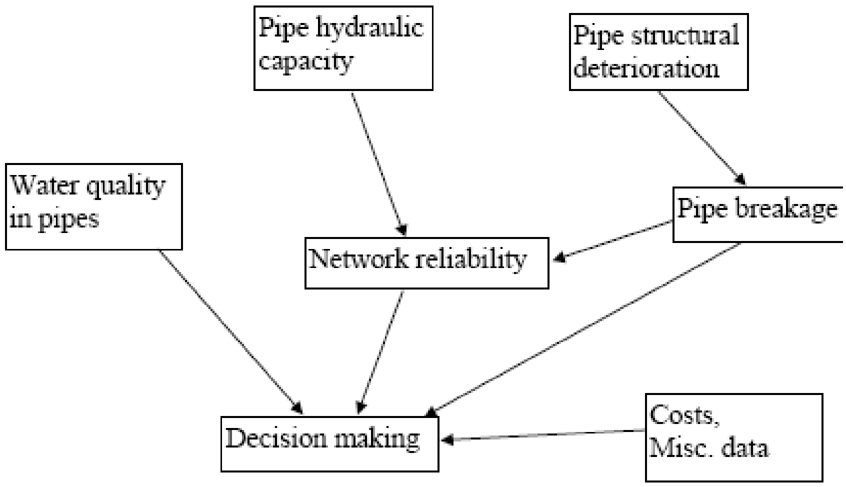
Análise de confiabilidade de um sistema e *reliability* de sistema de rede de água



Capítulo 19- Análise de confiabilidade de um sistema simples e reliability de sistema de água.

19.1 Introdução

Vamos estudar a confiabilidade de sistemas simples e de sistema de abastecimento de água.

Para a análise de confiabilidade de um sistema simples vamos seguir o modelo elaborado por May e Tung, 1992.

Um sistema pode ser composto por vários subsistemas e a confiança de cada sistema depende de como cada componente está interconectado conforme May e Tung, 1992.

Os sistemas podem ser: série e paralelo.

19.2 Sistemas em séries

O sistema mais simples é o sistema em séries onde cada componente tem a sua função. A probabilidade α no tempo t será:

$$\boldsymbol{\alpha(t)= \exp (- \Sigma\lambda i \,.\, t)}$$

Sendo:
$\alpha(t)$=probabilidade no tempo t
λi= falhas/hora do componente i
t= tempo em horas.
exp=e=2,718...

Com dois sistemas em série teremos:

$$\alpha(t)= \exp (- \Sigma\lambda i \,.\, t)$$
$$\alpha(t)= \exp (- \lambda_1 \text{ x } t - \lambda_2 \text{ x } t)= \exp -t(\lambda_1 + \lambda_2)$$

O sistema vai falhar quando:

$$\mathbf{MTTF= 1/ \Sigma \lambda i}$$

Para dois sistemas em série teremos:

$$\mathbf{MTTF= 1 / (\lambda_1 + \lambda_2)}$$

Sendo:
MTTF- *Mean Time To Failure*: que é o valor esperado para termos a falha.

Exemplo 19.1

Seja duas bombas em série sendo que uma tem a taxa de falhas λ_1=0,0003 falhas/hora e a outra λ_2=0,0002 falhas/hora. Calcular a confiança no sistema em série para 1000horas;

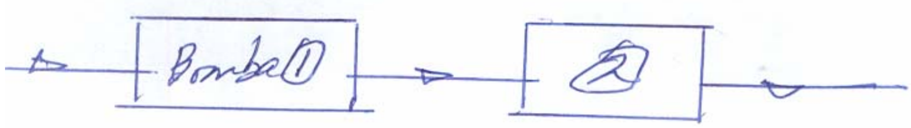


Figura 19.1- Duas bombas em série

$\alpha(t)= \exp (- \lambda_1 \text{ x } t - \lambda_2 \text{ x } t)= \exp [-t(\lambda_1 + \lambda_2)]$
$\alpha(t)= \exp [-1000(0,0003 +0,0002)]$
$\alpha(t)= \exp (-1000\text{x}0,0005)= 0,61$

Portanto, há 61% de confiabilidade no sistema em série para 1000horas de bombeamento.

O sistema vai falhar quando:

$$MTTF= 1 / (\lambda_1 + \lambda_2)= 1 / (0,0003+0,0002)=2000h$$

O sistema em série vai falhar em 2000horas.

19.3 Sistemas em paralelo

Para sistema em série quando um dos sistemas falha, todas as unidades falham, mas para um sistema em paralelo se uma parte do sistema falha, o sistema continua funcionando mesmo não atendendo a objetivo do projeto.

$$\boldsymbol{\alpha(t)= 1 - \Pi(1-e^{-\lambda i \text{ x } t})}$$

Sendo:

Π = produtos $(1-e^{-\lambda i \text{ x } t})$ com i variando de 1 a n dos membros em paralelo.

Para dois subsistemas em paralelo com λ diferentes teremos:

$$\boldsymbol{\alpha(t)= 1 - \{ (1-e^{-\lambda 1 \text{ x } t}) (1-e^{-\lambda 1 \text{ x } t}) \}}$$

O sistema com componentes idênticos não vai falhar quando os n componentes do sistema, isto é, quando i varia de 1 a n

$$\mathbf{MTTF= (1/ \lambda) \text{ x } \Sigma\ 1/i}$$

Para o caso de dois subsistemas em paralelo

$$\mathbf{MTTF= (1/ \lambda) \text{ x } (1/1 +1/2)}$$

Exemplo 19.2

Sejam duas bombas em paralelo iguais com taxa de falhas iguais λ=0,0005 falhas/hora. Calcular a confiança no sistema em paralelo para 1000horas.

$\alpha(t)= 1 - [(1-e^{-\lambda i \text{ x } t}) (1-e^{-\lambda i \text{ x } t})]$
$\alpha(t)= 1 - (1-e^{-\lambda i \text{ x } t})^2$
$\alpha(t)= 1 - (1^2 - 2 \text{ x } 1 \text{ x } e^{-\lambda i \text{ x } t} + e^{-2\lambda i \text{ x } t})$
$\alpha(t)= 2e^{-\lambda i \text{ x } t} - e^{-2\lambda i \text{ x } t}$
$\alpha(t)= 2e^{-0,0005\text{x } 1000} - e^{-2z0,0005 \text{ x } 1000} =0,8452$

Portanto, a confiabilidade no sistema é de 84,52% para 1000horas de bombeamento.

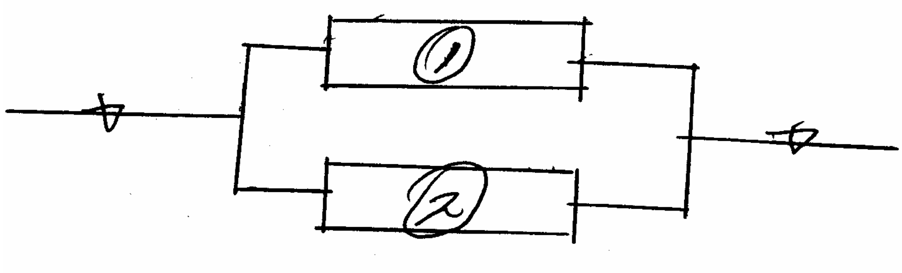


Figura 19.2- Duas bombas em paralelo

$$MTTF= (1/ \lambda) \times (1/1 +1/2)$$
$$MTTF= (1/ 0,0005) \times 1,5= 3000horas$$

O sistema certamente irá falhar em 3000horas.

Exemplo 19.3

Seja uma bomba em série com uma rede adutora sendo que a taxa de falha da bomba é λ_1=0,0005 falhas/hora e a da rede λ_2=0,0001245 falhas/hora. Calcular a confiança no sistema em série para 500horas.

$$\alpha(t)= \exp (- \lambda_1 \times t - \lambda_2 \times t)= \exp -t(\lambda_1 +\lambda_2)$$
$$\alpha(t)= \exp -500(0,0005 +0,0001245)$$
$$\alpha(t)= \exp (-500x0,0006245)= 0,7318$$

Portanto, há 73,18% de confiabilidade no sistema em série para 500horas de trabalho.

O sistema vai falhar quando:

$$MTTF= 1 / (\lambda_1 + \lambda_2)= 1 / (0,0005+0,0001245)= 1601h$$

O sistema em série vai falhar em 1601horas.

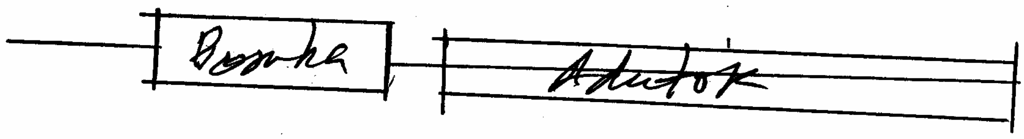


Figura 19.3- Uma bomba e uma adutora em série

Exemplo 19.4

Sejam 3 bombas em série com 3 rede adutora sendo que uma tem a taxa de falha da bomba é λ_1=0,0005 falhas/hora e a da rede λ_2=0,000057 falhas/hora. Calcular a confiança no sistema em série para 500horas.

$$\alpha(t)= \exp (-\lambda_1 \times t -\lambda_2 \times t)= \exp [-t(\lambda_1 +\lambda_2)]$$
$$\alpha(t)= \exp [-500(0,0005x 3 +0,000057x3)]$$
$$\alpha(t)= \exp (-500x0,001671)= 0,4338$$

Portanto, há 43,38% de confiabilidade no sistema em série.

O sistema vai falhar quando:

$$MTTF= 1 / (\lambda_1 + \lambda_2)= 1 / (0,0005 x3+0,000057x3)= 598h (25dias)$$

O sistema em série vai falhar em 598horas.

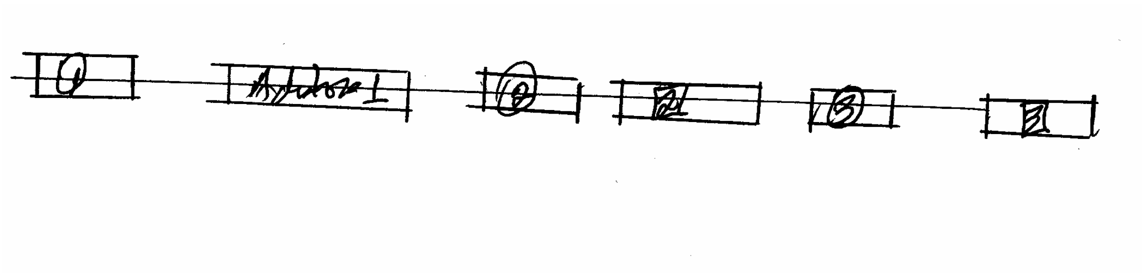


Figura 19.4- Três bombas em série e três adutoras em série

19.4 Tempo de reparo de vazamentos

Walski e Pellicia, 1982 desenvolveram uma equação que fornece o número de horas para a execução de reparo de um vazamento em função do diâmetro da rede.

$$\mathbf{tr= 2{,}59\ d^{\ 0{,}285}}$$

Sendo:
tr= número de horas para o conserto do vazamento
d= diâmetro do tubo em mm.

Tabela 19.1- Tempo de execução de um vazamento de acordo com o diâmetro. $t=2{,}59 \times D^{0{,}286}$ sendo D em mm

(mm)	Tempo de execução de um vazamento
75	8,8
100	9,6
150	10,8
200	11,7
250	12,5
300	13,1
400	14,3
500	15,2
600	16,0
700	16,7
800	17,4
900	18,0

Shamir, 1988 informa que o tempo de reparo de uma rede de água está entre 3horas e 72horas.

Nota: precisamos achar dados brasileiros para o tempo de conserto de vazamentos de redes em função do diâmetro.

19.5 Custo de conserto de vazamento em rede

O custo do conserto de vazamento de rede de água inclui as peças, materiais, mão de obras e leis sociais. Importante observar que não inclui o custo da água perdida num determinado tempo.

Supomos a equação:

$$\mathbf{Cvaz= 147 \times D^{0{,}4}}$$

Sendo:
Cvaz= custo por vazamento (R$)
D=diâmetro da rede (mm)
Custo médio achada em 1995+ US$ 351/vazamento
1US$ = R$ 1,78 (27/12/07)
US$ 351,00/vaz=R$625/vaz (ano base 1995)

Nota: a equação do custo do conserto do vazamento em função do diâmetro do tubo deverá ser atualizada e revista, pois trata-se de estimativa feita pelo autor.

Tabela 192- Custo de reparo de vazamentos por diâmetro da rede em mm.

Diâmetro (mm)	Custo/m (R$/m) jan/08
75	990
100	1110
150	1306
200	1465
250	1602
300	1723
400	1933
500	2114
600	2274
700	2419
800	2551
900	2674

Nota: rever o custo de conserto de um vazamento de rede em função do diâmetro da rede.

19.6 Custo por metro de tubulação

O custo por metro da tubulação prevê os custos da demolição, retirada da pavimentação, fornecimento de materiais, mão de obra, leis sociais e reposição de pavimentação. A rede velha poderá ser retirada ou ficar abandonada.

Obtivemos usando a planilha Excel a equação da potência.

$$C = 1,93\ D^{0,89}$$

Sendo:
C= custo da tubulação (R$/m)
D= diâmetro da tubulação (mm)

Tabela 19.3 Custo unitário de reposição de tubulação com material, mão de obra e pavimentação asfáltica (dezembro/2007)

Diâmetro do tubo (mm)	Custo/m (R$/m)
75	90
100	116
150	167
200	216
250	263
300	309
400	399
500	487
600	573

700	657
800	740
900	822

19.7 Custo da relação Custo de reparo do vazamento (C) / custo por metro de tubo (F)

É conveniente fazer a relação C/F para transformar numa equação de uma reta ou de uma potência.

Loganatham, 2002 sugere a equação de uma reta, mas curva que mais se ajustou foi a de potência obtida com planilha Excel.

No caso será: $$C/F= 91,19 \cdot D^{-0,49}$$

Sendo:

C/F= relação custo do reparo do vazamento/ custo por metro de tubo

D= diâmetro da tubulação (mm)

Na Tabela (19.4) estão os dados fornecidos no qual foi achada a curva da potência.

Tabela 19.4- Calculo da relação C/F

Diâmetro da rede	Custo de nova tubulação F	Reparo de vaz. C	Relação C/F
(mm)	(R$/m)	(R$/vaz)	
75	90	990	10,99
100	116	1110	9,55
150	167	1306	7,83
200	216	1465	6,80
250	263	1602	6,09
300	309	1723	5,57
400	399	1933	4,84
500	487	2114	4,34
600	573	2274	3,97
700	657	2419	3,68
800	740	2551	3,45
900	822	2674	3,25

19.8 Taxa de vazamento critica J*

Loganatham, 2002 no seu trabalho para achar a taxa de vazamento crítica de uma rede de água achou a seguinte equação:

$$J^*= \ln (1 + R)/ \ln [1 + C/(F \times L)]$$

Sendo:

J*= número de vazamentos por ano no trecho de rede. **Nota: não é vaz/km**.

R= taxa anual de inflação. Brasil atualmente 2008 R=0,045

C= custo para reparo de vazamentos (R$/reparo)

F= custo para colocar nova tubulação (R$/m)

L= comprimento da tubulação no trecho (m)

Loganatham, 2002 sugere na equação acima substituir C/F por uma reta, mas a melhor equação que achamos foi de uma potência, ou seja, **$C/F=91,19 \times D^{-0,49}$** sendo Diâmetro em milímetros.

Teremos então:

$$J^*= \ln (1 + R)/ \ln [1 + C/(F \times L)]$$

$$J^*= \ln (1 + R)/ \ln [1 + 91,19 \times D^{-0,49}/ L]$$

Como o valor de R=0,045 é uma constante, mudando só o diâmetro D e o comprimento L , podemos fazer a Tabela (19.5).

Tabela 19.5- Valores de vazamentos críticos por ano dependendo do diâmetro e comprimento da tubulação.

Compr. L	Diâmetro da rede de água			
	150	200	250	300
(m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	0	0	0	0
500	3,8	4,3	4,8	5,3
1000	7,5	8,6	9,6	10,5
1500	11,2	12,9	14,4	15,7
2000	14,9	17,2	19,2	20,9
2500	18,6	21,5	23,9	26,2
3000	22,4	25,7	28,7	31,4
3500	26,1	30,0	33,5	36,6
4000	29,8	34,3	38,3	41,8
4500	33,5	38,6	43,1	47,1
5000	37,2	42,9	47,8	52,3

Colocando-se no gráfico a Tabela (19.5) obtemos a Figura (19.5).

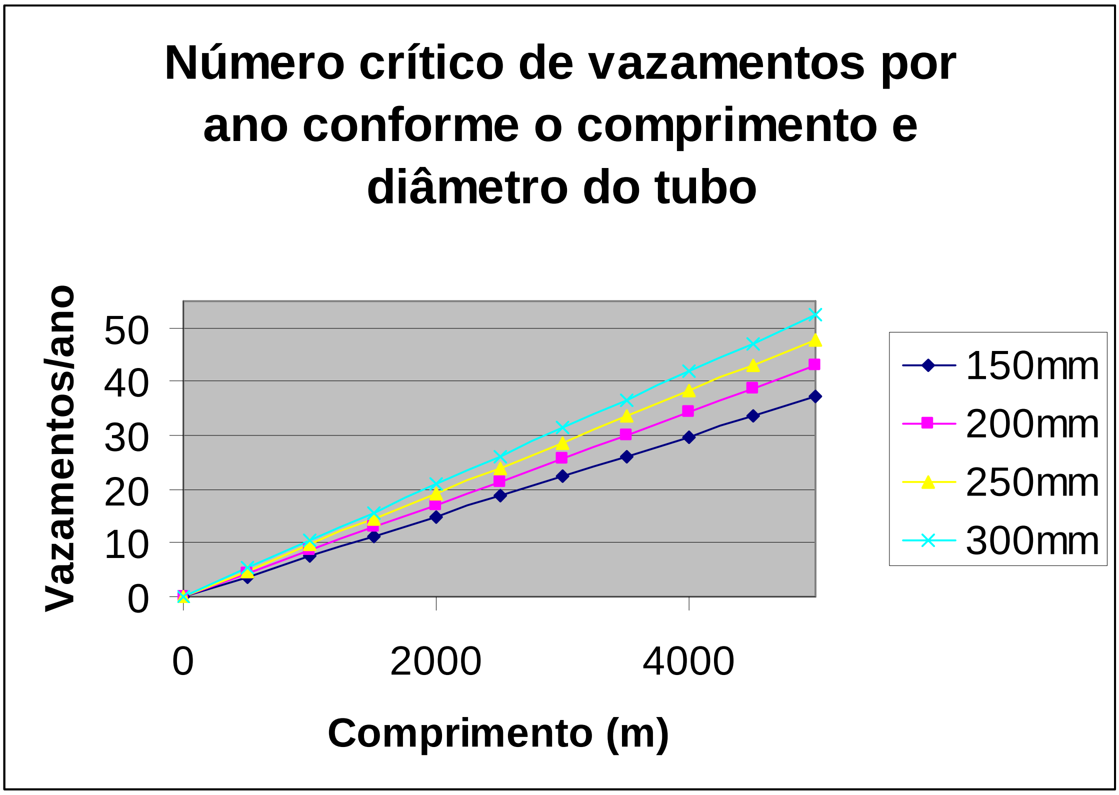


Figura 19.5- Vazamentos máximos no ano em função do diâmetro da rede e do comprimento do trecho, considerando R=0,045.

Verificando-se a Figura (19.5) podemos ver que uma tubulação com diâmetro de 150mm e comprimento de 4000m quando tiver 30 vazamentos/ano está na hora de ser trocada.

19.9 Quantidade de vazamentos por km e por ano

Walski, 1992 recomenda a fórmula **exponencial** de Shamir e Howard, 1979 para calcular a quantidade de vazamento por km de rede:

$$J = Jo \cdot e^{b(t-to)}$$

Sendo:
J= taxa de vazamentos por ano e por km no tempo t
Jo= taxa de vazamentos por ano e por km no tempo to
e= 2,718
t= ano
to= ano base

O valor de b pode ser igual a 0,051 que achamos em Gauarulhos e que corresponde a um acréscimo de vazamentos anual de 5,1%.

Os valores de b conforme Walski e Pellicia, 1982 para vários tipos de tubos de ferro ferro fundido variam entre 0,021/ano a 0,014/ano.

Tung, 1992 apresenta a equação de Walski e Pellicia, 1982 feita para a cidade de Binghmton no Estado de New York para tubos de ferro fundido dúctil.

$$\mathbf{J = 0{,}039 \ . \ e^{0{,}0137t}}$$

Sendo:
J= taxa de vazamentos/ Km x ano
t= idade da tubulação (anos)

Obtivemos para Guarulhos: $\mathbf{J = 0{,}317 \ . \ e^{0{,}051(t-1975)}}$

19.10 Dados SAAE de 1995

Para o ano de 1995 obtivemos:

- Tubos de PVC : **0,05 vazamentos / Km x ano**
- Tubos de ferro fundido: **0,73vazamentos/km x ano.**

Observe-se que a taxa de vazamentos para tubos de ferro fundido é muito grande em comparação com os tubos de PVC e isto se deve a idade da tubulação.

Conversão de unidades

0,73 vazamentos/ km x ano= 0,73 / (1000m x 365 dias x 24h)=0,000000083 vaz/m x hora

Exemplo 19.5

Seja uma adutora de recalque de 1500m. Achar a taxa de falha para tubulação de ferro fundido.
Considerando
λ= 0,000000083x 1500m=0,0001245 falhas/hora

As redes de distribuição de Guarulhos, em 1995, apresentaram a seguinte disposição, conforme o material da tubulação conforme Tabela (19.2).

Tabela 19.6- Comprimento e materiais do SAAE em 1995

Material	Comprimento (km)	SAAE (%)
Aço	14	0,86
Ferro Fundido	691	42,65
Fibrocimento	4	0, 25
PVC	911	56,24
Total	1.620	100,00 %

Toda a rede do SAAE é nova, isto é, possui menos de **43 anos**. Somente cerca de 40 km de rede de ferro fundido têm em torno de **50 anos** de idade, o que não é muito (2,47%).

A Tabela (19.7) apresenta vazamentos/km de rede e por ano de diversas cidades da Europa.

Tabela 19.7- Taxa de reposição e vazamento em kmxano para 1995

Pesquisa na Europa 1988-1994	Compr. da rede	Rede Vaz/km/ano	Idade Média da rede de água (anos)	Taxa de reposição (%)	Expectativa de vida (anos)
Zurique	1.090	0,25	45	1,7	60
Amsterdã	2.000	0,70	40	1,7	60
Viena	3.000	0,91	40	1,2	85
Genebra	1.180	0,15	30	1,0	100
Hamburgo	5.420	0,92	40	0,9	110
Munique	3.200	0,15	45	0,8	125
Milão	2.200	0,35	40	0,7	145
Antuérpia	2.060	0,15	30	0,6	165
Budapeste	4.200	0,25	40	0,2	500
Londres	28.700	0,20	70	0,1	1000

O custo do reparo do **ramal predial** foi de US$ 266,00 por unidade, considerando a substituição completa do ramal e um acréscimo de preço de 100%.

O custo de **reparo da rede** distribuidora foi de US$ 350,00 por unidade, levando em consideração os preços de materiais e serviços, incluindo pavimentação.

A SABESP escolheu duas situações características: redes novas de PVC com menos de 30 anos e pressões dentro das normas e redes antigas de ferro fundido, com mais de 30 anos e pressões maiores do que 60 mca.

No SAAE, para as medições de vazamentos visíveis e invisíveis, que são executadas anualmente, a média é de:

0,55 vazamentos por rede/km e

5,79 vazamentos por ramais prediais/km conforme Tabela (19.8).

Tabela 19.8- Vazamentos visíveis e invisíveis no SAAE em 1995

Tipos de vazamentos	Vazamentos/km SABESP ferro fundido com mais de 30 anos (invisíveis)	Vazamentos/km SAAE (visíveis)
redes	0,32	0,55
ramais prediais	1,19	5,79
Totais	1,51	6,34

19.11 Vazamentos por Km x ano

Shamir, 1988 apresenta dados de vazamentos por km e por ano de diversas cidades americanas conforme Tabela (19.9) e salienta que existem mais dados de falhas em tubulações do que em bombeamento. Com relação a bombas esclarece que é comum usar-se **1000horas** para verificar as falhas.

Nos estudos Shamir, 1988 tomou 0,625vazamento/km x ano como base.

Tabela 19.9- Vazamentos em diversas cidades dos Estados Unidos conforme Shamir, 1988

Cidade	Ano	vaz/kmxano
Boston	1969-1970	0,022
Chicago	1973	0,034
Denver	1973	0,097
Houston	1973	0,802
Indianopolis	1969-78	0,052
Los Angeles	1973-74	0,027
Louisville	1964-76	0,076
Milwaukee	1973	0,145
New Orleans	1969-78	0,423
New York City	1976	0,047
San Francisco	1973	0,066
Saint Louis	1973	0,066
Troy, N.Y.	1969-78	0,104
Washington, DC	1969-78	0,072

Usando a Tabela (19.6) com dados de vazamento por km e por ano de **Guarulhos** nos anos de 1975 a 1994 (20anos) obtemos a equação abaixo com coeficiente de determinação R^2=0,63 e desvio padrão de 0,21vaz/km;

$$J = Jo \cdot e^{b(t-to)}$$

$$J = 0{,}317 \cdot e^{0{,}051(t-1975)}$$

Sendo:

J= taxa de vazamento anual por km de rede de água no instante t

Jo= taxa de vazamento anual no instante to.

e= 2,718...

b= taxa constante= 0,051 vaz/ano

t= ano

to=ano base 1975,

Pelo valor de b=0,051 podemos ver que a taxa de crescimento anual de vazamentos é de 5,1%.

Na Tabela (19.10) estão os vazamentos de rede de água de Guarulhos desde 1975 a 1994 sendo que estão inclusos todos os tipos de tubos existentes no SAAE, como ferro fundido cinzento, ferro fundido dúctil e PVC.

Na Figura (19.6) está o gráfico dos dados e da curva exponencial achada em Excel com coeficiente de determinação R^2=0,63 e desvio padrão igual a 0,21 vaz/km.

Tabela 19.10- Vazamento por km de rede de água desde 1975 a 1994 (20anos). Incluem todos os tipos de tubos (ferro fundido cinzento, dúctil e PVC)

ano	vaz/km rede
1.975	0,371
1.976	0,256
1.977	0,270
1.978	0,439
1.979	0,426
1.980	0,434
1.981	0,452
1.982	0,299
1.983	0,508
1.984	0,543
1.985	0,684
1.986	0,468
1.987	0,634
1.988	0,629
1.989	0,733
1.990	1,141
1.991	0,855
1.992	0,723
1.993	0,591
1.994	0,588
1995	0,590
Desvio padrão= 0,21vaz/km	

Desvio padrão:
Usando o Excel o desvio padrão dos dados A4:A26 calcula-se assim**=DESVPAD(A4:A26)**

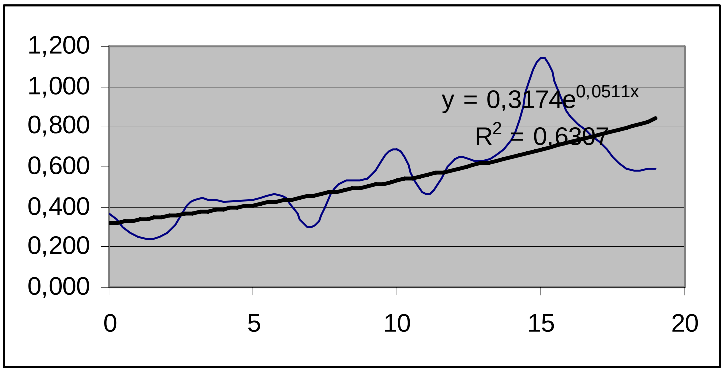


Figura 19.6- Curva achada em Excel dos vazamentos/km de Guarulhos de 1975 a 1994.

Na Tabela (19.11) estão os vazamentos/km de 21 cidades do Canadá observando a variação entre os diversos materiais.

Tabela 19.11- Vazamentos por km em 21 cidades do Canadá citado por Rajani e McDonald, 1995 in Dallius, 2004

Material	Porcentagem de rede	vaz/km
Ferro fundido	50	0,359
Dúctil	24	0,095
Cimento amianto	12	0,058
PVC	10	0,007
outros	4	
Total	100	

Baseado em percepção de administradores de água Pelletier et al, 2003 **in Dallius, 2004** fizeram o seguinte resumo da Tabela (19.12).

Tabela 19.12- Níveis aceitáveis de vazamentos em redes de água no citado por Pelletier et al, 2003 in Dallius, 2004

Níveis	Vazamento/km de rede de água
Alto	0,4
Aceitável	0,20 a 0,39
Bom	0,2

Os estudos de Khomsi et al, 1996 e Loganathan et al, 2002 in Dallius, 2004 mostraram que os vazamentos são proporcionais a idade da tubulação.

19.12 Método do *minimum cut-set*

Vamos explicar o método do *minimum cut-set* baseado em Sied, 2003.

O método do *minimum cut-set* destina-se a calcular a confiabilidade em um sistema Rs. O método diz que quando um sistema de tubos falha causa falha em todo o sistema.

Vamos propor que um vazamento causado por uma tubulação o trecho pode ser isolado de todo o sistema. Desta maneira separamos em grupo de 2 a três trechos e isolamos do sistema e para cada grupo achamos a probabilidade de falhas P1, P2,P3. Supõe-se que a falha em dois ou três tubos se fazem randomicamente. Fazemos cálculo novamente usando o método de Hardy-Cross, por exemplo,para cada suposição dos trechos.

Se no sistema de distribuição de água temos K número de trechos de tubos, podemos achar T subsistemas escolhidos aleatoriamente sendo que cada um tem de um tubo, dois tubos ou três tubos.

Por exemplo se o sistema tiver três trechos, a probabilidade de falhas dos três trechos será: P(MC)= P1 x P2 x P3x P12

Como escolhemos inúmeros subsistemas aconselha-se que sejam escolhidos no mínimo 4 subsistema, isto é, 4 *minimum cut-sets* e pelo principio da inclusão e exclusão das lei da probabilidade, a probabilidade de falhas no sistema Ps será a soma das probabilidades de cada subsistema.

Ps= P(MC1) + P(MC2)+ P(MC3)+ P(MC4)+....

A confiabilidade do sistema Rs será:

Rs= 1- Ps

Na Figura (19.6) temos uma rede malhada. Podemos randomicamente escolher falhas em varias trechos e deverá ser escolhido no mínimo em quatro trechos. Em cada trecho escolhido tiramos um tubo ou dois tubos.

Em cada trecho calculamos a falha P(MC1) , P(MC2), P(MC3) e P(MC4) lembrando que cada PMCi é obtido multiplicando as falhas de cada trecho como variáveis independentes que são. P(CM1)= P1 x P2 x P2 x P4

Depois achamos a falha total Ps= P(MC1)+ P(MC2) +P(MC3)+ P(MC4)

Achamos em seguida a *Reliabiity* R= 1-Ps

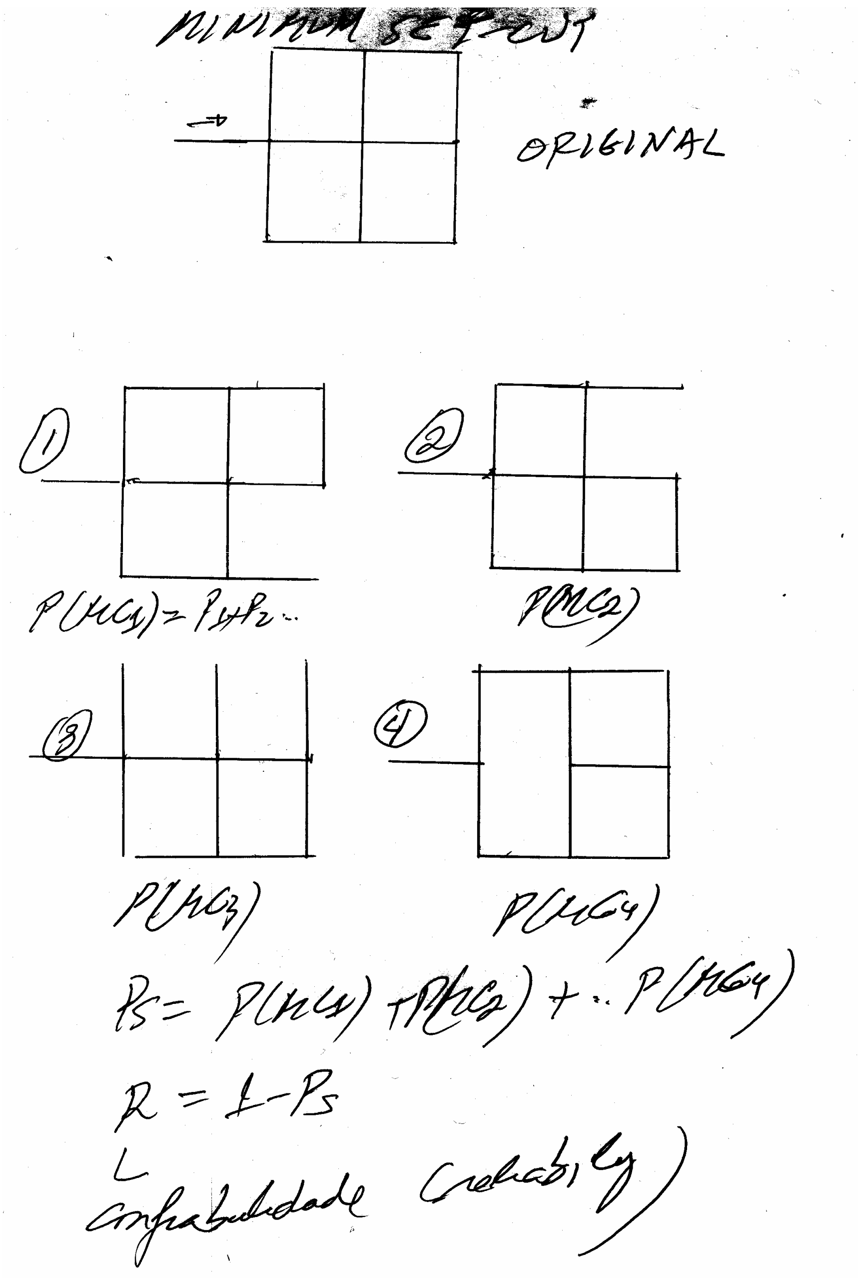


Figura 19.6- Exemplo de aplicação do método do minimum cut-set

Como se pode ver o método dá muito trabalho. Iremos somente mostrar em três trechos de rede como faz a sua aplicação usando o Exemplo 19.9.

Uma definição sobre confiança num sistema de abastecimento é devido a Goulter, 1995 e Culliname et al 1992 conforme MUHAMMAD, 2004: **confiança é a habilidade do sistema de atender as demandas que foram previstas, tanto em vazões como em pressões. O foco principal são as falhas no bombeamento e nos vazamentos.**

São feitos os cálculos normais usando um método determinístico como o Método de Hardy-Cross e depois verificam-se a confiabilidade devido a vazamentos nas redes e nas bombas. Para bombeamento é usado normalmente 1000horas de funcionamento para se verificar as falhas.

Para cada cut-set destacado são feitos os cálculos e o método recomenda no mínimo 4 cut-set.

Como se pode ver a incerteza nos dados é muito grande e daí ser realmente muito difícil de se calcular a confiabilidade de um sistema de abastecimento de água.

$$J = Jo \cdot e^{b(t-to)}$$

Sendo:
J= taxa de vazamento anual por km de rede de água no instante t
Jo= taxa de vazamento anual no instante to.
e= 2,718...
b= taxa constante
t= ano
to=ano base

Walski, 1992 depois do desenvolvimento matemático e de simplificações chegou a equação:

$$J^* = (Cr/Cb) \times \ln(1 + i)$$

Sendo:
J*= valor limite (valor crítico) dos vazamentos no trecho de L metros. É o número de vazamentos máximo por ano e não vazamento por km de rede.
Cr=custo da substituição da rede em R$. É o custo por metro de rede multiplicado pelo comprimento da rede.
b=taxa constante no caso b=0,0511 (5,11% de vazamentos ao ano)
Cb= custo dos reparos dos vazamentos em R$. É o custo de cada vazamento multiplicado pelo número de vazamentos estimados para o ano.
i= taxa de juros anuais em fração. Brasil tem média de 4,5% = 0,045

O valor de **J* é um valor crítico**, pois, com ele podemos decidir se vamos ou não substituir o trecho de rede de água.

Outros autores como Loganathan in MUHAMMAD, 2004 foram além de Walski e calcularam a probabilidade P(B) para a substituição do tubo da seguinte maneira:

$$Z = J^* - Jj$$

Nota: J* é o número de vazamentos por ano e não é vaz/km. Caso queiramos comparar temos que transformar J* em vazamentos por km de rede para poder comparar com Jj.

Com o valor de Z usados adequadamente conforme os exemplos, podemos entrar numa curva normal e acharmos a probabilidade da falha P(B). Tais estudos já foram feitos no Capítulo 5 denominado- Análise de Incerteza.

Mas a probabilidade total de falha ou probabilidade completa de falha Pcom depende ainda de um outro fator que é a capacidade da tubulação de transportar a vazão necessária P(A).

Se tivermos P(A) e P(B) podemos ter a probabilidade completa da falha da seguinte maneira:

Pcom= P(A) x P(B)

O valor da probabilidade para o transporte da vazão P(A) pode ser obtido assim:

Z= Qp – Qd

Sendo:
Z= com o valor adequado mostrando nos exemplos de Z podemos entrar na curva normal.
Qp= vazão disponível máxima na tubulação (m^3/s) usando por exemplo Hazen-Willians.
Qd= vazão existente (m^3/s) calculado por método determinístico como o método de Hardy-Cross.

Exemplo 19.6
Calcular a probabilidade P(B) de falha para substituição do tubo dados:
Diâmetro= 250mm
Custo por metro do tubo= R$ 263,00/m
Comprimento do tubo (m)= 2000m
Custo total da substituição do tubo=Cr= R$263,00/m x 2000m=R$ 526.000,00
Custo médio para reparar um vazamento: R$ 1602,00/vazamento conforme Tabela (19.8)
J= número de vazamentos no tempo t igual a 2008

$$\mathbf{J=0{,}317 \times e^{[0{,}051(t-1975)]}} \quad \text{sendo } \mathbf{b=0{,}051}$$

Para o ano t=2008 2008-1975=33anos
Número de vazamentos: J=0,317 x exp [0,051 (t-1975)]
Número de vazamentos: J=0,317 x exp [0,051 (2008-1975)]=**1,71vaz/km**
Número de vazamentos= J=2000m/ 1000m) x1,71 vaz/km=3,42vazamentos no trecho
Custo para reparar os vazamentos em 3,42 vazamentos a m durante um ano=
Cb=3,42 x R$ 1.602,00/vaz= R$ 5.478,04
Taxa anual de juros (Brasil, 2008)= 4,5%=0,045

J*= (Cr/Cb) x ln (1 + i)

J*= (5260000/5478,04) x ln (1 + 0,045) =4,22vaz/ano para o trecho em questão que tem comprimento de 2000m.

J* (vaz/km)= 4,22vaz/ano/ (2000m/1000m)= 2,11 vaz/km

Nota: cuidado para não esquecer que J* deverá estar em vaz/km!

J*= 2,11 vaz/km. Para vários valores de J* achamos o desvio padrão de σ_R =1,27 vaz/km.

Supondo que J=1,71 vaz/km no ano 2008 sendo o desvio padrão de 0,21vaz/km=σ_C

$$Z= J^* - \mathbf{0{,}317 \times e^{[0{,}051(t-1975)]}}$$

Para a curva normal precisamos do valor de Z= (X- μ)/ σ.
$\mu_{MS}= \mu_R - \mu_C = 2{,}11 - 1{,}71 = 0{,}40$
$\sigma^2_{MS} = \sigma^2_R + \sigma^2_C = (1{,}27)^2 + (0{,}21)^2$
$\sigma_{MS} = 1{,}27$
Conforme Chow, et al 1988.

$$-\frac{\mu_{MS}}{} = \frac{-0{,}40}{} = -0{,}31 = Z$$

σ_{MS} 1,27

Portanto, o risco R=0,37829 para que dê problemas e para a confiabilidade
P= 1- R=1-0,37829=0,6217
Portanto P(B)= 0,37829

Exemplo 9.7
Calcular o valor de P(A). Vamos supor que o diâmetro da rede seja de 0,25m.

O valor de Qp é obtido usando a equação da continuidade considerando uma velocidade máxima aceitável como por exemplo V=0,6 + 1,5D.

V=0,6+1,5 x 0,25= 0,975m/s
Área= 3,1416 x $0,25^2$/ 4= 0,0491m^2
Q= Ax V = 0,0491m^2 x 0,975m/s= **0,0479m^3/s =Qp=μ_R**
O coeficiente de variação =0,072 calculado no apêndice
Desvio padrão= 0,0479m^3/s x 0,072=0,0034m^3/s=σ_R
A capacidade do tubo de vazão é a resistência com o **subscrito R.**

Para a carga suponhamos que os erros na **previsão da demanda** sejam de 15%, ou seja, CV=0,15.
Suponhamos que usando o método de Hardy-Cross achamos Qd=μ_C =**0,0369 m^3/s**

Z= Qp – Qd

Sendo:
Z= número para entrar na curva normal
Qp= vazão disponível máxima na tubulação (m^3/s) usando por exemplo Hazen-Willians.
Qd= vazão existente (m^3/s) calculado por método determinístico como o método de Hardy-Cross.

$$\sigma_C = CV \times \mu_C = 0,15 \times 0,0369 m^3/s = 0,0055 m^3/s$$

Para a curva normal precisamos do valor de **Z= (X- μ)/ σ.**

$$\mu_{MS} = \mu_R - \mu_C = 0,0479 - 0,0369 = 0,011 m^3/s$$
$$\sigma^2_{MS} = \sigma^2_R + \sigma^2_C = (0,0034)^2 + (0,0055)^2$$
$$\sigma_{MS} = 0,0065 m^3/s$$

Portanto:

$$-\frac{\mu_{MS}}{\sigma_{MS}} = \frac{-0,011 m^3/s}{0,0065 m^3/s} = -1,69 = Z$$

A probabilidade para que dê problema R= 0,0455 e portanto P(A)= 0,0455

Exemplo 19.8

Se P(A)= 0,0455 e P(B)= 0,37829
são **variáveis independentes**, podemos calcular a probabilidade de completa falha Pcom.

Pcom= P(A) x P(B)

Pcom= 0,0455x 0,37829=0,0173

Portanto, a probabilidade de completa falha no trecho da rede em questão é de 1,73% e 98,27% para que não haja nenhum problema.

Poderíamos assim calcular a probabilidade para que não haja problema de todos os trechos de uma rede de água e multiplicando todas elas teríamos a probabilidade final.

Em um exemplo feito por MUHAMMAD, 2004 chegou a confiança no sistema de redes da cidade de Al-Khobar entre 65% e 70% e comparou com a cidade de Tucson no Arizona que tem confiabilidade de 96%.

No exemplo abaixo acharemos para a confiabilidade da rede 97,79%.

Exemplo 19.9

Vamos mostrar uma rede de água calculada por Silvestre pelo Método de Hardy-Cross. Após a rede calculada os resultados estão na Figura (19.7).

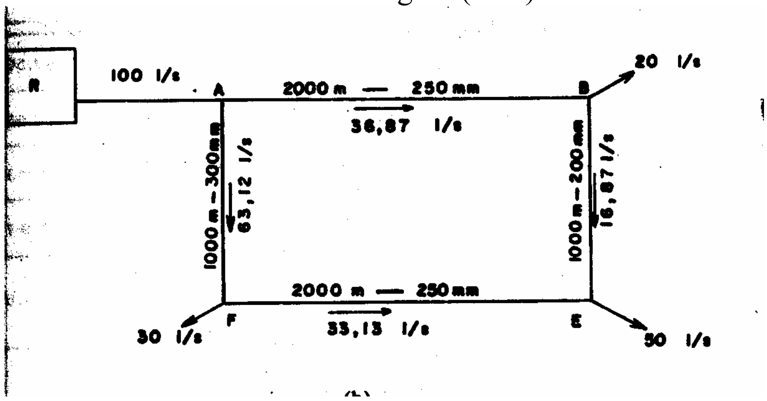


Figura 19.7- Esquema de rede calculada pelo método de Hardy-Cross conforme Silvestre, 1983

Aplicamos o conceito já mostrado nos exemplos anteriores em cada tramo e no final teremos a confiabilidade de toda a rede que será:

Pfinal= P(trecho1) x P(trecho2) x P(trecho3) x P(trecho 4)

Os cálculos estão na Tabela (19.13).

Tabela 19.13- Minimum cut set

Trecho	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Vazão (m3/s)	Velocidade	Área (m2)	
AB	0,25	2000	0,03687	0,975	0,049088	
BE	0,2	1000	0,01687	0,9	0,031416	
Qp (m3/s)	CVp	Desvio p. R	CVd	Desvio p.C	Desvio p.MS	
0,047860313	0,072	0,003445943	0,15	0,005531	0,006516	
0,0282744	0,072	0,002035757	0,15	0,002531	0,003248	
R-C	(R-C)/MS	Risco	P=1-R	Custo (R$/m)	Custo subst R$	Custo R$/reparo
0,010990313	-1,686612009	0,045838991	0,954161009	263	526000	1602
0,0114044	-3,511501157	0,000222792	0,999777208	216	216000	1465
Num de vaz no trecho	Custo reparo vaz. Trecho	Taxa de juros anual	J* vaz/ano	J* vaz/km	Ano base	
3,423261239	5484,064505	0,045	4,221847082	2,110924	2008	
1,71163062	2507,538858	0,045	3,791625091	3,791625	2008	
J vaz/km	MS	Desv R	Desvio padrão C	MS desvio p.	Z	
1,71163062	0,399292921	0,21	1,270886855	1,28812	-0,30998	
1,71163062	2,079994471	0,21	1,270886855	1,28812	-1,61475	
P(B)=R	P=1-R	Pm=Pax PB				
0,378287654	0,621712346	P1=0,017340324				
0,053182209	0,946817791	P2=0,000009446				
		P(MC1)=P1xP2= 0,0000001604				

Conclusão: o trecho separado de dois tubos tem probabilidade de falhas P(MC1)=0,0000001604

Nota:
Podemos obter o valor de Z corresponde a curva de distribuição normal usando a planilha Excel com a função: =DIST.NORMP(Z)

Da mesma maneira para os outros dois trechos de tubulação acharíamos: P(MC2)=0,000027398

A falha total do sistema seria:
Ps= P(MC1)+P(MC2)= 0,0000001604 + 0,000027398=0,0000275584
Mas a reliability (confiabilidade) Rs do sistema será:
Rs= 1-Ps= 1-0,0000275584=0,999982
Rs= 99,9982%

19.13 Observações de Thomas M. Walski, 1992

Walski, 1992 alerta as **consideráveis incertezas** na estimativa de custos de conserto dos vazamentos e na obtenção da taxa de crescimento de vazamentos.

Segundo, Walski, 1992 os resultados devem servir de guia para tomada de decisão.

Adverte ainda que para tubos curtos como tubos de 15m e com 35 vazamentos por ano a decisão é clara de que o mesmo deverá ser substituído. Aconselha ainda aos engenheiros para que verifiquem a causa do vazamento antes da tomada de decisão.

19.14 Modelos de cálculos de confiabilidade de uma rede de água.

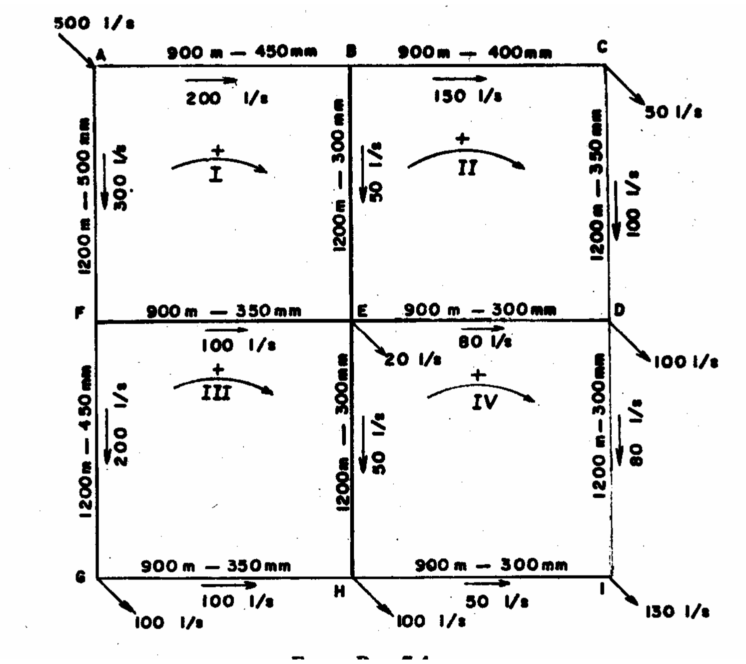
Existem **dezenas de métodos de cálculos de confiabilidade** numa rede de água, o que significa que não há um método aceito por todos.

Vamos citar alguns autores destes modelos extraídos do texto de Kleiner, 2007.

1. Wagner et al, 1988
2. Cullinane et al, 1987
3. Goulter e Bouchart, 1999
4. Fujiwara e De Silva, 1990
5. Bao e Mays, 1990
6. Omsbee e Kessler, 1990
7. Quimpo e Shamsi, 1991
8. Awumah et al, 1991
9. Bouchart e Goulter, 1991
10. Ostfeld e Shamir, 1996
11. Woodburn et al, 1987
12. Su e Mays, 1988
13. Kim e Mays, 1994
14. Arulraj e Suresh, 1995
15. Kleiner, 1996
16. Walski, 1987
17. Walski e Pellicia, 1982
18. Shamir e Howard, 1979

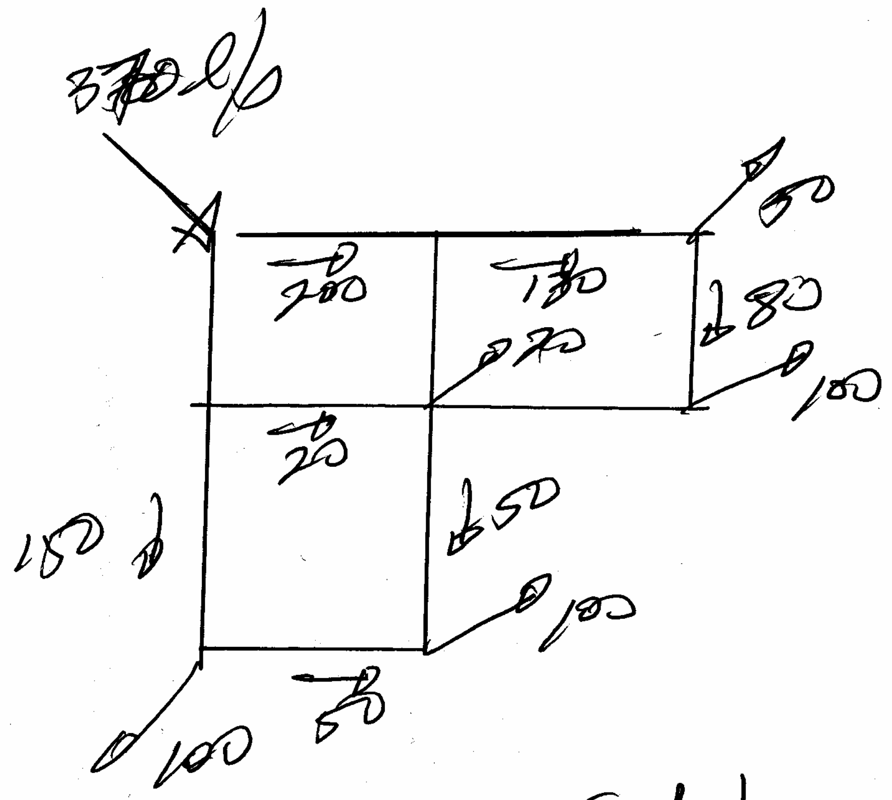
Exemplo 19.10

Tomamos um exemplo de rede malhada de Cross feito por Silvestre página 104 e aplicamos o método do mínimo cut set.



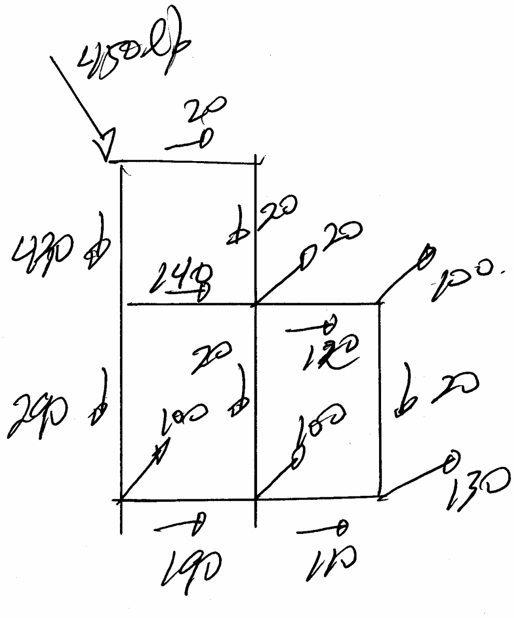
O método do mínimo cut-set sugere que se retire da tubulação um tubo, ou dois podendo ser até 3 ou 4.

Isto foi feito criando as figuras abaixo, onde foram inicializados no método de Hardy-Cross e posteriormente calculadas as vazões para a nova conformação. Em alguns nós reduzi a vazão para a metade no nó.

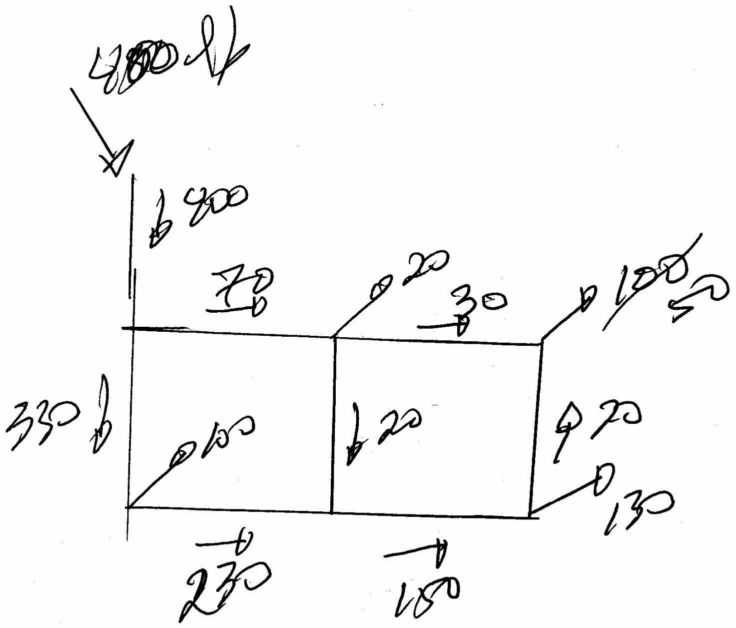


CROSS5.dat

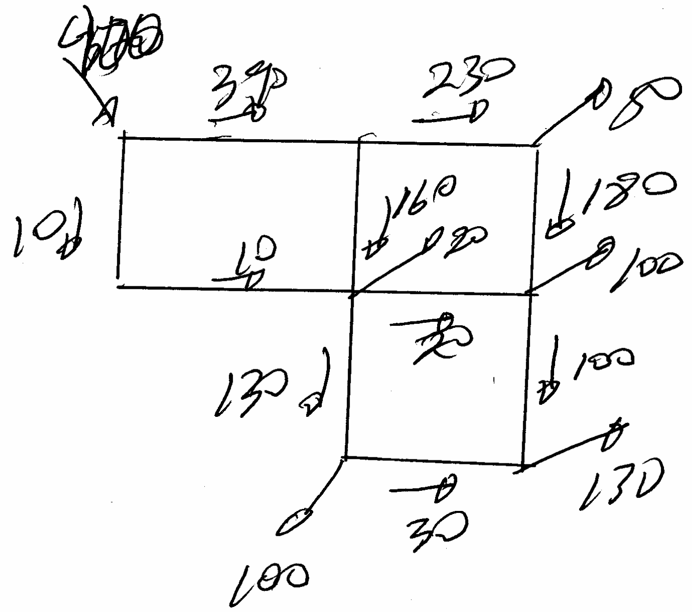
R5.TXT



cross6-dat
R6.txt



CROSS7.dat
R7.TXT



CROSS8.DAT
R8-TXT

Foram então calculado. Primeiramente calculamos a rede pelo método de Hardy-Cross tradicional obtendo no arquivo R4.txt o seguinte:

R4.txt (original)

```
SI 30  0.00100000005  1.00700004E-006  100. 9
 ESPEC. UNIDADES S.I.,VISCOSIDADE EM M**2/SEC= 0.0000010
 TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES=   30

 TUBO Q(CFS OU M**3/S)  L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG
    1            0.200       900.0       0.450     100.00000
    2            0.100       900.0       0.350     100.00000
    3            0.100       900.0       0.350     100.00000
    4            0.150       900.0       0.400     100.00000
    5            0.080       900.0       0.300     100.00000
    6            0.050       900.0       0.300     100.00000
    7            0.300      1200.0       0.500     100.00000
    8            0.050      1200.0       0.300     100.00000
    9            0.100      1200.0       0.350     100.00000
   10            0.200      1200.0       0.450     100.00000
   11            0.050      1200.0       0.300     100.00000
   12            0.080      1200.0       0.300     100.00000
 IND=
   4   1   8  -2  -7   4   4   9  -5  -8   4
   2  11  -3 -10   4   5  12  -6 -11   0   0
   0
 ITERACAO  N0.   1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0384
 ITERACAO  N0.   2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0116
 ITERACAO  N0.   3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0053
 ITERACAO  N0.   4 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0021
 ITERACAO  N0.   5 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0008
 TRAMO VAZAO   VELOCIDADE   PERDA      PERDA/1000
    1     0.214      1.34      5.34      5.93
    2     0.091      0.95      3.77      4.18
    3     0.095      0.99      4.03      4.48
    4     0.148      1.18      4.78      5.31
    5     0.068      0.97      4.64      5.16
    6     0.064      0.91      4.11      4.57
    7     0.286      1.46      7.29      6.08
    8     0.066      0.93      5.76      4.80
    9     0.098      1.02      5.69      4.74
   10     0.195      1.23      5.99      4.99
   11     0.069      0.98      6.29      5.24
   12     0.066      0.93      5.81      4.84
 IX=
   1   1   2   4   3   9   6  12   9  -6   8 -11   5  -2   4
  -7   1   0   8  -3   7 -10   4   0   2   8   5   0   0   0
   0   0   0   0
 NUMERO DO NO     COTA TERRENO
       1                       900.000
       2                       900.000
       3                       900.000
       4                       900.000
       5                       900.000
       6                       900.000
       7                       900.000
       8                       900.000
       9                       900.000
```

NO'	COTA PIEZ.	COTA TERR.	PRESSAO EM COLUNA DAGUA
1	959.942	900.000	59.942
2	954.680	900.000	54.680
3	949.912	900.000	49.912
4	952.615	900.000	52.615
5	948.891	900.000	48.891
6	944.246	900.000	44.246
7	946.617	900.000	46.617
8	942.575	900.000	42.575
9	938.452	900.000	38.452

R5.trt

```
SI 30  0.00100000005  1.00700004E-006  100. 8
 ESPEC. UNIDADES S.I.,VISCOSIDADE EM M**2/SEC= 0.0000010
 TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES=   30

 TUBO Q(CFS OU M**3/S)  L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG
    1           0.200       900.0       0.450     100.00000
    2           0.020       900.0       0.350     100.00000
    3           0.050       900.0       0.350     100.00000
    4           0.130       900.0       0.400     100.00000
    5           0.020       900.0       0.300     100.00000
    7           0.170      1200.0       0.500     100.00000
    8           0.070      1200.0       0.300     100.00000
    9           0.070      1200.0       0.350     100.00000
   10           0.100      1200.0       0.450     100.00000
   11           0.050      1200.0       0.300     100.00000
 IND=
   4   1   8  -2  -7   4   4   9  -5  -8   4
   2  11  -3 -10   0   0   0   0   0   0   0
   0
 ITERACAO  N0.   1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0523
 ITERACAO  N0.   2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0165
 ITERACAO  N0.   3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0039
 ITERACAO  N0.   4 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0009
 TRAMO VAZAO   VELOCIDADE   PERDA      PERDA/1000
    1     0.155      0.98      2.97      3.30
    2     0.055      0.57      1.46      1.63
    3     0.060      0.62      1.70      1.89
    4     0.111      0.88      2.81      3.12
    5     0.039      0.56      1.65      1.83
    7     0.215      1.09      4.26      3.55
    8     0.045      0.63      2.79      2.33
    9     0.051      0.53      1.70      1.42
   10     0.110      0.69      2.06      1.72
   11     0.040      0.57      2.33      1.94
 IX=
   1   1   2   4   3   9   6   5   5   2   4  10   7   3   8
  11   0   0   0   0   0   0   0
 NUMERO DO NO     COTA TERRENO
       1                     900.000
       2                     900.000
       3                     900.000
       4                     900.000
       5                     900.000
       6                     900.000
       7                     900.000
       8                     900.000
 NO' COTA PIEZ. COTA TERR.  PRESSAO EM COLUNA DAGUA
       1   960.000   900.000    60.000
       2   957.047   900.000    57.047
       3   954.249   900.000    54.249
       4   949.444   900.000    49.444
       5   950.901   900.000    50.901
       6   952.565   900.000    52.565
```

```
      7   947.377   900.000    47.377
      8   945.666   900.000    45.666
```

R6.txt

```
SI 30  0.00100000005  1.00700004E-006  100. 8
 ESPEC. UNIDADES S.I.,VISCOSIDADE EM M**2/SEC= 0.0000010
 TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES=   30

 TUBO Q(CFS OU M**3/S)  L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG
    1             0.020       900.0       0.450     100.00000
    2             0.140       900.0       0.350     100.00000
    3             0.190       900.0       0.350     100.00000
    5             0.120       900.0       0.300     100.00000
    6             0.110       900.0       0.300     100.00000
    7             0.430      1200.0       0.500     100.00000
    8             0.200      1200.0       0.300     100.00000
   10             0.290      1200.0       0.450     100.00000
   11             0.020      1200.0       0.300     100.00000
   12             0.020      1200.0       0.300     100.00000
 IND=
   4   1   8  -2  -7   4   5  12  -6 -11   4
   2  11  -3 -10   0   0   0   0   0   0   0
   0
 ITERACAO  N0.   1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0717
 ITERACAO  N0.   2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0139
 ITERACAO  N0.   3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0009
 TRAMO VAZAO   VELOCIDADE   PERDA      PERDA/1000
    1    -0.009     -0.06     -0.02     -0.02
    2     0.203      2.11     16.38     18.20
    3     0.156      1.62     10.16     11.29
    5     0.122      1.73     13.58     15.09
    6     0.108      1.52     10.85     12.05
    7     0.459      2.34     17.53     14.61
    8     0.171      2.42     33.77     28.14
   10     0.256      1.61      9.95      8.29
   11     0.051      0.73      3.64      3.03
   12     0.022      0.32      0.76      0.63
 IX=
   1   1   2   8   5   5   6  12   9  -6   8  -3   7 -10   4
  -7   1   0   4   2   5  11   8   0   0   0   0   0   0   0
   0   0   0   0
 NUMERO DO NO     COTA TERRENO
      1                      900.000
      2                      900.000
      4                      900.000
      5                      900.000
      6                      900.000
      7                      900.000
      8                      900.000
      9                      900.000
 NO' COTA PIEZ. COTA TERR.  PRESSAO EM COLUNA DAGUA
      1   960.055   900.000    60.055
      2   960.015   900.000    60.015
      4   942.552   900.000    42.552
      5   926.139   900.000    26.139
```

6	912.465	900.000	12.465
7	932.614	900.000	32.614
8	922.475	900.000	22.475
9	911.687	900.000	11.687

R7.txt

```
SI 30  0.00100000005  1.00700004E-006  100. 9
 ESPEC. UNIDADES S.I.,VISCOSIDADE EM M**2/SEC= 0.0000010
 TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES=   30

 TUBO Q(CFS OU M**3/S)  L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG
    2            0.070       900.0       0.350     100.00000
    3            0.230       900.0       0.350     100.00000
    5            0.030       900.0       0.300     100.00000
    6            0.150       900.0       0.300     100.00000
   10            0.330      1200.0       0.450     100.00000
   11            0.020      1200.0       0.300     100.00000
   12            0.020      1200.0       0.300     100.00000
 IND=
   4   2  11  -3 -10   4   5 -12  -6 -11   0
   0
 ITERACAO  N0.   1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.1453
 ITERACAO  N0.   2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0136
 ITERACAO  N0.   3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0030
 ITERACAO  N0.   4 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0002
 TRAMO VAZAO   VELOCIDADE   PERDA      PERDA/1000
    2     0.168      1.75     11.60     12.89
    3     0.132      1.37      7.42      8.24
    5     0.094      1.33      8.38      9.31
    6     0.086      1.22      7.11      7.90
   10     0.232      1.46      8.27      6.89
   11     0.054      0.77      4.03      3.36
   12    -0.044     -0.62     -2.74     -2.28
 IX=
   4   2   5   5   6 -12   9  -6   8  -3   7 -10   1   0   8
 -11   5   0   0   0   0   0   0
 NUMERO DO NO     COTA TERRENO
       4                 900.000
       5                 900.000
       6                 900.000
       7                 900.000
       8                 900.000
       9                 900.000
       0                   0.000
       0                   0.000
       0                   0.000
 NO' COTA PIEZ. COTA TERR.  PRESSAO EM COLUNA DAGUA
       1   924.006     0.000   924.006
       4   924.000   900.000    24.000
       5   912.377   900.000    12.377
       6   903.988   900.000     3.988
       7   915.751   900.000    15.751
       8   908.350   900.000     8.350
       9   901.244   900.000     1.244
```

R8.txt

```
SI 30  0.00100000005  1.00700004E-006  100. 9
 ESPEC. UNIDADES S.I.,VISCOSIDADE EM M**2/SEC= 0.0000010
 TOLERANCIA NA VAZAO =0.001 NO DE ITERACOES=   30

 TUBO Q(CFS OU M**3/S)  L(FT OU M) D(FT OU M) HW OU RUG
    2           0.070       900.0       0.350     100.00000
    3           0.230       900.0       0.350     100.00000
    5           0.030       900.0       0.300     100.00000
    6           0.150       900.0       0.300     100.00000
   10           0.330      1200.0       0.450     100.00000
   11           0.020      1200.0       0.300     100.00000
   12           0.020      1200.0       0.300     100.00000
 IND=
   4   2  11  -3 -10   4   5 -12  -6 -11   0
   0
 ITERACAO  N0.   1 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.1453
 ITERACAO  N0.   2 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0136
 ITERACAO  N0.   3 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0030
 ITERACAO  N0.   4 SOMA DAS CORR. DA VAZAO=    0.0002
 TRAMO VAZAO   VELOCIDADE   PERDA      PERDA/1000
    2     0.168      1.75     11.60     12.89
    3     0.132      1.37      7.42      8.24
    5     0.094      1.33      8.38      9.31
    6     0.086      1.22      7.11      7.90
   10     0.232      1.46      8.27      6.89
   11     0.054      0.77      4.03      3.36
   12    -0.044     -0.62     -2.74     -2.28
 IX=
   4   2   5   5   6 -12   9  -6   8  -3   7 -10   1   0   8
 -11   5   0   0   0   0   0   0
 NUMERO DO NO     COTA TERRENO
       4                      900.000
       5                      900.000
       6                      900.000
       7                      900.000
       8                      900.000
       9                      900.000
       0                        0.000
       0                        0.000
       0                        0.000
 NO' COTA PIEZ. COTA TERR.  PRESSAO EM COLUNA DAGUA
       1   924.006     0.000   924.006
       4   924.000   900.000    24.000
       5   912.377   900.000    12.377
       6   903.988   900.000     3.988
       7   915.751   900.000    15.751
       8   908.350   900.000     8.350
       9   901.244   900.000     1.244
```

Com as novas vazões calculadas entramos nas tabelas e calculamos o P(A) e P(B) de cada tubo e depois calculamos o P(MCi) de cada um dos quatro grupo.

Depois calculamos Ps que é a soma de

Ps=P(MC5)+ P(MC6)+ P(MC7)+ P(MC8)

Ps= 3,0E-90 + 2,6E-107 + 5,0E-47 + 1,9E-59= 5,023E-47

O minimum cut set foi P(MC7)= 5,0E-47

A confiabilidade da rede Rs = 1- Ps=1- 5,023E-47 =1

Conclusão: a confiabilidade da rede é de praticamente 100%

Entrada de dados para o Método de Hardy-Cross
Cross5.dat

```
'SI' 30    0.001   0.000001007    100.0    8
'HW'  1    0.2   900.0    0.45    100.    0  0
'HW'  2    0.02   900.0    0.35    100.    0  0
'HW'  3    0.05   900.0    0.35    100.0    0  0
'HW'  4    0.13  900.0    0.40    100.0    0  0
'HW'  5    0.02  900.0    0.30    100.0    0  0
'HW'  7    0.17   1200.0   0.50    100.0    0  0
'HW'  8    0.07  1200.0   0.30    100.0    0  0
'HW'  9    0.07   1200.0   0.35    100.0    0  0
'HW'  10   0.1   1200.    0.45    100.0    0  0
'HW'  11   0.05  1200.    0.30    100.0    0  0

'&&'  0 0 0 0 0 0 0

'PT'  4   1   8   -2  -7   4  4   9   -5   -8   4
'PT'    2  11   -3   -10  0 0   0 0 0 0 0

'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'    1   960
'&&'    0   0
'PT'    1   1   2    4    3   9    6  5 5  2    4
'PT'    10   7  3 8  11 0   0   0  0  0  0


'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'      1     900.00
'PT'      2     900.00
'PT'      3     900.00
'PT'      4     900.00
'PT'      5     900.00
'PT'      6     900.00
'PT'      7     900.00
'PT'      8     900.00

'&&'      0    0
```

Cross6.dat

```
SI' 30    0.001   0.000001007    100.0    8
'HW'  1    0.02  900.0    0.45    100.    0  0
'HW'  2    0.14  900.0    0.35    100.    0  0
'HW'  3    0.19  900.0    0.35    100.0    0  0
'HW'  5    0.12  900.   0.30    100.0    0  0
'HW'  6    0.11  900.0    0.30    100.0    0  0
'HW'  7    0.43   1200.0   0.50    100.0    0  0
'HW'  8    0.20  1200.0   0.30    100.0    0  0

'HW'  10   0.29   1200.    0.45    100.0    0  0
'HW'  11   0.02  1200.    0.30    100.0    0  0
'HW'  12   0.02  1200.    0.30    100.0    0  0
'&&'  0 0 0 0 0 0 0

'PT'  4   1   8   -2  -7   4  5   12    -6   -11  4
'PT'  2    11  -3    -10     0   0   0   0  0   0   0

'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'    1   960
'&&'    0   0
'PT'   1  1  2  8   5   5   6   12   9    -6   8
'PT'   -3  7   -10   4  -7    1   0 4   2    5    11
'PT'   8  0   0  0  0  0  0   0   0   0   0

'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'      1     900.00
'PT'      2     900.00
'PT'      4     900.00
'PT'      5     900.00
'PT'      6     900.00
'PT'      7     900.00
'PT'      8     900.00
'PT'      9     900.00
'&&'      0    0
```

Cross7.dat

```
SI' 30    0.001   0.000001007    100.0    9
'HW'  2    0.07   900.0    0.35    100.    0  0
'HW'  3    0.23   900.0    0.35    100.0    0  0

'HW'  5    0.03  900.0    0.30    100.0    0  0
'HW'  6    0.15  900.0    0.30    100.0    0  0



'HW'  10   0.33  1200.    0.45    100.0    0  0
'HW'  11   0.02  1200.    0.30    100.0    0  0
'HW'  12   0.02  1200.    0.30    100.0    0  0
'&&'  0 0 0 0 0 0 0

'PT'  4   2   11   -3  -10   4  5  -12   -6   -11   0


'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'    4   957,451
'&&'    0   0
'PT'    4   2   5   5 6   -12  9  -6   8 -3  7
'PT'    -10 1 0 8 -11 5 0  0  0  0   0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0


'PT'      4     900.00
'PT'      5     900.00
'PT'      6     900.00
'PT'      7     900.00
'PT'      8     900.00
'PT'      9     900.00
'&&'      0    0
```

Cross8.dat

```
'SI' 30    0.001   0.000001007    100.0    8
'HW'  1    0.39   900.0    0.45    100.    0  0
'HW'  2    0.01   900.0    0.35    100.    0  0

'HW'  4    0.23  900.0    0.40    100.0    0  0
'HW'  5    0.02  900.0    0.30    100.0    0  0
'HW'  6    0.03  900.0    0.30    100.0    0  0
'HW'  7    0.01   1200.0   0.50    100.0    0  0
'HW'  8    0.16  1200.0   0.30    100.0    0  0
'HW'  9    0.18   1200.0   0.35    100.0    0  0

'HW'  11   0.13  1200.    0.30    100.0    0  0
'HW'  12   0.10  1200.    0.30    100.0    0  0
'&&'  0 0 0 0 0 0 0

'PT'  4   1   8   -2  -7   4  4   9   -5   -8   4
'PT'  5   12   -6   -11 0    0 0  0  0   0 0

'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'    1   960
'&&'    0   0
'PT'    1   1   2      4    3   9    6  12   9   -6   8
'PT'   -11   5   -2    4   -7  1 0  2    8   5  0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'      1     900.00
'PT'      2     900.00
'PT'      3     900.00
'PT'      4     900.00
'PT'      5     900.00
'PT'      6     900.00

'PT'      8     900.00
'PT'      9     900.00
'&&'      0    0
```

Cross4.dat (original)

```
'SI' 30    0.001   0.000001007    100.0    9
'HW'  1    0.2   900.0    0.45    100.    0  0
'HW'  2    0.1   900.0    0.35    100.    0  0
'HW'  3    0.1   900.0    0.35    100.0    0  0
'HW'  4    0.15  900.0    0.40    100.0    0  0
'HW'  5    0.08  900.0    0.30    100.0    0  0
'HW'  6    0.05  900.0    0.30    100.0    0  0
'HW'  7    0.3   1200.0   0.50    100.0    0  0
'HW'  8    0.05  1200.0   0.30    100.0    0  0
'HW'  9    0.1   1200.0   0.35    100.0    0  0
'HW'  10   0.2   1200.    0.45    100.0    0  0
'HW'  11   0.05  1200.    0.30    100.0    0  0
'HW'  12   0.08  1200.    0.30    100.0    0  0
'&&'  0 0 0 0 0 0 0

'PT'  4   1   8   -2  -7   4  4   9   -5   -8   4
'PT'    2  11   -3   -10  4   5   12   -6   -11 0    0

'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'    1   960
'&&'    0   0
'PT'    1   1   2      4    3   9    6  12   9    6   8
'PT'    11   5    2    4   10   7 3  0  0    0   0
'&&' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

'PT'      1     900.00
'PT'      2     900.00
'PT'      3     900.00
'PT'      4     900.00
'PT'      5     900.00
'PT'      6     900.00
'PT'      7     900.00
'PT'      8     900.00
'PT'      9     900.00
'&&'      0    0
```

19.15 Bibliografia e livros consultados

-AL-ZAHARINI, MUHAMMAD et al. *Hydraulic reliability analysis of water distribution system.* Journal of the Institution of Engineers, Singapore, Vol. 1, Issue, 1, 2004. Department of civil engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals, 92 páginas.

-KLEINER, Y. *Rehabilitation planning of water distribuition networks: the component and the system perspective*. IRC-IR-735, 33 páginas. http:// irc.nrc-cnrc.gc.ca. acessado em 28 de dezembro de 2007.

-LOGANATHAN, G.V. et al. *An optimal replacement scheduling model for water distribution systems.* Universidade de Virginia, 2002

-MAY, LARRY W. e TUNG, YEOU KOUNG. *Hydrosystems engineering & management.*McGraw-Hill 1992, 530 páginas.

-MISIUNAS, DALLIUS. *Burst detection and location in pipelines and pipe networks*. Lund University, 2004, Sweden. ISBN 91-88934-30-6.

-SHAMIR, URI et al. *Water distribution reliability simulation methods*. ASCE, 1988.

-SILVESTRE, PASCHOAL. *Hidráulica gera*l. Rio de Janeiro, 1983, 316páginas

-SYED, JUNED LAIQ. *Risk and hydraulic reliability analysis of water distribution systems.* Novembro de 2003, 210páginas.

-TOMAZ, PLINIO. *Conservação da água.* Guarulhos, 1999, 294páginas.

-WALSKI, W. THOMAS. *Analysis of water distribuition systems.* Krieger, 1992, 275 páginas.

-VIRGINIA WATER RESOURCES CENTER,ano 2002. *Otimal Design rehabilitation stragegies for reliable water distribution systems.*
http://www.vwrrc.vt.edu/pdfs/specialreports/sr202002.pdf

Apêndice A

Tabela 19.14- Alguns coeficientes de variação

	Coeficiente de variação CV= **σ/ μ** **Média=μ**
C_{HW}	0,1
Diâmetro (m)	0,025
Perda de carga unitária J (m/m) em Hazen-Willians	0,0514
Qp(m^3/s)	0,072
Qd (Plínio)	0,15

Fórmula de Hazen-Willians

$$\mathbf{Q=0{,}27842\ C \times D^{2{,}63}\ J^{0{,}54}}$$

Sendo:
Q= vazão (m^3/s)
D= diâmetro (m)
C= coeficiente de Hazen-Willians
J= perda de carga unitária (m/m)

Fazendo as simplificações, teremos:

$$\Omega^2_{Q} = \Omega^2_{c} + (2{,}63)^2\Omega^2_{D} + (0{,}54)^2\Omega^2_{J}$$

$$\Omega^2_{Q} = 0{,}01^2 + (2{,}63)^2\ (0{,}025)^2 + (0{,}54)^2 0{,}0514^2 \ =0{,}005193$$

$$\Omega_Q = \sqrt{0{,}006193} \ =0{,}072$$

Portanto, o coeficiente de variação de Q é 0,072

A previsão de consumo tem erro de no mínimo 15% (0,15). Como exemplo para a carga, ou seja, de 0,50m^3/s para a cidade temos:

$\mu_{QC} = 0{,}50 m^3/s$

Variância $\sigma_{QC} = 0{,}15 \times 0{,}50 = 0{,}075 m^3/s$

CV=0,15

Tabela 19.15- Áreas da curva normal padrão Φ (z)=P(Z≤z)
Fonte: Tung, 1992 Z= (X- μ)/ σ.

TABLE 5.2.1
Standard normal curve areas (Devore, 1987) $\Phi(z) = P(Z \leq z)$.

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
−3.4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
−3.3	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
−3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
−3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
−3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
−2.9	0.0019	0.0018	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
−2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
−2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
−2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
−2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
−2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
−2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
−2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
−2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
−2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
−1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
−1.8	0.0359	0.0352	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
−1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
−1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
−1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
−1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0722	0.0708	0.0694	0.0681
−1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
−1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
−1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
−1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
−0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
−0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
−0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
−0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
−0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
−0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
−0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
−0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
−0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
−0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641

Tabela 19.16- Áreas da curva normal padrão Φ (z)=P(Z≤z)
Fonte: Tung, 1992 Z= (X- μ)/ σ.

TABLE 5.2.1 continued

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9278	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998