EDUARDO HENRIQUE CORDEIRO GONÇALVES



CURITIBA 2002

ANÁLISE DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS USADOS NO DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE REDES DE CONDUTOS SOB PRESSÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Marcos J. Tozzi Co-orientador: Eloy Kaviski

> CURITIBA 2002

ANÁLISE DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS USADOS NO DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE REDES. DE CONDUTOS SOB PRESSÃO

por

EDUARDO HENRIQUE CORDEIRO GONÇALVES

Dissertação aprovada como cumprimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

ORIENTADOR:

Marcos José Tozzi Universidade Federal do Paraná- UFPR

MEMBROS

Marco Aurélio Holanda de Castro Universidade Federal do Ceará-UFCE

José Junii Ota

Universidade Federal do Paraná- UFPR

Curitiba, 12 de julho de 2002

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1.Introdução	1
2.Métodos Computacionais	3
3.Considerações Teóricas	10
3.1. Escoamento Permanente	10
3.2. Modelo Quase-Estático	15
3.3. Escoamento Não-Permanente	23
3.4.Condições de Contorno	29
3.5. Equações para o termo de resistência	45
4.Análise de Exemplos Numéricos	53
4.1. Análise de redes malhadas	53
4.2. Análise de uma rede com válvulas redutoras de pressão	60
4.3.Golpe de aríete em sistemas de bombeamento	63
4.4.Análise de uma rede complexa	69
5.Conclusões e Recomendações	90
5.1.Conclusões	
5.2.Recomendações para estudos futuros	91
Referências Bibliográficas	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ilustração de uma rede de distribuição de água	.11
Figura 3.2 – Sistema de dois reservatórios interligados por um conduto	15
Figura 3.3 – Esquema de um modelo quase estático	.18
Figura 3.4 – Esquema de um escoamento em um conduto	.24
Figura 3.5 – Esquema do Método das Características	.28
Figura 3.6 – Válvula de Globo	.32
Figura 3.7 – Válvula de gaveta (gaveta circular)	.32
Figura 3.8 – Válvula de gaveta (gaveta retangular)	.33
Figura 3.9 – Válvula de Agulha	.34
Figura 3.10 – Válvula de Borboleta	.34
Figura 3.11 – Válvula de Esfera	.35
Figura 3,12 – Coeficiente K – Válvulas de gaveta	.49
Figura 3.13 – Coeficiente C – Válvula Borboleta	.50
Figura 3.14 – Coeficiente C – Válvula Borboleta	.51
Figura 3.15 – Coeficiente K – Válvulas de Globo totalmente abertas	.52
Figura 3.16 – Coeficiente C – Válvula de esfera	.52
Figura 4.1 – Rede Malhada	53
Figura 4.2 – Vazões obtidas pelo método de Hardy-Cross	56
Figura 4.3 – Vazões obtidas pelo EPANET	.56
Figura 4.4 – Vazões obtidas pelo WATERCAD	.57
Figura 4.5 – Vazões obtidas pelo WANDA	.57
Figura 4.6 – Rede de condutos com válvulas redutoras de pressão	60
Figura 4.7- Sistema de Bombeamento – ABREU & GUARGA [1994]	.63
Figura 4.8 – Esquema do direcionamento de vazões	64
Figura 4.9 – Operação da válvula	.66
Figura 4.10 – Resultados obtidos pelo WANDA para a bomba	.67
Figura 4.11 – Rede Complexa – KARNEY & MCINNIS	69

Figura 4.12 – Desenho esquemático da rede usado no EPANET	72
Figura 4.13 – Vazão no Sistema	74
Figura 4.14 – Demanda para o reservatório 1	.75
Figura 4.15 – Demanda para o reservatório 2	.75
Figura 4.16 – Vazão no Conduto 1	.76
Figura 4.17 – Vazão no Conduto 2	.76
Figura 4.18 – Vazão no Conduto 3	77
Figura 4.19 – Vazão no Conduto 4	.77
Figura 4.20 – Vazão no Conduto 5	.78
Figura 4.21 – Vazão no Conduto 6	.78
Figura 4.22 – Vazão no Conduto 7	.79
Figura 4.23 – Pressão no nó 2	79
Figura 4.24 – Pressão no nó 3	80
Figura 4.25 – Pressão no nó 5	80
Figura 4.26 – Resultados obtidos por KARNEY & McINNIS [1992]	81
Figura 4.27a – Resultados obtidos pelo programa WANDA – Válvula no	Nó
7	82
Figura 4.27b – Resultados obtidos pelo programa WANDA – Válvula de	
Redução de Pressão	.83
Figura 4.27c – Resultados obtidos pelo programa WANDA – Chaminé de	e
Equilíbrio	84
Figura 4.27d – Resultados obtidos pelo programa WANDA – Vazão na	
Chaminé de Equilíbrio	85
Figura 4.28 – Esquema para resolução de problemas em condutos	86
Figura 4.29 – Esquema Hp x Qp	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1- Custo dos Programas	2
Quadro 3.1- Classificação das Bombas	40
Quadro 3.2 - Valores dos parâmetros $r \in n$	47
Quadro 3.3 - Valores Típicos de Rugosidade	47
Quadro 3.4 - Coeficientes de Perda de Carga Localizada	48
Quadro 4.1 - Dados dos Nós	53
Quadro 4.2 - Dados dos Condutos	54
Quadro 4.3 – Resultados obtidos nos Nós	55
Quadro 4.4 – Resultados obtidos nos Condutos	55
Quadro 4.5 – Comparação entre as vazões	58
Quadro 4.6 – Comparação entre as velocidades	58
Quadro 4.7 – Comparação entre as perdas de carga	59
Quadro 4.8 – Dados das Ligações	61
Quadro 4.9 – Dados dos Nós	61
Quadro 4.10 – Cotas da Linha Piezométrica	62
Quadro 4.11 - Vazão nos Condutos	64
Quadro 4.12 - Pressão nos Nós	65
Quadro 4.13 – Carga nos Nós	70
Quadro 4.14 – Dados físicos	71
Quadro 4.15 – Especificações dos elementos externos.	71

LISTA DE SÍMBOLOS

- γ peso específico do líquido;
- η rendimento da bomba;
- *a* velocidade de propagação da onda no fluido;
- A_f área da seção transversal do conduto;
- D diâmetro do conduto;
- *E* módulo de Young (elasticidade do tubo);
- *e* espessura da parede do conduto;
- E_p energia transmitida ao sistema por uma bomba;
- *f* fator de resistência de Darcy-Weisbach;
- g aceleração da gravidade;
- *h* perda de carga;
- H carga;
- *h*_{fs} perda de carga no trecho de sucção
- H_m altura manométrica da bomba;
- *h*_s máxima carga de sucção da bomba;
- *L* comprimento do conduto;
- m, k_m coeficiente de resistência referente a perda de carga localizada;
- *N* velocidade de rotação da bomba em rotações por minuto;
- *n* expoente de vazão;
- NSPH nível de sucção da bomba;
- P potência da bomba;
- *p*_a pressão atmosférica;
- P_m potência mecânica da bomba;
- p_v pressão de vapor;
- *N*_{ss} velocidade de sucção específica
- *H*_o _ carga com a válvula aberta;
- *V*₀ velocidade com a válvula aberta;
- C_d _ coeficiente de descarga da válvula;

- ∠H -variação da carga
- ΔV -variação da velocidade;
- *L* -comprimento do conduto;
- h_0 _perda de carga inicial;
- *Ns* _ rotação específica da bomba;
- ΔQ -vazão de correção;

Q - vazão;

- Q_0 vazão arbitrada ou estimada;
- R, k_p coeficiente de resistência referente a perda de carga contínua;
- *t* tempo;
- T torque;
- V, U velocidade no conduto;
- *v*_s _ velocidade de sucção da bomba;
- x distância ao longo do conduto;
- θ grau de fechamento da válvula;
- ρ, ρ_f densidade do fluido;
- σ_c índice de cavitação crítico de Thoma;
- σ índice de cavitação de Thoma;
- τ grau de abertura da válvula;
- *ω* velocidade de rotação da bomba;

RESUMO

A análise do comportamento hidráulico de uma rede de distribuição é muito importante, pois indica quais são os problemas causados por uma eventual falha de operação ou proveniente da operação normal que causam um problema de transiente na rede, permitindo a redução ou a eliminação desses problemas. Existem muitos métodos para fazer esta análise, por exemplo, o método de Hardy-Cross, o método quase-estático e os métodos baseados na solução das equações de Saint-Venant escritas para o caso particular dos condutos. A complexidade dos modelos numéricos baseados nesses métodos variam da simples solução da equação da continuidade associado as condições de pressão nos nós até modelos mais complexos envolvendo solução por método de diferenças finitas. Normalmente os modelos mais simples são mais adequados para análises em períodos longos, enquanto modelos mais complexos são mais adequados a análises um pequeno espaço de tempo, como o caso de uma operação de uma válvula. Esta dissertação envolve três programas computacionais diferentes, denominados EPANET, WATERCAD e WANDA. São apresentados os conceitos básicos considerados nestes programas de computador e quatro exemplos envolvendo escoamentos permanente, guase-estático e não-permanente são resolvidos utilizando esses programas computacionais.

ABSTRACT

The analysis of the hydraulic behavior of distribution pipe networks is very important, since indicates what are the related problems caused by an eventual operation failure or by a normal operation that causes a transient problem in the network, allowing the reduction or even the elimination of these problems. There are many methods that deals with this analysis, such as, the Hardy-Cross method, the guasi-static method and the methods based on the solution of the Saint-Vennant equations applied to conducts. The complexity of the numerical models based on these methods varies from a simple solution of the continuity equation associated to some pressure conditions at the nodes to more sophisticated models involving finite differences solution. Normally, simple models allow for long period analysis and complex models for short period of time, as in the case of a valve operation. This dissertation deals with three different available computer programs, named as EPANET, WATERCAD and WANDA. The basic concepts considered in these softwares are presented and four examples involving steady, quasi-static and unsteady flows are solved. The comparison of the obtained results with those presented by the literature indicates the applicability and the restrictions of the considered models.

1.INTRODUÇÃO

A distribuição de água para os consumidores é geralmente a etapa final no processo de fornecimento. No presente trabalho será considerada a distribuição da água tratada. O sistema de distribuição de água é composto por uma a rede com seus elementos físicos (condutos, bombas, reservatórios e outros). O movimento da água nos condutos é governado pelos princípios do escoamento viscoso em condutos fechados. A pressão é mantida e regulada por válvulas e bombas, de modo que as demandas em cada zona de pressão sejam atendidas.

A previsão do comportamento de uma determinada rede de distribuição de água ao longo do tempo é de fundamental importância para a identificação de deficiências que podem causar a ausência de suprimento da demanda na distribuição, bem como a danificação de seus componentes. Adicionalmente, essa previsão permite realizar a pesquisa de soluções para eliminar as deficiências que, normalmente, se caracterizam por:

- a) acréscimo ou remoção de bombas;
- b) acréscimo ou remoção de válvulas (redutoras de pressão, controladoras de fluxo, entre outros tipos de válvulas);
- c) mudança nos tipos de válvula;
- d) inserção de reservatórios e tanques.

As variações das condições de escoamento de uma rede são provocadas, principalmente, pela parada automática de bombas e/ou pelo fechamento ou abertura de uma válvula. Essas variações conduzem a alterações significativas nas vazões e pressões ao longo do sistema de distribuição de água. Para a avaliação desses fenômenos, muitos modelos numéricos computacionais têm sido desenvolvidos para facilitar a análise de transientes nas redes de condutos forçados e reservatórios ou outros elementos ligados a rede, buscando assim o melhor projeto com a maior rapidez possível.

Versões educacionais e profissionais desses modelos podem ser adquiridos, com custos proporcionais ao detalhamento da análise e do número de condutos e componentes da rede de distribuição.

Esses modelos consideram a ocorrência de movimentos permanentes e não permanentes . As ferramentas de análise em período estendido também permitem obter a resposta do sistema à variação de oferta e de demanda sobre um determinado período de tempo.

Nesta dissertação, pretende-se analisar alguns modelos numéricos disponíveis no mercado formulados para análise do escoamento em redes de distribuição

O trabalho será desenvolvido através das análises teórica e matemática consideradas nos seguintes programas computacionais: o WATERCAD (versão acadêmica e versão profissional), o EPANET 2.0 e o WANDA. Adicionalmente, a resolução de redes de distribuição de água normalmente encontrados na literatura permitirá estabelecer as limitações de utilização de cada modelo.

Os custos dos programas, citados por ordem de importância para a realização do trabalho, estão apresentados no quadro 1.1 :

Programa Computacional	Custo		
	Fornecido	Convertido para	
		reais*	
WATERCAD ⁽¹⁾	\$ 95,00	200,00	
EPANET 2.0	não há custo	-	
WANDA ⁽¹⁾	680 Euro	1300,00	

Quadro 1.1 – Custos dos Programas

(*) Conversão em 28 de Março de 2001; (1) Versão não-comercial;

O presente trabalho será dividido em : apresentação dos programas computacionais utilizados (capítulo 2), aspectos teóricos (capítulo 3), estudo de casos onde os métodos computacionais são aplicados (capítulo 4) e conclusões e recomendações quanto ao uso dos método computacionais utilizados (capítulo 5).

2.MÉTODOS COMPUTACIONAIS

No presente capítulo são apresentados os programas computacionais utilizados na realização do presente trabalho.

2.1.WATERCAD:

Desenvolvido pela HAESTAD METHODS, o programa WATERCAD é encontrado na versão 4.5 e também como parte integrante do livro WATER DISTRIBUTION MODELLLING escrito por Thomas Walski, Donald V.Chase e Dragan Savic (2000). A figura 2.1 ilustra uma das telas do programa, apresentando uma rede de distribuição de água com os seus diversos elementos.



Figura 2.1- Apresentação do programa WATERCAD

A utilização do programa WATERCAD permite :

- a) Conduzir simulações em escoamento permanente, em período estendido (escoamento quase permanente);
- b) Analisar múltiplas variações de demanda em qualquer nó ;

- c) Modelar bombas usando :
 - i) Potência constante;
 - ii) Curva com múltiplos pontos característicos.
- d) Modelar válvulas de :
 - i) Controle de fluxo
 - ii) Sustentação de pressão
 - iii) Redução de pressão;
 - iv) Queda de pressão ;
 - v) Obstrução de fluxo.
- e) Modelar tanques cilíndricos e não-cilíndricos e cargas em mananciais;
- f) Analisar a presença de constituintes químicos (concentração, etc.);
- g) Analisar a qualidade da água dos mananciais.

Tendo em conta todas essas possibilidades de simulação do programa WATERCAD, pode-se afirmar que ele pode ser utilizado para:

- a) Dimensionamento dos condutos;
- b) Dimensionamento de bombas;
- c) Planejamento de redes de abastecimento de água;
- d) Estudos de operação da rede;
- e) Estudos de manutenção da rede;
- f) Estudos de qualidade da água.

2.2. EPANET

Desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency), encontra-se atualmente disponível na versão 2.0. Todos os seus arquivos podem ser obtidos gratuitamente através da Internet no endereço http://www.dhi.dk.

A figura 2.2 ilustra uma das telas do programa, apresentando uma rede de distribuição de água com os seus respectivos componentes.



Figura 2.2- Apresentação do programa EPANET

A utilização do programa EPANET permite:

- a) Modelar condutos sob pressão, válvulas, reservatórios, tanques e bombas;
- b) Modelar através dos pontos de suas curvas características ;
- c) Modelar válvulas do seguinte tipos :
 - i) Válvulas de controle de fluxo (FCV)
 - ii) Válvula genéricas(GPV);
 - iii) Válvulas de redução de pressão (PRV);
 - iv) Válvulas de sustentação de pressão (PSV) ;
 - v) Válvulas de obstrução de fluxo (TCV);

d) Conduzir a análise da rede em escoamento permanente e quasepermanente;

 e) Considerar várias curvas de demanda para qualquer nó a partir de um valor básico de demanda;

 f) Atender finalidades específicas de dimensionamento e efetuar cálculos que não são realizados diretamente pelo programa, como, por exemplo, curvas de variação de pressões na rede durante o funcionamento de um hidrante quando ocorre um incêndio;

2.3. WANDA

Existente na versão 3.2, o programa foi elaborado pelo DELFT HYDRAULICSINSTITUTE de acordo com o manual do programa.

A figura 2.3 apresenta uma das telas dos progrmas, ilustrando uma rede e alguns gráficos resultantes da sua utilização.



Figura 2-3-Apresentação do programa WANDA

Apresenta-se, na seqüência, as principais características do programa WANDA :

a) Tem grande aplicação em projetos de sistemas hidráulicos, usando uma grande variedade de componentes hidráulicos disponíveis:

- i) Tubo;
- ii) Conduto a superfície livre;
- iii) Válvula de controle de fluxo;
- iv) Válvula de direcionamento de fluxo ("check valves);

- v) Câmaras de ar;
- vi) Coluna rígida
- vii) Resistência;
- viii) Reservatórios;
- ix) Condições limite do sistema;
- x) Tubo infinito;
- xi) Sifão ;
- xii) Condensador;

b) Apresenta rapidez na realização dos desenhos;

c) Auxilia a elaboração de projetos de manutenção usando um banco de dados com informações da rede;

d) Computa diâmetros dos tubos, cargas e velocidades ;

e) Simula a análise de escoamento permanente e escoamento não-permanente, não importando o tamanho da rede, o tipo de fluído e as condições operacionais ;

f) Utiliza como modelo numérico as equações do escoamento não permanente;

2.4. ENTRADA DE DADOS

2.4.1. EPANET

Para os condutos exige-se a entrada do comprimento, diâmetro e rugosidade do conduto.Para as válvulas exige-se a entrada do tipo de válvula, diâmetro da válvula e as perdas de carga localizada na válvula, caso sejam consideradas. Para os reservatórios exige-se a sua elevação. Para os nós deve-se entrar com suas elevações e respectivas demandas. Para os tanques deve-se definir a entrada dos diâmetros, alturas máxima e mínima. Para as bombas deve-se entrar com a potência e a velocidade de rotação ou os pontos da curva carga-vazão.

2.4.2. WATERCAD

Para os condutos exige-se a entrada do comprimento, diâmetro e rugosidade do conduto. Para as junções, as elevações e respectivas demandas. Para as válvulas deve-se entrar com o diâmetro da válvula e respectiva elevação e, se houver, as perdas de carga do tipo localizada. Para os reservatórios deve-se entrar com as respectivas elevações. Para os tanques deve-se definir as alturas máxima, mínima e inicial. Para as bombas deve-se entrar com a potência ou os pontos da curva carga-vazão.

2.4.3.WANDA

São citados os elementos com suas respectivas exigências de entrada de dados

- a) Reservatório
 - Carga;
 - Pressão inicial sobre o nó;
- b) Tanques
 - Cota Mínima;
 - Cota máxima;
 - Diâmetro interno;

c) Condutos

- Diâmetro interno;
- Comprimento;
- Rugosidade.
- d) Nós
 - Cotas;
- e) Válvulas
 - Diâmetro interno ;
 - Coeficiente de resistência;
 - Diagramas de operação;
- f) Válvulas Redutoras de Pressão
 - Pressão no ponto que define a válvula aberta;
 - Vazão no ponto que define a abertura da válvula, isto é, a mínima vazão em que a válvula pode ser definida como aberta.

- g) Bomba
 - Curva de operação (Carga x Vazão) ;
 - Velocidade de rotação;
 - Momento de Inércia Polar.
- h) Chaminé de equilíbrio
 - Diâmetro da chaminé para cada cota.

O usuário pode optar pelas unidades sugeridas pelo programa ou pelas unidades utilizadas no Sistema Internacional de Medidas (S.I).

3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Neste capítulo serão discutidos os aspectos teóricos referentes aos modelos matemáticos utilizados nos programas computacionais usados no presente trabalho

3.1.ESCOAMENTO PERMANENTE

Manualmente pode se usar o método de Hardy-Cross para cálculo do escoamento permanente.

As seguintes regras devem ser observadas para a aplicação do método de Hardy-Cross :

- a) A soma algébrica das perdas de carga em cada circuito fechado deve ser nula;
- b) A somatória das vazões que chegam em um nó deve ser igual à somatória das vazões que saem do nó;
- c) A equação de perda de carga utilizada deve ser satisfeita em cada conduto. A relação entre a perda de carga e a vazão deve ser mantida em cada conduto..

A condição "a " implica que a variação de perda de carga no trecho AG (figura 3.1) é a mesma que através do percurso *AFEDG*.



Figura 3.1 – Ilustração de uma rede de distribuição de água

Uma equação geral relacionando a perda de carga *h* e a vazão Q no conduto pode ser escrita como

$$h = rQ^n \tag{3.1}$$

Nessa equação o coeficiente *r* envolve as características gerais de cada conduto, representados pelo seu comprimento, diâmetro e parâmetro relacionado com a rugosidade. Para a equação de Darcy-Weisbach, por exemplo, o coeficiente é expresso por:

$$r = 0,0826 \cdot f \cdot D^{-5} \cdot L \tag{3.2}$$

onde:

f = fator de atrito de Darcy-Weisbach ;

D = diâmetro do conduto (m);

L =comprimento (m);

O método de Hardy-Cross consiste em aplicar o seguinte procedimento :

- a) Estabelecer a melhor distribuição de vazões (vazões Q₀) que satisfaça a condição de continuidade em cada nó depois de um cuidadoso exame da rede;
- b) Calcular a perda de carga em cada circuito fechado. $\sum h = \sum rQ_0^n$ (deve ser nula para um circuito equilibrado);

- c) Calcular para cada circuito fechado, o valor do termo $\sum |nrQ_0^{n-1}|$ (todos os termos são considerados positivos).
- d) Calcular, em cada circuito, a vazão de correção ΔQ para equilibrar a carga no circuito, pela expressão.

$$\Delta Q = -\frac{\sum r Q_0^n}{\sum \left| nr Q_0^{n-1} \right|} \tag{3.3}$$

e) Calcular as vazões corrigidas em cada conduto, através da expressão:

$$Q = Q_0 + \Delta Q \tag{3.4}$$

f) Repetir os passos de "b" a "e" até obter a precisão desejada.

As equações no método de Hardy-Cross de acordo com ZIPPARRO & HASEN [1993] para serem resolvidas computacionalmente compreende o seguinte número de iterações (*l*)

$$l = p - j - f + 1 \tag{3.5}$$

onde p =número de condutos;

j = número de junções;

l = número de iterações;

f =número de nós fixos (tanques);

As relações de energia resultam em f-1 equações na forma

$$\Delta E = \sum h_l - \sum E_p \tag{3.6}$$

onde:

 ΔE = energia no sistema;

 h_i =perda de energia em cada conduto (incluindo as perdas de carga do tipo localizada) ;

 E_p = energia inserida no sistema por uma bomba.

Um sistema de j equações é produzido pelas equações de balanço de fluxo em cada junção. Essas equações têm a forma

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_e \tag{3.7}$$

onde

 Q_{in} = vazões que entram na junção;

 Q_{out} = vazões que abandonam a junção;

 Q_e =demanda externa na junção.

As equações de perda de carga nos condutos são escritas na forma

$$h_l = k_p Q^x \tag{3.8}$$

Para as perdas de carga do tipo localizada vale a expressão

$$h_{im} = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \tag{3.9}$$

onde:

 h_{lm} =perda de carga localizada (m) ;

K = coeficiente de perda de carga localizada;

V =velocidade no conduto (m/s);

g = aceleração da gravidade, 9,81 m/s².

Substituindo a velocidade pela vazão (Q) e pelo diâmetro (D), pode-se escrever

$$h_{lm} = k_m Q^2 \tag{3.10}$$

onde $k_m = \frac{8K}{\pi D^4}$

A energia imposta ao sistema por uma bomba é dada por

$$E_p = A + BQ + CQ^2 \tag{3.11}$$

onde :

 E_p = energia transmitida ao sistema pela bomba (m);

Q=vazão através da bomba (m³/s);

A, B, C = coeficientes da curva da bomba que são definidos pelas características de operação da bomba.

As relações de perda de carga nos condutos por atrito, a energia imposta por uma e as perdas de carga do tipo localizada resultam em l + f - 1 equações de equilíbrio de energia na forma

$$\Delta E = \sum (k_p Q^x + k_m Q^2) - \sum (A + BQ + CQ^2)$$
(3.12)

e j equações de equilíbrio de escoamento na forma

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_e \tag{3.13}$$

O programa WANDA resolve o escoamento permanente utilizando esse método na forma matricial, enquanto os programas WATERCAD e EPANET consideram o escoamento permanente como caso particular dos modelos que eles utilizam (esse modelo é o que será discutido no item 3.2).

3.2. MODELO QUASE-ESTÁTICO

3.2.1.Informações Gerais

O modelo de simulação em redes conhecido como modelo quase-estático ou simulação em período estendido pode ser utilizado para:

- 1) Analisar respostas da rede a fechamentos ou aberturas de válvulas;
- Análise da evolução de uma rede ante uma ruptura instantânea de um conduto;
- Análise da resposta fornecida pela rede à uma brusca variação de consumo (acréscimo ou redução);
- Analisar resposta da rede a arranques ou paradas bruscas de bombas , bem como as variações bruscas nas suas velocidades de giro;
- Análise das instabilidades provocadas pela introdução de uma válvula reguladora de pressão.

O modelo quase-estático permite uma compreensão eficaz do comportamento dos sistemas em relação às diferentes condições que são impostas ao longo do tempo.

Um exemplo de utilização do modelo quase-estático que pode ser resolvido de maneira analítica, é a determinação da perda de carga h em função do tempo para um sistema de dois reservatórios ligados por um conduto – figura 3.2.



Figura 3.2 – Sistema de dois reservatórios interligados por um conduto

Sejam as equações (3.14) e a equação (3.15) as equações de contorno aplicadas ao sistema.

$$\frac{dH_1}{dt} = -\frac{Q}{A_1} \tag{3.14}$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{Q}{A_2} \tag{3.15}$$

Nessas equações, tem-se

$$h = H_1 - H_2 = rQ^n (3.16)$$

De (3.14) e (3.15), temos

$$dh = dH_1 - dH_2 = -Qdt \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right)$$

Por outro lado levando em consideração a equação (3.16)

 $Q = \left(\frac{h}{r}\right)^{1/n}$

pode-se concluir que:

 $-dh = \left(\frac{h}{r}\right)^{1/n} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right) dt$

que resolvida conduz a

$$h = \left[h_0^{1-\frac{1}{n}} - \frac{\left[\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right]}{r^{\frac{1}{n}}} t \right]^{\frac{1}{1-\frac{1}{n}}}$$
(3.17)

sendo h_0 a perda de carga determinada considerando o escoamento permanente. Considerando-se os seguintes dados :

- Os reservatórios são dois tanques iguais e circulares com diâmetro de 10 m interligados por um conduto com fator de atrito (f) igual a 0,015; comprimento(L)

igual a 3500 m; diâmetro igual a 0,4 m; carga do primeiro reservatório(H_1) igual a 15 m e a carga do segundo reservatório igual a 0 m.

Para a equação de Darcy-Weisbach, onde

$$r = \frac{8f}{g\pi^2} \cdot \frac{L}{D^5}$$
 e $n = 2$

resulta

$$r = 423,62$$

que substituído com outros valores na equação(3.17) conduz a

$$h = \left[15^{0.5} - 0.77327t\right]^2 \tag{3.18}$$

onde t é o tempo e h_0 a perda de carga determinada na condição de escoamento permanente.

Um esquema genérico descrito por [ABREU,GUARGA & IZQUIERDO, 1994], é apresentado na figura 3.3



Figura 3.3 – Esquema de um modelo quase estático

3.2.2. Formulação pelo EPANET

O programa EPANET utiliza o modelo quase estático na forma matricial, conhecido como Algoritmo do Gradiente, conforme TODINI & PILATI [1987] citado por ROSSMAN [2000]. O seguinte sistema linear na forma matricial é resolvido:

$$\mathbf{A}\mathbf{H} = \mathbf{F} \tag{3.19}$$

onde: A = matriz jacobiana (N x N), onde N é o número de nós da rede

H = vetor das cargas desconhecidas

F= vetor que envolve os termos do lado direito da equação.

Os elementos da diagonal da matriz jacobiana A é dado por :

$$A_{ii} = \sum_{j} p_{ij} \tag{3.20}$$

E os demais elementos dados por

$$A_{ij} = -p_{ij} \tag{3.21}$$

Onde p_{ij} é a matriz do inverso da derivada dos elementos da matriz das perdas de carga. Assim a matriz **p** pode ser definida para os condutos como :

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|}$$
(3.22)

onde

$$Q_{ii}$$
 = a vazão entre o nó "i" e o nó "j"

r = coeficiente de resistência do tubo, que depende da equação de perda de carga;

m = coeficiente referente a perda de carga localizada;

n = expoente de vazão que está relacionada a equação de perda de carga;

Para as bombas, a expressão de p é escrita como :

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r (Q_{ij}/\omega)^{n-1}}$$
(3.23)

onde :

 ω = velocidade de rotação relativa da bomba ;

A matriz **F** representa o desequilíbrio das vazões que existe nos nós mais um fator de correção y_{ii} sendo definida por:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i\right) + \sum_j y_{ij} + \sum_j p_{ij} H_f$$
(3.24)

onde o último termo aplica-se a qualquer ligação conectando o nó *i* para um nó fixo **f** e o fator de correção y_{ij} é dado por :

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r \left| Q_{ij} \right|^n + m \left| Q_{ij} \right|^2 \right) \operatorname{sgn}(Q_{ij})$$
(3.25)

para condutos e

$$y_{ij} = -p_{ij}\omega^2 (h_0 - r(Q_{ij} / \omega)^n)$$
(3.26)

para bombas, onde sgn(x) é 1 se x>0 e -1 caso contrário. Q_{ij} é sempre positivo para bombas.

Processo Iterativo de Cálculo

As cargas *H* são calculadas resolvendo a equação (3.19). As novas vazões são calculadas por :

$$Q_{ij}^{new} = Q_{ij}^{old} - \left(y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)\right)$$
(3.27)

Esse processo é repetido até que a mudança de vazão seja menor do que um valor considerado como tolerância.

3.2.3. O modelo utilizado pelo WATERCAD

O algoritmo utilizado pelo WATERCAD é o mesmo utilizado pelo EPANET; a única diferença está na forma de otimização . O WATERCAD otimiza o algoritmo da forma descrita a seguir.

Dado uma rede com N nós com cargas desconhecidas, P condutos com suas vazões desconhecidas e B condições de contorno ou cargas conhecidas.

O sistema linear abaixo é resolvido .

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{12} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{21} \end{bmatrix} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \end{bmatrix} \times \mathbf{H}_{0} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}$$
(3.28)

q = vetor (N x 1) das demandas ;

Q = vetor (P x 1) das vazões desconhecidas ;

 $H = vetor (N \times 1) das cargas desconhecidas;$

 $A_{12} = A_{21}$ = matriz (P x N) das cargas desconhecidas ;

A₁₀ = matriz (P x B) das cargas conhecidas nos nós;

As seguintes convenções são usadas para atribuir os valores aos elementos das matrizes.

A(i, j) = 1 , 0 ou –1 se a vazão entra no nó i, não existe vazão nenhuma ou sai do j. As demandas nos nós são dados pelo vetor $(1 \times N)$

$$\boldsymbol{q}^{T} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{1}, \boldsymbol{q}_{2} \dots \boldsymbol{q}_{N} \end{bmatrix}$$
(3.29)

As perdas de carga são expressos pela matriz (1 x P)

$$F^{T}(Q) = [f_{1}, f_{2}, ..., f_{P}]$$
 (3.30)

com seus elementos sendo leis não lineares que expressam as perdas de carga.

A₁₁ = matriz diagonal dos coeficientes das perdas de carga, por exemplo se for considerada a equação de Hazen-Williams a matriz será:

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} r_1 |Q_1|^{n-1} & & & \\ & r_2 |Q_2|^{n-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & r_P |Q_P|^{n-1} \end{bmatrix}$$
(3.31)

A equação (3.28) é resolvida iterativamente. Para cada iteração k , os valores da matriz $H \in Q$ são dados por:

$$\mathbf{H}^{k+1} = (\mathbf{A}_{21}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}_{11}^{-1}\mathbf{A}_{12})^{-1} \left\{ \mathbf{A}_{12}\mathbf{N}^{-1}(\mathbf{Q}^{k} + \mathbf{A}_{11}^{-1}\mathbf{A}_{10}\mathbf{H}_{0}) + (\mathbf{q} - \mathbf{A}_{21}\mathbf{Q}^{k}) \right\}$$
(3.32)

$$\mathbf{Q}^{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{N}^{-1})\mathbf{Q}^{k} - \mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}_{11}^{-1}(\mathbf{A}_{12}\mathbf{H}^{k} + \mathbf{A}_{10}\mathbf{H}_{0})$$
(3.33)

N= matriz diagonal com os diversos valores de n resultantes do processo de derivação.

3.3.. ESCOAMENTO NÃO PERMANENTE;

A relação entre a variação de cargas e velocidades, no escoamento nãopermanente é dada por :

$$\sum \Delta H = \pm \frac{a}{g} \sum \Delta V \tag{3.34}$$

onde

 ΔH = variação de carga (m); ΔV = variação de velocidade (m/s); a = celeridade da onda de pressão (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s²);

As equações, na forma não-conservativa, para o escoamento não-permanente unidimensional em condutos, que representam, a conservação da quantidade de movimento e a conservação de massa, são as seguintes (Wylie e Streeter ,1978):

$$gA_f \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{A_f} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + f \frac{Q|Q|}{2DA_f} = 0$$
(3.35)

е

$$\frac{Q}{A_f}\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{Q}{A_f}\operatorname{sen}(\alpha) + \frac{a^2}{A_f g}\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

onde:

x = distância ao longo do conduto (m);

t = tempo(s)

 α = ângulo do eixo do conduto com a horizontal ;

H = carga piezométrica (m);

Q = vazão escoada (m³/s);

D = diâmetro do conduto (m);

 A_f = área da seção transversal do conduto($\pi D^2/4$);

f = fator de resistência de Darcy-Weisbach;

A celeridade em uma tubulação pode ser calculada de acordo com LENCASTRE [1983] por :

$$a = \left[\rho\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{E} \cdot \frac{D}{e}\right)\right]^{-1/2}$$
(3.36)

onde :

:

 ε = módulo de elasticidade volumétrica do líquido (N/m³);

E = módulo de elasticidade do material da conduta (N/m²);

 ρ = massa especifica do fluido (kg/m³) ;

D = diâmetro da conduto (m);

e = espessura do conduto(m).

Os métodos de análise usados com as equações de escoamento não permanente podem ser classificados, de acordo com WYLIE & STREETER [1978], em

- 1) Aritméticos
- 2) Gráficos
- 3) Características
- 4) Algébricos
- 5) Implícitos
- 6) Análise Linear



Figura 3.4 – Esquema de um escoamento em um conduto

1. Método Aritmético : Este método não leva em consideração a resistência ao escoamento. A equação (1) é integrada e escrita na forma :

$$H \pm \frac{a}{g}V = C \tag{3.37}$$

O sinal positivo é para um pulso de onda de pressão viajando de B para A, e toma a forma

$$H_A + \frac{a}{g}V_A = H_B + \frac{a}{g}V_B \tag{3.38}$$

As condições em A (figura 3.4) ocorrem L/a segundos depois das condições em B. Com H_B e H_A e o conhecimento de uma informação adicional é conhecida sobre A decorridos L/a segundos depois (uma condição de contorno), permite determinar H_A e V_A . Para a onda indo de A para B.

$$H_A - \frac{a}{g}V_A = H_B - \frac{a}{g}V_B \tag{3.39}$$

na qual as condições H_A e V_A ocorrem L/a segundos antes de H_B , V_B . Para a aplicação desse par de equações necessita-se condições de contorno (reservatórios, válvulas, tubos fechados).

 Método Gráfico: o método gráfico não considera o atrito em seu desenvolvimento teórico, mas utiliza meios de levá-lo em conta para a correção. As equações (5) são integradas graficamente resultando em um diagrama HV (H como ordenada e V como abcissa).
3. Método das Características: Transformam-se as duas equações diferenciais parciais do movimento e da continuidade em Quatro equações diferenciais ordinárias. Essas equações são então expressas em forma de diferenças finitas, usando-se o método intervalos de tempo especificados e a sua solução é realizada por um computador,

O método das características apresenta as seguintes vantagens: critério de estabilidade bem definido, condições de contorno facilmente programáveis, termos de menor importância podem ser mantidos se desejados, sistemas muito complexos podem ser manipulados, apresenta a melhor precisão entre os métodos de diferenças finitas, são de fáceis depuração, é um método detalhado que permite que seus resultados sejam escritos em forma tabular.

- 4. *Método Algébrico* : as equações algébricas são basicamente as duas equações características para pulsos de onda sonoras na direção positiva e negativa.
- 5. Métodos Implícitos: um método implícito é baseado em um procedimento de diferenças finitas que pode ser usado com sucesso para a solução de uma classe de problemas de escoamento não permanente. O procedimento é aplicável onde as forças de inércia não são importantes como o armazenamento ou os efeitos de capacidade. O método é formulado de modo que não existe a necessidade de manter uma certa relação entre o incremento de tempo Δt e o incremento de espaço Δx. Este fato permite uma maior flexibilidade que outros métodos quando se opera com sistema complexos, entretanto é necessário utilizar soluções simultâneas para todas as variáveis do sistema em cada passo de tempo. Quando aplicado a problemas de golpe de ariete é necessário adicionar a condição de Courant na relação entre o passo de tempo e o passo de espaço a fim de manter um nível de precisão satisfatório. Neste caso as vantagens do método são perdidas; então outros métodos são recomendados.
- Método Análise Linear: pela linearização do termo de atrito e desprezando outros ermos na equação do movimento, uma solução analítica é encontrada para oscilações de ondas senoidais.

3.3.1.0 Modelo utilizado pelo programa WANDA

O programa WANDA resolve a equação do momento

$$\frac{1}{A_f}\frac{\partial Q}{\partial t} + g\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA_f^2} = 0$$
(3.39)

e a equação da continuidade

$$\frac{1}{a^2}\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{gA_f}\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{com} \quad a^2 = \frac{K_f}{\rho_f} \left(1 + \frac{DK_f}{Ee}\right)^{-1}$$
(3.40)

onde :

a = velocidade de propagação da onda (m/s);

 K_f = compressibilidade do fluído (N/m²);

 ρ_f = densidade do fluido (kg/m³);

D = diâmetro interno do tubo (m);

- E = Módulo de Young(elasticidade do tubo) (N/m²);
- e = espessura da parede do conduto (m);

As equações (3.39) e (3.40) são solucionadas utilizando-se o método das características .

Considerando-se *H* e Q como variáveis dependentes , as equações diferenciais parciais básicas podem ser decompostas, utilizando o método das características, em dois sistemas de equações diferenciais ordinárias(C^+ e C^-)

$$C^{+}: \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA_{f}}\frac{dQ}{dt} + \frac{fa}{2gDA_{f}^{2}}Q|Q| = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = +a$$
(3.41a)

$$C^{-}:\frac{dH}{dt} - \frac{a}{gA_{f}}\frac{dQ}{dt} - \frac{fa}{2gDA_{f}^{2}}Q|Q| = 0$$
(3.42)

$$\frac{dx}{dt} = -a \tag{3.42a}$$

Essas equações são resolvidas através Método de Diferenças Finitas. Se $H \in Q$ são conhecidas nos pontos $A \in B$, as equações podem ser integradas ao longo das linhas características no ponto P. Podendo $H \in Q$ serem resolvidas em P. A integração resulta

$$H_{i}^{n+1} - H_{i-1}^{n} + R(Q_{i}^{n+1} - Q_{i-2}^{n}) + SQ_{i-1}^{n} |Q_{i-1}^{n}| = 0$$
(3.43)

$$H_{i}^{n+1} - H_{ii+1}^{n} - R(Q_{i}^{n+1} - Q_{i+1}^{n}) - SQ_{ii+1}^{n} |Q_{ni+1}| = 0$$
(3.44)

nas quais $R = \frac{a}{g A_f}$; $S = \frac{f a \Delta t}{2g D A_f^2}$



Figura 3.5 – Esquema do Método das Características

3.4.CONDIÇÕES DE CONTORNO

Em uma rede de condutos existem muitos elementos que afetam as condições de escoamento. Esses elementos são definidos através de condições de contorno.

3.4.1.Válvulas

As válvulas podem ser classificadas de acordo com a sua função em:

- a) Válvulas de Checagem : são usadas para manter o fluxo do escoamento em uma direção específica .
- b) Válvula de Controle de fluxo (FCV's): limita a vazão na válvula em um valor especificado e em uma direção específica. Estas válvulas são comumente encontradas em áreas onde a distribuição de água deseja ser limitada em um certo valor que não afete o sistema.
- c) Válvula Redutora de Pressão (PRV's): são freqüentemente usadas para separar as zonas de pressão em uma rede de distribuição de água. Estas válvulas previnem que a pressão exceda um certa valor que possa danificar o sistema.
- d) Válvula de Sustentação de Pressão (PSV's): mantém uma pressão específica antes da válvula. Semelhante à outras válvulas de regulação, é freqüentemente usada para evitar que as pressões no sistema não caiam até valores abaixo de um determinado valor aceitável.
- e) Válvulas de Queda de Pressão (PBV's): criam uma perda de carga na válvula, e são freqüentemente usadas para modelar componentes nos quais não se pode utilizar facilmente elementos padrão de perdas de carga localizadas.

 f) Válvulas de Obstrução de Fluxo (TCV's): simulam elementos de perdas de carga localizadas, nos quais as características de perda de carga variam com o tempo.

Embora os resultados referentes a abertura das válvulas não sejam descritos pelos programas WATECAD e EPANET eles podem ser calculados através de arquivo texto gerado pelos programas ou por conexão com Banco de dados(no caso do WATERCAD).

De modo geral a equação para as válvulas pode ser descrita, de acordo com STREETER[1966], por :

$$\frac{V}{V_0} = \tau \cdot \sqrt{\frac{H}{H_0}}$$
(3.45)

onde :

V = velocidade em um instante qualquer (m/s); $V_0 = \text{velocidade com a válvula totalmente aberta (m/s);}$ H = carga em um instante qualquer (m); $H_0 = \text{carga com a válvula aberta (m);}$ $\tau = \text{grau de abertura da válvula.}$

Isolando τ :

$$\tau = \frac{V}{V_0} \sqrt{\frac{H_0}{H}}$$
(3.46)

De acordo com STREETER[1966] as vazões imediatamente a jusante da válvula podem ser descritas pela equação básica dos orifícios :

31

$$Q_0 = (C_d A_G)_0 \sqrt{2gH_0}$$
(3.47)

$$Q = (C_d A_G) \sqrt{2gH} \tag{3.48}$$

onde:

Q = vazão em um dado instante ;

 Q_0 =vazão com a válvula totalmente aberta ;

 C_d = coeficiente de descarga do orifício ;

O grau de abertura da válvula τ é definido como :

$$\tau = \frac{(C_d A_G)}{(C_d A_G)_0} \tag{3.49}$$

Então, a equação (3.45) pode ser rescrita como :

$$\frac{Q}{Q_0} = \tau \sqrt{\frac{H}{H_0}}$$
(3.50)

Os valores de τ podem ser obtidos de acordo com o tipo de válvula em manuais de hidráulica. De acordo com LENCASTRE[1983], algumas equações de alguns tipos típicos de válvula podem ser definidos conforme as equações 3.51 á 3.58.

a) Válvula de Globo

$$\tau = s; \quad s = Z/D \tag{3.51}$$



Figura 3.6 – Válvula de Globo

b) Válvula de gaveta circular

$$\tau = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\arccos(s) - s\sqrt{1-s} \right]; \ s = Z/D$$
 (3.52).



Figura 3.7 – Válvula de gaveta(gaveta circular)

c)Válvula de gaveta retangular

$$\tau = 1 - \frac{1}{\pi} \left[\arccos(2s - 1) - 2(s - 1)\sqrt{(1 - (2s - 1)^2)} \right]; s = Z/D$$
(3.53)



Figura 3.8 – Válvula de gaveta (gaveta retangular)

d) Válvulas de agulha

$$\tau = 2s - s^2; s = Z/D$$
 (3.54)



Figura 3.9– Válvula de Agulha

e) Válvula Borboleta



Figura 3.10 – Válvula de Borboleta

f) Válvula Esférica

$$\frac{A_0}{A} = \frac{1 + \cos \theta}{2} + \frac{\cos \theta}{\pi} \{ \arcsin(-x) + \sin[2\arcsin(-x)] \}$$

$$- \{ \arcsin(x) + \sin[2\arcsin(x)] \}$$
(3.56)

onde:

$$x = \frac{\sin\theta \sqrt{\left(\frac{b}{B}\right)^2 - 1}}{1 + \cos\theta}$$
(3.57)

 A_0 = área de abertura com a válvula totalmente aberta;

A =área de abertura da válvula;

 θ = ângulo de abertura da válvula, definido conforme indicado na figura 3.11.

sendo utilizado para cálculo de θ_m a relação

$$\frac{\sin \theta_m}{1 + \cos \theta_m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{b}{B}\right)^2 - 1}}$$
(3.58)

onde: θ_m = valor máximo para o ângulo θ ;



Figura 3.11 – Válvula de esfera

De modo geral, para o cálculo da uma curva de perda de carga x vazão de uma válvula pode-se usar o seguinte algoritmo computacional :

- i) Entra-se com a vazão máxima(Q₀) e a carga máxima(H₀);
- ii) Arbitra-se s ;
- iii) Calcula-se a abertura τ por uma equação do tipo

$$\tau = f(s)$$

isto é, τ como função de s, onde

$$s = \frac{Z}{D}$$

iv) Calcula-se Q pela expressão

$$Q = Q_0 \cdot \tau \cdot \sqrt{s} \tag{3.59}$$

v) Cálcula-se ΔH pela expressão

$$\Delta H = (1 - \frac{1}{(\tau Q_0)^2} Q^2) \cdot H_0$$
(3.60)

Para o valor de τ =0, tem-se Q=0. Removendo-se a indeterminação da equação, obtém-se

$$\Delta H = 0 \tag{3.61}$$

Para as válvulas do tipo borboleta, "s" é definido como :

$$s = 1 - \frac{\theta}{\theta_m} \tag{3.62}$$

Para a obtenção do parâmetro θ a equação é reescrita como

$$\theta = \theta_m (1 - s) \tag{3.63}$$

onde θ_m é o ângulo que corresponde ao fechamento total da válvula.

Os procedimentos usados pelo EPANET para as válvulas são, em acordo com ROSSMAN [2000] :

- 1) As válvulas abertas são consideradas como tubo lisos com fator de rugosidade f = 0,02 e comprimento igual a duas vezes ao diâmetro da válvula . As ligações fechadas obedecem uma relação de perda de carga linear com um fator de resistência grande , por exemplo : $h= 10^8 Q$, então $p_{ij}=10^{-8}$ e $y_{ij}=Q_{ij}$. Para ligações onde $(r+m)Q_{ij} < 10^{-7}$ então $p_{ij}=10^7$ e $y_{ij}=Q_{ij}/n$; Este procedimento é aplicado também nas válvulas de obstrução.
- 2) As verificações de estado das válvulas de checagem são feitas após cada iteração ;
- As verificações das condições de pressão nas válvulas de redução de pressão e válvulas de sustentação de pressão são feitas depois de cada iteração;
- 4) A verificação do estado (aberto ou fechado) da válvula é realizada de acordo com a precisão adotada da seguinte forma :

Se |h| > Htol então Se h< -Htol então estado=FECHADO Se Q <-Qtol então estado =FECHADO Caso contrário estado =ABERTO Caso contrário Se Q<-QTOL então estado = FECHADO estado=CONSTANTE

5) A matriz dos coeficientes das válvulas de queda de pressão (PBVs) é formada da seguinte maneira :

 y_{ij} = Hset

6) Para as válvulas de redução de pressão o seguinte procedimento é utilizado :

Se estado = ATIVO então

Se Q < -Qtol</th>então o novo estado =FECHADOSe Hi < Hset+Hml-Htol</td>então o novo estado = ABERTOcaso contrário o novo estado = ATIVO

Se o estado= ABERTO então

Se Q < -Qtol então o novo estado=FECHADO

Se Hi > Hset+Hml+Htol então o novo estado =ATIVO

Caso contrário o novo estado=ABERTO

Se o estado = FECHADO então

Se Hi>Hj+Htol

E Hi<Hset – Htol então o novo estado = ABERTO

Se Hi>Hj+Htol

E Hj <Hset –Htol então o novo estado = ATIVO

Caso contrário o novo estado = FECHADO

onde:

Q = vazão através da válvula;

Hi = carga de montante ;

Hj = carga de jusante ;

Hml = perda de carga localizada;

Htol, Qtol = valores de tolerância para carga e vazão, respectivamente;

Hset = carga que define a pressão a jusante da válvula

7) Para uma válvula de controle de fluxo do nó i para o nó j com uma vazão fixada em Qset, Qset é adicionada como saindo do nó i e entrando no nó j e é subtraída de Fi e somada a Fj. Se a carga no nó i é menor que a carga no nó j, então a válvula não pode conduzir a vazão e é tratada como um conduto aberto 3.4.2. Bombas

A equação da curva característica de uma bomba é escrita como: a carga *H* em função da vazão Q, tendo a forma

$$H = A + BQ + CQ^2 \tag{3.64}$$

onde C é sempre negativo. Quando a equação (3.64) é linearizada de acordo com CHAUDRY & YVJEVICH [1981], passa a ter a forma :

$$Q = \frac{H}{2CQ_0 + b} + \frac{CQ_0^2}{2CQ_0 + B}$$
(3.65)

onde $H \neq uma$ carga maior que zero e Q_0 uma vazão estimada.

A potência de uma bomba é dada por :

$$P = \frac{\gamma Q H}{\eta} \tag{3.66}$$

onde :

P = potência da bomba (W);

 γ = peso específico do líquido , no caso, água (N/m³);

 $Q = vazão (m^3/s);$

H = altura de sucção da bomba (m);

 η = rendimento da bomba ;

A potência mecânica absorvida pela bomba é dada por :

$$P_m = T\omega \tag{3.67}$$

onde :

 P_m = potência mecânica (J);

T =torque aplicado no eixo da bomba(Nm);

ω = velocidade de rotação em rad/s

Assim o rendimento da bomba, η , pode ser escrito como :

$$\eta = \frac{\gamma Q H}{T \omega} \tag{3.68}$$

As bombas de acordo com sua velocidade de rotação, podem ser classificadas conforme o quadro 3.1.

Тіро	Rotação (rpm)
Escoamento radial com baixa rotação	300 – 900
Escoamento radial com média rotação	900 –1500
Escoamento radial com alta rotação	1500 – 2400
Escoamento Misto	2400 – 5000
Escoamento Axial	3400 – 15000

Quadro 3.1 – Classificação das Bombas

A máxima carga de sucção de uma bomba é dada por :

$$h_{s} = (p_{a} - p_{v})/\gamma - (h_{fs} + v_{s}^{2}/2g)$$
(3.69)

onde :

 p_a = pressão atmosférica (Pa);

 p_v = pressão de vapor (Pa);

 h_{fs} = é a perda de carga no trecho de sucção (m);

 v_s = velocidade no conduto de sucção (m/s);

A rotação específica da bomba (N_s) é definido por

$$N_{S} = NQ^{1/2} / H^{3/4}$$
(3.70)

onde :

N = número de revoluções por minuto;
 Q = vazão;
 H =carga.

E o nível de sucção da bomba (NSPH) é dado por

$$NSPH = (p_a - p_v) / \gamma - (h_s + h_{fs} + v_s^2 / 2g)$$
(3.71)

A avaliação da cavitação, em uma bomba, pode ser feita através do índice de Thoma(σ) definido na forma

$$\sigma = \frac{NSPH}{H_m} \tag{3.72}$$

onde H_m = altura manométrica da bomba ;

Portanto, a velocidade de sucção específica da bomba, N_{ss} , é definido por

$$N_{ss} = NQ^{1/2} / (NSPH)^{4/3}$$
(3.73)

e o índice de cavitação é rescrito como

$$\sigma = (N_s / N_{ss})^{4/3} \tag{3.74}$$

O índice de cavitação crítico, definido a partir de testes, é dado por :

$$\sigma_c = 0.103 \left(\frac{N_s}{1000}\right)^{4/3} \tag{3.75}$$

42

De acordo com PORTO [2000] o *N.S.P.H* deve ser usado na fase final de projeto, quando já se tem especificado o tipo de bomba, enquanto o índice de cavitação de Thoma deve ser utilizado na fase de ante-projeto sendo definido como a relação entre a energia cinética no ponto crítico e a carga total.

3.4.3. Emissores

A equação para os emissores, de acordo com CHAUDRY & YEVJEVICH [1981], é :

$$Q_s = K\sqrt{H_s - E_s} \tag{3.76}$$

onde :

 Q_s = vazão no emissor;

K = parâmetro que envolve o coeficiente de descarga e a área do orifício ou do emissor;

 H_s = carga no ponto considerado;

 E_s = elevação do orifício ou do emissor;

Depois de linearizada a equação (3.76) pode ser rescrita como

$$Q_s = \frac{Q_{s_0}}{2} + \frac{K(H_s - E_s)}{2Q_{s_0}}$$
(3.77)

onde:

 Q_{so} = valor estimado para a vazão no emissor.

3.4.4. Outros Elementos de Contorno

Os outros elementos de contorno importantes que podem ser encontrados em uma rede são: tanques, reservatórios, chaminés de equilíbrio.

- a) Reservatórios: é um nó em que a pressão é igual a pressão atmosférica e o seu nível é mantido constante durante um transiente hidráulico. Os reservatórios quanto a sua operacionalidade na condição de regime inicial, podem ser classificados em dois tipos: se alimenta a rede é denominado reservatório de montante e se é alimentado denomina-se reservatório de jusante;
- b) Tanque: é um caso particular de reservatório, onde o nível varia durante o transiente e é fechado para a atmosfera;
- c) Chaminé de Equilíbrio: é um caso particular de reservatório em que o nível varia durante o transiente e é aberto á atmosfera.

O estudo detalhado das influências dessas estruturas na rede não será estudado de modo detalhado no presente trabalho.

3.5. EQUAÇÕES PARA O TERMO DE RESISTÊNCIA

A resistência ao escoamento depende da rugosidade, viscosidade, diâmetro do conduto e velocidade do escoamento. Sendo expressa por coeficientes de resistência nas equações de Chézy, de Manning-Strickler, Darcy-Weisbach e Hazen-Williams.

3.5.1 .Equação de Chézy

$$V = C\sqrt{RS} \tag{3.78}$$

onde V = velocidade do escoamento(m/s);

 $C = \text{coeficiente de resistência de Chézy}(m^{1/2} s^{-1});$

R = raio hidráulico da seção(m). Para condutos circulares sob pressão, de diâmetro *D*, esse valor é igual a *D*/4 ;

S = declividade da linha de energia

3.5.2. Equação de Manning-Strickler

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$
(3.79)

onde :

n =coeficiente de rugosidade de Manning

3.5.3. Equação de Darcy-Weisbach

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{RS}$$
(3.80)

onde :

g = aceleração da gravidade

f = fator de atrito , função da rugosidade relativa κ/D e do número de

Reynolds Re;

R = raio hidráulico;

v = viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

S =declividade da linha piezométrica ;

3.5.4. Equação de Hazen-Williams

$$V = 0,356C_{HW} D^{0.63} S^{0.54}$$
(3.81)

onde :

 C_{HW} = coeficiente de atrito de Hazen-Williams;

A comparação direta entre as equações (3.78) e (3.80) conduz a

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \tag{3.82}$$

onde C é coeficiente de Chézy e f o fator de resistência de Darcy-Weisbach.

Tendo em conta :

a) A equação da continuidade;

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot V \Longrightarrow V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$
(3.83)

b) A equação da declividade da linha de energia

$$S = \frac{h}{L} \Longrightarrow h = S \cdot L \tag{3.84}$$

c) A relação entre o raio hidráulico R e o diâmetro D

pode-se escrever as equações (3.78) a (3.81) na forma

$$h = r \cdot Q^n \tag{3.86}$$

onde r é um coeficiente de resistência e n é um expoente da vazão do escoamento,

Os valores de r e n encontram-se definidos no quadro 3.2

quality of a value acc		/					
Equação	Coeficiente de Resistência(A)	Expoente da Vazão					
Hazen-Williams	$10,62 C_{HW}^{-1.852} D^{-4,871} L$	1,852					
Darcy-Weisbach	$0,0826 f(k,D,Q)D^{-5}L$	2,000					
Manning-Strickler	10,2936 $n^2 D^{-5,33} L$	2,000					
C_{HW} = coeficiente de rugos	sidade de Hazen-Williams						
k = coeficiente de rugosida f = fator de atrito;	k = coeficiente de rugosidade de Darcy f =fator de atrito;						
n=coeficiente de rugosida	<i>n</i> =coeficiente de rugosidade de Manning						
D= diâmetro do conduto(m)							
L= comprimento do conduto(m)							
Q= Vazão(m ³ /s)							

Quadro 3.2 – Valores dos parametros $r \in n$ da	i eq.(3.86)	
--------------------------------------------------	-------------	--

Os valores dos coeficientes de resistência típicos de acordo com o material podem ser encontrados no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Valores Típicos de Rugosidade Início							
Material	Coeficiente de Manning	Hazen-Williams	Darcy-Weisbach Altura de rugosi- dade				
	n(m ^{-1/3} s)	C _{HW}	k(mm) (*)				
Asbestos	0,011	140	0,0015				
Metal	0,011	135	0,0015				
Ferro Fundido,	0,015	100	0,6				
novo							
Concreto com formas de aço	0,011	140	0,006				
Concreto : com formas de madeira	0,015	120	0,002				
Concreto: espuma centrifugada	0,013	135	0,0012				
Cobre	0,011	135	0,0015				
Metal Corrugado	0.022	-	0,045				
Ferro Galvanizado	0,016	120	0,15				

Material	Coeficiente	Coeficiente	Darcy-Weisbach					
	de Manning	de Hazen-Williams	Altura de rugosi-					
			dade					
	n(m ^{-1/3} s)		k(mm) (*)					
		C _{HW}						
Vidro	0,011	140	0,0015					
Chumbo	0,011	135	0,0015					
Plástico	0,009	150	0,0015					
Aço esmaltado	0,010	148	0,0048					
Aço não alinhado	0,011	145	0,045					
Aço rebitado	0,019	110	0,9					
Verga de madeira	0,012	120	0,19					

Quadro 3.3 – Valores Típicos de Rugosidade -

(*) considerando o escoamento turbulento rugoso;

Perdas de Carga Localizadas

As perdas de carga localizadas podem ser avaliadas pela equação geral

$$h_L = K \frac{U^2}{2g} \tag{3.87}$$

Os valores de K são tabelados no quadro 3.4.

Quadro 3.4 Coeficientes de perda de carga localizada

Estrutura	Coeficiente
Válvula de globo, totalmente aberta	10,0
Válvula de agulha, totalmente aberta	5,0
Válvula de detenção, totalmente aberta	2,5
Válvula de comporta, totalmente aberta	0,2
Curva de raio curto	0,9
Curva de raio médio	0,8
Curva de raio longo	0,6
Curva de 45 graus	0,4
Curva de retorno	2,2
T padrão –escoamento no ramo	0,6
Principal	
T padrão – escoamento nos ramos	1,8
secundários	
Entrada Quadrada	0,5
Saída	1,0

Para a caso específico de perdas localizadas em válvulas é válida a relação

Fim

$$K = \frac{1}{C^2} - 1 \tag{3.88}$$

os valores de *C* e *K* encontram-se definidos nos ábacos(figuras 3.12 a 3.16 a seguir de acordo com o tipo de válvula.



Figura 3.12- Coeficiente K – Válvulas de gaveta



Figura 3.13 – Coeficiente C - Válvula Borboleta..



Figura 3.14 – Coeficiente C – Válvula Borboleta



Figura 3.15 – Coeficiente K – Válvulas de Globo totalmente abertas



Figura 3.16 - Coeficiente C - Válvula de esfera

4.ANÁLISE DE EXEMPLOS NUMÉRICOS

Neste capítulo serão realizadas análises de exemplos numéricos através dos programas EPANET, WATERCAD ou WANDA. Utilizando-se o programa mais adequado em cada um dos casos analisados.

4.1.ANÁLISE DE REDES MALHADAS

Neste exemplo serão analisados as diferenças entre o programas EPANET, WATERCAD e WANDA e o método de Hardy-Cross.

Considere a rede abaixo apresentada, extraída de CHAUDRY & YEVJEVICH [1981]:



Figura 4.1-Rede Malhada

Os dados para esta rede com suas características são apresentados nos quadros 4.1 e 4.2.

Nó	Demanda(I/s)	Elevação(m)						
1	- (*)	305						
2	0	259						
3	0	259						
4	0	259						
5	3,15	259						
6	63,09	259						

Quadro	4.1 -	Dados	dos	Nós
--------	-------	-------	-----	-----

(*) Dado não disponível, será calculado pelos programas

Conduto	Nó	Nó	Comprimento	Diâmetro	Coeficiente
	inicial	final	(m)	(mm)	de
			. ,		Hazen-Williams
1	1	2	305	203,2	100
2	2	3	183	152,4	100
3	4	3	305	152,4	100
4	1	4	183	152,4	100
5	2	5	305	152,4	100
6	5	6	183	152,4	100
7	3	6	305	152,4	100

Quadro 4.2 – Dados dos Condutos

Os resultados utilizando o Método de Hardy-Cross e os programas EPANET, WATERCAD e WANDA estão nos quadros 4.3 e 4.4. Os esquemas de vazões estão nas figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

Nó	Elevação	Demanda	Carga(m) Pressão(N/m²						são(N/m²)	
	(m)	(I/s)	Hardy-	EPANET	WATERCAD	WANDA	Hardy-	EPANET	WATERCAD	WANDA
			Cross				Cross			
1	305	0	305,00	305,00	305,00	305,0	0	0,00	0,00	0,00
2	300	0	299,62	299,85	299,86	300,3	399895	400379	399832	405200
3	298	0	297,79	298,15	298,15	298,8	379212	384062	383178	390500
4	303	0	302,36	302,43	302,43	302,7	420580	426048	425064	428500
5	290	3,15	289,86	290,18	290,18	290,9	303369	305876	305145	312700
6	286	63,09	284,99	285,43	285,43	286,3	255106	259278	258677	268000

Quadro 4.3 – Resultados obtidos nos Nós

Quadro 4.4 – Resultados obtidos nos Condutos

Cond			Vazão(l/s)			Veloci	Velocidade(m/s)			Perda	Perda de Carga(m/km)			
	L(m) (*)	D(m) (**)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4) (***)
1	305	0,2032	46,50	-46,49	46,49	46.56	1,43	1,43	1,43	1,44	16,99	16,87	16,87	15,48
2	183	0,1524	15,82	15,82	15,82	15,78	0,85	0,87	0,87	0,87	9,33	9,30	9,30	8,29
3	305	0,1524	19,75	19,75	19,75	19,68	1,07	1,08	1,08	1,08	14,09	14,03	14,03	12,73
4	183	0,1524	19,75	19,75	19,75	19,68	1,07	1,08	1,08	1,08	14,00	14,03	14,03	12,73
5	305	0,1524	30,67	30,68	30,68	30,78	1,68	1,68	1,68	1,69	31,88	31,71	31,72	30,99
6	183	0,1524	27,66	27,53	27,52	27,63	1,49	1,51	1,51	1,52	26,14	25,95	25,95	25,10
7	305	0,1524	35,43	35,56	35,57	35,46	1,95	1,95	1,95	1,94	41,97	41,70	41,71	40,78

(1) Hardy-Cross; (2) EPANET; (3) WATERCAD; (4) WANDA; (*) Comprimento; (**) diâmetro interno; (***) Altura de rugosidade = 0,914 x 10⁻³



Figura 4.2 – Vazões obtidas pelo método de Hardy-Cross



Figura 4.3 – Vazões obtidas pelo EPANET



Figura 4.4 – Vazões obtidas pelo WATERCAD



Figura 4.5 – Vazões obtidas pelo WANDA

Nesse caso foi estudado a diferença de resultados entre os modelos estático e quase-estático.

Vamos, inicialmente observar e analisar a topografia fornecida. O segundo anel está em um local com maior inclinação que o primeiro anel (anel esquerdo), esperandose vazões mais elevadas nos condutos deste anel que no anterior.

A partir dos resultados nota-se que não existiu grandes diferenças nos resultados entre o modelo estático e o modelo quase-estático.

Quanto as demandas, elas estão localizadas nos pontos finais da rede, o que afetará concomitantemente as vazões e pressões em toda a rede.

Para o cálculo das cargas, no método de Hardy-Cross foi desconsiderada

A fim de comparar o valor das vazões vamos construir o seguinte quadro(quadro 4.5).

Conduto	Hardy-Cross	EPANET	WATERCAD	WANDA	Média	Variância
1	46,5	46,49	46,49	46,56	46,51	0,001133
2	15,82	15,82	15,82	15,78	15,81	0,0004
3	19,75	19,75	19,75	19,68	19,73	0,001225
4	19,75	19,75	19,75	19,68	19,73	0,001225
5	30,67	30,68	30,68	30,78	30,70	0,002692
6	27,66	27,53	27,52	27,63	27,58	0,004967
7	35,43	35,56	35,57	35,46	35,50	0,004967

Quadro 4.5 – Comparação entre as vazões (I/s)

Através dessa tabela pode-se notar que os valores são bastante próximos.

Pode-se também, da mesma forma, comparar as velocidades e perdas de carga, conforme pode-se notar nos quadros 4.6 e 4.7.

Conduto	Hardy- Cross	EPANET	WATERCAD	WANDA	Média	Variância
1	1,43	1,43	1,43	1,44	1,43	2,5E-05
2	0,85	0,87	0,87	0,87	0,86	1E-04
3	1,07	1,08	1,08	1,08	1,07	2,5E-05
4	1,07	1,08	1,08	1,08	1,07	2,5E-05
5	1,68	1,68	1,68	1,69	1,68	2,5E-05
6	1,49	1,51	1,51	1,52	1,50	0,000158
7	1,95	1,95	1,95	1,94	1,94	2,5E-05

Quadro 4.6 – Comparação entre as velocidades (m/s)

Conduto	Hardy-Cross	EPANET	WATERCAD	WANDA	Média	Variância
1	16,99	16,87	16,87	15,48	16,55	0,51
2	9,33	9,3	9,3	8,29	9,06	0,26
3	14,09	14,03	14,03	12,73	13,72	0,43
4	14	14,03	14,03	12,73	13,70	0,41
5	31,88	31,71	31,72	30,99	31,58	0,16
6	26,14	25,95	25,95	25,1	25,79	0,22
7	41,97	41,7	41,71	40,78	41,54	0,27

Quadro 4.7 – Comparação entre as perdas de carga (m/km)

Os programas EPANET e WATERCAD não apresentam dificuldade, quanto a definição do cenário estudado, porém quando se utiliza o programa WANDA deve-se utilizar as estruturas computacionais denominadas "tubo infinito" ou as estruturas computacionais denominadas de "reservatórios com vazão constante".

4.2. ANÀLISE DE UMA REDE COM VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

Considere o desenho da rede ilustrado na figura 4.6, extraído de CHAUDRY & YEVJEVICH [1981]. A rede é composta por 11 condutos e 11 nós, 1 reservatório e 3 válvulas redutoras de pressão.

Deseja-se verificar as diferença que ocorre entre as cotas das linhas piezométricas quando se considera: a) Válvula como meio de ligação entre dois nós (EPANET); b) Válvula como nó (WATERCAD); .



Figura 4.6- Rede de condutos com válvulas redutoras de pressão

Ligação	Diâmetro	Comprimento	Rugosidade
	(mm)	(m)	(Hazen-Williams)
1	203,2	1524,0	110
2	152,4	914,4	110
3	152,4	182,9	110
4	152,4	182,9	110
5	152,4	457,2	110
6	152,4	457,2	110
7	152,4	182,9	110
8	152,4	182,9	110
9	152,4	457,2	110
10	152,4	457,2	110
11	102	457,2	110
12(Válvula)	150		-
13(Válvula)	150	-	-
14(Válvula)	150	_	-

Quadro 4.8 – Dados das Ligações

Quadro 4.9 – Dados dos Nós

	Elevação	Demanda				
Nó	(m)	(l/s)				
1	1524	-				
2	1372	0,00				
3	1372	8,00				
4	1372	0,00				
5	1372	0,00				
6	1372	4,00				
7	1372	0,00				
8	1372	4,00				
9	1372	0,00				
10	1372	0,00				
11	1372	8,00				
12	1372	51,00				
	Cota da Linha Piezométrica					
----	----------------------------	----------	--	--	--	--
Nó	(m)					
	EPANET	WATERCAD				
1	1524,0	1524,0				
2	1471,75	1474,30				
3	1449,12	1448,24				
4	1461,67	1465,43				
5	1453,46	1450,51				
6	1453,46	1372,09				
7	1446,60	1444,70				
8	1446,60	1372,09				
9	1459,33	1465,67				
10	1459,33	1372,09				
11	1453,48	1371,45				
12	1438,65	1363,23				

Quadro 4.10 – Cotas da Linha Piezométrica

Como pode-se verificar, as diferenças entre as cotas da linha piezométrica foi bastante grande nos nós 6, 8, 10, 11 e 12, que representam os nós que se encontram a jusante das válvulas. As diferenças de resultados são causadas pela diferença de interpretação entre os dois programas: o programa EPANET utiliza as válvulas como ligações (são avaliados apenas o nó de jusante e o nó de montante à válvula, considerando a válvula como se fosse um conduto) e válvulas como nós (a válvula é avaliada no ponto em que está localizada como se fosse um nó).

Conforme WALSKI, CHASE & SAVIC [2000] o modelo utilizado pelo WATERCAD é o que representa melhor a realidade.

4.3. GOLPE DE ARIETE EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Considere uma rede composta por 6 condutos, 6 nós, 3 reservatórios, 1 válvula de controle de fluxo e 1 bomba acompanhada de uma válvula de direcionamento de fluxo. Esta rede é indicada na figura 4.7, com os valores de celeridade de propagação da onda (A), comprimento (L), diâmetro(D), fator de atrito(f) e a vazão arbitrada(Q) por ABREU & GUARGA [1994] em cada conduto.



Figura 4.7- Sistema de Bombeamento - ABREU & GUARGA [1994]

Neste exemplo são analisados os aspectos referentes ao golpe de aríete em sistemas de bombeamento.

Inicialmente são calculadas as condições iniciais do escoamento na rede usando dois programas: WATERCAD e WANDA. O programa WATERCAD é utilizado apenas para verificar os resultados obtidos pelo outro programa.

Os resultados referentes às vazões e pressões iniciais estão indicados nos quadros 4.11 e 4.12.

Condutos	Vazão(m³/s)				
	WATERCAD	WANDA			
1	0,04079	0,04079			
2	0,01721	0,01687			
3	0,02358	0,02392			
4	0,01454	0,01313			
5	0,03175	0,03001			
6	0,00904	0,01078			

Quadro 4.11 – Vazão nos condutos



Figura 4.8 – Esquema do direcionamento das vazões

Condutos	Pressão(N/m²)				
	WATERCAD	WANDA			
1	0,00	0,00			
2	484998	4,905 x 10⁵			
3	820115	8,284 x 10 ⁵			
4	741227	7,461 x 10⁵			
5	0,00	0,00			
6	0,00s	0,00			

Quadro 4.12 - Pressão nos nós

As vazões tiveram valores bastante próximos, resultando na direção esperada. As pressões também resultaram valores coerentes, visto que existe uma bomba na rede. Dos nós que consistem em junções, o nó 2 teve a menor pressão pois é a junção mais elevada da rede. O maior valor de pressão resultante, no nó 3, corresponde a um valor de 84,4 m.c.a, valor que é considerado como pressão excessiva em uma rede de abastecimento, conforme a norma adotada no Brasil, que permite uma pressão máxima de 60 m.c.a.

Nas figuras 4.9 e 4.10 são apresentados os gráficos referentes ao transiente na bomba.



Figura 4.9 – Operação da válvula



- Bomba



Figura 4.10 – Resultados obtido pelo WANDA para a bomba

O fechamento rápido da válvula produz grandes oscilações até que se atinja a estabilização do escoamento na rede, enquanto que a operação lenta de fechamento. da válvula, como pode se notar nos gráficos mostrados nas figura 4.10, produz pequenas oscilações.

Depois de estabilizado, após o fechamento, ocorre uma redução de vazão e por conseqüência uma alteração na carga levando a uma redução de potência na bomba em 8%. Uma oscilação semelhante da carga também foi observada por FUJINO & TAMAI [1999].

4.4.ANÁLISE DE UMA REDE COMPLEXA

Neste caso serão analisados dois aspectos distintos: a) alteração da proporção entre a rugosidade os materiais da rede e suas conseqüências no método quaseestático (programa EPANET); b) Comparação entre o modelo utilizado pelo programa WANDA e o modelo utilizado por KARNEY & MCINNIS [1992].

Considere uma rede composta por dois reservatórios, sete nós, sete condutos, uma chaminé de equilíbrio, três válvulas de controle de fluxo e uma válvula de alívio de pressão. Esta rede é indicada na figura 4.11.



Figura 4.11- Rede Complexa- KARNEY & McINNIS [1992]

Os dados utilizados por KARNEY & MCINNIS[1992] estão nos quadros 4.13 a 4.15.

	Elevação	Carga	Q_{ext}	Descrição
Nó	(m)	(m)	(m³/s)	
1	150	200	-6,211	reservatório
				de carga
				constante
2	100	195,0	+2,000	demanda
				constante
3	150	188,8	+0,000	chaminé de
				equilíbrio
4	150	175,0	+1,183	reservatório
				de carga
				constante
5	100	183,4	+1,000	demanda
				constante
6	50	187,9	+0,000	válvula de
				redução de
				pressão
7	25	151,9	+2,028	válvula de
				controle de
				fluxo para a
				atmosfera

Número	Nó	Nó	Vazão	Comprimento	Diâme-	Veloci-	Fator
do	Inicial	final	Inicial	(m)	tro	dade de	de
Conduto			(m³/s)		(m)	propa-	Atrito
						gação	de
						da onda	Darcy
						(m/s)	
1	1	2	6,212	1001,2	1,500	996,3	0,012
2	2	3	1,708	2000,0	1,000	995,3	0,013
3	3	4	1,183	2000,0	0,750	995,0	0,014
4	3	5	0,524	502,5	0,500	1000,0	0,015
5	6	5	0,476	502,5	0,500	1000,0	0,015
6	2	6	2,503	1001,2	1,000	996,3	0,014
7	6	7	2,028	200,2	0,750	996,3	0,013

Quadro 4.14 - Dados físicos e vazões iniciais dos condutos

Quadro 4.15 - Especificações dos elementos externos

Elemento	Válvula/	Orifício	Tanque/Reservatório				Conector		
Externo	E.	E+	Zinf	Z _{sup}	Ar	f _r	Lc	D _c	f _c
	(m ^{5/2} /s)	(m ^{5/2} /s)	(m)	(m)	(m²)		(m)		
Q _{ext1}	5,0	5,0	150	201,5	œ	0	0	> 0	0
Q _{ext2}	3,0	3,0	180	195,0	5,0	0,020	30	0,500	0,020
Q _{ext3}	1,0	1,0	150	173,6	œ	0	0	> 0	0
Q _{ext6}	0,0	0,049	50	50,0	œ	0	0	> 0	0
Q _{ext7}	0,0	0,300	25	25,0	œ	0	0	> 0	0

A válvula no nó 7 é considerada com uma abertura que decresce de τ =0,6 para τ =0,2 em 10 s.

 a) Alteração da proporção entre a rugosidade os materiais da rede e suas conseqüências no método quase-estático.

Para usar o EPANET, os diâmetros necessitam ser convertidos em mm e as vazões iniciais em I/s. As válvulas serão consideradas como válvulas de obstrução. O desenho esquemático da rede conforme definido no EPANET é indicado na figura 4.12



Figura 4.12-Desenho esquemático da rede usado no EPANET

A fim de testar o modelo quase-estático (modelo utilizado pelo EPANET) quando a proporcionalidade das rugosidades é alterada foi feita a simulação considerando o coeficiente de Hazen-Wiliams do ferro dúctil C=100 (AZEVEDO NETTO, 1995) em todos os condutos.

Utilizando os valores obtidos no gráfico vazão no sistema pelo tempo (figura 4.13) obtemos o volume total de fluido adicionado ao longo do tempo. Isso é feito através da equação :

$$V = \int Q dt \tag{4.1}$$

73

a qual para este caso pode ser calculada na forma

$$V = \frac{t_f - t_i}{2} \cdot \left(Q_f + Q_i\right) \tag{4.2}$$

levando a concluir que o volume é uma função quadrática do tempo, isto é

$$V = f(t^2) \tag{4.3}$$

conforme já discutido no item 3.2.

Os gráficos de variação da vazão com o tempo para cada conduto estão indicados nas figuras 4.14 a 4.22 e os gráficos de variação de pressão no tempo para cada nó estão nas figuras de 4.23 a 4.25.

Analisando esses gráficos nota-se que poucas oscilações existiram no decorrer do tempo. A proporção entre as rugosidades nos condutos foi alterada, levando a uma mudança grande das vazões nos condutos, conforme pode-se observar nos valores iniciais dos gráficos indicados nas figuras 4.14 á 4.22.



Figura 4.13 – Vazão no Sistema



Figura 4.14 – Demanda para o reservatório 1



75











Figura 4.18 – Vazão no conduto 3



Figura 4.19 - Vazão no conduto 4



Figura 4.20 – Vazão no conduto 5.







Figura 4.23-Pressão no Nó 2



Figura 4.24 – Pressão no nó 3



Figura 4.25- Pressão no nó 5

b) Comparação entre o modelo utilizado pelo programa WANDA e o modelo utilizado por KARNEY & MCINNIS [1992].

Neste item será feito uma comparação entre os resultados obtidos por KARNEY & McINNIS [1992] apresentados na figura 4.26 e os resultados obtidos pelo programa WANDA (figura 4.27).



Figura 4.26 - Resultados obtidos por KARNEY & McINNIS [1992]



Figura 4.27a – Resultados obtidos pelo programa WANDA- Válvula no Nó 7



--- Relief Valve (Node 6) Figura 4.27b -- Resultados obtidos pelo programa WANDA -- Válvula de Redução de Pressão



Figura 4.27c – Resultados obtidos pelo programa WANDA – Chaminé de Equilíbrio



Figura 4.27d- Resultados obtido pelo programa WANDA – Vazão na chaminé de equilíbrio



Figura 4.28 – Esquema para resolução de problemas em condutos

KARNEY & McINNIS [1992] utilizam a seguinte forma para a equação de integração das equações de Saint-Venant para condutos :

$$\int_{A}^{P} Q \left| Q \right| dx = \left[Q_{A} + \varepsilon \left(Q_{P} - Q_{A} \right) \right] \left| Q_{A} \right| \Delta x$$
(4.4)

A equação, é integrada ao longo de AP e BP (figura 4.28) pode ser descrita por duas equações em termos das variáveis desconhecidas em P

$$H_{P} = C_{P} - B_{P}Q_{P} \tag{4.5}$$

$$H_P = C_M - B_M Q_P \tag{4.6}$$

$$C_{P} = H_{A} + Q_{A} \Big[B - R \big| Q_{A} \big| (1 - \varepsilon) \Big]$$
(4.7)

$$B_{P} = B + \varepsilon R \left| Q_{A} \right| \tag{4.8}$$

$$C_{M} = H_{B} - Q_{B} \left[B - R \left| Q_{B} \right| (1 - \varepsilon) \right]$$
(4.9)

$$\mathsf{B}_{\mathsf{M}} = \mathsf{B} + \varepsilon \mathsf{R} \left| \mathsf{Q}_{\mathsf{B}} \right| \tag{4.10}$$

onde:

$$B = a/(gA_f); \quad R = f \Delta x/(2gDA_f^2);$$

a=celeridade ;

g=aceleração da gravidade ;

D= diâmetro do conduto ;

A_f= área da seção transversal do conduto;

f = fator de atrito;

A vazão em P é calculada por :

$$Q_{P} = \frac{C_{P} - C_{M}}{B_{P} + B_{M}}$$
(4.11)

O modo de aplicação do método das características utilizado por KARNEY & MCINNIS [1992] difere do usado pelo programa WANDA pela adição de um coeficiente de linearização ϵ .

Considere as equações

$$(H_P)_1 = (C_P)_1 - (B_P)_1 Q_P$$
 (4.12)

$$(H_P)_2 = (C_P)_2 - (B_P)_2 Q_P$$
 (4.13)

Os valores linearizados são indicados pelo índice 1 e os não-linearizados (ϵ =0), que pertencem ao modelo tradicional, são indicados pelo índice 2.

$$(C_P)_1 = H_A + Q_A [B - R | Q_A | (1 - \varepsilon)]$$
 (4.14)

$$(C_P)_2 = H_A + Q_A [B - R|Q_A|]$$
 (4.15)

$$(B_P)_1 = B + \varepsilon R |Q_A| \tag{4.16}$$

$$\left(B_{P}\right)_{2}=B \tag{4.17}$$

Considerando que B, H_A, Q_A, Q_P, R são os mesmos para todas as equações então pode-se afirmar que

$$(C_P)_2 < (C_P)_1$$
$$(B_P)_2 < (B_P)_1$$

De modo análogo pode-se afirmar também que

$$(C_M)_2 < (C_M)_1$$
$$(B_M)_2 < (B_M)_1$$





Levando a concluir que a condição

$$(H_P)_2 < (H_P)_1$$

sempre ocorre, conforme pode-se notar na figura 4.29.

Isto é, o modelo proposto por KARNEY & MCINNIS [1992] sempre fornece valores de carga maiores que os valores de carga obtidos pelo modelo tradicional(utilizado pelo WANDA).

Para as vazões considere

$$(Q_P)_1 = \frac{(C_P)_1 - (C_M)_1}{(B_P)_1 + (B_M)_1}$$
(4.18)

$$(Q_P)_2 = \frac{(C_P)_2 - (C_M)_2}{(B_P)_2 + (B_M)_2}$$
(4.19)

Conforme mostrado anteriormente

$$(C_P)_2 < (C_P)_1$$

 $(B_P)_2 < (B_P)_1$
 $(C_M)_2 < (C_M)_1$
 $(B_M)_2 < (B_M)_1$

Então, de acordo com (4.18) e (4.19)

$$(Q_P)_1 < (Q_P)_2$$

Isto é, as vazões no modelo utilizado pelo programa WANDA serão sempre maiores que as vazões obtidas por KARNEY & MCINNIS [1992].

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1.CONCLUSÔES

Análise de redes malhadas

As velocidades e a perda de carga não possuem grandes diferenças, como pode-se observar pelos respectivos valores de variância amostral.

Os valores de pressão tiveram grandes diferenças. Isso deve-se ao fato de os procedimentos utilizados por cada programa diferirem de maneira significativa, isto é, os parâmetros físicos (cargas e vazões) não são calculados na mesma seqüência.

Análise de uma rede com válvulas redutoras de pressão

Como pode-se observar os resultados obtidos pelos dois programas diferem significativamente nos nós localizados nas proximidades de válvulas. Porém deve-se adotar o modelo utilizado pelo WATERCAD como modelo correto, pois ele é o que mais se aproxima da realidade.

Golpe de aríete em sistemas de bombeamento

O fechamento da válvula produz a queda de potência na bomba. Os resultados demonstram que alterações que podem ser consideradas instantâneas produzem grandes oscilações nas cargas, fato que não ocorre se essas alterações forem produzidas de modo lento.

Análise de uma rede complexa

Os valores de pico das oscilações na rede resultaram mais baixos que àqueles apresentados por KARNEY & McINNIS [1992], que utiliza um modelo diferente do utilizado pelo programa WANDA.

Conclusões Gerais

Da análise teórica dos programas (capítulos 2 e 3) e resultados obtidos nos exemplos numéricos (capítulo 4) pode-se afirmar :

- a) Os programas EPANET E WATERCAD são adequados em casos em que o período de tempo é extenso e por conseqüência o incremento de tempo é grande e que os efeitos devidos a operação de fechamento ou abertura de válvulas no escoamento da rede não sejam analisados.
- b) O WATERCAD apresenta-se mais adequado quando se deseja obter os resultados na forma de tabelas ou efetuar interface com algum banco de dados;
- c) O programa EPANET trata as válvulas como ligações, enquanto o WATERCAD trata as válvulas como nós. Para resolução de problemas que necessitem de resultados relacionados a válvula, o WATERCAD é recomendável;
- d) É permitido o processo de customização no EPANET;
- e) O WATERCAD possui uma biblioteca que pode ser utilizada com as características de válvulas existentes em catálogos de válvulas existentes no mercado;
- f) Para casos em que a ruptura em um ponto da rede existe é recomendável o uso do programa WANDA; pois este faz a análise com o modelo nãopermanente, modelo mais adequado à situação que o modelo quase estático;
- g) No modelo quase-estático a equação da continuidade, $\nabla \bullet \vec{q} = 0$, não precisa necessariamente ser satisfeita quando aplicada a um sistema físico isolado.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

O objetivo de estudar os modelos matemáticos utilizados no dimensionamento de redes de condutos sob pressão foi satisfatoriamente alcançado. Para estudos futuros apresenta-se as seguintes sugestões:

- a) Influência das variações de demanda do sistema;
- b) Estudo de sistemas de bombeamento;
- c) Transientes durante a operação de válvulas;
- d) Estruturas de proteção contra golpes de aríete;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, José M., GUARGA, Rafael; IZQUIERDO, Joaquin, **Transitorios y Oscilaciones**,Oficina de Publicaciones del Centro de Estudiantes de Ingeniería, Montevideo, 1994.
- ANDERSEN, J.H; POWELL, R.S., Simulation of Water Network Containing Controlling Elements., Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 125, No3, May/June, 1999.
- ANDERSON, Edward J.; JAMAL, Khairy Al .. Hydraulic Network Simplifications, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 121, No.3, May/June, 1995.
- AXWORTHY, David H.; KARNEY, Bryan W. Valve Closure in Graph-Theoretical Models for Slow Transient Network Analysis, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.126, No.4, April, 2000.
- BHAVE, Pramod R.; Extended Period Simulation of Water Systems Direct Solution, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol.114, No.5, October, 1988.
- CHAUDRY, M.Hanif & YEVJEVICH, V., Closed-Conduit Flow, Water Resources Publications, Littleton, 1981.
- CULLINANE, M.John ; LANSEY, Kevin E & MAYS Larry W., Optimization-Avaliability-Based Design of Water-Distribuition Networks, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.118, no. 3, March, 1992.

- ELANSARY, Amgad S.; CHAUDRY, M.Hanif, SILVA, Walter, Numerical and experimental investigation of transient pipe flow, Journal of Hydraulic Reaserch, Vol.32,no.5.
- FUJINO,K. & TAMAI,N., Analysis of Water Hammer Based on Network Theory, IX IAHR Congress, Graz, 1999.
- KARNEY, Byran W.; MCINNIS, Duncan, Efficient Calculations of Transient flow im Simple Pipe Networks, Journal of Hydarulic Engineering, ASCE, vol.118, No.7 July, 1992.

KOELLE, Edmund. Transient Analysis of Pressure Conduit Systems, São Paulo, 1986.

LENCASTRE, A., Hidráulica Geral, Fundação Hidroprojecto, Lisboa, 1983.

- LIPPAI, Istvan; HEANEY, James P., LAGUNA, Manuel.. Robust Water System Design with Commercial Intellligent Search Optimizers, Journal of computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.13, No3, July, 1999.
- NETTO, Azevedo, Manual de Hidráulica, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1998
- PORTO, Rodrigo de Melo, Hidráulica básica, São Carlos, 1999
- RAO, H.S.; BREE JR, Don Bree. Extended Period Simulation of Water Systems-Part A, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.103, No.2, February, 1977.
- RAO, H.S; MARKEL,Lawrence,C.; Bree Jr, Don Bree . Extended Period Simulation of Water Systems-Part B, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.103, No.3, March, 1977.
- ROSSMAN, Lewis, Epanet's Manual, Ohio, 2000.
- SHIMADA, Masashi, Time-Marching Approach for Pipe Steady Flows, .Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.114, No.11, November, 1988.
- STREETER, V.L, Transients in Closed Conduit Systems, Edited by Paul Tullis, FortCollins, Colorado, 1981.

- SU, Yu-Chun; MAYS, Larry W. et al. Reliability-Based Optomization Model for Water Distribution Systems, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.114, No.12, December, 1987.
- WALSKI, Thomas; Chase, Donald V. ;Savic, Dragan, Water Distribution Modelling, Haestad Press, Waterbury, 2000.

WANDA 's Manual, Delft Hydraulics Institue.

- WOOD, Don J. & JONES, E., Water-hammer charts for various types of valves, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, January, 1973.
- WYLIE, Benjamin, The MicroComputer and Pipeline Transients, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.109, No.12, December, 1983.

WYLIE, Benjamin; STRETER, Victor E. Fluid Transients, McGrawHill, New York, 1978.

ZIPARRO, Vincent J., & HASEN, Hans, **Davis' Handbook of Applied Hydraulics**, McGraw-Hill, New York, 1993.