

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

INVESTIGAÇÃO DE MÉTODOS CLÁSSICOS DE CALIBRAÇÃO DE REDES
HIDRÁULICAS

PETER BATISTA CHEUNG

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza

CAMPO GRANDE, JULHO DE 2001

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Agradeço à Deus pelo dom da vida; à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pela oportunidade oferecida; ao Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza, orientador e amigo, pela competência, dedicação e constantes incentivos à Pesquisa Científica; aos professores e funcionários do Departamento de Hidráulica e Transporte; à minha família pela formação, estímulo e auxílio prestado ao longo destes anos; à Thelma, minha esposa, pela compreensão, amor e companheirismo.

RESUMO

CHEUNG, P.B. (2001). *Investigação dos métodos clássicos de calibração de redes hidráulicas*. Campo Grande, 2001. 132p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

A finalidade do processo de calibração de uma rede de distribuição de água é ajustar os dados de entrada do modelo para reduzir o desvio entre os valores observados e prognosticados. Para o prognóstico acurado do comportamento real dos sistemas de distribuição de água, o modelo é calibrado utilizando dados observados na rede. Estas técnicas estão divididas em duas categorias principais: aquelas em que se ajustam apenas os coeficientes de perda de carga e outras em que se ajustam os coeficientes de perda de carga e as demandas nos nós. Os coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós são inicialmente estimados e são ajustados para que os valores preditos se aproximem dos valores reais. Atualmente, com o desenvolvimento de inúmeras técnicas de calibração, faz-se necessário um reexame dos modelos teóricos comumente utilizados. Neste trabalho, três métodos clássicos de calibração foram investigados, implementados e comparados em modelos de redes teóricas. Os três métodos são: o método analítico, o método analítico modificado e o método explícito. As simulações consideram a rede dividida em diferentes setores, como forma de avaliar a acurácia da solução. O principal objetivo foi avaliar a eficiência destas técnicas de calibração e compará-las entre si. O método analítico e o método analítico modificado apresentaram os menores desvios considerando o somatório das diferenças entre os valores observados e os valores reais para os três setores. Estes dois métodos produziram resultados com ordens de magnitudes idênticas, pois possuem semelhança em relação as suas formulações. O método de calibração explícito possui sua formulação diferenciada dos modelos anteriores e apresentou os maiores desvios, porém sua formulação permite a flexibilidade no sentido de incorporar outras variáveis de decisão de calibração, operação, projeto e componentes hidráulicos.

Palavras-chave: *redes hidráulicas, calibração, coeficiente de rugosidade, demanda.*

ABSTRACT

CHEUNG, P.B. (2001). *Investigation of the classic methods of calibration hydraulic networks*. Campo Grande, 2001. 132p. Dissertation of Master – Federal University of Mato Grosso do Sul (in portuguese).

The purpose of the calibration process in water - distribution systems is to adjust the data the model to reduce the deviation between observed and predicted values. To predict accurately the behavior of real water distribution systems, the model is calibrated using observed data in the network. These techniques are divided in two main categories: techniques that just adjust the pipe resistance coefficients and/or the nodal demands. The pipe resistance coefficients and the nodal demands are initially assumed and the model adjust until that predicted values combined with the real values. Nowadays, with the development of calibration techniques, become necessary a investigation of the theoretical models commonly used. In this work, three classic methods of calibration were investigated, implemented and compared in example networks. The twice methods are: the analytic method, the modified analytic method and explicit method. The simulations consider example networks divided in different sections, as from of evaluating the accuracy of the solution. The main objective went evaluate to efficiency of these calibration techniques and compared them to each other. The analytic method and the modified analytic method presented the smallest deviations considering the sum of the differences between the observed values and the real values. These two methods produced results with orders of identical magnitudes because they possess likeness in relationship its formulations. The explicit calibration method possesses its differentiated formulation of the previous models and it presented the largest deviations, even so its formulation allows the flexibility in the sense of incorporating other variables of calibration decision, operation, project and hydraulic components.

Keywords: *water networks, calibration, pipe resistance coefficients, nodal demands.*

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	ii
RESUMO	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
1. INTRODUÇÃO	01
2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 Introdução	03
2.2 Considerações Gerais	03
2.2.1 Aspectos Históricos	03
2.2.2 Análise de Redes	04
2.2.3 Definição da Calibração de Redes Hidráulicas	07
2.3 Modelos de Calibração	17
3 METODOLOGIA	24
3.1 Introdução	24
3.2 Método Analítico	24
3.2.1 Formulação Matemática	24
3.3 Método Analítico Modificado	27

3.3.1	Preparação dos Dados	28
3.3.2	Equações Básicas	30
3.3.3	Técnicas de Calibração Disponíveis	31
3.3.4	Técnica Proposta de Calibração	34
3.3.5	Procedimento Geral de Calibração	37
3.4	Método Explícito	38
3.4.1	Formulação Matemática	40
3.4.2	Método de Solução – Algoritmo de Newton-Raphson	43
3.4.3	Algoritmo Proposto de Resolução para o Método Explícito	45
3.5	Critério de Convergência	49
3.6	Equipamento e Linguagem Computacionais	50
3.7	Redes de Estudo	51
3.8	Aplicações	55
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Introdução	56
4.2	Dados de Entrada dos Modelos de Calibração	57
4.3	Simulação do Método Analítico para a Rede Exemplo 1	66
4.4	Simulação do Método Analítico Modificado para a Rede Exemplo 1	74
4.5	Simulação do Método Explícito para a Rede Exemplo 1	81
4.6	Simulação do Método Analítico para a Rede Exemplo 2	87
4.7	Simulação do Método Analítico Modificado para a Rede Exemplo 2	95
4.8	Simulação do Método Explícito para a Rede Exemplo 2	101
4.9	Comparação dos Métodos	107

5. CONCLUSÕES	112
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXO A1	119
ANEXO A2	123
ANEXO A3	127

LISTA DE TABELAS

3.1	Níveis dos reservatórios para cada rede exemplo	50
3.2	Dados geométricos reais da rede exemplo 1	51
3.3	Demandas reais nos nós para a rede exemplo 1	52
3.4	Energias reais nos nós para rede exemplo 1	52
3.5	Vazões reais nos trechos para rede exemplo 1	53
3.6	Dados geométricos reais da rede exemplo 2	53
3.7	Demandas reais nos nós para a rede exemplo 2	54
3.8	Vazões reais nos trechos para rede exemplo 2	54
3.9	Energias reais nos nós para rede exemplo 2	55
4.1	Demandas estimadas nos nós para rede exemplo 1	59
4.2	Incremento de vazão nos nós - rede exemplo 1	59
4.3	Energias reais nos nós para a rede exemplo 1	60
4.4	Energias estimadas nos nós para a rede exemplo 1	61
4.5	Vazões reais nos trechos para a rede exemplo 1	61
4.6	Vazões estimadas nos trechos para a rede exemplo 1	62
4.7	Incremento de vazão nos nós - rede exemplo 2	62
4.8	Demandas estimadas para rede Exemplo 2	63
4.9	Energias reais nos nós para a rede exemplo 2	63
4.10	Energias estimadas nos nós para a rede exemplo 2	64
4.11	Vazões reais nos trechos para a rede exemplo 2	64

4.12	Vazões estimadas nos trechos para a rede exemplo 2	65
4.13	Energias nos nós de testes s/ incremento de vazão para rede exemplo 1	68
4.14	Energias reais setorizadas - rede exemplo 1	69
4.15	Energias estimadas setorizadas – rede exemplo 1	69
4.16	Coefficiente de rugosidade calibrado - método analítico – rede exemplo	70
4.17	Demanda calibrada – método analítico - rede exemplo 1	70
4.18	Energia calibrada – método analítico - rede exemplo 1	71
4.19	Vazão calibrada – método analítico - rede exemplo 1	71
4.20	Diferenças quadráticas do método analítico – rede exemplo 1	72
4.21	Coefficiente de rugosidade calibrado - método analítico modificado – rede exemplo 1	76
4.22	Demanda calibrada – método analítico modificado – rede exemplo 1	77
4.23	Energia calibrada – método analítico modificado – rede exemplo 1	77
4.24	Vazão Calibrada – Método Analítico Modificado – Rede Exemplo 1	78
4.25	Diferenças quadráticas do método analítico modificado – rede exemplo 1	78
4.26	Coefficiente de rugosidade calibrado - método explícito - rede exemplo 1	82
4.27	Demanda calibrada - método explícito - rede exemplo 1	83
4.28	Energia calibrada - método explícito - rede exemplo 1	83
4.29	Vazão calibrada - método explícito – rede exemplo 1	84
4.30	Diferenças quadráticas do método explícito – rede exemplo 1	84
4.31	Energias nos nós de testes s/ incremento de vazão - rede exemplo 2	87
4.32	Energias reais setorizadas - rede exemplo 2	88
4.33	Energias estimadas setorizadas - rede exemplo 2	88

4.34	Coeficiente de rugosidade calibrado - método analítico - rede exemplo 2	89
4.35	Demanda calibrada nos nós - método analítico - rede exemplo 2	89
4.36	Energia calibrada - método analítico - rede exemplo 2	90
4.37	Vazão calibrada - método analítico – rede exemplo 2	91
4.38	Diferenças quadráticas do método analítico – rede exemplo 2	92
4.39	Coeficiente de rugosidade calibrado - método analítico modificado – rede exemplo 2	96
4.40	Demanda calibrada - método analítico modificado - rede exemplo 2	96
4.41	Energia calibrada - método analítico modificado - rede exemplo 2	97
4.42	Vazão calibrada - método analítico modificado - rede exemplo 2	97
4.43	Diferenças quadráticas do método analítico modificado - rede exemplo 2	98
4.44	Coeficiente de rugosidade calibrado - método explícito - rede exemplo 2	102
4.45	Demanda calibrada – método explícito - rede exemplo 2	102
4.46	Energia calibrada - método explícito - rede exemplo 2	103
4.47	Vazão calibrada - método explícito – rede exemplo 1	104
4.48	Diferenças quadráticas do método explícito – rede exemplo 2	105
4.49	Diferenças quadráticas totais das energias – rede exemplo 1	108
4.50	Diferenças quadráticas totais das energias - rede exemplo 2	109
4.51	Desvio relativo dos modelos de calibração para as redes exemplo (%)	110

LISTA DE FIGURAS

3.1	Distribuição da rede.....	35
3.2	Interpretação gráfica do método de Newton–Raphson.....	43
3.3	Rede exemplo utilizada por Nielsen (1989)	46
3.4	Rede exemplo 1	51
3.5	Rede exemplo 2	52
4.1	Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 1 utilizando o método analítico	72
4.2	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando um setor utilizando o método analítico	73
4.3	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando dois setores utilizando o método analítico	74
4.4	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando três setores utilizando o método analítico	74
4.5	Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 1 utilizando o método analítico modificado	79
4.6	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando um setor utilizando o método analítico modificado	80
4.7	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando dois setores utilizando o método analítico modificado	80
4.8	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando três Setores utilizando o método analítico modificado	81
4.9	Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 1 utilizando o método explícito	85

4.10	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando um setor utilizando o método explícito	85
4.11	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando dois setores utilizando o método explícito ...	86
4.12	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando três setores utilizando o método explícito	86
4.13	Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 2 utilizando o método analítico	93
4.14	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando um setor utilizando o método analítico	93
4.15	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando dois setores utilizando o método analítico	94
4.16	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando três Setores utilizando o método analítico	94
4.17	Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 2 utilizando o método analítico modificado	99
4.18	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando um setor utilizando o método analítico modificado	99
4.19	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando dois setores utilizando o método analítico modificado	100
4.20	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando três setores utilizando o método analítico modificado	101
4.21	Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 2 utilizando o método explícito	105
4.22	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando um setor utilizando o método explícito	106
4.23	Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando dois setores utilizando o método explícito ...	106
4.24	Comportamento dos modelos de calibração em relação ao desvio médio de cada setor – rede exemplo 1	107

4.25	Comportamento dos modelos de calibração em relação ao desvio médio de cada setor – rede exemplo 2	108
4.26	Comportamento dos modelos de calibração em relação ao desvio médio de cada setor – rede exemplo 2	110

1 – INTRODUÇÃO

Devido a crescente demanda de água, há uma necessidade em se obter sistemas de distribuição eficientes. Para isso, deve-se buscar novas tecnologias que contribuam para o uso e controle adequados de tal recurso, que por sua vez, está se tornando cada vez mais escasso.

Uma das formas de minimizar os problemas dos sistemas de distribuição de água ineficientes e inadequados, seria administrar os recursos hídricos de maneira tal, que houvesse disponibilidade de água no momento exato e no lugar certo. Modelos computacionais destinados à análise e projetos de sistemas de distribuição de água vêm sendo desenvolvidos por várias décadas, e muitos avanços foram realizados em relação as suas aplicações.

A disponibilidade dos microcomputadores tem possibilitado aos engenheiros, analisar os estados e as operações dos sistemas existentes e investigar os efeitos das mudanças propostas. Estes modelos são formulados e utilizados para prognosticar o comportamento das redes hidráulicas, considerando diferentes condições de carga para posteriormente, planejar suas expansões. A confiabilidade e eficácia destes modelos dependem da acurácia do método de calibração utilizado.

Recentemente, muitos pesquisadores têm proposto diferentes algoritmos para a calibração dos modelos de redes hidráulicas. Estas técnicas, têm sido baseadas em métodos analíticos, explícitos e técnicas de otimização. As técnicas baseadas em métodos analíticos, geralmente requerem a simplificação da rede através de tubulações equivalentes; e as técnicas baseadas em métodos explícitos, exigem adequação das características geométricas da rede e dos parâmetros variáveis, coeficientes de rugosidade das tubulações e demandas nos nós, nas equações hidráulicas.

A aplicação dos modelos matemáticos na análise e projeto de sistemas de distribuição de água é dependente da qualidade dos dados requeridos de entrada. Muitos destes dados podem ser determinados com nível de acurácia regular, no entanto, estes modelos podem ainda produzir resultados não confiáveis. Erros devidos aos valores incorretos de tais dados podem ser reduzidos com o processo de calibração do modelo.

Os modelos de calibração foram desenvolvidos para minimizar os erros presentes nos dados observados em campo, ajustando os valores prognosticados do sistema e combinando tais valores com o comportamento real da rede hidráulica. Porém, a calibração incorreta conduz a soluções incorretas dos parâmetros envolvidos, contribuindo para um prognóstico não eficaz do comportamento dos sistemas de distribuição de água.

Atualmente, com o desenvolvimento de inúmeras técnicas de calibração, torna-se necessário um reexame dos modelos teóricos utilizados para a calibração de redes hidráulicas. A implementação dos algoritmos de calibração é complexa, devido às formulações matemáticas se apresentarem de forma não-linear.

Este trabalho teve como finalidade a investigação, a implementação e a comparação dos métodos clássicos de calibração de sistemas de distribuição de água, aplicados em modelos de rede teórica. Tais métodos são: o método analítico, o método analítico modificado e o método explícito.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a eficiência das técnicas de calibração existentes na literatura. Esta é uma etapa preliminar para a aplicação em campo do conceito de calibração em uma rede real. Espera-se que as técnicas de calibração estudadas nesta pesquisa possam ser aplicadas em uma próxima fase, contribuindo para a melhoria dos sistemas de distribuição e abastecimento de águas existentes.

Inicialmente, no capítulo 2 desenvolveu-se uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos encontrados na literatura relacionados à calibração de redes hidráulicas. Neste capítulo encontram-se os conceitos fundamentais teóricos e o histórico dos métodos relacionados com a calibração dos sistemas de distribuição de água.

Na sequência, o capítulo 3 se refere à metodologia do trabalho, contendo a descrição dos fundamentos teóricos, os modelos utilizados, as hipóteses de trabalho, os equipamentos utilizados, as técnicas de calibração, os procedimentos de resolução e as possibilidades de estudo.

Os capítulos 4 e 5 contêm os resultados e as conclusões respectivamente, ou seja, as comprovações dos princípios básicos, discussões e interpretações dos resultados obtidos.

As referências bibliográficas que permitem a identificação das publicações citadas e consultadas estão no capítulo 6.

2 – PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para análise e calibração de redes de distribuição de água. A confiabilidade e eficiência dos algoritmos encontrados na literatura dependem do método de calibração utilizado. Percebe-se alguma diversidade nos trabalhos existentes, no que tange aos métodos para estudo e análise do problema de calibração de sistemas de abastecimento e distribuição de água. Estas técnicas estão divididas em duas categorias principais: as que ajustam apenas os coeficientes de perda de carga e aquelas na qual ajustam os coeficientes de perda de carga e as demandas nos nós.

2.2 – Considerações Gerais

A seguir são apresentadas algumas considerações gerais sobre os aspectos históricos, análise e calibração de redes hidráulicas. Estas considerações descrevem os conceitos teóricos, as formulações e alguns estudos desenvolvidos.

2.2.1 – Aspectos Históricos

O método da analogia elétrica foi um dos primeiros métodos a serem utilizados para análise e calibração de redes. Este método baseia-se na analogia entre um circuito elétrico e um sistema de distribuição de água. Os principais pesquisadores que utilizaram este método foram McILROY (1950); SURYAPRAKASAN, REID e GEYER (1950).

SHAMIR e HOWARD (1968) realizaram um estudo de caso, uma investigação nos sistemas de distribuição de água onde uma nova técnica foi introduzida. Porém esta nova tecnologia foi baseada em uma formulação matemática de difícil compreensão, em relação aos problemas de engenharia. Estes autores, estão entre os pioneiros na investigação de redes hidráulicas e no desenvolvimento da calibração.

GOFMAN e RODEH (1981) descreveram um método para incorporar como incógnitas as características das tubulações, resolvendo as equações de circuito em termos de geradores de energia. Um gerador de energia foi definido como uma resistência negativa ou positiva para encontrar alguma condição requerida. Se a resistência é positiva, significa que a resistência da tubulação deve ser elevada para causar o efeito desejado, se negativa uma bomba deve ser instalada. Resolvendo as equações de circuito, os autores aplicaram um método de ajuste simultâneo das vazões através de fatores de correção em cada circuito (e falsos circuitos). No entanto, os parâmetros de projeto como diâmetros das tubulações não foram determinados explicitamente.

O termo, “resistência das tubulações” ou “rugosidade das tubulações”, surgiu na literatura devido os modelos para análise de redes em regime permanente que se baseavam em técnicas numéricas iterativas e que incluíam desde analogia elétrica até as aplicações gráficas. São largamente difundidos os métodos de Hardy-Cross, Newton-Raphson e teoria linear. Os valores de rugosidade das tubulações podem ser encontrados na literatura. Uma boa origem de dados são as tabelas de WILLIAMS e HAZEN (1933). Porém estes valores encontrados são meramente valores típicos, do qual necessitam ser ajustados durante o processo de calibração.

2.2.2 – Análise de Redes

Um sistema de distribuição de água ou uma rede hidráulica é definido como qualquer arranjo de tubos para propósito de transportar água para população. Este sistema considera vários elementos interligados. Uma canalização tem dois terminais que podem ser conectados a uma rede (SOUZA 1994).

Antes da modelação ou simulação de um sistema de distribuição de água, é necessário que o sistema físico seja representado de tal forma, que o computador possa analisar os dados. Isto requer que o sistema de distribuição de água seja representado através de seus elementos básicos, como nós e ligações. Estas ligações representam seções de tubulações individuais, e os nós representam pontos no sistema, onde duas ou mais tubulações (ligações) unem-se ou onde a água está sendo introduzida ou requerida. Em relação aos vários serviços conectados ao longo do comprimento de um trecho de tubulação, é geralmente aceito na modelação, o agrupamento de metade das demandas ao longo de um trecho, no nó de montante e a outra metade das demandas, no nó de jusante.

Para as tubulações e os nós da rede, os dados físicos devem ser obtidos através da descrição geométrica dos reservatórios de elevação e armazenamento, bombas, e válvulas. Dados físicos para bombas incluem os valores médios da potência útil, vazões da bomba e curva característica de energia. Estes dados devem ser inseridos no computador em um formato compatível com o modelo computacional selecionado.

SHAMIR e HOWARD (1968) enunciaram que uma rede hidráulica é considerada resolvida quando as energias e os consumos em todos os nós e as vazões em todos os trechos são conhecidos.

A solução para o problema de redes é obtida quando algumas condições hidráulicas são satisfeitas: a soma algébrica das vazões em qualquer nó deve ser zero (conservação de massa em cada nó); o valor da energia piezométrica em um nó deve ser a mesma para todos os tubos conectados a este nó; e a relação de perda de carga e vazão deve ser satisfeita para cada elemento de rede (SHAMIR E HOWARD 1968).

Quando o número de parâmetros (incógnitas) se iguala ao número de nós ou de tubulações para modelos de demanda única, é possível retrabalhar as equações de continuidade e energia as quais podem ser resolvidas iterativamente (DONACHIE 1974; RAHAL, STERLING e COULBECK 1980; GOFMAN e RODEH 1981; ORMSBEE e WOOD 1986).

Em geral, a solução do sistema de equações é obtida ou pelo método de balanço de massa nos nós ou pelo método de balanço de cargas nos circuitos de uma rede. No método dos nós a solução é obtida pela resolução de um sistema de equações, em termos de carga, posteriormente calculando-se explicitamente as vazões nos trechos (SHAMIR e HOWARD 1977).

GOFMAN e RODEH (1981), EPP e FOWLER (1970) e WOOD e RAYES (1981) resolveram um sistema de equações resultante do método dos circuitos, em termos de um fator de ajuste de vazões para cada circuito do sistema.

ORMSBEE e WOOD (1986) propuseram uma variação desses dois métodos para a resolução de um sistema, onde as variáveis são as de dimensionamento do sistema e não propriamente as cargas e vazões. O método proposto é uma modificação do método linear proposto por WOOD e CHARLES (1972). Utilizando conjuntamente as equações dos nós da rede e das equações de carga dos circuitos, obtém-se um conjunto de equações simultâneas.

Muitos sistemas de distribuição de água, possuem tubulações com uma grande variedade de diâmetros. Na prática, tubulações menores que 100mm ou até 150 mm são ignoradas (FAIR, GEYER e OKUN 1971), ou agrupadas e substituídas através de tubulações equivalentes (JEPPSON 1982; WALSKI 1983).

JEPPSON (1982) forneceu fórmulas para auxiliar a substituição das tubulações, e recomendou o agrupamento dos efeitos do comprimento, diâmetro e coeficiente de perda de carga dentro de uma constante de resistência da tubulação.

A análise em regime permanente dos sistemas de distribuição de água é um problema de grande importância na engenharia. As equações hidráulicas básicas que descrevem o fenômeno são equações não lineares de difícil solução algébrica (SOUZA 1994).

RIGHETTO (1994) também descreve o equacionamento hidráulico de uma rede de distribuição de água através das leis de conservação de massa F_m e da energia F_e . Para cada nó da tubulação, a equação da continuidade é expressa por:

$$F_m(Q) = \sum_{n \in \{j\}}^{N_j} q_n - Q_j = 0 \quad (2.1)$$

onde j é qualquer nó da rede, isto é, $j = \{1, 2, \dots, nn\}$; nn é o número de nós da rede; Q_j é a vazão de consumo ou demanda no nó; N_j é o número de trechos conectados ao nó j ; e q_n são as vazões nos trechos que chegam ao nó j .

A equação de energia, aplicada a um circuito qualquer, aberto ou fechado, é expressa por:

$$F_e(Q) = \sum_{n \in \{k\}}^{N_k} [K_{pn} \cdot q_n^a + Kl_n \cdot q_n^2] - \Delta E_k = 0 \quad (2.2)$$

onde $\{K\}$ é o conjunto de todos os circuitos; K_{pn} é a constante de perda de carga distribuída; Kl_n é o coeficiente global de perdas localizadas no trecho n ; ΔE_k é a perda de energia em um circuito k , sendo igual a zero para todos os circuitos fechados; a é a constante de perda de carga, que depende da fórmula utilizada.

A técnica de solução adequada, depende da forma em que a rede esta disposta, ramificada ou em circuitos. Sistemas dispostos em circuitos requerem uma equação extra para que os problemas possam ser resolvidos. Sistemas com componentes hidráulicos exigem também uma equação extra para cada circuito (WALSKI 1992).

Em geral, os problemas de redes podem ser classificados em relação ao tempo considerado nas análises (permanente, gradualmente variado e transiente); à topologia do sistema (séries, ramificados, ramificados com vários reservatórios e circuitos); ao conjunto de equações disponíveis (continuidade, energia, circuitos e otimização); e ao método utilizado para resolver as equações resultantes (analítico, gráfico, Hardy-Cross, Teoria Linear e Newton-Raphson).

Se a rede está disposta em forma de circuito, ou se a energia é especificada em mais de uma localidade, as equações de energia e continuidade não podem ser resolvidas independentemente e os problemas tornam-se complexos (WALSKI 1992).

Existe uma equação de energia para cada circuito na rede. Algumas vezes quando o sistema é muito complexo, torna-se difícil a identificação dos circuitos. Cada circuito deve ser independente, ou seja, não deve haver dependência entre circuitos (WALSKI 1992).

EPP e FOWLER (1970) propuseram um algoritmo para seleção automática dos circuitos naturais de uma rede. Esta metodologia baseia-se na teoria dos grafos e busca obter o menor caminho entre dois nós da rede eliminando os termos que não pertencem ao circuito.

Depois que os dados foram reunidos e codificados, os parâmetros de entrada do modelo devem ser estimados através de um simulador hidráulico para posterior aplicação do método de calibração que fornecerá as respostas reais do sistema estudado. Em geral, os parâmetros incertos das redes são a rugosidade das tubulações e as demandas nos nós (ORMSBEE e LINGIREDDY 1997).

SOUZA (1994) descreve os modelos matemáticos para análise de sistemas de distribuição de água e classifica estes modelos em dois grupos principais: modelos de ajuste simples e modelos de ajuste simultâneo. Os modelos baseiam-se em técnicas numéricas e iterativas e incluem desde analogias elétricas até as aplicações gráficas e os métodos de Hardy-Cross, Newton-Raphson e Teoria Linear.

2.2.3 – Definição da Calibração de Redes Hidráulicas

SHAMIR e HOWARD (1977) mencionaram que a calibração é um processo que envolve tanto a modelação quanto um problema de engenharia e consiste na determinação das características físicas e operacionais de um sistema existente e na determinação dos dados de entrada, que quando incorporados no modelo computacional produz resultados reais. Estes

autores descreveram alguns detalhes das formulações matemáticas e os resultados obtidos de um estudo de caso. Esse trabalho desenvolveu um programa de medições de campo para auxiliar no processo de calibração. Foi enfatizada a estimação das resistências das tubulações através das perdas de cargas e medições de descarga em aproximadamente vinte pontos de abastecimento, dos quais, as demandas nos nós foram altamente correlacionadas. As análises computacionais realizaram ajustes das resistências em algumas tubulações enquanto que as demandas eram medidas instantaneamente nos nós de consumos.

Já WALSKI (1983) definiu a calibração como uma das duas etapas do processo onde se compara o prognóstico de pressões com aquelas observadas para condições de operação conhecidas, isto é, operação de bombas, níveis dos reservatórios, válvulas redutoras de pressão locais (PRV); e ajustam-se os dados de entrada para que o modelo melhore a relação entre valores observados e prognosticados.

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

A comparação dos resultados produzidos por um simulador hidráulico, com os resultados de testes de vazão e/ou energia fornece a base da calibração do modelo. Dependendo da acurácia dos dados de demandas nos nós e das características físicas do sistema, um modelo de análise de redes calibrado pode estimar energias nos nós entre o limite de $\pm 3,50$ m (HARRIS 1984).

ORMSBEE e LINGIREDDY (1997) declararam que, o esforço da calibração pode ser dividido em sete etapas básicas: identificação do uso do modelo; determinação das estimativas iniciais dos parâmetros de entrada; coleta dos dados; avaliação dos resultados; desenvolvimento da macro calibração; desenvolvimento de uma análise de sensibilidades; desenvolvimento da micro calibração.

Segundo ORMSBEE e LINGIREDDY (1997), antes da calibração de uma rede hidráulica são importantes primeiramente identificar o uso pretendido (dimensionamento de tubulações para o planejamento de um plano diretor, estudos operacionais, estudos de reabilitação, estudos de qualidade de água) e o tipo associado de análise hidráulica (regime permanente ou regime não permanente). Usualmente o tipo de análise está diretamente relacionado com o uso pretendido. Por exemplo, estudos de qualidade água e estudos operacionais requerem uma análise em regime não permanente, contudo alguns planejamentos

ou estudos de projetos podem ser desenvolvidos utilizando uma análise em regime permanente.

CESARIO (1980) expõe que a modelação e análise dos sistemas de distribuição são necessárias para operação eficiente e expansão dos sistemas existentes. A modelação dos sistemas de distribuição de água requer um programa computacional que simula condições reais de campo (modelos de calibração).

Tanto o uso pretendido do modelo quanto o tipo de análise associada, fornece alguma orientação sobre o tipo e qualidade dos dados de campo coletados e o nível desejado da relação entre as vazões e pressões prognosticadas, com aquelas observadas. Modelos para aplicações em regime permanente podem ser calibrados utilizando vazões estáticas múltiplas e observações de pressões coletadas em diferentes tempos do dia, sob várias condições de operação. Por outro lado, modelos para aplicações em regime não permanente requerem dados de campo coletados em um intervalo de tempo prolongado.

Em geral, um nível mais elevado de calibração é requerido para análises de qualidade de água ou um estudo operacional do que para um estudo geral de planejamento. Modelos mais avançados de análise de sistemas de distribuição de água têm incluído as características hidráulicas e a qualidade de água em seu código computacional. A modelação de qualidade de água nos sistemas de distribuição tem sido investigada, e, já existem estudos combinando modelos hidráulicos com modelos de qualidade. As concentrações transportadas no interior das tubulações dependem da vazão e da rugosidade das tubulações. Tais considerações influenciam os métodos utilizados para coleta de dados e subseqüentes etapas da calibração (ARAUJO e LANSEY 1999).

A segunda etapa da calibração é determinar as estimativas iniciais dos parâmetros do modelo. Na maior parte dos modelos, algum grau de incerteza é associado a esses parâmetros, principalmente, aos coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós.

Não há necessidade de se conhecer os valores precisos das rugosidades de cada tubulação e as demandas nos nós, pois o sistema será simulado e ajustado através da calibração. Porém os dados de entrada iniciais são valores típicos encontrados na literatura, por meio de tabelas. Estes valores podem ser convertidos em equações de perda de carga. Os valores da rugosidade das tubulações podem ser encontrados no livro original de WILLIAMS e HAZEN (1933).

Alguns autores desenvolveram métodos implícitos para estimar estes parâmetros através da minimização de um critério de erro (LANSEY e BASNET 1991; ORMSBEE 1989). Tipicamente, estes parâmetros são determinados através da minimização de uma função de resíduos entre os valores medidos e os prognosticados.

Quando um sistema de distribuição de água é calibrado, o objetivo principal é determinar os valores reais dos parâmetros variáveis (coeficiente de rugosidade e demandas). Com estes valores calibrados, pode-se então simular várias condições da rede contando com resultados confiáveis do modelo.

Na prática, não se consegue medir todos os parâmetros da rede diretamente, devido às despesas com a coleta de dados. Porém, há formas de avaliá-los utilizando as variáveis de estado, que afetam os parâmetros do sistema de forma direta. Quatro tipos de dados (variáveis de estado) podem estar disponíveis para a avaliação: energias e demandas nos nós, vazões nos trechos e níveis dos reservatórios. Todas estas quatro variáveis fornecem informações que podem para a determinação dos valores reais dos parâmetros do sistema. Estes incluem: parâmetros de projeto (diâmetros e comprimentos das tubulações, energias dos nós, energia e potência das bombas, volume de armazenamento e características das bombas), parâmetros de operação (velocidade das bombas, válvulas reguladoras de pressão, válvulas de controle e especificações de vazão ou pressão) e parâmetros de calibração (rugosidade das tubulações e demandas nos nós).

A tarefa mais difícil na calibração de redes hidráulicas é a seleção dos coeficientes de rugosidade das tubulações como os coeficientes de Hazen-Williams ou os fatores de atrito de Darcy-Weisbach. As estimativas iniciais dos valores de rugosidade das tubulações podem ser obtidas utilizando valores médios encontrados na literatura ou diretamente das medições de campo (WALSKI 1983).

A rugosidade das tubulações é um parâmetro de calibração que afeta diretamente o comportamento hidráulico da rede de distribuição de água em regime permanente. Pesquisadores e fabricantes tem desenvolvido tabelas que fornecem estimativas de rugosidade das tubulações em função de características como material, diâmetro, e idade. Por mais que estas tabelas possam ser úteis para tubulações novas, a aplicabilidade específica delas decresce em relação à idade das canalizações – possivelmente devido a tuberculose e a química da água. Por esta razão, estimativas iniciais de rugosidade, associadas a cada tubulação diferente das tubulações novas, devem ser obtidas diretamente dos testes de campo (ORMSBEE e LINGIREDDY 1997).

ORMSBEE e LINGIREDDY (1997) afirmaram também que, para obter as estimativas iniciais de rugosidade das tubulações diretamente dos testes de campo, era melhor dividir o sistema de distribuição de água em setores referentes às tubulações de mesmo material e idade. Por conseguinte, várias tubulações de diferentes diâmetros deveriam ser testadas em cada setor para obter estimativas individuais de rugosidade das tubulações e depois construir um nomograma particularizado do sistema completo. Assim que o nomograma é construído, ele pode ser utilizado para determinar os valores de rugosidade das tubulações para o restante das tubulações no sistema.

EGGENER e POLKOWSKI (1976) mostraram que os coeficientes de perda de carga das tubulações são parâmetros agrupados relacionados não apenas ao atrito ou rugosidade da tubulação, mas também as outras causas da perda de carga como os ajustes, válvulas, serviços conectados e alinhamentos divergentes das tubulações. Como geralmente os testes de campo são muito onerosos, recorre-se ao uso de gráficos e curvas padrões (CALIFORNIA SECTION COMMITTEE 1962; COMMITTEE 1935; LAMONT 1981; WILLIAMS e HAZEN 1933) que representam o coeficiente de perda de carga *versus* idade da tubulação, e contam com a experiência e o critério do modelo de rede utilizado.

EGGENER e POLKOWSKI (1976) argumentaram que, a parte mais frágil das informações dos dados de entrada, não era a condição de carga assumida, mas o fator de rugosidade das tubulações, enfatizando assim o ajuste dos coeficientes de perda de carga.

Os mesmos autores identificaram que o coeficiente de rugosidade é mais sensível às diferenças entre os diâmetros nominais (sempre utilizado nos cálculos) do que aos diâmetros reais. Afirmaram também que o coeficiente de rugosidade é dependente da velocidade de escoamento e podem ser comprovados através de testes nos sistemas em estudo. Aplicando-se altas velocidades, nos testes, é possível garantir perdas significativas de energia em pequenas distâncias disponíveis e o impacto das demandas locais durante o desenvolvimento dos testes.

ORMSBEE e LINGIREDDY (1997) declararam que o segundo maior parâmetro determinado na análise de calibração é a média (análise em regime permanente) ou a variação temporária (análise em regime não permanente) de demanda a ser determinada para cada nó. Estimativas iniciais médias de demandas nos nós podem ser obtidas através da identificação de uma região de influência associada com cada nó, identificando os tipos de unidades de demanda na área em serviço, e multiplicando o número de cada tipo por um fator de demanda associado. Alternativamente, a estimativa pode ser obtida através da identificação da área

associada com cada tipo de uso na área em serviço e então multiplicando a área de cada tipo por um fator de demanda associado.

O RESEARCH COMMITTEE (1974) identificou que a maior origem de erros na simulação da performance contemporânea estaria na distribuição e variação das cargas assumidas, enfatizando assim, o ajuste dos consumos nos nós. Uma técnica de calibração eficiente seria aquela que considerasse ambos parâmetros, de forma a decidir e fornecer uma sistemática dimensão para a necessidade do ajuste, se a todos os consumos nos nós e/ou aos coeficientes de perda de carga nas tubulações. A técnica deve produzir a calibração em poucas iterações.

Para a coleta dos dados de energia e vazão, testes de vazões nos hidrantes de incêndio são úteis (WALSKI 1983). Estes testes são conduzidos utilizando tanto um manômetro de pressão normal (para medições de energias dinâmicas e estáticas) quanto um manômetro de Pitot (para cálculo de descargas). Para a obtenção dos dados suficientes a um modelo de calibração, é importante que eles sejam provenientes de vários testes de vazão. É também importante que os dados das condições limites, associados ao sistema, sejam coletados antes que cada teste seja conduzido. Isto inclui informações como: os níveis dos tanques, o estado das bombas, dentre outros.

Segundo WALSKI (1986) para um modelo de calibração adequado uma diferença de 7% é considerada aceitável entre as leituras de pressão estática e dinâmica. Em se tratando dos testes estáticos, os dados coletados sobre um período prolongado de tempo (de no mínimo 24 horas e até sete dias) podem ser úteis para calibração dos modelos de redes. Os tipos mais comuns de dados são: a taxa de vazão nas tubulações, o nível de água dos reservatórios, e pressões nos nós.

Dependendo do nível de instrumentação e telemetria muitas dos dados já podem ser coletados como parte das operações normais. Estes dados são especialmente úteis na verificação e distribuição de demandas entre os vários nós. Se estes dados estão disponíveis, eles devem ser verificados em relação a sua acurácia antes de serem usados para a calibração. Se estes dados não estiverem prontamente disponíveis, o modelador deverá instalar medidores de pressão ou hidrômetros para obter os resultados. Na ausência de hidrômetros na linha dos reservatórios, vazões de entrada ou descargas podem ser deduzidas das leituras incrementais dos níveis dos reservatórios (WALSKI 1986).

As estimativas mais acuradas dos parâmetros são obtidas utilizando dados de múltiplas condições de demanda. WALSKI (1983) forneceu algumas orientações para medições de pressão no campo. As pressões deviam ser medidas próximo dos pontos de maior demanda. Adicionalmente, o autor sugeriu que os testes de pressão fossem desenvolvidos no perímetro da rede longe das origens dos nós.

Em geral, um projeto de amostragem se faz necessário, para que os dados sejam coletados com um certo grau de acurácia. Estes dados fornecem as características básicas e naturais do sistema em estudo. Modelo de calibração, ou estimação de parâmetros, é considerado uma pesquisa de amostragem, onde o objetivo é identificar acuradamente os parâmetros físicos do sistema (UBER e BUSH 1999).

UBER e BUSH (1999) propuseram uma teoria de amostragem estatística para garantir a qualidade dos modelos de calibração. Esta regra teórica é utilizada para motivar quantitativamente, métodos de amostragem em redes de distribuição de água e comparar objetivamente com as medidas de energia de um modelo hidráulico de calibração.

Assim que as vazões e pressões são prognosticadas, compara-se com os correspondentes valores observados, em uma tentativa de avaliar a acurácia do modelo. Utilizando os dados de telemetria, o modelo simula as condições diárias de operação (isto é, variação dos níveis de água e pressões no sistema) e os dados de campo são coletados. A acurácia do modelo pode ser avaliada utilizando vários critérios. O critério mais comum é a diferença de pressão absoluta ou diferença de pressão relativa. Para as simulações em períodos prolongados de tempo, as comparações são feitas entre taxas de vazões prognosticadas e observadas nas tubulações, pressões nos nós e níveis de água nos reservatórios. Dependendo da aplicação, um desvio máximo em estado variável entre 5% e 10% é geralmente considerado como satisfatório (ORMSBEE e LINGIREDDY 1997).

Os desvios entre os resultados da aplicação do modelo e as observações de campo podem ser causados por diversos fatores, incluindo: parâmetros incorretos do modelo (rugosidades das tubulações e demandas nos nós); dados incorretos da rede (diâmetros e comprimentos das tubulações); geometria incorreta da rede (tubulações conectadas incorretamente); definições de limites incorretos das zonas de pressão; erros nas condições de contorno (posições incorretas das válvulas reguladores de pressão, níveis de água nos reservatórios, curvas de bombas); erros nos registros históricos de operação (acionamento e desligamento de bombas em tempos incorretos); erros nos equipamentos de medidas (manômetros de pressão não propriamente calibrados); e erros de medição (leitura de valores

errados nos instrumento de medição). A última origem de erros pode ser eliminada ou no mínimo reduzidas através do desenvolvimento e implementação de um cuidadoso esforço na coleta dos dados. As eliminações dos erros remanescentes frequentemente requerem a aplicação iterativa de três etapas finais do processo de calibração – macro calibração, análises de sensibilidades, e micro calibração (ORMSBEE e LINGIREDDY 1997).

Se um (ou mais) dos valores medidos em regime permanente difere dos valores modelados por uma quantidade julgada excessiva (isto é, maior do que 30%), a causa desta diferença estenderá além dos erros de estimativa. As possíveis causas de tais diferenças são muitas, mas podem incluir válvulas fechadas ou parcialmente fechadas, curvas de bombas ou dados da telemetria dos reservatórios inaccurados, diâmetros ou tubulações constatadas diferente dos projetos e limites das zonas de pressão incorretos (WALSKI 1990).

O único modo de aceitar adequadamente tais erros de macro calibração é sistematicamente revisar os dados associados com o modelo e compará-los com os dados de campo para garantir a acurácia. Em muitos casos, alguns dados serão menos confiáveis do que outros. Esta observação fornece a lógica do lugar para início da identificação do problema. Modelos de análises de sensibilidades fornecem meios de identificação da origem das discrepâncias (CRUICKSHANK e LONG 1992).

ORMSBEE e LINGIREDDY (1997) declararam que antes de tentar uma micro calibração, é imprescindível desenvolver uma análise de sensibilidades do modelo para auxiliar na identificação da origem provável dos erros. Isto pode ser executado variando os parâmetros do modelo em quantidades diferentes e então medir os efeitos associados. Por exemplo, muitos modelos de rede têm como uma opção de análise, a capacidade de fazer múltiplas simulações, na qual os fatores de ajuste global podem ser aplicados para valores de rugosidade ou demandas nos nós. Tais resultados podem identificar os parâmetros que tem impacto mais significativo nos resultados do modelo e assim definir aqueles potenciais, para os subsequentes ajustes na micro calibração. Os parâmetros a serem ajustados nesta fase final de calibração são as rugosidades das tubulações e as demandas nos nós. Em muitos casos é útil processar a calibração em duas etapas: a calibração em regime permanente e calibração em regime não permanente.

Na calibração em regime permanente, os parâmetros do modelo são ajustados para combinar pressões e vazões associadas com observações estáticas múltiplas. Já na calibração em regime não permanente os parâmetros do modelo são ajustados para combinar a variação de pressão e vazão no tempo assim como as trajetórias do nível de água nos reservatórios. A

calibração em regime permanente é mais sensível às mudanças nas rugosidades das tubulações, enquanto em regime não permanente é mais sensível às mudanças na distribuição de demandas. Uma estratégia potencial na calibração seria primeiramente ajustar os valores dos parâmetros de rugosidade das tubulações utilizando os resultados dos testes de vazões nos hidrantes de incêndio e então tentar ajustar a distribuição de demandas utilizando dados sobre vazão, pressão e nível de água. (ORMSBEE e LINGIREDDY 1997).

Historicamente, os modelos de calibração têm empregado aproximações empíricas ou teóricas, as quais consomem tempo computacional significativo, frustrando os resultados para a maioria dos sistemas de distribuição de água. O nível de frustração, é claro, dependerá da perícia do modelador, da dimensão do sistema, e da quantidade e qualidade dos dados de campo. Algumas destas frustrações podem ser minimizadas com a divisão de sistemas complexos em partes menores e a calibração dos parâmetros do modelo, utilizando uma aproximação incremental (CRUICKSHANK e LONG 1992).

ORMSBEE (1989) descreveu que as técnicas baseadas nas equações analíticas geralmente requerem uma simplificação significativa da rede e o uso de tubulações equivalentes. Estas técnicas poderiam extrair resultados aproximados. Por outro lado, aproximações por simulação e otimização têm a vantagem de usar um modelo completo e assim produzir resultados melhores.

As técnicas de simulação são baseadas na idéia de resolução de um ou mais fatores de calibração, através do adcionamento de uma ou mais equações ao sistema resultante. As equações adicionais são usadas para definir uma condição de contorno adicional (tal como uma energia de descarga das vazões de incêndio). Adicionando uma equação extra, pode-se determinar explicitamente uma incógnita adicional. A desvantagem das aproximações por simulação, é que elas são restritas para um conjunto de condições de contorno em que sua aplicação se dá para uma distribuição de demanda. Tentativas para obter um resultado de calibração único requerem uma das duas estratégias de aplicação: uma aproximação sequencial ou uma aproximação média (ORMSBEE 1989).

Na aproximação sequencial, o sistema é subdividido em múltiplos setores os quais corresponderão aos números de dados das condições de contorno. Neste caso, o primeiro conjunto de observações é utilizado para obter fatores de calibração para o primeiro setor. Estes fatores são fixados, e então outros conjuntos de fatores são determinados para o segundo setor, e assim por diante. Na aproximação média, os fatores finais de calibração são obtidos pelo cálculo das médias dos fatores de calibração para cada aplicação individual.

A alternativa da aproximação por simulação é a aproximação por otimização. Nesta aproximação, o problema de calibração é formulado como um problema de otimização não linear consistindo de uma função objetivo não linear sujeito às restrições de igualdade e desigualdades linear e não linear.

Recentemente, pesquisadores (SCHAETZEN, SMITH, SAVIC e WALTERS 1999; TANG, KARNEY, PENDLEBURY e ZHANG 1999) tem investigado o uso de otimização genética para resolver tais problemas complexos de otimização não linear. A otimização genética, oferece uma significativa vantagem sobre as tradicionais aproximações por otimização, pois tenta-se obter uma solução ótima avaliando as soluções de vetores múltiplos simultaneamente. Adicionalmente, métodos de otimização genética não requerem gradientes de informação. Finalmente, os métodos de otimização genética empregam regras de transição probabilísticas, em oposição às regras determinísticas, com a vantagem de garantir uma metodologia de solução robusta.

Com o advento e uso da otimização não linear, é possível obter sucesso na micro calibração. É evidente, que o nível de sucesso depende da macro calibração. Embora a origem dos erros não seja prontamente identificada com técnicas de otimização convencional, isto pode ser desenvolvido utilizando tecnologia específica. Neste caso, regras de calibração geral podem ser desenvolvidas com base em dados experimentais, que identificam a provável fonte de origem dos erros do modelo para um dado conjunto de características do sistema e condições de operação. Assim, um sistema poderia estar ligado a uma interface gráfica e a um simulador hidráulico fornecendo um meio interativo para uso do modelo de calibração (ORMSBEE e LINGIREDDY 1997).

Tem crescido nos recentes anos, a defesa do uso de tecnologia dos sistemas de informações geográficas (GIS), controle supervisionado e sistemas de aquisição de dados (SCADA) baseados no modelo de calibração. A tecnologia GIS fornece um eficiente caminho para ligação da fatura dos clientes com os componentes do modelo de rede para uso nas estimativas iniciais das demandas dos nós. Tal tecnologia também fornece um meio gráfico para exame da base de dados dos erros (BASFORDE e SEVIER 1995)

Uma das mais interessantes possibilidades, considerando modelos de calibração de redes, é o desenvolvimento e implementação de um modelo de rede *on-line* diretamente ligado com um sistema de aquisição de dados (SCADA), fornecendo dados adicionais para que o esforço de calibração seja atualizado continuamente (SCHULTE e MALM 1993).

Um dos mais importantes problemas no uso de simuladores hidráulicos é determinar que modelo é capaz de representar realmente o sistema físico em estudo. WALSKI (1983) definiu a calibração como duas etapas do processo que compara as pressões e vazões prognosticadas com as pressões e vazões observadas para condições operacionais conhecidas, e ajusta os dados de entrada do modelo para melhorar a relação entre os valores prognosticados com aqueles observados. A calibração acurada depende muito do modelo.

LANSEY e BASNET (1991) apontaram que em termos econômicos, compensa ajustar, executar ou mesmo simular uma representação matemática de um modelo de rede hidráulica, apesar dos custos de calibração do modelo de simulação e da coleta de dados para estimação dos parâmetros não terem decrescido, porém um esforço rigoroso de calibração pode ser alcançado, auxiliando análises de planejamento e decisões operacionais .

2.3 – Modelos de Calibração

SHAMIR (1974) apresentou um método para calibrar uma rede utilizando um algoritmo de otimização para analisar modelos de demanda única. Este trabalho utilizou uma combinação de incógnitas, que podem ser energias e demandas nos nós ou resistências nos elementos.

DONACHIE (1974) escreveu um programa computacional para um análise rápida e eficiente de redes, idealizando a técnica de Newton-Raphson modificado. O programa incorpora uma rotina automática de calibração do sistema de distribuição de água reduzindo o esforço de engenheiros em calibrar seus modelos com a resposta observada do sistema real.

Algoritmos têm sido propostos por pesquisadores para a calibração do sistema com uso de técnicas baseadas em equações analíticas. WALSKI (1983) sugeriu o agrupamento dos coeficientes de perda de carga utilizando estas técnicas para modelos de demanda única.

WALSKI (1983) declarou que muitos pesquisadores consideram os valores de rugosidade encontrados na literatura suficientes para uso nos modelos, porém isto não é geralmente verdadeiro pois: (1) os valores da literatura são meramente valores médios e há uma quantidade razoável de variações sobre a média; (2) em um modelo substituto, uma tubulação deve também considerar a capacidade de carga dos condutos mais próximos que foram eliminados pelo modelo; (3) o fator de rugosidade C para uma tubulação deve também considerar perdas de carga localizadas ao qual não estão explicitamente consideradas para uso

nos comprimentos equivalentes; e (4) o consumo em um modelo é agrupado nos nós, enquanto no sistema real é atualmente distribuído entre os nós.

O desenvolvimento do mesmo autor, citado anteriormente, tornou possível o cálculo do fator de rugosidade C e consumos de água através de testes em hidrantes de incêndio. O problema destas aproximações está baseado na hipótese em que todos os erros não calibrados do modelo são resultados de erros no fator- C ou possivelmente no consumo de água. As experiências descritas concluíram que é improvável que um procedimento analítico simples ou uma técnica de otimização para calibrar um modelo sempre seja desenvolvido. Há simplesmente muitos outros fatores que podem estar incorretos em um modelo não calibrado, e existem muitas origens destes erros. Este trabalho também apontou a importância da comunicação dos modeladores, da acurácia e da atualização dos mapas dos sistemas de distribuição de água, pois vários problemas observados com o modelo foram resultantes do atraso entre a instalação de novas tubulações com as respectivas atualizações nos mapas.

Os métodos para prognosticar as demandas, se tornaram essenciais no processo de calibração de redes hidráulicas. Alguns destes métodos foram desenvolvidos por LINAWEAVER, GEYER e WOLFF (1967) como parte do projeto de pesquisa de demandas residenciais da Universidade de Johns Hopkins. Estes métodos têm sido resumidos sucintamente por CLARK, VIESSMAN E HAMMER (1977) e BOLAND, BAUMANN e DZIEGIELEWSKI (1981).

A acuracidade do modelo é usualmente definida como a diferença entre os valores das pressões ou energias observadas e as prognosticadas nos nós de testes (CESARIO e DAVIS 1984; EGGNER e POLKOWSKI 1976; RAHAL, STERLING e COULBECK 1980; WALSKI 1983), e depende da acurácia dos dados estabelecidos juntamente com o esforço e o custo que o modelo utilizado é preparado para suportar a um ajuste fino do modelo.

Em vez de definir diretamente a calibração através de “diferenças”, é preferível, entendê-la diretamente pelas proporções de pressões observadas com as prognosticadas ou diferenças de perda de carga dos nós de testes próximos das posições de contorno tendo pressões ou energias conhecidas (WALSKI 1986).

ORMSBEE e WOOD (1986) estenderam uma metodologia para ser utilizada na calibração de modelos de hidráulicos de rede. As principais incógnitas adicionais ao sistema algébrico são os coeficientes de atrito e as demandas. Neste algoritmo, substitui-se o diâmetro

por uma constante de perda de carga, no qual inclui-se novas variáveis. Para cada variável (constante de perda de carga) deve-se introduzir uma nova equação no sistema.

ORMSBEE (1989) retomou o algoritmo (ORMSBEE e WOOD 1986) para a calibração dos coeficientes de rugosidade das tubulações de uma rede, apresentando uma outra formulação, baseada em otimização não-linear. Nessa formulação é possível considerar múltiplas condições de demandas, normalmente encontradas durante o período diário de operações.

A função objetivo exprime a minimização da diferença entre os valores observados e previstos, em vários pontos do sistema e sob diferentes condições de consumo. Os valores observados podem incluir pressões nos nós, vazões em trechos ou níveis de água nos reservatórios elevados (RIGHETTO 1994).

BHAVE (1988) desenvolveu uma modificação da aplicação feita por WALSKI (1983) utilizando um procedimento iterativo de calibração, no qual ajustou simultaneamente as demandas nos nós e os coeficientes de resistência das tubulações. O modelo utilizado, ajustou os coeficientes de resistência das tubulações e/ou as demandas dos nós, através de um procedimento por tentativas, fazendo um prognóstico de pressões nos nós, concordando razoavelmente com as respectivas pressões observadas.

Na técnica proposta por WALSKI (1983), as demandas nos nós e as vazões de entrada nos nós de origem, crescem ou decrescem, dependendo do valor do fator de ajuste de demanda. Na técnica proposta por BHAVE (1988) é assumido que a vazão de entrada no nó de origem, pode ser medida ou estimada com bastante acurácia e uma vez conhecida este parâmetro permanece fixo durante a calibração.

Na técnica sugerida por BHAVE (1988), os coeficientes de resistência das tubulações e as demandas nos nós, foram ajustados sucessivamente. A rede foi dividida em vários setores conforme o número de testes disponíveis. As equações de calibração foram então formuladas e resolvidas. Os ajustes foram realizados por grupos de tubulações e aglomerados de nós e os ajustes das demandas nos nós, não foram concentrados, mas distribuídos por toda rede. A técnica também foi realizada sob diferentes condições de carga, produzindo combinações exatas entre os parâmetros prognosticados e os observados. Concluiu-se que a eficiência do procedimento de calibração cresce com o número acentuado de observações.

BOULOS e WOOD (1990) apresentaram um algoritmo explícito para determinar diretamente uma variedade de parâmetros de projeto, operação e calibração de redes

hidráulicas. Esta aplicação oferece uma base para determinar valores ótimos dos vários parâmetros de projeto, operação e calibração, no sentido que, os parâmetros podem ser calculados para encontrar as restrições específicas de vazão e pressão. Podem ser considerados todos os tipos de sistemas de distribuição. Foi utilizado o método de Newton-Raphson como procedimento para linearizar os termos não lineares e resolver simultaneamente o sistema de equações lineares.

Técnicas convencionais por tentativas e técnicas de otimização são inadequadas para esta aplicação citada acima. Os parâmetros indeterminados da rede representam as variáveis de decisão para o algoritmo de otimização explícito. O algoritmo explícito é ótimo, no sentido que, estes parâmetros são explicitamente determinados, para satisfazer especificações limites. As soluções são determinadas por meio de uma faixa contínua de variáveis de decisão.

No trabalho desenvolvido por BOULOS e WOOD (1990), as variáveis hidráulicas são as vazões nos trechos e as cargas nos nós da rede. As variáveis de decisão são introduzidas e definidas a partir de objetivos fixados na análise do sistema. Por exemplo, se o objetivo fosse o de garantir uma certa carga para um nó específico, a variável de decisão poderia ser o aumento da rotação das bombas de uma estação elevatória existente, ou a elevação do nível de água de um reservatório de distribuição por gravidade ou o aumento dos diâmetros das tubulações que irão aduzir água naquele determinado nó.

Portanto, BOULOS e WOOD (1990) afirmaram que a maneira como foi abordada e desenvolvida a aplicação, garante a determinação de parâmetros de projetos, operação e calibração para redes de distribuição de água. O uso de fatores globais e o agrupamento de parâmetros tornam flexível a escolha das variáveis de decisão. Este procedimento elimina a necessidade de um procedimento convencional de ensaios de avaliação ou aplicação de métodos de programação linear ou não linear, tradicionalmente usados para muitos tipos de cálculos. Este método também fornece uma técnica eficiente para acentuar a modelação em tempo real, que requer cálculos rápidos e seguros de muitos parâmetros.

ORMSBEE (1989), desenvolveu um método matemático implícito de calibração para uso nos modelos de redes hidráulicas. O método utilizou um algoritmo de otimização não linear em conjunto com uma rede complexa, ajustando os parâmetros do modelo selecionado, para diversas condições de carga no regime permanente e não permanente.

A principal vantagem da aplicação proposta por ORMSBEE (1989) é que ambos regimes de fluxo puderam ser considerados. Tais características forneceram ao usuário do

modelo, uma base aperfeiçoada para a avaliação dos seus parâmetros antes da aplicação em uma rede hidráulica. Os melhores resultados foram obtidos com o uso de duas etapas, no processo de calibração. Na primeira etapa, os valores de rugosidade das tubulações foram calibrados em condições de regime permanente (alta perda de carga) enquanto que na segunda etapa, a distribuição de demanda, foi calibrada baseada nas condições em regime não permanente (baixa perda de carga).

LANSEY e BASNET (1991) apresentaram uma estrutura similar à de ORMSBEE (1989), onde um algoritmo de programação não linear incorporou um modelo de simulação de rede. O algoritmo de otimização foi aplicado e o modelo pôde considerar simultaneamente condições de carga em regime permanente e não permanente. O modelo admitiu que as medições eram exatas e tinham o objetivo de minimizar a soma dos quadrados ou valores absolutos das diferenças entre valores observados e estimados de vazões nas tubulações e energias nos nós. O problema não linear foi reduzido através da aplicação de uma solução implícita nas equações de conservação de energia e massa, e posteriormente, o sistema foi calibrado juntamente com um modelo de simulação.

O modelo foi capaz de considerar todos os tipos e complexibilidades dos sistemas e todos os parâmetros tipicamente não conhecidos. Os resultados das aplicações demonstraram que a habilidade do modelo procurou soluções ótimas que combinavam aos valores medidos e aos valores computados de energia de pressão no nó, vazão da tubulação, e nível do tanque. Soluções combinadas foram encontradas, utilizando valores absolutos ou desvios quadrados como função objetivo. A divergência quadrática determinou soluções mais rápidas do que a divergência absoluta. Porém, até mesmo um algoritmo estável de calibração, não pode superar a ausência de dados suficientes. Os pesquisadores concluíram que pode haver numerosas alternativas ótimas, até mesmo em comparação com sistemas simples, e que uma grande variedade de valores de parâmetros tem um significativo impacto nos sistemas.

UBER e BUSH (1999) desenvolveram métodos de amostragem de campo para permitir as atividades de modelação, estimando os parâmetros de um modelo matemático ou, calibrando o modelo mais acuradamente. A aplicação foi realizada, utilizando estimação de parâmetros e teoria de projetos de amostragem. Propuseram métodos gerais, baseados nas sensibilidades para classificar as posições e tipo de medições para estimação de parâmetros de um modelo de distribuição de água. Métodos de amostragem são propostos e comparados para a calibração dos coeficientes de rugosidade das tubulações espacialmente distribuídos em simulações hidráulicas em período prolongado de tempo (EPS) e em modelos de qualidade de

água, comumente usados para prognosticar as dinâmicas da velocidade dos fluidos e transporte químico em uma rede hidráulica.

DATTA e SRIDHARAN (1994) aplicaram o método dos mínimos quadrados, baseados nas análises de sensibilidades. Este método tem a flexibilidade de utilizar múltiplas condições de demandas, e foi aplicado em um estudo de caso. Os estudos demonstraram ser uma técnica eficiente e robusta, produzindo convergência em situações variadas e utilizando diferentes variáveis. Os coeficientes de rugosidade foram ajustados em relação às energias baseados em alguns testes de campo.

ARAUJO e LANSEY (1999) desenvolveram um trabalho para identificar as condições de coleta dos dados úteis e localizações das medições. Um procedimento heurístico em três etapas foi desenvolvido para concluir a tomada de decisões. A base para este procedimento foi uma avaliação de calibração que estima o erro no prognóstico de energias por toda parte do sistema. Isto foi calculado através das incertezas para prognosticar a variância dos dados produzidos pelo modelo, dado a incerteza das medições de campo.

SCHAETZEN, SMITH, SAVIC e WALTERS (1999) realizaram um estudo de caso onde o problema de calibração foi solucionado com a aplicação de um algoritmo genético (GA). Este algoritmo é aplicado para produzir calibrações com qualidade consistente de dados, a partir de um modelo de rede razoavelmente calibrado, removendo a subjetividade.

Um novo método de calibração foi desenvolvido e aplicado utilizando a técnica dos algoritmos genéticos combinados com o estado de arte de um modelo de análises transientes (TransAM). A aplicação genética tem sido utilizada para representar vários sistemas físicos e de engenharia. A adequação desta aplicação para a calibração consiste em envolver um sistema de parâmetros em conformidade com a função objetivo selecionada (TANG, KARNEY, PENDLEBURY e ZHANG 1999).

TODINI (1999) apresentou uma técnica original para estimar coeficientes de rugosidade nos circuitos de uma rede de distribuição de água. O problema de estimação destes valores, através de medições disponíveis, conhecidos como problema inverso, foi executado através da minimização do quadrado das diferenças de energias piezométricas ou das demandas nós, conduzindo para um problema de estimação não-linear. A formulação apresentada converteu o problema para um problema de estimação linear, ao qual uma aplicação conhecida por filtro de Kalman foi desenvolvida.

VÍTKOVSKÝ, SIMPSON e LAMBERT (2000) apresentaram uma técnica que trabalha conjuntamente, a calibração e a detecção de vazamento em sistemas de distribuição de água. Esta técnica é denominada método transiente inverso, e utiliza algoritmos genéticos como ferramenta de detecção simultânea dos vazamentos e fatores de atrito.

MEIER e BARKDOLL (2000) demonstraram a necessidade de localizar pontos de testes ótimos nas redes de distribuição de água. Os autores também utilizaram a técnica de algoritmos genéticos para a escolha de tais pontos no sistema em estudo. Posteriormente foi realizado um estudo de caso e dados de campo foram obtidos com os pontos de testes determinados e finalmente, a calibração foi utilizada para ajuste dos dados observados.

3 – METODOLOGIA

3.1 - Introdução

É objetivo deste capítulo ressaltar as possibilidades de estudo, tendo em vista os conceitos fundamentais teóricos apresentados e fazer uma descrição dos modelos clássicos utilizados (método analítico, método analítico modificado e explícito), do critério de convergência adotado, do equipamento e linguagem computacional, das redes de estudo selecionadas e das aplicações que foram desenvolvidas.

3.2 – Método Analítico

As equações analíticas solucionam os problemas de redes hidráulicas através de formulações matemáticas, as quais incorpora-se aos métodos de calibração. Estes métodos ajustam os parâmetros de calibração (coeficientes de rugosidade e demandas nos nós) para posteriormente, comparar as vazões e pressões prognosticadas pelo modelo com as observadas em campo.

3.2.1 – *Formulação Matemática*

Este método, desenvolvido por WALSKI (1983), apresenta uma formulação que auxilia na decisão de ajuste simultâneo dos coeficientes de rugosidade das tubulações e das demandas nos nós. A técnica exige observações das pressões no sistema, em no mínimo, duas condições de carga. Os dados obtidos são sempre coletados em pontos conhecidos, como hidrantes de incêndio, por exemplo, onde pode se obter medições de vazão e energia.

O desenvolvimento das equações, para correção dos coeficientes de rugosidade das tubulações e das demandas nos nós, depende destes dados obtidos nos nós de testes. Os testes são realizados considerando aberturas diferenciadas nos hidrantes. As energias destes nós (hidrante) correspondem então, a uma vazão baixa, Q (hidrante fechado), e a uma vazão alta $Q + Q_f$ (hidrante aberto). As energias correspondentes a estas condições de vazão, podem ser definidas como sendo h_1 e h_2 , respectivamente; a vazão do nó de teste é denominado Q_f , e a energia piezométrica, H , refere-se aos pontos de energia conhecida (reservatórios).

Informações pertinentes que geralmente são incluídas como incógnitas, são as demandas nos nós Q , correspondendo a h_1 ; e o coeficiente de rugosidade da tubulação C .

Para esta situação é possível desenvolver expressões que calculam o fator de rugosidade correto C , de uma determinada área, e as demandas corretas, Q , para um dado grupo de nós em uma rede.

WALSKI (1983) desenvolveu uma regra única para a calibração, representando uma seção do sistema vindo de um nó de energia conhecida para um nó de teste através de uma tubulação equivalente. A perda de carga entre os pontos de energia conhecida e os nós de testes pode ser expresso da seguinte maneira (equações 3.1 e 3.2):

$$H_1 - h_1 = K_1 \left(\frac{S}{C} \right)^{1,85} \quad (3.1)$$

$$H_2 - h_2 = K_2 \left(\frac{S + Q_f}{C} \right)^{1,85} \quad (3.2)$$

$$S = \sum_{i=1}^m Q_i \quad (3.3)$$

onde Q_f é a diferença de vazão entre duas condições de carga, por exemplo: hidrante aberto e fechado; H_1 é a energia em um ponto de energia conhecida para baixa vazão (hidrante fechado); H_2 é a energia em ponto de energia conhecida para alta vazão (hidrante aberto); h_1 é a energia do nó de teste para baixa vazão; h_2 é a energia do nó de teste para alta vazão; K_1 é a constante da tubulação equivalente para baixa vazão; K_2 é a constante da tubulação equivalente para alta vazão; S é o consumo dos nós significativamente afetados pelo teste (equação 3.3); e m é o número de nós afetados pelo teste.

Existem quatro incógnitas nas equações descritas (3.1) e (3.2), K_1 , K_2 , C , e S . As constantes K_1 e K_2 dependem dos diâmetros e comprimentos e são iguais se não houver consumos entre o ponto de energia constante e o nó de teste. K_1 e K_2 podem ser estimados utilizando valores iniciais de C e Q , referenciadas como C_e e Q_e .

Dados os valores de C_e e Q_e , o modelo prognostica uma energia piezométrica como h_3 para a vazão Q_e , e h_4 para a vazão $Q_e + Q_f$. As equações (3.4) e (3.5) são expressões similares à equação (3.1) e podem ser utilizadas para estimar K_1 e K_2 se as estimativas iniciais, $Q_e + Q_f$, não estiverem erradas:

$$K_1 = (H_1 - h_3) \left(\frac{C_e}{S_e} \right)^{1,85} \quad (3.4)$$

$$K_2 = (H_2 - h_4) \left(\frac{C_e}{S_e + Q_f} \right)^{1,85} \quad (3.5)$$

onde h_3 é a estimativa de h_1 do modelo para C_e e S_e ; h_4 é a estimativa do modelo de h_2 para C_e e S_e ; C_e é a estimativa inicial de C ; Q_e é a estimativa inicial de Q ; e S_e é a estimativa inicial de S (equação 3.6).

$$S_e = \sum_{i=1}^m Q_{ei} \quad (3.6)$$

Inserindo os valores de K_1 e K_2 na equação (3.1) e (3.2) e resolvendo para S e C produz:

$$S = \frac{Q_f}{\frac{b}{a} \left(1 + \frac{Q_f}{S_e} \right) - 1} = AS_e \quad (3.7)$$

$$C = \frac{Q_f C_e}{b(S_e + Q_f) - aS_e} = BC_e \quad (3.8)$$

onde:

$$a = \left(\frac{H_1 - h_1}{H_1 - h_3} \right)^{0,54} \quad (3.9)$$

$$b = \left(\frac{H_2 - h_2}{H_2 - h_4} \right)^{0,54} \quad (3.10)$$

$$A = \frac{Q_f}{\frac{b}{a} (S_e + Q_f) - S_e} \quad (3.11)$$

$$B = \frac{Q_f}{b(S_e + Q_f) - aS_e} \quad (3.12)$$

As equações (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11) e (3.12) podem ser utilizadas para calcular valores melhorados de C e Q para a calibração. Os coeficientes a e b são úteis como indicadores de erros nas estimativas iniciais.

Para ajustar as demandas nos nós, individualmente, utilizamos a expressão (3.13):

$$Q_i = AQ_{ei}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.13)$$

Similarmente o coeficiente de rugosidade C para as tubulações deve ser ajustado, e a equação (3.8) pode ser mais corretamente escrita como:

$$C_j = BC_{ej}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

onde n é o número de tubulações afetadas durante os testes. Os parâmetros A e B, são fatores de correção para demandas e coeficientes de rugosidade, respectivamente.

A técnica descrita aplica-se adequadamente, quando a rede está setorizada, permanecendo os nós de testes em seu interior. Se as demandas mudarem drasticamente ao longo destes setores, é necessário subdividir a rede em mais setores e resolver cada setor sucessivamente, da origem (energia constante) até os nós testes.

Usualmente, nem todos os dados requeridos estão disponíveis. Os testes devem ser conduzidos no perímetro do sistema setorizado, e as vazões devem ser tão elevadas o quanto possível, obtendo assim perdas de carga significativas nos nós de testes.

A regras descritas são necessárias para garantir que H_1-h_1 e H_2-h_2 obtenham ordens de magnitude elevadas. Se não forem, então pequenos erros na determinação de h_1 e h_2 podem resultar em grandes erros em Q e C.

Este método baseia-se na hipótese de Q_f conhecido, desta forma, e requer a diferença nas demandas (Q_f) entre alta e baixa vazão. Esta técnica é poderosa no sentido de que, os dados requeridos para a calibração podem ser coletados em apenas um nó de teste.

3.3 – Método Analítico Modificado

Este método, desenvolvido por BHAVE (1988), ajusta os coeficientes de rugosidade das tubulações e/ou as demandas nos nós através de um procedimento iterativo. A calibração da rede é alcançada com acurácia, através da combinação entre os valores prognosticados com

os valores reais. As vazões de entrada da rede (adução) são consideradas conhecidas e permanecem fixas durante o processo de calibração.

Na prática, os sistemas de distribuição real sempre são esquematizados prioritariamente para análises, deixando apenas as características mais importantes, tais como tubulações de maiores diâmetros. A rede esquematizada para calibração, deve representar adequadamente o sistema de distribuição real.

3.3.1 –Preparação dos Dados

Rede Hidráulica Equivalente

Uma rede de distribuição de água consiste em centenas de tubulações com diâmetros variados. A preparação do modelo considerando todas estas tubulações faz com que o problema se torne complexo.

Na prática, portanto, as tubulações menores que 100mm ou muitas vezes iguais a 150mm são eliminadas (FAIR, GEYER e OKUN 1971) ou agrupadas e substituídas por tubulações equivalentes (JEPPSON 1982; WALSKI 1983a) até que a topologia resultante seja possível de ser manuseada. Se muitas tubulações são removidas durante este processo, o modelo resultante pode não representar adequadamente a rede de distribuição.

Para estudar o impacto dos sistemas equivalentes na acurácia dos resultados das análises, EGGNER e POLKOWSKI (1976) realizaram um estudo de caso em parte de uma rede de distribuição que servia uma população de 11275 habitantes. Neste estudo, o teste de vazão foi realizado em hidrantes de incêndio e foi observado uma pressão de 138,8 KPa, sendo a vazão de incêndio disponível no nó de teste igual a 5660 L/min comparado com 5280 L/min do sistema equivalente. Foi observado também que a acurácia no sistema equivalente aumentava quando todas as tubulações de diâmetros menores, próximos ao nó de origem, e as demandas concentradas nos nós, eram incluídas.

Em geral, portanto, a prática da omissão de pequenas tubulações é satisfatório, especialmente quando tais tubulações são perpendiculares às direções reais de escoamento ou estão próximas às tubulações de diâmetros maiores. Por outro lado, as pequenas tubulações agrupadas junto à origem de grandes demandas ou na vizinhança de grandes diâmetros devem ser consideradas no sistema equivalente e, não omitidas.

JEPPSON (1982) desenvolveu fórmulas para tubulações equivalentes e recomendou o agrupamento dos efeitos dos comprimentos, diâmetros e coeficientes de perda de carga incorporados a uma resistência de tubulação constante.

Como muitos programas de análise de redes, requerem a entrada direta do comprimento, diâmetro e coeficiente de tubulações, é preferível usar o comprimento e o diâmetro de grandes tubulações e mudar estes coeficientes para outras tubulações. Para obter resultados reais, o modelador deve também garantir que as posições das válvulas (completamente abertas ou fechadas) e as colocações de válvulas redutoras de pressão sejam corretamente representadas no modelo (EGGENER e POLKOWSKI 1976; RAO, MARKEL e BREE 1977).

Energia dos Nós de Origem

As energias nos nós de origem, podem ser determinadas com relativa acurácia. A elevação de água nos reservatórios e a energia proveniente das bombas podem ser medidas com manômetros apropriados ou por um sistema de telemetria (reservatórios).

Consumo nos Nós de Demanda

A estimação correta da taxa de consumo nos nós de demanda é de difícil compreensão. A taxa de consumo de água depende da população servida por um nó público, comercial, e outros usos; e dependendo do período do dia. Deste modo, a estimação de demandas nos nós é comparativamente menos acurada e pode precisar de ajuste durante o processo de calibração.

Coefficientes de Perda de Carga

A tarefa mais tediosa na calibração de uma rede hidráulica é a seleção apropriada dos coeficientes de perda, coeficientes de Hazen-Williams ou os fatores de atrito de Darcy-Weisbach.

Para a estimação dos coeficientes de perda de carga, é preferível possuir observações em algumas tubulações da rede hidráulica, plotar uma curva onde estão inclusos os coeficientes de perda de carga contra idade das tubulações.

Porém, como apontado por EGGNER e POLKOWSKI (1976), o coeficiente de perda de carga de uma tubulação em uma rede é um parâmetro agrupado, representando não apenas o atrito das tubulações, mais também outras causas da perda de carga tais como ajustes, válvulas, serviços conectados e divergência no alinhamento das tubulações. Este coeficiente depende também da velocidade do escoamento. A interseção dos condutos se assemelha, em se tratando de condições operacionais, às válvulas desligadas e, portanto as perdas de

ramificações e interseções que são apresentadas durante a operação normal são eliminadas durante os testes.

Se o grau de variação de proteção oferecido por camadas distintas e a diferença entre os diâmetros nominais e reais, especialmente para pequenas tubulações são consideradas, temos que o coeficiente de perda de carga contra idade das tubulações, baseados em poucas observações, torna-se menos seguro.

Assim, os testes de campo não podem refletir necessariamente a performance real sob diferentes condições de carga, e como também são onerosos, tais testes não podem ser realizados de forma extensiva, pois se tornam impraticáveis.

Portanto, o modelador deve utilizar curvas de coeficiente de perda de carga contra idade das tubulações, ou gráficos e curvas clássicas (CALIFORNIA SECTION COMMITTEE 1962; COMMITTEE 1935; LAMONT 1981; WILLIAMS e HAZEN 1933), e contar com a experiência e julgamento do trabalho de prognóstico dos coeficientes de perda de carga de tubulações na rede modelo.

A rede equivalente e os dados relativos das energias e abastecimentos dos nós de origem são, em geral, confiáveis e não necessitam de nenhum ajuste durante o processo de calibração.

O RESEARCH COMMITTEE (1974) declarou que a maior origem de erros, na simulação da performance contemporânea, estaria nas distribuições de carga assumidas e nas suas próprias variações, deste modo enfatizando o ajuste dos consumos nos nós.

Por outro lado, EGGNER e POLKOWSKI (1976) declararam que as partes frágeis das informações não são as condições de carga supostas, mas o fator de atrito das tubulações, enfatizando a necessidade do ajuste dos coeficientes de perda de carga.

3.3.2 – Equações Básicas

As equações básicas que governam o escoamento nas redes de distribuição de água são as equações de continuidade no nó e as equações de perda de carga no circuito. De acordo com a equação de continuidade no nó, a soma algébrica das vazões de um nó deve ser zero. Assim,

$$\sum_{\substack{i \text{ incidindo} \\ \text{em } j}} q_i + Q_j = 0 \quad \text{para todo } j \quad (3.15)$$

onde q_i é a vazão na tubulação i incidente no nó j , e Q_j é a vazão externa de abastecimento ou demanda no nó j . De acordo com a equação de *momentum* num circuito fechado, a soma algébrica de perdas de carga nas tubulações em um circuito deve ser zero. Assim,

$$\sum_{i \in c} h_{pi} = 0 \quad \text{para todo } c \quad (3.16)$$

onde h_{pi} é a perda de energia na tubulação i contido no circuito c .

A perda de carga em uma tubulação é geralmente expressa através da fórmula de Hazen-Williams (HW):

$$h_p = \frac{K_{HW} L q^{1,852}}{C^{1,852} D^{4,87}} \quad (3.17)$$

ou pela fórmula de Darcy-Weisbach (DW):

$$h_p = \frac{8fLq^2}{\pi^2 g D^5} \quad (3.18)$$

onde K_{HW} é a constante de Hazen-Williams; L é o comprimento da tubulação; q é a vazão na tubulação; C é o coeficiente de Hazen-Williams; D é o diâmetro da tubulação; e f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach; e g é a aceleração da gravidade. A perda de carga pode também ser expressa através de uma fórmula geral:

$$h_p = R q^n \quad (3.19)$$

onde R é a constante de resistência da tubulação que depende do comprimento, diâmetro, e rugosidade da tubulação; e n é o expoente, usualmente entre 1,7 e 2,0.

3.3.3 – Técnicas de Calibração Disponíveis

Muitas técnicas de calibração têm sido desenvolvidas recentemente. Essas técnicas, brevemente revisadas aqui, podem ser classificadas em duas categorias: técnicas onde apenas

os coeficientes de perda de carga são ajustados; e técnicas onde ambos parâmetros, isto é, coeficientes de perda de carga e demandas nos nós, são ajustados.

Técnicas de Ajuste dos Coeficientes de Perda de Carga

Neste tipo de técnica de calibração admite-se que as demandas nos nós prognosticadas são razoavelmente acuradas e apenas os coeficientes de perda de carga prognosticados precisam de ajuste. Estas técnicas utilizam a fórmula de perda de carga geral da equação (3.19) e ajustam as constantes de resistência das tubulações.

Os coeficientes de perda de carga são subsequentemente avaliados, usando as equações (3.17) ou (3.18), quando a calibração da rede é concluída.

Quando as demandas nos nós e as constantes de resistência são assumidas durante a calibração, a rede tem o número de equações igual ao número de incógnitas e portanto, uma única solução pode ser obtida.

A rede pode possuir locais que permitem a obtenção de informações adicionais, dos quais são tratadas como condições de contorno no modelo. Essas informações podem ser energias conhecidas nos nós, vazões em alguns trechos e/ou correções de descargas nos circuitos.

A variável de decisão adicional pode ser uma constante de resistência da tubulação, obtida da análise da rede. Assim, cada condição adicional conhecida, permite ao usuário do modelo, introduzir uma variável de decisão extra à constante de resistência de uma tubulação não conhecida.

As equações da rede são escritas em termos de energias nos nós, demandas nos nós, e constantes de resistência das tubulações. Para esta combinação de incógnitas, a rede hidráulica pode ser analisada pelo método de Newton-Raphson, utilizando as equações dos nós, como mostradas por SHAMIR e HOWARD (1977) ou as equações dos circuitos como demonstradas por GOFMAN e RODEH (1981), podendo ser até mesmo analisada pelo método de Hardy-Cross, como descrito por BHAVE (1986).

Baseados nestes princípios e usando o método de Newton-Raphson de análises de redes, RAHAL, STERLING e COULBECK (1980) desenvolveram uma expressão para analisar as sensibilidades de todas as energias dos nós, mudando as constantes de resistência das tubulações. Esta expressão é utilizada para derivar outra expressão de ajuste das

constantes de resistência, até que as energias nos nós estimados se aproximem dos valores medidos. Um caminho de seleção das tubulações para ajuste das constantes de resistência é escolher as tubulações que produzem uma grande redução na soma quadrática das discrepâncias entre as energias nos nós medidas e as simuladas. Este critério é matematicamente satisfatório e possui rápida convergência, embora isto possa resultar em uma mudança razoável na constante de resistência de uma tubulação e modificar as características da rede.

RAHAL, STERLING e COULBECK (1980) sugeriram um critério mais confiável de seleção das tubulações. Foram produzidas melhorias na soma quadrática das discrepâncias para pequenas mudanças nas constantes de resistência. Utilizando este critério, as tubulações são selecionadas e as constantes de resistência são ajustadas. As energias dos nós, onde se encontram os reservatórios de elevação são avaliadas e as discrepâncias entre os valores avaliados e observados são determinados. Se as discrepâncias estão dentro de uma tolerância especificada, o procedimento é finalizado, caso contrário, isto é repetido.

RAHAL, STERLING e COULBECK (1980) sugeriram uma tolerância de 0.3m entre os valores observados e prognosticados para um ajuste fino do modelo durante a calibração sob uma única condição de carga.

Em relação a estes princípios citados acima, ORMSBEE e WOOD (1986) propuseram uma técnica de calibração. Se a condição conhecida adicional é utilizada para avaliar uma constante de resistência da tubulação como anteriormente declarado, a constante de resistência da tubulação avaliada pode ser não realística. Por isso, estes autores sugeriram uma aplicação alternativa, onde a variável de decisão adicional é o fator de ajuste de resistência global ao invés da constante de resistência de uma única tubulação. As constantes de resistência assumidas para todas tubulações na rede são multiplicadas pelo fator de ajuste global para obter valores ajustados. Quando mais de uma condição adicional conhecida está disponível, a rede pode ser setorizada (número delas é de natureza igual ao número de condições adicionais conhecidas) e o fator de ajuste das resistências para cada setor é determinado. O método é direto, calibra explicitamente a rede em poucas iterações, e pode ser aplicado para diferentes condições de operação.

Técnicas de Ajuste dos Coeficientes de Perda de Carga e Demandas nos Nós

Uma das técnicas utilizadas para o ajuste simultâneo dos coeficientes das tubulações e demandas nos nós é a aplicação convencional por tentativas. O usuário do modelo confia na

sua própria experiência e no seu julgamento para o ajuste. Diversas simulações do modelo são necessárias para alcançar uma calibração com razoável aceitação.

WALSKI (1983) propôs o método analítico do qual ajusta simultaneamente os coeficientes das tubulações e as demandas nos nós, além de fornecer uma orientação para o ajuste qualitativo dos valores prognosticados.

3.3.4 – Técnica Proposta de Calibração

Na técnica proposta de calibração, ambos parâmetros, isto é, coeficientes de perda de carga das tubulações e demandas nos nós são ajustados, como feito na técnica proposta por WALSKI (1983). Contudo, na técnica citada, as demandas nos nós, e portanto a vazão de entrada da rede cresce ou decresce condicionado ao valor do fator de ajuste.

Na técnica proposta aqui (BHAVE 1988), é assumido que a vazão de entrada na rede pode ser medida ou relativamente estimada com certo grau de acurácia e, portanto isto é conhecido e permanece fixo durante a calibração.

Como as demandas dos nós e os coeficientes das tubulações são simultaneamente ajustados na técnica proposta, no mínimo duas condições adicionais devem ser avaliadas. Estas podem ser obtidas através de medições de energias de dois nós de demanda sob uma particular condição de carga, ou de um nó de demanda sob diferentes condições normais ou de vazões padronizadas de combate a incêndio como realizadas nas aplicações de WALSKI (1983, 1986), ou de um nó demanda sob duas diferentes condições de carga.

Considere, por exemplo, uma distribuição de rede mostrada na figura (3.1). O nó S é um nó de origem (adução) de energia conhecida, neste caso, o reservatório R, e os nós T_1 e T_2 são os nós de testes, onde as energias são medidas sob uma particular condição de carga. Dividindo a rede em setores, uma para cada nó de teste e supondo ΔQ_1 e ΔQ_2 sendo os ajustes de demanda dos setores, respectivamente, naturalmente $\Delta Q_2 = -\Delta Q_1$ até que o ajuste de demanda para toda rede seja zero.

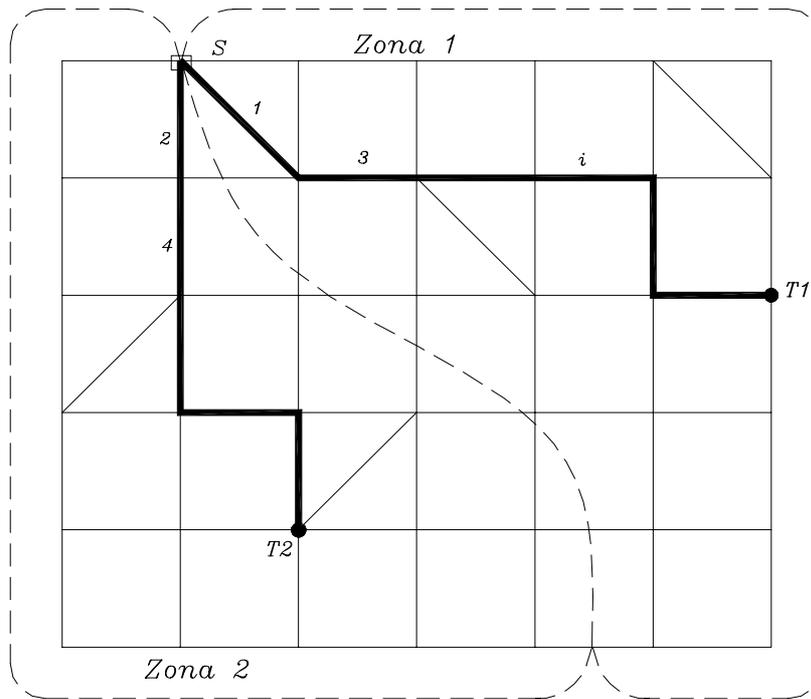


Figura 3.1 – Distribuição da rede

Considerando um caminho vindo de S para T_1 e rotulando as tubulações neste caminho de 1,3,...i... tem-se:

$$R_1(q_{1p})^n + R_3(q_{3p})^n + \dots + R_i(q_{ip})^n + \dots = H_s - H_{t1p} \quad (3.20)$$

onde $R_1, R_3, \dots, R_i, \dots$ são as constantes de resistência das tubulações 1,3,...,i,...; q_{1p}, q_{3p}, q_{ip} , são as vazões nas tubulações 1,3,...,i,...; para as demandas prognosticadas dos nós e constantes de resistência nas tubulações; H_s é a energia da origem S e H_{t1p} é a energia prognosticada de teste no nó T_1 .

Admitindo-se que a correção completa ΔQ_1 é aplicada para a primeira tubulação no caminho S- T_1 , e que esta correção reduz-se ao longo do caminho S- T_1 na proporção que a descarga é conduzida, o ajuste da tubulação i , é dado por: $\Delta Q_i = \frac{q_{ip}}{q_{1p}} \Delta Q_1$.

Se B é o fator de ajuste global para as constantes de resistência, então para o caminho S- T_1 tem-se a equação (3.21) a seguir:

$$BR_1(q_{1p} + \Delta Q_1)^n + BR_3(q_{3p} + \frac{q_{3p}}{q_{1p}} \Delta Q_1)^n + \dots + BR_i(q_{ip} + \frac{q_{ip}}{q_{1p}} \Delta Q_1)^n + \dots = H_s - H_{t1} \quad (3.21)$$

Expandindo a equação (3.21) e desprezando os termos de alta ordem de ΔQ_1 , combinando com a equação (3.20) e simplificando:

$$B(H_s - H_{t1p}) + \frac{nB(H_s - H_{t1p})}{q_{1p}} \Delta Q_1 = H_s - H_{t1} \quad (3.22)$$

Como $B \cong 1$, fazendo $B = 1$ para simplicidade do segundo termo, a equação (3.22) é reduzida para:

$$B(H_s - H_{t1p}) + \frac{n(H_s - H_{t1p})}{q_{1p}} \Delta Q_1 = H_s - H_{t1} \quad (3.23)$$

Similarmente, considerando caminho S-T₂, e fazendo $\Delta Q_2 = -\Delta Q_1$

$$B(H_s - H_{t2p}) - \frac{n(H_s - H_{t2p})}{q_{2p}} \Delta Q_1 = H_s - H_{t2} \quad (3.24)$$

onde q_{2p} é a vazão na tubulação 2, a primeira tubulação no caminho S-T₂. Simultaneamente resolvendo linearmente as equações (3.23) e (3.24), os valores de B e ΔQ_1 são obtidos.

A constante de resistência da tubulação ajustada R_i , o coeficiente de Hazen-Williams ajustado C_i , e o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach f_i ajustado são dados, respectivamente:

$$R_i = BR_{ip} \quad (3.25)$$

$$C_i = \frac{1}{B^{0,54}} C_{ip} \quad (3.26)$$

$$f_i = Bf_{ip} \quad (3.27)$$

Os ajustes de demanda por setor (zona) ΔQ_1 e ΔQ_2 ($= -\Delta Q_1$) são distribuídos na proporção para admitir demandas nos nós, nos setores (zonas) 1 e 2, respectivamente. Portanto, a demanda ajustada no nó Q_j pode ser apresentada por uma equação geral:

$$Q_j = Q_{jp} \left(1 + \frac{\Delta Q_z}{\sum_{j \in N_z} Q_{jp}} \right) \quad (3.28)$$

onde Q_{jp} é a demanda prognosticada do nó j ; ΔQ_z é o ajuste total de vazão por setor (zona); e N_z é o conjunto de nós de demanda no setor (zona) Z .

Os coeficientes de resistência e demandas nos nós são ajustados e então a análise da rede é realizada. É observado que a convergência processa sistematicamente e $B \rightarrow 1$ e $\Delta Q \rightarrow 0$. Contudo, como os termos de maior ordem de ΔQ são descartados e como é assumido que os ajustes das vazões são inteiramente levados pela primeira tubulação nos caminhos, a convergência é mais lenta, e diversas simulações do modelo podem ser necessárias para combinar os resultados ajustados com aqueles observados.

Porém, na prática, dependendo da acurácia dos dados disponíveis, as simulações do modelo podem ser interrompidas quando uma relação razoável é alcançada entre resultados ajustados e observados.

Quando observações são feitas em apenas um nó, sob condições de vazão normal e de incêndio ou sob duas diferentes condições de carga, t_2 e t_1 unem-se dentro de um único nó de teste. Como as observações e, portanto as equações disponíveis são duas, a rede é dividida em duas zonas, mas, o nó de origem S e o nó de teste T , são comuns para ambas zonas. Dois caminhos independentes, começando em S e terminando em T , situados nestas duas zonas, são selecionados. A demanda do nó T pode ser assumida para ser igualmente abastecida pelas duas zonas (setores) e é ajustada diretamente por ambas zonas (setores). Os parâmetros de decisão das duas equações são: ΔQ_1 ; ΔQ_2 ($= -\Delta Q_1$); e B para a rede completa.

3.3.5 – Procedimento Geral de Calibração

1) Preparar os dados do modelo, tão acuradamente quanto possível, fazendo as vazões de saídas totais iguais às vazões de entrada totais, para a rede completa.

2) Medir as energias dos nós de origem e os nós de teste para uma ou mais condições de carga. Também, medir as vazões de incêndio, se os testes são executados nos hidrantes de incêndio.

3) Produzir simulações do modelo para valores prognosticados sob diferentes condições de carga.

4) Obter as energias dos nós de teste, determinar as perdas de carga desde a origem até os nós de teste, e calcular as proporções de perdas de carga para condições prognosticadas e observadas.

5) Se as proporções são aceitas, a calibração é completa; senão continua.

6) Determinar o número de equações adicionais disponíveis para a calibração. Lembrar que uma rede com múltiplos reservatórios de origem, onde as energias e as demandas de todos os nós são conhecidas, a energia de apenas um nó de origem serve como um nó de referência e a energia de cada origem restante, fornece uma equação adicional.

7) Dividir a rede em diversos setores e decidir o número de B's e ΔQ 's até que a soma deles exceda o número de equações disponíveis em um (isto é devido ao último ΔQ ser igual a soma negativa de outros valores de ΔQ). Também selecionar os caminhos, até que todos juntos cubram todas os setores e que estejam na direção geral do escoamento e contenham tubulações que transportem grande parte da vazão em direção aos nós de teste, provenientes das simulações do modelo para a condição prognosticada (etapa 3). Utilizar também princípios iguais para a seleção de caminhos para redes com múltiplas origens.

8) Enquadrar equações apropriadas de ajuste para os caminhos selecionados, resolvê-las, e determinar os valores de B's e ΔQ 's.

9) Ajustar os coeficientes de resistência e demandas nos nós.

10) Tratar os valores ajustados como valores prognosticados e retornar a etapa 3.

3.4 – Método Explícito

Algoritmos explícitos determinam diretamente os parâmetros de projeto, operação e calibração. Soluções iterativas das equações de energia e continuidade fornecem técnicas para a determinação de condições de pressões e vazão em regime permanente, nas redes hidráulicas. A solução do problema é baseada na reformulação das equações de equilíbrio da rede, em termos dos parâmetros específicos do sistema.

O número de equações de energia e continuidade iguala-se ao número de seções das tubulações para todas configurações da rede. Geralmente, a equação resultante fixa é quase linear e é expressa em termos de vazões não conhecidas nas seções da tubulação. Estas equações não lineares podem ser resolvidas por métodos incrementais para linearizar os termos não lineares.

A aplicação do método explícito para a análise de redes, inclui as equações adicionais específicas de energia e continuidade e as equações adicionais que são utilizadas para a determinação direta de uma grande variedade de parâmetros do sistema de tubulações.

Para cada especificação definida, uma equação de energia ou continuidade pode ser incorporada no conjunto de equações do sistema. Uma equação de energia é adicionada, quando a energia em um determinado nó é especificada. Uma equação de continuidade é adicionada, quando a velocidade ou a vazão em uma determinada tubulação é especificada.

As equações de continuidade adicionadas descrevem as vazões específicas nas seções críticas das tubulações, por exemplo, a vazão requerida dentro ou fora do abastecimento. As equações de energias adicionais descrevem as pressões específicas requeridas dos nós projetados, assim como a pressão mínima requerida de um determinado nó projetado para uma aplicação particular.

Cada equação adicional permite o cálculo explícito de um único parâmetro da rede. Os parâmetros não determinados da rede representam as variáveis de decisão para o algoritmo de otimização explícito. O algoritmo explícito é ótimo, no sentido que, estes parâmetros são explicitamente determinados para satisfazer as condições de contorno. As soluções são determinadas para uma quantidade de variáveis de decisão.

Muitas condições de operação podem ser adicionadas. Não há limite para o número de energias ou vazões especificadas correspondendo aos parâmetros de cálculo, desde que se forneça uma relação um para um, ou seja, para cada equação adicionada tem-se uma variável de decisão.

Parâmetros que podem ser explicitamente determinados incluem parâmetros de projetos como os diâmetros, parâmetros de operação como a velocidade das bombas, e parâmetros de calibração como a rugosidade das tubulações. Existem muitas vantagens para uma aplicação que envolve o cálculo explícito dos parâmetros de rede hidráulica.

Na prática, os parâmetros de rede podem ser analisados, utilizando esta aplicação. Uma grande variedade de parâmetros tem sido utilizada por diversos pesquisadores, e incorporados em programas generalizados.

3.4.1 – Formulação Matemática

Geometria da Rede Hidráulica

Uma rede de distribuição compreende uma coleção de tubulações interconectadas em uma configuração específica, com diâmetros, comprimentos e rugosidades específicas. Os trechos das tubulações podem conter bombas, acessórios, assim como conexões hidráulicas e válvulas. Os pontos finais de cada tubulação são identificados como junção nos nós ou nós de energia conhecida. Um nó de junção é um ponto onde duas ou mais tubulações unem-se ou também um ponto de consumo onde vazões podem entrar ou sair do sistema. Um nó de energia conhecida é um ponto onde o grau de energia constante é mantido, como uma conexão a um reservatório, ou uma região de pressão constante. Quando as seções das tubulações, junções nos nós, e nós de grau fixo são propriamente identificados, a relação seguinte é válida (WOOD e RAYES 1981):

$$NP = NJ + NL + NE \quad (3.29)$$

onde NP é o número de trechos das tubulações; NJ é o número de nós de junção; NL é o número de circuitos; e NE é o número de nós de circuitos abertos. Segue da definição que em alguma rede conectada com nós de energia conhecida NF, o número de circuitos abertos, NE, é igual a NF-1.

Adicionalmente, circuitos abertos podem ser identificados em um sistema hidráulico. Um circuito aberto é definido como um caminho de tubulações sem interseção que não contém um caminho fechado entre quaisquer dos dois nós de energia conhecida.

Equações de Equilíbrio em Regime Permanente

Condições de equilíbrio em regime permanente, caracterizando o escoamento de um fluido em uma rede hidráulica, consistem em um número de equações de continuidade de massa NJ, uma para cada nó do sistema, e um número de equações de conservação de energia. (NL + NE), um para cada circuito do sistema. Para cada nó do sistema, a equação de conservação de massa requer que a soma algébrica de vazões seja igual a zero.

Ao redor de qualquer circuito, a equação de conservação de energia requer que a perda de carga acumulada (incluindo menor perda) menos alguma energia posta dentro do fluido através de bombas, menos a diferença do grau de energia total entre dois nós limites (zero para circuitos fechados) deva ser zero. O problema analítico de escoamento resultante em regime permanente pode ser formulado como:

$$\sum_{i=1}^{NP} \lambda_{j,i} q_i - Q_j = 0, \quad j=1,2,\dots,NJ \quad (3.30)$$

$$\sum_{i=1}^{NP} \gamma_{n,i} \left[K_{pi} q_i^n + K_{mi} q_i^2 \right] - \Delta E_n = 0, \quad n = NJ + 1, \dots, NP \quad (3.31)$$

onde $\gamma_{n,i} = -1$ se a tubulação i pertence ao circuito n com orientação oposta ao sentido adotado; $\gamma_{n,i} = 0$ se a tubulação i não pertence ao circuito n ; $\gamma_{n,i} = 1$ se a tubulação i pertence ao circuito n com mesma orientação do sentido adotada; $\lambda_{j,i} = -1$ se a tubulação i tem sentido voltado ao nó j ; $\lambda_{j,i} = 0$ se a tubulação i não está conectada com o nó j ; $\lambda_{j,i} = +1$ se a tubulação i tem sentido voltado ao nó j , e ΔE_n é zero para circuitos fechados e diferente de zero para os circuitos abertos, sendo igual à diferença de carga entre os nós de contorno do circuito aberto; q_i é a vazão volumétrica em uma seção da tubulação i ; Q_j é a vazão de entrada externa ou demanda (- se vazão de saída; + se vazão de entrada) do nó j ; K_{pi} é uma constante de tubulação i , onde é uma função do comprimento, diâmetro, e rugosidade; n é um expoente dependente da expressão de perda de carga utilizado; K_{mi} é uma constante de perda de carga para todas as singularidades existentes no trecho i .

Manuseio de Parâmetros da Rede como Incógnitas

As análises de um sistema de distribuição de água determinam o comportamento do um sistema sob diferentes condições de equilíbrio, em regime permanente, para características de tubulações especificadas, modelos de demanda e energias dos reservatórios. Estas análises envolvem a solução de NP equações simultâneas em termos de NP vazões incógnitas dadas pelas equações (3.30) e (3.31).

As equações de escoamento são também funções do comprimento, diâmetro, rugosidade, coeficiente de perda localizada, energia de bomba, energia de reservatório, velocidade da bomba, e outros parâmetros do sistema. É possível resolver explicitamente os parâmetros indeterminados do sistema para encontrar a performance do sistema requerido. O objetivo é satisfazer as equações de equilíbrio da rede e as equações adicionais que descrevem

o comportamento do sistema representado, através de um conjunto de condições de contornos quase lineares. Estas condições são expressas como pressão de estado (não linear) e restrições de igualdade de vazão (linear). Isto pode ser feito através de uma equação adicional de energia ou continuidade para cada variável de decisão adicionada ao conjunto de equações.

Uma equação de energia é adicionada quando a pressão de um nó de junção crítica é especificada. A equação de energia adicionada é escrita como um circuito aberto para um caminho de tubulações entre o nó crítico e o nó dado pelo sistema, que incorpora as variáveis de decisão adicionadas. Uma equação de continuidade é adicionada, quando a condição de vazão para uma tubulação crítica é especificada. Como há muitas especificações limites, as equações podem ser adicionadas como decisórias. Cada especificação adicionada, é expressa como pressão de estado ou restrição de vazão, permitindo a determinação direta de um parâmetro adicional do sistema. Não existe restrição no número de limitações de igualdade e os cálculos dos parâmetros associados enquanto uma relação um para um é mantida, isto é, a relação seguinte deve ser assegurada:

$$NP + ND = NJ + NL + NE + NC \quad (3.32)$$

onde ND é o número de variáveis de decisão adicionadas; e NC é o número de equações adicionadas.

Existem três caminhos onde os valores explícitos podem ser calculados. Para cada pressão projetada ou condição de vazão, um dos cálculos seguintes podem ser feitos.

1) Cálculo de um único valor explícito para um parâmetro único projetado. Por exemplo, o cálculo do diâmetro de uma tubulação projetada que necessita encontrar uma condição de pressão especificada.

2) Cálculo de um único valor explícito para um parâmetro múltiplo projetado aplicado para um grupo de variáveis. Por exemplo, o cálculo de um valor de carga piezométrica única para ser utilizada como o ajuste em válvulas reguladoras de pressão encontrar uma pressão específica em uma região.

3) Cálculo de uma mudança de fator global para um parâmetro projetado. Por exemplo, uma mudança percentual em todas rugosidades de tubulações para um grupo de tubulações projetadas encontrar uma pressão específica baseada em testes de campo.

A flexibilidade considerável no ajuste dos parâmetros da rede é obtida quando um fator global é utilizado, como uma variável de decisão. Este fator, que ajusta todos ou um grupo de parâmetros selecionados da rede, pode ser calculado para satisfazer a igualdade da condição imposta.

Novamente, muitas condições (equações) podem ser adicionadas. Na medida que, as condições de contorno são impostas, vários parâmetros dos sistemas de tubulações podem ser agrupados, desde que, a soma destes grupos de parâmetros seja igual ao número de condições específicas, e que uma diferença do fator global para cada grupo, possa ser calculada.

Este fator é utilizado para ajustar todas as variáveis de decisão constituídas nos seus respectivos grupos. Cada grupo consiste de um conjunto de tubulações com um sistema de incógnitas característico, que pode diferir de um grupo para o outro. Adicionalmente, tubulações selecionadas podem ser excluídas destes grupos e permanecerem inalteradas. Por exemplo, um grupo pode conter todas as rugosidades de tubulações mais velhas de uma determinada idade, e um segundo grupo pode conter de todas demandas nos nós que representam consumo industrial.

Combinações de numerosos tipos de parâmetros e os três métodos anteriormente descritos, para cálculos dos valores dos parâmetros, fornecem uma aplicação geral para definição das variáveis de decisão a serem determinadas.

3.4.2 – Método de Solução – Algoritmo de Newton-Raphson

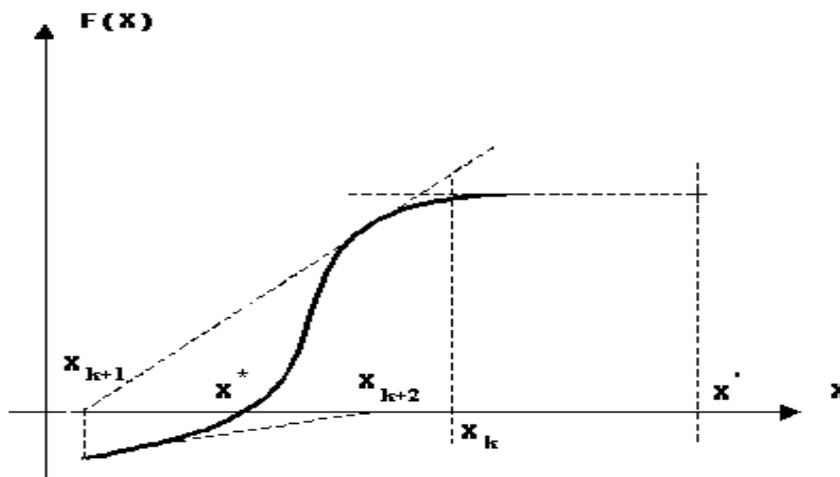


Figura 3.2 – Interpretação gráfica do método de Newton-Raphson

A técnica de Newton–Raphson baseia-se em achar um novo conjunto de aperfeiçoamentos ou correções para os valores das incógnitas em cada iteração. Os aperfeiçoamentos são calculados do termo de primeira ordem de uma expansão de Taylor sobre o argumento atual da solução. O método de Newton–Raphson está apresentado geometricamente na figura (3.2).

O valor de x é a solução procurada, tal que:

$$f(x)_{x=x^*} = f(x^*) = 0 \quad (3.33)$$

Para a k -ésima iteração a aproximação para x^* é denotada por x_k . A iteração seguinte é dada por:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k = x_k - \frac{f(x_k)}{df(x_k)/dx} \quad (3.34)$$

onde $df(x_k)/dx$ é a derivada de $f(x)$ avaliada em X_k . A equação para o k -ésimo aperfeiçoamento Δx_k , pode ser escrita como:

$$f(x) + \frac{df}{dx} \Delta x = 0 \quad (3.35)$$

onde $f(x)$ e sua derivada são avaliadas utilizando o valor de x .

Quando há n equações para satisfazer $f_1(x_1, \dots, x_n) = 0, \dots, f_n(x_1, \dots, x_n) = 0$ e n incógnitas (x_1, \dots, x_n) para serem resolvidas, o conjunto de n aperfeiçoamentos $(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$ é a solução do conjunto de n equações lineares simultâneas :

$$f_i(x_1, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3.36)$$

A solução simultânea de NP+ND equações quase lineares é requerida para determinar a vazão em cada tubulação mais as variáveis de decisão específicas. Esta solução pode ser obtida através da linearização do conjunto de equações usando a técnica de Newton-Raphson (EPP e FOWLER 1970; MARTIN e PETERS 1963; SHAMIR e HOWARD 1968).

Com este método, um procedimento iterativo simultâneo é construído através do truncamento da expansão da série de Taylor do resíduo da equação determinada após o termo linear. A pré-ordenação destas equações não é necessária desde que todas estas equações

sejam manuseadas simultaneamente pelo método de Newton-Raphson. O processo iterativo resultante pode ser expresso abaixo:

$$K(q, W)^{(v)} \left\{ \frac{\Delta q}{\Delta W} \right\}^{(v+1)} = -\{F(q, W)^{(v)}\}, v \geq 0 \quad (3.37)$$

$$q^{(v+1)} = q^{(v)} + \Delta q^{(v+1)} \quad (3.38)$$

$$W^{(v+1)} = W^{(v)} + \Delta W^{(v+1)} \quad (3.39)$$

onde q é o vetor de vazões; W é o vetor de variáveis de decisão; F é uma função que depende das variáveis vazões e decisão; Δq é o vetor de vazão incremental; e ΔW é o vetor incremental das variáveis de decisão. O sobrescrito em parênteses designa o número de iterações, onde v é a iteração corrente de Newton-Raphson. A matriz Jacobiana K (Equação 3.40) é dada por:

$$K(q, W) = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial q_1 \dots & \partial f_1 / \partial q_{NP} & \partial f_1 / \partial W_1 \dots & \partial f_1 / \partial W_{ND} \\ \partial f_{NP+ND} / \partial q_1 \dots & \partial f_{NP+ND} / \partial q_{NP} & \partial f_{NP+ND} / \partial W_1 \dots & \partial f_{NP+ND} / \partial W_{ND} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Em cada iteração o conjunto de equações pode ser resolvido para as correções (Δ 's). Estas equações fornecem os valores das incógnitas para se obter novas estimativas da solução. A solução pode ser encontrada utilizando métodos de resolução lineares (Anexo A1).

As iterações continuam até que uma solução convergente é alcançada, e a convergência do método é atingida quando as normas de diferenças relativas entre duas iterações sucessivas para ambos dados de vazão e variáveis de decisão são menores que uma tolerância especificada. As energias de cada nó podem então ser calculadas, começando dos nós dados e adicionando ou subtraindo mudanças nas linhas de energia, baseadas nos valores conhecidos para vazão e variáveis de decisão.

3.4.3 – Algoritmo Proposto de Resolução para o Método Explícito

O algoritmo descrito nesse item é uma contribuição original desse trabalho. Esse algoritmo foi desenvolvido para auxiliar implementações gerais do problema de calibração de redes hidráulicas utilizando o método explícito.

Considerando a formulação geral (3.37) e substituindo a variável de decisão W pelo coeficiente de rugosidade (C) tem-se:

$$K(q, C)^v \left\{ \frac{\Delta q}{\Delta C} \right\}^{v+1} = -\{F(q, C)\}^v, \quad v \geq 0 \quad (3.41)$$

onde K é a Matriz Jacobiana; q é a vazão no trecho; C é o coeficiente de rugosidade; F é uma função que depende das variáveis vazão e coeficiente de rugosidade; e v é a ordem de iteração. A função F é composta pelas equações de continuidade da rede para todos os nós, pelas equações dos circuitos fechados e das equações adicionais.

O sistema de equações (3.41) pode ser formulado de forma geral (equação 3.42) onde as matrizes A^t , O , Z e W , bem como os vetores q , C , S , U e M são apresentados posteriormente no transcórre do desenvolvimento.

$$\left\{ \begin{bmatrix} A^t & O \\ Z & W \end{bmatrix} \right\} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta C \end{bmatrix} \right\}^{k+1} = - \left\{ \begin{bmatrix} S \\ U \\ M \end{bmatrix} \right\} \quad (3.42)$$

Para exemplificação do algoritmo (equação 3.42) é considerada uma rede de pequeno porte apresentada por NIELSEN (1989).

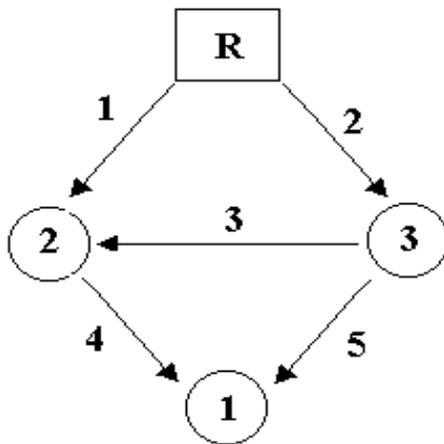


Figura 3.3 – Rede exemplo utilizada por Nielsen (1989)

Considerando a fórmula de perda de carga de Hazen-Williams em uma tubulação com um fator de correção para o coeficiente de rugosidade tem-se a equação (3.43):

$$hp = 10,643 \frac{L q^{1,85}}{(F_c C)^{1,85} D^{4,87}} \quad (3.43)$$

onde L é o comprimento da tubulação; q é a vazão no trecho; C é o coeficiente de rugosidade; D é o diâmetro da tubulação; e F_c é o fator de correção do coeficiente de rugosidade.

As matrizes que representam a figura (3.3) são dadas:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad A_r = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad C_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

onde a matriz A é a matriz de incidência dos nós; a matriz A^t é a matriz transposta da matriz A ; a matriz A_r é a matriz de incidência dos nós com reservatórios; a matriz O é uma matriz nula de ordem m (trechos) por ne (número de equações adicionais); a matriz C é a matriz dos circuitos e a matriz C_a é a matriz dos coeficientes dos circuitos abertos.

A matriz de incidência A é definida em relação à direção de fluxo adotado na rede (figura 3.3). A ordem desta matriz A é igual ao número de trechos (m) pelo número de nós (n). Como exemplo, observa-se na figura (3.3) o trecho 4, a sua montante está o nó 2 e a sua jusante está o nó 1, dessa forma são atribuídos indexadores 1 e -1 aos elementos A_{41} e A_{42} da matriz A , respectivamente. No caso de trechos interligados ao reservatório segue o mesmo procedimento da matriz de incidência A , porém observa-se a criação da matriz A_r , onde sua ordem, é igual ao número de trechos (m) pelo número de reservatórios (r). Como exemplo, observa-se o trecho 1, onde a sua montante encontra-se o reservatório, e a sua jusante o nó 2, dessa forma são atribuídos indexadores 1, ao elemento A_{12} da matriz A , e -1 ao elemento A_{r11} da matriz A_r .

Observando-se a figura (3.3) tem-se os nós 1 e 3 como nós de testes adotados. O circuito composto pelos trechos 1, 2 e 3 é denominado circuito 1, o circuito obtido pelos trechos 3, 4 e 5 é denominado circuito 2. A matriz C possui ordem m (trechos) por $m-n$ (circuitos), onde n é o número de nós. Para a montagem da matriz C observa-se o circuito 1 da figura (3.3), considerando o sentido anti-horário para este circuito, percebe-se que o trecho 1 está no mesmo sentido do fluxo adotado (anti-horário), então recebe o indexador 1 (C_{11}), já os trechos 2 e 3, recebem indexadores -1 por estarem contrários ao fluxo. Este procedimento pode ser verificado nos elementos da matriz C .

A ordem da matriz C_a é m por nca , onde nca é o número de circuitos abertos e está relacionado ao nó de teste, neste caso, o circuito aberto 1 é formado pelas tubulações 1 e 4 da

figura (3.3), e o circuito aberto 2 é formado pela tubulação 2. O circuito aberto é definido pelo percurso da água do nó de energia conhecida (reservatório) para os nós de testes (1 e 3).

Para obtenção da matriz Z no equacionamento (3.42) tem-se:

$$Z = C_e \cdot Dz \quad (3.44)$$

$$C_e = \begin{bmatrix} C^t \\ -Ca^t \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

onde $Dz = \text{diag}[dz_1, \dots, dz_m]$, sendo dz a derivada da equação (3.43) em termos de vazão para cada trecho.

Para obtenção da matriz W (equação 3.42) determina-se a matriz $Dw = \text{diag}[dw_1, \dots, dw_m]$, onde dw é a derivada da equação (3.43) em termos do fator de correção F_c para cada trecho da rede. Então a matriz W pode ser escrita da seguinte maneira:

$$W = -C_e Dw M_{cr} \quad (3.46)$$

onde, M_{cr} é a matriz dos coeficientes de rugosidade de ordem m (trechos) por ns (número de setores), que para cada trecho tem-se um setor correspondente. $M_{cr}[i,j] = m_{ij}$, para i pertencente ao setor j atribui-se 1, caso contrário 0. Considerando a figura (3.3), tem-se a rede dividida em dois setores, o primeiro conta com os trechos 1 e 4, e o outro conta com as tubulações 2,3 e 5, desta forma tem-se a matriz M_{cr} :

$$M_{cr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz S pode ser determinada através da equação (3.47):

$$S = A^t q \quad (3.47)$$

A matriz U é determinada utilizando a matriz transposta dos circuitos C , a matriz incidência com reservatório A_r , o vetor coluna H_r , que é composto pelas energias de cada reservatório do sistema, e a matriz $DQ = \text{diag}[dq_1, \dots, dq_m]$ onde dq é a derivada da equação (3.43) em termos da vazão no trecho. A matriz U pode ser escrita da seguinte maneira:

$$U = C^t [DQ + (Ar Hr)] \quad (3.48)$$

Finalmente, a matriz M pode ser escrita da seguinte maneira:

$$M = (-Ca^t DQ) + (Hre - Ht) \quad (3.49)$$

onde Hre é o vetor coluna de energia (conhecida) referente aos nós de testes; Ht é o vetor coluna das energias reais (medidas) dos nós de testes. Com isso tem-se o algoritmo do método explícito definido.

3.5 – Critério de Convergência

Existem vários critérios para interromper as rotinas de programas computacionais. Um critério de convergência simples e fácil de ser implementado pode ser adotado, quando a maior diferença das variáveis incógnitas entre duas iterações consecutivas for menor que uma tolerância especificada.

Seja V um espaço vetorial sobre o corpo R. Uma norma em V é uma aplicação $\|\cdot\| : V \rightarrow R$, satisfazendo as seguintes condições:

$$\|x\| \geq 0, \|x\| = 0, \Leftrightarrow x = 0, \forall x \in V \quad (3.50)$$

$$\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|, \forall \lambda \in R, \forall x \in V \quad (3.51)$$

$$\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|, \forall x, y \in V \quad (3.52)$$

Se $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ então:

$$\|x\|_2 = \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.53)$$

A equação (3.53) é referente à norma 2, esta norma é conhecida como norma euclidiana. O critério de parada foi estabelecido da seguinte maneira:

$$\|x^{k+1}\|_2 - \|x^k\|_2 \leq \text{TOL} \quad (3.54)$$

A equação (3.54) descreve que a norma da iteração posterior ($k+1$) menos a norma na iteração anterior (k) for menor ou igual a uma tolerância (TOL), o processo iterativo é finalizado.

3.6 – Equipamento e Linguagem Computacionais

A programação dos algoritmos foi implementada no Delphi 5.0 (Pascal) e o equipamento utilizado foi um microcomputador Pentium II 350 MHz, com 64 MB de memória RAM. Três programas computacionais foram desenvolvidos. Todos os programas foram desenvolvidos para o ajuste dos coeficientes de resistência das tubulações e/ou as demandas nos nós. As sub-rotinas bem como os programas encontram-se no Anexo (A3) deste trabalho. Estes programas tiveram a capacidade de realizar simulações em duas redes de estudo com configurações geométricas limitadas, pois não foram incorporados componentes hidráulicos como válvulas, bombas e outros equipamentos que simulam condições operacionais.

3.7 – Redes de Estudo

Para o estudo do desempenho e comportamento dos métodos propostos neste trabalho, foram selecionadas duas redes encontradas com frequência na literatura. A primeira rede exemplo é constituída de 9 trechos, 6 nós e 1 reservatório (figura 3.4). A segunda rede exemplo é constituída de 23 trechos, 12 nós e 1 reservatório (figura 3.5). Os níveis dos reservatórios para cada rede exemplo estão apresentados na tabela (3.1).

Tabela 3.1 – Níveis dos reservatórios para cada rede exemplo

Níveis dos Reservatórios (m)	
Rede Exemplo 1	60,9
Rede Exemplo 2	100,0

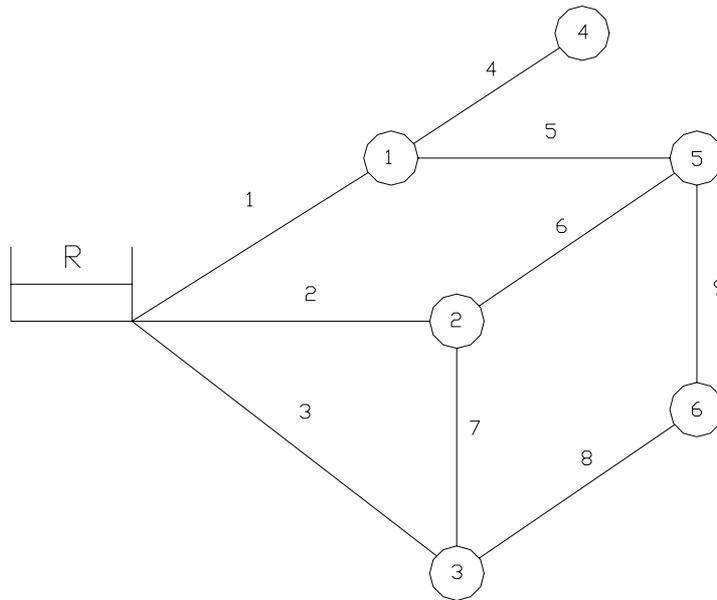


Figura 3.4 – Rede exemplo 1

Os dados geométricos da rede exemplo 1, tais como, diâmetros, comprimentos e coeficientes de rugosidade são apresentados na tabela (3.2).

Para obtenção dos valores reais de energia nos nós e vazão nos trechos foi utilizado o modelo de análise de redes desenvolvido por NIELSEN (1989) que se encontra detalhado no Anexo (A2). Os dados geométricos (tabela 3.2) e as demandas reais nos nós (tabela 3.3) referentes à rede exemplo 1, foram tratados como os dados de entrada deste modelo de análise de redes. As tabelas (3.4) e (3.5) apresentam os valores reais das energias nos nós e vazões reais nos trechos para a rede exemplo 1.

Tabela 3.2 – Dados Geométricos Reais da Rede Exemplo 1

Dados Geométricos Reais			
Trechos	D (m)	L (m)	C
1	0,30	609,6	111,1
2	0,40	762,0	111,1
3	0,25	914,4	111,1
4	0,20	304,8	111,1
5	0,30	609,6	111,1
6	0,30	457,2	111,1
7	0,20	152,4	111,1
8	0,30	304,8	111,1
9	0,30	152,4	111,1

Tabela 3.3 – Demandas reais nos nós para a rede exemplo 1

Demandas nos Nós (m³/s)	
Nó	Vazão
1	0,063
2	0,126
3	0,032
4	0,025
5	0,095
6	0,032

Tabela 3.4 – Energias reais nos nós para rede exemplo 1

Energia Real (m)	
Nó	Energia
1	53,3
2	54,2
3	53,4
4	51,8
5	52,6
6	52,6

Os dados geométricos da rede exemplo 2, tais como, diâmetros, comprimentos e coeficientes de rugosidade são apresentados na tabela (3.6).

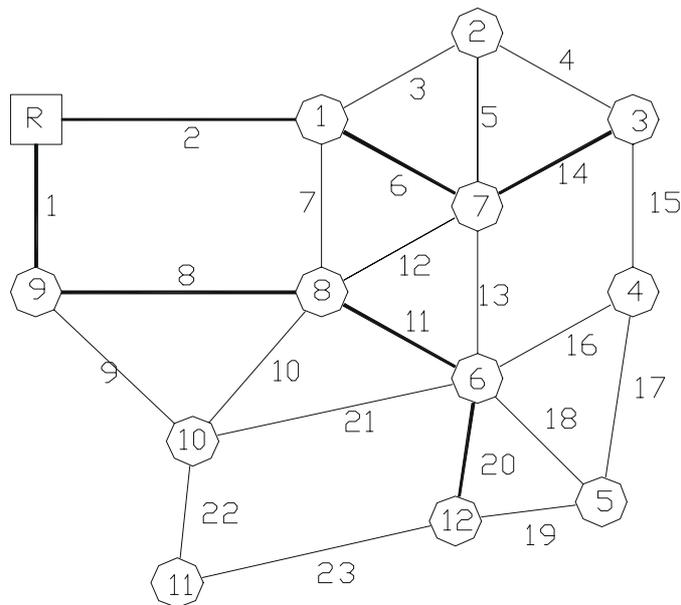


Figura 3.5 – Rede exemplo 2

Para obtenção dos valores reais de energia nos nós e vazão nos trechos foi utilizado o modelo de análise de redes proposto por NIELSEN (1989) (Anexo A2). Foram considerados

os dados geométricos (tabela 3.6) e as demandas reais nos nós (tabela 3.7) referentes à rede exemplo 2, como dados de entrada no modelo. As tabelas (3.8) e (3.9) apresentam os valores reais das energias nos nós e vazões reais nos trechos para a rede exemplo 2.

Tabela 3.5 – Vazões reais nos trechos para rede exemplo 1

Vazão Real (m³/s)	
Trecho	Vazão
1	0,1218
2	0,2144
3	0,0599
4	0,0250
5	0,0338
6	0,0622
7	0,0262
8	0,0541
9	0,0010

Tabela 3.6 – Dados geométricos reais da rede exemplo 2

Dados Geométricos Reais			
Trechos	D (m)	L (m)	C
1	0,40	300,0	113,5
2	0,40	400,0	113,5
3	0,30	350,0	113,5
4	0,25	500,0	113,5
5	0,30	400,0	113,5
6	0,35	300,0	113,5
7	0,30	400,0	113,5
8	0,30	500,0	113,5
9	0,25	600,0	113,5
10	0,20	300,0	113,5
11	0,25	300,0	113,5
12	0,30	300,0	113,5
13	0,25	400,0	113,5
14	0,30	300,0	113,5
15	0,20	500,0	113,5
16	0,25	400,0	113,5
17	0,20	300,0	113,5
18	0,25	500,0	113,5
19	0,20	400,0	113,5
20	0,25	300,0	113,5
21	0,15	300,0	113,5
22	0,20	400,0	113,5
23	0,15	500,0	113,5

Tabela 3.7 – Demandas reais nos nós para a rede exemplo 2

Demandas Reais (m³/s)	
Nó	Vazão
1	0,040
2	0,030
3	0,020
4	0,030
5	0,040
6	0,050
7	0,060
8	0,040
9	0,010
10	0,020
11	0,040
12	0,020

Tabela 3.8 – Vazões reais nos trechos para rede exemplo 2

Vazão Real (m³/s)	
Trechos	Vazão
1	0,1583
2	0,2423
3	0,0573
4	0,0154
5	0,0119
6	0,0967
7	0,0482
8	0,0930
9	0,0552
10	0,0128
11	0,0598
12	0,0285
13	0,0482
14	0,0289
15	0,0243
16	0,0180
17	0,0123
18	0,0239
19	0,0036
20	0,0302
21	0,0140
22	0,0340
23	0,0059

Tabela 3.9 – Energias reais nos nós para rede exemplo 2

Energia Real (m)	
Nó	Energia
1	95,8
2	94,7
3	94,4
4	92,2
5	91,8
6	92,6
7	94,7
8	94,9
9	98,6
10	94,5
11	91,2
12	91,9

3.8 - Aplicações

As simulações realizadas nas redes exemplos tiveram as seguintes finalidades:

- Comparar a eficiência das formulações apresentadas e propostas.
- Estabelecer critérios de comparação para os métodos de calibração propostos.
- Observar o grau de acurácia dos valores fornecidos pelas redes exemplos com aqueles prognosticados pelos modelos propostos.
- Confrontar os métodos propostos com uma tolerância fixada.
- Analisar o comportamento das redes exemplo sob condições de carga.
- Realizar simulações para possíveis generalizações e aperfeiçoamentos dos modelos e formulações propostas.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Introdução

O estudo do comportamento real dos sistemas de distribuição de águas, utilizando os métodos clássicos de calibração de redes hidráulicas, é um tanto vasto e envolve técnicas numéricas complexas para a obtenção de resultados.

Uma vez fundamentados os conceitos teóricos sobre os sistemas de distribuição de água, realizou-se um estudo, cujo objetivo foi destacar as diferenças e o desempenho de cada um dos métodos descritos, tomando-se como base, alguns exemplos de sistemas de distribuição de águas encontrados na literatura (figuras 3.4 e 3.5).

Nesse trabalho, as discrepâncias ou desvios, entre os valores calibrados e os valores reais foram analisados em relação às energias nos nós. As energias ou pressões nos nós garantem referenciais para o estudo da acurácia e validação dos resultados obtidos no processo de calibração.

Segundo CESARIO e DAVIS (1984), EGGENER e POLKOWSKI (1976) e WALSKI (1983), uma forma de investigar a acurácia de um modelo de calibração, é analisar os dados em termos de diferenças dos valores calibrados em relação aos valores reais. A consistência desta relação fornece uma referência que garante a validação dos resultados.

WALSKI (1983) afirmou que um desvio médio entre os valores calibrados e os valores reais, no intervalo de $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$, é considerado aceitável, em se tratando das energias nos nós.

Já CESARIO e DAVIS (1984) afirmaram que modelos podem ser calibrados para uma acurácia entre $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, em relação às energias nos nós.

BUSH e UBER (1999) afirmaram que para a obtenção de parâmetros de calibração acurados é necessário apenas simular a rede hidráulica com múltiplas condições de carga.

WALSKI (1983) afirma também que os valores podem sofrer desvios significativos nas soluções, dependendo do local de medição na rede hidráulica e recomenda que os dados sejam obtidos nos nós de contorno da rede, distantes dos reservatórios.

HARRIS (1984) fez um estudo de caso, onde um modelo de calibração foi desenvolvido e seus dados analisados através de gráficos de barras, confrontando energias e nós. Foi realizada uma comparação das energias simuladas em relação às energias medidas.

ORMSBEE (1989) afirma que para se obter uns resultados de calibração únicos, requerem-se duas estratégias de simulação, sequencial e média, onde a rede é dividida em setores. A estratégia sequencial ajusta os parâmetros para um setor e depois fixa este valor, ajustando os parâmetros para o próximo setor e assim sucessivamente. Já na aproximação média, é obtida uma média dos valores finais ajustados de cada setor, gerando assim um fator de rugosidade global.

Nesse trabalho, os parâmetros foram ajustados simultaneamente, considerando diferentes setores e cada setor apresenta um parâmetro de calibração ajustado, além do ajuste global considerado para as demandas nos nós.

Os resultados de cada setor representam uma condição de contorno adicionada. Esta condição de contorno foi obtida a partir de energias de alguns nós determinados na rede, os quais são denominados nós de teste.

4.2 - Dados de Entrada dos Modelos de Calibração

A metodologia para a obtenção dos dados de entrada para os modelos de calibração é apresentada a seguir. Os métodos descritos nesse trabalho possuem algumas particularidades e exigem informações iniciais distintas.

Estas informações são denominadas "medições" nos pontos do sistema (nós de testes) onde há um monitoramento ou um teste, representando os dados "reais" do sistema estudado. Depois de obtidas estas informações adicionais (dados reais), estes valores são comparados com os resultados prognosticados pelo modelo de calibração, segundo uma tolerância especificada.

Como as aplicações nesse trabalho são teóricas, os termos especificados como dados "reais" são aqueles valores que na prática representam o comportamento real do sistema de distribuição de água, obtido por informações amostrais de campo (medição de energia ou vazão). Portanto, foi considerada uma suposta medição de vazão (perturbação ou incremento) em alguns pontos da rede (nós de testes) como procedimento para obter informações do sistema.

As simulações consideraram as redes exemplos (figuras 3.4 e 3.5) divididas em setores, como forma de avaliar a acurácia dos resultados produzidos pelos modelos de calibração.

Devido à divisão da rede em vários setores, foi necessária a consideração de nós referenciais para as supostas medidas de vazão. Estes nós representam, na prática, os pontos de testes do sistema de distribuição de água.

Após a fixação dos nós de teste (monitorados), foi possível simular as energias nos nós e as vazões nos trechos de cada rede exemplo, utilizando o modelo de análise de rede proposto por NIELSEN (1989).

Os dados de entrada para o modelo de calibração em diferentes simulações, foram obtidos através de supostas medidas de vazão nos nós de testes. Estas medidas são denominadas incrementos de vazão. Estes incrementos foram acrescentados nas demandas dos nós, obtendo assim todas as energias e vazões das redes em estudo. As tabelas (4.2 e 4.7) apresentam os incrementos de vazão de cada rede exemplo e seus respectivos nós de testes. Existem valores na literatura para estes incrementos, alguns dados relativos podem ser encontrados nos estudos de WASLKI (1983).

Nesse trabalho, alguns dados receberam a denominação "estimados". Estes dados estão relacionados, na prática, aos dados de projeto da rede (coeficientes de rugosidade e demandas nos nós). O tempo de operação das redes serve como um indicador de avaliação para os analistas, pois ao longo do tempo, os coeficientes de rugosidade e as demandas dos nós podem ter seus valores alterados. Desta forma, estes dados de projetos quando inseridos como dados de entrada em um simulador hidráulico, poderão fornecer resultados não condizentes com a realidade local, não representando o comportamento real dos sistemas de distribuição de águas.

Por isso, nesse trabalho, foi suposta a "condição estimada", equivalentemente a situação em que os dados gerados por um modelo de análise de redes, possuem desvios em relação aos dados reais.

O processo de calibração tende a minimizar as discrepâncias entre os dados reais e os dados estimados, gerando assim os valores "calibrados", que por sua vez, se aproximam numericamente dos dados reais do problema.

A condição estimada é obtida através das simulações das redes exemplo utilizando os dados geométricos, porém os coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós recebem valores diferenciados da condição real.

Considerando a rede exemplo 1, foi atribuído um valor de 115 (WALSKI 1983) para o coeficiente de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós são iguais a $1,2Q_{\text{real}}$ (tabela 4.1) diferindo propositalmente dos dados reais.

Tabela 4.1 – Demandas estimadas nos nós para rede exemplo 1

Demanda Estimada (m^3/s)	
Nó	Vazão
1	0,075
2	0,151
3	0,038
4	0,030
5	0,114
6	0,038

Para a rede exemplo 2, foi suposto um coeficiente de rugosidade das tubulações igual a 100 (BHAVE 1988) e as demandas estimadas nos nós também são iguais a $1,2Q_{\text{real}}$ e são apresentadas na tabela (4.8).

Tabela 4.2 – Incremento de vazão nos nós - rede exemplo 1

Incremento de Vazão para a Rede Exemplo 1 (m^3/s)					
Setores					
1	2		3		
Nó 4	Nó 4	Nó 6	Nó 4	Nó 5	Nó 6
0,008	0,005	0,003	0,003	0,003	0,002

Como os modelos de calibração, analítico e modificado, exigem dados de energias que correspondem às várias condições de carga (cenários de demanda nos nós) nas redes em estudo, foi necessário então a simulação de um cenário real e um cenário estimado (tabela 4.3 e 4.4 respectivamente) para a rede exemplo 1, e as tabelas (4.9) e (4.10) no caso da rede exemplo 2. Estes cenários foram também relacionados com o número de setores em que cada rede exemplo é dividida.

Já para a simulação de setores diferenciados, foram adotados vários pontos de monitoramento nas redes exemplo. No caso da rede exemplo 1, e considerando a rede dividida em um setor, o nó de teste foi o nó 4. Para a rede dividida em dois setores os nós de testes foram os nós 4 e 6, e para a simulação da rede com três setores, os nós de testes foram os nós 4, 5 e 6 (tabela 4.2).

O modelo explícito exige como dados de entrada as demandas, os coeficientes de rugosidade estimados, e as energias reais nos nós de testes considerando a setorização. Não é

necessário simular a rede com incrementos de vazão nos nós, pois para cada energia real adicionada em sua formulação matemática, há uma equação de energia correspondente.

Em se tratando da rede exemplo 2, para a simulação da rede com um setor o nó de teste é o nó 12. Para a simulação com dois setores, os nós de testes são os nós 3 e 12. Já para a simulação da rede com três setores os nós de testes são os nós 3, 11 e 12.

Considerando a rede exemplo 1 (figura 3.4), os dados de demandas reais e estimadas nos nós são apresentados nas tabelas (3.3) e (4.1) respectivamente. Pode-se observar que as demandas estimadas (tabela 4.1) possuem um desvio em relação às demandas reais (tabela 3.3).

A tabela (4.2) apresenta o incremento de vazão nos nós para a rede exemplo 1. Com esses valores acrescentados em cada nó, referente a cada setor, nas demandas reais (tabela 3.3) e nas demandas estimadas (tabela 4.1), foram construídas as tabelas referentes à condição real e estimada (tabela 4.3 e 4.4) respectivamente em relação às energias nos nós e as tabelas (4.5) e (4.6) em relação às vazões nos trechos.

Como os modelos de calibração, analítico (WALSKI 1983) e analítico modificado (BHAVE 1988) exigem dados reais (energia) para diferentes condições de carga, foi realizado um procedimento de obtenção destas energias para os diferentes setores através de medições de vazão nos nós.

Primeiramente foi considerada a rede exemplo 1 dividida em apenas um setor. Para um setor, tem-se o incremento de vazão e o respectivo nó de teste (tabela 4.2). Este incremento foi adicionado na demanda referente ao nó. Então com os dados geométricos reais (tabela 3.2) da rede exemplo 1 e as demandas nos nós com acréscimo de vazão foram obtidas as energias e vazões da rede através do modelo de NIELSEN (1989), para a condição real de um setor (tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Energias reais nos nós para a rede exemplo 1

Energia (m) - Condição Real			
Nó	Setores		
	1	2	3
1	52,7	52,9	52,9
2	54,0	54,0	54,0
3	53,1	53,2	53,1
4	50,3	50,9	51,1
5	52,1	52,3	52,2
6	52,1	52,3	52,2

Considerando a rede dividida em dois e três setores para a condição real, segue o mesmo procedimento descrito para a rede dividida em um setor, porém o incremento de vazão foi adicionado em dois nós, no caso de dois setores, e em três nós no caso de três setores.

Em se tratando da condição estimada e da rede exemplo 1, o procedimento foi semelhante à condição real, porém as demandas nos nós (tabela 4.1) e o coeficiente de rugosidade foram considerados valores estimados, para o coeficiente de rugosidade o valor foi igual a 115.

A tabela (4.4) apresenta os valores de energias nos nós para a condição estimada, considerando a rede exemplo 1. Há uma coluna nesta tabela que está denominada "sem incremento", ou seja, foram considerados na simulação pelo modelo de NIELSEN (1989), os dados geométricos com coeficiente de rugosidade estimado e as demandas nos nós estimadas sem incremento de vazão nos nós.

Tabela 4.4 – Energias estimadas nos nós para a rede exemplo 1

Energia (m) - Condição Estimada				
Nó	Sem Incremento	Setores		
		1	2	3
1	51,0	50,4	50,6	52,9
2	52,2	51,9	52,0	54,0
3	51,1	50,8	50,9	53,1
4	49,0	47,4	48,0	51,1
5	50,0	49,6	49,7	52,2
6	50,0	49,6	49,7	52,2

Tabela 4.5 – Vazões reais nos trechos para a rede exemplo 1

Vazão (m³/s) – Condição Real			
Trechos	Setores		
	1	2	3
1	0,1264	0,1247	0,1249
2	0,2189	0,2173	0,2184
3	0,0613	0,0608	0,0612
4	0,0330	0,0300	0,0280
5	0,0304	0,0317	0,0339
6	0,0654	0,0642	0,0650
7	0,0275	0,0270	0,0273
8	0,0569	0,0559	0,0566
9	0,0008	0,0010	0,0009

A tabela (4.5) apresenta os valores de vazão nos trechos para as condições reais, com a rede dividida em diferentes setores. Estes valores foram obtidos utilizando o simulador hidráulico proposto por NIELSEN (1989).

A tabela (4.6) apresenta os valores de vazão nos trechos para a condição estimada, considerando os diferentes setores, e a descrição do termo "sem incremento", segue da mesma forma que foi denominado para as energias da condição estimada.

Em se tratando da rede exemplo 2 (figura 3.5), os dados de demandas reais e estimadas nos nós, são apresentados nas tabelas (3.7) e (4.8) respectivamente. Pode-se observar que as demandas estimadas possuem um desvio em relação às demandas reais.

Para que fossem obtidas as condições reais e estimadas (tabelas 4.9 e 4.10) de energia nos nós e vazões nos trechos da rede exemplo 2, para diferentes setores, um incremento de vazão (tabela 4.7) é adicionado nas demandas reais e estimadas (tabelas 3.7 e 4.8) em relação ao nó de teste. Assim, o modelo de análise de rede produziu os valores de energia nos nós e vazão nos trechos para a rede dividida em diferentes setores.

Tabela 4.6 – Vazões estimadas nos trechos para a rede exemplo 1

Vazão (m³/s) – Condição Estimada				
Trechos	Sem Incremento	Setores		
		1	2	3
1	0,1455	0,1502	0,1485	0,1487
2	0,2564	0,2609	0,2593	0,2604
3	0,0716	0,0731	0,0725	0,0729
4	0,0300	0,0380	0,0350	0,0330
5	0,0405	0,0372	0,0385	0,0407
6	0,0742	0,0774	0,0763	0,0770
7	0,0311	0,0325	0,0320	0,0323
8	0,0648	0,0676	0,0666	0,0672
9	0,0008	0,0007	0,0008	0,0007

As mesmas considerações realizadas para a rede exemplo 1 servem para a rede exemplo 2. A diferenciação encontra-se na topologia da rede (trechos e nós) e na disposição dos nós de testes considerados.

Tabela 4.7 – Incremento de vazão nos nós - rede exemplo 2

Incremento de Vazão para a Rede Exemplo 2 (m³/s)					
Setores					
1	2		3		
Nó 12	Nó 3	Nó 12	Nó 3	Nó 11	Nó 12
0,140	0,100	0,040	0,050	0,050	0,040

O método de obtenção dos dados referentes à condição estimada para a rede exemplo 2 foi idêntico ao procedimento realizado na condição real, porém as demandas nos nós (tabela 4.8) e o coeficiente de rugosidade foram considerados valores estimados, sendo o coeficiente de rugosidade igual a 100.

A tabela (4.8) apresenta os valores das demandas estimadas para a rede exemplo 2. Estes valores representam $1,2Q_{\text{real}}$, representando o desvio adotado em relação as demandas reais.

Tabela 4.8 – Demandas estimadas para rede Exemplo 2

Demandas Estimadas (m³/s)	
Nó	Vazão
1	0,048
2	0,036
3	0,024
4	0,036
5	0,048
6	0,060
7	0,072
8	0,048
9	0,012
10	0,024
11	0,048
12	0,024

Tabela 4.9 – Energias reais nos nós para a rede exemplo 2

Energia (m) – Condição Real				
Nó	Sem Incremento	Setores		
		1	2	3
1	95,8	92,7	92,5	92,7
2	94,7	90,9	90,2	90,7
3	94,4	90,2	87,9	89,4
4	92,2	83,7	86,5	86,1
5	91,8	81,6	85,8	85,0
6	92,6	84,1	87,1	86,6
7	94,7	90,7	90,2	90,6
8	94,9	90,9	91,1	91,1
9	98,6	97,4	97,6	97,5
10	94,5	89,7	90,8	89,5
11	91,2	81,5	85,8	77,3
12	91,9	77,4	85,6	84,0

Tabela 4.10 – Energias estimadas nos nós para a rede exemplo 2

Energia (m) – Condição Estimada				
Nó	Sem Incremento	Setores		
		1	2	3
1	92,5	88,0	87,7	88,0
2	90,6	85,0	84,1	84,8
3	90,1	84,0	80,9	83,0
4	86,0	73,8	77,7	77,1
5	85,4	70,6	76,7	75,5
6	86,7	74,6	78,9	78,1
7	90,5	84,7	84,0	84,6
8	90,9	85,2	85,4	85,4
9	97,5	95,9	96,1	95,9
10	90,4	83,5	85,1	83,2
11	84,2	70,0	76,5	64,4
12	85,6	65,7	76,5	74,5

Tabela 4.11 – Vazões reais nos trechos para a rede exemplo 2

Condição Real (m³/s)				
Trechos	Sem Incremento	Setores		
		1	2	3
1	0,1583	0,2155	0,2094	0,2152
2	0,2423	0,3247	0,3310	0,3250
3	0,0573	0,0777	0,0864	0,0808
4	0,0154	0,0235	0,0450	0,0333
5	0,0119	0,0241	0,0114	0,0175
6	0,0967	0,1354	0,1430	0,1366
7	0,0482	0,0717	0,0615	0,0677
8	0,0930	0,1273	0,1267	0,1255
9	0,0552	0,0781	0,0726	0,0795
10	0,0128	0,0229	0,0103	0,0270
11	0,0598	0,1065	0,0792	0,0850
12	0,0285	0,0296	0,0586	0,0411
13	0,0482	0,0892	0,0586	0,0684
14	0,0289	0,0400	0,0945	0,0670
15	0,0243	0,0435	0,0195	0,0302
16	0,0180	0,0182	0,0264	0,0215
17	0,0123	0,0318	0,0160	0,0218
18	0,0239	0,0470	0,0330	0,0363
19	0,0036	0,0389	0,0090	0,0181
20	0,0302	0,1054	0,0483	0,0629
21	0,0140	0,0250	0,0198	0,0174
22	0,0340	0,0560	0,0431	0,0691
23	0,0059	0,0160	0,0031	0,0208

A tabela (4.11) apresenta os valores das vazões reais nos trechos para a rede exemplo 2, estes valores foram obtidos utilizando o simulador hidráulico (NIELSEN 1989) com os dados geométricos e demandas nos nós reais.

A tabela (4.12) apresenta os valores das vazões estimadas nos trechos para a rede exemplo 2. O modelo de análise de redes (NIELSEN 1989) produziu tais dados baseados nos dados estimados da rede.

A coluna denominada "sem incremento" na tabela (4.12), contém dados produzidos sem a consideração de medidas de vazão em alguns nós da rede exemplo 2. Com isso, os dados da tabela (4.7) não são utilizados para esta situação.

No caso da rede exemplo 2 dividida em vários setores, os dados denominados incremento de vazão (tabela 4.7), são considerados nos respectivos nós de testes, relacionados ao número de setores. Cada setor representa uma condição de contorno adicionada ao conjunto de soluções do sistema. Estas condições de contorno são as energias nos nós de testes.

Tabela 4.12 – Vazões estimadas nos trechos para a rede exemplo 2

Condição Estimada (m ³ /s)				
Trechos	Sem Incremento	Setores		
		1	2	3
1	0,1883	0,2454	0,2395	0,2450
2	0,2919	0,3744	0,3805	0,3748
3	0,0691	0,0895	0,0982	0,0926
4	0,0171	0,0252	0,0471	0,0351
5	0,0119	0,0243	0,0111	0,0175
6	0,1154	0,1538	0,1620	0,1552
7	0,0575	0,0810	0,0708	0,0769
8	0,1124	0,1466	0,1460	0,1449
9	0,0659	0,0887	0,0833	0,0900
10	0,0136	0,0239	0,0104	0,0280
11	0,0723	0,1187	0,0917	0,0972
12	0,0339	0,0350	0,0648	0,0466
13	0,0584	0,0992	0,0688	0,0783
14	0,0329	0,0439	0,0991	0,0710
15	0,0300	0,0491	0,0264	0,0362
16	0,0238	0,0251	0,0317	0,0277
17	0,0139	0,0343	0,0182	0,0240
18	0,0292	0,0529	0,0386	0,0421
19	0,0068	0,0373	0,0067	0,0161
20	0,0350	0,1080	0,0534	0,0666
21	0,0174	0,0282	0,0232	0,0209
22	0,0421	0,0644	0,0505	0,0771
23	0,0078	0,0144	0,0005	0,0228

4.3 – Simulação do Método Analítico para a Rede Exemplo 1

A tabela (4.3) apresenta os valores das energias reais nos nós, obtidos através dos dados geométricos da rede e da vazão real de consumo nos nós (tabela 3.3).

Os resultados da simulação para rede exemplo 1 (figura 3.4) utilizando o método analítico, foram obtidos seguindo o procedimento descrito no item (4.2) deste capítulo. Este método é baseado na técnica desenvolvida por WALSKI (1983) que requer informações (energias) em alguns pontos da rede (nós de testes), para posteriormente produzirem os valores calibrados (coeficientes de rugosidade e demandas nos nós).

Primeiramente, considerando a formulação matemática do modelo de calibração analítico, descrito no capítulo 3, temos a equação (3.9) onde o parâmetro H_1 representa o ponto de energia conhecida. Na equação (4.1) o parâmetro H_1 foi substituído por H_R representando a energia do reservatório.

Tem-se também o parâmetro h_1 na equação (3.9), que na equação (4.1), foi substituído pelo parâmetro H_{teste1} que representa a energia real no nó de teste. Já o parâmetro (h_3) é denominado na equação (3.9) como sendo a energia prognosticada de h_1 , aqui na equação (4.1) representado por H_{prog1} . E assim similarmente para o parâmetro b (equação 4.2).

$$a = \left(\frac{H_R - H_{teste1}}{H_R - H_{prog1}} \right)^{0,54} \quad (4.1)$$

$$b = \left(\frac{H_R - H_{teste2}}{H_R - H_{prog2}} \right)^{0,54} \quad (4.2)$$

$$A = \frac{Q_{teste}}{\frac{b}{a}(S_{estimado} + Q_{teste}) - S_{estimado}} \quad (4.3)$$

$$B = \frac{Q_{teste}}{b(S_{estimado} + Q_{teste}) - aS_{estimado}} \quad (4.4)$$

onde A é o coeficiente de ajuste de demandas; B é o coeficiente de ajuste do coeficiente de rugosidade; H_R é a energia do reservatório; H_{teste1} é a energia no nó de teste sob uma condição de carga, H_{teste2} é a energia em outro nó de teste sob a mesma condição de carga.

Se for considerado apenas um nó de teste, H_{teste1} é a energia do nó de teste 1 sob uma condição de carga, e H_{teste2} é a energia do nó de teste 1 sob outra condição de carga.

$H_{\text{prog } 1}$ é a energia do nó de teste prognosticada referente ao nó de teste 1, $H_{\text{prog } 2}$ é a energia prognosticada relacionada ao nó de teste 2, ou seja, são energias relacionadas aos C_e e S_e que são valores estimados do coeficiente de rugosidade e da soma de demandas referentes aos nós daquele setor. O termo Q_{teste} é a vazão incrementada por medição no nó de teste representado por Q_f na equação (3.11). Os parâmetros a e b são denominados índices de magnitude de erro.

Para a rede exemplo 1 dividida em um setor, os ajustes mínimos necessários são dois parâmetros: o coeficiente de rugosidade e o ajuste de demanda nos nós. Com isso duas equações são necessárias para a obtenção dos resultados. Observando a equação (4.1) percebe-se que o H_R é um valor dado e os $H_{\text{teste } 1}$, $H_{\text{teste } 2}$, $H_{\text{prog } 1}$ e o $H_{\text{prog } 2}$ são valores de entrada que precisam ser determinados.

Para $H_{\text{prog } 1}$ e $H_{\text{prog } 2}$ foram simuladas condições em que se considerou o coeficiente de rugosidade estimado e as demandas estimadas para diferentes situações. A esta simulação denominou-se condição estimada. Já para o $H_{\text{teste } 1}$ e $H_{\text{teste } 2}$, foi simulada a condição em que todos os valores da rede são valores reais, e representam a condição real.

Então para a rede dividida em um setor, considerando apenas um nó de teste, houve a necessidade de simular a rede exemplo com duas condições de carga (cenários de demanda), pois foram necessários dois valores reais para o nó de teste e dois valores prognosticados para o mesmo nó de teste. As equações utilizadas no processo de calibração foram as equações (4.3) e (4.4).

As condições de carga estão relacionadas aos cenários de demanda, e nesse trabalho foi relacionado ao acréscimo (incremento) de vazão (medição), que foi adicionado ao nó de teste gerando um outro cenário de demanda, ou seja, outra condição de carga do sistema em estudo. Para a simulação da condição real e da condição estimada, o incremento de vazão foi o mesmo, podendo assim considerar dois cenários de demandas diferentes.

As energias nos nós estão relacionadas aos cenários de demanda, para cada cenário de demanda as energias nos nós se alteram, mas perante a calibração o coeficiente de rugosidade tende a ser o mesmo.

Na prática as medições devem ocorrer nos horários de menor variação de demanda, para que se possam realizar várias medições com maior grau de liberdade, não havendo grandes variações nas energias nos nós.

Para a rede dividida em dois setores, considerando dois nós de testes, houve a necessidade de simular a rede exemplo com duas condições de carga (cenários de demanda),

pois foram necessários quatro valores de entrada para os nós de testes reais e quatro valores de entrada para os nós de testes prognosticados. As equações utilizadas no processo de calibração foram duas equações (4.3) e duas equações (4.4).

Para a rede dividida em três setores, considerando três nós de testes, houve a necessidade de simular a rede exemplo com duas condições de carga (cenários de demanda), pois foram necessários seis valores de entrada para os nós de testes reais e seis valores de entrada para os nós de testes prognosticados. As equações utilizadas no processo de calibração foram três equações (4.3) e três equações (4.4).

Para todos os casos, as equações (4.3) e (4.4) foram resolvidas simultaneamente através de um procedimento iterativo, e a cada iteração a norma euclidiana dos parâmetros de ajuste A e B foram calculados e comparados com uma determinada tolerância.

A tabela (4.13) apresenta os valores das energias nos nós de testes, referentes às condições real e estimada. Essas energias foram medidas utilizando o simulador hidráulico (NIELSEN 1989), dos quais os dados geométricos reais e os dados geométricos estimados serviram de dados de entrada.

Foram considerados o coeficiente de rugosidade e as demandas reais para simular a condição real e o coeficiente de rugosidade estimado e demandas estimadas para simular a condição estimada.

Apoiando-se nas considerações realizadas por ORMSBEE (1989) sobre as estratégias de calibração, nesse trabalho adotou-se a estratégia média. O coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 1 foi de 111,1, valor médio calculado da condição real proposta no trabalho de WASLKI (1983), e as demandas reais utilizadas são encontradas na tabela (3.3). Em se tratando do coeficiente de rugosidade estimado, foi atribuído um valor de 115 como estimativa inicial e os valores referentes às demandas estimadas são encontrados na tabela (4.1). Os valores obtidos na tabela (4.13) não possuem incremento de vazão nos nós de demandas referentes aos nós de testes.

Tabela 4.13 – Energias nos nós de testes s/ incremento de vazão para rede exemplo 1

Energia s/ Incremento de Vazão (m)			
Condição	Nós de testes		
	4	5	6
Real	51,8	52,6	52,6
Estimada	49,0	50,0	50,0

Em relação à condição real, os valores das energias são correspondentes aos valores reais da rede, refletindo o comportamento real do sistema de distribuição de água.

Percebe-se na tabela (4.14) que para a rede dividida em um setor, a única informação necessária foi o nó 4. Os parâmetros calibrados são o coeficiente de rugosidade e o ajuste de demanda, que neste caso foram considerados globais, ou seja, são aplicados a toda rede.

Tabela 4.14 – Energias reais setorizadas - rede exemplo 1

Energia Real c/ Incremento de Vazão (m)			
Setores	Nós de testes		
	4	5	6
1	50,3	-	-
2	50,9	-	52,3
3	51,1	52,2	52,2

Como descrito na metodologia (capítulo 3), o método analítico exige valores das energias reais e energias estimadas para cada simulação. Com isso o aumento dos parâmetros a serem calibrados é proporcional às informações adicionais requeridas.

Para a rede dividida em dois setores, são necessárias as informações adicionais referentes aos nós 4 e 6. Os parâmetros calibrados neste caso, foram dois coeficientes de rugosidade e o ajuste de demanda, que é distribuído proporcionalmente nos nós.

Tabela 4.15 – Energias estimadas setorizadas - rede exemplo 1

Energia Estimada c/ Incremento de Vazão (m)			
Setores	Nós de Testes		
	4	5	6
1	47,4	-	-
2	48,0	-	49,7
3	48,3	49,6	49,6

No caso da rede representada em três setores, aplicou-se a mesma metodologia da rede em dois setores, diferindo apenas nos parâmetros calibrados, sendo três coeficientes de rugosidade e um ajuste de demanda.

A tabela (4.16) apresenta os resultados dos coeficientes de rugosidade calibrados obtidos pelo método analítico para a rede representada por diferentes setores. Observa-se que o coeficiente de rugosidade calibrado foi aplicado para todos os trechos, no caso de um setor, onde apenas um nó é de teste. Para a situação em que a rede é dividida em dois setores, os coeficientes de rugosidade são aplicados para cada tubulação referente ao setor correspondente, e neste caso dois nós são de testes.

Considerando a rede dividida em três setores, a tabela (4.16) mostra os valores obtidos pela aplicação do método analítico, considerando três nós de testes. Observam-se as divisões da rede exemplo 1, através dos valores calibrados do coeficiente de rugosidade, demonstrando a forma de em que a rede está dividida (setor).

Tabela 4.16 – Coeficiente de rugosidade calibrado - método analítico - rede exemplo 1

Coeficiente de Rugosidade Calibrado			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	73,2	114,4	99,9
2	73,2	87,7	86,9
3	73,2	87,7	108,1
4	73,2	114,4	99,9
5	73,2	87,7	99,9
6	73,2	87,7	86,9
7	73,2	87,7	108,1
8	73,2	87,7	108,1
9	73,2	87,7	108,1

Resumidamente a tabela (4.17), apresenta as demandas calibradas para diferentes divisões da rede exemplo 1. A magnitude dos valores encontrados, correspondentes a cada setor, encontra-se na mesma ordem de grandeza, não havendo grandes variações.

Após a obtenção dos dados calibrados (tabelas 4.16 e 4.17), os coeficientes de rugosidade e as demandas calibradas, são tratados como dados de entrada no modelo de análise de rede proposto por NIELSEN (1989). Este modelo produziu os resultados de energia calibrada (tabela 4.18) e vazão calibrada de toda a rede (4.19) em relação aos diferentes setores. Na tabela (4.18) é apresentado também, o desvio relativo das energias calibradas em relação às energias reais.

Tabela 4.17 – Demanda calibrada - método analítico - rede exemplo 1

Demanda Calibrada (m³/s)			
Nó	Setores		
	1	2	3
1	0,04	0,07	0,06
2	0,08	0,10	0,10
3	0,02	0,02	0,03
4	0,02	0,03	0,02
5	0,06	0,07	0,07
6	0,02	0,02	0,03

Tabela 4.18 – Energia calibrada - método analítico - rede exemplo 1

Energia Calibrada (m)							
Nó	Real	Setores					
		1		2		3	
			%		%		%
1	53,3	53,2	0,1	53,9	-1,3	53,4	-0,2
2	54,2	54,2	0,0	54,6	-0,7	54,2	0,0
3	53,4	53,4	0,0	53,4	0,1	53,9	-0,9
4	51,8	51,8	0,0	51,6	0,3	52,5	-1,4
5	52,6	52,6	0,0	52,6	0,0	53,1	-1,1
6	52,6	52,6	0,0	52,6	0,0	53,1	-1,1

Todos os desvios deste método, referentes às energias (tabela 4.18), satisfazem o intervalo de validação, $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ propostos por WALSKI (1983) e $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, CESARIO e DAVIS (1984).

Tabela 4.19 – Vazão calibrada - método analítico - rede exemplo 1

Vazão Calibrada (m³/s)			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	0,0804	0,1192	0,1085
2	0,1415	0,1642	0,1678
3	0,0395	0,0457	0,0578
4	0,0172	0,0253	0,0221
5	0,0215	0,0289	0,0296
6	0,0406	0,046	0,0458
7	0,0173	0,0193	0,0235
8	0,0348	0,0403	0,0505
9	0,0008	0,0009	0,0011

A tabela (4.20) apresenta uma comparação entre os valores estimados, calibrados e os reais, em termos de diferenças quadráticas, em relação às energias nos nós, para os diferentes setores considerados na rede exemplo 1.

A coluna da tabela (4.20) denominada "estimada" corresponde aos valores de energia produzidos pelo modelo de análise de redes com o coeficiente de rugosidade estimado e as demandas estimadas (tabela 4.1) para a rede exemplo 1. Nota-se uma diferença em relação às energias reais e percebe-se que utilizando a calibração os desvios diminuem em relação às energias estimadas para todas as simulações consideradas.

As diferenças quadráticas apresentadas na tabela (4.20) foram obtidas utilizando as energias reais (tabela 4.3), as energias calibradas de cada setor (tabelas 4.18) e as energias estimadas (tabela 4.4).

Tabela 4.20 – Diferenças quadráticas do método analítico – rede exemplo 1

Diferenças Quadráticas das Energias – Método Analítico								
Nó	(Estimado – Real) ²		(Calibrado – Real) ²					
	H	Desvio	1 Setor		2 Setores		3 Setores	
	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio
1	51,0	5,18	53,2	0,00	53,9	0,45	53,4	0,02
2	52,2	4,06	54,2	0,00	54,6	0,14	54,2	0,00
3	51,1	5,36	53,4	0,00	53,9	0,22	53,5	0,01
4	49,0	7,89	51,6	0,03	52,5	0,51	52,0	0,03
5	50,0	6,58	52,6	0,00	53,1	0,30	52,7	0,03
6	50,0	6,58	52,6	0,00	53,1	0,30	52,7	0,02
Σ		35,66		0,03		1,92		0,10

Utilizando a tabela (4.20) e observando o maior desvio total encontrado (2 setores) igual a 1,92, verifica-se que o método analítico diminui em 94,61% os desvios em relação aos desvios totais da energia estimada.

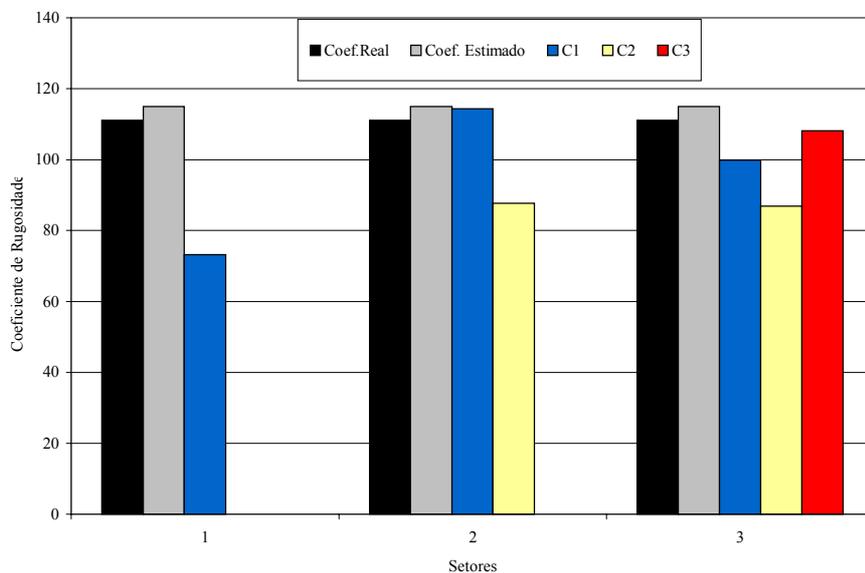


Figura 4.1 – Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 1 utilizando o método analítico

A relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrado é apresentada na figura (4.1). Apesar dos coeficientes de rugosidade calibrados se apresentarem menores que os coeficientes de rugosidade real e estimado, isto não representa um resultado ruim, pois

o processo de calibração é um ajuste conjunto e simultâneo dos coeficientes de rugosidades nas tubulações e das demandas nos nós. Isto pode ser verificado na tabela (4.20) através dos desvios da situação estimada em relação às situações calibradas. Na situação calibrada, tanto o coeficiente de rugosidade, quanto as demandas nos nós foram ajustadas, produzindo resultados melhores em relação a situação estimada, onde os parâmetros não foram ajustados.

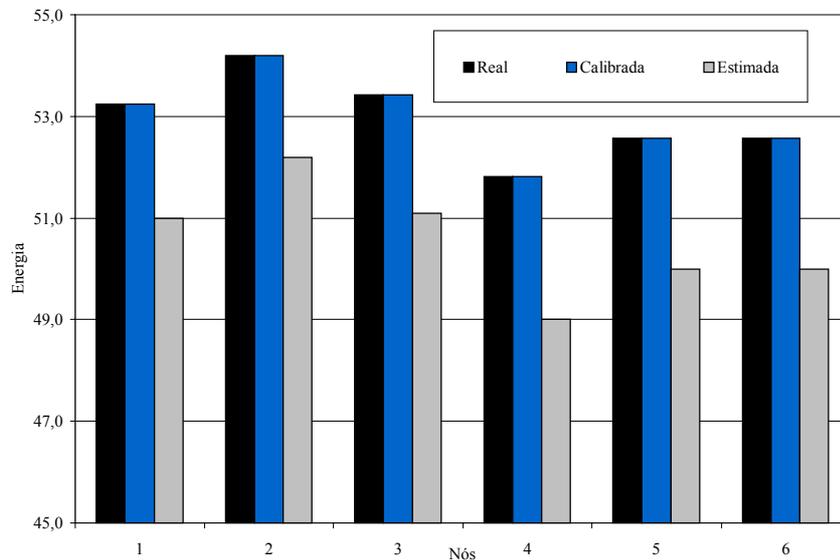


Figura 4.2 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando um setor utilizando o método analítico

A figura (4.2) apresenta o comportamento das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais em termos de valores absolutos para a rede considerada em um setor. Observa-se que o processo de calibração ajusta eficientemente os valores de todos os nós da rede, através das energias conhecidas em alguns pontos da rede, e que quando considerados o coeficiente de rugosidade e as demandas nos nós calibrados, os desvios de energias nos nós, em relação aos valores reais, são mínimos. Para este caso, o dado real (energia) foi conhecido em apenas um nó de teste.

Observando a figura (4.2) pode-se afirmar que, quando os parâmetros estimados dos coeficientes de rugosidade e das demandas nos nós, são tratados como dados de entrada em um modelo de análise de redes, existe a possibilidade de ocorrer um desvio em relação solução real, não representando assim, o comportamento real do sistema estudado.

A figura (4.3) apresenta o comportamento das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais, considerando dois setores. Percebe-se uma ligeira diferença das energias calibradas em relação às energias reais em alguns nós. Estas diferenças são irrelevantes quando as energias reais são comparadas com as energias estimadas.

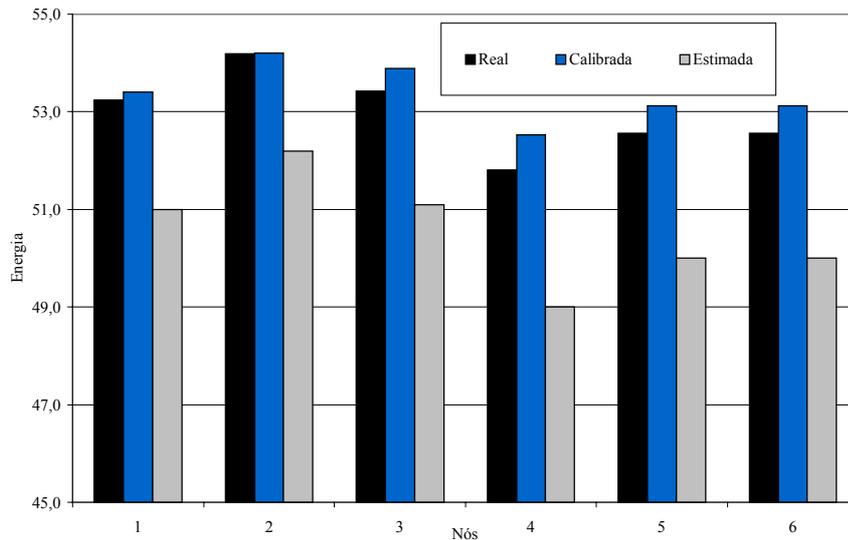


Figura 4.3 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando dois setores utilizando o método analítico

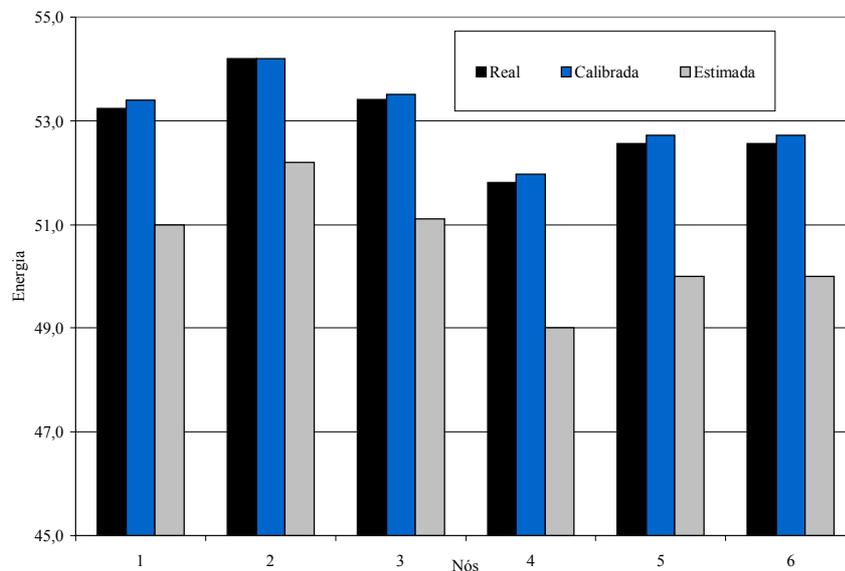


Figura 4.4 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando três setores utilizando o método analítico

A figura (4.4) mostra o comportamento das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais em termos de valores absolutos para a rede considerada em três setores.

4.4 – Simulação do Método Analítico Modificado para a Rede Exemplo 1

Os resultados da simulação para rede exemplo 1 (figura 3.4) utilizando o método analítico modificado, foram obtidos seguindo o procedimento descrito no item (4.2) deste capítulo. Este método é baseado na técnica desenvolvida por BHAVE (1988), o qual requer

informações de energias em alguns pontos da rede (nós de testes), para posteriormente produzir os valores calibrados (coeficientes de rugosidade e demandas nos nós).

Os dados de entrada no modelo de calibração analítico modificado são: as energias reais nos nós de testes para as diferentes simulações, as demandas estimadas nos nós (tabela 4.1), e os dados geométricos com coeficiente de rugosidade estimado.

Neste método, os modelos de análise de redes e calibração, estão trabalhando conjuntamente, prognosticando os valores estimados a cada iteração. Os valores prognosticados são então comparados aos dados reais, nos pontos determinados da rede (nós de testes), segundo uma tolerância especificada.

O coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 1 é de 111,1 (WALSKI 1983) e as demandas reais, são encontradas na tabela (3.3). Como estimativa inicial, atribuiu-se o valor de 115 para o coeficiente de rugosidade, e para as demandas estimadas seus valores são encontrados na tabela (4.1).

Para a obtenção de dados da rede, referentes às várias condições de carga, foram consideradas pequenas perturbações nos nós (incremento), para o sistema estudado. Os dados resultantes são incorporados nas equações utilizadas pelo modelo de calibração, e assim obteve-se as energias nos nós e as vazões nos trechos, referentes a cada condição imposta.

Considerando as equações de ajuste do modelo de calibração analítico modificado (3.23 e 3.24) com dois nós de testes, tem-se que B é o ajuste do coeficiente de perda de carga, ΔQ é o ajuste de demanda, n é o expoente da fórmula de Hazen-Williams, H_s é a energia do reservatório, H_t é a energia real do nó de teste, H_{tp} é a energia prognosticada do nó de teste e q_{1p} é a vazão no trecho prognosticada. Os índices 1 e 2 referem-se aos respectivos nós de teste.

Para a rede exemplo 1 dividida em um setor, considerou-se um nó de teste. Duas condições de carga foram impostas a este nó, gerando as energias H_{t1} , H_{t2} . Como a energia do reservatório é conhecida e observando as equações (3.23) e (3.24), percebe-se que o fator $(H_s - H_{t1p})$ é a perda de carga prognosticada. Então, foram necessárias duas equações para obter um ajuste do coeficiente de rugosidade e um ajuste de demanda nos nós. Isto é, como se fosse uma medida de vazão em um hidrante de incêndio, com duas aberturas diferentes (média e total).

Para a rede exemplo 1 dividida em dois setores, foi necessário considerar dois nós de testes, para ajustar dois parâmetros de calibração e um ajuste de demanda. Foi imposta uma

condição de carga nos dois nós de testes e um desses nós de testes recebeu outra condição de carga produzindo três formulações conforme a equação (4.5):

$$B_1(h_{1p}) + B_2(h_{2p}) + \frac{n(H_s - H_{tp})}{q_p} \Delta Q = H_s - H_t \quad (4.5)$$

Os valores de h_p são referentes à soma das perdas de carga prognosticadas pelo modelo, nas tubulações que levam ao nó de teste. Os índices 1 e 2 referem-se aos setores considerados. Os parâmetros q_p e ΔQ estão relacionados ao caminho de teste (reservatório – nó de teste) como descrito no capítulo (3), referente à metodologia deste modelo.

Para a rede exemplo dividida em três setores foram considerados dois nós de testes recebendo duas condições de carga, com isso foram geradas quatro equações, da forma:

$$B_1(h_{1p}) + B_2(h_{2p}) + B_3(h_{3p}) \frac{n(H_s - H_{tp})}{q_p} \Delta Q = H_s - H_t \quad (4.6)$$

Tabela 4.21 – Coeficiente de rugosidade calibrado - método analítico modificado - rede exemplo 1

Coeficiente de Rugosidade Calibrado			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	145,7	166,5	156,2
2	145,7	166,5	156,2
3	145,7	166,5	156,2
4	145,7	117,2	110,8
5	145,7	117,2	110,8
6	145,7	117,2	110,8
7	145,7	117,2	119,1
8	145,7	117,2	119,1
9	145,7	117,2	119,1

Para a resolução dos três casos de simulação, as equações (4.5) e (4.6) foram resolvidas por um método de resolução de sistemas lineares, método de eliminação de Gauss, com pivotamento na diagonal principal (Anexo A1). Como resultado da aplicação do método analítico modificado, a tabela (4.21) mostra os valores calibrados para os coeficientes de rugosidade bem como a setorização da rede exemplo 1.

A tabela (4.22) apresenta as demandas nos nós, calibradas para a rede exemplo 1. Verificou-se uma certa linearidade, em ordem de magnitude, dos valores de demandas

calibradas, em relação aos vários setores considerados, enquanto os coeficientes de rugosidade, apresentaram variações para as diversas simulações.

Tabela 4.22 – Demanda calibrada - método analítico modificado – rede exemplo 1

Demanda Calibrada (m³/s)			
Nós	Setores		
	1	2	3
1	0,075	0,082	0,076
2	0,151	0,147	0,151
3	0,038	0,037	0,038
4	0,030	0,033	0,030
5	0,114	0,111	0,114
6	0,038	0,037	0,038

Os coeficientes de rugosidade e as demandas calibradas são tratados como dados de entrada no simulador hidráulico (NIELSEN 1989), que neste caso, está incorporado ao modelo de calibração analítico modificado, produzindo assim os resultados de energias nos nós apresentados na tabela (4.23), bem como, seus respectivos desvios relativos.

Tabela 4.23 – Energia calibrada - método analítico modificado – rede exemplo 1

Energia Calibrada (m)							
Nó	Real	Setores					
		1		2		3	
			%		%		%
1	53,3	52,6	1,3	54,1	-1,5	53,9	-1,2
2	54,2	53,6	1,1	55,7	-2,8	55,2	-1,8
3	53,4	52,4	2,0	54,4	-1,8	53,9	-0,9
4	51,8	51,3	0,9	51,9	-0,1	51,8	0,0
5	52,6	51,2	2,5	52,9	-0,6	52,5	0,2
6	52,6	51,0	2,9	52,9	-0,6	52,6	0,0

Todos os desvios deste método, referentes às energias calibradas (tabela 4.23), satisfazem o intervalo de validação dos valores calibrados, $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ propostos por WALSKI (1983) e $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, CESARIO e DAVIS (1984).

O resultado das vazões nos trechos, referente a cada simulação, encontra-se na tabela (4.24). Observa-se que as demandas calibradas nos nós demonstraram pequenas alterações, mesmo quando os valores das vazões nos trechos apresentam magnitudes diferenciadas.

Tabela 4.24 – Vazão Calibrada - Método Analítico Modificado – Rede Exemplo 1

Vazão Calibrada (m³/s)			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	0,1745	0,1804	0,1698
2	0,3069	0,2927	0,2882
3	0,0887	0,0887	0,0858
4	0,0300	0,0328	0,0302
5	0,0691	0,0550	0,0554
6	0,1073	0,0973	0,0878
7	0,0481	0,0413	0,0407
8	0,0986	0,0852	0,0814
9	0,0603	0,0176	0,0171

A tabela (4.25) mostra uma comparação entre os valores estimados, calibrados e os valores reais em termos de diferenças quadráticas em relação às energias reais nos nós, para os diferentes setores considerados na rede exemplo 1.

Para a obtenção dos valores da tabela (4.25) foram necessárias às energias reais (tabela 3.4), as energias estimadas (tabela 4.4) e as energias calibradas (tabela 4.23). Neste método, foi observada uma sensível melhoria, à medida que se tem um maior número de setores na rede exemplo 1. Isto pode ser visto, considerando o somatório das diferenças quadráticas para cada setor.

Tabela 4.25 – Diferenças quadráticas do método analítico modificado – rede exemplo 1

Diferenças Quadráticas das Energias – Método Analítico Modificado - Rede Exemplo 1								
Nó	(Estimado – Real) ²		(Calibrado – Real) ²					
			1 Setor		2 Setores		3 Setores	
	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio
1	51,0	5,18	52,6	0,50	54,1	0,61	53,9	0,40
2	52,2	4,06	53,6	0,36	55,7	2,30	55,2	0,92
3	51,1	5,36	52,4	1,12	54,4	0,91	53,9	0,22
4	49,0	7,89	51,3	0,23	51,9	0,00	51,8	0,00
5	50,0	6,58	51,2	1,78	52,9	0,11	52,5	0,01
6	50,0	6,58	51,0	2,36	52,9	0,10	52,6	0,00
Σ		35,66		6,36		4,04		1,55

Atenta-se ao fato de que o somatório das diferenças quadráticas (tabela 4.25) das energias estimadas em relação às energias calibradas, para os diferentes setores, é mais elevado. Isto comprova que o método analítico modificado produziu resultados de calibração eficientes.

Observando o maior desvio total encontrado na tabela (4.25), 1 setor, igual a 6.36, verifica-se que o método analítico modificado diminuiu em 82,16% os desvios, em relação aos desvios totais da energia estimada.

A figura (4.5) apresenta o comportamento dos coeficientes de rugosidade calibrados e estimados em relação ao coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 1 utilizando o modelo de calibração modificado.

A relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrado é apresentada na figura (4.5). Apesar dos coeficientes de rugosidade calibrados, apresentarem diferenciação considerável em relação ao coeficiente de rugosidade real, isto não representa um resultado ruim, pois o processo de calibração é um ajuste conjunto e simultâneo dos coeficientes de rugosidades nas tubulações e as demandas nos nós. Isto pode ser verificado na tabela (4.25) através dos desvios da situação estimada em relação às situações calibradas. Na situação calibrada tanto o coeficiente de rugosidade, quanto as demandas nos nós foram ajustadas, produzindo resultados melhores em relação a situação estimada, na qual os parâmetros não foram ajustados.

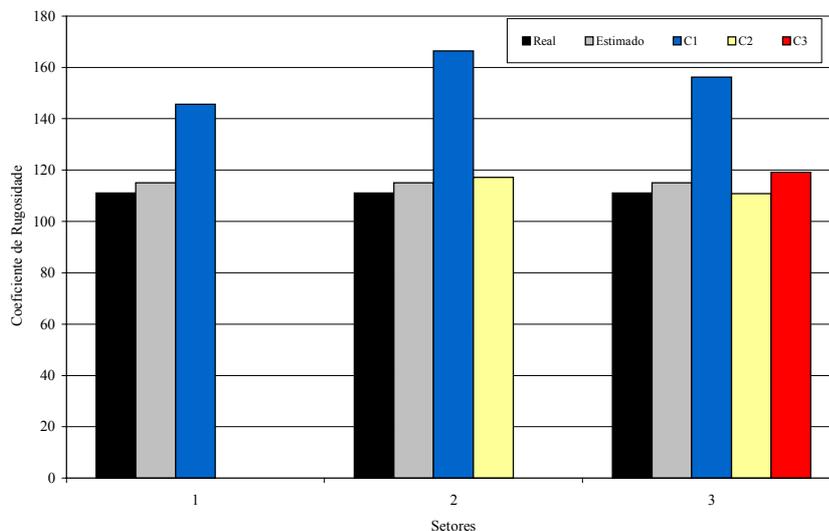


Figura 4.5 – Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 1 utilizando o método analítico modificado

O coeficiente de rugosidade denominado "C1" na figura (4.5) apresentou um comportamento diferenciado dos demais, neste modelo de calibração. É visto que para as diversas simulações, este parâmetro demonstrou a mesma característica, superestimando seu valor em relação ao coeficiente de rugosidade real. Este coeficiente (C1) está relacionado ao

nó de teste 4. BHAVE (1988) declarou que o coeficiente de rugosidade depende da velocidade do escoamento, onde é encontrada alta durante os testes nos nós.

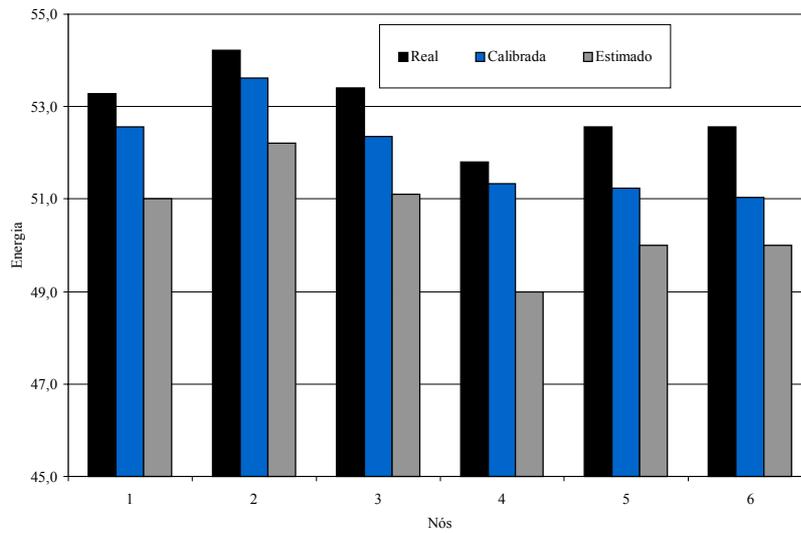


Figura 4.6 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando um setor utilizando o método analítico modificado

A figura (4.6) apresenta o comportamento das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais, em termos de valores absolutos, para a rede considerada com um setor. Todos os nós apresentaram calibração de energia inferior aos valores reais. Porém, as diferenças calibradas ainda se apresentaram melhores que as diferenças dos valores estimados.

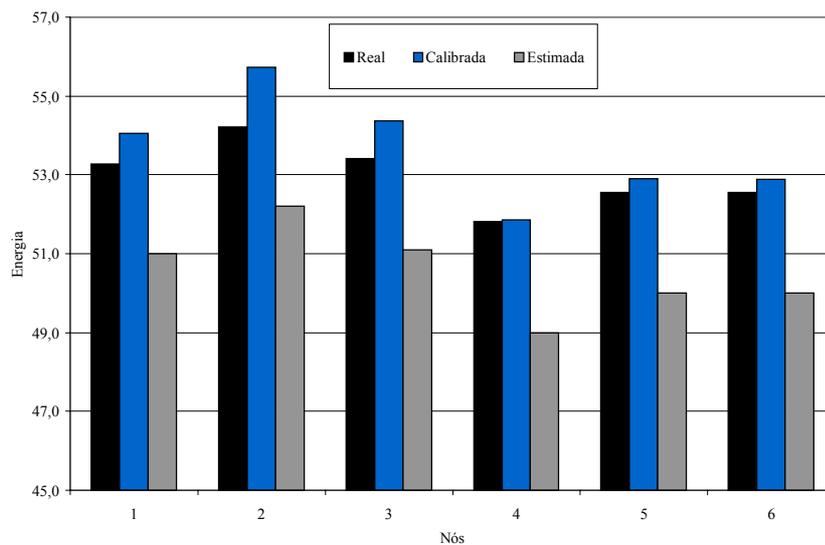


Figura 4.7 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando dois setores utilizando o método analítico modificado

A figura (4.7) mostra o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais, considerando dois setores. As maiores diferenças são encontradas nos nós próximos ao reservatório e nos nós próximos aos nós de testes, sofreram menores desvios. As energias calibradas produziram resultados maiores do que as energias reais.

Como a perda de carga é proporcional à vazão, há uma tendência de se encontrar maiores perdas onde as vazões são elevadas (BHAVE 1988). Neste caso pode-se observar o fato (figura 4.7), onde as maiores vazões são encontradas, ou seja, nas regiões próximas ao reservatório, levando a quantificação de maiores perdas, podendo assim ser encontrados maiores desvios em relação às energias nos nós.

A figura (4.8) apresenta o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais, em termos de valores absolutos, para a rede considerada em três setores. As maiores diferenças ainda se encontram nos nós próximos ao reservatório, afirmando a proposição de que maiores vazões poderão produzir maiores desvios nas energias nos nós.

Observa-se uma ligeira estabilização nos nós 4, 5 e 6, quase não havendo desvio em relação aos valores reais.

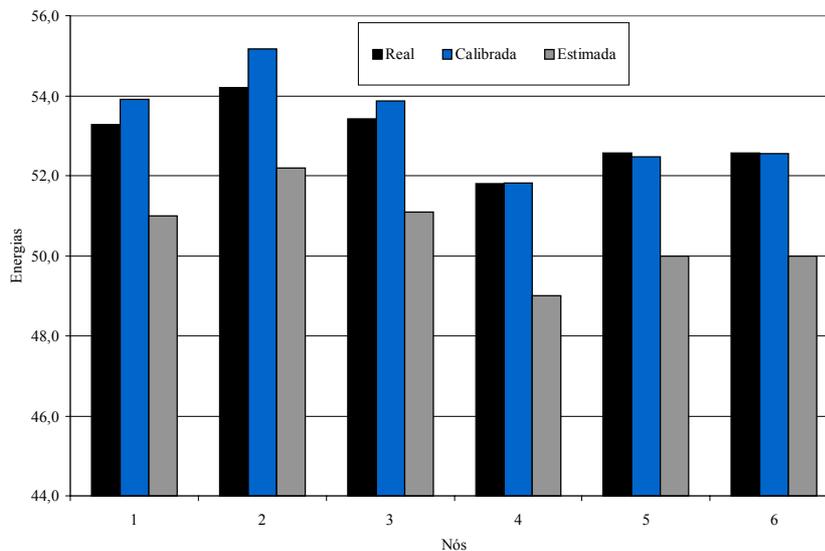


Figura 4.8 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando três Setores utilizando o método analítico modificado

4.5 – Simulação do Método Explícito para a Rede Exemplo 1

Os resultados da simulação para rede exemplo 1 (figura 3.4), utilizando o método explícito, foram obtidos seguindo o procedimento geral descrito no item (4.2) deste capítulo. Este método é baseado na técnica desenvolvida por BOULOS E WOOD (1990) o qual requer

informações (energias reais) de alguns pontos da rede (nós de testes), para posteriormente produzir os valores calibrados (coeficientes de rugosidade e demandas nos nós).

Os dados de entrada do modelo explícito requerem apenas as demandas estimadas, os dados geométricos (com coeficiente de rugosidade estimado) e as energias reais nos nós.

O método de calibração explícito possui sua formulação, diferenciada dos modelos anteriormente descritos, baseando-se nas equações de equilíbrio da rede e nas equações adicionais que descrevem o comportamento do sistema. O procedimento de cálculo utiliza o método de Newton – Raphson (equação 3.37) para linearizar os termos não lineares.

O Algoritmo descrito no item (3.4.3) foi aplicado para as redes exemplos (figura 3.4 e 3.5) considerando os diferentes setores. O procedimento de trabalho das formulações explícitas foi semelhante, para ambas redes exemplos.

Para a rede exemplo 1 dividida em um setor, considerou-se um nó de teste, e não foi necessário simular condições de carga. Neste caso, este método simplesmente requereu o valor de energia de um nó de teste, para ser incorporado na equação (3.37). As demandas nos nós foram estimadas.

Para a rede exemplo 1 dividida em dois setores, foram considerados dois nós de testes, com isso, foi necessária a obtenção das energias reais, referentes a esses nós. As demandas foram iguais às consideradas no caso de um setor. Já para a rede exemplo 1 dividida em três setores, segue a mesma proposição realizada para um e dois setores.

A tabela (4.26) apresenta os resultados dos coeficientes de rugosidade, calibrados pelo método explícito.

Tabela 4.26 – Coeficiente de rugosidade calibrado - método explícito - rede exemplo 1

Coeficiente de Rugosidade Calibrado			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	127,8	128,9	132,1
2	127,8	122,9	115,3
3	127,8	122,9	104,2
4	127,8	128,9	132,1
5	127,8	122,9	132,1
6	127,8	122,9	115,3
7	127,8	122,9	104,2
8	127,8	122,9	104,2
9	127,8	122,9	104,2

A tabela (4.27) mostra os valores calibrados das demandas nos nós utilizando o método explícito. Há uma linearidade nos resultados encontrados para os diferentes setores. As variações de demanda são pequenas, devido o modelo ajustar as vazões para cada trecho de tubulação e posteriormente relacionar com as demandas nos nós.

Tabela 4.27 – Demanda calibrada - método explícito - rede exemplo 1

Demanda Calibrada (m³/s)			
Nós	Setores		
	1	2	3
1	0,074	0,074	0,076
2	0,151	0,151	0,151
3	0,037	0,037	0,038
4	0,030	0,030	0,030
5	0,114	0,114	0,114
6	0,038	0,038	0,038

Após a obtenção dos dados calibrados (tabelas 4.26 e 4.27), os coeficientes de rugosidade e as demandas calibradas, são tratados como dados de entrada no modelo de análise de rede proposto por NIELSEN (1989), gerando os resultados de energia calibrada (tabela 4.28) e vazão calibrada de toda a rede (4.29) em relação aos diferentes setores. Da mesma forma que nas outras simulações foram calculados os desvios relativos em relação às energias reais (tabela 4.28).

Todos os desvios deste método, referentes às energias (tabela 4.28), satisfazem o intervalo de validação dos valores calibrados, $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ propostos por WALSKI (1983) e $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, CESARIO e DAVIS (1984).

Tabela 4.28 – Energia calibrada - método explícito - rede exemplo 1

Energia Calibrada (m)							
Nó	Real	Setores					
		1		2		3	
			%		%		%
1	53,3	52,4	1,7	52,2	2,0	52,5	1,4
2	54,2	53,4	1,5	53,1	2,1	52,9	2,5
3	53,4	52,5	1,8	52,1	2,4	51,8	3,1
4	51,8	50,8	2,0	50,6	2,3	51,0	1,5
5	52,6	51,4	2,2	51,1	2,8	51,0	3,0
6	52,6	51,4	2,2	51,1	2,8	50,9	3,1

A tabela (4.29) mostra os valores das vazões de cada trecho de tubulação em relação aos diferentes setores.

Tabela 4.29 – Vazão calibrada - método explícito – rede exemplo 1

Vazão Calibrada (m³/s)			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	0,1492	0,1521	0,1526
2	0,2631	0,2591	0,2460
3	0,0737	0,0724	0,0628
4	0,0300	0,0300	0,0300
5	0,0452	0,0481	0,0486
6	0,0790	0,0762	0,0701
7	0,0330	0,0318	0,0298
8	0,0698	0,0673	0,0507
9	0,0103	0,0103	0,0197

A tabela (4.30) apresenta uma comparação entre os valores calibrados, estimados e reais em termos de diferenças quadráticas em relação às energias reais nos nós, para os diferentes setores considerados na rede exemplo 1.

Observando a tabela (4.30), pode-se garantir que método explícito de calibração reduziu os desvios encontrados das energias nos nós. Levando em conta o desvio máximo encontrado, igual a 10,93, verifica-se que o método explícito reduz em 69,35% os desvios em relação aos desvios totais das energias estimadas.

Tabela 4.30 – Diferenças quadráticas do método explícito – rede exemplo 1

Diferenças Quadráticas das Energias - Método Explícito – Rede Exemplo 1								
Nó	(Estimado – Real) ²		(Calibrado – Real) ²					
			1 Setor		2 Setores		3 Setores	
	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio
1	51,0	5,18	52,4	0,83	52,2	1,16	52,5	0,56
2	52,2	4,06	53,4	0,67	53,1	1,34	52,9	1,77
3	51,1	5,36	52,5	0,91	52,1	1,70	51,8	2,77
4	49,0	7,89	50,8	1,07	50,6	1,37	51,0	0,59
5	50,0	6,58	51,4	1,28	51,1	2,20	51,0	2,51
6	50,0	6,58	51,4	1,31	51,1	2,24	50,9	2,73
Σ		35,66		6,07		10,01		10,93

A coluna da tabela (4.30) denominada "estimada" corresponde aos valores de energia produzidos pelo modelo de análise de redes com o coeficiente de rugosidade estimado e as demandas estimadas (tabela 4.1) para a rede exemplo 1. Nota-se uma diferença em relação às energias reais e percebe-se que utilizando a calibração, os desvios diminuem em relação às energias estimadas, para todas as simulações consideradas.

A figura (4.9) apresenta o comportamento dos coeficientes de rugosidade calibrados e estimados em relação ao coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 1 utilizando o modelo de calibração explícito.

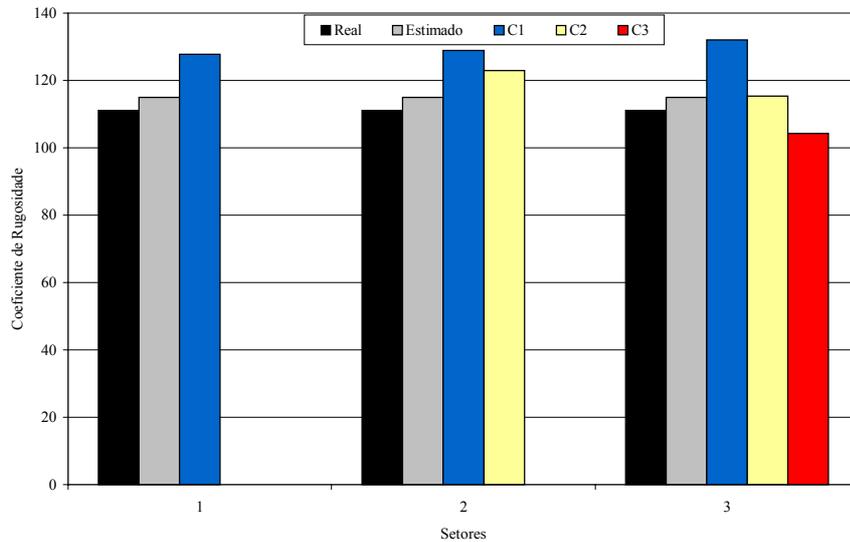


Figura 4.9 – Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 1 utilizando o método explícito

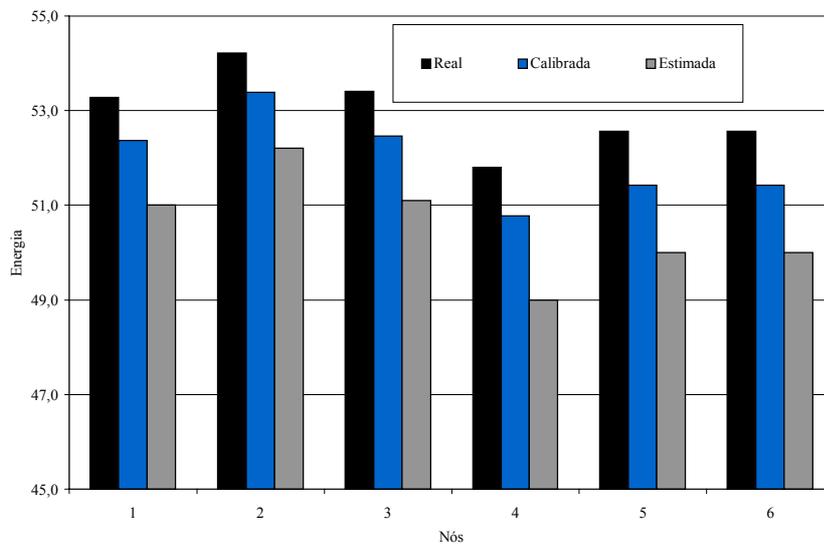


Figura 4.10 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando um setor utilizando o método explícito

A relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrado é apresentada na figura (4.9). Apesar dos coeficientes de rugosidade calibrados apresentarem diferenciação considerável em relação aos coeficientes de rugosidade real e estimado, isto não representa um resultado ruim, pois o processo de calibração é um ajuste conjunto e simultâneo dos coeficientes de rugosidades nas tubulações e as demandas nos nós. Isto pode ser verificado na tabela (4.30), através dos desvios da situação estimada em relação às situações calibradas. Na

situação calibrada, tanto o coeficiente de rugosidade quanto às demandas nos nós, foram ajustadas, produzindo resultados melhores em relação à situação estimada, na qual, os parâmetros não foram ajustados.

A figura (4.10) apresenta o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais em termos de valores absolutos para a rede considerada em um setor. Observe-se que as energias calibradas encontram-se abaixo dos valores das energias reais.

A diferença entre os valores calibrados e os valores reais é menor que a diferença encontrada entre os valores estimados e os valores reais.

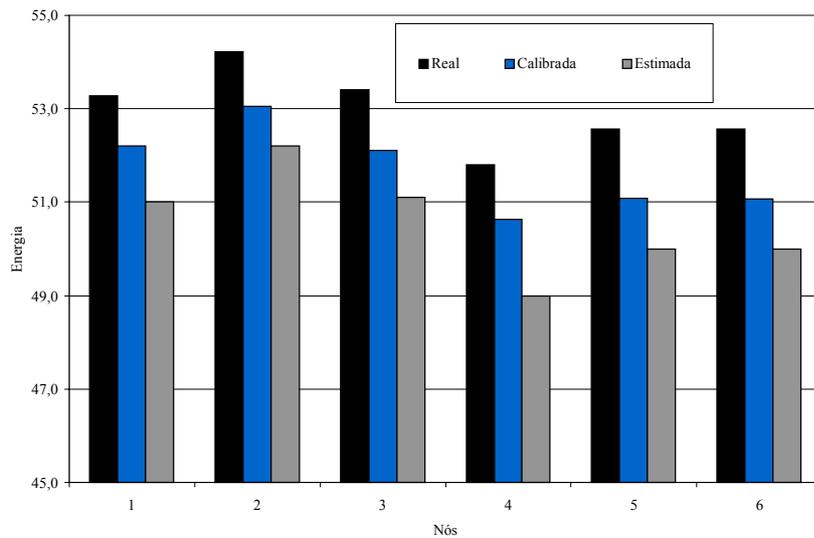


Figura 4.11 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando dois setores utilizando o método explícito

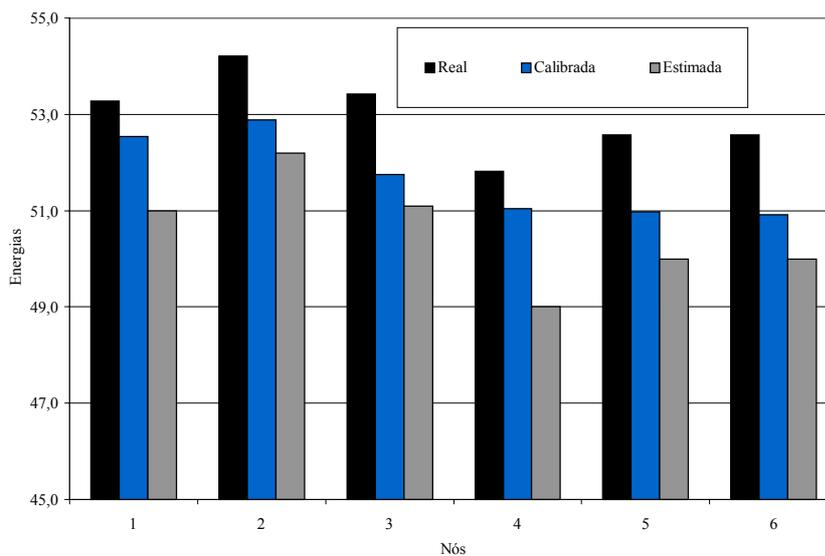


Figura 4.12 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 1 considerando três setores utilizando o método explícito

A figura (4.11) mostra o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais, considerando a rede dividida em dois setores. As energias calibradas demonstraram resultados inferiores às energias reais. Observa-se que todos os nós apresentam a mesma característica, não havendo variação diferenciada. As energias calibradas demonstraram uma sensível melhora em relação às energias estimadas.

A figura (4.12) mostra o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais, considerando a rede dividida em três setores.

4.6 – Simulação do Método Analítico para a Rede Exemplo 2

Os resultados da simulação para rede exemplo 2 (figura 3.5), utilizando o método analítico, foram obtidos seguindo o mesmo procedimento descrito no item (4.2) deste capítulo. A formulação matemática é trabalhada semelhantemente à aplicação na rede exemplo 1.

A tabela (4.31) apresenta os valores das energias nos nós de testes referentes às condições real e estimada. Essas energias foram medidas utilizando o modelo de análise de rede proposto por NIELSEN (1989), dos quais os dados geométricos reais e os dados geométricos estimados serviram de dados de entrada.

Tabela 4.31 – Energias nos nós de testes s/ incremento de vazão - rede exemplo 2

Energia s/ Incremento de Vazão (m)			
Condição	Nós de Testes		
	3	11	12
Real	94,4	91,2	91,9
Estimada	90,1	84,2	85,6

Apoiando-se nas considerações realizadas por ORMSBEE (1989) sobre as estratégias de calibração, nesse trabalho adotou-se a estratégia média. O coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 2 foi de 113,5, valor médio calculado da condição real proposta no trabalho de BHAVE (1988).

A tabela (4.32) mostra os valores das energias reais nos nós de testes para as diferentes simulações consideradas. O valor do coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 2 é de 113,5 e as demandas reais utilizadas são encontradas na tabela (3.7).

Considerando a rede dividida em apenas um setor, o único nó de teste foi o nó 12. Para a rede dividida em dois setores os nós de testes foram os nós 3 e 12, e para a rede dividida em três setores os nós de testes foram os nós 3, 11 e 12.

Tabela 4.32 – Energias reais setorizadas - rede exemplo 2

Energia Real c/ Incremento de Vazão (m)			
Setores	Nós de Testes		
	3	11	12
1	-	-	77,4
2	87,9	-	85,6
3	89,4	77,3	84,0

Para a obtenção das energias estimadas nos nós de testes (tabela 4.33), foi considerado um coeficiente de rugosidade estimado igual a 100 (BHAVE 1988), como estimativa inicial e os valores referentes às demandas estimadas, são encontrados na tabela (4.8).

Tabela 4.33 – Energias estimadas setorizadas - rede exemplo 2

Energia Estimada c/ Incremento de Vazão (m)			
Setores	Nós de Testes		
	3	11	12
1	-	-	65,7
2	80,9	-	76,5
3	83,0	64,4	74,5

A tabela (4.34) apresenta os resultados dos coeficientes de rugosidade calibrados, obtidos pelo método analítico para a rede exemplo 2, em relação aos diferentes setores. Observa-se que o coeficiente de rugosidade calibrado foi aplicado a todos os trechos, no caso de um setor, onde se tem apenas um nó de teste. Para a situação em que a rede é dividida em dois setores, os coeficientes de rugosidade são aplicados para cada tubulação referente ao setor correspondente, e neste caso dois nós são de testes.

Considerando a rede dividida em três setores, a tabela (4.34) mostra os valores obtidos pela aplicação do método analítico, considerando três nós de testes. Observam-se as divisões da rede exemplo 2 através dos valores calibrados do coeficiente de rugosidade, demonstrando a forma de setorização da rede.

Tabela 4.34 – Coeficiente de rugosidade calibrado - método analítico - rede exemplo 2

Coeficiente de Rugosidade Calibrado			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	97,81	97,31	97,80
2	97,81	115,62	110,32
3	97,81	115,62	110,32
4	97,81	115,62	110,32
5	97,81	115,62	110,32
6	97,81	115,62	110,32
7	97,81	115,62	110,32
8	97,81	97,31	97,80
9	97,81	97,31	114,61
10	97,81	97,31	97,80
11	97,81	97,31	97,80
12	97,81	97,31	97,80
13	97,81	115,62	110,32
14	97,81	115,62	110,32
15	97,81	115,62	110,32
16	97,81	97,31	97,80
17	97,81	97,31	97,80
18	97,81	97,31	97,80
19	97,81	97,31	97,80
20	97,81	97,31	97,80
21	97,81	97,31	114,61
22	97,81	97,31	114,61
23	97,81	97,31	114,61

Tabela 4.35 – Demanda calibrada nos nós - método analítico - rede exemplo 2

Demanda Calibrada (m³/s)			
Nó	Setores		
	1	2	3
1	0,029	0,041	0,040
2	0,022	0,031	0,030
3	0,014	0,020	0,020
4	0,022	0,026	0,030
5	0,029	0,034	0,040
6	0,036	0,043	0,050
7	0,043	0,061	0,060
8	0,029	0,034	0,040
9	0,007	0,009	0,007
10	0,014	0,017	0,020
11	0,029	0,034	0,040
12	0,014	0,017	0,020

A tabela (4.35) apresenta os valores das demandas calibradas nos nós referentes à rede exemplo 2 utilizando o método analítico. Há uma linearidade dos valores encontrados para os diferentes setores considerados, em se tratando da ordem de magnitude.

Tabela 4.36 – Energia calibrada - método analítico - rede exemplo 2

Energia Calibrada (m)							
Nó	Real	Setores					
		1		2		3	
			%		%		%
1	95,8	95,8	0,0	96,1	-0,3	95,3	0,5
2	94,7	94,8	0,0	95,1	-0,4	94,1	0,6
3	94,4	94,4	0,0	94,8	-0,4	93,8	0,7
4	92,2	92,3	0,0	93,0	-0,8	91,3	1,0
5	91,8	91,9	0,0	92,6	-0,8	90,8	1,1
6	92,6	92,6	0,0	93,3	-0,8	91,7	0,9
7	94,7	94,7	0,0	95,0	-0,4	94,1	0,6
8	94,9	94,9	0,0	95,3	-0,5	94,3	0,6
9	98,6	98,6	0,0	98,7	-0,1	98,3	0,3
10	94,5	94,5	0,0	94,9	-0,5	93,9	0,7
11	91,2	91,3	0,0	91,8	-0,6	90,4	0,9
12	91,9	91,9	0,0	92,6	-0,8	90,9	1,1

Após a obtenção dos dados calibrados (tabelas 4.34 e 4.35), os coeficientes de rugosidade e as demandas calibradas são tratados como dados de entrada no modelo de análise de rede proposto por NIELSEN (1989). Este modelo produziu os resultados de energia calibrada (tabela 4.36) e vazão calibrada de toda a rede (4.37) em relação aos diferentes setores.

Todos os desvios deste método, referentes às energias (tabela 4.36), satisfazem o intervalo de validação dos valores calibrados, $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ propostos por WALSKI (1983) e $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, CESARIO e DAVIS (1984).

A tabela (4.38) apresenta uma comparação entre os valores calibrados, estimados e reais, em termos de diferenças quadráticas, em relação às energias nos nós, para os diferentes setores considerados na rede exemplo 2. Para a obtenção destes valores foram necessárias as energias reais (tabela 3.8), energias estimadas (tabela 4.10) e as energias calibradas (tabela 4.36).

Tabela 4.37 – Vazão calibrada - método analítico – rede exemplo 2

Vazão Calibrada (m³/s)			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	0,1360	0,1301	0,1513
2	0,2082	0,2373	0,2490
3	0,0493	0,0565	0,0591
4	0,0132	0,0146	0,0159
5	0,0102	0,0109	0,0131
6	0,0831	0,0949	0,1000
7	0,0414	0,0447	0,0498
8	0,0799	0,0758	0,0831
9	0,0474	0,0453	0,0581
10	0,0110	0,0111	0,0120
11	0,0514	0,0478	0,0548
12	0,0245	0,0276	0,0261
13	0,0414	0,0446	0,0499
14	0,0248	0,0278	0,0294
15	0,0208	0,0224	0,0253
16	0,0155	0,0144	0,0171
17	0,0106	0,0109	0,0124
18	0,0205	0,0202	0,0234
19	0,0032	0,0027	0,0040
20	0,0259	0,0258	0,0292
21	0,0120	0,0110	0,0150
22	0,0292	0,0283	0,0352
23	0,0051	0,0056	0,0047

Observando o desvio máximo encontrado (tabela 4.38) igual 6.44 (3 setores), percebe-se que há uma redução de 97,86%, em relação ao desvio total das energias estimadas. Com isto, comprova-se o erro cometido ao se utilizar dados estimados em estudos de redes hidráulicas.

Observando o somatório das diferenças quadráticas (tabela 4.38) das energias para cada situação, percebe-se uma diminuição significativa em relação à condição estimada. Em se tratando do pior ajuste verificado neste caso, três setores, a diminuição dos desvios foi de 97,86%, em relação à condição estimada, comprovando a eficiência da técnica de calibração.

A coluna da tabela (4.38) denominada "estimada", corresponde aos valores de energia produzidos pelo modelo de análise de redes, com o coeficiente de rugosidade estimado e as demandas estimadas (tabela 4.8) para a rede exemplo 2. Nota-se uma diferença em relação às energias reais e percebe-se que aplicando a técnica de calibração os desvios diminuem em relação às energias estimadas para todas as simulações consideradas.

Tabela 4.38 – Diferenças quadráticas do método analítico – rede exemplo 2

Diferenças Quadráticas das Energias - Método Analítico								
Nó	(Estimado – Real) ²		(Calibrado – Real) ²					
			1 Setor		2 Setores		3 Setores	
	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio
1	92,5	11,03	95,8	0,00	96,1	0,09	95,3	0,21
2	90,6	17,14	94,8	0,00	95,1	0,13	94,1	0,34
3	90,1	18,85	94,4	0,00	94,8	0,16	93,8	0,38
4	86,0	38,74	92,3	0,00	93,0	0,57	91,3	0,85
5	85,4	41,47	91,9	0,00	92,6	0,54	90,8	1,10
6	86,7	34,12	92,6	0,00	93,3	0,51	91,7	0,73
7	90,5	17,28	94,7	0,00	95,0	0,14	94,1	0,36
8	90,9	15,79	94,9	0,00	95,3	0,19	94,3	0,32
9	97,5	1,154	98,6	0,00	98,7	0,01	98,3	0,09
10	90,4	17,12	94,5	0,00	94,9	0,18	93,9	0,41
11	84,2	49,17	91,3	0,00	91,8	0,35	90,4	0,62
12	85,6	39,45	91,9	0,00	92,6	0,52	90,9	1,03
Σ		301,04		0,00		3,38		6,44

A figura (4.13) apresenta o comportamento dos coeficientes de rugosidade calibrados e estimados, em relação aos coeficientes de rugosidade reais. Apesar do coeficiente de rugosidade calibrado, para a rede dividida em um setor, se apresentar abaixo da condição estimada, isto não interfere diretamente na obtenção das energias nos nós, pois também é levado em consideração o ajuste de demandas nos nós, realizado pelo modelo de calibração e este conjunto de dados ajustados, fornece as energias calibradas.

A relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrado é apresentada na figura (4.13). Apesar dos coeficientes de rugosidade calibrados apresentarem variações significativas em relação aos coeficientes de rugosidade real, isto não representa um resultado ruim, pois o processo de calibração é um ajuste conjunto e simultâneo dos coeficientes de rugosidades nas tubulações e as demandas nos nós. Isto pode ser verificado na tabela (4.38) através dos desvios da situação estimada em relação às situações calibradas. Na situação calibrada tanto o coeficiente de rugosidade quanto às demandas nos nós foram ajustadas, produzindo resultados melhores em relação à situação estimada dos quais os parâmetros não foram ajustados.

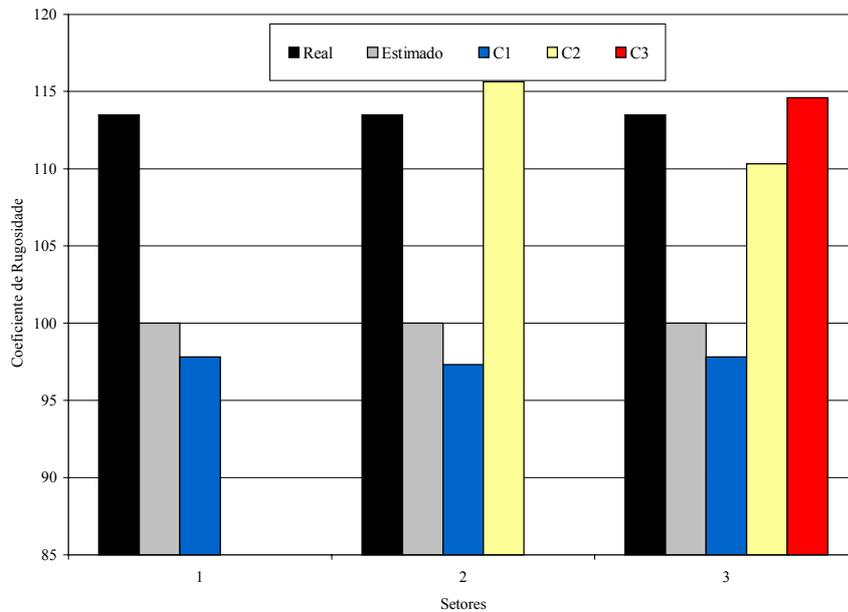


Figura 4.13 – Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 2 utilizando o método analítico

A figura (4.14) apresenta o comportamento das energias calibradas e estimadas, em relação às energias reais, considerando a rede dividida em um setor. Comprova-se que a técnica de calibração ajusta eficientemente as energias calibradas em relação às energias reais. Observa-se também o erro cometido ao se adotar dados estimados (coeficiente de rugosidade e demandas) para análise do sistema em estudo.

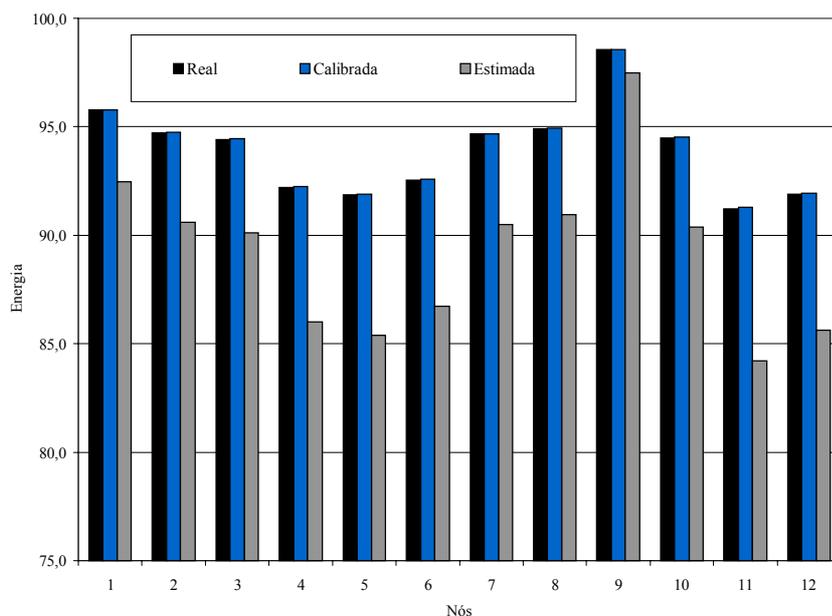


Figura 4.14 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando um setor utilizando o método analítico

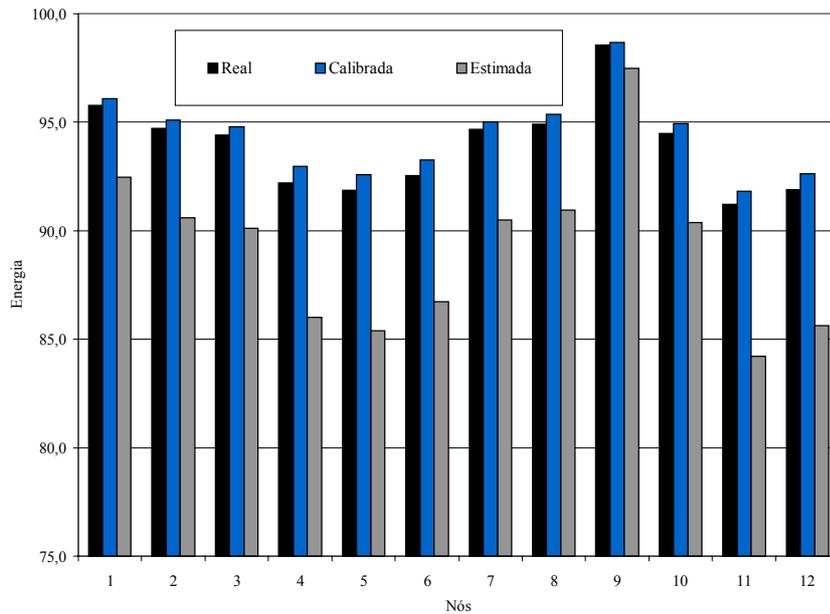


Figura 4.15 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando dois setores utilizando o método analítico

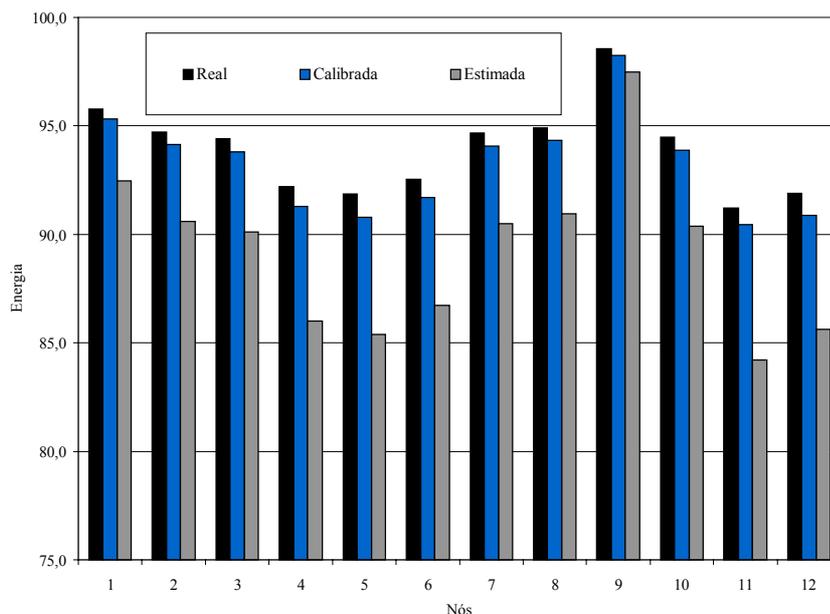


Figura 4.16 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando três Setores utilizando o método analítico

A figura (4.15) mostra o comportamento das energias calibradas e estimadas, em relação às energias reais, para a rede dividida em dois setores. Foi verificado, em alguns nós, a energia calibrada ser maior que a energia real, porém o modelo de calibração apresentou bons resultados, ajustando eficientemente, as energias em relação às energias reais. Mais uma vez, pode ser comprovado o erro cometido na utilização de dados estimados, em modelos de

análise de rede. Percebem-se desvios significantes das energias estimadas em cada nó do sistema estudado.

A figura (4.16) mostra o comportamento das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais, para a rede dividida em três setores. Foi verificado que as energias calibradas estão abaixo das energias reais, porém em relação à diferença encontrada das energias estimadas em relação às energias reais, estas diferenças observadas das energias calibradas tornam-se irrelevantes.

4.7 – Simulação do Método Analítico Modificado para Rede Exemplo 2

Os resultados da simulação para rede exemplo 2 (figura 3.5) utilizando o método analítico modificado, foram obtidos seguindo o mesmo procedimento descrito no item (4.2) deste capítulo. A formulação matemática é trabalhada semelhantemente a aplicação na rede exemplo 1.

O coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 2 é de 113,5 (BHAVE 1988) e as demandas reais são encontradas na tabela (3.7). Como estimativa inicial, atribuiu-se o valor de 100 (BHAVE 1988), para o coeficiente de rugosidade e as demandas estimadas são encontradas na tabela (4.8).

O método analítico modificado é semelhante ao método analítico, porém no método analítico modificado não são necessárias informações para a condição estimada, pois o próprio modelo prognostica tais valores. Como resultado da aplicação do método analítico modificado, a tabela (4.39) mostra os valores calibrados para os coeficientes de rugosidade, bem como, a setorização da rede exemplo.

A tabela (4.40) apresenta as demandas nos nós calibradas para a rede exemplo 2. Verificou-se uma linearidade dos valores de demandas calibradas em relação aos vários setores considerados, não verificando grandes variações. Já os coeficientes de rugosidade apresentaram variações para as diversas simulações.

Os valores calibrados (coeficiente de rugosidade e demandas) são tratados como dados de entrada no simulador hidráulico (NIELSEN 1989), que neste caso está incorporado ao modelo de calibração analítico modificado, produzindo assim os resultados de energias nos nós apresentados na tabela (4.41).

Tabela 4.39 – Coeficiente de rugosidade calibrado - método analítico modificado - rede exemplo 2

Coeficiente de Rugosidade Calibrado			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	136,1	147,1	168,7
2	136,1	147,1	168,7
3	136,1	95,8	100,3
4	136,1	95,8	100,3
5	136,1	95,8	100,3
6	136,1	95,8	100,3
7	136,1	147,1	168,7
8	136,1	147,1	168,7
9	136,1	147,1	88,0
10	136,1	147,1	88,0
11	136,1	147,1	88,0
12	136,1	95,8	100,3
13	136,1	95,8	100,3
14	136,1	95,8	100,3
15	136,1	95,8	100,3
16	136,1	147,1	88,0
17	136,1	147,1	88,0
18	136,1	147,1	88,0
19	136,1	147,1	88,0
20	136,1	147,1	88,0
21	136,1	147,1	88,0
22	136,1	147,1	88,0
23	136,1	147,1	88,0

Tabela 4.40 – Demanda calibrada - método analítico modificado - rede exemplo 2

Demanda Calibrada (m³/s)			
Nós	Setores		
	1	2	3
1	0,05	0,05	0,07
2	0,04	0,04	0,05
3	0,02	0,02	0,03
4	0,04	0,04	0,03
5	0,05	0,05	0,04
6	0,06	0,06	0,05
7	0,07	0,07	0,09
8	0,05	0,05	0,04
9	0,01	0,01	0,01
10	0,02	0,02	0,02
11	0,05	0,05	0,04
12	0,02	0,02	0,02

Tabela 4.41 – Energia calibrada - método analítico modificado – rede exemplo 2

Energia Calibrada (m)							
Nó	Real	Setores					
		1		2		3	
			%		%		%
1	95,8	95,7	0,0	96,5	-0,7	96,8	-1,1
2	94,7	94,7	0,1	94,9	-0,2	95,0	-0,3
3	94,4	94,4	0,0	94,5	-0,1	94,5	-0,1
4	92,2	92,1	0,1	91,7	0,5	91,9	0,3
5	91,8	91,7	0,1	91,5	0,4	91,4	0,4
6	92,6	92,5	0,1	92,2	0,4	92,5	0,0
7	94,7	94,6	0,0	94,8	-0,2	95,0	-0,3
8	94,9	94,9	0,0	95,3	-0,4	96,3	-1,4
9	98,6	98,6	0,0	98,7	-0,1	99,2	-0,6
10	94,5	94,6	-0,1	94,8	-0,3	95,1	-0,6
11	91,2	91,1	0,2	91,3	-0,1	90,2	1,1
12	91,9	91,9	0,0	91,7	0,2	91,6	0,3

Tabela 4.42 – Vazão calibrada - método analítico modificado – rede exemplo 2

Vazão Calibrada (m³/s)			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	0,1884	0,1960	0,1732
2	0,2922	0,2845	0,3072
3	0,0691	0,0608	0,0694
4	0,0171	0,0142	0,0161
5	0,0119	0,0081	0,0005
6	0,1154	0,1007	0,1132
7	0,0575	0,0747	0,0571
8	0,1124	0,1161	0,1221
9	0,0659	0,0696	0,0431
10	0,0135	0,0177	0,0179
11	0,0723	0,0892	0,0596
12	0,0341	0,0327	0,0620
13	0,0584	0,0458	0,0461
14	0,0329	0,0283	0,0344
15	0,0300	0,0233	0,0235
16	0,0238	0,0289	0,0191
17	0,0139	0,0114	0,0110
18	0,0292	0,0308	0,0233
19	0,0067	0,0087	0,0051
20	0,0351	0,0352	0,0283
21	0,0174	0,0213	0,0125
22	0,0421	0,0456	0,0326
23	0,0077	0,0054	0,0069

Todos os desvios deste método, referentes às energias (tabela 4.41), satisfazem o intervalo de validação de calibração, $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ propostos por WALSKI (1983) e $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, CESARIO e DAVIS (1984).

A tabela (4.43) mostra uma comparação entre os valores calibrados, estimados e os valores reais em termos de diferenças quadráticas em relação às energias reais nos nós, para os diferentes setores considerados na rede exemplo 2. Para a obtenção destes valores foram necessárias as energias reais (tabela 3.8), as energias estimadas (tabela 4.10) e as energias calibradas (tabela 4.41).

Tabela 4.43 – Diferenças quadráticas do método analítico modificado – rede exemplo 2

Diferenças Quadráticas das Energias - Método Analítico Modificado								
Nó	(Estimado – Real) ²		(Calibrado – Real) ²					
			1 Setor		2 Setores		3 Setores	
	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio
1	92,5	11,03	95,7	0,00	96,5	0,50	96,8	1,16
2	90,6	17,14	94,7	0,00	94,9	0,02	95,0	0,06
3	90,1	18,58	94,4	0,00	94,5	0,01	94,5	0,02
4	86,0	38,74	92,1	0,02	91,7	0,25	91,9	0,08
5	85,4	41,47	91,7	0,01	91,5	0,11	91,4	0,16
6	86,7	34,12	92,5	0,01	92,2	0,11	92,5	0,00
7	90,5	17,28	94,6	0,00	94,8	0,03	95,0	0,10
8	90,9	15,78	94,9	0,00	95,3	0,13	96,3	1,88
9	97,5	1,15	98,6	0,00	98,7	0,01	99,2	0,39
10	90,4	17,11	94,6	0,00	94,8	0,10	95,1	0,33
11	84,2	49,17	91,1	0,02	91,3	0,01	90,2	1,03
12	85,6	39,45	91,9	0,00	91,7	0,05	91,6	0,08
Σ		301,04		0,06		1,33		5,29

Tomando como base o somatório total (tabela 4.43), observa-se que para todos os casos houve uma melhoria significativa nos desvios encontrados, podendo afirmar que o processo de calibração representa o comportamento real do sistema de distribuição de água estudado.

Observando o maior desvio encontrado na tabela (4.43 - 3 setores) igual a 5,29, verifica-se uma redução de 98,24% em relação ao desvio quadrado das energias estimadas. Com isso comprova-se a eficiência do método.

A coluna da tabela (4.43) denominada "estimada" corresponde aos valores de energia produzidos pelo modelo de análise de redes com o coeficiente de rugosidade estimado e as demandas estimadas (tabela 4.8) para a rede exemplo 2. Nota-se uma diferença em relação às

energias reais e percebe-se que utilizando a calibração os desvios diminuem em relação às energias estimadas para todas as simulações consideradas.

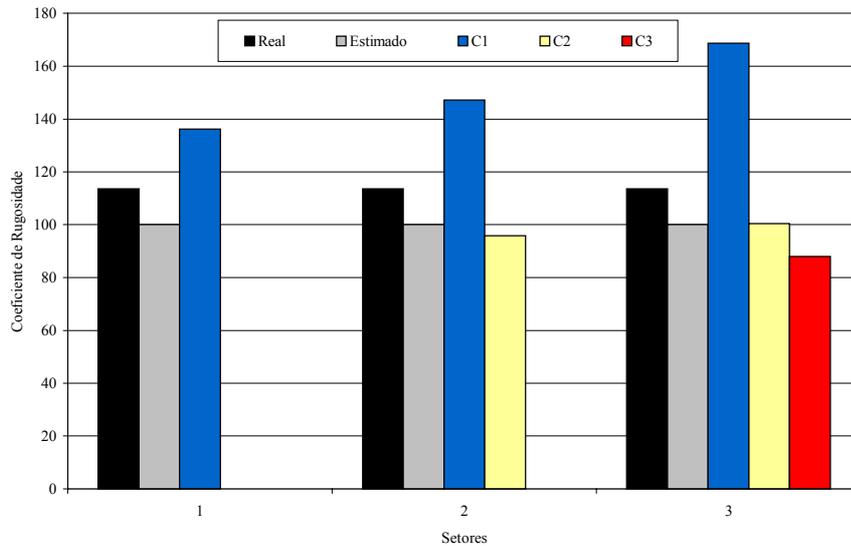


Figura 4.17 – Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 2 utilizando o método analítico modificado

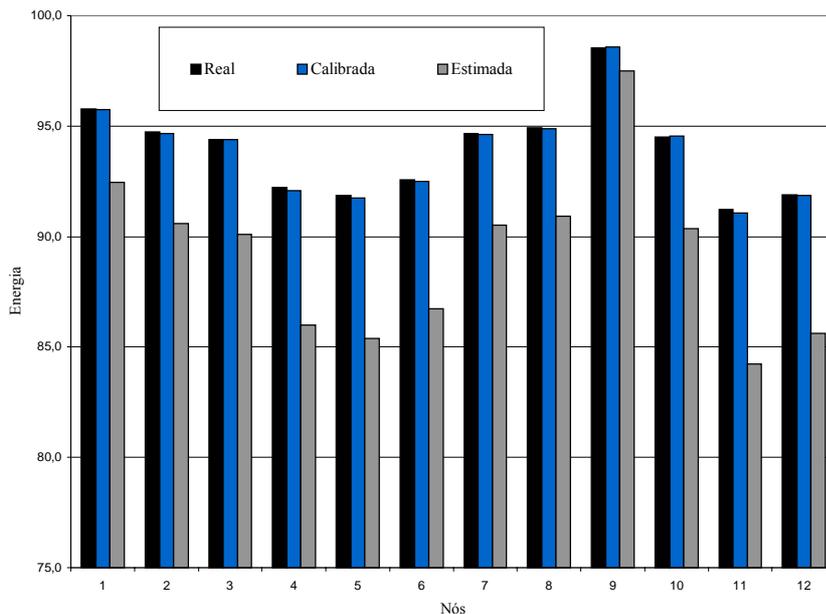


Figura 4.18 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando um setor utilizando o método analítico modificado

A figura (4.17) apresenta o comportamento dos coeficientes de rugosidade calibrados e estimados em relação ao coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 2 utilizando o modelo de calibração modificado. Apesar dos coeficientes de rugosidade calibrados apresentarem variações perceptíveis em relação aos coeficientes de rugosidade real, isto não representa um resultado ruim, pois o processo de calibração é um ajuste conjunto e simultâneo

dos coeficientes de rugosidades nas tubulações e as demandas nos nós. Isto pode ser verificado na tabela (4.43) através dos desvios da situação estimada em relação às situações calibradas. Na situação calibrada tanto o coeficiente de rugosidade quanto as demandas nos nós foram ajustadas, produzindo resultados melhores em relação a situação estimada dos quais os parâmetros não foram ajustados.

A figura (4.18) apresenta o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais em termos de valores absolutos para a rede considerada com um setor. Observando a figura (4.18), é verificada a diferença entre as energias estimadas em relação às energias reais, e que as diferenças das energias calibradas em relação às energias reais tornam-se irrelevantes, quando comparadas às energias estimadas, validando o método.

A figura (4.19) mostra o comportamento das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais considerando dois setores.

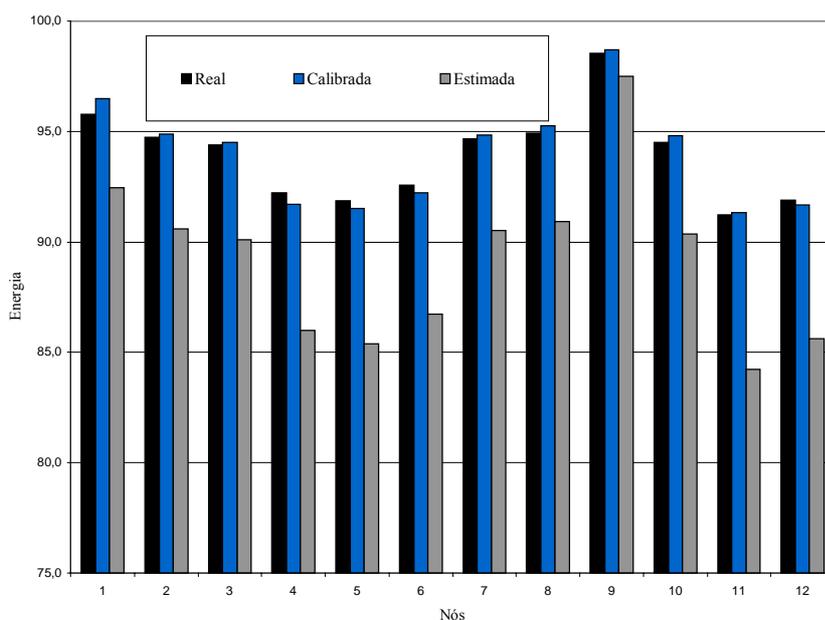


Figura 4.19 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando dois setores utilizando o método analítico modificado

A figura (4.20) apresenta o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais em termos de valores absolutos para a rede considerada em três setores.

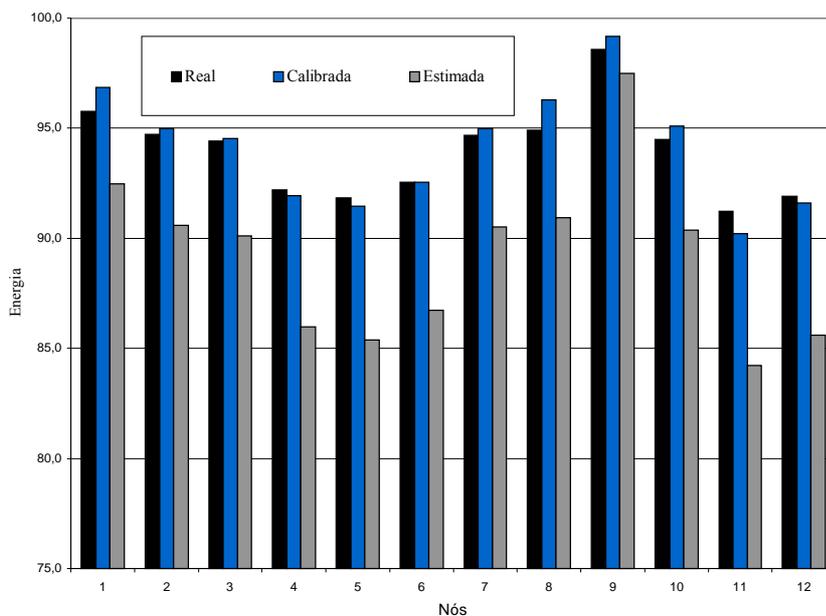


Figura 4.20 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando três setores utilizando o método analítico modificado

4.8 – Simulação do Método Explícito para a Rede Exemplo 2

Os resultados da simulação para rede exemplo 2 (figura 3.5) utilizando o método explícito foram obtidos seguindo o mesmo procedimento geral descrito no item (4.2) deste capítulo. Este método é baseado na técnica desenvolvida por BOULOS E WOOD (1990) do qual requer informações (energias reais) de alguns pontos da rede (nós de testes), para posteriormente produzir os valores calibrados (coeficientes de rugosidade e demandas nos nós).

Para a consideração da rede em setores, este método segue o mesmo procedimento que para a rede exemplo 1, das simulações anteriores. A tabela (4.44) apresenta os resultados dos coeficientes de rugosidade calibrados pelo método explícito.

A tabela (4.45) mostra os valores calibrados das demandas nos nós utilizando o método explícito. Encontra-se a linearidade nos resultados em relação à ordem de magnitude para os diferentes setores. As variações de demanda encontradas são pequenas, isto é porque o modelo ajusta as vazões para cada trecho de tubulação e posteriormente relaciona com as demandas nos nós, diferentemente do método analítico e analítico modificado que ajustam diretamente as demandas nos nós.

Tabela 4.44 – Coeficiente de rugosidade calibrado - método explícito - rede exemplo 2

Coeficiente de Rugosidade Calibrado			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	119,8	87,0	100,0
2	119,8	122,5	88,7
3	119,8	122,5	88,7
4	119,8	122,5	88,7
5	119,8	122,5	88,7
6	119,8	122,5	88,7
7	119,8	122,5	88,7
8	119,8	87,0	100,0
9	119,8	87,0	77,9
10	119,8	87,0	100,0
11	119,8	87,0	100,0
12	119,8	87,0	100,0
13	119,8	122,5	88,7
14	119,8	122,5	88,7
15	119,8	122,5	88,7
16	119,8	87,0	100,0
17	119,8	87,0	100,0
18	119,8	87,0	100,0
19	119,8	87,0	100,0
20	119,8	87,0	100,0
21	119,8	87,0	77,9
22	119,8	87,0	77,9
23	119,8	87,0	77,9

Tabela 4.45 – Demanda calibrada – método explícito - rede exemplo 2

Demanda Calibrada (m³/s)			
Nós	Setores		
	1	2	3
1	0,059	0,059	0,059
2	0,039	0,039	0,039
3	0,040	0,040	0,040
4	0,020	0,020	0,020
5	0,029	0,030	0,023
6	0,059	0,059	0,060
7	0,053	0,036	0,057
8	0,048	0,054	0,032
9	0,019	0,019	0,019
10	0,009	0,009	0,010
11	0,020	0,019	0,020
12	0,010	0,010	0,010

Tabela 4.46 – Energia calibrada - método explícito - rede exemplo 2

Energia Calibrada (m)							
Nó	Real	Setores					
		1		2		3	
			%		%		%
1	95,8	94,5	1,4	95,6	0,3	93,8	2,1
2	94,7	93,2	1,5	94,5	0,2	92,3	2,5
3	94,4	92,7	1,8	94,1	0,4	91,7	2,9
4	92,2	91,4	0,9	92,6	-0,6	90,3	2,0
5	91,8	91,2	0,6	92,3	-0,8	90,2	1,8
6	92,6	91,6	1,1	92,8	-0,4	90,5	2,3
7	94,7	93,2	1,5	94,5	0,2	92,3	2,5
8	94,9	93,7	1,2	94,8	0,1	93,1	1,9
9	98,6	98,1	0,5	98,4	0,2	98,1	0,5
10	94,5	93,8	0,7	94,8	-0,3	93,1	1,5
11	91,2	91,7	-0,6	92,6	-1,8	90,3	1,0
12	91,9	91,4	0,6	92,4	-0,9	90,3	1,8

Após a obtenção dos dados calibrados (tabelas 4.44 e 4.45), os coeficientes de rugosidade e as demandas calibradas são tratados como dados de entrada no modelo de análise de redes NIELSEN (1989) gerando os resultados de energia calibrada (tabela 4.46) e vazão calibrada de toda a rede (4.47) em relação aos diferentes setores. Também é apresentado na tabela (4.46) os desvios relativos de cada nó, das energias calibradas em relação as energias reais. Todos os desvios deste método, referentes às energias, satisfazem o intervalo de validação de $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ propostos por WALSKI (1983) e $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, CESARIO e DAVIS (1984).

A tabela (4.47) mostra os valores das vazões de cada trecho de tubulação em relação aos diferentes setores.

A tabela (4.48) apresenta uma comparação entre os valores calibrados, estimados e os valores reais em termos de diferenças quadráticas em relação às energias reais nos nós, para os diferentes setores considerados na rede exemplo 2. Para a obtenção destes valores foram necessárias as energias reais (tabela 3.8), energias calibradas (tabela 4.46) e as energias estimadas (4.10).

Observando o maior desvio encontrado na tabela (4.48) igual a 42.08, pode-se concluir que houve uma diminuição do desvio quadrado em relação ao desvio quadrado estimado foi de 86,01%.

Tabela 4.47 – Vazão calibrada - método explícito – rede exemplo 1

Vazão Calibrada (m³/s)			
Trecho	Setores		
	1	2	3
1	0,1614	0,1304	0,1609
2	0,2477	0,2698	0,2338
3	0,0567	0,0619	0,0540
4	0,0180	0,0198	0,0176
5	0,0006	0,0028	0,0029
6	0,0925	0,1011	0,0878
7	0,0402	0,0496	0,0346
8	0,0913	0,0710	0,0982
9	0,0507	0,0399	0,0429
10	0,0044	0,0015	0,0003
11	0,0508	0,0427	0,0559
12	0,0372	0,0222	0,0451
13	0,0377	0,0479	0,0356
14	0,0385	0,0420	0,0377
15	0,0164	0,0214	0,0150
16	0,0116	0,0086	0,0114
17	0,0080	0,0099	0,0065
18	0,0154	0,0159	0,0139
19	0,0058	0,0048	0,0029
20	0,0156	0,0177	0,0169
21	0,0134	0,0111	0,0113
22	0,0239	0,0214	0,0215
23	0,0038	0,0022	0,0013

A coluna da tabela (4.48) denominada "estimada" corresponde aos valores de energia produzidos pelo modelo de análise de redes com o coeficiente de rugosidade estimado e as demandas estimadas (tabela 4.8) para a rede exemplo 2. Nota-se uma diferença em relação às energias reais e percebe-se que utilizando a calibração os desvios diminuem em relação às energias estimadas para todas as simulações consideradas.

A figura (4.21) apresenta o comportamento dos coeficientes de rugosidade calibrados em relação ao coeficiente de rugosidade real para a rede exemplo 2 utilizando o modelo de calibração explícito.

A relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrado é apresentada na figura (4.21). Apesar dos coeficientes de rugosidade calibrados se apresentarem diferenças consideráveis em relação aos coeficientes de rugosidade real e estimado, isto não representa um resultado ruim, pois o processo de calibração é um ajuste conjunto e simultâneo dos

coeficientes de rugosidades nas tubulações e as demandas nos nós. Isto pode ser verificado na tabela (4.48) através dos desvios da situação estimada em relação às situações calibradas. Na situação calibrada tanto o coeficiente de rugosidade quanto às demandas nos nós foram ajustadas, produzindo resultados melhores em relação à situação estimada dos quais os parâmetros não foram ajustados.

Tabela 4.48 – Diferenças quadráticas do método explícito – Rede Exemplo 2

Diferenças Quadráticas das Energias – Método Explícito								
Nó	(Estimado – Real) ²		(Calibrado – Real) ²					
			1 Setor		2 Setores		3 Setores	
	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio	H	Desvio
1	92,5	11,21	94,5	1,67	95,5	0,08	93,8	4,05
2	90,6	16,91	93,2	2,15	94,5	0,02	92,3	5,60
3	90,1	18,50	92,7	2,88	94,1	0,11	91,7	7,29
4	86,0	38,55	91,4	0,62	92,8	0,34	90,3	3,52
5	85,4	40,97	91,2	0,35	92,5	0,54	90,2	2,58
6	86,7	34,62	91,6	1,00	92,9	0,11	90,5	4,36
7	90,5	17,60	93,2	2,14	94,5	0,04	92,3	5,56
8	90,9	15,72	93,7	1,35	94,8	0,01	93,1	3,35
9	97,5	1,25	98,1	0,21	98,4	0,04	98,1	0,21
10	90,4	17,11	93,8	0,47	94,7	0,06	93,1	2,04
11	84,2	48,78	91,7	0,26	92,8	2,70	90,3	0,78
12	85,6	39,51	91,4	0,27	92,7	0,67	90,3	2,72
Σ		301,04		13,38		4,73		42,08

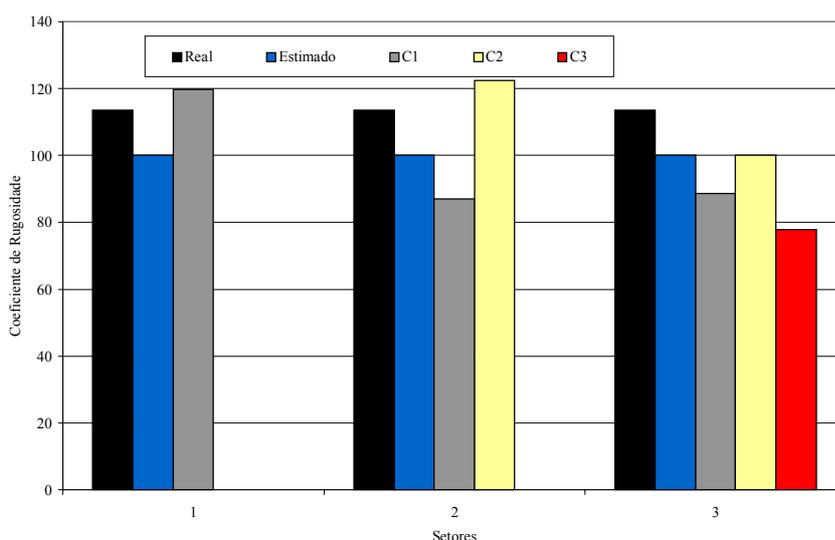


Figura 4.21 – Relação entre os coeficientes de rugosidade real, estimado e calibrados para a rede exemplo 2 utilizando o método explícito

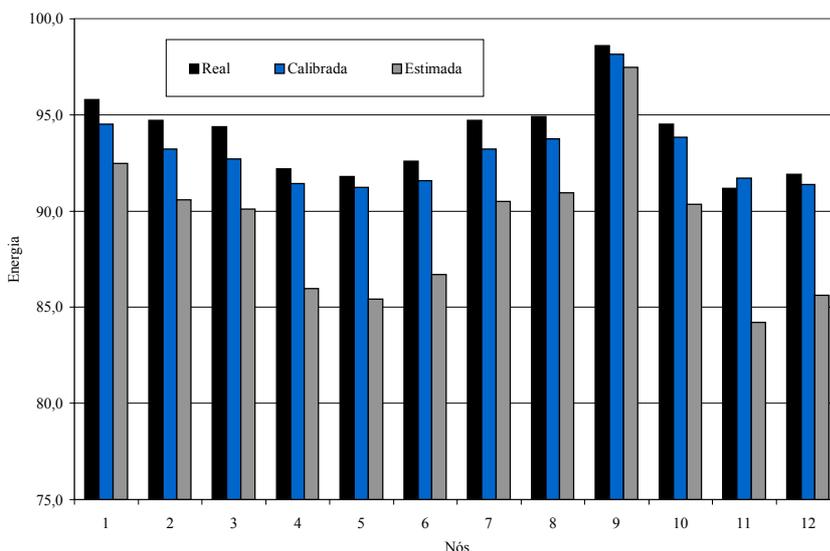


Figura 4.22 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando um setor utilizando o método explícito

A figura (4.22) apresenta o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais em termos de valores absolutos para a rede considerada em um setor. Observa-se que as energias calibradas encontram-se abaixo dos valores das energias reais com exceção no nó de teste 11.

Observando a figura (4.22), notou-se que em todos os nós as energias calibradas estão abaixo das energias reais, porem quando as diferenças das energias calibradas são comparadas com as energias estimadas, pode ser verificado que esta diferença é irrelevante.

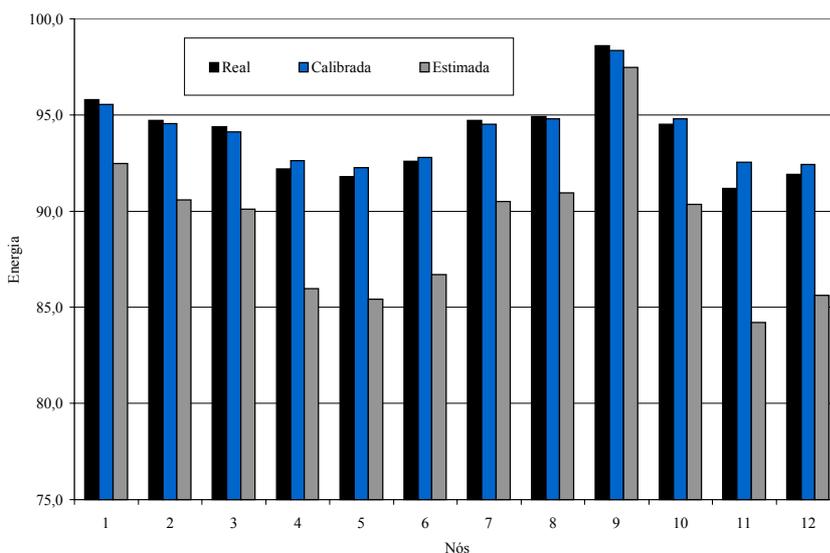


Figura 4.23 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando dois setores utilizando o método explícito

A figura (4.23) mostra o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais considerando a rede dividida em dois setores.

A figura (4.24) mostra o comportamento das energias calibradas em relação às energias reais considerando a rede dividida em três setores. As energias calibradas apresentaram valores de energias inferiores aos valores de energias reais.

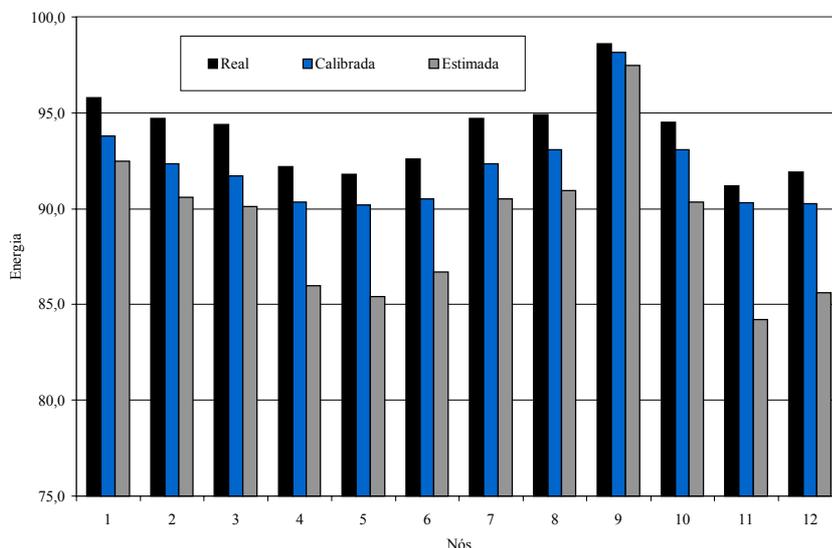


Figura 4.24 – Comparação das energias calibradas e estimadas em relação às energias reais para rede exemplo 2 considerando dois três setores utilizando o método explícito

4.9 – Comparação dos Métodos

Neste trabalho, os métodos clássicos de calibração de redes foram apresentados e desenvolvidos da seguinte maneira:

- a) Método Analítico
- b) Método Analítico Modificado
- c) Método Explícito

Como visto anteriormente no capítulo (2) de pesquisa bibliográfica, o método analítico modificado é um aperfeiçoamento do método analítico e por isso, estes dois métodos apresentaram semelhança em relação as suas formulações, produzindo resultados com ordens de magnitudes idênticas.

Em relação à formulação do método explícito, pode-se dizer que possui características diferentes em relação aos métodos analíticos. A flexibilidade de sua formulação faz com que

possam ser incorporados vários parâmetros de calibração, operação, projeto e componentes hidráulicos, desde que existam condições contorno necessárias do sistema.

O estudo do comportamento dos desvios dos algoritmos de calibração foi realizado através da utilização de vários cenários de simulação. O aumento do número de observações na rede, em alguns casos, diminui os desvios dependendo do método utilizado e da dimensão da rede.

Portanto, como forma de se avaliar o desempenho dos métodos de calibração descritos, foram desenvolvidos três cenários de simulação, onde as redes exemplos foram divididas em diferentes setores (zonas).

Tabela 4.49 – Diferenças quadráticas totais das energias – rede exemplo 1

Rede Exemplo 1	Diferenças Quadráticas			
	1	2	3	$\Sigma/3$
Método Analítico	0,03	1,92	0,10	2,05
Método Analítico Modificado	6,36	4,04	1,55	11,95
Método Explícito	6,07	10,01	10,93	27,01
Σ	12,46	15,97	12,58	
Desvio Quadrado Médio	4,15	5,32	4,19	

As tabelas (4.49) e (4.50) apresentam os somatórios dos desvios quadráticos, relativos às redes exemplo, considerando os diferentes setores em relação a cada modelo de calibração.

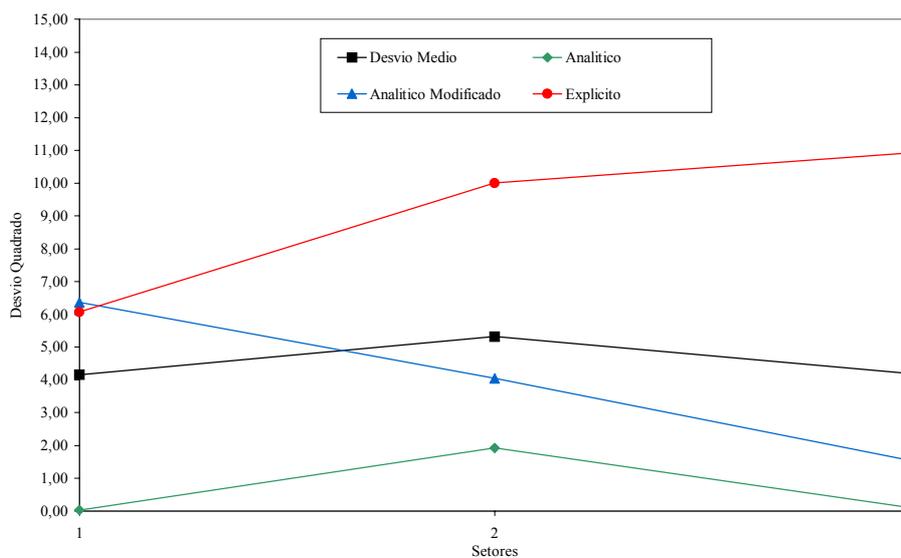


Figura 4.25 – Comportamento dos modelos de calibração em relação ao desvio médio de cada setor – rede exemplo 1

Observando a tabela (4.49), percebe-se que o método analítico apresentou o menor desvio, considerando o somatório dos desvios para os três setores em se tratando da rede exemplo 1. Nota-se que nenhum desvio apresentou grandes variações em seus valores, cada modelo apresentou sua referida ordem de magnitude. Por exemplo, o modelo explícito apresentou seus desvios para os diferentes setores, entre os valores num 6 e 11.

A figura (4.25) apresenta o comportamento dos desvios de cada método de calibração em relação ao desvio médio de cada setor, considerando os três métodos. Verificou-se que o modelo analítico apresentou para todos os casos, desvios abaixo do desvio médio de cada setor. O método analítico modificado apresentou uma forte tendência a diminuir seus desvios conforme o número de observações da rede aumenta.

O método explícito apesar de manter seus desvios acima do desvio médio é considerado aceitável, suas energias calibradas encontram-se no intervalo de validação dos valores calibrados, $\pm 3\%$ a $\pm 10\%$ propostos por WALSKI (1983) e $\pm 7\%$ a $\pm 14\%$, CESARIO e DAVIS (1984). Os seus desvios aumentaram a medida que o número de setores aumentou, devido à incorporação de equações adicionais (condições de contorno).

Tabela 4.50 – Diferenças quadráticas totais das energias - rede exemplo 2

Rede Exemplo 2	Diferenças Quadráticas			
	1	2	3	$\Sigma/3$
Método Analítico	0,00	3,38	6,44	9,82
Método Analítico Modificado	0,06	1,33	5,29	6,68
Método Explícito	13,38	4,73	42,08	60,19
Σ	13,44	9,44	53,81	
Desvio Quadrado Médio	4,48	3,15	17,94	

Para a rede exemplo (2), uma rede de médio porte, o método analítico modificado apresentou o menor somatório de desvio (tabela 4.50). Já o método explícito apresentou o mesmo comportamento, conforme as informações da rede aumentam seus desvios aumentam, isto é comprovado pela incorporação das equações adicionais, que por sua vez possuem incertezas em seus parâmetros. O método analítico manteve sua ordem de magnitude dos desvios.

A figura (4.26) ilustra os resultados provenientes da tabela (5.50) em relação ao desvio quadrado médio por setor, de cada método de calibração, para a rede exemplo (2).

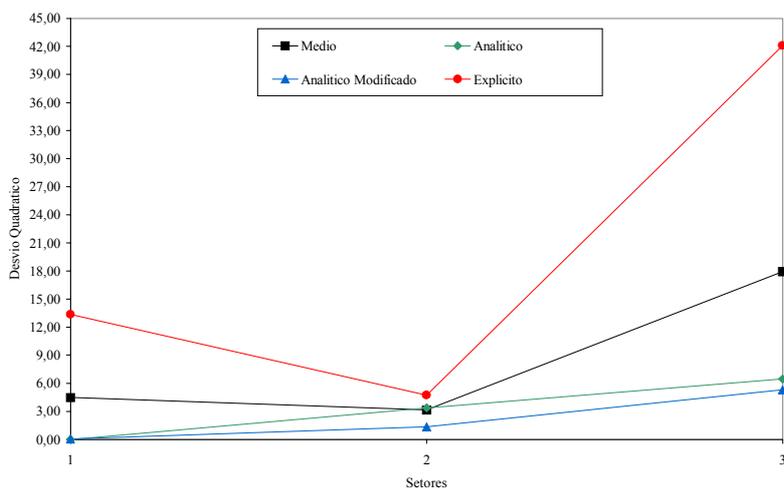


Figura 4.26 – Comportamento dos modelos de calibração em relação ao desvio médio de cada setor – rede exemplo 2

Relacionando os desvios dos dados estimados de coeficiente de rugosidade e demandas nos nós nos modelos de análise de redes sem a calibração, com os desvios máximos encontrados de todas as simulações para cada modelo, foi possível apresentar a tabela (4.51).

Tabela 4.51 – Desvio relativo dos modelos de calibração para as redes exemplo (%)

Método de Calibração	Rede 1 (9 trechos)	Rede 2 (23 trechos)
Método Analítico	94,61	97,86
Método Analítico Modificado	82,16	98,24
Método Explícito	69,35	86,01

A tabela (4.51) apresenta a relação entre o maior desvio encontrado de cada modelo de calibração, considerando todas as simulações, e os desvios apresentados das condições estimadas para cada rede exemplo. A porcentagem significa a redução de erros que cada modelo conseguiu atingir, em relação os erros (desvio quadrático) considerados na condição estimada.

As vantagens e desvantagens de cada método estão amplamente relacionadas ao número de informações requeridas, ou seja, as variáveis de decisão. Os métodos apresentados representaram de forma consistente o comportamento real dos sistemas de distribuição de água estudados.

O método analítico, apesar de apresentar os menores desvios quadráticos, não possui flexibilidade na inserção de variáveis de decisão na sua formulação, como por exemplo

componentes hidráulicos. Porém, apresentou uma melhor combinação entre os valores calibrados e os valores reais.

O método analítico modificado apresentou uma combinação satisfatória entre os valores calibrados e os valores reais. Sua formulação não possibilita, com facilidades, a incorporação de outras variáveis de decisão. Porém, apresentou uma formulação simples considerando a rede em diversos setores e várias condições de carga.

O método explícito apresentou os maiores desvios em relação aos valores reais, porém estes desvios, são considerados aceitáveis na validação dos resultados obtidos. A flexibilidade deste método está na manipulação e incorporação de outras variáveis de decisão, que possibilita a inserção de vários parâmetros de rede, como por exemplo, componentes hidráulicos, parâmetros de projetos e operação.

Os métodos apresentados produziram resultados satisfatórios e representaram com clareza o comportamento real dos sistemas estudados.

5 – CONCLUSÕES

Devido à crescente demanda por água, há necessidade em se obter sistemas de distribuição eficientes. Modelos computacionais para análise e projetos de redes hidráulicas vêm sendo desenvolvidos por várias décadas.

Estes modelos são formulados e utilizados para prognosticar o comportamento real do sistema em estudo na operação e posteriormente planejar suas expansões. A confiabilidade e eficácia destes modelos, contudo, depende da acurácia dos dados de entrada.

Desvios em relação aos valores reais são encontrados nos resultados dos modelos de análises de redes, devido ao uso de parâmetros incorretos. Os coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós mudam ao longo do tempo e se realizada uma análise do sistema após um tempo de implantação, utilizando os parâmetros de projeto (coeficientes de rugosidade e demandas), os resultados produzidos pelo modelo, podem não condizer com a realidade local.

Um das formas de minimizar esses desvios encontrados nos dados de entrada é utilizar os modelos de calibração, nos quais ajustam os parâmetros variáveis da rede combinando os valores observados com os valores prognosticados pelo modelo. Para isso, é necessário realizar alguns testes de campo e obter dados reais do sistema de distribuição de água. Estes dados reais são tratados como condições de contorno nos modelos de calibração.

A literatura apresenta inúmeras técnicas de calibração, e as comparações destas técnicas quanto a eficiência dos métodos, tornam-se importantes. Por esta razão, este trabalho teve por finalidade investigar, implementar e comparar os métodos clássicos de calibração (analítico, analítico modificado e explícito) em duas redes teóricas.

As comparações dos modelos foram realizadas utilizando diferenças quadráticas em relação as energias nos nós com vários cenários de simulação (setorização). As simulações realizadas, admitiram o sistema dividido em várias setores, representando os grupos de tubulações e conseqüentemente os respectivos parâmetros calibrados.

Em redes hidráulicas de pequeno porte, constatou-se que o método analítico e o método analítico modificado, apresentaram os menores desvios, considerando o somatório das diferenças entre os valores observados e os valores reais para os três setores. Estes dois

métodos produziram resultados com ordens de magnitudes idênticas, pois possuem semelhança em relação as suas formulações.

O método de calibração explícito, possui sua formulação diferenciada dos modelos anteriores e apresentou os maiores desvios, porém sua formulação, permite a flexibilidade no sentido de incorporar outras variáveis de decisão de calibração, operação, projeto e componentes hidráulicos.

Constatou-se ainda, que o processo de calibração ajusta os coeficientes de rugosidade e as demandas nos nós de maneira ótima, pois encontra as soluções através de restrições impostas, no caso, as energias conhecidas nos nós. A técnica pode ser utilizada quando as energias são medidas em um mais nós de demanda, sob várias condições de carga.

Os métodos apresentados, produziram resultados satisfatórios e representaram o comportamento real dos sistemas estudados, uma vez que, os desvios entre os valores reais e os prognosticados encontram-se em um intervalo de validação aceitável.

A exploração de escolha dos pontos ótimos de testes, em um sistema de distribuição de água e a forma adequada de disposição dos setores na rede, merecem estudos e aperfeiçoamentos, pois podem interferir na acurácia dos dados de entrada do modelo.

A investigação e o reexame dos modelos de calibração dos sistemas de distribuição de águas, realizados neste trabalho possibilitarão estudos em redes de maiores dimensões, com maior eficiência e auxiliar os profissionais que atuam na área da engenharia hidráulica.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J., LANSEY, A. K.** – Data Collection for Water Distribution Network Calibration. England, **Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications**, v. 1, Research Studies Press, p. 271-278, 1999.
- BASFORD, C., SEVIER, C.** – Automating the Maintenance of a Hydraulic Network Model Demand Database Utilizing GIS and Customer Billing Records. Norfolk, Va., **Proceedings the Computer Conference of the American Water Works Association**, 1995.
- BOLAND, J. J., BAUMANN, D. D., DZIEGIELEWSKI, B.** – An Assessment of Municipal and Industrial Water Use Forecasting Techniques. Ft. Belvoir, VA, IWR CR-81-C05, United State Army Institute for Water Resources, 1981.
- BOULOS, P. F., WOOD, D.J.** – Explicit Calculation of Pipe – Network Parameters. **Journal of the Hydraulic Division**, v. 116, n. HY11, p. 1329-1344, 1990.
- BHAVE, P.R.** – Calibrating Water Distribution Network Models. **Journal of Environmental Engineering Division**, v. 114, p.120-136, 1988.
- BHAVE, P.R.** – Unknown pipe Characteristics in Hardy-Cross Method of Network Analysis. **Journal Indian Water Works Association**, 18(2),p. 133-135. India, 1986.
- 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, 1999.
- CALIFORNIA SECTION COMMITTEE.** – Loss in Capacity of Water Mains. **Journal of the American Water Works Association**, v. 54, n. 10, p. 1293-1312, 1962.
- CESARIO, A. L.** – Computer Modelling Programs: Tools for Model Operations. **Journal of the American Water Works Association**, p. 508-513, 1980.
- CESARIO, A. L., DAVIS, J.O.** – Calibrating Water System Models. **Journal of the American Water Works Association**, v.76, n. 7, p. 66-69, 1984.

- CLARK, J. W., VIESSMAN W., HAMMER M. J. – Water Supply and Pollution Control.**
New York, IEP – Dunn – Donnelley Publishing, 1977.
- COMMITTEE. – Pipeline Friction Coefficient and Effect of Age Thereon. Journal of the New England Water Works Association,** v. 49, p. 235, 1935.
- CRUICKSHANK, J. R., LONG, S. J. – Calibrating Computer Model of Distribution.**
Nashville, Tenn, **Proceedings the Computer Conference of the American Water Works Association,** 1992.
- DATTA, R. S. N., SRIDHARAN, K. – Parameter Estimation in Water-Distribution Systems By Least Squares. Journal of Water Resources Planning and Management,** v. 120, n. 4, p. 405-422, 1994.
- DONACHIE, R. P. – Digital Program for Water Network Analysis. Journal of the Hydraulic Division,** v. 100, n. HY3, p. 393-403, 1974.
- EGGENER, C. L., POLKOWSKI, L.B. – Network Models and the Impact of Modelling Assumptions. Journal of the American Water Works Association,** v. 68, n. 4, p. 189-196, 1976.
- EPP, R., FOWLER, A. G. – Efficient Code for Steady State Flows in Networks. Journal of the Hydraulic Division,** v. 96, n. HY1, p. 43-56, 1970.
- FAIR, G. M., GEYER, J. C., OKUN, D. A. – Elements of Water Supply and Waste Water Disposal.** New York, John Wiley and Sons, 1971.
- GOFMAN, E., RODEH, M. – Loop Equations With Unknown Pipe Characteristics. Journal of the Hydraulic Division,** v. 107, n. HY9, p. 1047-1060, 1981.
- HARRIS, R. U. – Computer Modelling in Water System Planning and Design. Journal of the American Water Works Association,,** p. 78-81, 1984.
- JEPPSON, R. W. – Equivalent Hydraulic Pipes for Parallel Pipes. Journal of the Hydraulic Division,** v. 108, n. HY1, p. 35-45, 1982.
- LAMONT, P. A. – Common Pipe Formulas Compared With the Theory of Roughness. Journal of the American Water Works Association,** v.72, n. 5, p. 274-280, 1981.

- LANSEY, K., BASNET, C.** – Parameter Estimation for Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 117, n. 1, p. 126, 1991.
- LINAWEAVER, F. P., GEYER, J. C., WOLFF J. B.** – Summary Report on Residential Water Use Research Project. **Journal of the American Water Works Association**, v. 59, n. 3, p. 269, 1967.
- MARTIN, D. W., PETERS, G.** – The Application of Newton's Method to Network Analysis by Digital Computers. **Journal of the Institute of Water Engineering**, v. 17, p. 115-129, 1963.
- McILROY, M. S.** – Direct – Reading Electric Analyzer for Pipeline Networks. **Journal of the American Water Works Association**, p. 347-365, 1950.
- 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, 2000.
- NIELSEN, H. B.** – Methods for Analyzing Pipe Networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 2, p. 139-157, 1989.
- ORMSBEE, L. E., WOOD, D. J.** – Explicit Pipe Network Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 112, n. 2, p. 116-182, 1986.
- ORMSBEE, L. E.** – Implicit Network Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.
- ORMSBEE, L. E., LINGIREDDY, S.** – Calibrating Hydraulic Network Models. **Journal of the American Water Works Association**, v. 89, n. 2, p. 42-50, 1997.
- RAHAL, C. M., STERLING, M. J. H., COULBECK, B.** – Parameter Tuning for Simulation Models of Water Distribution Networks. London, England, **ICE Proceedings**, v. 69, n. 2, p. 751-762, 1980.
- RAO, H. S., MARKEL, L. C., BREE, D. W., Jr.** – Extended Period Simulation of Water Systems – part B. **Journal of the Hydraulic Division**, v. 103, n. HY3, p. 281-294, 1977.

- RESEARCH COMMITTEE** – Water Distribution Research and Applied Development Needs. **Journal of the American Water Works Association**, v. 66, n. 6, p. 385-390, 1974.
- RIGHETTO**, A.M. – Cálculo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água a partir de Condições Transitórias: Adequação e Estudo de Casos. **Tese de Livre Docência - EESC**, 1994.
- SCHAETZEN**, W., **SMITH**, R. M., **SAVIC** D. A., **WALTERS**, G. A. – Optimal Logger Density in Water Distribution Network Calibration. England, **Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications**, v. 1, Research Studies Press, p. 301-307, 1999.
- SCHULTE**, A. M., **MALM**, A. P. – Integrating Hydraulic Modeling and SCADA Systems for System Planning and Control. **Journal of the American Water Works Association**, v.85, n. 7, p. 62, 1993.
- SHAMIR** , U. – Optimal Design and Operation of Water Distribution Systems. **Water Resources**, v. 10, n. 1, p. 27-36, 1974.
- SHAMIR** , U., **HOWARD**, C. D. D. – Engineering Analysis of Water Distribution Systems. **Journal of the American Water Works Association**, v. 69, n. 9, p. 510-514, 1977.
- SHAMIR** , U., **HOWARD**, C. D. D. – Water Distribution System Analysis. **Journal of the Hydraulic Division**, v. 94, n. HY1, p. 219-234, 1968.
- SOUZA**, R. S. – Aspectos Computacionais da Análise de Redes de Distribuição de Água com Componentes Hidráulicos em Regime Permanente. **Dissertação de Mestrado**, 1994.
- SURYAPRAKASAM**, M. V., **REID**, G. W., **GEYER**, J. C. – Use of Alternating Current Network Calculator in Distribution Systems Design. **Journal of the American Water Works Association**, p. 1154-1164, 1950.
- TANG**, K., **KARNEY**, B., **PENDLEBURY**, M., **ZHANG**, F. – Inverse Transient Calibration of Water Distribution Susters Using Genetic Algorithms. England, **Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications**, v. 1, Research Studies Press, p. 317-326, 1999.

- TODINI, E.** – Using a Kalman Filter Approach for Looped Water Distribution Networks Calibration. England, **Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications**, v. 1, Research Studies Press, p. 327-336, 1999.
- VÍTKOVSKÝ, J. P., SIMPSON, A. R., LAMBERT, M. F.** – Leak Detection and Calibration Using Transients and Genetic Algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 4, p. 262-265, 2000.
- WALSKI, T. M.** – Analysis of Water Distribution Systems. **Krieger Publishing Company Malabar**, Florida, 1992.
- WALSKI, T. M.** – Sherlock Holmes Meets Hardy-Cross, or Model Calibration in Austin, Texas. **Journal of the American Water Works Association**, v. 82, n. 3, p. 34, 1990.
- WALSKI, T. M.** – Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 112, n. 2, p. 238-249, 1986.
- WALSKI, T. M.** – Technique for Calibrating Network Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.
- WILLIAMS, G. S., HAZEN, A.** – **Hydraulic Tables**. New York, John Wiley and Sons, 1933.
- WOOD, D. J., CHARLES, C. O. A.** – Hydraulic Network Analysis using Linear Theory. **Journal of the Hydraulic Division**, v. 98, n. HY7, p.1157-1170, 1972.
- WOOD, D. J., RAYES, A. G.** – Reliability of Algorithms for Pipe Network Analysis. **Journal of the Hydraulic Division**, v. 107, n. HY10, p.1145-1161, 1981.

ANEXO A1 – SISTEMAS DE EQUAÇÕES LINEARES

A1 – SISTEMAS DE EQUAÇÕES LINEARES

Um sistema de m equações lineares e n incógnitas consiste em um conjunto de relações algébricas da forma:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{a1.1})$$

onde x_j são as incógnitas, a_{ij} são os coeficientes do sistema e b_i são as componentes do lado direito. O sistema (a.1) pode ser mais convenientemente escrito da forma matricial:

$$Ax = b \quad (\text{a1.2})$$

onde A é a matriz dos coeficientes, e b é do lado direito e x é o vetor incógnita. Chama-se de solução o conjunto de valores x_i que satisfaz a equação (a1.1).

A1.1 – Método de Eliminação Gaussiana

O método de eliminação gaussiana reduz o sistema (a1.2) em um sistema equivalente da forma $Ux = \hat{b}$, onde U é uma matriz triangular superior e \hat{b} é uma atualização do vetor original b . Considerando o sistema original $A^{(1)}x = b^{(1)}$ temos que durante o procedimento de redução basicamente emprega a propriedade de que a substituição das equações pela diferença entre esta equação e outra multiplicada por um vetor não nulo constante produz um sistema equivalente.

Assim, considerando uma matriz não singular $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, e supondo que a diagonal de entradas a_{11} é não nula, introduz-se os multiplicadores:

$$m_{i1} = \frac{a_{i1}^{(1)}}{a_{11}^{(1)}}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (\text{a1.3})$$

onde $a_{ij}^{(1)}$ denota os elementos de $A^{(1)}$. O método de eliminação é realizado da seguinte forma:

$$a_{ij}^{(2)} = a_{ij}^{(1)} - m_{i1}a_{1j}^{(1)}, \quad i, j = 2, \dots, n. \quad (\text{a1.4})$$

$$b_i^{(2)} = b_i^{(1)} - m_{ij}b_j^{(1)}, \quad i, j=2, \dots, n. \quad (\text{a1.5})$$

o novo sistema fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n}^{(1)} \\ 0 & a_{22}^{(2)} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2n}^{(2)} \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ 0 & a_{n2}^{(2)} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{nn}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{(1)} \\ b_2^{(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (\text{a1.6})$$

onde denota-se $A^{(2)}x = b^{(2)}$, é equivalente ao sistema (a.2). Similarmente pode-se transformar o sistema de maneira semelhante, onde desta vez são eliminados as incógnitas x_2 das linhas 3, ..., n. Em geral, tem-se uma seqüência finita de sistemas:

$$A^{(k)}x = b^{(k)}, \quad 1 \leq k \leq n \quad (\text{a1.7})$$

onde, para $k \geq 2$, a matriz $A^{(k)}$ tem a seguinte forma:

$$A^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & \cdot & a_{1n}^{(1)} \\ 0 & a_{22}^{(2)} & & & & & & & & & a_{2n}^{(2)} \\ \cdot & & \cdot & & & & & & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & & & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & & & & & & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & a_{kk}^{(k)} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{kn}^{(k)} \\ \cdot & & & & \cdot & \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & \cdot & & & & & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & a_{nk}^{(k)} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{nn}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{a1.8})$$

tendo assumido que $a_{ii}^{(i)} \neq 0$ (Pivotamento) para $i = 1, \dots, k-1$. É claro que para $k = n$, pode se obter o sistema triangular superior $A^{(n)}x = b^{(n)}$.

$$\begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n}^{(1)} \\ 0 & a_{22}^{(2)} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2n}^{(2)} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot \\ 0 & \cdot & a_{nn}^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{(1)} \\ b_2^{(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n^{(n)} \end{bmatrix} \quad (\text{a1.9})$$

Consistentemente com as notações que tem sido previamente introduzida, percebe-se $A^{(n)}$ é uma matriz triangular superior. As entradas $a_{kk}^{(k)}$ são chamadas pivôs e obviamente são não-nulos para $k = 1, \dots, n-1$.

A fórmula que transforma o sistema k – éximo em $k+1$ – éximo, para $k = 1, \dots, n-1$ assumindo que $a_{kk}^{(k)} \neq 0$ e definindo o multiplicador:

$$m_{ik} = \frac{a_{ik}^{(k)}}{a_{kk}^{(k)}}, \quad i = k+1, \dots, n \quad (\text{a1.10})$$

e portanto:

$$a_{ij}^{(k+1)} = a_{ij}^{(k)} - m_{ik} a_{kj}^{(k)}, \quad i, j = k+1, \dots, n \quad (\text{a1.11})$$

$$b_i^{(k+1)} = b_i^{(k)} - m_{ik} b_k^{(k)}, \quad i = k+1, \dots, n \quad (\text{a1.12})$$

ANEXO A2 – MODELO DE ANÁLISE DE REDES HIDRÁULICAS

A2 – MODELO DE ANÁLISE DE REDES HIDRÁULICAS

As formulações propostas por NIELSEN (1989) podem ser utilizadas tanto para o método da teoria linear (LTM), como para o método de Newton – Raphson (NR) simplesmente fixando o valor de γ (1 e \square respectivamente). No entanto, um inconveniente de ambas formulações como apresentado por NIELSEN (1989) é observado.

Nota-se claramente que a matriz jacobiana precisa ser invertida, ou seja, há a necessidade de avaliar sua inversa que em geral, requer n^3 operações. Este procedimento não é conveniente, pois requer um grande número de operações, gera resultados com maiores erros de arredondamento, despendendo custo excessivo de processamento e memória computacional.

As formulações apresentadas por NIELSEN (1989) foram reformuladas de tal forma a eliminar este inconveniente. SOUZA em (1994) apresentou uma formulação que foi utilizada neste trabalho, onde o cálculo da inversa foi evitado, gerando um sistema de equações lineares que requer em geral n^2 operações, aumentando a eficiência do modelo computacional.

A2.1 – Formulação em Termos das Energias

A formulação original proposta por NIELSEN (1989) é:

$$h_{k+1} = h_k - \gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + A^t D_k^{-1} (Ah_k + A_r h_r)] \quad (\text{a2.1})$$

passando o vetor energia atual h_k para o lado esquerdo da formulação obtem-se:

$$h_{k+1} - h_k = -\gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + A^t D_k^{-1} (Ah_k + A_r h_r)] = h_{k,k+1} \quad (\text{a2.2})$$

Rearranjando a matriz Jacobiana obtemos um sistema de equações lineares:

$$[A^t D_k^{-1} A]h_{k,k+1} = -\gamma[Q + A^t D_k^{-1} (Ah_k + A_r h_r)] \quad (\text{a2.3})$$

O procedimento para a avaliação do vetor de energias h_{k+1} no processo iterativo é resumido abaixo:

- 1) Calcular a estimativa inicial do vetor de energias h_0 de tal forma a satisfazer as equações de energia $[A^t D_0^{-1} A] h_0 = -[Q + A^t D_0^{-1} (A_r h_r)]$ com $D_k^{-1} = \text{diag}[K_1^{-\frac{1}{\alpha}}, \dots, K_m^{-\frac{1}{\alpha}}]$.
- 2) Calcular a matriz dos coeficientes e o vetor independente do sistema de equações lineares. Note que A^t , A , Q , A_r , h_r são dados do problema que D_k^{-1} em função de h_k .
- 3) Resolver o sistema de equações lineares simétrico, cuja solução é o vetor $h_{k,k+1}$.
- 4) Calcular o vetor de energias $h_{k+1} = h_{k,k+1} + h_k$.
- 5) Repetir os passos (2) e (4) do procedimento até a convergência do processo iterativo.

A2.2 – Formulação em Termos das Vazões

A formulação proposta por NIELSEN (1989) é:

$$q_{k+1} = q_k - \gamma^{-1} C [C^t D_k C]^{-1} C^t (D_k q_k + A_r h_r) \quad (\text{a2.4})$$

chamando $q_{k+1} = q_k - Cu$, o vetor u é dado por:

$$u = \gamma^{-1} [C^t D_k C]^{-1} C^t (D_k q_k + A_r h_r) \quad (\text{a2.5})$$

onde C é igual a matriz de ordem m por $(m-n)$ tal que $A^t C = 0$; u é o vetor de ordem $m-n$.

Rearranjando a matriz Jacobiana obtém-se um sistema de equações lineares com incógnitas u :

$$[C^t D_k C] u = \gamma^{-1} C^t (D_k q_k + A_r h_r) \quad (\text{a2.6})$$

O procedimento para a avaliação do vetor de vazões q_{k+1} no processo iterativo é resumido a seguir:

- 1) Calcular a estimativa inicial do vetor de vazões q_k de tal forma que satisfaça as equações de continuidade em cada nó.

- 2) Calcular a matriz dos coeficientes e o vetor independente do sistema de equações lineares (a2.6). Note que C^t , C , A_r , h_r são dados do problema ou matrizes e vetores conhecidos, e que D_k é função de q_k .
- 3) Resolver o sistema simétrico de equações lineares, cuja solução será o vetor u de ordem $m-n$.
- 4) Calcular o vetor de vazões $q_{k+1} = q_k - Cu$
- 5) Repetir os passos (2) e (4) do procedimento até a convergência do processo iterativo.

ANEXO A3 – PROGRAMAS E SUB-ROTINAS


```

FOR w:=1 TO nn DO
  BEGIN
    NQP:=NQP+sqr(QPP[w]);
    NQA:=NQA+sqr(QAA[w]);
  END;
NORMANQP:=sqr(NQP);
NORMANQA:=sqr(NQA);
NORMAAQ:=abs((NORMANQA-NORMANQP)/(NORMANQA));

FOR w:=1 TO nn DO
  QK[w]:=QAA[w]/1000;
end;{fim while}

CALIBRA 3.1 – MÉTODO EXPLÍCITO

{Cálculo das Estimativas Iniciais}
reddev1(gama,nt,nn,r,A,Ar,DN,CH,LT,HR,QK,H1,q1);

{Preparação do vetor HT que será subtraído do vetor HRE}
{Estimativas Iniciais}
{algumas operações de preparação}

for i:= 1 to nt do
  CHP[i,IZ[i]]:=CH[i];
for i:= 1 to nt do
  QT[i]:=abs(QT[i]);
for i:= 1 to nn do
  NQK[i]:=(-1)*QK[i];

trans(nt,nn,A,AT);
trans(nt,nn,CF,CFT);
trans(nt,nn,CCA,CCAT);
for i:= 1 to nl do
  for j:= 1 to nt do
    CE[i,j]:=CFT[i,j];
pp:=nl+1;
for i:= 1 to nea do
  begin
    for jj:= 1 to nt do
      begin
        CE[pp,jj]:=(-1)*CCAT[i,jj];
      end;
    pp:=pp+1;
  end;
for i:= 1 to nn do
  for j:= 1 to nt do
    AG[i,j]:=AT[i,j];
for i:= 1 to nn do
  for j:= (nt+1) to (nt+nea) do
    AG[i,j]:=0;
for i:= 1 to (nt+nea) do
  for j:= 1 to nt do
    NCE[i,j]:=(-1)*CE[i,j];
for i:= 1 to nea do
  for j:= 1 to nt do
    NCAT[i,j]:=(-1)*CCAT[i,j];
for i:= 1 to nc do
  NHT[i]:=(-1)*HT[i];

WHILE (NORMAQ>PREC) or (NORMACH>PREC) DO
  begin
    iter:=iter+1;
    if iter>1 then
      prec:=0.5;
    {if iter>2 then
      gamat:=1.85;}

diagboulos(nt,LT,DN,QT,IZ,CHP,DQ);
dgdetrato(nt,LT,DN,QT,IZ,CHP,DW);
dgdervacao(nt,LT,DN,QT,IZ,CHP,DZ);
{preparação para montagem da Matriz AG
= jacobiano (exp(-1*lnk))}
vn:=nl+nea;
multi(vn,nt,nt,nt,CE,DZ,Z);
multi(vn,nt,nt,nt,NCE,DW,CDW);
multi(nt,nt,nt,nea,CDW,MCR,W);
pp:=nn+1;
for i:= 1 to (nl+nea) do
  begin
    for j:= 1 to nt do
      begin
        AG[pp,j]:=Z[i,j];
      end;
    pp:=pp+1;
  end;
pp:=nt+1;
ww:=nn+1;
flag1:=0;
for i:= 1 to (nl+nea) do
  begin
    if flag1=1
    then
      begin
        pp:=nt+1;
      end;
    for j:= 1 to nea do
      begin
        AG[ww,pp]:=W[i,j];
        pp:=pp+1;
      end;
    flag1:=1;
  end;
  ww:=ww+1;
  end;
  {Fim da Montagem da matriz AG}
  {Início da Montagem da matriz BG}
  multi1(nn,nt,nt,1,AT,QT,PRCO);
  soma(nn,1,nn,1,PRCO,NQK,RCO);
  multi1(nt,r,r,1,AR,HR,P1RC);
  soma(nt,1,nt,1,DQ,P1RC,P2RC);
  multi1(nl,nt,nt,1,CFT,P2RC,RC);
  multi1(nea,nt,nt,1,NCAT,DQ,P3RCA);
  soma(nea,1,nea,1,HRE,NHT,P4RCA);
  soma(nea,1,nc,1,P3RCA,P4RCA,RCA);
  j:=nd+1;

  for ii:= 1 to nn do
    BG[ii,j]:=(-1)*(gamat)*RCO[ii];
    pp:=nn+1;
  for i:= 1 to nl do
    begin
      BG[pp,j]:=(-1)*(gamat)*RC[i];
      pp:=pp+1;
    end;
    pp:=nn+nl+1;
  for i:= 1 to nea do
    begin
      BG[pp,j]:=(-1)*(gamat)*RCA[i];
      pp:=pp+1;
    end;
    {fim da montagem da Matriz BG}
    {saída dos dados}

gaussbid(nd,AG,BG,X);
for i:= 1 to nt do
  begin
    QTT[i]:=X[i]+QT[i];
  end;
for i:= 1 to nt do
  QTP[i]:=QTT[i];
j:=nt+1;
for i:= 1 to nea do
  begin
    XX[i]:=X[j];
    j:=j+1;
  end;

for i:= 1 to nt do
  begin
    CHPP[i,IZ[i]]:=abs(XX[IZ[i]]+CHP[i,IZ[i]]);
  end;

{cálculo das normas}

NQT:=0;
NQT1:=0;
for i:= 1 to nt do
  begin
    NQT:=NQT+sqr(QT[i]);
    NQT1:=NQT1+sqr(QTP[i]);
  end;
NCHP:=0;
NCHP1:=0;
for i:= 1 to nt do
  begin
    NCHP:=NCHP+sqr(CHP[i,IZ[i]]);
    NCHP1:=NCHP1+sqr(CHPP[i,IZ[i]]);
  end;
NORMAQ:=sqr(NQT);
NORMAQ1:=sqr(NQT1);
NORMACHP:=sqr(NCHP);
NORMACHP1:=sqr(NCHP1);
NORMAQ:=abs((NORMAQ1)-(NORMAQ)/(NORMAQ1));
NORMACH:=abs((NORMACHP1)-(NORMACH)/(NORMACHP1));
{preparação do CHP - processo iterativo}
for i:= 1 to nt do
  CHP[i,IZ[i]]:=abs(CHPP[i,IZ[i]]);
for i:= 1 to nt do
  QT[i]:=abs(QTP[i]);
end;{fim while}

```

SUBROTINAS

REDE V1 – Modelo de Análise de Redes NIELSEN (1989)

```

redeV1(gama:real;nt,nn,r:integer;NO1,NO2:veti;Dn,Ch,Lt,Hr,Q:Vet;var H1,qt:vet);
var precl,norma:real;
begin
  precl:=0.01;
  norma:=10;
  t:=nt;
  n:=nn;
  Matco(t,n,r,NO1,NO2,AR,A);
  Diag(t,LT,CH,DN,D1);
  Trans(t,n,A,AT);
  Multi(n,t,t,AT,D1,CM);
  Multi(n,t,t,n,CM,A,CA);
  Multi(t,r,r,1,AR,HR,AH);
  Multi1(n,t,t,1,CM,AH,CAH);
  Soma (n,1,n,1,Q,CAH,QA);

  for w:= 1 to n do
    begin
      QA[w]:=(-1)*QA[w];
    end;
  for i:= 1 to n do
    for j:= 1 to n do
      CA1[i,j]:=CA[i,j];

  for i:= 1 to n do
    begin
      CA1[i,n+1]:= QA[i];
    end;
  Gauss(n,CA1,H);
  for w:= 1 to n do
    begin
      HK[w]:=H[w]
    end;
  while norma>precl do
    begin
      Multi1 (t,n,n,1,A,HK,AHK);
      Soma (t,1,t,1,AHK,AH,S1);
      Diag1(t,LT,CH,DN,S1,D1);
      Multi(n,t,t,AT,D1,CM);
      Multi(n,t,t,n,CM,A,CA);
      Multi1(n,t,t,1,CM,S1,M2);
      Soma (n,1,n,1,Q,M2,S2);
      {if norma<0.1
      then
        GAMA:=1.85;}
      for w:=1 to n do
        begin
          S2[w]:=(-1)*(GAMA)*S2[w];
        end;

      for i:= 1 to n do
        begin
          CA1[i,n+1]:= S2[i];
        end;
      Gauss(n,CA1,HKK);
      for w:= 1 to n do
        begin
          H1[w]:=HKK[w]+HK[w];
        end;
      NH:=0;
      NH1:=0;
      for w:=1 to n do
        begin
          NH:=NH+sqr(HK[w]);
          NH1:=NH1+sqr(H1[w]);
        end;
      normal:=sqr(NH);
      norma2:=sqr(NH1);
      norma:=abs(norma2-normal);
      for w:= 1 to n do
        begin
          HK[w]:=H1[w]
        end;
      end;
      vazao (t,d1,s1,qt);
    end;
end;

```

GAUSS – Método de Resolução de Sistemas Lineares

```

Gauss(n:integer;A:Mat;var X:Vet);
var flag:integer;
M:mat;
SM:vet;
B:vet;
begin
  for k:= 1 to n do
    begin
      flag:=0;
      if k<n then
        begin
          flag:=2;
          if A[k,k]=0 then
            begin
              flag:=0;
              for l= k to n-1 do
                begin
                  if flag=0 then
                    begin
                      if A[l+1,k]>>0 then
                        begin
                          flag:=1;

```

```

for j:=1 to n+1 do
  begin
    A[k,j]:=A[k,j]+A[l+1,j];
  end;
end;
end;
end;
end;
end;
if (k>=n) or (flag=0)
then
  begin
    if A[k,k]=0 then
      begin
        flag:=0;
        for i:= 1 to n do
          if flag=0 then
            begin
              if A[i,k]<>0 then
                begin
                  flag:=1;
                  for j:= 1 to n+1 do
                    begin
                      A[k,j]:=A[k,j]+A[i,j];
                    end;
                end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    if k<(n-1) then
      begin
        l:= k+1;
        for i= k+1 to n do
          begin
            M[i,l-1]:=A[i,l-1]/A[l-1,l-1];
            for j:=1 to n+1 do
              begin
                A[i,j]:=A[i,j]-M[i,l-1]*A[l-1,j];
              end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  for i:=1 to n do
    begin
      for j:=1 to n+1 do
        begin
          if j>n
          then
            begin
              B[i]:=A[i,j]
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  n:=n;
  X[n]:=B[n]/A[n,n];
  for i:=n-1 downto 1 do
    begin
      j:=i+1;
      Sm[j-1]:=0;
      for j:=i+1 to n do
        begin
          Sm[j]:=a[i,j]*x[j]+Sm[j-1];
          X[i]:=B[i]/A[i,i]-Sm[j]/A[i,i]
        end;
      end;
    end;
end;
end;

```

OPERAÇÕES ELEMENTARES**Multiplicação de Matrizes, Matrizes Coeficientes, Transposta e Soma**

```

procedure Multi(L1,C1,L2,C2:integer;A,B:Mat;var C:Mat);
begin
  if C1=L2
  then
    begin
      for k:=1 to L1 do
        begin
          for j:=1 to C2 do
            begin
              C[k,j]:=0;
              for i:=1 to L2 do
                begin
                  C[k,j]:=C[k,j]+A[k,i]*B[i,j];
                end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  else
    begin
      form1.memo1.lines.add('cálculo impossível!');
    end;
  end;
end;

procedure Multi1(L1,C1,L2,C2:integer;A:Mat;B:vet; var C:vet);

begin
  if C1=L2
  then
    begin
      for k:=1 to L1 do
        begin
          for j:=1 to C2 do
            begin
              C[k]:=0;
              for i:=1 to L2 do
                begin
                  C[k]:=C[k]+A[k,i]*B[i];
                  if C[k]=0
                  then
                    begin
                      C[k]:=0.000001;
                    end;
                end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  else
    begin
      form1.memo1.lines.add('cálculo impossível!');
    end;
  end;
end;

procedure Matco(t,n,r:integer;NO1,NO2:Veti;var BC:Mat;var AC:Mat);
var C:Mat;

begin
  for i:=1 to t do
    begin
      for j:= 1 to (n+r) do
        begin
          C[i,j]:=0
        end;
      end;
    end;
  for i:= 1 to t do
    begin
      C[i,NO1[i]]:=1;
      C[i,NO2[i]]:=1;
    end;

  for i:= 1 to t do
    begin
      for j:= 1 to n do
        begin
          AC[i,j]:=C[i,j]
        end;
      end;

  for i:= 1 to t do
    begin
      k:=1;
      for j:= (n+1) to (n+r) do
        begin
          BC[i,k]:=C[i,j];
          k:=k+1
        end;
      end;
    end;
end;

procedure Trans(t,n:integer;AC:Mat;var B:Mat);

begin
  for i:=1 to t do
    begin
      for j:=1 to n do

```

```

      begin
        B[j,i]:=AC[i,j];
      end;
    end;
  end;
end;

procedure Soma (L1,C1,L2,C2:integer;A,B:Vet;Var C:Vet);

begin
  if (L1=L2) and (C1=C2)
  then
    begin
      for k:= 1 to L1 do
        begin
          for j:= 1 to C1 do
            begin
              C[k]:=A[k]+B[k];
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

MATRIZES DIAGONAIS – Cálculo de Perda de Carga

```

procedure Diag(t:integer;LT,CH,DN:Vet;var D:Mat);
var P:vet;

begin
  for i:=1 to t do
    begin
      for j:=1 to t do
        if i=j
        then
          begin
            P[i]:=10.643*LT[i]/(exp(1.85*Ln(CH[i]))*exp(4.87*Ln(DN[i])));
            D[i,i]:=exp((-1)*(1/1.85)*Ln(P[i]));
            if D[i,i]<1e-6
            then
              D[i,i]:=1e-6
            end
          end;
        else
          begin
            D[i,j]:=1e-6
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;

procedure Diag1(t:integer;LT,CH,DN,SS1:Vet;var D:Mat);
var P:vet;

begin
  for i:=1 to t do
    begin
      ss1[i]:=-ss1[i];
    end;
  for i:=1 to t do
    begin
      for j:=1 to t do
        if i=j
        then
          begin
            P[i]:=10.643*LT[i]/(exp(1.85*Ln(CH[i]))*exp(4.87*Ln(DN[i])));
            D[i,i]:=exp((-1)*(1/1.85)*Ln(P[i]))*
              exp((1/1.85-1)*ln(abs(ss1[i])));
            if D[i,i]<1e-6
            then
              D[i,i]:=1e-6
            end
          end;
        else
          begin
            D[i,j]:=1e-6
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

MATRIZES DIAGONAIS – Cálculo de Derivadas

```

procedure Diagboulos(t:integer;LT,DN,SS1:Vet;IZ:Veti;CHP:Mat;var D:Vet);
var
  i,j:integer;
  P:vet;
begin
  for i:=1 to t do
    for j:=1 to t do
      begin
        P[i]:=10.643*LT[i]/(exp(1.85*Ln(CHP[i,IZ[i]]))*exp(4.87*Ln(DN[i])));
        D[i]:=P[i]*exp(1.85*ln(ss1[i]));
      end;
    end;
  end;

procedure Dgdervazao(t:integer;LT,DN,VA:Vet;IZ:Veti;CHP:Mat;var DDZ:Mat);
var
  i,j:integer;
begin
  for i:=1 to t do
    for j:=1 to t do
      if i=j
      then
        begin

```

```

        DDZ[i,j]:=(1.85*10.643*LT[i])*(exp(0.85*ln(VA[i])))/
        (exp(1.85*Ln(CHP[i,IZ[i]]))*exp(4.87*Ln(DN[i])));
    end
else
    begin
        DDZ[i,j]:=0;
    end;
end;

end;
procedure Dgderatrito(t:integer;LT,DN,VAZ:Vet;IZ:Vet;CHP:Mat;var DDW:Mat);
var
    i,j:integer;
begin
    for i:=1 to t do
        for j:=1 to t do
            if i=j
            then
                begin
                    DDW[i,j]:=(1.85*10.643*LT[i])*(exp(1.85*ln(abs(VAZ[i]))))*
                    (exp(-2.85*Ln(CHP[i,IZ[i]]))*exp(4.87*Ln(DN[i])));
                end
            else
                begin
                    DDW[i,j]:=0;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```

