



29 - 31 OUTUBRO 1997 - BRASÍLIA - BRASIL

**XVIII CILAMCE
CONGRESSO ÍBERO LATINO-AMERICANO DE
MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA**

ANAIIS

VOLUME I

**Brasília
29-31 de Outubro de 1997**



Universidade de Brasília

Ref 074.	151
Não Linearidade Geométrica nos Núcleos Resistentes D. D. Mori, I. G. Matias Junior (São Carlos) Ref 049.	159
Investigations on Beam Problems Using the hp Clouds Method Part 2 - Numerical Aspects P. T. R. Mendonça, C. S. Barcellos (UFSC), C. A. Duarte (Texas) Ref 237.	167
Novo Tratamento no Estudo Paramétrico de Tensões em Juntas Tubulares C. A. N. Dias (Poli-USP) Ref 078.	175
Função Convexa de Redistribuição de Esforços Solicitantes para o Dimensionamento de Estruturas E. L. Mello (UnB) Ref 396.	185

2 Engenharia do Meio Ambiente/Environmental Engineering

Aspectos Numéricos do Cálculo do Risco de Falha em Controle de Cheias, M. G. Andrade, S. A. Meira, A. A. F. M. Carneiro (São Carlos), M. D. Fragoso (LNCC) Ref 025... ..	195
Numerical Simulation of Turbulent Environmental Flows, P. C. S. Juca, C. R. Maliska (UFSC) Ref 201.	201
Numerical Modelling of Flow over Complex Terrain, F. T. Boçon, (UFPR) C. R. Maliska (UFSC) Ref 048.	209
Modelling Respiration Rates in a SBR Treating Domestic Wastewater, R. S. Bernardes (UnB) Ref 89.	219
Sobre a Simulação da Sedimentação em Batelada, S. C. A. França, E. C. Biscaia Jr, G. Massarani (COPPE), Ref 032.	227

3 Métodos de Elementos de Contorno/Boundary Element Methods

Uso de Elementos de Contorno Descontínuos para a Simulação de Percolação Bidimensional em Meios Não Homogeneos Isotrópicos, W. P. B. Sampaio, J. P. S. Azevedo (COPPE) Ref 123.	237
A Boundary Element Optimised Block Manipulation for Subregion Problems, J. A. F. Santiago, J. C. F. Telles (COPPE), Ref 320.	245
Uma Formulação H-Hierárquica com Reanálise local para Elasticidade 2D, Utilizando o MEC P. H. R. Perni, J. C. F. Telles (COPPE), Ref 386.	253
Um Novo Enfoque para a Formulação Hipersingular do MEC para Solução de Problemas Potenciais Bidimensionais, P. Fleury Jr, W. J. Mansur, J. P. S. Azevedo (COPPE), Ref 122.	261
A 3D Boundary Integral Formulation for the Analysis of thin Acoustic Barriers over an Impedance Plane, L. A. Lacerda (WIT), L. C. Wrobel (Brunel U), H. Power (WIT), W.	

ASPECTOS NUMÉRICOS DO CÁLCULO DO RISCO DE FALHA EM CONTROLE DE CHEIAS

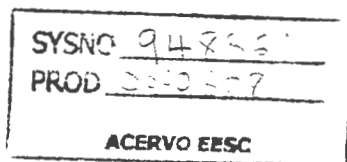
M.G. Andrade¹; S.A. Meira¹; A.A.F.M. Carneiro²; M.D. Fragoso³

¹USP-ICMSC-SCE-CP.668-13.560-970-São Carlos-SP.; ²USP-EESC-SEL-CP.359-13.560-250 São Carlos-SP; ³LNCC-22.290-160-Rio de Janeiro-RJ.

INTRODUÇÃO

O sistema brasileiro de geração de energia elétrica é um sistema hidrotérmico com forte predominância de geração hidroelétrica. Desta forma, a maioria dos reservatórios do sistema hidroelétrico foi projetado e construído visando exclusivamente a geração de energia elétrica. Para se efetuar o controle de cheias é necessário prever a disponibilidade de volumes vazios nos reservatórios capazes de absorver parcelas determinadas das afluições, evitando ou reduzindo o impacto de danos causados a jusante. No entanto, a manutenção de volumes de espera nos reservatórios conduz a uma redução da disponibilidade energética do aproveitamento e por se tratar de um aproveitamento hidroelétrico isto causa um aumento do risco de geração térmica futura. Torna-se evidente a existência de um conflito entre a utilização dos reservatórios para controle de cheias e geração de energia elétrica. Para minimizar este conflito é necessário, do ponto de vista energético, alocar o menor volume de espera possível. Mas, do ponto de vista do controle de cheias, é necessário se avaliar o risco de que o reservatório não seja capaz de controlar uma cheia quando um determinado volume de espera é alocado. Entre os métodos utilizados para cálculo do volume de espera e risco de falha os mais tradicionais são o Método da Curva Volume x Duração [1] e o Método das Trajetórias Críticas [2]. O ponto fraco destes métodos está na alocação de volume de espera sem levar em conta a variação do potencial da cheia com o decorrer do período chuvoso.

Neste trabalho estamos propondo um modelo estocástico associado a conceitos de confiabilidade. Existe uma revisão desta abordagem [3] e mais recentemente esta técnica foi aplicada para cálculo do risco de falha [4]. Nestes modelos considera-se a afluência que atinge o reservatório durante uma cheia como uma carga, e a capacidade do reservatório para amortecer esta cheia como uma resistência que o reservatório oferece à propagação desta cheia. Neste trabalho modelamos a carga e a resistência como processos estocásticos do tipo difusão. Supondo que os processos são homogêneos para pequenos intervalos de tempo dentro do período chuvoso e, utilizando a fórmula de Itô [5], formulamos o problema de valor de contorno de Dirichlet, cuja solução numérica é uma aproximação para o risco de falha associado a determinado volume de espera. O método proposto permite considerações sobre a variação do potencial da cheia com o decorrer da estação chuvosa, possibilitando o cálculo dos volumes de espera e dos respectivos riscos para diferentes intervalos de tempo dentro do período úmido. Com este método é possível fazer a alocação dinâmica do volume de espera, sem incorrer nas dificuldades encontradas pelos métodos existentes.



CÁLCULO DO RISCO DE FALHA

Considere um reservatório projetado para operar com um volume máximo S_1 , um volume de espera S_2 para controle de cheias e o volume associado a dimensão de borda livre S_3 para conter as ondas induzidas pelo vento, como mostra a Figura 1(a). O nível do reservatório associado a $S_{max} = S_1 + S_2$ é chamado de max-maximoro.

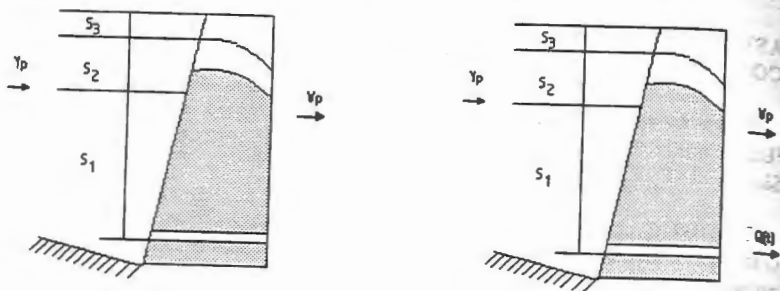


Figura 1(a) - Representação de projeto. (b) - Representação no instante t .

Supondo que no instante $t \in [0, T]$ chega ao reservatório uma onda de cheia com volume $Y(t)$ que denominamos como a carga que atinge o reservatório no instante t . Se nesse instante o reservatório está operando com um volume armazenado $S(t)$ e libera um volume de água (volume defluente) $R(t)$, então o volume de espera $S_e(t)$ necessário para conter a carga, sem violar as restrições de defluência, é calculado como:

$$S_e(t) = Y(t) - R(t) \quad (1)$$

Desta forma a capacidade operativa necessária para controlar a onda de cheia é:

$$S_o(t) = S(t) + S_e(t) \quad (2)$$

O reservatório falhará no tocante ao controle da cheia se $S_o(t) > S_1 + S_2$. Assim, temos que o reservatório falhará se:

$$Y(t) > (S_1 + S_2) - S(t) + R(t) \quad (3)$$

A resistência do reservatório à propagação de uma onda de cheia é dada por:

$$X(t) = S_{max} - S(t) + R(t) \quad (4)$$

Podemos dizer que o reservatório falhará no tocante ao controle de uma onda de cheia se a carga $Y(t)$ for maior que a resistência $X(t)$ e o risco de falha $\rho(t, x_t, y_t)$ é a probabilidade de $Y(t) > X(t)$, para qualquer $t \in [0, T]$, ou seja:

$$\rho(t, x_t, y_t) = P[Y(s) > X(s) | X(t) = x_t, Y(t) = y_t], \forall s > t \quad (5)$$

MODELO DA CARGA $Y(t)$ E DA RESISTÊNCIA $X(t)$

A carga $Y(t)$ depende das condições meteorológicas isso atribui a ela um caráter estocástico. Para modelar a carga, vamos supor inicialmente que no instante $t \in [0, T]$ chega ao reservatório uma vazão que pode ser modelada como a derivada do volume que atinge o reservatório em um intervalo de tempo $[t, t + dt]$, assim:

$$\frac{dY(t)}{dt} = \alpha(t) + \sigma_y \frac{dB_y(t)}{dt} \quad (6)$$

onde $\alpha(t)$ é uma função puramente determinística que representa a tendência e sazonalidade das vazões neste intervalo e $dB_y(t)/dt$ é um ruído branco normalmente distribuído, $N(0, \sigma_y^2)$. A carga que atinge o reservatório no instante t pode ser calculada integrando-se (6) no intervalo $[0, t]$, assim temos:

$$Y(t) = Y(0) + \int_0^t \alpha(s)ds + \sigma_y \int_0^t dB_y(s) \quad (7)$$

Portanto a carga $Y(t)$ satisfaz a seguinte equação diferencial estocástica:

$$dY(t) = \alpha(t)dt + \sigma_y dB_y(t) \quad (8)$$

O modelo estocástico para a resistência $X(t)$ é obtido considerando a equação (4). Adicionamos a esta equação um ruído branco $dB_x(t)/dt \sim N(0, \sigma_x^2)$ que representa a flutuação aleatória da resistência devido a alguns fatores tais como evaporação no espelho d'água do reservatório e efeitos das ondas provocadas pelo vento. Assim temos:

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\frac{dS(t)}{dt} + \frac{dR(t)}{dt} + \sigma_x \frac{dB_x(t)}{dt} \quad (9)$$

O volume que atinge o reservatório no intervalo $[0, t]$ é dado por:

$$S(t) = S(0) + \int_0^t \alpha(s)ds + \sigma_y \int_0^t dB_y(s) \quad (10)$$

O volume deplecionado no intervalo $[0, t]$ pode ser calculado usando-se a regra de operação dada pelas vazões defluentes $\{u(t), t \geq 0\}$, como:

$$R(t) = R(0) + \int_0^t u(s)ds \quad (11)$$

Integrando (9), substituindo-se (10) e (11) e denotando por $\beta(t) = -\alpha(t) + u(t)$, temos a equação diferencial estocástica para a resistência do reservatório, dada por:

$$dX(t) = \beta(t)dt + \sigma_x dB_x(t) - \sigma_y dB_y(t) \quad (12)$$

AValiação DO RISCO DE FALHA

A carga e a resistência $\{X(t), Y(t) \geq 0\}$ são processos de Markov satisfazendo as equação diferencial estocástica:

$$\begin{pmatrix} dX(t) \\ dY(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta(t) \\ \alpha(t) \end{pmatrix} dt + \begin{pmatrix} \sigma_x & -\sigma_y \\ 0 & \sigma_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dB_x(t) \\ dB_y(t) \end{pmatrix}$$

Para avaliar o risco de falha segundo a equação (5) vamos definir o espaço de estado do processo $\{X(t), Y(t)\}$ como $\bar{\Omega} = \{(x, y) | 0 \leq x \leq x_{max}, 0 \leq y \leq y_{max}\}$ com $\bar{\Omega} = \Omega \cup \partial\Omega$, onde $\partial\Omega$ denota a fronteira de Ω e (x, y) denota um ponto em Ω . Denotamos também por $C^0(\Omega)$ (ou $C^0(\partial\Omega)$) a classe de funções contínuas em Ω ou $(\partial\Omega)$ e por $C^k(\Omega)$ a classe de funções que são contínuas e possuem derivadas parciais contínuas em Ω , até a ordem k . O risco de falha é definido como uma função real $\rho(x, y) : \bar{\Omega} \rightarrow [0, 1]$.

Seja agora $\bar{F} = \{(x, y) | x \leq y, 0 \leq y \leq y_{max}\}$ região fechada de $\bar{\Omega}$ onde o sistema falha, ou seja $X(t) \leq Y(t)$. Denotamos por ∂F a fronteira de F e $\bar{F} = F \cup \partial F$. Seja $\bar{E} = \{(x, y) | x \geq y, 0 \leq y \leq y_{max}\}$ a região de $\bar{\Omega}$ onde o sistema não falha, ou seja $X(t) > Y(t)$ e denotamos por ∂E a fronteira de E e $\bar{E} = E \cup \partial E$. Denotamos por $\Gamma = \{(x, y) | x = y\}$ uma curva suave em Ω onde $\rho(x, y) = 1, \forall (x, y) \in \Gamma$ e $\Gamma = \partial E \cap \partial F$. Neste contexto podemos dizer que o risco de falha é a probabilidade do sistema atingir a região da fronteira de $\bar{E}$ definida por Γ , em um instante de tempo s , partindo no instante $t < s$, de um ponto interior $(x, y) \in \bar{E}$, ou seja:

$$\rho(t, x, y) = P((X(s), Y(s)) \in \Gamma | X(t) = x, Y(t) = y) \quad (13)$$

Se $p_{X,Y}(t, x, y, s, x_s, y_s)$ é a função densidade de probabilidade de transição de estado do processo $\{X(t), Y(t), t \geq 0\}$ e $d\ell$ um elemento infinitesimal da fronteira Γ . Então (14) pode ser escrita como:

$$\rho(t, x, y) = \int_{\Gamma} p_{X,Y}(t, x, y, s, x_s, y_s) d\ell \quad (14)$$

Para avaliar o risco de falha em um intervalo $[t_1, t_2] \subset [0, T]$. Podemos escolher o intervalo $[t_1, t_2]$ de forma que o processo $\{X(t), Y(t), t_1 \leq t \leq t_2\}$ seja estacionário neste intervalo, assim temos:

$$a_X(t) = a_X, a_Y(t) = a_Y, b_X(t) = b_X, b_Y(t) = b_Y, \forall t \in [t_1, t_2]$$

Com essas considerações o risco de falha dado pela equação (15) pode ser avaliado usando-se o seguinte resultado.

Lema: Seja $\{X(t), Y(t), t \geq 0\}$ processos de Markov definidos no espaço de probabilidade $(\Omega, \mathcal{F}_t, P)$ e $\rho(x, y) \in C^4(\Omega) \cap C^0(\bar{\Omega})$, uma função satisfazendo o seguinte problema de valor de contorno:

$$\text{Problema } \Sigma = \begin{cases} \mathcal{L}\rho(x, y) = 0 & (x, y) \in F \\ \rho(x, y) = 1 & (x, y) \in \Gamma \\ \rho(x, y) = 0 & (x, y) \in \partial F \setminus \Gamma \end{cases}$$

onde $\mathcal{L}$ é o operador diferencial definido por:

$$\mathcal{L} = b_{11}, \frac{\partial^2}{\partial x_t^2} + (b_{12} + b_{21}), \frac{\partial^2}{\partial x_t \partial y_t} + b_{22}, \frac{\partial^2}{\partial y_t^2} + \alpha_x, \frac{\partial}{\partial x_t} + \alpha_y, \frac{\partial}{\partial y_t}$$

os coeficientes b_{ij} são os elementos da matriz b dada por:

$$b = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sigma_x & -\sigma_y \\ 0 & \sigma_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 \\ -\sigma_y & \sigma_y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 + \sigma_y^2 & -\sigma_y^2 \\ -\sigma_y^2 & \sigma_y^2 \end{pmatrix}$$

Então:

$$\rho(x, y) = \int_{\Gamma} p_{X,Y}(x, y, x_s, y_s) d\ell$$

Prova: Seja $\tau_x = \inf\{s \geq t \mid (x_s, y_s) \in \partial F, X(t) = x_t, Y(t) = y_t\}$ é o primeiro instante de tempo em que $X(t)$ e $Y(t)$ atigem a fronteira de F . Sendo $\rho(x, y) \in C^4(\Omega) \cap C^0(\bar{\Omega})$ então pela fórmula de Itô [5], temos:

$$\rho(x_s, y_s) = \rho(x, y) + \int_t^s \mathcal{L}\rho, dt' + \int_t^s (\nabla \rho)^T \cdot \sigma dW(t'), \forall t \leq s \leq \tau_x$$

Fazendo $s = \tau_x$ e tomando o valor esperado temos:

$$E\rho(x_{\tau_x}, y_{\tau_x}) = \rho(x, y) \quad (15)$$

Sendo $\rho(x_{\tau_x}, y_{\tau_x}) = 1$ em Γ e $\rho(x_{\tau_x}, y_{\tau_x}) = 0$ em $\partial F \setminus \Gamma$, temos que:

$$E\rho(x_{\tau_x}, y_{\tau_x}) = \int_{\Gamma} p_{X,Y}(x_t, y_t, x_s, y_s) d\ell \quad (16)$$

substituindo (16) em (17) concluímos a prova do Lema. □

O problema Σ é conhecido como problema de valor de contorno de Dirichlet [6] e pode ser resolvido numericamente por técnicas de diferenças finitas [7]. No entanto vamos optar pela técnica apresentada em [8] a qual tem se mostrado muito mais precisa que as técnicas tradicionais de diferenças finitas. Para isto é necessário colocar o operador $\mathcal{L}$ na sua forma canônica. Isto pode ser feito através de transformações lineares adequadas [ver 7]. No caso do Problema Σ essas transformações são:

$$\begin{aligned} x &= \sigma_x \xi + \sigma_y \eta & y &= -\sigma_y \eta & u(\xi, \eta) &= \rho(\xi, \eta) \exp\left\{\frac{a_1 \xi + a_2 \eta}{2}\right\} \\ a_1 &= \frac{2(\alpha_x + \alpha_y)}{\sigma_x} & a_2 &= -\frac{2\alpha_y}{\sigma_y} & \lambda^2 &= \frac{a_1^2 + a_2^2}{2} \end{aligned}$$

Usando essas relações podemos transformar o problema Σ no problema Σ^* :

$$\text{Problema } \Sigma^* = \begin{cases} \Delta u(\xi, \eta) - \lambda^2 u(\xi, \eta) = 0 & (\xi, \eta) \in \mathcal{V} \\ u(\xi, \eta) = 1 & (\xi, \eta) \in \Upsilon \\ \rho(\xi, \eta) = 0 & (\xi, \eta) \in \partial \mathcal{V} \setminus \Upsilon \end{cases}$$

Onde $\mathcal{V}$, $\partial \mathcal{V}$ e Υ são as transformações dos espaços F , ∂F e Γ respectivamente. A solução do Problema Σ , pode ser encontrada pela transformação inversa.

SOLUÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA Σ

Definition 1. Seja S_h uma malha uniforme quadrada, com passo h cobrindo a região retangular $V \cup \partial V$ tal que para algum N e $MS_h := \{(\xi_i, \eta_j) \mid \xi_i = \xi_0 + ih, \eta_j = \eta_0 + jh; i = 0, 1, 2, \dots, N \text{ e } j = 0, 1, 2, \dots, M\}$. Um nó nessa rede é denotada por $\zeta_{i,j} = (\xi_i, \eta_j)$, e associamos a cada função $\phi: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ uma função discreta $\hat{\phi}: S_h \rightarrow \mathbb{R}$ chamada função de rede tal que $\hat{\phi}_{i,j} = \phi(\zeta_{i,j})$. O número total de pontos interiores é denotado por $M_0 N_0$, com $N_0 = N - 1$ and $M_0 = M - 1$.

Seja $u(\xi, \eta) \in C^4(\Omega)$ a solução do problema Σ^* e S_h a rede quadrada dada na Definição 1. Seja $U \mapsto \mathbb{R}$ uma função de rede que satisfaz a seguinte equação diferença para $i = 0, 1, 2, \dots, N_0, j = 0, 1, 2, \dots, M_0$:

$$U_{i,j} = \frac{1}{4, I_0(\lambda h)} (U_{i-1,j} + U_{i+1,j} + U_{i,j+1} + U_{i,j-1}) \quad (17)$$

Então [8]:

$$\|u - U\|_{\infty} \leq \frac{1}{(I_0(\lambda h) - 1) \left[\frac{h^4 D_4}{4!} + O(h^6) \right]} \quad (18)$$

onde estamos denotando por $D_k := \max\{\sup\{|\partial^k u(\xi, \eta)| / \partial \xi^{k-j} \partial \eta^j \mid (\xi, \eta) \in V\} \mid 0 \leq j \leq k\}$. Também denotamos por $I_0(\lambda h)$ função modificada de Bessel de ordem zero. Como consequência deste resultado temos: $\|u - U\|_{\infty} = O(h^2)$. Todos esses resultados estão provados em [8]. Usando as equações (18) e (19), podemos calcular uma aproximação numérica para a solução do problema Σ , $\rho(x, y)$, em cada ponto da rede (x_i, y_j) , como se segue:

$$R_{i,j} = U_{i,j} \exp\left\{-\frac{a_1 \xi_{i,j} + a_2 \eta_{i,j}}{2}\right\} \quad (19)$$

onde:

$$\xi_{i,j} = \frac{1}{\sigma_x} (x_i + y_j) \quad \eta_{i,j} = -\frac{1}{\sigma_x} y_j$$

APLICAÇÃO AO RESERVATÓRIO DE XAVANTES

O modelo de cálculo de risco desenvolvido neste trabalho foi aplicado a um reservatório do sistema hidroelétrico do sudeste brasileiro, a Usina de Xavantes. Esta usina pertence à Companhia Energética de São Paulo - CESP e está situada no Rio Paranapanema, afluente do Rio Paraná, na fronteira entre os estados de São Paulo e Paraná. Ela faz parte de um grande complexo de usinas hidráulicas interligadas e seus dados principais encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Dados do reservatório de Xavantes

	Volume (km3)	Nível (m)
Volume útil	3.041	-
Coroamento da barragem	-	479.00
Máximo máximo	9.410	475.50
Máximo operativo normal	8.795	474.00
Mínimo operativo (vol. morto)	5.754	465.23

As restrições mínima e máxima de jusante são $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. O engolimento máximo (turbinagem) é $648 \text{ m}^3/\text{s}$ e a capacidade total de vertimento é de $3252 \text{ m}^3/\text{s}$. O volume de espera projetado é $S_e=615 \text{ km}^3$.

Para a realização do estudo de caso, a operação da Usina de Xavantes foi simulada com discretização diária e horizonte de 181 dias, correspondente à estação das chuvas. A simulação é repetida para 10 períodos chuvosos, 10 anos, para os quais dispõem-se de dados de vazões diárias. Usamos para ilustrar a aplicação do método os resultados de simulação referente ao ano de 1982. A política de operação do reservatório foi obtida a partir da otimização da operação da usina, com discretização mensal e horizonte de 5 anos, usando-se um algoritmo não linear de otimização de fluxo em rede. A vazão defluente operativa diária na simulação é dada pela regra de operação que procura acompanhar o volume ótimo, controlando sua defluência. É importante ressaltar que no modelo só há vertimento quando não mais for possível turbinar, ou seja, só há vertimento quando a defluência for superior ao engolimento máximo.

Da simulação obtêm-se as resistências diárias ou os vazios de volume até o volume máximo maximoro. Nas Figuras 2(a) e 2(b) mostramos a resistência e a carga para os 181 dias do período chuvoso de 1982, juntamente com uma suavização polinomial destas curvas e o ajuste linear utilizado para calcular os coeficientes α_x , $\alpha_y(\text{drift})$, e σ_x , σ_y , (difusão) desses processos.

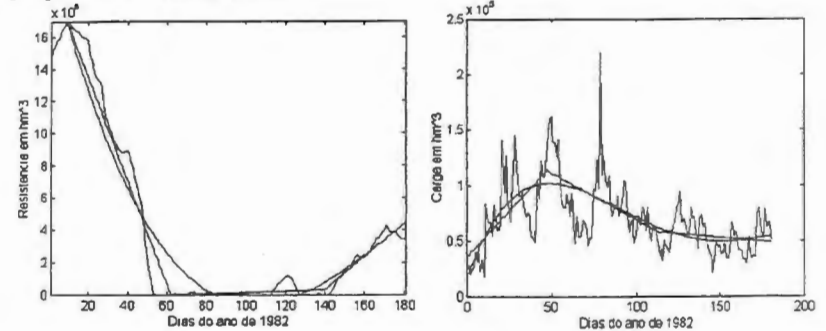


Figura 2. (a) Resistência, (b) Carga, para os 181 dias do período chuvoso

Os coeficientes α_x e σ_x^2 ajustados para a resistência $X(t)$ são dados na Tabela 1 e os coeficientes α_y e σ_y^2 ajustados para a carga $Y(t)$ são dados na Tabela 2

Tabela 2. Coeficientes de drift e de difusão da resistência

	$1 \leq t \leq 62$	$62 \leq t \leq 140$	$140 \leq t \leq 181$
α_x	-3.2006×10^{-4}	4.3172×10^{-2}	4.3172×10^{-2}
σ_x^2	1.6788×10^5	2.9404×10^4	4.3552×10^4

Tabela 3. Coeficientes de drift e de difusão da carga

	$1 \leq t \leq 48$	$48 \leq t \leq 115$	$115 \leq t \leq 181$
α_y	1.6554×10^{-3}	-8.4973×10^{-2}	-1.2860×10^{-2}
σ_y^2	2.5925×10^4	2.9417×10^4	1.5641×10^4

A Figura 3 mostra o risco de falha para os primeiros 30 dias do período chuvoso de 1982. Nesse período a vazão máxima foi de $1702 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo a uma carga de 143.98 Km^3 . A curva de risco referente a esta vazão (Figura 7) nos permite observar que para um risco de 6% deve-se alocar um volume de espera de aproximadamente 175 Km^3 (ponto a). Considerando uma cheia igual à vazão média deste período que é $878 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondente a uma carga de 75.98 Km^3 , encontramos na curva de risco desta vazão um volume de espera de 100 Km^3 (ponto b) para um risco de 6%. Este resultado leva-nos a concluir que o volume de espera projetado de 615 Km^3 (Tabela 1), é muito superior ao volume necessário para controlar a cheia dos primeiros 30 dias deste período.

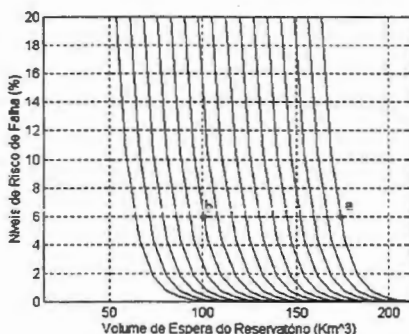


Figura 3 - Curvas de Risco $\times$ Volume de espera para os primeiros 30 dias do período chuvoso de 1982, para 16 níveis de cheias

Referências

- [1] Beard, L.R.; "Flood Control Operation of Reservoir", Jour. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 89, Proc. Paper 3380, pp. 8-10, 21-23, 1963.
- [2] Kelman, J.; "Flood and Hydroelectric Utilization, ABRH, RBE, pp. 91-98, Rio de Janeiro, 1987.
- [3] Yen, B.C.; "Stochastic Methods and reliability Analysis in Water Resources", Computer Methods & Water Resources, Computational Hydrology, pp. 183-197, 1988.
- [4] Meon, G.; "Overtopping Probability of Dams Under Flood Load", Proc. of the Sixth IAHR Inter. Symp. On Stoch. Hydraulics, pp. 99-106, Taipei, 1992.
- [5] Arnold, L.; "Stochastic Differential Equation: Theory and Applications", John Wiley & Sons, USA. 1974.
- [6] Garabedian, P.R.; "Partial Differential Equation", John Wiley & Sons, N. York, 1964.
- [7] Samarski, A.A., Andréiev, V.B.; "Difference Methodos for Elliptic Equations", Mir Publisher, Moscow, 1979. (Spanish)
- [8] Val, J.B.R., Andrade, M.G.; "On the Numerical Solution of the Dirichlet Problem For Helmholtz Equation", Amer. Math. Letter, Vol. 9, No. 2, pp. 85-89, 1996.