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

CHEUNG, P.B.; SOUZA, R.S. Comparação de Métodos de Calibração de Redes Hidráulicas. In: **Planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de águas, o estado da arte e questões avançadas**, 2002, João Pessoa. Planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de águas, o estado da arte e questões avançadas, 2002.

CHEUNG, P.B. **Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Via Algoritmo Genético**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

COSTA, L. H. M.; HOLANDA, M. A. C.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, p. 187-196, 2010.

DARWIN, C. **On the origin of species**. London, John Murray, 1859. Disponível em <[http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1859\\_Origin\\_F373.pdf](http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1859_Origin_F373.pdf)>.

DIANATI, M.; SONG, I.; TREIBER, M. An introduction to genetic algorithms and evolution strategies. **University of Waterloo**, Waterloo, Ontario, Canadá, 2002.

FRANCA ALENCAR, M. N.; HOLANDA, M. A. C. Projeto de Redes de Distribuição de Água por Algoritmos Genéticos. In: **IV Seminário Hispano brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água - IV SEREA**, 2004, João Pessoa. IV Seminário Hispano brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água - IV SEREA, 2004.

GALIZA, R. V. P. **Calibração de rugosidade de tubulações de redes de distribuição de água, via método transiente inverso com aplicação de algoritmo genético**. 162p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2006.

GOUDBERG, D. E.; KUO, C. H. Genetic Algorithms In Pipeline Optimization. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 1, n. 2, p. 128-141, 1987.

INMETRO;CICMA;SEPIN, 2012. Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. 141 p. Duque de Caxias, RJ: Disponível em <[http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum\\_final.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf)>.

INMETRO, 2012. Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados.VIM 2012. Duque de Caxias, RJ: 94 p. Disponível em <[www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim\\_2012.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf)>.

KAMAND, F.Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.114, n. 2, p.311-323, 1988.

KARNEY, B. W. Energy relations in transient closed-conduit flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 116, n. 10, p. 1180-1196, 1990.

KARNEY, B. W.; MCINNIS, D. Transient analysis of water distribution systems. **Journal of the American Water Works Association**, v. 82, n. 7, p. 62-70, 1990.

KARNEY, B. W.; MCINNIS, D. Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 118, n. 7, p. 1014-1030, 1992.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos algoritmos genéticos. In: Galvão, C.O.; Valença, M.J.S. (Org.). *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. 1ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, v., p. 99-150, 1999.

LANSEY, K. E.; BASNET, C. Parameter estimation for water distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 117, n. 1, p. 126-144, 1991.

LANSEY, K. et al. Calibration Assessment and Data Collection for Water Distribution Networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, V. 127, P. 270-279, 2001.

LIGGETT, J. A.; CHEN, L.C. Inverse transient analysis in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 120, n. 8, p. 934-955, 1994.

MAIA JÚNIOR, J. V. F. **Comparação de Métodos de Dimensionamento em Redes de Distribuição de Água**. 144p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2012.

NASH, G. A; KARNNEY, B.W. Efficient Inverse Transient Analysis in Series Pipe System. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 7, p. 761-764, 1999.

NEUMAN, S. Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. **Water Resources Research**, v. 9, n. 4, p. 1006-1021, 1973.

NEVES, C.L. **Calibração de Parâmetros de Modelos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água Para Estudos de Operação de Rede**. Distrito Federal. 133p. Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. 2007.

ONU. 2014. A ONU e a água. Disponível em <<http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-em-acao/a-onu-e-a-agua>>. Acesso em 22 de ago. 2014.

ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J. Explicit pipe network calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management**. ASCE, v. 112, n. 2, p. 166-182, 1986.

ORMSBEE, L. E. Implicit network calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management**. ASCE, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.

PACHECO, M. A. C. Algoritmos Genéticos: Princípios E Aplicações, v. 1, **ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada**, 1999. Disponível em [www.ica.ele.puc-rio.br](http://www.ica.ele.puc-rio.br), acesso: 2014

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos, EESC-USP, 2006, 540p.

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

REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 123, n. 6, p. 317-326, 1997.

ROSAL, M.C.F. **Programação não-linear aplicada a otimização de redes pressurizadas de distribuição de água**. Recife. 99 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

SANEAMENTO. 2014, Disponível em <[www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/A6.html](http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/A6.html)> Acesso em 22 de ago. 2014

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

SALVINO, M.M. **Modelagem Computacional Visando a Reabilitação de Redes Hidráulicas**. Tese (doutorado). Universidade Federal da Paraíba. Centro de Tecnologia. João Pessoa, 2012.

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. – **Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks**. Journal of the Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.

SAVIC, D.A.; KAPELAN, Z.S.; JONKERGOUW, P.M.R. Quo vadis water distribution model calibration? **Urban Water Journal**, v.6, nº1, p. 3-22, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15730620802613380>.

SHAMIR, U.; HOWARD, C. D. D. Engineering Analysis of Water-Distribution Systems. **Journal American Water Works Association**, v. 69, nº9, p. 510-514, 1977.

SIMPSON, A. R.; DANDY, G. C.; MURPHY, L. J. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 4, p. 423-443, 1994.

SIMPSON, A.; VÍTKOVSKY, J.; LAMBERT, M. – Transients for calibration of pipe roughnesses using genetic algorithms. **8<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems**. BHR Groups. Publications n. 39, p. 587-597, 2000.

SILVA, F. G. B. **Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

SILVA, A. C. A. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos**. 134p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2006.

SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R. Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética. In: **VI Simpósio Ítalo Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental**, 2002, Vitória - ES. Anais Do Evento, 2002.

SOARES, A. K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão.** São Carlos. 153p. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

SOARES, A. K. - **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório** - Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

VENTURINI, M.A.A.G. **Metodologia de Análise e Decisão Multicriterial para a Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água.** Tese (doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

VIEIRA, M. E. A G. - **Calibração de modelos de redes de distribuição de água usando algoritmo genético multiobjetivo.** Goiás. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Goiás, 2008.

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

WENDLAND, E.; RABELO, J. Incertezas nos modelos de Fluxo Subterrâneo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v. 15, n. 3, p.147-160. 2010.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. - **Fluid transients.** New York, McGraw-Hill, 1978, 384p.

WU, Z. Y; et al. Calibrating Water Distribution Model via Genetic Algorithms. **The paper is presented at 2002 AWWA IMTech Conference**, April 14-17, Kansas City, Missouri, USA, 2002.