

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**Calibração de modelos de distribuição de
água através do acoplamento do TMA
com o otimizador de Nelder-Mead**

Henrique da Silva Pizzo

Campinas
2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**Calibração de modelos de distribuição de
água através do acoplamento do TMA
com o otimizador de Nelder-Mead**

Henrique da Silva Pizzo

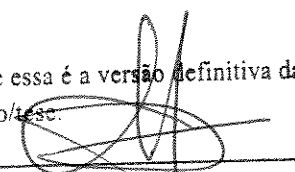
Orientador: Professor Doutor Edevar Luvizotto Júnior

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Campinas

2004

Atesto que essa é a versão definitiva da
dissertação/tese.

Prof. Dr. 

Matricula 201570-1011104

NIDADE	78C
CHAMADA	
T/UNICAMP	
P689c	
EX	
IMBO, BC/	61449
OC.	16-86-03
C	☐
D	☒
EÇO	11.00
TA	04-2-05
CPD	

Bib id 335926

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P689c

Pizzo, Henrique da Silva

Calibração de modelos de distribuição de água através do acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead / Henrique da Silva Pizzo.—Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Edevar Luvizotto Júnior.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Hidráulica Modelos. 2. Métodos de simulação. 3. Abastecimento de água. 4. Otimização matemática. I. Luvizotto Júnior, Edevar. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**Calibração de modelos de distribuição de água através do
acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead**

Henrique da Silva Pizzo

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Professor Dr. Edevar Luvizotto Júnior
Presidente e Orientador/ FEC-UNICAMP



Professora Dra. Vera Maria Cartana Fernandes
FEAR-Universidade de Passo Fundo



Professor Dr. Podalyro Amaral de Souza
EPUSP



Professor Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa
FEC-UNICAMP



Professor Dr. Mário Conrado Cavicchia
FEC-UNICAMP

Campinas, 22 de julho de 2004

**Dedico esta tese à minha esposa, Ana, o amor
da minha vida, de quem eu quero estar
sempre junto.**

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por tudo.
- À minha esposa, Ana Lucia, por estar sempre, e em todos os sentidos, a meu lado.
- Aos meus pais, Vimar e Heloísa, pelo constante incentivo e apoio ao longo do doutorado, e de toda a minha vida.
- Ao meu orientador, professor Edevar Luvizotto Jr., por toda a dedicação, compreensão, auxílio computacional, garra e seriedade demonstrados. É, antes de um excelente pesquisador, uma excelente pessoa.
- Aos meus irmãos, Gustavo e Míriam, por serem sempre meus amigos de verdade.
- Ao meu ex-chefe, engenheiro Marcos Dias da Silva, por me apoiar na obtenção da licença, em 1999, para cursar os créditos do doutorado.
- Ao diretor administrativo da Cia. de Saneamento Municipal de Juiz de Fora, coronel Adelmir Romualdo de Oliveira, por permitir a minha permanência na empresa após o expediente, a fim de dar continuidade às pesquisas desta tese.
- Aos colegas da Universidade de Passo Fundo que me auxiliaram em disponibilizar tempo para concluir este trabalho.
- Aos meus amigos e familiares, pelo amor, carinho e amizade.
- Aos meus professores e colegas, pela instrução, conselhos, incentivo e convivência.
- A todos que, de alguma maneira, contribuíram para que este trabalho pudesse ter sido concluído com êxito.

Sumário

	Página
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Símbolos.....	xii
Resumo.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 OBJETIVOS.....	05
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	06
3.1 Modelos.....	06
3.1.1 Generalidades.....	06
3.1.2 Representação topológica.....	10
3.1.3 Análise hidráulica.....	18
3.1.4 Parâmetros a serem calibrados.....	21
3.2 Calibração.....	31
3.2.1 Generalidades.....	31
3.2.2 Técnicas de calibração.....	36
4 NOVA PROPOSIÇÃO: ACOPLAMENTO DO TMA E NELDER-MEAD.....	52
4.1 Modelo hidráulico TMA.....	52
4.2 Otimizador de Nelder-Mead.....	57
4.3 O acoplamento do simulador TMA com o método de busca de Nelder-Mead.....	63
4.4 Análise comparativa de desempenho.....	65
5 APLICAÇÃO.....	67
6 PONTOS DE MONITORAMENTO (ANÁLISE DE SENSIBILIDADE).....	76
6.1 Generalidades.....	76

6.2 Proposição de métodos de identificação das estações de monitoramento.....	79
7 ESTUDOS DE CASO.....	83
7.1 Rede L.....	83
7.2 Rede F.....	86
8 RESULTADOS E ANÁLISE.....	92
8.1 O calibrador.....	92
8.2 Etapa de verificação.....	94
8.3 Etapa de validação.....	100
9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	113
Anexo.....	115
Referências.....	119
Abstract.....	124

Lista de Figuras

	Página
3.1 - Evolução cronológica do estudo dos parâmetros a calibrar.....	22
4.1 - Malha de cálculo.....	55
4.2 - NÓ genérico.....	55
4.3 - ENO genérico.....	55
4.4 - Método de Nelder-Mead (1).....	62
4.5 - Método de Nelder-Mead (2).....	62
4.6 - Método de Nelder-Mead (3).....	62
4.7 - Método de Nelder-Mead (4).....	62
4.8 - Método de Nelder-Mead (5).....	63
4.9 - Acoplamento do TMA com Nelder-Mead.....	65
5.1 - Topologia e dados do exemplo.....	67
5.2 - Aspectos da convergência dos vetores de C.....	68
5.3 - Resultados para valores de C incorretos.....	70
5.4 - Resultados para valores de C corretos.....	71
5.5 - Calibração usando cinco NÓs monitorados.....	73
5.6 - Calibração usando quatro NÓs monitorados.....	73
5.7 - Calibração usando três NÓs monitorados.....	74
5.8 - Calibração usando dois NÓs monitorados.....	74
7.1 - Rede L.....	83
7.2 - Rede F.....	86
8.1 - Programa CALIBRA: introdução dos dados da rede.....	93
8.2 - Programa CALIBRA: modo de simulação.....	93
8.3 - Programa CALIBRA: modo de calibração.....	94

8.4.8.33 – Gráficos dos resultados.....	107
---	-----

Lista de Tabelas

	Página
4.1 – Resultado do exemplo para os quatro métodos de busca.....	66
5.1 – Tubulações.....	67
5.2 – Reservatório.....	67
5.3 – Cargas monitoradas (mca).....	67
5.4 – Resultados de calibração.....	68
6.1 – Valores de dh/dC para uma situação hipotética.....	80
6.2 – Valores de dC/dh.....	81
7.1 – Tubulações.....	84
7.2 – Reservatório.....	84
7.3 – Cargas nos NÓs.....	84
7.4 – Matriz de sensibilidade da rede L.....	85
7.5 – Tubulações.....	87
7.6 – Cargas nos NÓs.....	87
7.7 – Matriz de sensibilidade da rede F.....	89
8.1 – seis tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%), 9(11%), 13(9%), 17(7%) – total: 82% (rede L).....	95
8.2 – cinco tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%), 9(11%), 13(9%) – total: 75% (rede L).....	96
8.3 – quatro tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%), 9(11%) – total: 66% (rede L).....	97
8.4 – três tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%) – total: 55% (rede L).....	98
8.5 – dois tubos calibrados: 5(23%), 3(19%) – total: 42% (rede L).....	99
8.6 – sete NÓs monitorados (rede F).....	101
8.7 – seis NÓs monitorados (rede F).....	102
8.8 – cinco NÓs monitorados (rede F).....	103

8.9 – quatro NÓs monitorados (rede F).....	104
8.10 – três NÓs monitorados (rede F).....	105
8.11 – dois NÓs monitorados (rede F).....	106

Lista de Símbolos

GRANDEZA

C – coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams
H – carga hidráulica
t – tempo
a – celeridade
g – aceleração da gravidade
A – área
Q – vazão
x – espaço
f – fator de atrito de Darcy-Weisbach
K – rugosidade equivalente hidráulica da tubulação
D – diâmetro
B' – impedância
R – resistência
 χ^2 – função objetivo
 σ^2 – variância
K – número de variáveis da função
N – número médio de avaliações da função objetivo

REPRESENTAÇÃO DIMENSIONAL

adimensional
[L]
[T]
[L] / [T]
[L] / [T]²
[L]²
[L]³ / [T]
[L]
adimensional
[L]
[L]
[T] / [L]²
[T]² / [L]⁵
adimensional
[L]²
adimensional
adimensional

Resumo

Pizzo, Henrique da Silva. Calibração de modelos de distribuição de água através do acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 137 páginas. Tese de Doutorado.

O trabalho situa-se dentro da linha de pesquisa de modelos de simulação hidráulica de redes de distribuição, e aborda especificamente a sua calibração, ou seja, visa desenvolver uma rotina de procedimentos que assegure que os valores de rugosidade das tubulações, de entrada no modelo, sejam representativos dos reais, resultando em simulações confiáveis. O método de calibração foi desenvolvido através do acoplamento de simulador hidráulico baseado no “time marching approach” – TMA, com o algoritmo otimizador de Nelder-Mead. São apresentados métodos de identificação de estações de monitoramento para a calibração, aplicados a casos específicos, em etapas de verificação e validação, com resultados satisfatórios.

Palavras Chave: calibração de modelos, análise de redes, Nelder-Mead, estações de monitoramento.

1 INTRODUÇÃO

Os **modelos matemáticos** de simulação hidráulica de sistemas de abastecimento são ferramentas cujo objetivo é reproduzir, através de um computador, com a maior exatidão possível, o comportamento real do sistema físico que representa. Porém, não é necessário que o modelo reproduza todos os componentes físicos do sistema, mas talvez somente aqueles mais significativos, dependendo da confiabilidade exigida e do uso a que se destina o modelo. García-Serra (1988) define o modelo matemático de uma rede como uma abstração do sistema físico real, que pretende, mediante uma formulação com maior ou menor grau de complexidade, simular a resposta do sistema para as situações pretendidas. Na prática, a modelação de uma rede se reduz ao estudo de um esquema simplificado da mesma, a cujas tubulações se associam os parâmetros adequados para reproduzir, o mais fielmente possível, seu comportamento efetivo. As tubulações do modelo podem corresponder a tubulações reais ou a uma determinada associação das mesmas, de maneira que certas grandezas (por exemplo, rugosidade dos condutos) que aparecem no modelo não têm, necessariamente, que coincidir com as reais (são modelados curvas, tês, válvulas, etc., existentes no conjunto das tubulações). Também são representados elementos de regulação, estações de bombeamento, etc. Por outro lado, os NÓs, definidos pelas linhas dos tubos no modelo, podem corresponder a uma confluência de tubulações mais ou menos próximas, a um consumo aplicado em substituição a uma ramificação pouco importante, a um consumo pontual grande, etc.

Segundo Walski (1985), um modelo computacional de um sistema de distribuição de água é composto por um conjunto de equações, e que prevê as pressões e vazões nesse sistema. Todavia, os resultados de um modelo são somente tão precisos quanto os dados que lhes deram origem. Embora seja possível identificar com exatidão o comprimento e o diâmetro das

tubulações, outras variáveis necessárias ao programa, como a distribuição de vazões e os coeficientes de rugosidade dos tubos, não são bem conhecidas para o sistema como um todo, definindo o que se denomina de **calibração** do modelo. As possibilidades são:

- Assumir os coeficientes de rugosidade dos tubos e a distribuição de vazões como corretos e ajustar as cotas piezométricas;
- Assumir as cotas piezométricas e a rugosidade como corretas e ajustar a estimativa de distribuição de vazão;
- Assumir a distribuição de vazão e estimativas das cotas piezométricas como corretas e ajustar os coeficientes de rugosidade.

Por mais preciso e melhor elaborado que seja o modelo simulador, esse não será eficaz em fornecer resultados de pressões e/ou vazões condizentes com os verdadeiros, se os dados de entrada nesse modelo não forem os reais. É nesse ponto que se insere a necessidade de uma efetiva calibração, a fim de aferir os dados de entrada, antes que se dê seguimento à etapa de simulação, de fato.

A abordagem estática é empregada nas metodologias denominadas clássicas, em que a caracterização do escoamento do fluido, considerado incompressível, é feita com base nas equações de conservação de massa e de energia e em uma lei de resistência ao escoamento. Não são considerados efeitos de inércia e de elasticidade. A solução numérica dos métodos que se utilizam da abordagem estática, na maioria dos casos, recai na linearização e solução do sistema de equações resultante. Koelle e outros (1992), citados por Luvizotto Júnior, observam que o processo de soluções de equações lineares na sua forma matricial geral $[A].[x] = [B]$ é comum a várias atividades da engenharia [...]. É de conhecimento na literatura técnica que, em alguns casos, dependendo dos valores dos elementos componentes da matriz $[A]$, ocorrem imprecisões na determinação dos valores das incógnitas que compõem a matriz $[x]$. Em determinado estudo de caso de uma instalação hidráulica real, observam que, embora não houvesse problemas de convergência com o método da teoria linear utilizado na solução do problema, os resultados eram errôneos e somente por investigação dos mesmos, podia-se verificar o fato do mau condicionamento da matriz que compunha o sistema de equações representativo do escoamento na instalação.

A abordagem elástica baseia-se no emprego das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento, generalizadas de tal forma a caracterizar os escoamentos, em regime permanente e em regime variável (transitório ou oscilatório). Embora as bases do emprego dessa técnica na análise do regime permanente tenham já sido propostas há alguns anos, só recentemente, em função de novas pesquisas e dos avanços computacionais, passou a ser considerada como uma ferramenta extremamente poderosa para esse tipo de análise.

O “time marching approach” – TMA, a ser empregado neste trabalho, tem a vantagem de ser um método que apresenta uma convergência “física” (supostamente “real”) no tempo, através de um transitório hipotético, alcançando o regime permanente final. Esse não é o caso de outros métodos largamente empregados em redes de água, como os métodos de Cross, Newton-Raphson, Linear, Gradiente, e outros, que contemplam uma aproximação simplesmente numérica.

Uma outra vantagem do TMA é que ele já trabalha com as equações do transitório hidráulico, estando, então, pronto para ser empregado em casos de calibração executados em regime transiente, apesar de não ser o caso nesta tese.

Com relação aos métodos de otimização, Reis et al. (1997) citam que, apesar da aplicação com sucesso dos algoritmos genéticos para vários tipos de problema, ele não garante a identificação do ótimo global.

Segundo Solomatine (1998), apesar dos algoritmos genéticos serem os preferidos para problemas relacionados a recursos hídricos, outros algoritmos globais (ou multi-extremo) são também utilizados (DUAN et al., 1993; KUCZERA, 1997). Solomatine aponta que muitos usuários estão desinformados da existência desses outros algoritmos, que podem se apresentar mais eficientes e efetivos que os genéticos. Ele compara nove desses algoritmos em termos de efetividade (precisão), eficiência (número necessário de avaliações da função - relativo ao tempo de computação), e confiabilidade (porcentagem de “acertos” do algoritmo). Dois dos algoritmos pesquisados (ACCO e CRS4) apresentaram melhor comportamento que o genético. Outros experimentos (ABEBE; SOLOMATINE, 1998) mostram que para certas classes de problema

com variáveis altamente discretas, por exemplo, na otimização das redes de distribuição de água, o algoritmo genético, devido à sua natureza discreta, pode realmente ser mais preciso que outros algoritmos desenvolvidos para variáveis contínuas. Ainda assim, praticamente em todos os problemas com variáveis contínuas onde atuou o genético, outros algoritmos de otimização global podem também ser utilizados.

Segundo Wright (1996), ao longo da última década tem havido uma retomada do interesse em métodos de otimização não derivativos, principalmente para problemas em que avaliações da função são muito dispendiosas ou complexas, não permitindo que as derivadas exatas ou aproximadas sejam calculadas a custo razoável. Aponta uma crescente necessidade de pesquisas na área, visto que tais métodos de busca direta, principalmente o Nelder-Mead e suas variações, têm sido amplamente utilizados apesar de sérias deficiências na teoria e desempenho.

As dificuldades inerentes ao processo de calibração, já detectadas na necessidade de várias equipes de campo e aparelhos medidores, e outras de caráter mais teórico, apresentam mais um importante desafio a ser enfrentado.

Tendo isso, aliado às questões anteriormente citadas, é que se justifica a presente tese, através da proposta de um modelo híbrido, obtido pelo acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead, se prestando como uma interessante ferramenta para a calibração de modelos de redes de distribuição de água.

Após uma extensa revisão da literatura sobre o assunto, que vale como fundamentação teórica, é apresentada a nova metodologia a ser empregada. Com ela, são fornecidos exemplos e, então, discutidos critérios para posicionamento ideal de estações de monitoramento de pressões, visando o processo de calibração. Por fim, alguns pontos de investigação para futuras pesquisas são sugeridos.

2 OBJETIVOS

A presente tese tem como objetivos:

- Fazer uma ampla revisão da bibliografia, apresentando o estado da arte da calibração de redes de distribuição de água, desde a década de 70;
- Apresentar uma nova metodologia (Modelo Híbrido) para a calibração de redes de distribuição de água, mais especificamente falando, a determinação dos coeficientes de rugosidade reais dos tubos constituintes da mesma;
- Propor metodologias de identificação de estações de monitoramento de pressões que forneçam bons resultados no processo de calibração;
- Discutir metodologias aplicadas a calibração de redes hidráulicas;
- Apontar possíveis direcionamentos para o seguimento de pesquisas no assunto.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Modelos

3.1.1 Generalidades

Os sistemas de distribuição de água têm fundamental importância na infra-estrutura das cidades. Porém, devido ao crescimento contínuo da população, com conseqüentes expansões da malha urbana, tais sistemas começam a se apresentar insuficientes. Impõe-se, assim, a necessidade de profundas modificações no processo como um todo, através de grandes e inúmeras obras, a fim de que se possa continuar a garantir um bom abastecimento de água para as comunidades. Conforme Ormsbee e Wood (1986), a fim de que essas melhorias sejam realmente efetivas, e apresentem-se compatíveis com as imposições econômicas vigentes, são necessárias decisões de engenharia baseadas em sólidos procedimentos de análise, as quais devem ser tomadas o quanto antes, a fim de possibilitar tal processo de desenvolvimento. Essa necessidade de mudança é citada por Liggett (1993), que chama a atenção para o fato de que, em muitas cidades, as tubulações são enterradas e esquecidas, até que alguma anormalidade no funcionamento aconteça. Na grande maioria das vezes as redes têm manutenções menos intensas se são continuamente monitoradas, a fim de verificar, temporariamente, suas condições. Além disso, com o uso dessas práticas, podem ser evitadas grandes interrupções no sistema de abastecimento de água.

O modelo matemático de uma rede pode ser utilizado para simular o comportamento da mesma sob determinadas condições de carga e, em particular, resolver problemas, como os que são apresentados a seguir (GARCÍA-SERRA, 1988):

a) Determinação das pressões de serviço em todos os pontos da rede para um dado perfil de demanda. Ao se considerar um consumo de ponta, a utilização do modelo verificará a capacidade da rede para suprir as exigências de demandas críticas.

b) Estabelecimento de planos de ação ante possíveis avarias ou rupturas em pontos estratégicos da rede, através da prévia simulação dessas situações. Desse modo, podem ser descobertos pontos ou situações extremamente vulneráveis.

c) Influência na rede devido a modificação na topologia, como instalação de novos trechos, substituição de trechos antigos, novas conexões entre NÓS, etc.

d) Estudo dos efeitos que o aumento de demanda, causado por ampliações, tem nos níveis de pressão.

e) Determinação do suprimento máximo destinado a um ponto, de forma que seja assegurado um nível mínimo de pressão nos pontos adjacentes afetados por esse mesmo NÓ (por exemplo, redes de incêndio).

f) Determinação das características ideais de uma nova linha de tubos para abastecer um consumo, dado um nível mínimo exigido na qualidade do serviço.

g) Previsão do efeito que a introdução de novos pontos de injeção de vazão (ou eliminação desses) produzirá na rede.

h) Simulação das evoluções diárias nos níveis dos reservatórios para um determinado esquema de produção, com vistas a eleger, por exemplo, as tarifas elétricas mais econômicas.

i) Aplicações de controle em tempo real a fim de garantir o serviço, em todo momento, com pressão suficiente.

Um dos pontos chave para a confecção de um modelo matemático de uma nova rede e que pode ser considerado como a primeira etapa na elaboração do mesmo é reunir a maior quantidade possível de informação acerca da rede a ser modelada. Trata-se de familiarizar com o sistema, a fim de conhecer a topologia da rede, os materiais das tubulações, a idade e o traçado das redes, a situação das válvulas e seu grau de abertura. Também é conveniente conhecer o tipo de água que circula, sua dureza, etc., fatores importantes para prever o estado das tubulações,

principalmente as mais antigas. O pessoal especializado, encarregado da exploração da rede, pode facilitar as informações acerca do estado de conservação da mesma, estado das válvulas, fugas existentes e qualquer outro dado adicional necessário para elaborar o modelo. É necessário conhecer a topografia do terreno com a maior exatidão possível, a fim de determinar as cotas dos pontos da rede para, posteriormente, obter a pressão em cada ponto do sistema. Por fim, deve-se ter um conhecimento exaustivo dos pontos de produção e seu regime de funcionamento, assim como dos consumos da rede e a quantidade de água injetada na mesma. Todos esses dados são necessários para que se possa cobrir as diferentes etapas na confecção do modelo do sistema. Sem dúvida, o auxílio da população, da companhia de saneamento e autoridades locais é muito importante neste processo.

Segundo Eggener e Polkowski (1976), com o advento da modelação de redes hidráulicas por computadores digitais, tanto para projetos quanto para controle operacional, houve um aumento do interesse nos impactos das situações comumente empregadas para a simulação de redes, como por exemplo, modelagem topológica, definição de demandas e de valores de rugosidade da tubulação. Pode-se desenvolver modelos detalhados de sistemas reais, verificar seu desempenho sob várias condições de carga, ajustar os modelos a fim de obter o melhor comportamento global, e então utilizá-los como ferramentas de pesquisa para examinar os impactos das simulações e a sensibilidade do modelo às diferentes condições. Recomendam que, para a confecção do modelo, deva-se ter acesso a projetos, desenhos, mapas e outros registros que descrevam precisamente a localidade, as tubulações, com comprimento, diâmetro, idade e material, o posicionamento de todas as válvulas principais e as características hidráulicas de todos os dispositivos de entrada e controle. Deve-se, ainda, possuir registros que permitam determinar o consumo médio das residências, e que indiquem quais usuários devem ser investigados em maiores detalhes. É interessante que o sistema esteja em condições mecânicas satisfatórias, a fim de permitir fácil manipulação para aquisição de dados. A condição das válvulas principais e do equipamento de monitoramento e controle é muito importante. Se possível, deve-se utilizar levantamentos topográficos em campo ao invés de mapas aéreos, a fim de alcançar uma maior precisão.

O desenvolvimento do processo requer um grande esforço, a fim de se obter os dados a serem usados no modelo. Extensivos testes de campo devem ser empreendidos para determinar o fator de rugosidade das tubulações, além de cuidadosas análises dos bombeamentos correntes e registros de consumo, a fim de alocar corretamente as demandas da rede. Se puder se garantir que os registros de dados descrevem corretamente os elementos reais do sistema e seu funcionamento, que os dispositivos de entrada e de controle podem ser adequadamente modelados, e que o equipamento de monitoramento esteja em boas condições de operação, então as variáveis da modelagem ficam reduzidas a:

- a) Validade da condição de carga e vazão estimadas;
- b) Escolha da fórmula do escoamento (ou de perda de carga);
- c) Adoção dos coeficientes de rugosidade dos tubos.

Se as condições dos testes de vazão forem adequadas, a primeira variável torna-se conhecida com um razoável grau de certeza, reduzindo o problema para duas variáveis. Quanto à segunda variável, sua adoção é questão de preferência ou de costume. No Brasil, as normas da ABNT recomendam que se dê preferência fórmula universal, porém a fórmula de Hazen-Williams e outras fórmulas empíricas são, também, amplamente utilizadas. Nesse caso, passar-se-ia a uma única variável, que é a adoção dos coeficientes de rugosidade dos tubos. Assim, ressalta-se que um nível razoável de precisão pode ser atingido em modelagem de redes de distribuição se for feito um esforço para enriquecer e dar confiabilidade aos dados de entrada.

Os modelos de simulação de redes hidráulicas são compostos por equações, cujas incógnitas incluem, principalmente, cargas e vazões. Costumam ser incorporadas bombas, válvulas e outras particularidades das redes estudadas (SHAMIR; HOWARD, 1977). Uma rede de tubos e outros elementos hidráulicos é tida como resolvida quando as cargas e consumos nos NÓS e as vazões nas tubulações e elementos são conhecidos. A obtenção da solução consiste em encontrar os valores de uma determinada série de incógnitas, conhecidos os outros dados da rede. As leis físicas que garantem a solução são:

- a) Uma relação conhecida entre vazão e o gradiente de energia para cada tubo ou elemento (conhecida como equação da perda de carga);
- b) Conservação da massa (equação da continuidade) em cada NÓ.

Segundo Ortíz et al. [s.d.], ao longo do tempo tem-se estabelecido a necessidade de melhorar o aspecto operacional da rede, abordando-se temas de projeto de redes, análise de funcionamento hidráulico com base em modelos numéricos, e privilegiando a setorização das redes como ferramenta indispensável para controlar a operação, os volumes de água recuperada e estabelecer um bom controle de perdas de água. Ainda conforme os mesmos autores, os modelos matemáticos de sistemas de distribuição de água são gerados e utilizados para prever o comportamento das redes sob diferentes condições e para planejar expansões da mesma. Normalmente os modelos de simulação de redes são integrados com os dados obtidos em escritório, projetos, visitas a campo, etc., todavia, os resultados obtidos nem sempre são contrastados com medições de consumo e pressão em campo, e por isso se desconhece o grau de precisão do modelo, sendo, nesse caso, impossível de assegurar a qualidade dos resultados obtidos. Dessa forma, os projetos que se baseiam em modelos gerados de tal forma podem apresentar alto grau de incerteza.

3.1.2 Representação Topológica

De acordo com Shamir e Howard (1977), a inclusão de cada tubo, peça e equipamento da rede real, no modelo computacional, não é necessária. Na prática, sistemas reais de distribuição são freqüentemente esquematizados (“esqueletizados”) antes de se proceder à análise, sendo representados no modelo somente os elementos mais importantes, como as tubulações maiores. Esse passo da análise é particularmente importante quando se está analisando o sistema de distribuição em cidades maiores, com uma grande variação de diâmetros de tubos. Muitas das tubulações menores podem não ser importantes para a capacidade da rede na distribuição de grandes quantidades de água para as várias regiões do sistema. Além disso, a descrição detalhada do local onde ocorrem os consumos também pode não ser tão importante, e esse pode ser agregado a NÓS representativos de demandas de áreas vizinhas. O procedimento de decidir o que incluir no modelo da rede e o que deixar de fora é freqüentemente impreciso, pois termina por depender do julgamento do engenheiro analista.

Assim sendo, a capacidade de uma rede para conduzir água das fontes para alguns pontos principais de consumo pode ser avaliada por uma rede simplificada, com tubos fictícios. A capacidade de transporte de vazão prevista para essa rede deve ser a mesma da rede real. Uma técnica para desenvolver uma rede simplificada é obter soluções para uma série de condições de carga. Essas soluções devem incluir um número de tubos com fatores de resistência desconhecidos em uma rede “esqueletizada”, contendo somente as mais importantes tubulações da rede real: isso define o modelo simplificado. Os resultados da análise de um modelo maior e mais realista ou dados de campo reais podem ser utilizados para determinar valores de consumo conhecidos e cargas totais para o modelo hipotético de análise. O método discutido permite soluções diretas para as resistências dos tubos fictícios, que corresponderiam ao comportamento de uma rede mais complexa. Vazões e cargas hipotéticas podem ser determinadas por processo similar. Desenvolver uma rede simplificada é equivalente a calibrar um modelo de rede para representar adequadamente a distribuição real do sistema. Modelos simplificados são necessários quando a eficiência computacional da solução é crucial, como no caso de controle em tempo real.

Na época em que o tempo de processamento computacional ainda era um grande problema, Shamir e Howard, em artigo de 1977, expõem que a prática comum era reduzir o número de tubos a um outro valor, tendo a capacidade de carga equivalente. Se uma rede de 100 NÓs pudesse ser reduzida para 50 NÓs, o custo de tempo computacional seria reduzido, aproximadamente, por um fator quatro, pois o tempo de computação varia, a grosso modo, com o quadrado do número de NÓs. Essa pôde ser uma importante consideração no benefício x custo da análise computacional, especialmente se forem consideradas simulações da operação de armazenamento, análises de otimização de redes ou controle “on line” em tempo real.

Luvizotto Jr. (1999) chama atenção para o fato de que, na modelação de um escoamento, além de se ter em conta o conjunto de equações adequado para representar o estado do fluxo, é necessária uma adequada descrição da configuração da rede. O grau de detalhes que se deve utilizar para descrever a topologia, ou seja, como as tubulações e acessórios devem ser considerados para que a modelação seja representativa da realidade, é uma questão muito importante, cuja solução, ainda que possua indicadores na literatura técnica, não poderá prescindir de investigações para cada caso. Indica, em seu outro trabalho (1998), uma forma de

modelagem topológica em que o sistema fica perfeitamente identificado, onde cada elemento (tubos, reservatórios, bombas e válvulas) recebe quatro identificadores: número, tipo, NÓ de montante e NÓ de jusante. Tal metodologia foi proposta por Koelle (1982).

Dentro da mesma idéia anterior, Ortíz et al. [s.d.] afirmam que a adoção da topologia do modelo constitui-se em importante atividade, e consiste na definição de segmentos de tubulação e NÓs que irão representar a rede. Para a esquematização (“esqueletização”) deve ser feito um trabalho de síntese, já que, geralmente, não é possível representar no modelo teórico todos os condutos integrantes da rede, mas somente os principais. Ainda assim, os NÓs devem concentrar as demandas de vários usuários em um só ponto, hipótese de trabalho que simplifica a realidade. Apresentam algumas recomendações práticas que facilitam a elaboração do modelo, tornando-o mais confiável e simples de se utilizar:

- Tubulações

Para reduzir o número de tubos e NÓs recomenda-se utilizar diâmetros iguais ou maiores que 100 ou 150 mm. Em caso de ser necessário incluir diâmetros menores, convém substituí-los por condutos equivalentes. Isso é particularmente importante nas vizinhanças das fontes de alimentação do sistema.

- Carga nos reservatórios

A carga nesses pontos de alimentação deve ser um parâmetro altamente confiável dos modelos, devido à relativa simplicidade das medições; os níveis dos reservatórios, pressão das bombas, etc., têm seus valores quantificáveis com equipamentos de controle adequados, por exemplo, células de pressão, manômetros digitais de boa precisão, etc.

- Consumos associados aos reservatórios

De forma similar à carga, o consumo na rede deve ser um parâmetro confiável ao se estruturar o modelo. Atualmente existem no mercado uma grande quantidade de equipamentos de medição de vazão, com razoáveis precisões.

- Consumo nos NÓs

É uma das variáveis mais complexas de se estimar e, visto que é parâmetro fundamental no desempenho do modelo de simulação, deve ser avaliada da maneira mais criteriosa possível. Uma estimativa correta dos consumos nos NÓs é bastante difícil de ser feita. Depende da população servida pelo NÓ, do tipo de uso da água (doméstico, público, comercial,

etc.), e também depende do dia e da hora. Ortíz et al. concluem que a demanda é o parâmetro menos preciso e é necessário considerar seu ajuste durante o processo de calibração da rede.

- Coeficientes de perda de carga

Ainda segundo os mesmos pesquisadores, a tarefa mais difícil na calibração de uma rede é uma seleção apropriada dos coeficientes de perda de carga nos condutos, tais como os coeficientes de Hazen-Williams ou de Darcy-Weisbach. Citam que talvez a melhor estratégia para a estimativa desses coeficientes seja efetuar algumas observações na rede, ou seja, medir em campo o coeficiente de perdas de um certo número de tramos, os mais representativos possível, e então traçar uma curva de coeficientes de perda x idade da tubulação, e a partir de tal curva obter os coeficientes de perda para cada segmento da rede.

García-Serra (1988) indica que, em primeiro lugar, deve-se definir a topologia do modelo, ou seja, de quais tubulações esse irá se compor. A fim de atingir o objetivo, deve-se dispor de um conjunto o mais detalhado possível de dados da rede, relativos a:

- a) Relação completa de tubulações do sistema
 - diâmetros
 - extensões
 - material
 - idade
 - estado de conservação
- b) Relação completa das válvulas
 - diâmetros
 - graus de abertura
 - tipo de função
 - estado de conservação
- c) Mapas com curvas de nível de metro em metro, no máximo

Uma vez agrupadas essas informações, deve-se definir até que nível de detalhes será considerado na elaboração do modelo. Podem acontecer basicamente dois casos:

- Redes pequenas (até cerca de 200 tubos): possível se chegar a um grande nível de detalhes, de maneira que sejam representados todos os tubos e NÓS do sistema;

- Redes maiores: necessária uma simplificação do modelo real, constituindo essencialmente em:

- a) eliminação de alguns tubos de pequeno diâmetro;
- b) associação de tubos em série ou em paralelo;
- c) unificação de NÓs próximos;
- d) eliminação de ramais, substituindo-os por seu consumo no ponto de encontro com a rede, a menos que se queira determinar pressões no próprio ramal.

Em qualquer simplificação deve-se ter em conta a situação das tubulações com relação ao fluxo principal, pontos de consumo e manutenção da capacidade de condução do sistema original. García-Serra (1988) detalha os itens citados, relativos à simplificação das redes reais:

- **Eliminação de Tubos de Pequeno Diâmetro**

Em geral trata-se de eliminar todas as tubulações que afetem muito pouco a capacidade de condução do sistema. Normalmente trata-se de condutos de pequeno diâmetro que formam malhas equilibradas, ou seja, a vazão por ambos extremos do circuito é afluenta. Todavia, uma variação importante no estado de consumos da rede pode fazer com que os condutos apresentem acréscimos de vazão, sendo que a aproximação efetuada afetaria, mais ou menos segundo o diâmetro e a vazão circulante, a capacidade de condução do sistema. Nesse caso, o entorno seria modificado pela eliminação dos condutos.

García-Serra (1988) comenta que vários autores haviam proposto, quase três décadas antes, a possibilidade de eliminar as tubulações de 80 mm ou menores quando a rede for pequena, e de até 200 mm para redes maiores, como é o caso de McPherson (1960), e Fair e Geyer (1961). Cita, ainda, outros autores, de opiniões diferentes, um pouco mais cautelosos, pelo menos em certos casos, propondo incluírem-se também as tubulações de pequeno diâmetro, como é o caso de Becker (1972), Camp e Lawler (1952), e Eggner e Polkowski (1976). Em qualquer caso, uma vez obtido o esqueleto do modelo, deve-se proceder a um ajuste. Assim, as rugosidades finais das tubulações do modelo devem ser ajustadas a fim de minimizar o erro entre valores calculados e valores medidos. Se a tendência é a diminuição exagerada das rugosidades, é de se imaginar que o sistema foi excessivamente “esqueletizado”. Conclui que sempre podem ser eliminadas tubulações, desde que a capacidade de condução não seja reduzida no modelo.

- **Coincidência de NÓs Próximos**

Esta simplificação consiste basicamente em unir dois ou mais NÓs da rede em um só, no modelo, sempre que estejam suficientemente próximos, de forma que seja possível considerar a cota piezométrica em ambos como sendo praticamente a mesma. Trata-se de um caso muito freqüente, pois é habitual que os condutos circulem por ambas calçadas de uma rua. Também é possível realizar essa união em pequenas praças, de onde confluem várias tubulações, quando a distância que separa seus NÓs de cabeceira é pequena, podendo ser desprezada a perda de carga ente eles. Evidentemente o consumo de cada NÓ passará a fazer parte do consumo do NÓ resultante. Em qualquer caso, a inclusão no sistema de condutos de resistência ao escoamento muito pequena pode dar lugar a problemas de convergência quando da resolução do sistema de equações que se forma. Não se ter em conta esses condutos é irrelevante, pois suas resistências serão acumuladas a outros segmentos do sistema na hora de ajustar o modelo.

- **Importância do Consumo na Topologia Adotada**

O grau de “esqueletização” de uma rede depende bastante da distribuição dos consumos na mesma. Costuma-se atribuir os consumos aos NÓs do modelo. Pode-se concluir, então, que o número de NÓs do modelo e, portanto, o de condutos, será claramente influenciado pela distribuição de consumos. A simplificação de coincidência de NÓs pode dar-se quando apresentarem consumos semelhantes, porém quando um NÓ tiver um consumo muito superior aos demais, esse deve ser mantido em sua forma original, no modelo topológico.

- **Associação de Tubulações em Série e em Paralelo**

Dado um conjunto de tubulações, denomina-se conduto equivalente à tubulação resultante da associação entre elas, de tal forma que seja produzida uma mesma perda de carga que a anteriormente verificada, para uma mesma vazão, ou seja, é uma tubulação fictícia que substitui várias outras e mantém o mesmo comportamento hidráulico do conjunto anterior. A metodologia a ser utilizada na obtenção dos condutos equivalentes, tanto na associação em série quanto na em paralelo é bastante simples, podendo ser encontrada em qualquer manual de hidráulica. O que é importante e deve ser ressaltado é que expedientes como o apresentado são muito utilizados na simplificação de uma malha mais complexa.

Segundo Eggener e Polkowski (1976), questões relacionadas ao grau de detalhamento (“esqueletização”) necessário ao bom funcionamento dos modelos de distribuição têm atraído a

atenção dos analistas desde que as técnicas de balanço de redes foram introduzidas. Sugere-se que os investigadores mais antigos “esqueletizavam” os sistemas a fim de que os cálculos pudessem ser feitos com régua de cálculo. Defendendo esse procedimento, Clark e Viessman (1965) indicam que observações de campo confirmaram que a prática não é tão ruim quando o sistema alimentador estiver bem definido e evidenciado, desde que não tenha uma capacidade muito maior que as tubulações menores. Fair e Geyer (1961) dizem que o analista pode ser guiado pelos fatos de que as tubulações contribuem pouco para a vazão total:

1- Quando elas são pequenas, seis polegadas ou menores, na maioria dos sistemas, e quando têm oito ou dez polegadas, em grandes sistemas;

2- Quando elas estão em ângulos retos com a direção geral do fluxo e não houver pressão diferencial apreciável entre as junções no sistema.

McPherson (1960), também citado por Eggener e Polkowski, aponta que a inclusão de tubos de pequena capacidade não é necessária em modelação, não reduz a influência das suposições necessárias e nem melhora a precisão global dos resultados. Por outro lado, Becker et al. (1972) afirmam ser enfatizado pela literatura e ter sido confirmado por eles a importância de se incluir tantas tubulações quanto possível no modelo, inclusive as de seis e quatro polegadas. Parece que Camp e Lawler (1952) têm a posição mais filosófica sobre o assunto, quando dizem que é desejável que se examine a magnitude dos erros causados por se negligenciar as tubulações menores e que se esse erro for muito difícil de avaliar, então todas as tubulações devem ser incluídas. Eggener e Polkowski ressaltam que, na possibilidade de se desconsiderar uma tubulação mais próxima da fonte, com uma vazão provavelmente mais concentrada, é de se esperar um erro maior que se tal tubulação estiver mais a jusante. Dessa forma, finalizam seu artigo ressaltando a importância de se considerar também os tubos de diâmetros menores nas vizinhanças das maiores fontes de suprimento e de grandes cargas concentradas (vazões pontuais).

Segundo Ormsbee e Lingireddy (1997), antes que um sistema de distribuição real possa ser modelado ou simulado por um programa, o sistema físico deve ser representado em uma forma que o computador possa analisar. Isso requer que o sistema de distribuição seja inicialmente representado por uma base de dados de NÓS articulados entre si. Nesse caso, as

articulações representariam tubos individuais, e os NÓS representariam pontos no sistema onde dois ou mais tubos se conectam ou onde a água estiver sendo injetada. Os dados associados com cada seção do tubo incluem a identificação do número do tubo, o comprimento, diâmetro e rugosidade. Dados associados com cada NÓ de junção incluem o número de identificação da junção, a cota e a demanda no ponto. Embora seja reconhecido que o escoamento das vazões é dado de forma variável no tempo, através das conexões existentes ao longo do comprimento, é geralmente aceitável em modelação relacionar metade da vazão ao longo do segmento de tubo ao NÓ de montante, e a outra metade ao NÓ de jusante. Além das tubulações da rede e dados dos NÓS, devem ser obtidos dados de todos os reservatórios e tanques, bombas e válvulas. Os dados acerca de reservatórios incluem informações sobre a geometria dos mesmos e níveis iniciais de água. Dados de bombas incluem o valor da potência média útil ou dados que descrevam a curva característica (altura manométrica x vazão).

Técnicas baseadas em soluções analíticas geralmente requerem simplificações significativas da rede, através de “esqueletização” e uso de tubulações equivalentes. Dessa maneira, as técnicas empregadas podem obter somente resultados aproximadamente corretos. De forma contrária, tanto propostas de simulação quanto de otimização têm a vantagem de usar um modelo completo, e assim são esperados resultados mais precisos.

Walski (1990) aponta uma série de problemas possíveis de ocorrer na fase de definição da topologia da rede:

- Modelos de sistemas reais, onde a maior parte da vazão escoar por tubos de pequenos diâmetros, tendo esses tubos sido deixados de lado na representação topológica, provavelmente não funcionarão bem;
- Esquecimento de se representar válvulas ou outros dispositivos no modelo topológico pode levar a conclusões errôneas;
- Representar uma determinada tubulação como interconectada ao sistema, sendo que, na verdade, encontra-se desconectada das outras;
- Válvulas consideradas abertas no modelo podem estar parcialmente fechadas na realidade, ocasionando uma grande perda de carga localizada e discrepância nos resultados. Aí incluem-se também os casos de válvulas totalmente fechadas ou com defeito.

3.1.3 Análise Hidráulica

Na solução de problemas genéricos em engenharia procura-se, inicialmente, a formulação de um modelo físico, simplificação da situação real, que proporcione um equacionamento matemático de resolução acessível e indicativa da solução real desejada. Os recursos atualmente disponíveis para o cálculo mostram que as simplificações, que há algumas décadas eram necessárias para o acesso à resolução de problemas de engenharia, hoje apresentam-se dispensáveis, e ainda, a solução do modelo matemático obtido é, quase sempre, a definição da situação real do problema proposto. Para a resolução do modelo matemático, entendido como sendo o conjunto completo e consistente de equações que representa a situação física real, é normalmente necessária, em engenharia, a inserção de parâmetros complementares obtidos por via empírica, visando a obtenção de resultados numéricos significativos (KOELLE, s.d.).

Segundo Luvizotto Junior (1998), o número e o caráter não linear das equações que regem o escoamento fluido através de redes de condutos forçados impossibilitam, na maioria das vezes, uma solução analítica direta para a obtenção das variáveis de estado (carga e vazão) ou de parâmetros de interesse (calibração e detecção de fugas). Por essa razão, diversos modelos matemáticos têm sido propostos para a obtenção mais aproximada possível dessas variáveis e parâmetros.

Esses modelos se dividem de acordo com a sua concepção, em modelos dinâmicos e estáticos. Os primeiros permitem que as variáveis de interesse sejam avaliadas ao longo do tempo. Se essa variação é modelada como consequência de efeitos de inércia da massa fluida, esses modelos serão ditos modelos dinâmicos inerciais, que por sua vez podem levar ou não em consideração os efeitos elásticos da água e da tubulação (modelos elásticos ou modelos rígidos). Por outro lado, se as mudanças nas variáveis são devidas a alterações muito lentas das condições de escoamento, nos contornos da rede, pode-se considerar que não sejam mobilizados os efeitos de inércia e elásticos, resultando nos chamados modelos dinâmicos não inerciais, empregados nas análises em período extensivo. A segunda categoria de modelos, os modelos estáticos, são os que modelam o fluxo considerando que os valores das variáveis de estado não mudem com o tempo.

Embora os modelos estáticos possuam campos tradicionais de utilização, o modelo dinâmico elástico (ou simplesmente modelo elástico) possui um equacionamento geral, capaz de englobar os demais como casos particulares (Luvizotto Junior, 1999). Tradicionalmente as rotinas de simulação em regime permanente utilizam métodos estáticos. A simulação em período extensivo é considerada como uma situação quasi-estática decorrente de situações estáticas sucessivas, com variação das características dos contornos, como os níveis de reservatórios.

Luvizotto Junior (1998) ressalta em seu trabalho que é bastante importante a aplicação adequada dos modelos de acordo com o tipo de evento que se esteja avaliando e ter em conta os principais parâmetros que predominam em cada modelo. Por exemplo, a determinação exata da rugosidade de uma tubulação pode ser fundamental em um modelo estático, como responsável principal por variações de carga, por outro lado podem ser bem menos significativas nos modelos dinâmicos elásticos. Com relação a adequar o modelo à situação que se pretende analisar, ele cita Cabrera et al. (1994), que sintetizam o problema do seguinte modo:

a) Uma variação extremamente brusca da condição de trabalho da rede, como partida ou parada de uma bomba, ruptura de uma tubulação ou o fechamento muito rápido de uma válvula, deve ser analisada com o modelo inercial elástico;

b) Uma variação significativa das condições de trabalho da rede, como um rápido aumento de consumo, necessita de um modelo inercial que leve em consideração a aceleração da água, para obter uma solução correta, na qual se refere, por exemplo, o tempo de resposta da rede. Geralmente o modelo dinâmico rígido é adequado;

c) Uma variação pausada nas condições operacionais do sistema, como por exemplo, a evolução do consumo ao longo de um dia, que leva a variações bastante lentas das vazões nas tubulações ao longo do tempo, tornando os efeitos de inércia desprezíveis. O modelo quasi-estático para a simulação em período extensivo é adequado nesse caso;

d) O modelo estático só pode analisar estados de carga bem definidos de uma rede. Em qualquer caso, o modelo quasi-estático não é mais que uma sobreposição no tempo de diferentes situações estáticas, com diferentes contornos (níveis de reservatórios), do mesmo modo que uma imagem em movimento pode ser obtida por superposição temporal de imagens estáticas próximas.

Segundo Ormsbee e Lingireddy (1997), geralmente o tipo de análise hidráulica empregado está diretamente relacionado ao uso pretendido para o modelo. Por exemplo, estudos da operação do sistema e de qualidade de água requerem análise em período extensivo, enquanto certos estudos para planejamento e projetos podem ser realizados utilizando-se análise em regime permanente. Nesse último, o modelo prevê pressões e vazões no sistema em um determinado instante, sob condições específicas de operação e demanda (por exemplo, a demanda média ou máxima diária). É como se fosse tirada uma fotografia do sistema em um específico instante de tempo. Já na análise em período extensivo, o modelo fornece as variáveis do sistema ao longo de um determinado período (geralmente ao longo de 24 horas). Nesse caso, é como se fosse feito um filme sobre o desempenho do sistema. Pode-se conceber a análise em período extensivo como sendo constituída por vários intervalos de tempo, onde, dentro de cada intervalo, atua o regime permanente.

Modelos para aplicações em regime permanente podem ser calibrados através de diversas observações de valores estáticos de pressão e vazão, coletados em diferentes horas do dia e sob condições de operação variáveis. Por outro lado, modelos para aplicações em período extensivo requerem dados de campo coletados ao longo de determinado período, por exemplo, de um a sete dias.

Ainda conforme os autores, em muitos casos pode-se tornar vantajoso dividir a fase de micro-calibração em dois passos: calibração em regime permanente e calibração em período extensivo. Na primeira, os parâmetros do modelo são ajustados para se equivalerem a vazões e pressões reais associadas a várias observações estáticas. Esses dados são geralmente obtidos por testes de incêndio. Na calibração em período extensivo, os parâmetros do modelo são ajustados para equivalerem a pressões e vazões variáveis no tempo, como também oscilações de nível de reservatórios. Na maioria dos casos, a calibração em regime permanente é mais sensível a mudanças na rugosidade das tubulações, enquanto a calibração em período extensivo é mais sensível a mudanças na distribuição de demandas. Uma estratégia potencial para a calibração seria, primeiramente, ajustar cuidadosamente os valores de rugosidade dos tubos, e então tentar ajustar corretamente a distribuição de demandas, usando dados de vazão, pressão e telemetria de reservatórios.

Ormsbee e Lingireddy (1997) citam ainda que, historicamente, muitas tentativas de calibração de modelos empregaram métodos empíricos ou por tentativas, o que pode ser extremamente demorado e ineficiente para sistemas de distribuição. O nível de insucesso dependerá, de alguma forma, da habilidade do analista, do tamanho do sistema, e da quantidade e qualidade dos dados de campo. Alguns problemas podem ser minimizados dividindo-se sistemas complicados em partes menores e então calibrando os parâmetros do modelo usando aproximações incrementais. Calibração de sistemas com vários reservatórios, algumas vezes, podem ser facilitadas pela coleta de conjuntos de dados com somente um reservatório aberto por vez.

Walski (1990) menciona o caso de um modelo onde as bombas só poderiam ser acionadas ou desligadas no início de cada intervalo, previamente especificados. Na verdade, elas o eram, porém não exatamente naqueles instantes, e essas defasagens provocavam diferenças entre níveis de reservatório previstos pelo modelo e os verificados na prática. Esse é um exemplo de caso em que, mesmo com análise em período extensivo, a definição de intervalos de tempo inadequados pode introduzir erros nos resultados.

Atualmente, vários pesquisadores têm proposto diferentes algoritmos para uso em calibração automática de modelos de redes hidráulicas, e muitas dessas técnicas são restritas à calibração em regime permanente. Tais metodologias têm sido baseadas no uso de equações analíticas, modelos de simulação e métodos de otimização.

3.1.4 Parâmetros a serem calibrados

Neste item são relatados fatos relativos aos parâmetros a calibrar, segundo vários autores, não necessariamente seguindo uma ordem cronológica, mas sim, com uma sequência que proporcione a melhor compreensão do assunto como um todo. Todavia, a fim de possibilitar ao leitor também uma visualização cronológica dos acontecimentos, é inserido um quadro demonstrativo antes do texto propriamente dito:

ANO	AUTOR	FATOS / RELATOS PRINCIPAIS
1920	Williams e Hazen	Apresentam tabelas de coeficientes de rugosidade, levando em conta o diâmetro e a idade das tubulações.
1937	Colebrook e White	Hipótese do aumento aproximadamente linear das rugosidades com o tempo.
1974	AWWA	Principal fonte de erros são as hipóteses de distribuição de vazões.
1976	Eggner e Polkowski	Imprecisão das curvas “rugosidade x idade do tubo” para pequenos sistemas malhados. Principal fonte de erros são os coeficientes de rugosidade adotados.
1977	Shamir e Howard	Importância da simultaneidade de medições de descargas em pontos chave do sistema.
1981	Lamont	Mais completa relação de dados acerca da rugosidade de condutos. Necessidade de se considerar a perda da capacidade de transporte com o tempo.
1983	Walski	Diferenças entre pressões medidas e calculadas (mca) para que o modelo possa ser considerado calibrado: bons dados:1,5(média) e 5,0(máxima) dados fracos:3,0(média) e 10,0(máxima).
1986	Walski	Preferível critério de “relações” ao invés do de “diferenças”, em referência a pressões previstas pelo modelo e as observadas.
1988	Garcia-Serra	Necessidade de se disponibilizar uma boa base de dados.
1990	Walski	Necessidade de se lançar mão das técnicas disponíveis para calibração e não basear-se em suposições ou “valores da literatura tradicional”.
Sem data	Ortiz et al.	É sempre possível ajustar, de forma local, demandas e/ou coeficientes de rugosidade [...] pode conduzir a diferentes calibrações para usuários distintos.

Figura 3.1 – Evolução cronológica do estudo dos parâmetros a calibrar

Segundo Ortiz et al. [s.d.], para que o processo de calibração seja feito de forma eficiente, é preciso conhecer a natureza dos dados de entrada no modelo, já que são eles as possíveis fontes de erro na precisão dos dados de saída. É possível dividir as incertezas nos dados de entrada em quatro categorias (Walski, 1983), ou seja, na:

- a) Estimativa incorreta de demandas (distribuição das vazões);
- b) Estimativa incorreta da capacidade de condução das tubulações (rugosidade);
- c) Estimativa incorreta da carga de pressão nos NÓs (bombas, reservatórios);
- d) Precária representatividade do arranjo real da rede no modelo teórico (topologia).

As duas últimas causas podem ser minimizadas por um correto controle em campo, através de equipes e metodologias adequadas. Já as duas primeiras causas têm soluções um pouco mais elaboradas, sendo objeto de vários métodos existentes na literatura disponível sobre calibração.

García-Serra (1988) acrescenta às fontes de erro nos dados de entrada fugas não detectadas na rede, desconhecimento da posição e grau de abertura das válvulas, erros na medição e manipulação dos dados e, por fim, a falta de simultaneidade das leituras. Abordando a questão da distribuição de demandas, ele cita que, geralmente, a análise de uma rede consiste em determinar as cotas piezométricas nos NÓS e vazões circulantes nas tubulações, para uma determinada distribuição de consumos dos usuários do sistema. É por isso que o modelo matemático de uma rede deve incluir, além da topologia e características das linhas (tubos) e NÓS, um conhecimento o mais exaustivo possível dos consumos, tendo em conta, obviamente, que a distribuição de cargas será diferente segundo o estado da rede que se está analisando. É, então, necessário disponibilizar uma base de dados que relacione os diferentes padrões de distribuição de consumo na rede, para que, ao analisar um determinado estado de carga, os consumos sejam representados o mais fielmente possível.

Segundo o citado, é possível obter o máximo grau de detalhes se for possível conhecer, para cada instante, o consumo de cada usuário do sistema. Em tal caso, a distribuição de cargas na rede, salvo fugas e consumos não registrados pela companhia de saneamento, estaria perfeitamente definido. Porém, isso é praticamente impossível de se obter, devendo-se, então, recorrer a estimativas feitas com base em diversos critérios:

- Estimativa em função do faturamento da companhia de saneamento;
- Estimativa do consumo doméstico em função das densidades de população das diferentes zonas da rede, tendo em conta as diferentes taxas de consumo previstas. Os consumos industriais devem ser estimados à parte;
- Estimativa do consumo doméstico em função do comprimento de tubulação existente em cada zona, levando em conta os diferentes valores da vazão “per capita” prevista para cada uma delas. Os consumos industriais podem ser obtidos de maneira análoga. Também os diâmetros das tubulações instaladas podem influir no grau de favorecimento para cada zona.

García-Serra dá preferência ao primeiro item na estimativa de cargas nas regiões de redes já existentes, enquanto que adota o segundo caso quando não existem dados de medição de volume consumido ou quando são analisados casos de ampliação de redes para abastecer uma determinada zona. Uma comparação entre as estimativas de todos os métodos pode ser útil para detectar erros na avaliação das cargas da rede. Ele ainda chama a atenção para o fato de que se deve contemplar também o caso de consumos não registrados (caso de fugas e ligações clandestinas).

Com relação à questão da rugosidade interna das tubulações, García-Serra aponta que, uma vez realizado o estudo de consumos na rede, deve-se proceder à adoção dos fatores de carga (coeficientes de rugosidade).

No caso de uma rede com poucos usuários, onde cada um deles está representado no modelo por um NÓ, não haverá problemas de atribuição. Conhecido o consumo de cada usuário, esse será relacionado ao NÓ correspondente, tomando o valor relativo a esse no instante desejado (hora do dia, dia da semana, etc.), todavia, na quase totalidade dos casos, é impossível descer a esse grau de detalhes devido ao grande número de NÓs em um modelo real de rede, e por isso deve-se recorrer a algum método que permita representar, o mais fielmente possível, esses consumos em um modelo com um número de NÓs menor que o real (é o já citado caso da representação topológica).

Os consumos podem ser atribuídos aos NÓs do modelo ou ser considerados uniformemente distribuídos ao longo dos tubos, tendo em conta que os consumos que efetivamente estão situados nos NÓs sejam considerados como tais. A primeira forma de atribuição é geralmente a mais utilizada pela sua simplicidade, dado que os erros introduzidos por ambos os métodos são similares, conforme demonstra García-Serra, através de desenvolvimento matemático de uma situação hidráulica típica, resultando em erros de milímetros de coluna d'água, absolutamente insignificantes, quando os instrumentos de medida, em muitos casos, não são capazes de avaliar décimos de mca.

Uma vez decidido onde serão posicionadas as cargas de consumo, deve-se determinar como realizar a atribuição dos consumos aos NÓs. García-Serra enumera, em ordem decrescente de detalhes, a utilidade dos dados obtidos junto às companhias de saneamento locais:

1) Situação e consumo de todas as atividades vinculadas à rede, indicando, em cada uma delas, que parte do consumo é industrial e que parte é doméstica.

2) Consumo dos diferentes usuários do sistema, indicando os domicílios dos mesmos e verificando se trata-se de consumo doméstico ou industrial. Nesse caso, o desconhecimento da localização dos pontos de consumo faz com que o grau de detalhe dos dados seja menor que em “1”.

3) Consumo das diferentes ruas da rede, assinalando que parte do mesmo é doméstico e que parte é industrial; também seriam necessários a localização e o consumo dos usuários mais importantes, assim como detalhes provenientes da localização dos consumos de uma rua em determinada região da mesma.

Se os dados coletados se referem a pontos de consumo, o processo a seguir é atribuir a cada NÓ do modelo o consumo das medições mais próximas ao mesmo, tendo em conta que essas devem estar posicionadas em linhas que confluem ao NÓ. É essencial construir uma base de dados e associar uma zona de influência da rede a cada NÓ, de maneira que o consumo de todas as medições da mesma fique associado a esse NÓ.

Shamir e Howard (1977) indicam que, na prática, as demandas instantâneas da rede, os consumos, são incógnitas, exceto talvez em poucos pontos do sistema. Por outro lado, a adução de água aos principais pontos de suprimento e estações de bombeamento é geralmente medida. Uma parte importante no processo de calibração é a estimativa dos consumos em todos os NÓs da rede, usando as descargas desses pontos principais e quaisquer outros dados disponíveis. Destacam que é bastante importante um programa de campo que inclua medições simultâneas de descargas em pontos chave do sistema de distribuição, quando a reservação no sistema é considerável. Estimativas de vazão computadas com base em medições de carga total geralmente não são confiáveis e podem levar à acumulação excessiva de erros com o tempo.

Ainda conforme Shamir e Howard, experiência com uma dada rede sempre permite ao engenheiro desenvolver a capacidade de estimativas iniciais para as incógnitas (dados de entrada). Essa é uma razão pela qual os métodos numéricos ou matemáticos não são essenciais para tal fim. Todavia, intuição nem sempre é uma boa alternativa para predizer como uma rede se comportará quanto aos diferentes padrões de demanda e mudanças em elementos. Em estudos descritos pelos autores, várias surpresas foram detectadas, resultados de métodos por tentativas para auxiliar a calibração.

Williams e Hazen (apud SHARP; WALSKI, 1988), sugerem em suas tabelas originais de 1920, valores para coeficientes de rugosidade para cada diâmetro de tubo, para várias idades. Recomendam-se testes de perda de carga em campo quando se fizer necessário um alto nível de precisão, porém não descrevem quantitativamente o efeito da qualidade da água na rugosidade dos condutos.

Colebrook e White (apud SHARP; WALSKI, 1988) estudaram o problema do aumento da rugosidade, tendo desenvolvido a hipótese que as rugosidades crescem aproximadamente linearmente com o tempo, e que a taxa de crescimento depende bastante do pH da água, relatando os resultados em trabalho de 1937. Assim sendo, os métodos para prever taxas de crescimento de rugosidade devem levar em conta a qualidade da água. Outra importante descoberta de Colebrook e White foi que a perda da capacidade de transporte de vazão se deve muito mais ao aumento das rugosidades do que à diminuição do diâmetro efetivo do tubo causado pelos elementos rugosos.

Ainda segundo Sharp e Walski, Lamont forneceu a mais completa relação de dados acerca de rugosidades de conduto e a diretriz mais racional sobre os efeitos da qualidade da água no crescimento das rugosidades. Afirmam que os valores de rugosidade inicial usualmente terão pouco efeito no coeficiente de rugosidade, após os primeiros anos de uso. Apresentam em seu trabalho várias equações que explicam a razão da curta duração dos resultados de limpeza de tubulações, quando não acompanhada de revestimento de argamassa de cimento ou mudança na qualidade da água. Confirmam, ainda, a teoria do crescimento linear das rugosidades com o tempo, dependendo da qualidade da água, com respeito à corrosão ou precipitação.

Lamont (1981) atenta para que, no projeto e dimensionamento de tubulações, seja necessário levar em consideração a perda da capacidade de transporte com o tempo. A estimativa dessa perda de capacidade não é tarefa fácil, devido ao envolvimento de muitos fatores, como tuberculização, formação de lodo e outras influências destrutivas. O problema pode ser melhor explicado pelo conceito da taxa de crescimento das rugosidades, proposto por Colebrook e White, e depois estendido por Lamont ao caso da formação do lodo em tubos lisos. Tubos de ferro fundido e aço são particularmente sensíveis aos efeitos da idade, especialmente conduzindo águas corrosivas. Mesmo tubos lisos revestidos de cimento ou betume, que não estariam sujeitos ao efeito quando carreando água limpa e tratada, podem perder rapidamente a capacidade de transporte quando sujeitos à água bruta, devido à formação do lodo. Ainda segundo Lamont, a tuberculização pode reduzir a capacidade de condutos de ferro fundido, após 30 anos de uso, de 15 a 70 %, dependendo do grau de ataque corrosivo e do diâmetro do conduto. Analogamente, a formação de lodo pode reduzir a capacidade de um tubo liso, após 10 a 20 anos de uso com água bruta, em 25 %, chegando até acima de 50 % da capacidade original, em casos extremos. Tubos de concreto não-revestido, cimento revestido e cimento amianto podem sofrer uma pequena perda de capacidade (5 a 10 %) durante os primeiros anos de uso, pela influência do lodo. Uma capa de tinta betuminosa, contudo, preveniria isso e preservaria a capacidade de carga original indefinidamente. Tubos lisos não-ferrosos (incluindo chumbo e cobre) e tubos plásticos obtidos por extrusão parecem não serem sujeitos ao efeito da idade, quando conduzindo água normalmente tratada.

Eggener e Polkowski (1976) indicam um procedimento de modelagem que permite o computador ajustar os coeficientes de rugosidade, de forma a produzir as mesmas pressões observadas nos NÓs. Segundo eles, o procedimento padrão de atribuir a todas as tubulações da rede um coeficiente de rugosidade baseado em curvas “rugosidade x idade do tubo”, desenvolvidas por testes de campo em uma pequena amostra de tubos pertencentes a pequenos sistemas malhados é fruto de prática adotada em trabalhos anteriores. Esses sim, eram feitos adequadamente, visto que as redes de distribuição eram maiores e caracterizadas por tubulações alimentadoras bem definidas, de altas capacidades, quando comparadas àqueles sistemas de condutos menores. Os autores justificam que o valor do coeficiente de rugosidade não pode ser determinado corretamente para sistemas em malhas com pequenos diâmetros. É bem sabido que

o coeficiente de rugosidade é um parâmetro, de certa forma, indefinido, que, aliado ao fator de fricção, responde por quaisquer perdas menores que possam estar presentes. Para os sistemas malhados, as perdas localizadas incluem conexões, ajustes, válvulas e desvios de alinhamento. Essas perdas, principalmente aquelas causadas por desvios no alinhamento, variam consideravelmente para tubulações de mesmos diâmetros dentro da mesma malha, reduzindo a validade da extrapolação do coeficiente de rugosidade com a idade do tubo.

Eggenger e Polkowski recomendam que os ajustes e refinamentos sejam adiados até que todas as válvulas sejam locadas e determinado se estão abertas ou fechadas, sob pena de estar se utilizando um modelo ótimo em uma representação incorreta do arranjo real, o que vai produzir, obviamente, resultados incorretos.

Ortíz et al. [s.d.], citando Eggenger e Polkowski (1976), chamam atenção para o fato de que o coeficiente de rugosidade das tubulações não somente representa o efeito das perdas de carga contínuas, devidas ao atrito, mas sim a um ajuste global, também contemplando perdas localizadas. Por outro lado, o valor desse coeficiente é (ou pelo menos deveria ser) uma função também da velocidade do fluido na tubulação. Normalmente, quando se realizam os testes, se mantêm um fluxo alto, com objetivos tais como:

- Ter perdas de carga significativas em trechos curtos;
- Minimizar o impacto das demandas locais;
- Serem fechadas válvulas que conectam com outros ramais, etc.

Devido a esses fatos, em testes específicos de avaliação dos coeficientes, são obtidos valores diferentes daqueles atuantes em uma operação normal. Como consequência disso, as curvas de coeficiente de perdas versus idade da tubulação, obtidas com poucas observações, não são totalmente confiáveis, sendo particularmente duvidosas para diâmetros pequenos, em que a diferença entre o diâmetro nominal e o real pode ser muito importante. Por isso, os autores recomendam efetuar os testes em condições reais de operação, e as curvas obtidas serão tanto mais confiáveis conforme a experiência e a seriedade de quem realizou os testes.

Em geral, o processo de representação topológica da rede e determinação das cargas e gastos nas fontes (essas últimas podem ser medidas) são os elementos mais confiáveis do modelo e normalmente não devem requerer ajustes no processo de calibração. Porém, tanto dados de demanda em cada NÓ e coeficientes de rugosidade em trechos de tubo são menos confiáveis, e por isso são geralmente as variáveis de ajuste durante o processo de calibração do modelo da rede de distribuição.

Conforme o Comitê de Sistemas de Distribuição de Água da AWWA (1974), a principal fonte de erro na simulação do funcionamento de redes são as hipóteses de distribuição de demandas e suas variações, e por isso recomenda-se que a ênfase do ajuste deva ser focada nas demandas nodais. Por outro lado, alguns autores, entre eles Eggener e Polkowski (1976), estabelecem que a parte mais frágil da entrada de dados no modelo não é a demanda, mas sim o coeficiente de rugosidade dos trechos de tubulação. Assim sendo, conforme exposto por Ortíz et al., a definição do item de maior grau de importância no processo de ajuste, se nos dados de demanda ou se nos coeficientes de fricção, não está de todo claro, existindo diversas opiniões contraditórias, predominando o ajuste de demandas em certos casos e o ajuste dos coeficientes em outros.

Ortíz et al. apontam que, na realidade, é sempre possível tratar de ajustar, de forma local, demandas e/ou coeficientes de rugosidade, e forçar o modelo a ajustar-se a medições de uma condição simples de cargas. Todavia, tal procedimento não é lógico, nem sistemático, e pode conduzir a diferentes calibrações para usuários distintos. Indicam, ainda, que o grau de precisão do modelo é comumente definido em termos das pressões ou cargas nos NÓs medidos, e depende principalmente da precisão na formulação dos dados de entrada, e da dedicação e investimento que o usuário do modelo está disposto a aplicar para alcançar um adequado ajuste.

Estimar até que grau o ajuste é considerado razoável não é tarefa fácil, já que são envolvidos muitos fatores, por exemplo:

- a) Qualidade dos dados de pressões e cotas utilizadas;
- b) Quantidade de recursos econômicos disponíveis para efetuar as medições em campo e trabalho de escritório, para ajustar o modelo.

Citam que, a fim de se considerar um modelo calibrado, Walski (1983) propõe uma diferença média de 1,5 m entre pressão medida e pressão calculada, com um valor máximo de 5,0 m para um bom grupo de dados de entrada, e respectivamente, 3,0 e 10,0 m para um grupo fraco de dados. Já Cesario e Davis (1984) estabelecem uma precisão de 3,5 a 7,0 m para se considerar o modelo calibrado.

Esses dois critérios de avaliação da precisão são obtidos através de diferenças absolutas, todavia, Walski (1986) e Bhave (1988) consideram preferível estabelecer um critério de avaliação através de relações ou índices entre os valores de pressão ou perda de carga previstos pelo modelo e os observados, nos NÓs em questão e próximo aos locais onde a perda de carga tenha sido medida. Esse critério de “relação” é superior ao de ‘diferenças”, já que é independente das unidades utilizadas e da natureza do gradiente hidráulico, seja esse plano ou com forte declividade. Uma tolerância de $\pm 3,0 \%$ nas pressões ou perdas, para diferentes condições de operação, pode ser um valor aceitável.

Walski (1990) chama atenção para que em dias quentes, quando o tempo está seco, o consumo de água pode aumentar bastante em relação à média normal diária. Indica como melhor que os testes de precisão do modelo, na checagem dos resultados produzidos com os dados reais de campo, sejam feitos nesses dias, em que as perdas de carga são maiores. Esse expediente tende a ampliar os possíveis erros nos fatores de rugosidade e demandas, de maneira que se tenha uma calibração mais eficiente.

Uma outra situação apontada por Walski é que, em muitas localidades, o consumo de água varia significativamente durante o dia. Dessa maneira, considerando esse consumo variável de acordo com a região, quando da entrada de dados no modelo, os resultados podem ser bem mais realistas, além de ser importante conhecer que a vazão pode não se manter constante, nem mesmo durante um teste. Cita, ainda, possíveis fontes de erro, quando são considerados grandes consumidores que ainda não se encontram “em carga” (por exemplo, indústrias recentes), e relação desses à zonas de pressão erradas.

Walski conclui que, se o engenheiro necessita ter alguma confiança nos resultados de um modelo de sistema de distribuição de água, esse modelo deve ser calibrado, usando-se dados de entrada de alta qualidade. O simples fato de analisar diferenças entre pressões observadas e calculadas, para uma simples condição de carga, não é maneira aceitável de se julgar a precisão da calibração. Várias técnicas estão disponíveis para se coletar e utilizar os dados para calibração. Segundo ele, não há razão para basear-se em suposições ou valores da literatura tradicional, como coeficientes de rugosidade, padrões de uso da água e cargas do entorno, para uso no modelo.

3.2 Calibração

3.2.1 Generalidades

Ortíz et al. [s.d.] afirmam existir pelo menos duas ações dentro do projeto cuja eficácia depende diretamente da confiabilidade do modelo de simulação utilizado: os aspectos de detecção de fugas maiores em tubulações mediante a utilização do modelo e a setorização da rede. Segundo eles, a tarefa de verificação dos resultados do modelo com medições de campo até assegurar que esse possa prever, com razoável precisão, o comportamento da rede é o que se denomina de calibração do modelo. Apresentam definições de alguns outros autores:

“Calibração consiste na determinação das características físicas e operacionais de um sistema existente e determinação de dados de entrada que, quando aplicados ao modelo, produzam resultados realistas” (SHAMIR; HOWARD, 1977).

“É o processo de ajuste fino de modelo até que esse simule as condições de campo para um horizonte de tempo específico, e para as condições de demanda máxima horária, com uma precisão razoável” (CESARIO; DAVIS, 1984).

“É um processo de dois passos, que consiste na comparação de pressões e vazões fornecidas pelo modelo [...] com as pressões e vazões conhecidas (medidas) em condições de operação, ou seja, operações de equipamento de bombeamento, níveis de reservatório, válvulas redutoras de pressão, etc., e ajuste dos dados de entrada no modelo até que esses produzam um ajuste razoável entre os valores observados e os calculados” (WALSKI, 1983).

Ferreri, Napoli e Tumbiolo (1994) comentam sobre a necessidade de avaliar, com uma boa precisão, os parâmetros característicos da rede, onde o coeficiente de rugosidade dos tubos assume grande importância. A determinação desses parâmetros, que geralmente se alteram consideravelmente com o tempo, constitui-se no problema conhecido como calibração da rede.

Os ajustes entre grandezas hidráulicas podem fazer o modelo parecer calibrado, embora somente uma ou algumas das combinações entre as variáveis possam estar corretas. Muitas vezes o modelo pode simplesmente aparentar estar calibrado (e não estar, de fato) devido a erros adicionais poderem ter sido introduzidos, cancelando o efeito dos erros iniciais e mascarando o resultado final. Conforme o autor, uma alternativa para contornar o problema é a coleta de dados adequados para os sistemas, o que vai eliminar, ou pelo menos, reduzir significativamente as incertezas. A forma de se proceder é obtendo os registros de pressão no sistema de distribuição em um determinado tempo e conhecer (não estimar) as cargas nos reservatórios, bombas e válvulas redutoras de pressão, correspondentes àquele tempo. Outro importante conceito em um criterioso processo de calibração de modelo é a alteração das vazões no sistema real para valores conhecidos e observação de como as pressões variam. Calibrar o modelo em uma faixa de diferentes vazões ajuda a assegurar que o modelo não esteja calibrado por compensação de erros.

Walski (1990) admite como possível se pensar que a calibração de um modelo de distribuição de água seja um processo lógico e direto. Porém, algumas vezes a melhor ferramenta para a calibração de modelos consiste em um grande trabalho investigativo, um pouco de intuição e alguma sorte. O problema, todavia, reside no fato de que é virtualmente impossível saber com certeza o que está errado com um dado modelo. Quando feita criteriosamente, a calibração de modelos não é rápida nem fácil. O preço por não fazê-la corretamente é ter que basear as decisões sobre dimensionamento de tubulações em modelos altamente imperfeitos, e isso termina por fazer o custo da calibração parecer pequeno.

Conforme Ormsbee e Lingireddy (1997), os modelos computacionais para análise e projeto de sistemas de distribuição de água existem há várias décadas. Durante esse tempo, muitos avanços têm sido verificados em sua sofisticação e aplicação. A disponibilidade e a propagação do uso da tecnologia dos microcomputadores vêm possibilitando às companhias de

água e aos engenheiros analisar as condições e operações de sistemas existentes e investigar os efeitos de mudanças propostas. A validade desses modelos, porém, vai depender muito da precisão dos dados de entrada. Indica os principais parâmetros de incerteza no modelo como geralmente sendo a rugosidade das tubulações e as demandas nodais. Devido à dificuldade de se obter processos de medida econômicos e confiáveis desses dois parâmetros, os valores do modelo final são normalmente determinados via a calibração do modelo, ou seja, ajustando os parâmetros necessários para produzir resultados que melhor se aproximem das condições reais observadas nos dados medidos em campo. Ainda segundo ele, embora a calibração deva sempre ser incluída em qualquer análise hidráulica, ela é freqüentemente deixada de lado ou feita casualmente. Como resultado, dados inadequados podem ser usados ou erros podem passar despercebidos, fazendo com que o resultado do modelo hidráulico seja limitado.

De uma forma geral, definem que um modelo de calibração de rede deva compreender sete passos básicos:

- a) Identificar o uso pretendido para o modelo;
- b) Determinar as estimativas iniciais dos parâmetros do modelo;
- c) Coletar os dados para calibração;
- d) Avaliar os resultados do modelo;
- e) Executar a macro-calibração;
- f) Realizar análise de sensibilidade;
- g) Executar a micro-calibração.

Antes de calibrar um modelo hidráulico de redes, é importante primeiramente identificar o uso a que se destina (por exemplo, dimensionamento de tubulações para planos diretores, estudos operacionais, projetos, estudos de recuperação, estudos de qualidade da água, etc.), e o tipo de análise hidráulica empregado, o que vai prover alguma diretriz sobre o tipo e qualidade dos dados de campo coletados e o nível desejado de relação entre pressões e vazões observadas e calculadas pelo modelo. O segundo passo é determinar as estimativas iniciais dos parâmetros no modelo primário. Em muitos modelos, um certo grau de incerteza pode ser associado a diversos parâmetros, mais notadamente os coeficientes de rugosidade dos tubos e as demandas a serem atribuídas a cada NÓ. As estimativas iniciais dos valores de rugosidade de tubos podem ser

obtidas utilizando-se os valores médios da literatura ou diretamente por medidas de campo. De acordo com os autores, o segundo maior parâmetro determinado na análise de calibração é a demanda média (análise em regime permanente) ou a demanda variável com o tempo (análise em período extensivo).

Após os parâmetros do modelo terem sido estimados, a sua precisão pode ser verificada. Isso é feito executando-se o modelo, usando os valores estimados e as condições de contorno observadas, e então comparando os resultados do modelo com os resultados das observações de campo. Dados de testes de incêndio, leituras de medidores de vazão em estações de bombeamento, e dados de tanques telemétricos são bastante comuns. É importante, ainda, que os dados das condições de contorno associadas sejam registrados antes que cada teste seja executado. Isso inclui informações dos níveis dos reservatórios, condições das bombas, etc. Dependendo do nível de instrumentação e telemetria, muitos dados já podem ser coletados como parte normal da operação.

Finalizada essa etapa, as demandas e pressões estimadas são então comparadas com os valores correspondentes, observados em campo, em uma tentativa de verificar a exatidão do modelo, que pode ser avaliada usando-se vários critérios. Um dos critérios mais comuns seria avaliar o valor da diferença entre pressões observadas e pressões calculadas, em valor absoluto, referentes a cada NÓ. O outro critério seria que essa diferença de cada NÓ fosse relacionada ao valor do desvio médio de todos os NÓs avaliados da rede, traduzindo-se em diferenças relativas. Segundo os autores, esse segundo critério é preferencial. Para simulações em período extensivo são feitas comparações entre descargas, pressões e níveis d'água em reservatórios. Dependendo da aplicação, uma variação máxima de cinco a dez por cento é geralmente considerada satisfatória.

As diferenças entre os resultados da aplicação do modelo e as observações de campo podem ser causadas por diversos fatores (ORMSBEE; LINGIREDDY, 1997):

- erros na modelação dos parâmetros (valores de rugosidade de tubulações e distribuição de demandas nodais);
- geometria incorreta da rede (tubos conectados aos NÓs errados);

- definição incorreta dos limites das zonas de pressão;
- dados incorretos da rede (diâmetro dos tubos, comprimento, etc.);
- erros nas condições de contorno (ou seja, incorreções nos dados de válvulas reguladoras de pressão, nível d'água nos reservatórios, curvas de bomba, etc.);
- erros em registros da operação do sistema (por exemplo, bombas partindo e parando em períodos incorretos);
- incorreções no equipamento de medição;
- erros de leitura nos instrumentos.

Com relação à macro-calibração, se um (ou mais) dos valores das variáveis medidas for diferente dos valores modelados, por uma percentagem suposta excessiva (por exemplo, trinta por cento), a causa da diferença provavelmente se estende além de erros de estimativa para cada rugosidade de tubo e demanda nodal. São muitas as causas possíveis para tais diferenças: válvulas fechadas ou parcialmente fechadas, curvas de bombas, dados inadequados de telemetria de reservatórios, incorreções de diâmetros e comprimentos de tubos, geometria errada da rede e delimitação incorreta das zonas de pressão. A macro-calibração consiste, então, em uma fase de detecção e correção de erros mais grosseiros. Antes de passar à micro-calibração, é útil realizar a análise de sensibilidade do modelo, a fim de auxiliar na identificação da maior possível fonte de erros desse. Isso pode ser conseguido variando os parâmetros do modelo em diferentes faixas e então medindo os efeitos associados. A micro-calibração deve ser feita depois que os resultados do modelo e as observações de campo estiverem em relativa concordância. Os parâmetros a serem ajustados durante essa fase final mais refinada da calibração são a rugosidade dos tubos e demandas nodais.

Conforme García-Serra (1988), uma vez implementado o modelo, deve-se estudar sua adequação à realidade física, contrastando medidas de campo com resultados obtidos por aquele. Afirmar que nunca existirá uma coincidência total entre os valores medidos e os calculados e que as causas que provocam essa discrepância são, entre outras:

- Modelagem topológica da rede (não são contempladas todas as canalizações e nem a maioria dos elementos que provocam perdas menores);
- Desconhecimento da rugosidade real dos condutos e do diâmetro efetivo dos mesmos;

- Erros na determinação das cotas;
- Desconhecimento da vazão exata consumida por cada usuário em cada instante (trabalha-se com valores médios) e no ramal do usuário, no exato ponto de consumo;
- Fugas não detectadas na rede;
- Desconhecimento, em muitos casos, da posição e grau de abertura das válvulas;
- Erros na transcrição dos dados;
- Erros de medição e falta de simultaneidade das mesmas, na grande maioria dos casos.

Defende que, por tais motivos, deve-se ajustar o modelo, a fim de reduzir a discrepância entre valores medidos e calculados.

Ormsbee e Lingireddy (1997) atentam para o fato de que atualmente têm aumentado bastante as iniciativas para o uso tanto do sistema de informações geográficas (SIG) quanto do sistema de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA) baseados em calibração de modelos. É esperado que desenvolvimentos e aplicações futuras da tecnologia de ambos levem a ferramentas ainda mais eficientes.

3.2.2 Técnicas de calibração

Eggener e Polkowski, em 1976, já fazem menção à questão da calibração dos coeficientes de rugosidade das redes de distribuição de água. Eles sugerem que o método mais lógico de se modelar um sistema malhado, para o qual, segundo eles, as condições de vazão podem ser melhor definidas que o fator de fricção, é “alimentar” o computador com dados de vazão de duas ou mais condições, juntamente com as pressões nodais observadas para cada condição de carga e uma série de valores de rugosidade assumidos. A estratégia é permitir que o computador realize o balanço da rede para cada condição de carga, armazene os resultados, examine o ajuste global do modelo, explore as melhores estimativas e realize um outro balanço do modelo com as novas rugosidades, e assim iterativamente até que alguma condição de aceitação seja satisfeita. Segundo os autores, naquela época um esquema havia há pouco sido

descrito por Donachie, na Inglaterra, porém o método ainda não estava bem disseminado no país, exigindo maiores pesquisas na área.

Shamir e Howard (1977) citam estudos em duas cidades onde foi empreendido um programa de medições de campo para auxiliar na calibração. Na primeira, a ênfase foi nas estimativas de resistência dos tubos pela perda de carga e medidas de descarga devido a aproximadamente vinte pontos de suprimento terem fornecido padrões de vazão com os quais as demandas nos NÓs estavam altamente correlacionadas. Na segunda, por outro lado, o programa de campo baseava-se principalmente em medições simultâneas de cargas totais ao longo da rede, desde que resistências de vários tubos fossem conhecidas, enquanto o suprimento era medido apenas em quatro pontos. A análise computacional indicava os consumos instantâneos locais em vários NÓs e obtinha um bom refinamento no valor das resistências em importantes, apesar de poucas, tubulações.

Uma forma bastante rudimentar e preliminar de se proceder à calibração de modelos é através da utilização de dados de rugosidade disponíveis em tabelas da literatura sobre o assunto. Não se trata, entretanto, de um processo convencional de calibração, mas sim de um método auxiliar, que visa minimizar sua necessidade e fazer com que essa possa ser realizada em intervalos de tempo maiores. Dentro dessa idéia, conforme Lamont (1981), embora longe de ser ideal, a fórmula de Hazen-Williams vinha sendo usada com relativo sucesso pelos engenheiros hidráulicos e sanitaristas, principalmente por terem adquirido experiência na adoção do valor aproximado do coeficiente C (coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams) para cada situação particular. A fim de compensar as limitações da fórmula e aumentar a sua precisão no uso, o autor apresenta valores de C variando com o diâmetro e com o material e condição da tubulação.

Convém ressaltar que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991, 1994) recomenda a utilização da fórmula universal da perda de carga, com o fator de atrito calculado pela equação de Colebrook-White, por ser essa mais precisa e abrangente que a fórmula de Hazen-Williams e quaisquer outras fórmulas empíricas. Todavia, a fórmula de Hazen-Williams continua a ser ainda bastante utilizada, com o agravante de muitos projetistas não considerarem o diâmetro, mas somente o tipo de conduto, influenciando no valor do coeficiente C. Pizzo, Moraes

e Silva (2000) apresentam um estudo no qual são verificados desvios provenientes da aplicação da fórmula universal e a fórmula de Hazen-Williams. Lamont afirma, entretanto, que quando utilizados corretamente os valores do coeficiente C por ele fornecidos, a fórmula de Hazen-Williams fornece resultados suficientemente precisos para os fins práticos, apesar de também indicar a fórmula universal como mais abrangente.

Walski (1983) apresenta fórmulas que podem simplificar bastante o processo de calibração de modelos de sistemas de distribuição de água, auxiliando na decisão de quando e quanto ajustar o valor da rugosidade e a distribuição de vazões adotada. Tais fórmulas podem ser utilizadas com dados provenientes de condição de altas e baixas vazões, enquanto registrando valores de bombas e operação de reservatórios. Pode ser obtido através de testes de hidrante.

Coulbeck (1984, 1985) apresenta um programa para cálculo de valores de estimativas refinadas de parâmetros físicos da rede e dados operacionais. O procedimento engloba a avaliação de um conjunto de ajustes de valores de mínimo, a fim de anular qualquer discrepância entre os dados simulados e os medidos. Uma solução por técnicas de otimização resolve os conflitos que surgem devidos aos diferentes efeitos das variáveis de sistema e permite restrições definidas pelo usuário. São usadas técnicas de otimização hierarquizada, a fim de admitir sistemas de alto grau dimensional contendo grande número de variáveis e, por essa razão, mais apropriadas ao uso em redes de distribuição em larga escala. Além de tudo, o método faz o melhor uso das informações disponíveis e considera todos os ajustes possíveis, a fim de eliminar as discrepâncias entre as medidas reais da rede e as simulações de computador. Os ajustes otimizados representam os mínimos desvios ponderados das estimativas iniciais de seus valores.

Na função de mérito, ou função objetivo (função de diferenças entre parâmetros simulados e observados, a ser minimizada), Coulbeck englobou os valores de níveis de reservatório, pressões em tubos e válvulas, bombas e demandas nodais. Tal programa, desenvolvido para calibração de sistemas de distribuição, apresenta como principais vantagens:

a) Seleção de uma faixa de discrepâncias medidas, consistindo de vazões em reservatórios e pressões nodais;

b) Seleção de ajustes para dados operacionais, consistindo de níveis de reservatório e demandas de consumo, e parâmetros da rede, para tubos, válvulas e bombas, onde cada ajuste possa ser especificado individualmente em um elemento ou em base nodal, se necessário;

c) Incorporação de restrições de ajuste e fatores de ponderação, opcionalmente, por meio de valores definidos pelo usuário;

d) Cálculo simultâneo de ajustes, fornecendo zero de discrepância, com os desvios ponderados minimizados de valores estimados.

Como consequência, o operador pode usar a experiência de engenharia, direcionando para a solução o resultado mais aceitável. Uma vantagem adicional é a capacidade do modelo abranger também a calibração de sistemas com simulação em período extensivo ou com conjuntos de dados medidos. Bons resultados foram obtidos da aplicação do programa a sistemas típicos, estando a ordem de grandeza dos resultados calibrados bem dentro das expectativas, evidenciando a flexibilidade do método que, embora usado em sistemas de distribuição de água, pode apresentar benefícios na calibração de outros tipos de rede de distribuição, como por exemplo, óleo e gás.

Walski (1985) apresenta métodos de calibração da rugosidade de tubos por processos analíticos e por tentativas, e ainda uma técnica para tentar diminuir os erros resultantes das incertezas a respeito dos padrões de uso da água. Ele fornece uma série de dicas para o problema da calibração:

- Realizar testes de campo: é o único meio de se conhecer, com certeza, os valores das rugosidades.
- Checar o real ponto de operação das bombas, não confiando unicamente na capacidade média ou nas curvas originais. As curvas reais podem ser obtidas com tubo de Pitot e manômetros.
- Checar a regulação das válvulas redutoras de pressão. Em geral, essas válvulas possuem registradores acoplados que, devido ao grande tempo de uso, podem não fornecer medições precisas.
- Determinar o consumo total de água no sistema a fim de obter uma avaliação das pressões para a calibração do modelo. Pode ser determinado pelo cálculo da produção na

fonte e considerações sobre a taxa em que os reservatórios são cheios ou esvaziados, à medida que as leituras de pressão venham sendo feitas.

- Verificar a precisão dos macro-medidores. Se esses não tiverem sido calibrados há pouco tempo, devem ser checados utilizando-se o tubo de Pitot.

Em 1986, Walski, em outro trabalho, ilustra que é possível calibrar, com boa precisão, um modelo matemático de complexas redes de distribuição de água (271 NÓs, 307 tubos e 9 válvulas redutoras de pressão), bastando que os dados coletados sejam adequados e precisos. Recomenda como essencial que o modelo seja calibrado para diversos padrões de uso da água e distribuições de vazão, sob pena de estar calibrado só aparentemente, para algumas situações, apresentando grandes erros de fato.

A fim de aumentar a confiabilidade nos modelos de rede de água e eliminar a necessidade de métodos de calibração por tentativas, Ormsbee e Wood propõem, em 1986, um algoritmo para calibração explícita. É formulado em termos de coeficientes de perda de carga e desenvolvido pela reformulação das equações básicas da rede. Essas são resolvidas explicitamente por ajustes de perda de carga para satisfazer uma ou mais condições de medição de pressão ou vazão para determinadas situações de carga e operação da rede. Os ajustes determinados por essa maneira são utilizados para revisar a rugosidade dos tubos ou perdas de carga localizadas definidas.

Segundo Sharp e Walski (1988), o conhecimento da rugosidade dos condutos de água em uso é um fator crítico nos cálculos para dimensionamento de tubulações, e há vários modos de obter tal informação. O primeiro é usar os valores da literatura tradicional, porém é sabido que esses valores variam bastante de sistema para sistema. Um segundo método é determinar a rugosidade existente em tubulações já instaladas, calculando valores de rugosidade que façam um modelo computacional de rede de água apresentar-se calibrado, sob uma grande faixa de condições. O terceiro método consiste em medir em campo a rugosidade real dos tubos através de testes de perda de carga. Esse método é bastante dispendioso, porém é o que fornece resultados mais confiáveis. Todavia, segundo os autores, nenhum desses métodos para determinação do

coeficiente de rugosidade provê uma maneira de extrapolar para o futuro a rugosidade das tubulações.

Em sua tese de doutorado, García-Serra (1988) faz um trabalho bastante abrangente, onde apresenta várias técnicas e variações para calibração de modelos matemáticos de distribuição de água e cita outras tantas, propostas por outros autores, dividindo-as em determinísticas e não-determinísticas. Primeiramente, aborda as técnicas de precalibrado, que são métodos mais simples, proporcionando um ajuste não tão preciso do modelo. Discorre, ainda nessa fase, sobre técnicas matemáticas de minimização sem utilização de derivadas, que são muito úteis ante a dificuldade de seu cálculo para certas funções objetivo. Posteriormente, trata das técnicas de ajuste (calibração) mais refinadas, as quais são apoiadas em base analítica importante, fundamentada na própria formulação do sistema de equações que definem o comportamento da rede, ou em técnicas de análise de sensibilidade que permitem determinar a variação de certa grandeza ao modificar parâmetros de ajuste. Cita que muitos casos são resolvidos aplicando-se, inicialmente, alguma técnica de precalibrado, e à seguir refina-se o resultado com alguma técnica mais apurada.

Bhave (1988) desenvolve uma técnica simples e iterativa de calibração baseada nos métodos propostos por Walski, com a diferença de que ele assume que a vazão na fonte possa ser medida ou determinada com precisão, e conserva-se fixa durante o processo de calibração, enquanto Walski admite-a como variável. Bhave utiliza como dados as cargas e suprimentos nos NÓS fonte e somente cargas nos NÓS de demanda. A técnica pode ser usada quando as cargas são medidas em um ou mais NÓS de demanda, sob:

- uma condição particular de carga;
- condição de vazão normal e de vazão de incêndio (vazão alta);
- diversas condições de carga.

Quando a carga é medida em somente um NÓ de demanda, em uma rede com fonte única, sob uma única condição de carga, tendo somente uma equação adicional disponível, a técnica é usada para ajustar todos os coeficientes de resistência através de um fator de ajuste

global. Quando mais medições de pressão forem disponibilizadas, a técnica passa a ser usada para ajustar os coeficientes de resistência e demandas nodais.

Em 1989, através de um algoritmo de otimização não-linear, Ormsbee apresenta um modelo matemático implícito para uso na calibração de modelos de redes hidráulicas. A principal vantagem da técnica proposta é que são contempladas tanto situações de carga em regime permanente quanto em período extensivo. Isso permite ao usuário uma base bastante consistente para avaliar os parâmetros antes de aplicados ao modelo da rede. No exemplo do autor, os melhores resultados foram obtidos através de um processo de calibração em duas fases. Na primeira, os valores de rugosidade de tubos são calibrados tendo por base as condições de carga do regime permanente (alta perda de carga), enquanto que na segunda fase, a distribuição de demandas é calibrada com as condições de carga do período extensivo (baixa perda de carga).

Segundo Walski (1990), o problema de muitas das técnicas até então desenvolvidas é basearem-se em suposições que todos os erros em modelos não calibrados eram resultantes de imprecisões nos coeficientes de rugosidade ou possibilidades de uso da água. Dessa maneira, erros provenientes de falhas na representatividade da rede real no modelo teórico eram erroneamente atribuídos a outros motivos.

Boulos e Wood (1990) desenvolvem uma forma eficiente de se determinar explicitamente uma variedade de parâmetros de projeto, operação e calibração de redes hidráulicas. A técnica requer uma relação unívoca entre a seleção de parâmetros para avaliação e as restrições de especificação para pressão e vazão. Entretanto, através do uso de fatores globais e agrupamento de parâmetros, pode ser obtida razoável flexibilidade na escolha das variáveis de decisão. Para muitas situações, o método elimina a necessidade de convencionais procedimentos por tentativas ou de aplicação de métodos tradicionais de programação linear e não-linear. Proporciona, ainda, uma técnica eficiente para aprimorar a modelagem em tempo real, que requer cálculo rápido e confiável dos muitos parâmetros envolvidos.

Lansey e Basnet (1991) apresentam um algoritmo robusto de programação não-linear, que auxilia na estimação dos parâmetros de entrada para um modelo de redes. A filosofia do

método é minimizar a diferença entre os dados observados e aqueles computados pelo simulador, através de um esquema de otimização. O problema tem seu tamanho e dificuldade reduzidos através do uso do modelo de simulação, para eliminar uma grande faixa de restrições, e os gradientes necessários para o modelo de otimização são eficientemente computados resolvendo-se séries de equações lineares.

A função objetivo proposta por eles relaciona valores observados e calculados de pressões nodais, vazões nos tubos e níveis de reservatórios, sendo possível incluir no modelo valores limites de cargas nodais para os NÓS em que os dados de pressão possam não ser suficientes para assegurar uma relativa precisão dos dados computados. Se forem considerados vários padrões de demanda, a inclusão de limites no modelo passa a ser desnecessária, e é também possível incluir esses limites nos parâmetros do sistema e adicionar algumas avaliações e raciocínios lógicos, por exemplo, impor que as rugosidades para tubos velhos sejam maiores que para os novos. Os autores chamam a atenção para que mesmo um estável algoritmo de calibração não é suficiente para suprir a ausência de bons e suficientes dados de valores medidos. Lansey e Basnet (1991, p.127,131) fazem um interessante retrospecto do estado da arte da calibração de modelos até aqui. Vale a pena citá-lo: (tradução nossa)

Walski (1983) sugere substituir grupos de tubulação por tubulações equivalentes e determinar os coeficientes de rugosidade usando equações analíticas para condições de demandas isoladas. Quando o número de parâmetros desconhecidos iguala-se ao número de NÓS ou tubos, para padrão único de demanda, é possível reempregar as equações da continuidade e energia a fim de considerar os parâmetros como incógnitas, podendo ser resolvidas de maneira iterativa (DONACHIE, 1974; RAHAL et al., 1980; GOFMAN; RODEH, 1981; ORMSBEE; WOOD, 1986). Shamir (1974) apresenta um método para calibração de rede usando um algoritmo de otimização capaz de analisar padrões isolados de demanda. Mais tarde, Coulbeck (1985) lineariza as equações da rede e realiza procedimento de otimização para condições isoladas de carga. Finalmente, Ormsbee (1988) combina um modelo de simulação e o método complexo modificado de busca direta a fim de poder considerar séries de cargas independentes ou simulações em período extensivo. [...] Ele e outros (GILL; MURRAY; WRIGHT, 1981) notaram a preferência de se usar uma técnica de solução de problemas não lineares baseada na direção gradiente, isso se os gradientes puderem ser obtidos. Já que as cargas de pressão e níveis de reservatório são variáveis implícitas, os gradientes da função objetivo relativos às variáveis de estado não podem ser computados diretamente. Apesar de contínuas, não podem ser conhecidas na forma integral. As derivadas são, então, computadas através de um esquema de diferenças finitas, todavia, esse processo apresenta um grande consumo de tempo. Uma alternativa é usar as equações dos gradientes reduzidos para computar os gradientes analiticamente, de maneira eficiente (LASDON; MANTELL, 1978; LANSEY, 1987).

Ligget (1993) e Luvizotto Jr. (1998) apresentam métodos inversos para calcular fugas em sistemas de abastecimento de água, tanto para regime permanente quanto para transitório. Os métodos inversos também são os requeridos para a calibração de modelos. Consistem em problemas onde os dados de saída (por exemplo, pressões) são conhecidos através de medição de campo, e são então determinados dados do sistema (p.e., distribuição de vazão, rugosidade dos tubos). Em geral, o método inverso atua juntamente com um simulador (direto) e um otimizador. São adotadas as equações da continuidade e da energia, no caso de regime permanente, e no caso de regime variável, a equação do transitório é resolvida pelo método das características, a fim de compor o simulador. O otimizador é dado pelo método de Levenberg-Marquardt (1986). Ligget cita que, em muitos desses casos, pode-se chegar a resultados errados, visto que muitos buscadores de mínimo (otimizadores) são capazes de encontrar somente pontos de mínimos locais ao invés de mínimos globais.

Ferreri et al. (1994) propõem um método para avaliar coeficientes de rugosidade de tubos, usando medidas de pressão e de vazão em pontos selecionados da rede. O método é baseado no sistema de equações da continuidade e energia, para regime permanente. Tal sistema, que é não-linear, é resolvido com o uso do método de Newton-Raphson, e os pontos de medição são escolhidos pela análise da matriz de sensibilidade, a ser abordada mais adiante.

Ligget e Chen (1994), Nash e Karney (1999), e Araújo e Chaudhry (2001) trabalham com o método transiente inverso aplicado à calibração de sistemas. O método apresenta a vantagem de, a partir de um único ponto de monitoramento, produzir vários valores de pressão no tempo, requerendo, assim, um menor número de estações de monitoramento, para um mesmo número de informações. Nash e Karney criam uma situação transitória de escoamento em um sistema hidráulico, através do fechamento de uma válvula, obtendo um série de pressões utilizadas para calibrar os fatores de atrito das tubulações. São discutidos a sensibilidade dos resultados da calibração em função da quantidade de dados incluídos na análise, a estimativa inicial do fator de atrito dos tubos, e as diferenças entre valores medidos e modelados. Atribuem os erros introduzidos na análise ao processo de modelagem e aos dados imperfeitos, concluindo que não necessariamente todos os dados disponíveis devam ser incluídos no processo de calibração, mas somente os necessários, sob pena de o processo se verificar ineficiente.

Ormsbee e Lingireddy (1997) apresentam uma descrição bastante detalhada sobre as técnicas de calibração disponíveis: equações analíticas, modelos de simulação e métodos de otimização. Segundo eles:

a) Técnicas baseadas em equações analíticas (“tentativa e erro”) geralmente requerem significativas simplificações da rede através da “esqueletização” e do uso de condutos equivalentes. Dessa forma, as técnicas podem fornecer resultados somente aproximados. De forma contrária, técnicas de simulação e otimização têm a vantagem de utilizar um modelo completo e, por isso, melhores resultados são esperados.

b) Técnicas de simulação (“modelos explícitos”) são baseadas na idéia de determinar um ou mais fatores de calibração adicionando uma ou mais equações da rede. As equações adicionais são utilizadas para definir uma condição de contorno adicional (como a carga em uma saída de hidrante). Acrescentando uma equação extra, o pesquisador pode determinar explicitamente uma incógnita adicional. A principal desvantagem das técnicas de simulação é que elas podem manipular somente um conjunto de condições de contorno por vez. Por exemplo, aplicando uma técnica de simulação a um sistema com três diferentes conjuntos de observação (todos obtidos sob diferentes condições de contorno: níveis de reservatório, situação de bombas, etc.) são obtidos três resultados distintos. Tentativas de obter um resultado único da calibração exigirão a aplicação de uma das estratégias: o método seqüencial ou o método da média. No método seqüencial, o sistema é subdividido em tantas zonas quanto for o número de conjuntos de condições de contorno. Nesse caso, o primeiro conjunto de observações é utilizado para obter os fatores de calibração para a primeira zona. Esses fatores são então mantidos fixos e um outro conjunto de fatores é determinado para a segunda zona, e assim por diante. No método da média, os fatores de calibração finais são obtidos pela média dos fatores de calibração de aplicações individuais.

c) As principais alternativas às técnicas de simulação são as técnicas de otimização (“modelos implícitos”). Nessas, o problema da calibração é formulado como um problema de otimização não-linear, consistindo de função objetivo não-linear, sujeita a restrições de igualdade e desigualdade lineares ou não. É relativamente recente a investigação do uso de algoritmos genéticos para resolver problemas complexos de otimização não-linear. Segundo os autores, a otimização via algoritmos genéticos apresenta uma vantagem significativa em relação a outros métodos tradicionais, na medida em que tenta obter uma solução ótima enquanto continua a

avaliar simultaneamente os vários vetores solução. Além disso, as técnicas de otimização por algoritmos genéticos não necessitam de informações gradientes, e empregam regras de transição probabilísticas, e não determinísticas, o que garante uma metodologia de solução mais robusta.

Segundo Bush e Uber (1998), tem sido comum a combinação de medidas de pressão e vazão na calibração de modelos hidráulicos de redes. Com o advento dos modelos de qualidade da água, os estudos com traçadores têm indicado uma nova forma de calibração daqueles modelos. Os autores fornecem um avanço em como maximizar a confiabilidade nos valores dos parâmetros estimados, dado um certo nível de práticas de amostragem. Para tal, lançam mão de idéias estabelecidas na estimativa de parâmetros e na teoria de planos de amostragem, e propõem métodos gerais baseados em sensibilidade para avaliar tipos de medida e seu posicionamento. Tais métodos não fornecem resultados otimizados, porém são práticos, e podem ser aplicados para seleção de bons tipos de traçador e locais de tomada de pressão, tendo a vantagem de, embora aproximados, não serem métodos puramente estatísticos, nos quais existe uma deficiência de base física.

Ainda conforme eles, os métodos de planos de amostragem são propostos e comparados para calibrar os coeficientes de rugosidade de modelos hidráulicos e de qualidade de água em redes espacialmente distribuídas, comumente usados para prever a dinâmica da velocidade do fluido e o transporte químico em redes de distribuição. Esses métodos de amostragem geram esquemas que podem incluir somente medidas de pressão, somente medidas de concentração do traçador ou uma combinação entre elas. Atentam para que, intuitivamente, pode-se notar que a localização dos pontos de medição é uma variável da amostragem que afeta a precisão da calibração, e os métodos de amostragem auxiliam a identificar bons locais para cada tipo de medição, assumindo amostragem contínua no tempo. Com o uso de tais métodos, os autores constataram que, quando adotadas ambas as medidas de pressão e traçador, os parâmetros estimados têm o dobro do grau de confiabilidade em relação àqueles estimados com um só tipo de medida. Uma discussão completa de estimação de parâmetros e teoria dos planos de amostragem é feita por Bush (1995).

Loaiciga et al. (apud BUSH; UBER, 1998) relatam, em 1992, que um plano de amostragem pode se destinar a vários fins: monitoramento ambiental, detecção, tendência e pesquisa. Por exemplo, em sistemas de água subterrânea, conforme Knopman e Voss (1987), o comportamento do coeficientes de sensibilidade e suas implicações para estimativa de parâmetros formou a base dos planos de amostragem para a caracterização de aquíferos.

Bush e Uber ressaltam que Walski forneceu importante conhecimento prático e experiência ao tema da calibração de redes, enquanto outros autores adotaram esquemas mais teóricos, tendo sido consideradas técnicas explícitas (Ormsbee e Wood, 1986; Boulos e Wood, 1990, 1991) e implícitas (Lansey e Basnet, 1991; Ormsbee, 1989; Ligget e Chen, 1994). Citam que Kennedy et al. (1991) reportou simples e eficiente procedimento para calibração, baseado em modelos de qualidade d'água, os quais têm sido investigados desde a década de 1980 (Grayman et al., 1988; Males et al., 1988; Clark et al., 1991, 1993; Rossman e Boulos, 1993; Rossman et al., 1994).

Segundo Solomatine (1998), muitas questões relacionadas a recursos hídricos requerem soluções por técnicas de otimização: otimização de reservatórios, problemas de alocação ideal de recursos e planejamento, calibração de modelos, e muitos outros. Tradicionalmente, os problemas de otimização vêm sendo resolvidos utilizando-se técnicas de otimização linear e não-linear, onde é normalmente admitido que a função objetivo a ser minimizada é conhecida analiticamente e possui um único ponto de mínimo. Todavia, na prática há muitos problemas que não podem ser descritos na forma analítica, e muitas das funções objetivo possuem vários pontos extremos (máximos e mínimos). Nesses casos é necessário recorrer a problemas de otimização multi-extremo (global), onde os métodos tradicionais de otimização não são aplicáveis, devendo ser investigadas outras soluções. Um desses problemas típico é o da calibração automática de modelos, ou identificação de parâmetros. Uma das tentativas para resolver tais problemas, que tem ficado bastante popular recentemente, é o uso dos algoritmos genéticos (Goldberg, 1989; Michalewicz, 1996). Um número considerável de publicações relacionadas a recursos hídricos aborda seu uso (Wang, 1991; Babovic et al., 1994; Cieniawski, 1995; Dandy et al., 1996; Savic e Walters, 1997; Franchini e Galeati, 1997; Reis et al., 1997; dentre outros).

Em 1998, Solomatine apresenta um algoritmo (ACD) de pesquisa aleatória, que combina o ACCO com o “dowhill simplex descents” de Nelder-Mead (1965). Ele cita Torn e Zilinskas (1989) e Pintér (1995), que fornecem uma cobertura bastante abrangente dos vários métodos, onde é possível distinguir diversos grupos. Com relação aos algoritmos evolutivos, afirma que, historicamente, têm se desenvolvido em três variações: estratégias evolutivas, programação evolutiva e algoritmos genéticos. Back e Schwefel (1993) dão um panorama geral dessas técnicas, que diferem principalmente em tipos de mutação, recombinação e operadores de seleção.

Solomatine apresenta uma série de problemas onde algoritmos globais foram usados:

- funções tradicionais usadas em otimização global, com ótimos globais conhecidos (Dixon e Szegő, 1978; Duan et al., 1993; Solomatine, 1995);
- calibração de modelo hidrológico (Solomatine, 1995);
- calibração de modelo hidrodinâmico com superfície livre, em 2-D (Constantinescu, 1996);
- calibração de modelo de distribuição de água subterrânea (Solomatine et al., 1998);
- calibração de modelo de crescimento ecológico;
- calibração de modelo de espelho eletrostático (Vdovine et al., 1995);
- solução de problema de programação dinâmica para otimização de reservatório (Lee, 1997);
- otimização de rede de água (Abebe e Solomatine, 1998).

O autor relata que a escolha entre os vários métodos de otimização global pode depender do tipo de problema, e são necessárias mais pesquisas a fim de se comparar tais técnicas, como a do “simulated annealing”, estratégias evolutivas, acoplamento topológico a vários níveis, evolução simplex e outros (Ali e Storey, 1994; Locatelli e Schoen, 1996; Neumaier, 1998; Duan, 1993; Kuczera, 1997). Aponta que os melhores resultados devem ser obtidos por adaptação estrutural, ou seja, alternando diferentes algoritmos durante o processo de busca.

Greco e Del Giudice (1999) afirmam que o principal problema em calibração de modelos é o grande número de parâmetros a calibrar partindo-se de poucas medições (problema inverso do controle de redes). A fim de contorná-lo, os referidos pesquisadores apresentam um procedimento que combina um algoritmo de otimização não-linear com um simulador de redes. A rugosidade dos tubos é continuamente ajustada até que os resultados da simulação sejam condizentes com os dados observados em campo. O processo funciona através de uma série de restrições obtidas da matriz de sensibilidade, e trabalha com diversas condições de carga, além de poder adotar diferentes equações de resistência ao escoamento.

O problema de otimização não é simples de se resolver porque ambas função objetivo e restrições são não-lineares. Além disso, as variáveis de decisão, relacionadas às restrições, não são facilmente explicitáveis. Greco e Del Giudice, a fim de aumentar o número de dados de medição disponível, adotam uma técnica já utilizada por Ormsbee (1989), e Lansey e Basnet (1991), que consiste em alterar as condições de operação, por exemplo, variando as demandas ou a posição dos consumidores, a fim de produzir dados de medição adicionais. É claro que todas as novas informações estarão parcialmente correlacionadas com as já existentes.

Os autores citam que os avanços mais promissores para a calibração parecem ser baseados em técnicas de otimização, como os de Shamir (1974) e Ormsbee (1989), e atentam para que o processo de calibração não seja tratado como uma “caixa preta”. Ressaltam que o conhecimento das regras de engenharia com relação à adoção de rugosidade dos tubos desempenha importante papel no processo de calibração. Greco e Del Giudice relatam que alguns métodos não levam em consideração os valores iniciais de rugosidade, que geralmente são estimativas bastante razoáveis, extraídas das tabelas dos manuais, e que essa estimativa inicial é tipicamente (e curiosamente) deixada de lado quando da resolução de problemas de calibração, justamente os quais penam pela escassez de dados disponíveis.

Meier e Barkdoll (2000) fazem um retrospecto das técnicas de calibração, indicando que, inicialmente, essas eram feitas por tentativas. O processo não era exato e havia dificuldades em se obter bons resultados. Através de certas simplificações, vários modelos automáticos foram desenvolvidos, e mais recentemente, os métodos de otimização vêm sendo utilizados. Em seu

artigo, os pesquisadores empregam o algoritmo genético, a fim de otimizar os perfis amostrais a serem utilizados na calibração de um modelo de distribuição de água, em uma pequena cidade. O modelo comportou-se extremamente bem, fornecendo as soluções ótimas, confirmadas em testes de validação.

Gambale (2000), em sua dissertação de mestrado, faz um retrospecto dos modelos de simulação e dos métodos clássicos de otimização: programação linear, programação dinâmica e programação não linear. Apresenta uma ampla abordagem a respeito do algoritmo genético, e sua aplicação na calibração de redes de água, e comenta sobre uma série de técnicas presentes na literatura.

Luvizotto Jr. et al. (2000) apresentam um trabalho comparativo entre quatro otimizadores, o qual será descrito em maiores detalhes em capítulo adiante.

Riguetto (2001) apresenta um modelo hidráulico acoplado a um modelo de otimização, baseado nos algoritmos genéticos, a fim de calibrar valores de vazões nos NÓS e trechos, e rugosidade de tubos, obtendo bons resultados. Apesar de não ter adotado critérios aparentes para escolha dos NÓS e trechos a monitorar, aponta que a identificação correta dessas estações de monitoramento é a chave para a obtenção de bons resultados com o modelo de calibração. Cita que, para redes com centenas de NÓS e trechos, é preciso selecionar os mais importantes, priorizando os NÓS de periferia e distantes dos pontos de alimentação, e os trechos mais importantes, considerando o grau de dependência das demandas nodais em relação a cada trecho da rede.

Lansey et al. (2001) propõem um método heurístico para estudar as incertezas causadas pelos desvios nos processos de medição e estimação, durante a calibração de uma rede de distribuição de água. Além disso, o método se presta para identificar condições favoráveis para a obtenção de dados monitorados. O procedimento considera três componentes do processo de modelagem: estimação de parâmetros, avaliação da calibração e sistematização da coleta de dados. Utilizam a matriz de covariância das cargas nodais calculadas para verificar a qualidade da calibração.

Silva et al. (2001) citam o método apresentado por De Schaetzen et al. (2000), e aplica-o na determinação de pontos de monitoramento, destinados à calibração de redes de distribuição de água. O problema apresentado configura-se na otimização de uma função de aptidão, composta pelos critérios de sensibilidade e entropia máxima, sendo o otimizador baseado nos algoritmos genéticos.

Fazem o interessante comentário de que os métodos baseados em matrizes de sensibilidade aplicados à calibração de redes dependem de uma razoável estimativa dos valores de rugosidade dos trechos e citam que, na prática, as rugosidades estimadas podem ser bastante diversas das reais, devendo o método ser aplicado a uma faixa de valores de coeficientes de rugosidade (e não só a um), a fim de se obter maior confiabilidade na identificação das estações de monitoramento.

Olsthoorn, Poeter e Moorman (2002), em análise de modelos de água subterrânea, aponta que modelos calibrados por métodos de tentativa e erro não revelam problemas inerentes, e que podem se dar por completados sem dados suficientes. A fim de exemplificar, utilizam um aquífero de 400 Km², anteriormente calibrado por tentativa e erro, calibrado então por modelo automatizado. Citam duas importantes ferramentas de calibração automática, de domínio público: PEST e UCODE, e recomendam firmemente a análise de dados estatísticos, a fim de que a confiabilidade do modelo seja incrementada.

Silva (2003), em sua tese de doutorado, cita uma série de outros autores que lidam com a questão de calibração de redes: Yu e Powell (1994), Reedy et al. (1996), Vitkovsky e Simpson (1997), Todini (1999), Cheung (2001), Kapelan et al. (2002), dentre outros.

A revisão mais específica sobre o “time marching approach” e algoritmos de busca está apresentada dentro do próximo capítulo, como aspecto de fundamentação para sua aplicação conjunta.

4 NOVA PROPOSIÇÃO: ACOPLAMENTO DO TMA E NELDER-MEAD

4.1 Modelo hidráulico TMA

As equações gerais que regem o escoamento líquido em condutos forçados são equações diferenciais parciais hiperbólicas, sem solução analítica, que sejam respectivamente, a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f Q |Q|}{2 D A} = 0 \quad (4.2)$$

onde H é a carga hidráulica, t é o tempo, a é a celeridade, g é a aceleração da gravidade, A é a área da seção transversal do tubo, Q é a vazão, x é o espaço, f é o fator de atrito, e D é o diâmetro do tubo.

Segundo Chaudhry (apud LUVIZOTTO Jr., 1999) várias técnicas numéricas e gráficas de solução para este sistema de equações já foram propostas, sendo o método das características a técnica mais empregada, por uma série de vantagens.

A abordagem elástica é tradicional na análise de regimes transitórios, entretanto, devido ao caráter geral de suas equações, permite também a análise de escoamentos em regime permanente.

O TMA (time marching approach) é uma técnica de determinação do regime permanente real como resultado de uma situação transitória hipotética, criada pelo modelador. A técnica foi bastante explorada por Shimada (1988) e Luvizotto Jr. (1995), dentre outros, o qual cita ser fato que a convergência para o regime permanente através do transitório pode ser bastante lenta, o que tem motivado alguns pesquisadores a buscarem procedimentos para acelerá-la. Shimada aponta que, embora necessitando de maior esforço computacional que os métodos mais diretos, o TMA é, por vezes, preferido por realizar análise em regime permanente ou transiente da mesma forma e por ser capaz de produzir diferentes regimes permanentes unicamente alterando as condições de contorno. Já Luvizotto Jr. (1995) apresenta aplicações do método também para período extensivo, e aponta que a principal vantagem em relação a outros métodos de cálculo de redes, como o da teoria linear e o de Newton-Raphson, é a sua “convergência física”, ao acompanhar a evolução transitória, em detrimento ao processo iterativo numérico dos outros métodos, sem contar o fato desses serem matriciais, resultando numa seqüência de soluções de sistemas de equações, que possuem particularidades para resolução que devam sempre ser observadas. Outra vantagem do TMA é que o método pode ser aplicado também a situações de regime não-permanente, visto que as equações componentes são as do transitório hidráulico.

Nas redes hidráulicas, a transmissão de informação em um ENO (elemento) tubo é obtida pela mudança da carga (H) e da vazão (Q) em cada ponto P, ao longo de seu comprimento, que se processam a cada instante t (figura 4.1). Esta transmissão mobiliza a característica de inércia, resistência e elasticidade, do fluido em escoamento e da própria tubulação, de tal forma que as informações transmitidas a posição P, a cada instante, podem ser obtidas dos valores de carga e vazão nas posições A e B, num instante anterior, de acordo com o método das características.

$$H_P = H_A - B'(Q_P - Q_A) + RQ_P|Q_A| \quad (4.3)$$

$$H_P = H_B + B'(Q_P - Q_B) + RQ_P|Q_B| \quad (4.4)$$

onde B' é o termo de impedância e R a resistência da tubulação

$$B' = \frac{a}{gA} \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (4.5; 4.6)$$

e, retomando, a é a celeridade, que é a velocidade com que a perturbação hidrodinâmica é transmitida, D é o diâmetro do tubo, A é a área da seção transversal da tubulação, f é o fator de atrito da fórmula Universal de perda de carga distribuída (estas grandezas juntas representam as propriedades das tubulações) e g a aceleração da gravidade. A decodificação das informações enviadas por A (equação 4.3) e por B (equação 4.4) é feita no ponto P no instante $t+\Delta t$, na forma de (Q_P):

$$Q_P = (C_A - C_B) / (B'_A + B'_B) \quad (4.7)$$

onde B'_A , B'_B , C_A , C_B representam os valores:

$$B'_A = (B' - R|Q_A|) \quad (4.8)$$

$$B'_B = (B' + R|Q_B|) \quad (4.9)$$

$$C_A = (H_A + B'Q_A) \quad (4.10)$$

$$C_B = (H_B - B'Q_B) \quad (4.11)$$

As informações assim propagadas de um instante para outro passam das extremidades dos tubos para os NÓS, genericamente representado na figura 4.2, em que TC é o número de tubos que “convergem” para o NÓ e TD é o número de tubos que divergem do NÓ. Pode-se considerar que a um dado NÓ seja possível estar vinculado uma demanda $D(t)$ e uma vazão Q_{PE} de um ENO não tubo, associado a esse NÓ.

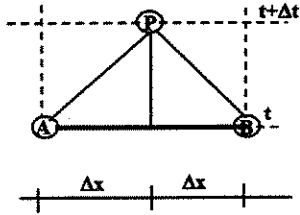


Figura 4.1 – Malha de cálculo

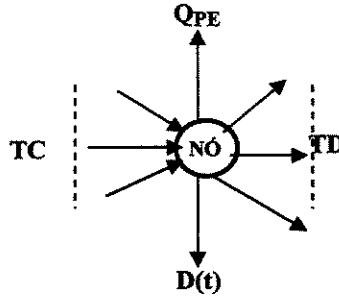


Figura 4.2 – NÓ genérico



Figura 4.3 – ENO genérico

Da condição de continuidade no NÓ pode-se chegar, após uma série de manipulações, à equação denominada equação do NÓ:

$$\boxed{Q_{PE} = E_N - B'_N H_P} \quad (4.12)$$

onde E_N e B'_N totalizam as informações recebidas pelo NÓ, na forma

$$E_N = \sum_{j=1}^{TC} \frac{C_A(j)}{B'_A(j)} + \sum_{k=1}^{TD} \frac{C_B(k)}{B'_B(k)} + D(t) \quad (4.13)$$

$$B'_N = \sum_{j=1}^{TC} \frac{1}{B'_A(j)} + \sum_{k=1}^{TD} \frac{1}{B'_B(k)} \quad (4.14)$$

A demanda $D(t)$ é acrescentada em E_N como uma informação externa, que foi adicionada ao conjunto de informações internas recebidas pelo NÓ. A vazão Q_{PE} representa uma resposta do ENO não-tubo aos estímulos recebidos em seus NÓs de montante e de jusante, esta resposta irá depender das características funcionais deste elemento, genericamente esquematizado na figura 4.3. As informações recebidas dos NÓs podem ser escritas na forma dos parâmetros E_E e B'_E , que mobilizam a resposta do ENO não tubo na forma:

$$\boxed{H_{PE} = E_E - B'_E Q_{PE}} \quad (4.15)$$

onde,

$$E_E = \frac{E_{N1}}{B'_{N1}} - \frac{E_{N2}}{B'_{N2}} \quad \text{e} \quad B'_E = \frac{1}{B'_{N1}} - \frac{1}{B'_{N2}} \quad (4.16; 4.17)$$

e H_{PE} a diferença de carga entre os NÓs de montante e de jusante. Observando a equação (4.15) nota-se que a resposta aos estímulos que chegam ao NÓ devem ser combinadas as características funcionais do ENO não tubo para que se possa obter a resposta ao estímulo. Estas características podem ser expressas de forma genérica como:

$$H_{PE} = H_{P1} - H_{P2} = \varphi(Q_{PE}) \quad (4.18)$$

Desta forma pode-se dizer que as informações, traduzidos pela equação (4.14) em conjunto com a característica funcional, fornecerá a resposta

$$F(Q_{PE}) = \varphi(Q_{PE}) + B'_E Q_{PE} - E_E = 0 \quad (4.19)$$

Para um ENO não tubo genérico que não acumule massa, a equação particular, $\varphi(Q_{PE})$ é conhecida (normalmente como uma forma quadrática do tipo $H_{PE} = aQ_{PE}^2 + bQ_{PE} + c$) e pode ser substituída na equação (4.19) resultando em:

$$Q_{PE}|Q_{PE}| + FQ_{PE} + G = 0, \quad \text{com solução} \quad (4.20)$$

$$Q_{PE} = \frac{2G}{F + \sqrt{F^2 + 4|G|}} \quad (4.21)$$

onde os valores de F e G são determinados para cada instante de cálculo para cada um dos elementos segundo sua característica (coeficientes a , b e c). Esta resposta é passada ao sistema

através dos NÓs de montante e de jusante através da equação (4.11), que realimenta o processo cognitivo.

Quando a análise é focada na obtenção do regime permanente, no período extensivo ou no monitoramento de perdas, pode-se utilizar o fato de que a impedância $B=a/gA$, não tem significado físico e portanto pode se substituir a celeridade por $a = L/\Delta t$, em que L é o comprimento do tubo, desta forma a impedância é dada por:

$$B' = \frac{L}{gA \Delta t} \quad (4.22)$$

Segundo Shimada, 1992, para acelerar a convergência ao regime permanente, pode-se substituir os tubos da rede de comprimento L_i e coeficiente de atrito f_i , por tubos equivalentes com comprimentos comuns L_o e um correspondente coeficiente de atrito dado por:

$$f_i^* = \frac{f_i L_i}{L_o} \quad (4.23)$$

Construído a partir do emprego do TMA (time marching approach), para análise de sistemas de abastecimento, o simulador hidráulico utilizado no presente trabalho é o sistema SPERTS, desenvolvido por Luvizotto Jr. (1995).

4.2 Otimizador de Nelder-Mead

A fim de desenvolver um modelo de calibração, é interessante que seja acoplado ao simulador hidráulico um algoritmo de busca de pontos extremos de funções, com o objetivo de garantir o processo de convergência do modelo hidráulico para a realidade física. O resultado desse acoplamento é chamado de Modelo Híbrido. A equação a ser utilizada, conhecida por função objetivo ou função de mérito, trabalha com a diferença entre valores medidos e valores

simulados, diferença essa que deve ser minimizada para que se tenha os valores dados pelo modelo o mais próximo possível dos reais. O esquema apresenta-se da seguinte maneira:

$$\min \chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_i^* - V_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (4.24)$$

onde:

χ^2 – função objetivo

V_i^* – valor da grandeza medido;

V_i – valor da grandeza simulado;

N – número de pontos monitorado;

σ – desvio padrão

Taba (1997), citado por Luvizotto Jr. et al. (2000), sugere que, em teoria, o processo de busca pode ser tratado através de dois conjuntos de métodos distintos:

- Método de busca direta: só utilizam no processo de busca de valores da função objetivo. São empregados quando a função é descontínua e não diferenciável, quando as derivadas são difíceis de se calcular, ou para aproximações prévias.
- Métodos diferenciais: se utilizam do valor da função objetivo e de suas derivadas parciais, de primeira e segunda ordem, no processo de busca.

Wright (1996) cita que os métodos de busca direta foram sugeridos inicialmente na década de 50, e continuaram sendo propostos durante a década seguinte, em quantidade razoável. Tais métodos eram tipicamente apresentados e justificados mais pela intuição, baseada na geometria de baixa dimensão, do que propriamente pela teoria matemática. Assim, foi motivado

o aparecimento de novos algoritmos, na tentativa de superar certas ineficiências dos métodos anteriores.

Ela cita que o método de busca direta mais famoso, baseado em um simplex¹, foi proposto por Nelder e Mead, em artigo de 1965. O método de Nelder-Mead é baseado na criação de um simplex dinâmico, modificado continuamente por regras estabelecidas, a fim de que se adapte da melhor maneira à configuração local.

Conforme Nelder e Mead (1965), Spendley et al. (1962) foram introdutores de engenhosa idéia para busca de condições ótimas de operação avaliando-se os valores de saída de um sistema em uma série de pontos formando um simplex na região factível de pesquisa, e continuamente formando novos simplex, através da reflexão de um ponto no espaço das remanescentes. Essa idéia é claramente aplicável a problemas matemáticos de minimização de funções de várias variáveis. Todavia, pela concepção de Spendley et al., os passos a serem dados para a variação dos fatores em jogo eram já conhecidos e determinados, o que tornava a estratégia um pouco rígida para o uso em geral.

Já no método de Nelder-Mead, que leva o nome dos autores, o simplex adapta-se por si próprio à configuração local, alongando-se em regiões de pesquisa onde são formados longos planos inclinados, mudando de direção em regiões angulosas, e contraindo-se nas proximidades de um ponto de mínimo. Não há necessidade de se fazer suposições sobre a superfície de busca, exceto que ela seja contínua e tenha um único mínimo na área de pesquisa. Uma importante propriedade do método é que ele converge mesmo quando o simplex inicial encontra-se entre dois ou mais “vales” da direção de busca, propriedade que não é comum a alguns outros métodos. Ainda segundo Nelder e Mead, para funções com duas a dez variáveis de decisão, foi determinado que a relação entre o número de variáveis K e o número médio de avaliações N da função objetivo (adotando que a convergência final se dê com um valor aproximado de $2,5 \cdot 10^{-9}$) é descrita por:

$$N = 3,16 \cdot (K+1)^{2,1} \quad (4.27)$$

¹ Figura geométrica de N dimensões, consistindo de $N + 1$ vértices e de todos os segmentos de reta que os interconectam, as faces poligonais, etc., conhecido por poliedro convexo.

Em 1974, Phillips apresenta um método de otimização, composto por uma combinação de várias técnicas padronizadas, sendo uma delas a de Nelder-Mead.

Olsson e Nelson (1975) relatam que a revista *Technometrics* de maio de 1973 apresentava uma série de artigos onde se fazia uso de minimização de funções. Em alguns deles, uma ou mais modificações especiais tinham que ser feitas no procedimento padrão para resolver os diferentes problemas. Dada a sua experiência com o simplex de Nelder-Mead, resolveram aplicar o procedimento a seis dos problemas citados e publicar os resultados, devido à simplicidade de aplicação do método, precisão, e ausência de exigências especiais. Com isso, constata-se a capacidade do método em resolver uma variedade de problemas de otimização, sem a necessidade de transformações especiais para cada tipo de problema. Entretanto, chamam atenção para o fato de que quanto maior o problema, com mais número de restrições, menos recomendado é o procedimento de Nelder-Mead. Porém, para problemas usuais, com não mais de meia dúzia de parâmetros, o método tem um desempenho muito bom.

Akkit (1977), em um problema de ajuste de curva, sugere uma técnica simples para evitar que o procedimento de Nelder-Mead encontre falsos pontos de mínimo, possivelmente ocasionado, devido à lógica do processo, pela geração de novos vetores iguais aos descartados.

Barton e Ivey Jr. (1996) apontam ser o método de Nelder-Mead o mais popular método de busca direta, baseados nas aplicações publicadas até então. Naquele ano já havia mais de 2.000 citações do artigo original de Nelder e Mead, com cerca de 200 citações só em 1989. Segundo eles, o campo de aplicação é muito vasto: química analítica, biologia, neurologia, estatística, engenharia, controle de qualidade, gerenciamento da pesca e tecnologia de fusão. Citam que Fletcher (1987) considera a técnica de Nelder-Mead a de maior sucesso entre aquelas que simplesmente comparam valores de função, e afirmam que ainda pouca coisa é sabida sobre as propriedades de convergência do método em funções determinísticas e que não há provas da convergência das iterações (para um ponto qualquer, seja de ótimo ou não) quando minimizando o valor de uma função estocástica. Em algoritmos estocásticos, entretanto, a convergência para pontos de mínimo reais pode ser comprovada.

Ainda de acordo com Barton e Ivey Jr., os modelos de simulação estocásticos são cada vez mais importantes para o desenvolvimento de sistemas efetivos e reais rápidos e de baixo custo, e, dentro dessa linha, foram eles próprios os primeiros a apresentar a primeira análise formal do comportamento de Nelder-Mead em funções estocásticas, examinando e desenvolvendo modificações que fariam o procedimento mais eficiente nessas situações, principalmente quanto à “parada” do sistema antes do momento correto, já que o mesmo foi originalmente desenvolvido para funções determinísticas sem restrições. Relatam que o algoritmo de Nelder-Mead apresenta-se interessante para otimização da simulação devido a não ser sensível a pequenas imprecisões ou perturbações estocásticas no valor das funções. Isso acontece porque o método utiliza somente o ordenamento dos valores da função para determinar o passo seguinte, e não os valores em si. Conseqüentemente, pequenas perturbações que não alteram a ordem dos valores não terão efeito no algoritmo de busca da trajetória. Inversamente, perturbações aleatórias consideráveis, geradas por componentes estocásticos, alterarão o ordenamento dos valores da função no simplex, e afetarão a seleção das etapas subseqüentes, o que pode conduzir a resultados inadequados.

Tomick et al. (1995), com o conhecimento prévio do trabalho de Barton e Ivey Jr., que ainda não havia sido publicado definitivamente, oferecem contribuição àquele. Tratam de desenvolver um critério de seleção do tamanho da amostra para melhorar o desempenho do processo de Nelder-Mead para as funções mencionadas anteriormente, o que possibilitou reduzir o erro a menos de 20% do valor inicial, em todas as dezoito funções testadas.

Luvizotto Jr. (1998) utiliza o procedimento de Nelder-Mead para detecção de fugas em sistemas de distribuição de água, com resultados bastante expressivos, valendo-se do simulador hidráulico SPERTS, gerando um modelo híbrido. Rardin (apud LUVIZOTTO JÚNIOR, 1998) descreve o procedimento como a seguir:

Em uma otimização sobre N variáveis de decisão, o algoritmo de Nelder-Mead constrói e mantém um conjunto de N+1 vetores de variáveis de busca ordenados, $a^1, \dots, a^{N+1}$, com soluções distintas, $\chi^2(1), \dots, \chi^2(N+1)$, com $\chi^2(1)$ apresentando o melhor valor da função objetivo, $\chi^2(2)$ o segundo melhor valor e assim por diante. Cada iteração durante a pesquisa tenta substituir a solução mais inadequada $\chi^2(N+1)$, por uma melhor.

Figura 4.4 – Método de Nelder-Mead (1)

I - DIREÇÃO DE BUSCA

Na iteração t, o algoritmo de Nelder-Mead emprega a direção de pesquisa:

$$\Delta \mathbf{x} \cong \mathbf{x}^{(t)} - \mathbf{a}^{(N+1)} \quad (4.28)$$

que move a pior das soluções correntes, produzida por $\mathbf{a}^{(N+1)}$, em direção ao centróide das N melhores soluções, dado por:

$$\mathbf{x}^{(t)} \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{a}^{(i)} \quad (4.29)$$

A idéia é mover a pior solução do conjunto, para uma direção construída a partir das restantes.

Figura 4.5 – Método de Nelder-Mead (2)

II - LIMITAÇÃO DO TAMANHO DO PASSO

O algoritmo de Nelder-Mead explora novos conjuntos $\mathbf{x}^{(t)} + \lambda \Delta \mathbf{x}$, primeiro refletindo sobre o centróide, com $\lambda = 1$. Ao substituir-se o valor de $\mathbf{a}^{(N+1)}$, com o obtido através deste novo conjunto, se poderá obter um melhor ou pior conjunto, que será adotado no processo. Se o ponto de reflexão é o “novo melhor” vetor [$\chi^2(\mathbf{x}^{(t)}) > \chi^2(\mathbf{a}^{(1)})$], o algoritmo **expande** tentando $\lambda = 2$. Se o novo ponto for pior que o melhor ponto anterior, o procedimento **contraí**, tentando outro valor de λ , $\lambda = +1/2$ ou $\lambda = -1/2$.

Figura 4.6 – Método de Nelder-Mead (3)

III-ENCURTAMENTO

Quando a reflexão e a subsequente contração falham na melhora do conjunto de vetores do algoritmo de Nelder-Mead, aplica o procedimento de encurtamento de todo o conjunto de vetores através do vetor melhor adequado $\mathbf{a}^{(1)}$, onde:

$$\mathbf{a}^{(i)} \leftarrow \frac{1}{2} (\mathbf{a}^{(1)} + \mathbf{a}^{(i)}) \text{ para todo } i=2, \dots, n+1 \quad (4.30)$$

Figura 4.7 – Método de Nelder-Mead (4)

IV - CRITÉRIO DE PARADA

A pesquisa do procedimento de Nelder-Mead se encerra, quando os valores da função objetivo para o conjunto de pontos tornam-se essencialmente iguais. Esta condição pode ser estabelecida quando:

$$\sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^{N+1} [\chi^2(\mathbf{a}^{(i)}) - \chi^2(\mathbf{x}^{(i)})]^2} \leq \varepsilon \quad (4.31)$$

Figura 4.8 – Método de Nelder-Mead (5)

Com o esquema indicado se processa a convergência dos N+1 vetores de variáveis de busca para o ótimo, segundo o critério de parada estabelecido.

Em 1999, Yoon e Shoemaker comparam o desempenho de oito algoritmos, entre os quais o de Nelder-Mead, usados para identificar ações mais efetivas quanto à biorremediação de aquíferos subterrâneos contaminados.

4.3 O acoplamento do simulador TMA com o método de busca de Nelder-Mead

O acoplamento dos dois módulos, um caracterizado pelo simulador hidráulico, baseado no “Time Marching Approach” e o outro pelo método de busca sem derivadas de Nelder-Mead, como anteriormente descritos, é feito de forma direta sem maiores interferências nos códigos padrões individuais de cada modelo. São na realidade acrescentadas: uma rotina de leitura de dados de monitoramento e de tubos a serem calibrados, uma rotina com a função objetivo, e uma de interfaceamento que faz a chamada do simulador para cada opção de vetor de coeficientes de atrito, como será descrito.

O modelo do simulador lê os dados referentes à rede (dados de topologia) e os dados específicos de cada um dos elementos e NÓS, como seria feito para uma simulação hidráulica convencional em regime permanente. Neste ponto é acrescentada uma rotina de leitura adicional de informações para o procedimento de calibração. São lidos o número total de NÓS monitorados (NNMO), o número de cada NÓ monitorado (i) (NM(i)) e o valor da carga monitorada neste NÓ

(HM(i)). Além destas informações, a rotina de leitura deverá ler o número total de tubos a calibrar (NTTC), o número do tubo (j) a calibrar (NTC(i)) e um valor que servirá de “semente” (STC(j)) para gerar os vetores de coeficientes de rugosidade. Estes valores são utilizados na “criação” automática de estimativas iniciais utilizadas no procedimento de Nelder-Mead.

Com base nessas sementes são gerados pelo procedimento de Nelder-Mead (NTTC+1) vetores de (NTTC) valores, correspondente ao coeficiente de atrito de cada tubo a calibrar. Cabe lembrar que estes vetores são modificados durante o procedimento de busca de Nelder-Mead, resultando ao final em vetores idênticos com a suposta solução do problema.

Uma vez gerado os vetores iniciais, passa-se efetivamente a ao procedimento de ajuste destes vetores (calibração), onde o simulador é chamado para resolver o problema hidráulico utilizando os valores de cada vetor como um caso possível da solução. Após o processamento, o simulador retorna as cargas calculadas para os NÓs que estão sendo monitorados. Estas cargas nodais obtidas permitem a avaliação da função objetivo, descrita em termos da soma das diferenças quadráticas entre cargas monitoradas e calculadas, cujo mínimo é almejado.

As funções objetivo calculadas para cada um dos (NTTC+1) vetores são hierarquizadas, da melhor para pior solução, na seqüência do procedimento de Nelder-Mead. O vetor de coeficientes que levou a pior solução (maior valor da função objetivo) é substituído pelo procedimento de busca, como anteriormente descrito e, reavaliado em conjunto com os outros vetores, sendo assim, sucessivamente melhorados os piores vetores de coeficientes através do procedimento de Nelder-Mead, até que se atinja uma calibração dentro dos erros desejados.

O acoplamento descrito nos parágrafos anteriores pode ser sintetizado no fluxograma da Figura 4.9:

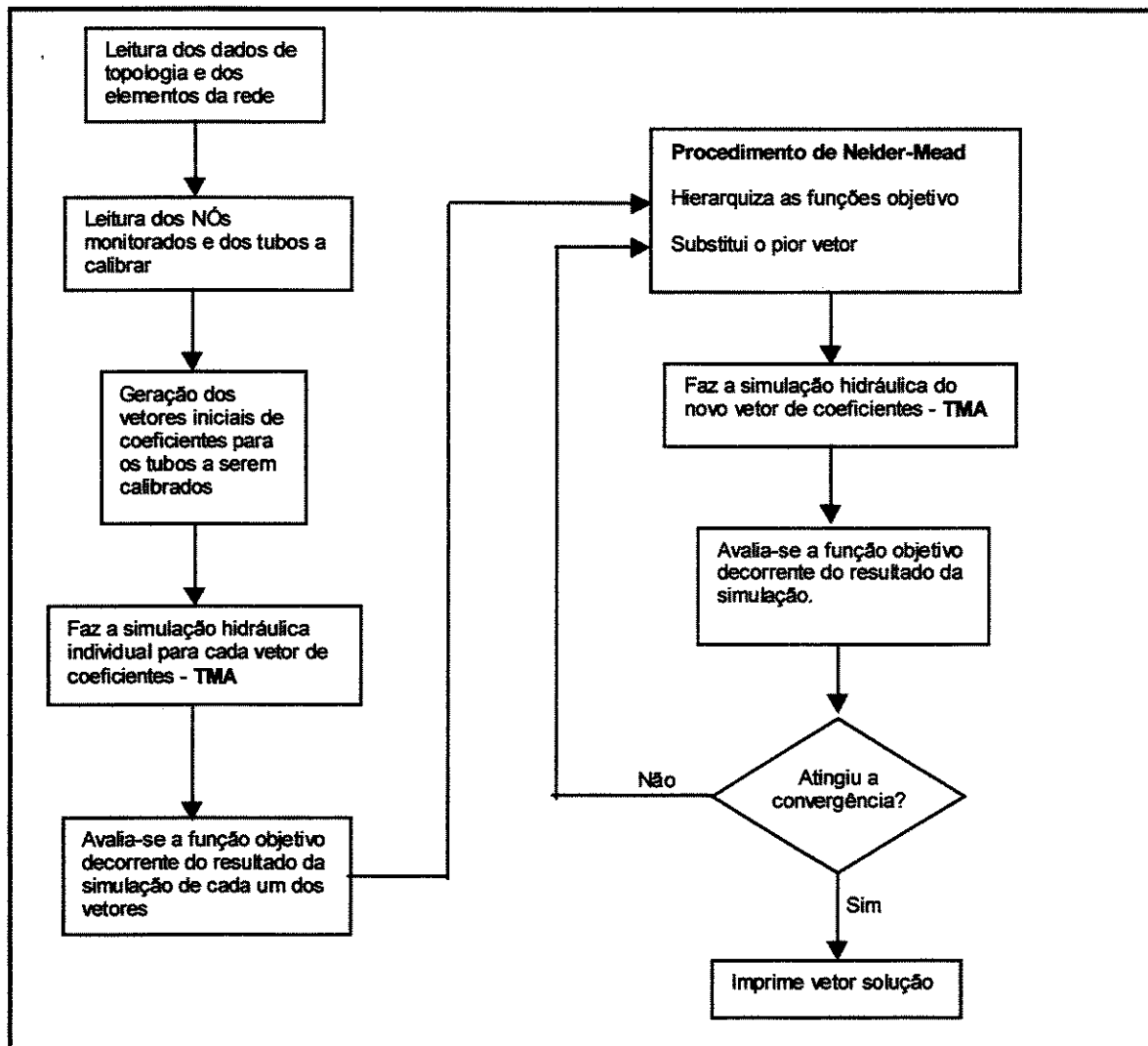


Figura 4.9 – Acoplamento do TMA com Nelder-Mead

4.4 Análise comparativa de desempenho

Em 2000, Luvizotto Jr. et al. apresentam um trabalho comparativo de quatro modelos híbridos, formados pelo acoplamento do TMA, operando através do SPERTS, com diferentes otimizadores, em um problema de detecção de fugas (que pode ser assimilada como uma calibração de vazões). Os algoritmos para otimização utilizados foram:

- Método Gradiente;
- Método de Levenberg-Marquardt;
- Método dos Algoritmos Genéticos;
- Método de Nelder-Mead.

Os dois primeiros utilizam processos derivativos, e os dois últimos, não. Os resultados dos quatro procedimentos de detecção estão apresentados na tabela seguinte. Dentro deste critério todos os métodos conseguiram detectar as fugas impostas. O tabela apresenta também o número de iterações necessárias para cada um dos procedimentos. Ainda que a função objetivo não seja explícita, nota-se uma convergência mais rápida dos métodos diferenciais, embora o método de busca gradiente, na forma proposta, tenha utilizado um número elevado de soluções do problema hidráulico, como decorrência do passo de busca aleatório. Dentre os métodos diretos, o método de Nelder-Mead mostrou-se mais eficiente para a solução do exemplo proposto que o método dos algoritmos genéticos, que se mostrou lento para uma aplicação em tempo real.

Tabela 4.1. Resultado do exemplo para os quatro métodos de busca

		GRADIENTE	LEVEMBERG-MARQUARDT	NELDER-MEAD	GENÉTICO
Iterações		19	2	45	158
Soluções da rede		1101	13	396	3160
Nº	Valor Real	Valores após a convergência indicada nos gráficos (em l/s)			
4	4,0	3,98	4,13	3,97	4,10
7	5,0	4,96	4,87	5,04	4,90
8	3,0	3,25	3,07	3,03	3,10
10	4,0	3,90	3,98	3,97	4,00

É, por fim, interessante notar ainda que há situações, como a proposta por Luvizotto Jr. e OCampos (2002), em que o algoritmo de Levenberg-Marquardt pode ter sérios problemas de convergência.

5 APLICAÇÃO

Foi desenvolvido um estudo de caso da aplicação do modelo híbrido, utilizando Nelder-Mead, para o mesmo sistema hipotético anteriormente utilizado para fugas, só que desta vez, para calibração dos coeficientes de rugosidade de tubulações. Os resultados foram satisfatórios, porém isso dependeu do número de pontos monitorados. Publicados como resultado parcial desta tese (PIZZO; LUVIZOTTO Jr., 2001), são apresentados a seguir:

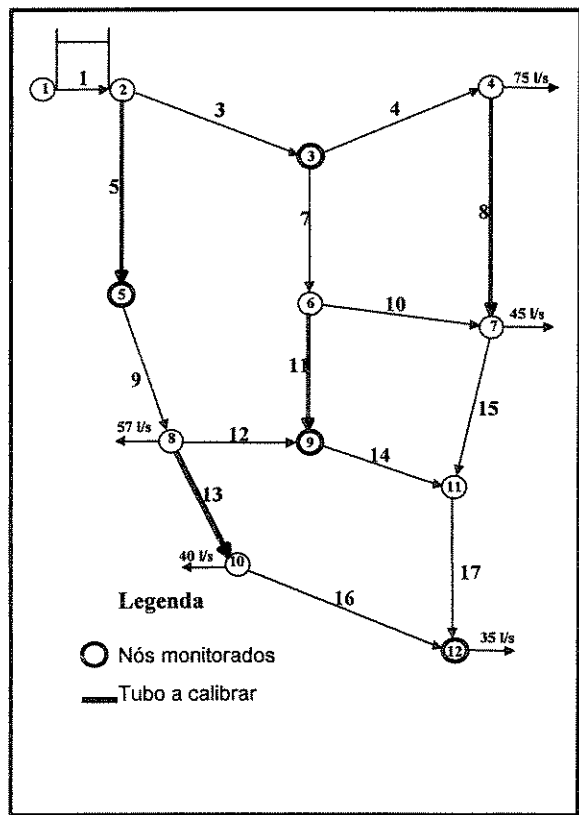


Figura 5.1 - Topologia e dados do exemplo

Tabela 5.1 -Tubulações					
ENO	N1	N2	L (m)	D (mm)	C
3	2	3	3000	500	100
4	3	4	1500	400	100
5	2	5	2500	400	100
7	3	6	1500	200	100
8	4	7	2200	300	90
9	5	8	1500	400	100
10	6	7	2200	500	100
11	6	9	2500	200	110
12	8	9	2700	200	100
13	8	10	2000	250	120
14	9	11	1700	200	100
15	7	11	1800	250	100
16	10	12	1000	200	100
17	11	12	1200	200	100

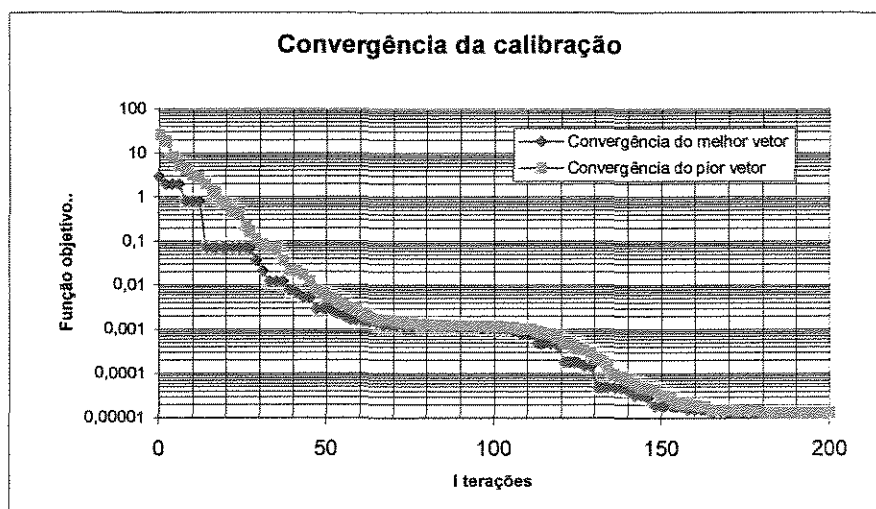
Tabela 5.2 - Reservatório			
ENO	N1	N2	NÍVEL (m)
1	1	2	100

Tabela 5.3- Cargas monitoradas (mca)	
NO	Carga
3	95,01
5	92,36
7	87,02
9	87,15
12	77,59

Tabela 5.4 – Resultados de calibração

SITUAÇÃO	NÓs UTILIZADOS	Coeficiente C			
		TUBOS			
		5	8	11	13
Valor correto	-	100	90	110	120
Calibração 1	3 – 5 – 7 – 9 – 12	100,0	89,9	111,1	120,1
Calibração 2	3 – 5 – 9 – 12	100,0	90,0	110,4	120,0
Calibração 3	3 – 5 – 12	100,1	88,1	118,7	120,3
Calibração 4	3 – 12	115,7	135,7	106,4	104,0

A Figura 5.2 ilustra o processo de caminhamento dos vetores para a solução ótima (mínimo da função objetivo), com a evolução do melhor e pior vetor de solução para a condição de calibração com todos os cinco NÓs monitorados. Cabe observar que os vetores que resultam nas melhores e piores situações se modificam ao longo do procedimento, alternando-se entre os cinco vetores levados simultaneamente durante o processo. Após a convergência, como seria de se esperar, não há diferenças significativas entre o pior e o melhor vetor contendo as soluções.

Figura 5.2 – Aspectos da convergência dos vetores de C

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam os valores das simulações iniciais da rede proposta, sendo que é a Figura 5.4 que contempla os valores de coeficientes de rugosidade reais. Assim sendo, é o valor das pressões obtidas na Figura 5.4 que é o admitido como correto, ou seja, o “monitorado” (na verdade, não houve monitoramento em campo). Esse método tem a vantagem

de permitir que se conheça os coeficientes de rugosidade reais (ou seja, aqueles empregados para a obtenção das pressões supostas reais).

Assim, quando da convergência entre pressões “monitoradas” e pressões calculadas, já na fase de calibração, pode-se verificar a concordância (ou não) entre valores de C supostamente reais e C utilizados para a convergência do processo.

Regime Permanente em redes de abastecimento de água

Copyright 1991-2000

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior

1. DADOS GERAIS DA REDE

Numero de Elementos	15
Numero de Tubos	14
Numero de Reservatorios	1
Numero de Estacoes de Bombas	0
Numero de Valvulas	0
Numero de Nos com demandas	5
Numero de Cotas fornecidas	6

2. DADOS DOS TUBOS

No.	No Montante	No Jusante	Comprimento (m)	Diametro (mm)	C ou e (# ou mm)	dk (#)
3	2	3	3000.00	0.500	100.0000	0.0
4	3	4	1500.00	0.400	100.0000	0.0
5	2	5	2500.00	0.400	100.0000	0.0
7	3	6	1500.00	0.200	100.0000	0.0
8	4	7	3700.00	0.400	100.0000	0.0
9	5	8	1500.00	0.400	100.0000	0.0
10	6	7	2200.00	0.300	100.0000	0.0
11	6	9	2500.00	0.200	100.0000	0.0
12	9	8	2700.00	0.200	100.0000	0.0
13	8	10	2000.00	0.250	100.0000	0.0
14	9	11	1700.00	0.200	100.0000	0.0
15	7	11	1800.00	0.250	100.0000	0.0
16	10	12	1000.00	0.200	100.0000	0.0
17	11	12	1200.00	0.200	100.0000	0.0

3. DADOS DOS RESERVATORIOS

No.	No Montante	No Jusante	Nivel (m)
1	1	2	100.00

4. NOS COM DEMANDAS

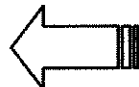
No	Demanda (- entra + sai)
4	75.00
7	45.00
8	57.00
10	40.00
12	35.00

5. RESULTADOS NOS TUBOS

Tubo No.	Compr. (m)	Diam. (mm)	Carga Mont. (m.c.a.)	Jus. (m.c.a.)	Vazao (l/s)	Veloc. (m/s)	Perda Distr.	(m) Local	J (m/km)
3	3000.00	500	100.00	94.91	143.7	0.37	5.10	0.00	1.700
4	1500.00	400	94.91	89.38	121.5	0.48	5.54	0.00	3.691
5	2500.00	400	100.00	92.56	108.3	0.43	7.45	0.00	2.981
7	1500.00	200	94.91	87.94	22.2	0.35	6.98	0.00	4.651
8	3700.00	400	89.38	87.07	46.5	0.18	2.31	0.00	0.623
9	1500.00	400	92.56	88.09	108.3	0.43	4.47	0.00	2.981
10	2200.00	300	87.94	87.07	17.0	0.12	0.86	0.00	0.392
11	2500.00	200	87.94	87.14	5.2	0.08	0.80	0.00	0.321
12	2700.00	200	87.14	88.09	-5.5	-0.09	0.95	0.00	0.353
13	2000.00	250	88.09	76.18	45.7	0.47	11.92	0.00	5.961
14	1700.00	200	87.14	85.07	10.8	0.17	2.07	0.00	1.216
15	1800.00	250	87.07	85.07	18.5	0.19	2.01	0.00	1.114
16	1000.00	200	76.18	75.80	5.7	0.09	0.38	0.00	0.378
17	1200.00	200	85.07	75.80	29.3	0.47	9.28	0.00	7.731

6. RESULTADOS NOS NÓS ESPECIFICADOS

No	Cota Piezometrica (m)
3	94.91
5	92.56
7	87.07
9	87.14
12	75.80



**CARGAS OBTIDAS COM
VALORES DE C INCORRETOS**

Figura 5.3 - Resultados para valores de C incorretos

Regime Permanente em redes de abastecimento de agua

Copyright 1991-2000

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior

1. DADOS GERAIS DA REDE

Numero de Elementos	15
Numero de Tubos	14
Numero de Reservatorios	1
Numero de Estacoes de Bombas ...	0
Numero de Valvulas	0
Numero de Nos com demandas	5
Numero de Cotas fornecidas	6

2. DADOS DOS TUBOS

No.	No Montante	No Jusante	Comprimento (m)	Diametro (mm)	C ou e (# ou mm)	dk (#)
3	2	3	3000.00	0.500	100.0000	0.0
4	3	4	1500.00	0.400	100.0000	0.0
5	2	5	2500.00	0.400	100.0000	0.0
7	3	6	1500.00	0.200	100.0000	0.0
8	4	7	3700.00	0.400	90.0000	0.0
9	5	8	1500.00	0.400	100.0000	0.0
10	6	7	2200.00	0.300	100.0000	0.0
11	6	9	2500.00	0.200	110.0000	0.0
12	9	8	2700.00	0.200	100.0000	0.0
13	8	10	2000.00	0.250	120.0000	0.0
14	9	11	1700.00	0.200	100.0000	0.0
15	7	11	1800.00	0.250	100.0000	0.0
16	10	12	1000.00	0.200	100.0000	0.0
17	11	12	1200.00	0.200	100.0000	0.0

3. DADOS DOS RESERVATORIOS

No.	No Montante	No Jusante	Nivel (m)
1	1	2	100.00

4. NOS COM DEMANDAS

No	Demanda (- entra + sai)
4	75.00
7	45.00
8	57.00
10	40.00
12	35.00

5. RESULTADOS NOS TUBOS

Tubo No.	Compr. (m)	Diam. (mm)	Carga Mont. (m.c.a)	Carga Jus. (m.c.a)	Vazao (l/s)	Veloc. (m/s)	Perda Distr.	(m) Local	J (m/km)
3	3000.00	500	100.00	95.01	142.2	0.36	5.00	0.00	1.666
4	1500.00	400	95.01	89.63	119.7	0.48	5.39	0.00	3.591
5	2500.00	400	100.00	92.36	109.8	0.44	7.65	0.00	3.059
7	1500.00	200	95.01	87.88	22.5	0.36	7.13	0.00	4.752
8	3700.00	400	89.63	87.02	44.7	0.18	2.61	0.00	0.704
9	1500.00	400	92.36	87.77	109.8	0.44	4.59	0.00	3.059
10	2200.00	300	87.88	87.02	17.0	0.12	0.86	0.00	0.392
11	2500.00	200	87.88	87.15	5.5	0.09	0.74	0.00	0.295
12	2700.00	200	87.15	87.77	-4.4	-0.07	0.63	0.00	0.233
13	2000.00	250	87.77	78.35	48.4	0.49	9.44	0.00	4.718
14	1700.00	200	87.15	85.37	9.9	0.16	1.78	0.00	1.047
15	1800.00	250	87.02	85.37	16.7	0.17	1.66	0.00	0.921
16	1000.00	200	78.35	77.59	8.4	0.13	0.76	0.00	0.761
17	1200.00	200	85.37	77.59	26.6	0.42	7.79	0.00	6.490

6. RESULTADOS NOS NÓS ESPECIFICADOS

NÓ	Cota Piezometrica (m)
3	95.01
5	92.36
7	87.02
9	87.15
12	77.59



**CARGAS OBTIDAS COM
VALORES DE C
CORRETOS**

Figura 5.4 - Resultados para valores de C corretos

As Figuras 5.5 a 5.8 apresentam os resultados do Modelo Híbrido, obtido pelo acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead, para cinco, quatro, três e dois NÓs monitorados. Relativamente a cada caso, a etapa (1) apresenta os vetores iniciais, onde cada componente de um vetor representa uma estimativa de C de um determinado tubo. Como no caso presente existem quatro tubos a calibrar, são criados cinco ($= 4+1$) vetores. O modelo, através do TMA, simula o comportamento da rede para cada uma das cinco situações, compara o valor das pressões com o valor das pressões “reais”, obtidas na fase anterior, e calcula o valor da função objetivo para cada caso. Dos cinco, o vetor que produziu o maior valor da função objetivo é descartado e automaticamente substituído por outro, supostamente melhor, obtido através dos restantes, conforme detalhado no capítulo anterior, em Nelder-Mead.

A essa sequência corresponde uma iteração. O número de iterações (repetições do processo visto) será o necessário para que as pressões calculadas sejam iguais às pressões monitoradas, zerando os valores da função objetivo. No caso da Figura 5.5, foram necessárias 208 iterações para que o processo convergisse (etapa (2)).

Continuando a análise, na etapa “SOLUÇÃO PARA OS TUBOS PESQUISADOS”, pode-se notar os valores de C que fizeram com que o processo convergisse. É interessante notar, neste ponto, que os valores de C não foram (e muitas vezes não são) iguais aos C “reais” da rede, apesar de fazerem com que os valores de pressão convirjam para os “reais”.

Por fim, na etapa de “VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO”, são apresentados os valores finais de pressão nodal e, como pode-se verificar, são praticamente iguais aos “reais”. As demais Figuras (5.6, 5.7 e 5.8) esquematizam a mesma sequência, com a única diferença de contemplarem menos pontos de monitoramento.

CALIBRACAO POR ACOPLAMENTO

DO TMA (Time Marching Approach) E DO PROCEDIMENTO DE NELDER MEAD

Copyright(c)-2000 Prof. Dr. Edevar Luvizotto Jr. Msc. Henrique S. Pizzo

(1)-Vetor de estimativas iniciais para tubos a calibrar					
	5	8	11	13	F. OBJ
1	80.0	100.0	100.0	100.0	26.0748
2	100.0	150.0	100.0	100.0	2.9354
3	150.0	100.0	100.0	100.0	18.8118
4	100.0	80.0	150.0	100.0	5.0675
5	100.0	100.0	80.0	150.0	4.0711

=> Numero de avaliacoes da funcao objetivo : 208

(2)-Vetor resultante final para tubos a calibrar					
	5	8	11	13	F. OBJ
1	100.0	89.9	111.1	120.1	0.0000
2	100.0	89.9	111.1	120.1	0.0000
3	100.0	89.9	111.0	120.1	0.0000
4	100.0	89.9	111.1	120.1	0.0000
5	100.0	89.9	111.0	120.1	0.0000

SOLUCAO PARA OS TUBOS PESQUISADOS

TUBO	Fator
5	100.0
8	89.9
11	111.1
13	120.1

***** VERIFICACAO DA SOLUCAO *****

NO	Medido	Calculado
3	95.010	95.007
5	92.360	92.361
7	87.020	87.020
9	87.150	87.149
12	77.590	77.590

Figura 5.5 - Calibração usando cinco NÓs monitorados

CALIBRACAO POR ACOPLAMENTO

DO TMA (Time Marching Approach) E DO PROCEDIMENTO DE NELDER MEAD

Copyright(c)-2000 Prof. Dr. Edevar Luvizotto Jr. Msc. Henrique S. Pizzo

(1)-Vetor de estimativas iniciais para tubos a calibrar					
	5	8	11	13	F. OBJ
1	80.0	100.0	100.0	100.0	25.3405
2	100.0	150.0	100.0	100.0	2.1905
3	150.0	100.0	100.0	100.0	17.7453
4	100.0	80.0	150.0	100.0	4.6184
5	100.0	100.0	80.0	150.0	3.7503

=> Numero de avaliacoes da funcao objetivo : 147

(2)-Vetor resultante final para tubos a calibrar					
	5	8	11	13	F. OBJ
1	100.0	90.0	110.4	120.0	0.0000
2	100.0	90.0	110.4	120.0	0.0000
3	100.0	90.0	110.4	120.0	0.0000
4	100.0	90.0	110.4	120.0	0.0000
5	100.0	90.0	110.4	120.0	0.0000

SOLUCAO PARA OS TUBOS PESQUISADOS

TUBO	Fator
5	100.0
8	90.0
11	110.4
13	120.0

***** VERIFICACAO DA SOLUCAO *****

NO	Medido	Calculado
3	95.010	95.006
5	92.360	92.361
9	87.150	87.149
12	77.590	77.590

Figura 5.6 - Calibração usando quatro NÓs monitorados

CALIBRACAO POR ACOPLAMENTO

DO TMA (Time Marching Approach) E DO PROCEDIMENTO DE NELDER MEAD
Copyright(c)-2000 Prof. Dr. Edevar Luvizotto Jr. Msc. Henrique S. Pizzo

(1)-Vetor de estimativas iniciais para tubos a calibrar

	5	8	11	13	F. OBJ
1	80.0	100.0	100.0	100.0	22.0705
2	100.0	150.0	100.0	100.0	1.9435
3	150.0	100.0	100.0	100.0	14.8131
4	100.0	80.0	150.0	100.0	4.5395
5	100.0	100.0	80.0	150.0	3.7386

==> Numero de avaliacoes da funcao objetivo : 150001

(2)-Vetor resultante final para tubos a calibrar

	5	8	11	13	F. OBJ
1	100.1	88.1	118.7	120.3	0.0000
2	100.1	88.1	118.7	120.3	0.0000
3	100.1	88.1	118.7	120.3	0.0000
4	100.1	88.1	118.7	120.3	0.0000
5	100.1	88.1	118.7	120.3	0.0000

SOLUCAO PARA OS TUBOS PESQUISADOS

TUBO	Fator
5	100.1
8	88.1
11	118.7
13	120.3

***** VERIFICACAO DA SOLUCAO *****

NO	Medido	Calculado
3	95.010	95.010
5	92.360	92.360
12	77.590	77.590

Figura 5.7 - Calibração usando três NÔs monitorados

CALIBRACAO POR ACOPLAMENTO
DO TMA (Time Marching Approach) E DO PROCEDIMENTO DE NELDER MEAD
 Copyright(c)-2000 Prof. Dr. Edevar Luvizotto Jr. Msc. Henrique S. Pizzo

(1)-Vetor de estimativas iniciais para tubos a calibrar					
	5	8	11	13	F. OBJ
1	80.0	100.0	100.0	100.0	14.5039
2	100.0	150.0	100.0	100.0	1.8205
3	150.0	100.0	100.0	100.0	0.2921
4	100.0	80.0	150.0	100.0	4.5282
5	100.0	100.0	80.0	150.0	3.7213

==> Numero de avaliacoes da funcao objetivo : 150002

(2)-Vetor resultante final para tubos a calibrar					
	5	8	11	13	F. OBJ
1	115.7	135.7	106.4	104.0	0.0000
2	115.7	135.7	106.4	104.0	0.0000
3	115.7	135.7	106.4	104.0	0.0000
4	115.7	135.7	106.4	104.0	0.0000
5	115.7	135.7	106.4	104.0	0.0000

SOLUCAO PARA OS TUBOS PESQUISADOS

TUBO	Fator
5	115.7
8	135.7
11	106.4
13	104.0

***** VERIFICACAO DA SOLUCAO *****

NO	Medido	Calculado
3	95.010	95.010
12	77.590	77.590

Figura 5.8 - Calibração usando dois NÔs monitorados

A metodologia proposta de um modelo híbrido, através da utilização do TMA e do procedimento de Nelder-Mead, para calibração das redes hidráulicas de sistemas de abastecimento de água parece bastante promissora como alternativa aos métodos anteriormente propostos. O estudo de caso apresentado, embora longe de esgotar as inúmeras possibilidades, fornece indicativos de sua viabilidade como técnica de calibração.

No capítulo 7 são apresentados novos exemplos, com a rede já vista e uma outra rede maior, com fins de identificação dos pontos ideais de monitoramento, assunto tratado já a partir do capítulo seguinte. Também na nova rede, os resultados do acoplamento TMA – Nelder-Mead evidenciam sucesso, conforme será visto adiante.

6 PONTOS DE MONITORAMENTO (ANÁLISE DE SENSIBILIDADE)

6.1 Generalidades

Com relação ao número de pontos a se monitorar (estações de monitoramento), é conveniente que se tenha o mínimo possível de estações, desde que suficientes para garantir uma boa calibração. Nesse caso seriam evitados: gastos com deslocamento de diversas equipes de campo, necessidade de vários aparelhos registradores de pressão (visto que é ideal que as medições sejam simultâneas) e outras dificuldades operacionais que poderiam, inclusive, inviabilizar o processo.

Lee e Deninger (1992) apresentam estudo onde descrevem um procedimento para posicionamento ótimo de estações de monitoramento para controle de qualidade da água em redes de distribuição. Todavia, não entram no mérito da determinação de fatores de rugosidade das tubulações, e nem de uma relação entre vazões nodais e diâmetros, o que poderia se prestar à verificação das interações tubo x NÓ, através da perda de carga. Abordam, na verdade, as demandas nodais e suas inter-relações, visto se tratar de problema de qualidade, onde a distribuição dos volumes se apresenta como sendo o fator mais importante.

Dentro da idéia de se ter um número limitado de estações de monitoramento, torna-se importante saber qual a representatividade que a adoção de uma rugosidade errada, para cada um dos tubos, terá nas pressões resultantes, ou de outra maneira, saber qual(is) o(s) tubo(s) influencia(m) mais o(s) NÓ(s). É a chamada Análise de Sensibilidade.

Para isso é interessante se tomar valores de dP/dC (variação da pressão nodal em relação a uma variação unitária do coeficiente de rugosidade). Assim, tais derivadas são calculadas numericamente, através de um pequeno incremento em “C”. O sistema é simulado e verificadas as alterações de pressão nos NÓS de interesse. À estrutura formada pelos valores de dP/dC (também chamados de dh/dC), referentes a cada NÓ e a cada tubo, dá-se o nome de Matriz de Sensibilidade.

Ligget (1993), em artigo sobre detecção de vazamentos na rede, através de método inverso (que é também o utilizado para calibração de modelos), recorre à análise de sensibilidade, sendo que a matriz de sensibilidade é dominada por um dos tubos. Cita que, apesar desse fato poder ter sido resultado de uma má representação da rede, os resultados podem ser muito influenciados pela rugosidade de certos tubos, e que o erro de tais rugosidades pode acarretar sérios desvios nas regiões de perda de carga. Comenta que erros da ordem de 10% na estimativa do coeficiente de rugosidade C são mais difíceis de ocorrer, enquanto que erros na faixa dos 40% são mais freqüentes.

Luvizotto Jr. (1988), em sua tese de pós-doutorado, também analisa fugas de água nas redes de distribuição. Adota a mesma sistemática de Ligget para o cálculo da matriz de sensibilidade, porém, faz antes um estudo bastante detalhado, expressando graficamente e por tabelas resultados acerca da variação das cargas nodais em função de variações unitárias de cada um dos coeficientes de rugosidade da rede. Aponta, ainda, a calibração de sistemas (aferição das rugosidades dos tubos), que é o objeto desta tese, como uma outra aplicação dos procedimentos inversos. Na verdade, os dois problemas (detecção de fugas e calibração) se mostram bastante semelhantes, tendo respectivamente, fugas nodais e rugosidade dos tubos, como variáveis de decisão, e as cargas nos NÓS como parâmetros de referência, no processo de aproximação das situações simuladas para as situações reais.

Ferreri, Napoli e Tumbiolo (1994) também utilizam a análise de sensibilidade para seleção dos pontos de monitoramento, visando a determinação de valores reais de rugosidade dos tubos. Segundo eles, a importância das matrizes de sensibilidade é, inicialmente, permitir avaliar se pequenos erros na calibração das rugosidades pode resultar em erros consideráveis nas vazões

e cargas computadas pelo modelo. Como consequência, essas matrizes também são importantes por fornecerem boas indicações sobre quais os pontos a serem monitorados. Atentam para que se as cargas piezométricas variam sensivelmente com os coeficientes de rugosidade, então a variação dessas cargas modificará muito pouco tais coeficientes. Afirmam, ainda, que um NÓ (ou uma seção de tubo) nem sempre apresentará uma mesma sensibilidade com relação à rugosidade de diferentes tubos, sendo necessário, então, levar em consideração a sensibilidade de cada NÓ (ou de cada seção de tubo) em relação a todos os coeficientes de rugosidade a serem calibrados. Recomendam que, para melhores resultados da calibração, as operações devam ser feitas à noite, quando os consumos podem ser praticamente desprezados. Adotam que o número de informações monitoradas seja igual ao número de tubos a ser calibrado.

Bush e Uber (1998) propõem três métodos para determinação de pontos ótimos de monitoramento de pressões e/ou concentrações de traçador utilizado na rede, para a calibração de modelos. Os melhores resultados foram obtidos quando se levou em conta a medição simultânea de ambas as grandezas. Chegaram a valores indicativos de que os principais pontos a serem monitorados, em termos de pressão, eram, em geral, aqueles localizados nas regiões mais periféricas da rede.

Silva et al. (2001) relatam de maneira sucinta e clara o motivo de recentes motivações dos pesquisadores na obtenção dos pontos mais representativos da rede: “[...] a aquisição de dados geralmente torna-se muito dispendiosa, havendo a necessidade de uma equipe de trabalho e dispositivos especiais para realização de medidas, além da harmonia com o órgão responsável pelo abastecimento municipal ... Diante de tais dificuldades, a rede de monitoramento de pressão e vazão geralmente é constituída de um número reduzido de pontos de observação. Eles devem, portanto, ser escolhidos de maneira a fornecer o máximo de informação possível”.

6.2 Proposição de métodos de identificação das estações de monitoramento

São propostos pela presente tese cinco métodos empíricos para a identificação (quantidade e posicionamento) das estações de monitoramento, sendo que tais metodologias de identificação serão aplicadas à rede em estudo e comparados seus resultados finais, em termos de aproximação dos coeficientes de rugosidade gerados por cada uma delas em relação aos valores reais.

Com relação à identificação dos tubos a serem calibrados, é feito um esquema baseado nas idéias de Liggett (1993), trabalhadas por Luvizotto Jr. (1998). Computada uma série de dados indicativos da variação da pressão em cada NÓ, a partir de uma variação unitária no coeficiente C de Hazen-Williams (adotou-se aqui uma variação (erro) de 10 unidades a mais), faz-se o somatório dessas taxas de variação (dh/dC ou dP/dC) de todos os NÓs referidos a um determinado tubo. A seguir, executa-se o mesmo procedimento para cada tubo. Ao final, obtém-se uma série de somatórios de dh/dC , sendo um somatório para cada tubo. Transforma-se esses valores em percentuais em relação ao total, e soma-se cumulativamente em ordem decrescente, até que se obtenha uma dada percentagem desejada.

O procedimento se propõe a verificar quais dos tubos têm mais influência no regime geral de pressões, ou seja, quais tubos não devem ser abstraídos do processo de calibração, visto que, se por algum motivo, suas rugosidades forem tomadas como diferentes das reais, podem resultar em grandes discrepâncias das cargas nodais simuladas em relação às reais.

No capítulo seguinte é apresentada a matriz de sensibilidade referente aos valores de dh/dC para a rede em estudo do capítulo anterior, obtidos numericamente para uma variação de C em 10 unidades acrescidas, separadamente para cada tubo, os quais estão calculados em módulo, a fim de uniformizar valores positivos e negativos, e multiplicados por um fator 100, no simples intuito de aumentar a ordem de grandeza dos valores manipulados.

A fim de exemplificar a situação proposta, sem maiores preocupações com geometria da rede, unidades, etc., apresenta-se a seguir uma tabela com valores de dh/dC de uma situação hipotética:

Tabela 6.1 – Valores de dh/dC para uma situação hipotética

	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	Σ	%	% _{acumulado}
Tubo I	3	12	8	23	32 (2°)	83
Tubo II	7	15	14	36	51 (1°)	51
Tubo III	4	3	5	12	17 (3°)	100

Os somatórios para cada linha (cada tubo) serão de 23, 36 e 12, que, respectivamente, correspondem a 32%, 51% e 17%. Se adotássemos o índice de representatividade (% acumulado) igual ou maior que 50%, teríamos que é suficiente que o tubo II seja calibrado. Já se for exigido um índice maior ou igual a 70%, o tubo I também precisaria ser incluído na calibração.

Conforme já visto, o número de pontos a monitorar (no caso desse trabalho, monitoramento de pressão) é função do número de tubos a calibrar, não devendo ser inferior a esse. Deve-se, então, a partir deste ponto, concentrar esforços no sentido do posicionamento de tais estações de monitoramento, assunto a que os métodos a seguir se referem.

a) MÉTODO DO NÓ DE JUSANTE

Este método se resume exclusivamente em se considerar o NÓ de jusante como ponto de monitoramento para cada tubo a ser calibrado, e baseia-se na “estreita relação” entre um dado NÓ e seu tubo de montante. Atenta-se para o caso em que, devido a grandes dimensões da rede, nem sempre ser possível conhecer, de imediato, o sentido do fluxo (o que pode fazer inverter o NÓ de montante com o de jusante). Nesses casos, é conveniente simular a operação do sistema (usando-se rugosidades aproximadas) a fim de se ter noção do sentido de escoamento da água.

b) MÉTODO DO SOMATÓRIO PARCIAL DOS dC/dh

Assim como na definição dos tubos a serem calibrados foi adotado um esquema de somatório dos vários dh/dC , imaginou-se aqui que os NÓS que melhor refletem na rugosidade dos tubos escolhidos previamente são aqueles que apresentam o maior valor de dC/dh (ou o maior somatório desses valores, no caso de adotado mais de um tubo). Dessa forma, seriam esses os pontos cujo monitoramento seria mais indicativo dos valores de C . Cabe salientar que os tubos a serem considerados serão somente aqueles já selecionados em etapa anterior. Como forma de simplificação, bastará inverter o valor de dh/dC para que se obtenha os valores de dC/dh .

Exemplificando, lança-se mão da tabela 6.1, para se obter os valores de dC/dh , supondo-se um índice de representatividade na identificação dos tubos requerido de, no mínimo, 70%. Sendo assim, é necessário que os tubos II e I sejam calibrados, originando o seguinte quadro de dC/dh :

Tabela 6.2 – Valores de dC/dh

	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3
Tubo I	0,33	0,083	0,125
Tubo II	0,143	0,067	0,071
Σ	0,473	0,15	0,196

As somas de dC/dh dos tubos para cada NÓ são 0,473; 0,15 e 0,196. Assim, como o número de NÓS de monitoramento deve ser de 2 (visto que são 2 tubos – caso de 70%), os escolhidos são os que apresentam somas maiores, ou seja, o NÓ 1 e o NÓ 3, que seriam os mais representativos dos tubos I e II.

c) MÉTODO DO SOMATÓRIO PARCIAL DOS dh/dC

Esse método tem como base o mesmo cálculo dos dh/dC para determinação dos tubos a serem calibrados, só que usado para a escolha das estações de monitoramento. O somatório, aqui,

assim como na letra “b”, é feito ao longo das verticais, já que trata-se de escolher NÓs, e não tubos. É justificado pela idéia de que um erro unitário na carga do NÓ (dado por imprecisão de leitura ou erro de fechamento entre carga simulada e carga lida), produzindo um erro pequeno em C, seria a situação menos comprometedora para o resultado. Então deve-se eleger o NÓ para o qual o valor (ou somatório de valores dos tubos a serem calibrados) de dh/dC seja o maior.

Exemplificando-se com a tabela 6.1, e imaginando-se que os tubos I e II sejam realmente aqueles a serem calibrados, tem-se que os somatórios de dh/dC são, respectivamente para os NÓs 1, 2 e 3, de 10, 27 e 22, indicando que, pela ordem, os NÓs 2 e 3 devam ser os escolhidos como estações de monitoramento.

d) MÉTODO DO SOMATÓRIO TOTAL DOS dC/dh

Semelhante ao método do dC/dh parcial, este método leva em conta a soma dos dC/dh de todos os tubos, e não somente daqueles a serem calibrados. Justifica-se pelo fato de que não somente os tubos a serem calibrados interferem no processo, mas todos os tubos da rede. Os somatórios de dC/dh , respectivamente para os NÓs 1, 2 e 3, seriam 0,73; 0,48 e 0,40, sendo, então, o NÓ 1 considerado o mais representativo, depois o 2 e, finalmente, o 3.

e) MÉTODO DO SOMATÓRIO TOTAL DOS dh/dC

Análogo ao anterior, só que relativo ao método do dh/dC parcial. Os somatório de dh/dC para os NÓs 1, 2 e 3 são, respectivamente, 14, 30 e 27, assim classificando os NÓs em ordem de importância: 2, 3 e 1.

7 ESTUDOS DE CASO

7.1 Rede L

Os cinco métodos apresentados no capítulo anterior foram aplicados à rede em estudo do capítulo 5, referida a partir de agora como rede L. Todavia, antes da aplicação dos métodos, é necessário definir a matriz de sensibilidade. A rede L é representada novamente a seguir:

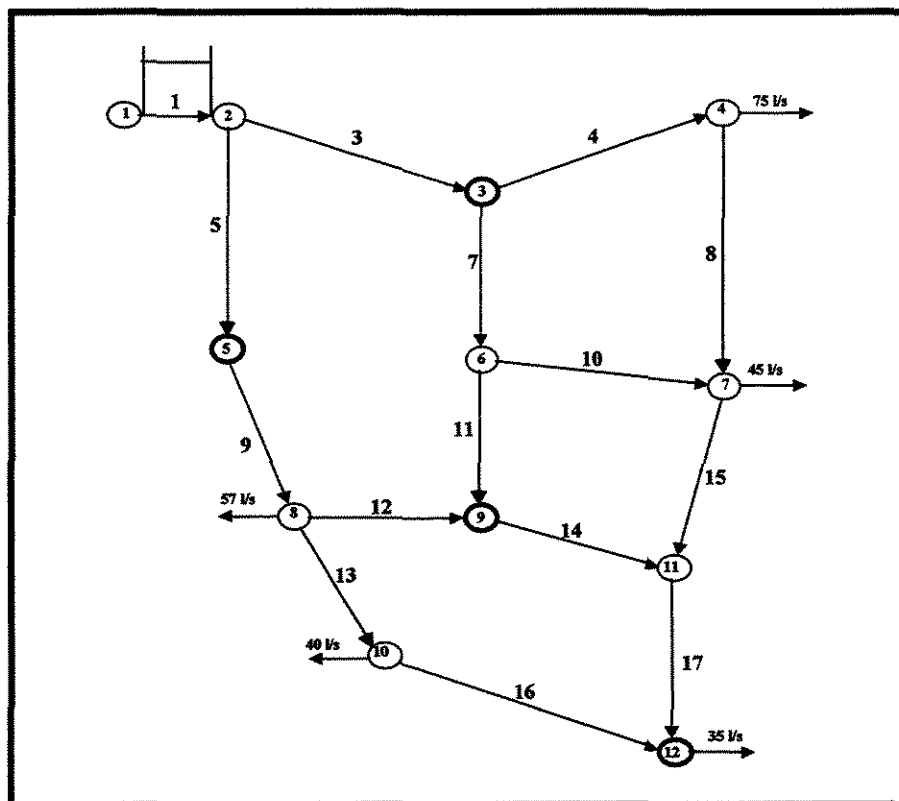


Figura 7.1 – Rede L

Tabela 7.1 – Tubulações

Tubo	N1	N2	L (m)	D (mm)	C
3	2	3	3000	500	100
4	3	4	1500	400	100
5	2	5	2500	400	100
7	3	6	1500	200	100
8	4	7	2200	300	90
9	5	8	1500	400	100
10	6	7	2200	500	100
11	6	9	2500	200	110
12	8	9	2700	200	100
13	8	10	2000	250	120
14	9	11	1700	200	100
15	7	11	1800	250	100
16	10	12	1000	200	100
17	11	12	1200	200	100

Tabela 7.2 – Reservatório

ENO	N1	N2	NÍVEL (m)
1	1	2	100

Tabela 7.3 – Cargas nos NÓs

NÓ	CARGA (mca)
1	100,00
2	100,00
3	95,01
4	89,63
5	92,36
6	87,88
7	87,02
8	87,78
9	87,15
10	78,35
11	85,37
12	77,59

A matriz de sensibilidade foi obtida de forma numérica devido à inexistência de equações particulares que relacionem o valor da carga ao da rugosidade, que permitiriam o cálculo analítico das derivadas. Arbitrando a variação unitária de C como sendo um incremento de 10 unidades no seu valor, foram verificadas as diferenças de pressão no NÓ obtidas com o C real e o C alterado, gerando o dh/dC .

Ressalta-se que os valores de dh/dC foram considerados em módulo, a fim de uniformizar valores positivos e negativos, e multiplicados por 100, para facilitar a sua manipulação. Os tubos mais representativos foram, em ordem de importância, 5, 3, 4, 9, 13, 17, 7 (e 8), 15, 10 (e 14) e 11 (e 12 e 16).

Com relação ao índice de representatividade, descrito no capítulo anterior, foram tomados os seguintes: 82%, 75%, 66%, 55% e 42%, a fim de que o campo de aplicação dos métodos seja bem representativo. No caso da rede L, considerou-se sempre o número de tubos a calibrar igual ao número de estações de monitoramento. A seguir é apresentada a matriz de sensibilidade da rede L:

Tabela 7.4 – Matriz de sensibilidade da rede L

NÓ → TUBO ↓	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Σ	%
P(real)	95,01	89,63	92,36	87,88	87,02	87,78	87,15	78,35	85,37	77,59	-	-
P(ΔC3)	95,76	90,31	92,50	88,46	87,62	88,00	87,57	78,66	85,87	77,95	-	-
(dh/dc)₃	75	68	14	58	60	22	42	31	50	36	456	19%
P(ΔC4)	94,95	90,33	92,47	88,30	87,54	87,95	87,47	78,60	85,79	77,88	-	-
(dh/dc)₄	6	70	11	42	52	17	32	25	42	29	326	13%
P(ΔC5)	95,11	89,83	93,42	88,26	87,35	88,71	87,72	79,12	85,83	78,28	-	-
(dh/dc)₅	10	20	106	38	33	93	57	77	46	69	549	23%
P(ΔC7)	94,98	89,69	92,42	88,19	87,21	87,87	87,34	78,47	85,55	77,72	-	-
(dh/dc)₇	3	6	6	31	19	9	19	12	18	13	136	6%
P(ΔC8)	94,98	89,52	92,42	88,11	87,30	87,87	87,32	78,48	85,59	77,74	-	-
(dh/dc)₈	3	11	6	23	28	9	17	13	22	15	147	6%
P(ΔC9)	95,07	89,75	92,23	88,11	87,22	88,33	87,49	78,81	85,65	78,00	-	-
(dh/dc)₉	6	12	13	23	20	55	34	46	28	41	278	11%
P(ΔC10)	95,01	89,64	92,35	87,81	87,06	87,76	87,12	78,34	85,38	77,59	-	-
(dh/dc)₁₀	0	1	1	7	4	2	3	1	1	0	20	1%
P(ΔC11)	95,00	89,62	92,37	87,86	87,01	87,79	87,19	78,36	85,37	77,60	-	-
(dh/dc)₁₁	1	1	1	2	1	1	4	1	0	1	13	0,5%
P(ΔC12)	95,01	89,64	92,35	87,91	87,04	87,75	87,19	78,34	85,39	77,59	-	-
(dh/dc)₁₂	0	1	1	3	2	3	4	1	2	0	17	0,5%
P(ΔC13)	95,03	89,68	92,30	87,96	87,12	87,69	87,20	79,24	85,56	78,31	-	-
(dh/dc)₁₃	2	5	6	8	10	9	5	89	19	72	225	9%
P(ΔC14)	95,01	89,64	92,35	87,88	87,05	87,76	87,08	78,36	85,46	77,62	-	-
(dh/dc)₁₄	0	1	1	0	3	2	7	1	9	3	27	1%
P(ΔC15)	95,00	89,60	92,38	87,87	86,98	87,81	87,20	78,42	85,52	77,68	-	-
(dh/dc)₁₅	1	3	2	1	4	3	5	7	15	9	50	2%
P(ΔC16)	95,01	89,63	92,35	87,89	87,03	87,77	87,15	78,30	85,39	77,65	-	-
(dh/dc)₁₆	0	0	1	1	1	1	0	5	2	6	17	0,5%
P(ΔC17)	94,98	89,57	92,42	87,80	86,92	87,87	87,09	78,79	85,17	78,19	-	-
(dh/dc)₁₇	3	6	6	8	1	9	6	44	20	60	163	7%

Nota: O valor $(dh/dc)_i$, sendo “i” o número do tubo, é dado por: $|P(\Delta C_i) - P(\text{real})| \times 100$

7.2 Rede F

Assim como no caso da rede L, aqui também serão aplicados os cinco métodos apresentados, e mais um sexto método. A rede F foi extraída de um artigo publicado por Ferreri, Napoli e Tumbiolo, em 1994, sendo que o sexto método citado é traduzido pelo conjunto de NÓs mais representativos a serem adotados como estações de monitoramento no referido artigo, citado aqui como método dos Italianos. A rede F é explicitada a seguir:

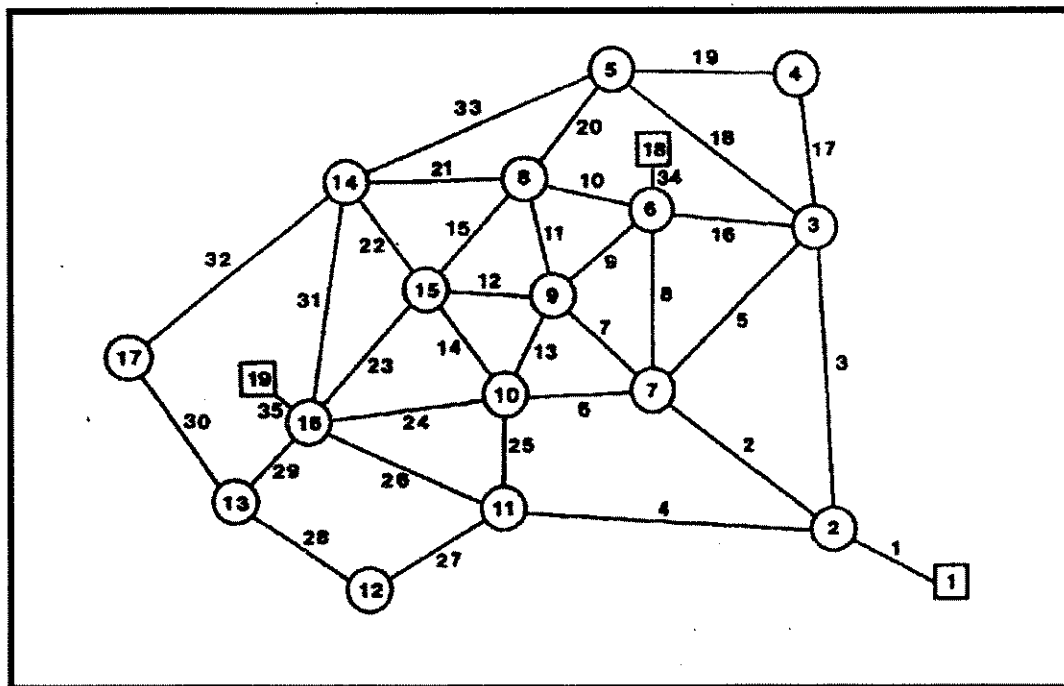


Figura 7.2 – Rede F

Tabela 7.5- Tubulações

Tubo	N1	N2	L (m)	D (mm)	C
1	1	2	200	150	80
2	2	7	180	150	80
3	2	3	230	150	80
4	2	11	250	150	80
5	3	7	180	80	65
6	7	10	120	125	80
7	7	9	120	100	65
8	6	7	135	125	65
9	6	9	100	125	65
10	6	8	100	125	65
11	8	9	100	100	65
12	9	15	100	100	65
13	10	9	100	80	65
14	10	15	110	80	65
15	8	15	130	80	75
16	6	3	130	150	80
17	3	4	130	125	80
18	3	5	220	125	80
19	4	5	140	80	80
20	8	5	110	80	80
21	8	14	120	80	85
22	14	15	100	80	85
23	16	15	140	125	75
24	16	10	150	125	75
25	11	10	90	100	75
26	16	11	185	125	75
27	11	12	130	125	75
28	13	12	130	100	85
29	16	13	90	150	85
30	13	17	135	125	85
31	16	14	150	150	85
32	14	17	200	125	85
33	14	5	190	80	85
34	18	6	150	150	70
35	19	16	150	150	70

Tabela 7.6 Cargas nos NÓs

NÓ	CARGA (mca)
2	90,85
3	89,11
4	88,98
5	87,73
6	90,05
7	88,89
8	88,80
9	88,31
10	88,41
11	89,17
12	87,55
13	88,66
14	88,67
15	88,12
16	89,30
17	87,71

Verificam-se demandas nodais de 12,5 l/s nos seguintes NÓs: 3, 5, 7, 9, 10, 12, 15 e 17.

A partir dos dados expostos no artigo, determinou-se as cotas de cada um dos reservatórios:

Reservatório 1: 103,553 m;

Reservatório 18: 100,901 m;

Reservatório 19: 101,031 m.

Com esses dados foi possível obter a matriz de sensibilidade da rede F, calculada de maneira análoga à da rede L. Os cinco tubos mais representativos foram, na ordem de importância, 35, 34, 1, 4 e 2. No caso da rede F, foram sempre esses os tubos a serem calibrados, com variações de sete a duas estações de monitoramento. Antes de se apresentar os resultados dos métodos propostos, segue-se a matriz de sensibilidade da rede F:

Tabela 7.7 – Matriz de sensibilidade da rede F

(VB) – Valor muito baixo

NÓ → TUBO ↓	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Σ
P(real)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,05	88,89	88,80	88,31	88,41	89,17	87,55	88,66	88,67	88,12	89,30	87,71	-
P(ΔC1)	91,96	89,98	89,84	88,56	90,81	89,77	89,59	89,11	89,24	90,01	88,36	89,43	89,44	88,91	90,06	88,48	-
(dh/dc) ₁	111	87	86	83	76	88	79	80	83	84	81	77	77	79	76	77	1324
P(ΔC2)	90,76	89,13	89,00	87,76	90,10	89,01	88,85	88,37	88,47	89,18	87,57	88,69	88,70	88,17	89,33	87,74	-
(dh/dc) ₂	9	2	2	3	5	12	5	6	6	1	2	3	3	5	3	3	70
P(ΔC3)	90,78	89,22	89,09	87,81	90,11	88,90	88,84	88,34	88,42	89,16	87,55	88,67	88,69	88,14	89,31	87,72	-
(dh/dc) ₃	7	11	11	8	6	1	4	3	1	1	0	1	2	2	1	1	60
P(ΔC4)	90,78	89,09	88,96	87,73	90,05	88,89	88,83	88,34	88,45	89,28	87,64	88,73	88,72	88,17	89,37	87,77	-
(dh/dc) ₄	7	2	2	0	0	0	3	3	4	11	9	7	5	5	7	6	71
P(ΔC5)	90,85	89,10	88,97	87,72	90,05	88,90	88,80	88,31	88,41	89,17	87,55	88,66	88,67	88,13	89,30	87,71	-
(dh/dc) ₅	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	(VB)
P(ΔC6)	90,84	89,10	88,97	87,72	90,04	88,87	88,80	88,32	88,44	89,18	87,56	88,68	88,68	88,14	89,31	87,72	-
(dh/dc) ₆	1	1	1	1	1	2	0	1	3	1	1	2	1	2	1	1	(VB)
P(ΔC7)	90,84	89,11	88,97	87,73	90,05	88,87	88,81	88,34	88,41	89,17	87,55	88,67	88,67	88,14	89,31	87,71	-
(dh/dc) ₇	1	0	1	0	0	2	1	3	0	0	0	1	0	2	1	0	(VB)
P(ΔC8)	90,88	89,10	88,97	87,73	90,01	88,96	88,80	88,32	88,44	89,19	87,57	88,68	88,68	88,14	89,32	87,72	-
(dh/dc) ₈	3	1	1	0	4	7	0	1	3	2	2	2	1	2	2	1	32
P(ΔC9)	90,86	89,09	88,96	87,73	90,00	88,92	88,83	88,42	88,46	89,21	87,59	88,70	88,71	88,19	89,34	87,75	-
(dh/dc) ₉	1	2	2	0	5	3	3	11	5	4	4	4	4	7	4	4	63
P(ΔC10)	90,86	89,10	88,97	87,75	90,01	88,90	88,91	88,34	88,43	89,19	87,58	88,70	88,72	88,16	89,34	87,75	-
(dh/dc) ₁₀	1	1	1	2	4	1	11	3	2	2	3	4	5	4	4	4	52

Tabela 7.7 – Matriz de sensibilidade da rede F (continuação)

P(AC11)	90,85	89,11	88,97	87,72	90,05	88,90	88,77	88,33	88,42	89,17	87,55	88,66	88,66	88,13	89,30	87,70	-
(dh/dc) ₁₁	0	0	1	1	0	1	3	2	1	0	0	0	1	1	0	1	(VB)
P(AC12)	90,85	89,11	88,97	87,73	90,05	88,89	88,80	88,30	88,41	89,17	87,55	88,67	88,67	88,14	89,30	87,71	-
(dh/dc) ₁₂	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	(VB)
P(AC13)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,05	88,89	88,80	88,32	88,41	89,17	87,55	88,66	88,67	88,12	89,30	87,70	-
(dh/dc) ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	(VB)
P(AC14)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,05	88,89	88,80	88,31	88,40	89,17	87,55	88,66	88,67	88,14	89,30	87,71	-
(dh/dc) ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	(VB)
P(AC15)	90,85	89,10	88,97	87,72	90,04	88,89	88,78	88,31	88,42	89,17	87,55	88,67	88,67	88,14	89,30	87,71	-
(dh/dc) ₁₅	0	1	1	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0	2	0	0	(VB)
P(AC16)	90,88	89,20	89,06	87,78	90,01	88,90	88,80	88,31	88,42	89,18	87,56	88,67	88,68	88,13	89,31	87,71	-
(dh/dc) ₁₆	3	9	8	5	4	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	37
P(AC17)	90,85	89,11	89,00	87,73	90,05	88,89	88,80	88,31	88,41	89,17	87,55	88,66	88,67	88,12	89,30	87,71	-
(dh/dc) ₁₇	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(VB)
P(AC18)	90,84	89,08	88,96	87,85	90,04	88,89	88,82	88,32	88,42	89,17	87,56	88,67	88,69	88,13	89,31	87,72	-
(dh/dc) ₁₈	1	3	2	12	1	0	2	1	1	0	1	1	2	1	1	1	30
P(AC19)	90,85	89,10	88,94	87,77	90,05	88,89	88,81	88,31	88,41	89,17	87,55	88,67	88,68	88,13	89,31	87,71	-
(dh/dc) ₁₉	0	1	4	4	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	(VB)
P(AC20)	90,85	89,12	88,99	87,78	90,05	88,89	88,78	88,30	88,41	89,17	87,55	88,66	88,66	88,12	89,30	87,70	-
(dh/dc) ₂₀	0	1	1	5	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	1	(VB)
P(AC21)	90,85	89,11	88,97	87,73	90,05	88,89	88,79	88,31	88,41	89,17	87,55	88,67	88,67	88,12	89,30	87,71	-
(dh/dc) ₂₁	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	(VB)
P(AC22)	90,85	89,11	88,98	87,72	90,05	88,90	88,80	88,32	88,41	89,17	87,55	88,66	88,65	88,14	89,30	87,70	-
(dh/dc) ₂₂	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	2	2	0	1	(VB)
P(AC23)	90,86	89,12	88,99	87,74	90,07	88,91	88,82	88,35	88,43	89,16	87,54	88,64	88,67	88,20	89,28	87,69	-
(dh/dc) ₂₃	1	1	1	1	2	2	2	4	2	1	1	2	0	8	2	2	32

Tabela 7.7 – Matriz de sensibilidade da rede F (continuação)

P(ΔC24)	90,86	89,12	88,99	87,73	90,06	88,92	88,81	88,33	88,46	89,17	87,54	88,64	88,66	88,13	89,28	87,69	-
(dh/dc)₂₄	1	1	1	0	1	3	1	2	5	0	1	2	1	1	2	2	(VB)
P(ΔC25)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,06	88,91	88,81	88,32	88,44	89,14	87,53	88,66	88,67	88,13	89,30	87,70	-
(dh/dc)₂₅	0	0	0	0	1	2	1	1	3	3	2	0	0	1	0	1	(VB)
P(ΔC26)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,05	88,90	88,80	88,31	88,41	89,18	87,56	88,66	88,66	88,12	89,30	87,70	-
(dh/dc)₂₆	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	(VB)
P(ΔC27)	90,84	89,10	88,97	87,73	90,05	88,89	88,80	88,31	88,41	89,14	87,76	88,70	88,68	88,13	89,31	87,73	-
(dh/dc)₂₇	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3	21	4	1	1	1	2	36
P(ΔC28)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,05	88,90	88,80	88,31	88,41	89,18	87,64	88,64	88,66	88,12	89,30	87,69	-
(dh/dc)₂₈	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	9	2	1	0	0	2	(VB)
P(ΔC29)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,05	88,90	88,80	88,31	88,41	89,17	87,59	88,75	88,68	88,12	89,30	87,76	-
(dh/dc)₂₉	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	9	1	0	0	5	(VB)
P(ΔC30)	90,85	89,11	88,98	87,73	90,05	88,90	88,81	88,31	88,41	89,16	87,54	88,63	88,69	88,13	89,30	87,80	-
(dh/dc)₃₀	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	3	2	1	0	9	(VB)
P(ΔC31)	90,85	89,12	88,99	87,75	90,06	88,90	88,83	88,32	88,41	89,16	87,54	88,66	88,73	88,14	89,28	87,73	-
(dh/dc)₃₁	0	1	1	2	1	1	3	1	0	1	1	0	6	2	2	2	(VB)
P(ΔC32)	90,85	89,10	88,97	87,72	90,04	88,89	88,79	88,31	88,41	89,17	87,56	88,69	88,65	88,12	89,31	87,80	-
(dh/dc)₃₁	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	3	2	0	1	9	(VB)
P(ΔC33)	90,85	89,12	88,99	87,77	90,05	88,90	88,80	88,31	88,41	89,16	87,54	88,65	88,65	88,12	89,29	87,69	-
(dh/dc)₃₃	0	1	1	4	0	1	0	0	0	1	1	1	2	0	1	2	(VB)
P(ΔC34)	91,65	90,11	89,97	88,69	91,20	89,83	89,78	89,27	89,30	89,99	88,36	89,47	89,52	89,01	90,10	88,53	-
(dh/dc)₃₄	80	100	99	96	115	94	98	96	89	82	81	81	85	89	80	82	1447
P(ΔC35)	91,69	89,98	89,86	88,67	90,89	89,83	89,80	89,30	89,45	90,24	88,67	89,84	89,78	89,19	90,50	88,85	-
(dh/dc)₃₅	84	87	88	94	84	94	100	99	104	107	112	118	111	107	120	114	1623

Nota: O valor $(dh/dc)_i$, sendo “i” o número do tubo, é dado por: $|P(\Delta C_i) - P(\text{real})| \times 100$

8 RESULTADOS E ANÁLISE

8.1 O calibrador

Os cinco métodos apresentados no capítulo 6 foram aplicados às redes L e F. Foi utilizado o programa CALIBRA, desenvolvido por Luvizotto Jr. (2002), a fim de que, quando da convergência entre as pressões monitoradas e as pressões calculadas (critério de parada do modelo híbrido), saber quais os valores então atribuídos aos coeficientes de rugosidade C . Quanto mais esses se aproximaram dos valores de C reais, significa dizer que o processo de calibração foi mais exato, mais fiel aos seus reais objetivos, podendo-se concluir, ainda, que os pontos de monitoramento adotados foram mais eficientes em exprimir as informações dos tubos em estudo, enfim, da rede.

São apresentadas três situações particulares do programa. A primeira corresponde à entrada dos dados da rede, a segunda corresponde à etapa de simulação, fornecendo os valores finais de pressão nodal (fornece também as vazões nos trechos), e finalmente, a etapa de calibração. Nessa última, a partir de uma topologia já definida, e então indicadas as estações de monitoramento e os tubos a terem a rugosidade ajustada, o programa calcula os valores finais de C , para que os valores de pressão calculada satisfaçam aos de pressão monitorada.

Uma listagem para uso do sistema CALIBRA é apresentada no Anexo.

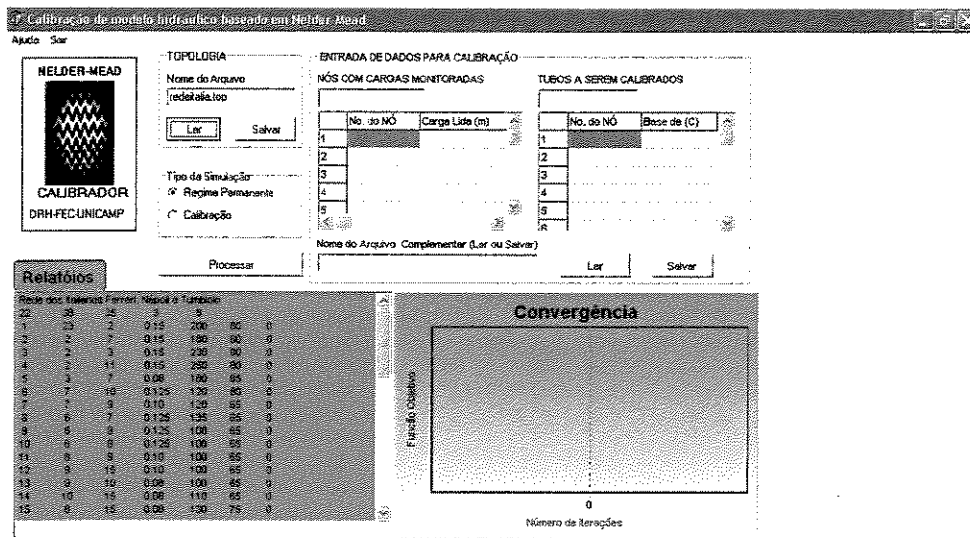


Figura 8.1 – Programa CALIBRA: introdução dos dados da rede

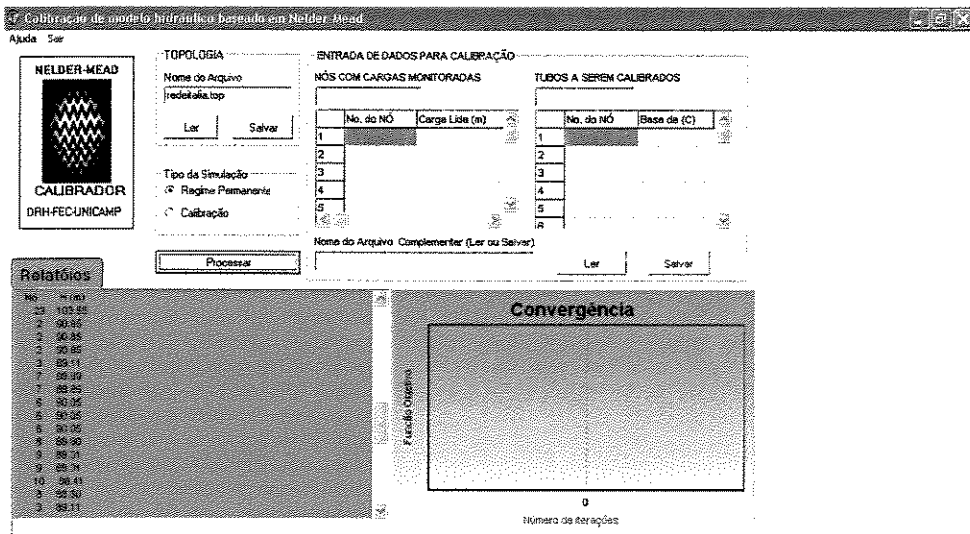


Figura 8.2 – Programa CALIBRA: modo de simulação

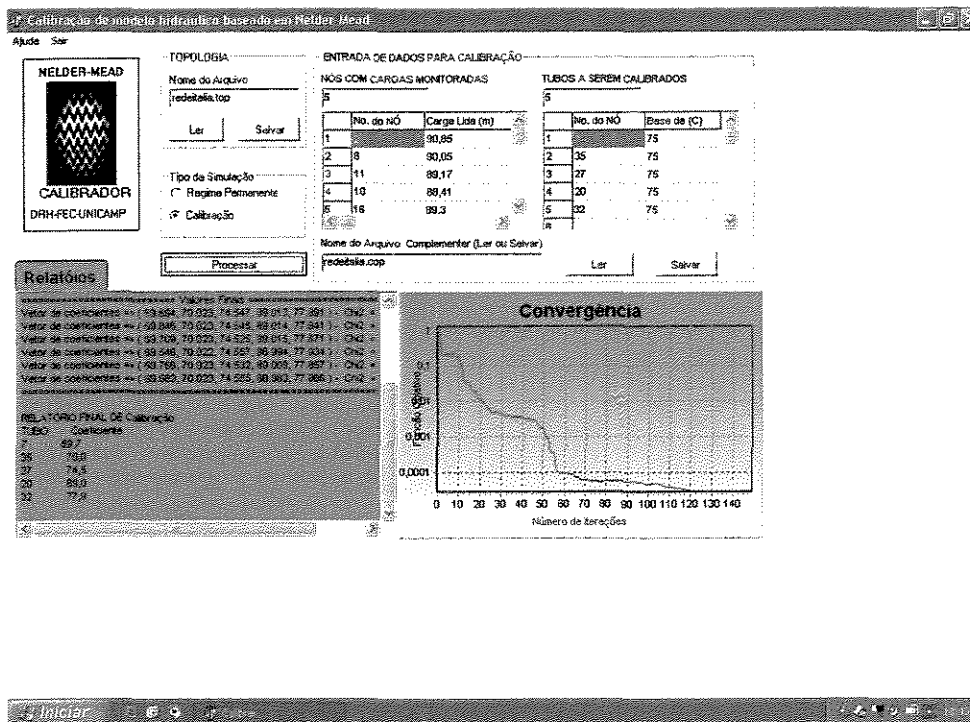


Figura 8.3 – Programa CALIBRA: modo de calibração

8.2 Etapa de verificação

Esta etapa consiste na primeira aplicação dos diferentes conjuntos de estações de monitoramento, determinados a partir de cada método sugerido, a uma rede em estudo, no caso, a rede L. Deixa-se claro, então, que a finalidade de cada método é determinar quais os NÓS serão escolhidos como estações de monitoramento de pressões.

As tabelas seguintes consistem, na parte superior, dos somatórios dos valores de dh/dC e de dC/dh , parciais e totais, indicando com um asterisco quais os NÓS a serem tomados como estações de monitoramento, em cada caso. Na parte inferior de cada tabela, é indicado o valor de C atingido quando o método de calibração atingia o critério de parada.

Como já foi abordado, quanto mais os valores de C foram próximos de seus valores reais, mais efetivas foram as estações de monitoramento em exprimir as condições reais da rede, conseqüentemente, melhor o método proposto.

Os métodos dos somatórios parciais e totais serão representados pelos índices P e T, respectivamente, e o número de estações de monitoramento testadas variou de 6 a 2, sempre igual ao número de tubos a calibrar, referidos no capítulo 7. Os NÓs avaliados em cada uma das situações são aqueles que, em cada método, estão referenciados por asteriscos. Seguem-se as tabelas com os resultados:

Tabela 8.1 – seis tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%), 9(11%), 13(9%), 17(7%) – total: 82% (rede L)

NÓ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sum(dh/dC)_P$	102	181 *	156	177 *	176	205 *	176	312 *	205 *	307 *
$\sum(dC/dh)_P$	1,28 *	0,53 *	0,58 *	0,36 *	1,22 *	0,35	0,47 *	0,14	0,20	0,13
NÓ jus	*	*	*			*		*		*
$\sum(dh/dC)_T$	110	205	175	245 *	238 *	235 *	235	353 *	274 *	354 *
$\sum(dC/dh)_T$	11,45 *	7,12 *	6,41 *	5,41 *	4,64	4,24	3,76	4,64 *	4,48	5,89 *
TUBOS	5	3	4	9	13	17				
C real	100	100	100	100	120	100				
C: $\sum(dh/dC)_P$	101,4	99,6	100,4	97,9	120,0	100,0				
C: $\sum(dC/dh)_P$	99,9	100,1	100,1	100,3	104,4	86,3				
C: NÓ jus	100,0	100,0	100,0	100,1	120,0	100,0				
C: $\sum(dh/dC)_T$	103,5	99,7	100,2	95,0	120,0	100,0				
C: $\sum(dC/dh)_T$	99,9	100,1	100,0	99,6	120,2	100,1				

Tabela 8.2 – cinco tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%), 9(11%), 13(9%) – total: 75% (rede L)

NÓ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Sigma(dh/dC)_P$	99	175 *	150	169	175	196 *	170	268 *	185 *	247 *
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,95 *	0,36 *	0,41 *	0,23	0,22	0,24 *	0,30 *	0,12	0,15	0,11
NÓ jus	*	*	*			*		*		
$\Sigma(dh/dC)_T$	110	205	175	245 *	238 *	235	235	353 *	274 *	354 *
$\Sigma(dC/dh)_T$	11,4 *	7,12 *	6,41 *	5,41 *	4,64	4,24	3,76	4,64	4,48	5,89 *
TUBOS	5	3	4	9	13	17				
C real	100	100	100	100	120	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	104,3	99,9	100,2	93,9	120,0	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	100,0	100,0	100,0	100,1	120,0	—				
C: NÓ jus	100,0	100,0	100,0	100,1	120,0	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	109,4	99,4	100,4	89,0	119,7	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	100,0	100,1	100,0	99,6	120,3	—				

Tabela 8.3 – quatro tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%), 9(11%) – total: 66% (rede L)

NÓ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Sigma(dh/dC)_P$	97	170 *	144	161	165	187 *	165	179 *	166	175 *
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,45 *	0,16 *	0,25 *	0,11	0,12	0,13 *	0,10	0,11	0,10	0,10
NÓ jus	*	*	*			*				
$\Sigma(dh/dC)_T$	110	205	175	245 *	238	235	235	353 *	274 *	354 *
$\Sigma(dC/dh)_T$	11,45 *	7,12 *	6,41 *	5,41	4,64	4,24	3,76	4,64	4,48	5,89 *
TUBOS	5	3	4	9	13	17				
C real	100	100	100	100	—	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	102,0	100,4	99,6	96,9	—	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	100,0	100,0	100,0	100,1	—	—				
C: NÓ jus	100,0	100,0	100,0	100,1	—	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	103,1	99,3	100,8	95,5	—	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	100,0	100,0	100,0	100,1	—	—				

Tabela 8.4 – três tubos calibrados: 5(23%), 3(19%), 4(13%) – total: 55% (rede L)

NÓ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Sigma(dh/dC)_P$	91	158 *	131	138 *	145 *	132	131	133	138	134
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,28 *	0,08	0,17 *	0,07	0,07	0,11 *	0,07	0,08	0,07	0,08
NÓ jus	*	*	*							
$\Sigma(dh/dC)_T$	110	205	175	245	238	235	235	353 *	274 *	354 *
$\Sigma(dC/dh)_T$	11,45 *	7,12 *	6,41 *	5,41	4,64	4,24	3,76	4,64	4,48	5,89
TUBOS	5	3	4	9	13	17				
C real	100	100	100	—	—	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	99,4	100,5	99,7	—	—	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	100,0	100,1	100,4	—	—	—				
C: NÓ jus	100,0	100,0	100,0	—	—	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	100,1	98,4	102,0	—	—	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	100,0	100,0	100,0	—	—	—				

Tabela 8.5 – dois tubos calibrados: 5(23%), 3(19%) – total: 42% (rede L)

NÓ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Sigma(dh/dC)_P$	85	88	120 *	96	93	115 *	99	108	96	105
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,11 *	0,06	0,08*	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04
NÓ jus	*		*							
$\Sigma(dh/dC)_T$	110	205	175	245	238	235	235	353 *	274	354 *
$\Sigma(dC/dh)_T$	11,45 *	7,12 *	6,41	5,41	4,64	4,24	3,76	4,64	4,48	5,89
TUBOS	5	3	4	9	13	17				
C real	100	100	—	—	—	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	100,0	100,4	—	—	—	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	100,0	100,0	—	—	—	—				
C: NÓ jus	100,0	100,0	—	—	—	—				
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	100,0	100,2	—	—	—	—				
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	100,1	100,0	—	—	—	—				

De uma maneira geral, pode-se notar que os melhores resultados foram aqueles obtidos com os conjuntos de estações de monitoramento dados pelos métodos $\Sigma(dC/dh)_{\text{Parcial}}$, NÓ de jusante, e $\Sigma(dC/dh)_{\text{Total}}$, pois foi com esses métodos de seleção que os valores de $C_{\text{de cálculo}}$ mais se aproximaram dos valores de C_{real} , quando da convergência do processo, em termos de pressão.

8.3 Etapa de validação

Consiste em aplicar novamente os métodos definidores das estações de monitoramento de pressão a uma outra rede em estudo, neste caso, a rede F, e verificar se existe alguma regularidade no fato de terem sido os métodos $\sum(dC/dh)_{\text{Parcial}}$, NÓ de jusante, e $\sum(dC/dh)_{\text{Total}}$ os mais indicados, como no caso do item 8.2.

Um método adicional será considerado neste caso, que, na realidade, é a adoção dos pontos considerados mais representativos por Ferreri, Nápoli e Tumbiolo, em seu artigo de 1994, do qual foi extraída a rede F em questão. Será aqui designado por método dos italianos. O número de estações de monitoramento de pressões variou de 7 a 2 NÓs, enquanto o número de tubos calibrados manteve-se sempre igual a 5, e os mesmos tubos, conforme descrito no capítulo anterior. As tabelas com os resultados seguem a mesma padronização daqueles referentes à rede anterior, e são apresentados a seguir:

Tabela 8.6 – sete NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M. italianos					*			*	*		*			*	*	*
$\Sigma(dh/dC)_T$	312	316	322*	325*	312	321	324*	321	315	308	340*	332*	319	331*	311	335*
$\Sigma(dh/dC)_P$	291*	278	277	276	280	288*	285	284	286*	285*	285	286*	281	285*	286*	282
$\Sigma(dC/dh)_T$	47,1*	41,1*	35,0	41,5*	44,8*	38,9	38,9	39,9	42,8*	44,0*	38,6	33,5	35,2	32,4	42,0*	32,4
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,29	1,03*	1,03*	2,37*	2,23*	2,12*	0,57	0,53	0,45	1,12*	0,64*	0,51	0,57	0,43	0,51	0,53
NÓ jus	*	*			*	*		*		*					*	
TUBOS	1	35	34	4	2	$\Sigma [Ci - C_{real}]$										
C real	80	70	70	80	80	0										
C: italianos	74,0	70,6	72,9	104,0	101,8	55,3										
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	81,0	70,1	69,0	78,0	82,5	6,6										
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	79,7	69,7	70,7	80,5	78,8	3,0										
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	80,0	69,9	70,1	80,2	79,7	0,7										
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	80,1	70,1	70,0	80,6	79,4	1,4										
C: NÓ jus	80,0	69,9	70,1	80,3	79,6	0,9										

Tabela 8.7 – seis NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M. italianos								*	*		*			*	*	*
$\Sigma(dh/dC)_T$	312	316	322	325*	312	321	324*	321	315	308	340*	332*	319	331*	311	335*
$\Sigma(dh/dC)_P$	291*	278	277	276	280	288*	285	284	286*	285	285	286*	281	285*	286*	282
$\Sigma(dC/dh)_T$	47,1*	41,1	35,0	41,5*	44,8*	38,9	38,9	39,9	42,8*	44,0*	38,6	33,5	35,2	32,4	42,0*	32,4
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,29	1,03*	1,03*	2,37*	2,23*	2,12*	0,57	0,53	0,45	1,12*	0,64	0,51	0,57	0,43	0,51	0,53
NÓ jus	*				*	*		*		*					*	
TUBOS	1	35	34	4	2	$\Sigma [Ci - C_{real}]$										
C real	80	70	70	80	80	0										
C: italianos	76,4	70,3	71,8	92,9	92,2	30,8										
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	82,2	69,6	68,3	79,0	87,5	12,8										
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	79,7	70,0	70,3	79,6	79,5	1,5										
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	80,0	70,0	70,0	79,7	80,2	0,5										
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	79,9	70,0	70,2	80,3	79,0	1,6										
C: NÓ jus	80,0	69,9	70,1	80,2	79,7	0,7										

Tabela 8.8 – cinco NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M. italianos								*	*		*			*		*
$\Sigma(dh/dC)_T$	312	316	322	325*	312	321	324	321	315	308	340*	332*	319	331*	311	335*
$\Sigma(dh/dC)_P$	291*	278	277	276	280	288*	285	284	286*	285	285	286*	281	285	286*	282
$\Sigma(dC/dh)_T$	47,1*	41,1	35,0	41,5	44,8*	38,9	38,9	39,9	42,8*	44,0*	38,6	33,5	35,2	32,4	42,0*	32,4
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,29	1,03	1,03*	2,37*	2,23*	2,12*	0,57	0,53	0,45	1,12*	0,64	0,51	0,57	0,43	0,51	0,53
NÓ jus	*				*	*				*					*	
TUBOS	1	35	34	4	2	$\Sigma [Ci - C_{real}]$										
C real	80	70	70	80	80	0										
C: italianos	76,2	70,6	71,8	91,0	89,5	26,7										
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	73,8	70,1	75,5	87,8	71,2	28,4										
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	82,7	69,4	67,8	85,7	82,3	13,5										
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	80,0	69,9	70,1	80,3	79,7	0,8										
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	80,9	69,1	70,1	81,4	79,5	3,8										
C: NÓ jus	80,0	69,9	70,1	80,3	79,7	0,8										

Tabela 8.9 – quatro NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M. italianos								*			*			*		*
$\Sigma(dh/dC)_T$	312	316	322	325	312	321	324	321	315	308	340*	332*	319	331*	311	335*
$\Sigma(dh/dC)_P$	291*	278	277	276	280	288*	285	284	286*	285	285	286*	281	285	286	282
$\Sigma(dC/dh)_T$	47,1*	41,1	35,0	41,5	44,8*	38,9	38,9	39,9	42,8*	44,0*	38,6	33,5	35,2	32,4	42,0	32,4
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,29	1,03	1,03	2,37*	2,23*	2,12*	0,57	0,53	0,45	1,12*	0,64	0,51	0,57	0,43	0,51	0,53
NÓ jus	*				*					*					*	
TUBOS	1	35	34	4	2	$\Sigma [Ci - C_{real}]$										
C real	80	70	70	80	80	0										
C: italianos	74,0	71,1	73,1	94,0	91,0	35,2										
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	81,2	70,2	69,1	76,2	76,2	9,9										
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	88,3	69,1	62,1	95,1	89,6	41,8										
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	77,9	71,7	70,4	77,7	75,4	11,1										
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	79,9	70,1	70,0	79,6	79,3	1,3										
C: NÓ jus	80,5	69,8	69,8	80,0	82,0	2,9										

Tabela 8.10 – três NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M. italianos											*			*		*
$\Sigma(dh/dC)_T$	312	316	322	325	312	321	324	321	315	308	340*	332*	319	331	311	335*
$\Sigma(dh/dC)_P$	291*	278	277	276	280	288*	285	284	286*	285	285	286	281	285	286	282
$\Sigma(dC/dh)_T$	47,1*	41,1	35,0	41,5	44,8*	38,9	38,9	39,9	42,8	44,0*	38,6	33,5	35,2	32,4	42,0	32,4
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,29	1,03	1,03	2,37*	2,23*	2,12*	0,57	0,53	0,45	1,12	0,64	0,51	0,57	0,43	0,51	0,53
NÓ jus	*				*										*	
TUBOS	1	35	34	4	2	$\Sigma [Ci - Creal]$										
C real	80	70	70	80	80	0										
C: italianos	73,7	71,0	73,4	97,2	90,5	38,4										
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	74,0	69,0	75,6	101,6	101,4	55,6										
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	80,8	74,6	64,0	70,7	86,0	26,7										
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	76,6	73,1	70,3	74,9	73,7	18,2										
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	73,4	75,8	70,0	86,1	84,0	22,5										
C: NÓ jus	79,5	70,5	69,9	76,5	81,1	5,7										

Tabela 8.11 – dois NÓs monitorados (rede F)

NÓ	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M. italianos											*					*
$\Sigma(dh/dC)_T$	312	316	322	325	312	321	324	321	315	308	340*	332	319	331	311	335*
$\Sigma(dh/dC)_P$	291*	278	277	276	280	288*	285	284	286	285	285	286	281	285	286	282
$\Sigma(dC/dh)_T$	47,1*	41,1	35,0	41,5	44,8*	38,9	38,9	39,9	42,8	44,0	38,6	33,5	35,2	32,4	42,0	32,4
$\Sigma(dC/dh)_P$	0,29	1,03	1,03	2,37*	2,23*	2,12	0,57	0,53	0,45	1,12	0,64	0,51	0,57	0,43	0,51	0,53
NÓ jus	*				*											
TUBOS	1	35	34	4	2	$\Sigma [C_i - C_{real}]$										
C real	80	70	70	80	80	0										
C: italianos	70,1	76,7	68,6	118,3	95,8	72,1										
C: $\Sigma(dh/dC)_T$	70,1	76,7	68,6	118,3	95,8	72,1										
C: $\Sigma(dh/dC)_P$	73,6	79,6	67,3	68,1	74,3	36,3										
C: $\Sigma(dC/dh)_T$	77,2	72,8	70,1	79,1	73,3	13,3										
C: $\Sigma(dC/dh)_P$	77,4	72,7	69,3	93,5	93,6	33,1										
C: NÓ jus	77,2	72,8	70,1	79,1	73,3	13,3										

A seguir, são ilustrados gráficos das situações expostas, sendo que a grandeza observada é o Erro Percentual do coeficiente C, em relação a seu valor real: $EPC = \{[C - C_{real}] / C_{real}\} \times 100$.

1º CASO: Tubo 1-

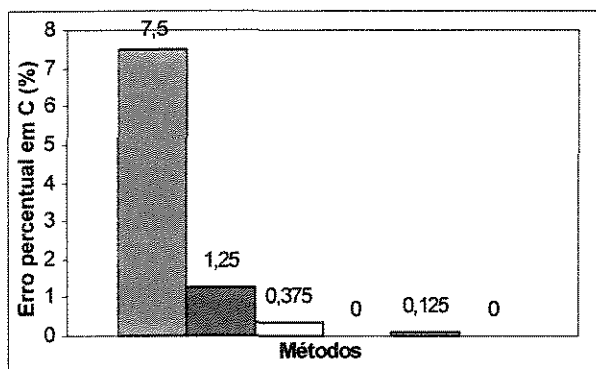


Figura 8.4 – Sete NÓs monitorados

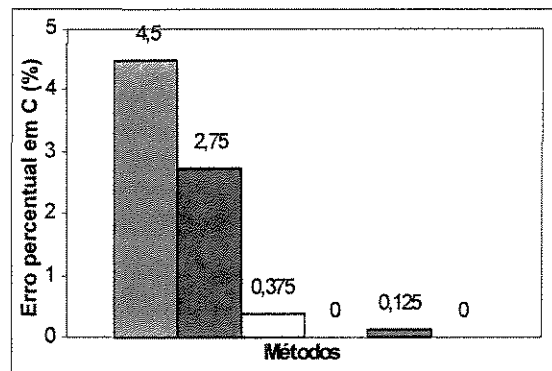


Figura 8.5 – Seis NÓs monitorados

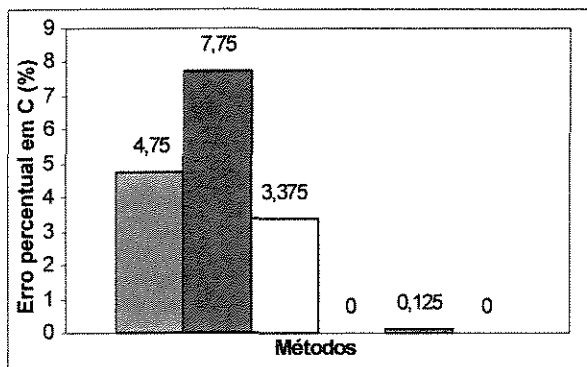


Figura 8.6 – Cinco NÓs monitorados

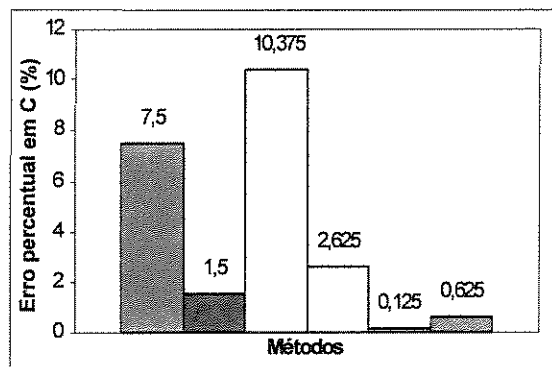


Figura 8.7 – Quatro NÓs monitorados

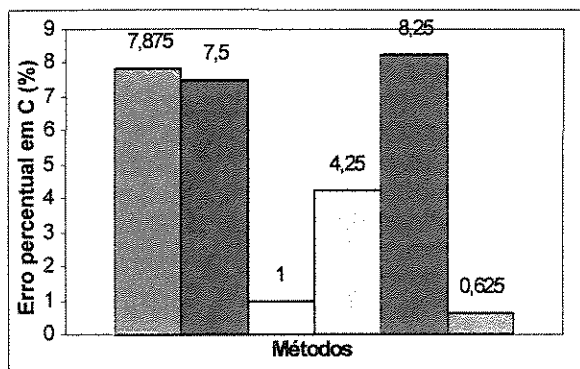


Figura 8.8 – Três NÓs monitorados

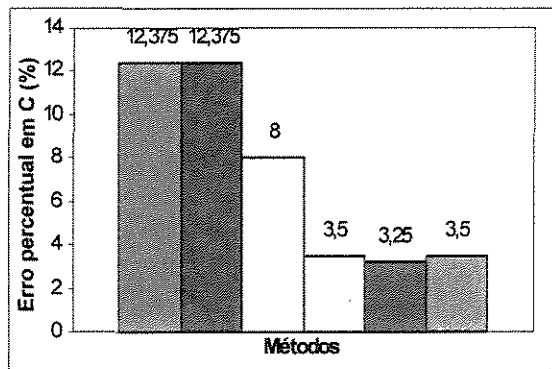


Figura 8.9 – Dois NÓs monitorados

Legenda:		Método italianos		Método $\sum(dC/dh)_{TOTAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{TOTAL}$		Método $\sum(dC/dh)_{PARCIAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{PARCIAL}$		Método NÓ jussante

2º CASO: Tubo 35-

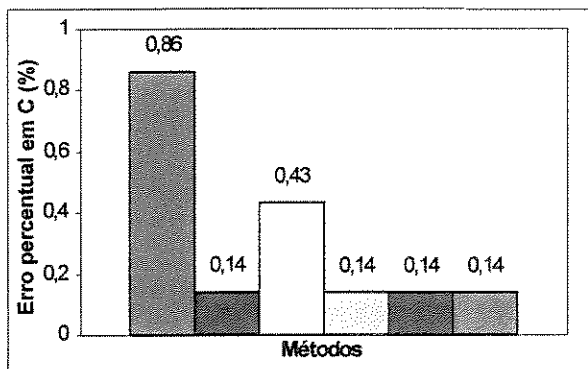


Figura 8.10 – Sete NÓs monitorados

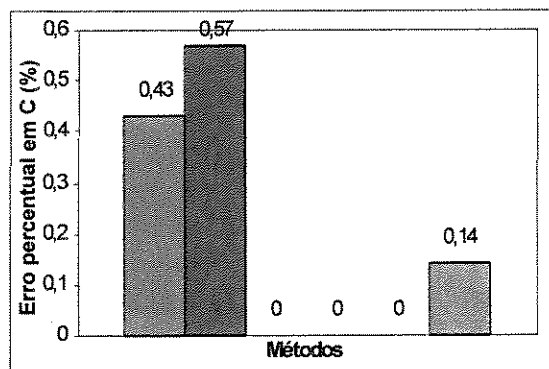


Figura 8.11 – Seis NÓs monitorados

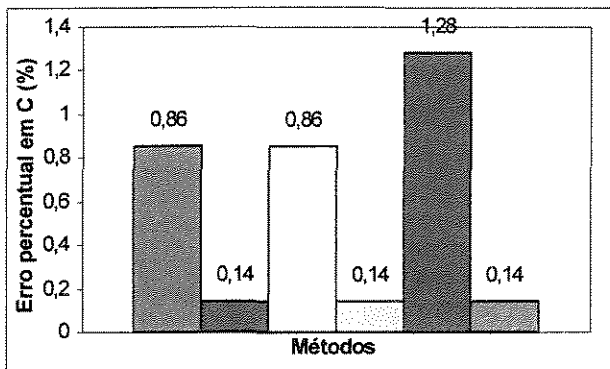


Figura 8.12 – Cinco NÓs monitorados

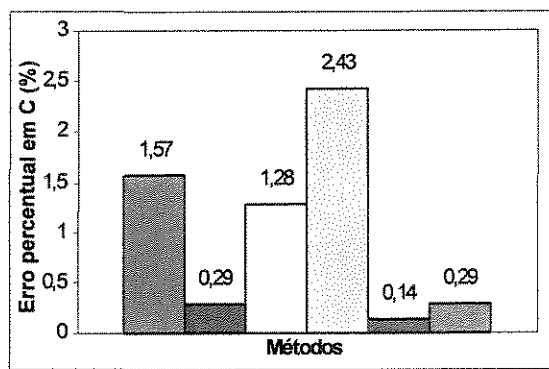


Figura 8.13 – Quatro NÓs monitorados

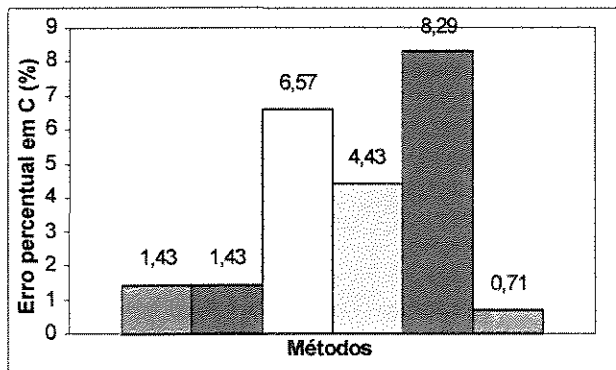


Figura 8.14 – Três NÓs monitorados

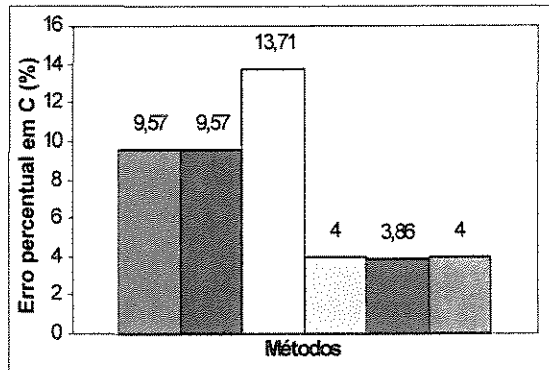


Figura 8.15 – Dois NÓs monitorados

Legenda:		Método italianos		Método $\Sigma(dC/dh)_{TOTAL}$
		Método $\Sigma(dh/dC)_{TOTAL}$		Método $\Sigma(dC/dh)_{PARCIAL}$
		Método $\Sigma(dh/dC)_{PARCIAL}$		Método NÓ jusante

3º CASO: Tubo 34-

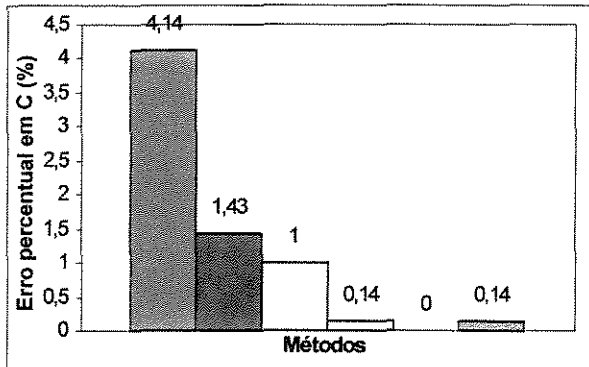


Figura 8.16 – Sete NÓs monitorados

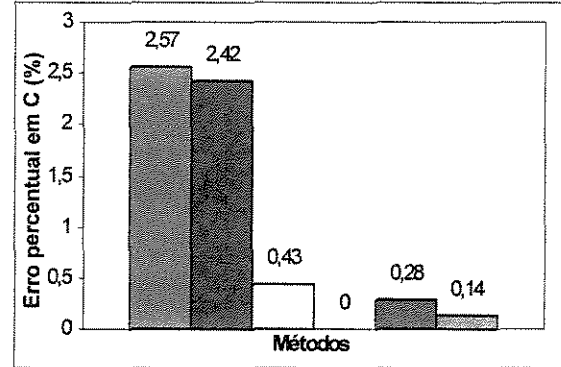


Figura 8.17 – Seis NÓs monitorados

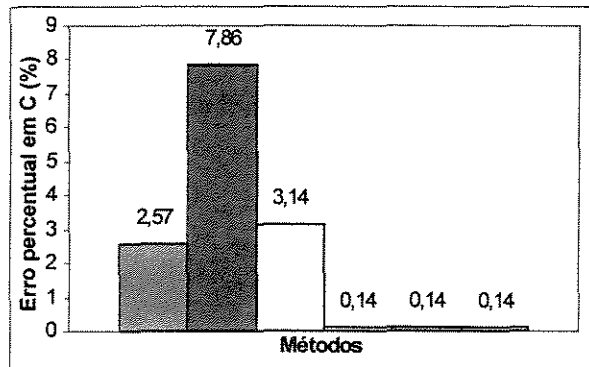


Figura 8.18 – Cinco NÓs monitorados

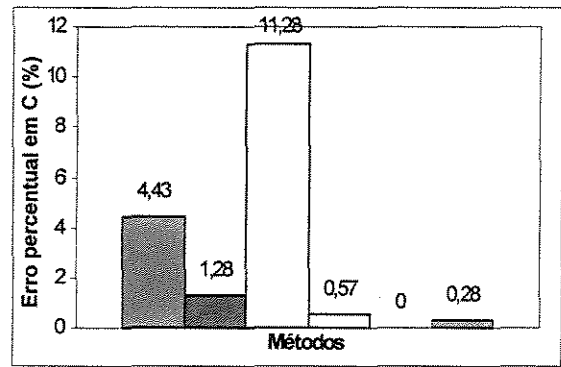


Figura 8.19 – Quatro NÓs monitorados

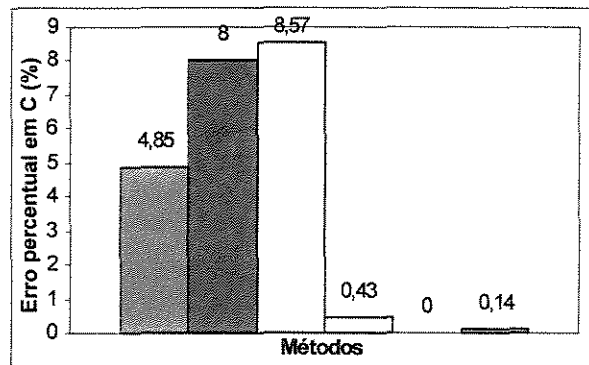


Figura 8.20 – Três NÓs monitorados

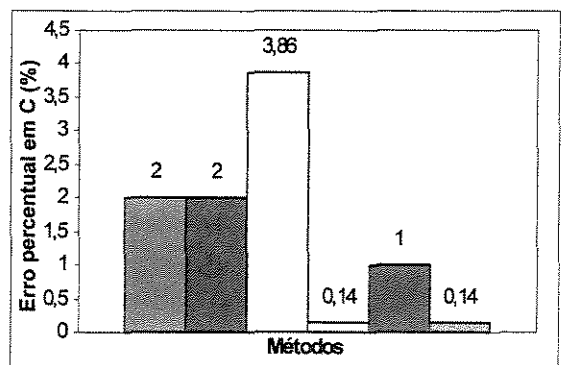


Figura 8.21 – Dois NÓs monitorados

Legenda:		Método italianos		Método $\sum(dC/dh)_{TOTAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{TOTAL}$		Método $\sum(dC/dh)_{PARCIAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{PARCIAL}$		Método NÓ jusante

4º CASO: Tubo 4-

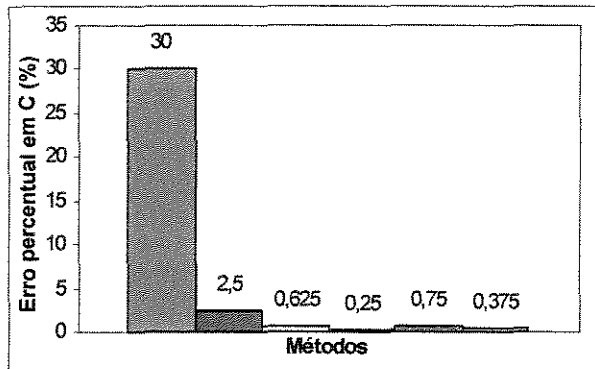


Figura 8.22 – Sete NÓs monitorados

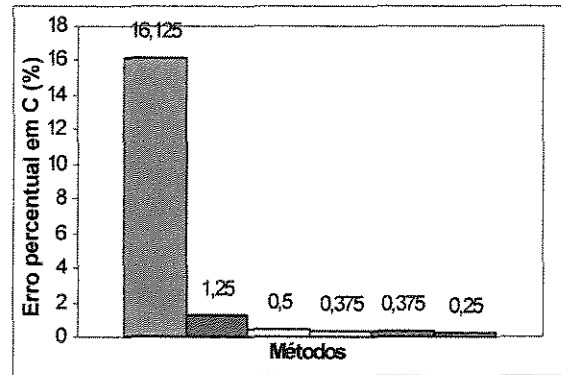


Figura 8.23 – Seis NÓs monitorados

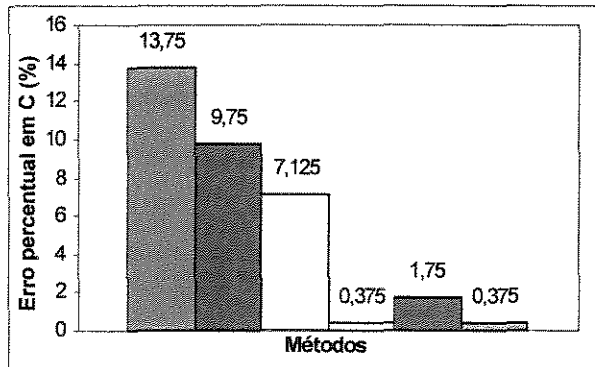


Figura 8.24 – Cinco NÓs monitorados

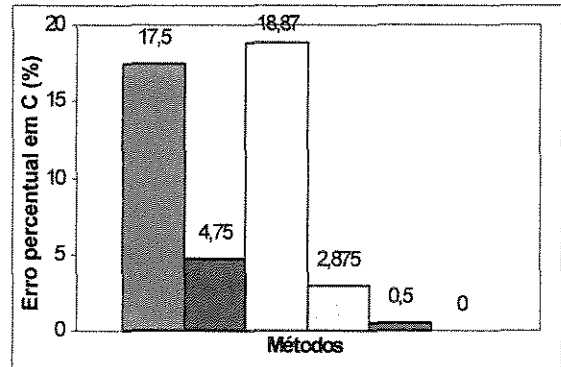


Figura 8.25 – Quatro NÓs monitorados

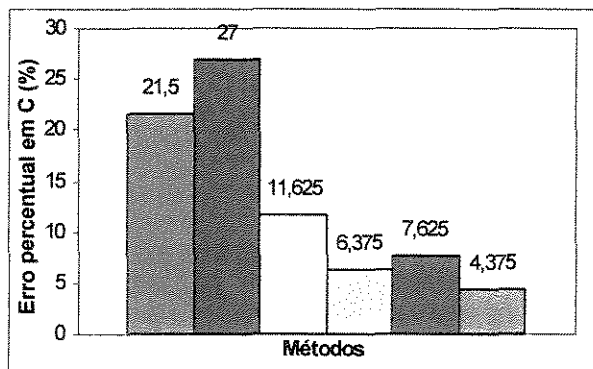


Figura 8.26 – Três NÓs monitorados

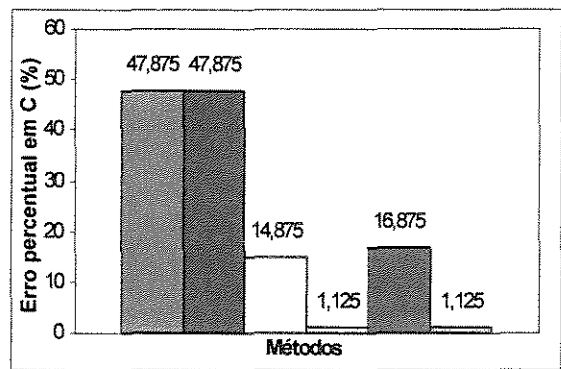


Figura 8.27 – Dois NÓs monitorados

Legenda:		Método italiano		Método $\sum(dC/dh)_{TOTAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{TOTAL}$		Método $\sum(dC/dh)_{PARCIAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{PARCIAL}$		Método NÓ jusante

5º CASO: Tubo 2-

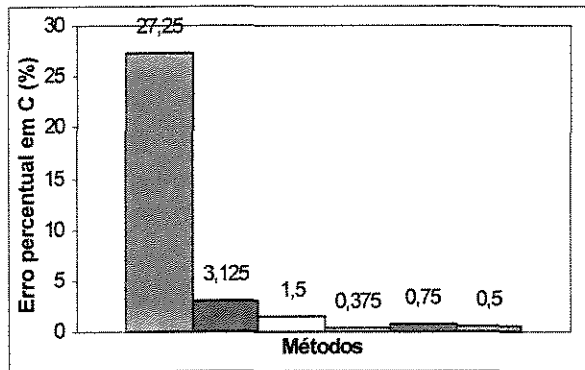


Figura 8.28 – Sete NÓs monitorados

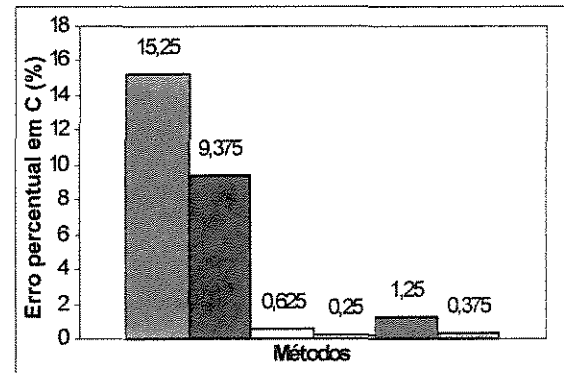


Figura 8.29 – Seis NÓs monitorados

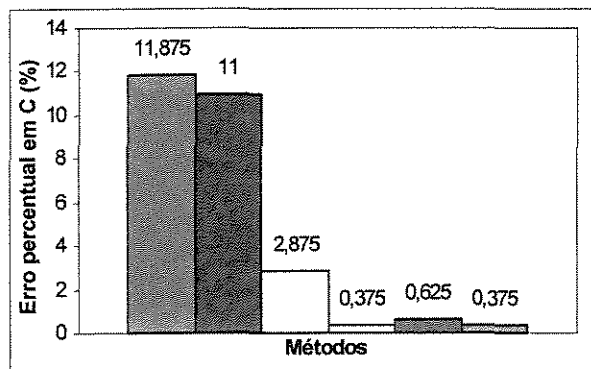


Figura 8.30 – Cinco NÓs monitorados

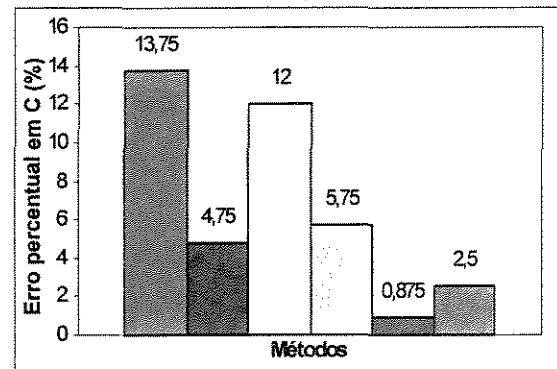


Figura 8.31 – Quatro NÓs monitorados

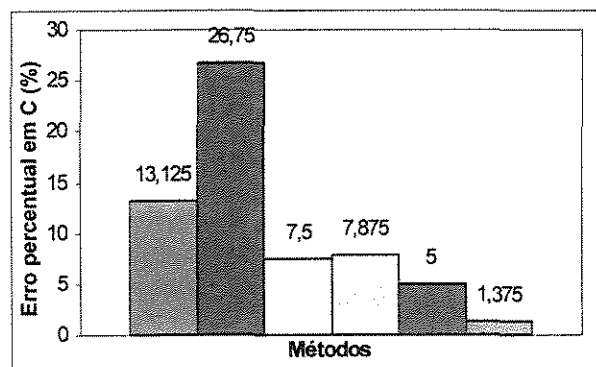


Figura 8.32 – Três NÓs monitorados

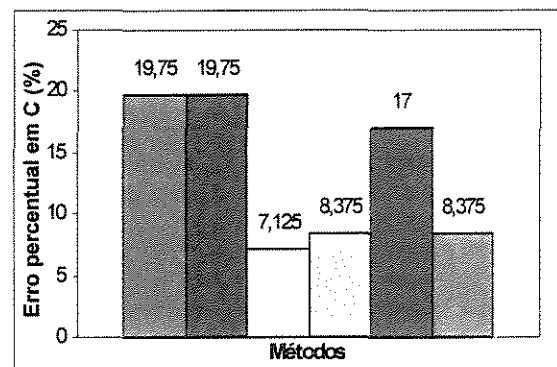


Figura 8.33 – Dois NÓs monitorados

Legenda:		Método italianos		Método $\sum(dC/dh)_{TOTAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{TOTAL}$		Método $\sum(dC/dh)_{PARCIAL}$
		Método $\sum(dh/dC)_{PARCIAL}$		Método NÓ jusante

Os métodos do NÓ de jusante e do $\sum(dC/dh)_{\text{Total}}$ foram os que apresentaram melhores resultados, corroborando com os resultados da etapa de verificação (item 8.2). O método do $\sum(dC/dh)_{\text{Parcial}}$, que também havia estado dentre os melhores naquela etapa, continuou de certa forma satisfatório, porém não tanto quanto os outros dois anteriormente citados.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi apresentada uma nova metodologia para calibração de redes de distribuição de água, mais especificamente falando, para determinação das rugosidades reais das tubulações mais representativas, através do monitoramento de pressão em alguns pontos da rede.

Na verdade, tratou-se de um método inverso, onde foram inicialmente estimados valores de rugosidade das tubulações, e o sistema simulador SPERTS procedeu ao cálculo direto da rede, tantas vezes quanto necessárias para que as pressões calculadas, a cada nova iteração do programa, se igualassem às pressões monitoradas (que, na verdade, não foram medidas, mas sim simuladas e tomadas como reais).

Nesse momento, foram observados os valores das rugosidades que levaram a tal resultado, e o que foi verificado é que freqüentemente diferiam das rugosidades reais. Nesses termos, quando da convergência entre pressões calculadas e “monitoradas”, nas situações em que quanto mais os coeficientes de rugosidade aí observados se aproximavam dos reais, mais adequados eram os NÓs adotados como estações de monitoramento, para os fins da calibração. Conforme já citado anteriormente, os coeficientes de rugosidade reais da rede podiam ser conhecidos, pois não se tratou de casos de monitoramento em campo, mas de simulações teóricas.

Para que, a cada nova iteração, os valores de C fossem estimados de forma a fazer com que o valor da pressão calculada convergisse para a pressão real, foi utilizado o algoritmo de otimização de Nelder-Mead.

Um interessante avanço foi, então, a bom desempenho do Modelo Híbrido, resultante do acoplamento entre o simulador baseado no TMA e o otimizador de Nelder-Mead, acrescido de que seu processamento se mostrou bastante veloz.

Um outro avanço foi apresentar metodologias para a identificação de estações de monitoramento que dessem bons resultados na calibração. As metodologias foram testadas em determinada rede, e depois validadas em outra, essa última bem maior. Todavia, recomenda-se ainda uma série de pesquisas referentes a essa questão, principalmente quanto a padrões para redes grandes e pequenas, e implicação da adoção de estações de monitoramento subseqüentes.

Ao longo da pesquisa surgiram várias indagações e inquietações, frutos de revisão bibliográfica, de sugestões de professores, e do próprio encaminhamento do trabalho. Porém, muitas foram deixadas, não “de lado”, mas para uma oportunidade futura, objetivando não se desviar muito do eixo central do trabalho.

Assim, são apresentadas sugestões para a continuidade das investigações:

- Verificação se a calibração em regime transitório, utilizando-se poucas estações de monitoramento, tem a mesma precisão da calibração no regime permanente, com mais estações.
- Inserção de análises estatísticas no processo de calibração.
- Atribuição de “pesos” para as diferentes estações de monitoramento.
- Monitoramento de vazão nos trechos, juntamente com pressões nodais, aqui abordadas isoladamente, verificando a possível melhora nos resultados.
- Atribuição de “desvios” nas rugosidades reais dos tubos que não seriam calibrados, para supor um possível erro de dados cadastrais.

Por fim, satisfeitos com a pesquisa realizada e os resultados obtidos, embora com a sensação de querer sempre fazer um pouco mais, acreditamos ter dado uma contribuição ao setor, um pequeno avanço... e somos felizes por termos tido essa oportunidade.

ANEXO – Listagem para uso do sistema CALIBRA

DADOS DA TOPOLOGIA

1. Criação/Edição de arquivo de Topologia

Um arquivo de topologia conterá os elementos necessários para uma simulação em regime permanente de uma rede hidráulica de condutos forçados. Para a criação de um arquivo de topologia, forneça um nome para o arquivo no quadro de entrada e utilize o quadro de Relatórios para a criação do arquivo de dados. Após o fornecimento de todos os dados, "clique" no botão **salvar** no quadro topologia para salvar o arquivo fornecido. Este arquivo poderá ser lido fornecendo seu nome e "clique" o botão **ler**. O arquivo lido aparecerá no quadro de relatórios poderá ser editado. (Como sugestão para facilitar o uso do programa salve arquivos de topologia com a extensão .top. Exemplo: ex1.top).

Composição do Arquivo de topologia

O arquivo de topologia é composto necessariamente pelas linhas contendo:

- Uma linha contendo a descrição do arquivo (máximo de 235 caracteres).
- Uma linha contendo Número de Nós, Número de Elementos, Número de Tubos, Número de Reservatórios e Número de Nós com Demanda
- Um número de linhas igual ao número de Tubos contendo as informações de cada Tubo: Número do Elemento, Número do Nó de Montante, Número do Nó de Jusante, Diâmetro (em metro), Comprimento (em metro), Coeficiente de Hazen-Willian (adimensional), Soma dos Coeficientes de perdas localizadas.
- Um número de linhas igual ao número de reservatórios, contendo as informações de cada Reservatório: Número do Elemento, Número do Nó de Montante, Número do Nó de Jusante, Nível do Reservatório (em metro).
- Um número de linhas igual ao número de Nós com Demandas, contendo as informações de cada Nó com demanda: Número do NO, Vazão de demanda (em m³/s).

2. Leitura de Dados da Topologia (do SPERTS)

No quadro de entrada do nome do arquivo de topologia forneça o nome de um arquivo de dados criado anteriormente. Este nome deverá conter a extensão do arquivo (Ex. Topologia1.Dat). O arquivo de dados deverá conter dados suficientes para calcular uma rede em regime permanente. Os dados lidos são apresentados no quadro destinado a relatórios para conferência e edição.

3. Salvando dados da topologia

Os dados que estejam apresentado no quadro de relatórios poderão ser salvos em arquivo através do botão salvar. Um nome para o arquivo deverá estar previamente escrito no quadro de entrada do nome de arquivo.

SIMULAÇÕES

1. Simulando o regime permanente

Para simular o regime permanente de uma dada topologia, preencha o quadro de edição de nome da topologia com o nome do arquivo que se deseja simular (a extensão é necessária). Não é necessário ler o dados da topologia preliminarmente para processá-la (opção ler), mas este recurso pode ser utilizado para verificar se a topologia esta correta.

Com o nome do arquivo da topologia digitado, passe o botão indicativo do painel de tipo da simulação para a posição Regime Permanente. “Clicando” no botão **processar** a rede será processada para cálculo do regime permanente. Os resultados de simulação, tais como vazão nas tubulações e cargas nos NÓs serão apresentados no bloco de relatórios.

2. Executando uma calibração

Para executar uma calibração, preencha o quadro de edição de nome da topologia com o nome do arquivo que se deseja simular (a extensão é necessária). Não é necessário ler o dados da topologia preliminarmente para o processamento (opção ler), mas este recurso pode ser utilizado para verificar se a topologia está correta. Em seguida preencha o quadro de edição do nome do arquivo complementar, no quadro de edição apropriado. Não é necessário ler os dados complementares preliminarmente (opção ler associada), mas este recurso pode ser utilizado para edição do arquivo complementar.

Com os nomes dos arquivos de topologia e de dados complementares (monitoramento) preenchidos, passe o botão indicativo do painel de tipo da simulação para a posição Calibração. “Clicando” no botão **processar** a rede será processada para calibração dos tubos selecionados. Os resultados da simulação tais como vetores iniciais e finais dos coeficientes C, assim como, os valores finais destes estarão impressos no bloco de resultados.

DADOS PARA CALIBRAÇÃO

1. Criando os dados de monitoramento

Para obter as cargas nodais, devidas a um erro no coeficiente de rugosidade, pode-se simular uma topologia alterando os valores de C, para os tubos que se deseja modificar (tubos alterados).

Como sugestão acrescentar a letra **m** após o nome do arquivo, antes da extensão para indicar que o arquivo é modificado. Modificações para novas situações da mesma topologia poderão receber numeração seqüencial **m1**, **m2**, **m3**, etc. Exemplo: Para a topologia **EX1.top** pode-se criar modificações **EX1m.top**, **Ex1m1.top**, **EX1m2.top**, etc..

Com a topologia modificada pela alteração dos coeficientes, simula-se a rede em regime permanente. No quadro de relatórios será exibido a solução da rede. Serão exibidos os diversos nós da rede e suas respectivas cargas, que poderão ser copiados (**Ctrl-C**) deste relatório e colados para a planilha de entrada de dados de nós com cargas monitoras (**Ctrl-V**). Depois de preenchido os NÓS de cargas monitoradas, forneça o numero total de NÓS monitorados no quadro de edição sobre a tabela.

Para criar os dados para calibração, forneça na tabela 2 os tubos que sejam considerados na calibração. Além da indicação do tubo, forneça um indicativo de valor de C que se espera encontrar para o tubo (este é apenas uma estimativa para iniciar o processo de busca; escolha valores diferentes para os diversos tubos). Uma vez estabelecidos todos os tubos forneça este número total de tubos a calibrar no quadro de edição apropriado. As duas tabelas e quadros de edição constituem o que se chama *dados complementares* para a calibração.

2. Salvando os dados complementares.

Uma vez digitado os dados complementares estes deverão ser salvos através de um "clique" no botão **salvar** na parte correspondente da edição. Antes de salvar os dados, o quadro de edição solicitando o nome do arquivo complementar deverá ser preenchido. Como sugestão, recomenda-se o uso da extensão **.COP** para os arquivos complementares (Exemplo: **Ex1.cop**). Após o "clique" do botão **salvar**, os dados arquivados são mostrados na tela de relatório na forma como foram arquivados.

3. Lendo e editando os dados complementares

Um arquivo de dados complementares previamente salvo poderá ser lido e posteriormente editado, se desejado, fornecendo o nome do arquivo no quadro de edição apropriado e "clcando" o botão **ler**. Os dados lidos do arquivo aparecerão simultaneamente no quadro de relatório e nas tabelas de edição. Use as tabelas de edição para alterar os dados desejados (modificações no quadro de relatórios não terão efeito). Os dados modificados poderão ser salvos em outro arquivo, diferente do atual, se desejado, fornecendo o nome no quadro de edição apropriado e clicando sobre a opção **salvar**. Os arquivos modificados poderão receber a letra **m** após o nome atual do arquivo, antes da extensão (Exemplo: o arquivo **Ex1.COP** poderá gerar um arquivo modificado **EX1m.COP**), para facilitar sua identificação.

REFERÊNCIAS

1. AKITT, J. W. Function minimisation using the Nelder and Mead simplex method with limited arithmetic precision: the self regenerative simplex. **The Computer Journal**, v.20, n.1, p.84-85, feb.1977.
2. ALVES, M. B. M.; ARRUDA, S. M. **Como fazer referências**. Florianópolis, 2003.
Disponível em: <<http://www.ufsc.br>>. Acesso em: 29 jan. 2004.
3. ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H. Incertezas na calibração de redes de distribuição de água com dados transientes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju. **Anais...** CD-ROM.
4. BARTON, R. R.; IVEY Jr., J. S. Nelder-Mead simplex modifications for simulation optimization. **Management Science**, v.42, n.7, p.954-973, jul.1996.
5. BHAVE, P. R. Calibrating water distribution network models. **Journal of Environmental Engineering**, v.114, n.1, p. 120-136, feb.1988.
6. BOULOS, P. F.; WOOD, D. J. Explicit calculation of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.116, n.11, p. 1329-1344, nov.1990.
7. BUSH, C. A.; UBER, J. G. Sampling design methods for water distribution model calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.124, n.6, p.334-344, nov./dec.1998.
8. CHEUNG, P. B.; SOUZA, R. S. Influência do zoneamento de uma rede hidráulica na acurácia de um modelo de calibração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Anais...** CD-ROM.
9. COULBECK, B. A computer program for calibration of water distribution systems. **Journal of The Institution of Water Engineers and Scientists**, v.38, n.1, p.79-80, feb.1984.
10. _____. An application of hierarchical optimization in calibration of large-scale water networks. **Optimal Control Applications and Methods**, v.6, p.31-42, 1985.

11. EGGENER, C. L.; POLKOWSKI, L. B. Network models and the impact of modeling assumptions. **Journal of AWWA: management and operations**, p.189-196, apr.1976.
12. FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBILOLO, A. Calibration of roughness in water distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER PIPELINE SYSTEMS, 2., 1994, Edimburgo. **Proceedings...** p.379-396.
13. GAMBALE, S. R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
14. GARCÍA-SERRA, J. **Estudio y mejora de las técnicas de calibración de modelos de redes hidráulicas**. 1988. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Universidade Politécnica de Valência, Valência, 1988.
15. GENOVEZ, A. I. B.; TEIXEIRA, E. N. **Instruções para apresentação de dissertações/teses na FEC**. Campinas: 1999. 42 p. Trabalho não publicado.
16. GRAYMAN, W. M. et al. Special topics in water distribution modeling. In: STRAFACI, A. M. (Ed.). **Essential Hydraulics and Hydrology**. Waterbury: Heastad Press, 1998. p.1-60.
17. GRECO, M.; DEL GIUDICE, G. New approach to water distribution network calibration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.125, n.8, p. 849-854, aug.1999.
18. KOELLE, E. **Transientes Hidráulicos**. São Paulo: [198?]. Trabalho não publicado.
19. LAMONT, P. A. Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness. **Journal of AWWA: research and technology**, p.274-280, may 1981.
20. LANSEY et al. Calibration assessment and data collection for water distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 127, n. 4, p. 270-279, apr.2001.
21. LANSEY, K. E.; BASNET, C. Parameter estimation for water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.117, n.1, p.126-144, jan./feb.1991.
22. LEE, B. H.; DEININGER, R. A. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. **Journal of Environmental Engineering**, v.118, n.1, p.4-16, jan./feb.1992.
23. LIGGET, J. A.; Network monitoring and the algorithmic location of leaks under steady and unsteady conditions. In: **Water Supply Systems: state of the art and future trends**. Southampton: Computational mechanics publications, 1993. p.253-270.
24. LUVIZOTTO Jr., E. **Controle operacional de redes de abastecimento de água auxiliado por computador**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

25. _____. Programa de Pós-Doutoramento no Exterior: Relatório final. Valência: 1998. 204 p.
26. _____. **Análise de redes hidráulicas a condutos forçados em regime permanente através do método elástico.** Campinas: 1999. 63 p. Trabalho não publicado.
27. LUVIZOTTO Jr., E.; OCAMPOS, A. Comparando os métodos de Levenberg-Marquardt e Nelder-Mead em modelos de detecção de fugas. In: SEMINÁRIO HISPANO-BRASILEIRO SOBRE PLANIFICACION, PROYECTO Y OPERACION DE REDES DE ABASTECIMIENTO, 2., 2002, Valência. **Anais...**
28. LUVIZOTTO Jr., E.; PIZZO, H. S. Properties and analysis of searching techniques for calibrating a water distribution network with a model. **Acta Universitatis Carolinae – Geologica**, Praga, vol. 46, n. 2/3, p. 282-285, 2002.
29. _____. Acoplamento do TMA (time marching approach) e do método de Nelder-Mead em um modelo para detecção de fugas. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 9., 2000, Porto Seguro. **Anais...** p.333-342.
30. LUVIZOTTO Jr., E.; SOLIANI, R.; PIZZO, H. S.; JAQUIÊ, L. Análise de técnicas de busca para um modelo de detecção de fugas. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 19., 2000, Córdoba. **Anais...** p.309-318.
31. MEIER, R. W.; BARKDOLL, B. D. Sampling design for network model calibration using genetic algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.126, n.4, p.245-250, jul./aug.2000.
32. MULTISIMPLEX: the simplex optimization method. Disponível em: http://www.multisimplex.com/simplex_m.htm. Acesso em: 17 jan. 2002.
33. NASH, G. A.; KARNEY, B. W. Efficient inverse transient analysis in series pipe systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.125, n.7, p.761-764, jul.1999.
34. NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The Computer Journal**, v.7, p.308-313, 1965.
35. OLSSON, D. M.; NELSON, L. S. The Nelder- Mead simplex procedure for function minimization. **Technometrics**, v.17, n.1, p.45-51, 1975.
36. OLSTHOORN, T.; POETER, E.; MOORMAN, J. Lessons from analyzing trial-and-error calibrated models for prediction reliability. **Acta Universitatis Carolinae – Geologica**, vol. 46, n. 2/3, p. 183-189, 2002.
37. ORMSBEE, L. E. Implicit network calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.115, n.2, p.243-257, mar.1989.

38. ORMSBEE, L. E.; LINGIREDDY, S. Calibrating hydraulic network models. **Journal of AWWA**, v.89, n.2, p.42-50, feb.1997.
39. ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J. Explicit pipe network calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.112, n.2, p.166-182, apr.1986.
40. ORTÍZ, V. J. B. et al. **Calibración de modelos de simulación de redes de distribución de agua potable**. México: [199-]. 55p.
41. PHILLIPS, D. A. A preliminary investigation of function optimisation by a combination of methods. **The Computer Journal**, v.17, n.1, p.75-79, feb.1974.
42. PIZZO, H. S.; LUVIZOTTO Jr., E. Demands calibration in water distribution networks by a Hybrid Method. In: HOLZ, P. K. et al. (Org.). **Advances in Hydro-Science and Engineering**. Varsóvia, 2002. v. 5. CD-ROM.
43. _____. Calibração de modelos de distribuição de água através do algoritmo de Nelder-Mead. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** CD-ROM.
44. PIZZO, H. S.; MORAIS, D. R.; SILVA, M. D. Comparação entre a fórmula universal e a fórmula de Hazen-Williams na determinação da perda de carga em condutos hidráulicos. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UFJF, 4., 2000, Juiz de Fora. **Anais...** p.1085-1094.
45. PRESS, W. H. et al. Downhill simplex method in multidimensions. In: _____. **Numerical Recipes in Pascal: the art of scientific computing**. Cambridge, 1989. p.326-330.
46. RAUBER, J. J.; SOARES, M. (Coord.). **Apresentação de trabalhos científicos: normas e orientações práticas**. 3. ed. Passo Fundo: Ediupf, 2003.
47. REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 6, p. 317-326, nov./dec.1997.
48. RIGHETTO, A. M. Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 3, p. 33-44, jul./set. 2001.
49. SHAMIR, U.; HOWARD, C. D. D. Engineering analysis of water-distribution systems. **Journal of AWWA: water technology/distribution**, p. 510-514, sep.1977.
50. SHARP, W. W.; WALSKI, T. M. Predicting internal roughness in water mains. **Journal of AWWA: management and operations**, p.34-40, nov.1988.
51. SHIMADA, M. Time-marching approach for pipe steady flows. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.114, n.11, p.1301-1320, nov.1988.

52. SILVA, F. G. B. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos**. 2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
53. SILVA, F. G. B. et al. Aplicação de método de determinação da rede de amostragem ótima para calibração de sistemas de distribuição de água de abastecimento através de algoritmos genéticos (AGs). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju. **Anais...** CD-ROM.
54. SOLIANI, R. **Otimização de Recursos Hídricos**, 1999. 16 p.. Notas de aula. Impresso.
55. SOLOMATINE, D. P. Genetic and other global otimization algorithms – comparison and use in calibration problems. In: INTERNAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS, 1998, Rotterdam. **Proceedings...**
56. TOMICK, J. J.; ARNOLD, S. F.; BARTON, R. R. Sample size selection for improved Nelder-Mead performance. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1995. **Proceedings...** p.341-345.
57. WALSKI, T. M. Technique for calibrating network models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.109, n.4, p.360-372, oct.1983.
58. _____. Assuring accurate model calibration. **Journal of AWWA: management and operations**, p.38-41, dec.1985.
59. _____. Case study: pipe network model calibration issues. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.112, n.2, p. 238-249, apr.1986.
60. _____. Sherlock Holmes meets Hardy-Cross or model calibration in Austin, Texas. **Journal of AWWA: management and operations**, p. 34-38, mar.1990.
61. WALTERS, F. H. et al. The variable size simplex algorithm. In: **Sequential Simplex Optimization**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. p. 103-126.
62. WRIGHT, M. H. Direct search methods: once scorned, now respectable. In: DUNDEE BIENNIAL CONFERENCE IN NUMERICAL ANALYSIS, 1995, Dundee. **Proceedings...** Harlow, UK: 1996. p. 191-208.
63. _____. **Recent developments in non-derivative optimization methods**. Disponível em: <<http://www.siam.org/meetings/archives/op96/ms24.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2001.
64. YOON, J. H.; SHOEMAKER, C.A. Comparison of optimization methods for ground-water bioremediation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 125, n. 1, p. 54-63, jan./feb.1999.

Abstract

The thesis discuss about hydraulic networks models simulation, specifically its calibration. In other words, the aim is to develop a routine of procedures that assure that values of pipes roughness, the model input values, be the real ones, resulting in more confident simulations. The calibration model was developed by the joint between a hydraulic simulator based in time marching approach – TMA, and the Nelder-Mead optimization algorithm. Identifying methods of monitoring stations for calibration are presented, and they are applied to specific situations, in verifying and validation stages, and the results were satisfactory.

Key-words: model calibration, network analysis, Nelder-Mead, monitoring stations.