Campus de São Carlos

**CONTROLE DE CHEIAS EM USINAS HIDROELÉTRICAS
E O CONFLITO COM A GERAÇÃO DE ENERGIA**

Autor: Marcos de Araújo Paz

Orientador: Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLE DE CHEIAS EM USINAS
HIDROELÉTRICAS
E O CONFLITO COM A GERAÇÃO DE ENERGIA**

Marcos de Araújo Paz

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro

São Carlos

Janeiro, 2000

Class.	TESE-EEEC
Cutt.	4264
Tombo	026/00

5/5 1070683

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P348c Paz, Marcos de Araújo
Controle de cheias em usinas hidroelétricas e o
conflito com a geração de energia / Marcos de Araújo
Paz. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Alber de França
Mendes Carneiro.

1. Sistemas de potência. 2. Controle de cheias.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **MARCOS DE ARAUJO PAZ**

Dissertação defendida e aprovada em 13.01.2000
pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **ADRIANO ALBER DE FRANÇA M. CARNEIRO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. **MARINHO GOMES DE ANDRADE FILHO**
(Instituto de Ciências Matemáticas e Computação - Universidade de São Paulo)

Engenheiro **CESAR LUCIO CORRÊA DE SÁ JUNIOR (Especialista)**
(ELETROBRÁS)

Prof. Assoc. **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
Coordenadora da Área de Engenharia Elétrica

Prof. Assoc. **RENATO VAIRO BELHOT**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC
Em Exercício

**Dedico este trabalho à minha mãe Lourdes,
ao meu pai Jaime (*in memoriam*),
à minha irmã Rosemary,
aos meus irmãos de coração Cláudio e Joaquim,
por todo o apoio que sempre me deram, mesmo nos momentos mais difíceis**

Agradeco

Ao Professor Adriano pela amizade, incentivo, paciência, orientação e sobretudo por acreditar em nosso trabalho.

Ao Professor Marinho por sua generosa contribuição dividindo conosco seus valiosos conhecimentos, pela amizade e atenção sempre concedida.

Aos amigos especiais de todas as horas, com os quais aprendi e continuo aprendendo a cada dia: Márcia, Miguel, Gilberto, Val, Beto, Alexandre, Richard, Patrícia.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação: Mário, Donato, Cristina, Renan, Ênio, Renata, Renato e Lúcia, João Bosco, Guilherme e Arthur.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP que de algum modo contribuíram para o andamento deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudo concedida.

À Deus por minha vida e família.

SUMÁRIO

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>i</i>
<i>LISTA DE FIGURAS DOS ANEXOS</i>	<i>ii</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>iii</i>
<i>LISTA DE TABELAS DOS ANEXOS</i>	<i>iii</i>
<i>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</i>	<i>iv</i>
<i>LISTA DE SÍMBOLOS</i>	<i>v</i>
<i>RESUMO</i>	<i>ix</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>x</i>
<i>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</i>	<i>1</i>
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	7
1.3 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO	8
<i>CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE NO CONTROLE DE CHEIAS</i>	<i>9</i>
<i>CAPÍTULO III - METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE VOLUME DE ESPERA</i>	<i>27</i>
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2 MÉTODO DA CURVA VOLUME X DURAÇÃO	29
3.3 MÉTODO DA CURVA VOLUME X DURAÇÃO POR JANELAS	36
3.4 MÉTODO DAS TRAJETÓRIAS CRÍTICAS	43
3.5 MÉTODO POR EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS	48
<i>CAPÍTULO IV - MODELO DE SIMULAÇÃO</i>	<i>56</i>
4.1 INTRODUÇÃO	56
4.2 MODELO DE SIMULAÇÃO	57
4.3 PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO	62
<i>CAPÍTULO V - ESTUDO DE CASO</i>	<i>68</i>
5.1 INTRODUÇÃO	68
5.2 DADOS DA USINA DE CHAVANTES	70
5.3 RESULTADOS ADQUIRIDOS COM A SIMULAÇÃO	72

<i><u>CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES</u></i>	<i><u>89</u></i>
<i><u>ANEXO A - PROGRAMAS</u></i>	<i><u>93</u></i>
A.1 MÉTODO DA CURVA VOLUME X DURAÇÃO	94
A.2 MÉTODO DA CURVA VOLUME X DURAÇÃO POR JANELAS	98
A.3 MÉTODO DAS TRAJETÓRIAS CRÍTICAS	102
A.4 MÉTODO POR EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ESTOCÁSTICAS	105
A.5 MODELO DE SIMULAÇÃO	108
A.6 TESTES DE ADERÊNCIA	115
A.7 GERADOR DE SÉRIES SINTÉTICAS	119
<i><u>ANEXO B-DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS APLICADAS À HIDROLOGIA</u></i>	<i><u>121</u></i>
B.1 INTRODUÇÃO	121
B.2 PARÂMETROS NUMÉRICOS DE VARIÁVEIS	122
B.3 DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE PROBABILIDADES	123
B.4 AJUSTES DAS DISTRIBUIÇÕES	126
<i><u>ANEXO C - TESTES DE ADERÊNCIA</u></i>	<i><u>128</u></i>
C.1 INTRODUÇÃO	128
C.2 O TESTE QUI QUADRADO χ^2 DE ADERÊNCIA	129
C.3 O TESTE KOLMOGOROV-SMIRNOV	131
<i><u>ANEXO D - GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS</u></i>	<i><u>135</u></i>
D.1 INTRODUÇÃO	135
D.2 SÉRIES SINTÉTICAS APLICANDO O MODELO AUTO-REGRESSIVO AR	136
<i><u>ANEXO E - INFERÊNCIA BAYESIANA E PROCESSOS DE MARKOV</u></i>	<i><u>141</u></i>
E.1 INFERÊNCIA BAYESIANA	141
E.2 PROCESSOS DE MARKOV	143
<i><u>ANEXO F - GRÁFICOS DEMONSTRATIVOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO</u></i>	<i><u>146</u></i>
<i><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></i>	<i><u>161</u></i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 - Curva Nível - Prejuízo	2
Figura 1. 2 - Hidrograma típico de uma onda de cheia.....	3
Figura 1. 3 - Reservatório utilizado no controle de cheias.	6
Figura 1. 4 - Atenuação do pico de cheia.....	7
Figura 2. 1 - Modelo da Curva Volume x Duração (método gráfico)	14
Figura 3. 1 - Curva Volume x Duração associada a uma probabilidade p' fixa de emergência.	31
Figura 3. 2 - Fluxograma do Método da Curva Volume x Duração.....	33
Figura 3. 3 - Formação dos blocos de vazões afluentes	36
Figura 3. 4 - Fluxograma do Método da Curva Volume x Duração por Janelas.....	39
Figura 3. 5 - Evolução do volume de espera para o i -ésimo ano	44
Figura 3. 6 - Traçado da curva limite para todas as trajetórias.....	44
Figura 3. 7 - Curva Limite para uma probabilidade p'	45
Figura 3. 8 - Fluxograma do Método das Trajetórias Críticas.....	46
Figura 3. 9 - Modelamento para o Método por Equações Diferenciais Estocásticas	49
Figura 3. 10 - Fluxograma do Método por Equações Diferenciais Estocásticas.....	54
Figura 4. 1 - Corte esquemático de uma usina hidroelétrica.....	58
Figura 4. 2 - Diagrama de simulação	60
Figura 4. 3 - Potência máxima do conjunto turbina-gerador	65
Figura 4. 4 - Turbinagem máxima do conjunto turbina-gerador	65
Figura 5. 1 - Localização da cascata do rio Paranapanema	69
Figura 5. 2 - Disposição das usinas hidroelétricas na cascata do rio Paranapanema	69
Figura 5. 3 - Histórico de vazões afluentes.....	72
Figura 5. 4 - (a) Volume de espera máximo e (b) volume de espera médio em cada método	73
Figura 5. 5 - Trajetória de volume para o Método da Curva Volume x Duração.....	73
Figura 5. 6 - Trajetória de volume para o Método da Curva Volume x Duração por Janelas .	74
Figura 5. 7 - Trajetória de volume para o Método das Trajetórias Críticas (usando histórico de vazões naturais)	75
Figura 5. 8 - Trajetória de volume para o Método das Trajetórias Críticas (usando séries sintéticas de vazões)	75
Figura 5. 9 - Trajetória de volume para o Método das Equações Diferenciais Estocásticas	76
Figura 5. 10 - Curvas de risco para os dias mais críticos do histórico	76
Figura 5. 11 - Estimativa bayesiana dos coeficientes α_i e σ_i^2	76

LISTA DE FIGURAS DOS ANEXOS

Figura b 1 - Função Densidade de Probabilidade	126
Figura b 2 - Função Distribuição Acumulada.....	127
Figura c 1 -(a)Função distribuição de probabilidade;(b)Função densidade acumulada teórica e amostral.....	129
Figura c 3 -(a)Função distribuição de probabilidade;(b)Função densidade acumulada teórica e amostral.....	130
Figura c 4 - Resultado do teste Qui-Quadrado para cada dia.....	131
Figura c 5 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov para cada dia.....	132
Figura d 1 - Ruído independente identicamente distribuído $a_t \sim N(0, \sigma_a^2)$,.....	138
Figura d 2 - Estimadores de ϕ	139
Figura d 3 - Séries Sintéticas geradas por AR(1)	140
Figura f 1 - Resultados da simulação para o Método da Curva Volume x Duração.....	147
Figura f 2 - Resultados da simulação para o Método da Curva Volume x Duração por Janelas	148
Figura f 3 - Resultados da simulação para o Método por Equações Diferenciais Estocásticas.....	149
Figura f 4 -Resultados da simulação para o Método das Trajetórias Críticas aplicado o histórico.....	150
Figura f 5 - Resultados da simulação para o Método das Trajetórias Críticas aplicando séries sintéticas.....	151
Figura f 6 - Turbinagem média.....	152
Figura f 7 - Vertimento máximo e médio.....	152
Figura f 8 - Defluência média e máxima.....	152
Figura f 9 - Volume Vazio médio e máximo	153
Figura f 10 - Falhas ocorridas: volume excedente e taxa defluente média.....	153
Figura f 11 - Fator de Uso	153
Figura f 12 - Resultados da simulação para MCVD: parâmetros auxiliares.....	154
Figura f 13 - Resultados da simulação para MCVDJ: parâmetros auxiliares.....	155
Figura f 14 - Resultados da simulação para MEDE: parâmetros auxiliares.....	156
Figura f 15 - Resultados da simulação para MTC-h: parâmetros auxiliares	157
Figura f 16 - Resultados da simulação para MTC-s: parâmetros auxiliares.....	158
Figura f 17 - Energia Armazenada média e Energia Perdida média.....	159
Figura f 18 - Engolimento Máximo médio e mínimo.....	159
Figura f 19 - Disponibilidade de potência média e mínima	159
Figura f 20 - Energia Gerada média e mínima.....	160
Figura f 21 - Energia Vertida máxima e média.....	160

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1. 1 - Medidas Estruturais.....</i>	<i>4</i>
<i>Tabela 5. 1 - Dados principais da Usina de Chavantes</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 5. 2 - Coeficientes dos polinômios característicos da Usina de Chavantes.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 5. 3 - Volume de Espera máximo e médio.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 5. 4 - Resultado da simulação: Vazão Turbinada e Vertimento.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 5. 5 - Resultado da simulação: Defluência e Volume Vazio</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 5. 6 - Resultado da simulação: Falhas e Fator de Uso</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 5. 7 - Resultado da simulação: Energia Armazenada e Energia Perdida</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 5. 8.- Resultado da simulação: Engolimento Máximo, Disponibilidade de Potência.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 5. 9 - Resultado da simulação: Energia Gerada e Energia Vertida.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 5. 10 - Resultado da simulação Energia Total: Somatório da Energia Gerada e Energia Armazenada no último dia do período úmido.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 5.11 - Resultados Gerais.....</i>	<i>80</i>

LISTA DE TABELAS DOS ANEXOS

<i>Tabela c 1- Distribuição Qui-Quadrado - Valores Críticos.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabela c 2 - Valores Críticos de D para o Teste Kolmogorov-Smirnov.....</i>	<i>134</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>GCOI</i>	- <i>Grupo Coordenador para Operação Interligada</i>
<i>CECCA</i>	- <i>Controle de Cheias e Armazenamentos</i>
<i>GTEH</i>	- <i>Grupo de Trabalho de Estudos Hidrológicos</i>
<i>SCEN</i>	- <i>Subcomitê de Estudos Energéticos</i>
<i>CEPEL</i>	- <i>Centro de Pesquisas de Energia Elétrica</i>
<i>ELETROBRÁS</i>	- <i>Centrais Elétricas Brasileiras S.A.</i>
<i>CESP</i>	- <i>Companhia Energética de São Paulo</i>
<i>MCVD</i>	- <i>Método da Curva Volume x Duração</i>
<i>MCVDJ</i>	- <i>Método da Curva Volume x Duração por Janelas</i>
<i>MTC</i>	- <i>Método das Trajetórias Críticas</i>
<i>MEDE</i>	- <i>Método por Equações Diferenciais Estocásticas</i>
<i>AR</i>	- <i>Modelo Auto-Regressivo</i>
<i>MCMC</i>	- <i>Método de Monte Carlo em Cadeias de Markov</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C_d	- dano total
k_d	- índice de dano de enchente
h	- profundidade média de inundação
M	- índice do valor de mercado da área de inundação
p_{id}	- proporção da área de inundação desenvolvida pela área total inundada
A_T	- área total de inundação
$P(t)$	- precipitação em função do tempo
C_g	- centro de massa da precipitação
$Q(t)$	- vazão no tempo
t_p	- tempo de pico
t_b	- tempo de base
PI	- ponto de inflexão
$\bar{Q}$	- média anual das vazões máximas diárias
Q_T	- vazão máxima provável em T anos
a, b	- parâmetros determinados caso a caso
Tr	- período de recorrência em anos
σ	- desvio da variável Q_i a partir da média
n	- número de anos
C_o	- coeficiente de obliquidade de Pearson
x	- variável auxiliar
Q_f	- moda dos valores extremos
y_i	- variável reduzida
$\bar{y}$	- média da variável reduzida
σ_y	- desvio padrão da variável reduzida
f_k	- fator de frequência
$s(t)$	- armazenamento do reservatório no instante t
$y(t)$	- volume afluente no intervalo $(t-I, t)$
$q(t)$	- volume defluente no intervalo $(t-I, t)$
qr	- descarga de restrição
K_s	- capacidade a ser alocada no reservatório

x_g	- fator de ponderação
k	- defasagem no tempo entre os picos dos hidrogramas de entrada e saída
φ	- coeficiente angular
C	- capacidade de armazenamento do reservatório
S_{LI}	- limite inferior do volume de armazenamento
S_{LS}	- limite superior do volume de armazenamento
q_{LI}	- limite inferior de defluência
q_{LS}	- limite superior de defluência
$\lambda(t)$	- indica o quanto a afluência é considerada na determinação da defluência
b_s	- variável determinística irrestrita
$w_s(t)$	- armazenamento depois da descarga e antes da defluência
$u_s(t)$	- o armazenamento disponível no reservatório no começo do período t
$v_s(t)$	- o armazenamento disponível depois da defluência $q(t)$ e antes da afluência $y(t)$
k_{tu}	- constante de transformação de unidades
x_d	- vazão relativa
$\hat{y}_{vr}$	- vazão máxima média estimada.
y_{vr}	- logaritmo da vazão relativa
$\bar{y}_{vr}$	- média de y_{vr}
σy_{vr}	- desvio padrão de y_{vr}
n_1	- número de volumes excedentes nulos
n_2	- número de volumes excedentes superiores a zero
n_o	- número de observações
y_{ex}	- série de volumes excedentes superiores a zero
p_n, λ_{ex}	- parâmetros da distribuição mista exponencial
p'	- probabilidade fixa de emergência
$n_s(i)$	- número de vazões superiores a vazão de restrição para o dia i
m	- ultimo dia do período estudado
$\hat{p}_i$	- probabilidades de ocorrência de vazões acima da vazão de restrição para o dia i
μ_s e τ	- parâmetros da distribuição exponencial para valores extremos.
S_{in}	- volume da inundação
S_r	- armazenamento disponível
u_o	- sistema parcial obtido do sistema original
U	- conjunto dos sistemas parciais que contém o reservatório mais a jusante do sistema
z	- vazão vertida
u	- vazão turbinada
U_{min}	- turbinagem mínima

U_{max}	- turbinagem máxima
Q_{min}	- defluência mínima
Q_{ref}	- descarga de referência ou defluência máxima
S_t	- volume armazenado no instante t
S_{util}	- volume útil do reservatório
S_{max}	- volume máximo do reservatório
S_{min}	- volume mínimo do reservatório
Ve_t	- volume de espera
MS_t	- meta de volume para o instante t
dS_i	- diferença entre a meta de volume do dia i e o volume do dia anterior
Yt_i	- defluência necessária para seguir a meta de volume para o dia i
Es	- energia armazenada
Es_p	- energia perdida
$h_{mon}(s)$	- polinômio cota de montante - volume
$h_{jus}(q)$	- polinômio defluência - cota de montante
Cf_{md}	- canal de fuga médio
pc	- perda de carga
δ	- densidade da água
g	- aceleração da gravidade
η	- rendimento do conjunto turbina - gerador
h_{ref}	- queda de referência (nominal)
$QU(t)$	- engolimento máximo
N_{maq}	- número de máquinas
u_{ef}	- engolimento efetivo por máquina
$HI(t)$	- queda líquida
h_{nm}	- queda nominal de cada conjunto
$H_B(t)$	- queda bruta
Pt_g	- disponibilidade de potência
Pt_{ef}	- potência efetiva por máquina em cada conjunto
$Eg(t)$	- energia gerada
$Ev(t)$	- energia vertida
R_{md}	- produtibilidade média
R_{esp}	- produtibilidade específica

LISTA DE SÍMBOLOS DOS ANEXOS

$f(x)$	- função densidade de probabilidade
μ	- média de um conjunto amostral
σ	- desvio padrão
π	- pi (3.1415)
α e β	- parâmetros da distribuição Gamma
$\Gamma(\alpha)$	- função gamma
θ e α	- parâmetros da distribuição Gumbel
$P(y)$	- probabilidade de y
$E(y)$	- valor esperado de y
σ^2	- variância
H_0	- hipótese nula
O_k	- frequência observada
np_k	- frequência esperada
$\chi^2(\alpha)$	- distribuição Qui-Quadrado
AR(1)	- auto regressivo de primeira ordem
N_+	- conjunto dos números inteiros positivos
Z	- conjunto de observações
ϕ_i	- parâmetro do modelo auto-regressivo
$a(t)$	- ruído independente identicamente distribuído
ρ_{cov}	- covariância
$p(y, \theta)$	- função densidade de probabilidade conjunta
$p(\theta y)$	- função densidade de probabilidade <i>a posteriori</i>
$p(\theta)$	- função densidade <i>a priori</i>
$l(\theta y)$	- função de verossimilhança
V_{EC}	- variância entre cadeias
V_{DC}	- variância dentro de cada cadeia
m	- número de cadeias geradas
n	- número de observações em cada cadeia
df	- graus de liberdade
$\propto$	- proporcionalidade

RESUMO

O objetivo do controle de cheias é regularizar a vazão defluente das usinas hidroelétricas para evitar danos às suas jusantes. Dentre os vários métodos para realizar o controle de cheias, destacam-se o da Curva Volume $\times$ Duração e o das Trajetórias Críticas. O Método da Curva Volume $\times$ Duração prioriza o controle de cheias, com o cálculo do volume de espera constante ao longo do período chuvoso, baseado nas vazões afluentes acumuladas. Já o Método das Trajetórias Críticas utiliza as vazões afluentes excedentes no cálculo recursivo dos volumes de espera, utilizando a idéia de envoltória das trajetórias.

Neste trabalho, introduzem-se algumas melhorias no método da Curva Volume $\times$ Duração, sendo feitas análises comparativas entre este método, o método Curva Volume $\times$ Duração por Janelas (introduzindo o conceito de janelas de aflúências), e ainda o método de controle de cheias por Equações Diferenciais Estocásticas, com o cálculo dos parâmetros por inferência bayesiana. O objetivo da análise é avaliar o desempenho no controle de cheias de modo mais eficiente: minimizando os danos a jusante sem comprometer excessivamente ou desnecessariamente a geração de energia elétrica. As metodologias são aplicadas à Usina de Chavantes sob várias condições hidrológicas. Em cada análise são contabilizadas as ocorrências de falhas (vazão defluente superior à vazão de referência) e suas intensidades, bem como parâmetros relacionados à geração de eletricidade, tal como a energia armazenada no reservatório durante o período de cheias, disponibilidade média e diária de ponta e geração média diária.

ABSTRACT

The objective of the overflowing control is to regularize the outflow of the hydropower plant to avoid downstream damage. Among the several methods to accomplish the overflowing control, we pointed out the Curve Volume $\times$ Duration and the Critical Trajectories. The Curve Volume $\times$ Duration Method prioritizes the overflowing control, with the calculation of the expectation constant volume along the rainy period, based on the accumulated overflow. The Critical Trajectories Method already uses the overflow exceeding in the recursive calculation of the expectation volumes, using the idea of covering trajectories.

In this work, some improvements are introduced in the Curve Volume $\times$ Duration Method, being made comparative analyses among this method, the Curve Volume $\times$ Duration by Window Method (introducing the concept of date windows), and still the overflow Method by Stochastic Differentiate Equations, with the calculation of the parameters by bayesian inference. The objective of the analysis is to evaluate the performance in the overflow control by efficient way: minimizing the downstream damages without committing excessively or unnecessarily the generation of electric energy. The methodologies are applied to Chavantes Powerplant, under several hydrologic conditions. In each analysis, the occurrences of faults are counted (flowing down higher them the flowing reference) and its intensities, as well as the related parameters to the electricity generation, like as the stored energy in the reservoir during the overflow period, medium and daily availability of peak and medium daily generation.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O setor energético, no seu planejamento de operação objetivando a geração de energia, leva em consideração a sazonalidade no ano hidrológico. O ano hidrológico é subdividido em duas estações distintas: estação seca e estação úmida. Esta última, também denominada estação chuvosa, é caracterizada pela ocorrência de precipitações chuvosas com maior frequência e intensidade, período este que se estende de dezembro a maio na região Sudeste do Brasil.

Quando a chuva é intensa e a quantidade de água que chega ao rio é superior à sua capacidade de vazão, tem-se como consequência inundações das áreas ribeirinhas. Os impactos ambientais resultantes dependem do grau de ocupação destas áreas e da frequência e intensidade com que ocorrem as inundações [1].

O desenvolvimento histórico da utilização de áreas livres nos leva ao condicionamento urbano hoje existente. Com o crescimento desordenado das cidades, as áreas de risco considerável foram ocupadas trazendo como consequência prejuízos humanos e materiais. Quando a frequência das inundações é baixa, a população ganha confiança e despreza o risco fazendo com que uma possível enchente assuma proporções catastróficas. Os prejuízos causados pelas enchentes podem ser avaliados utilizando o método da Curva Nível-Prejuízo, método da Curva de Prejuízo Histórico ou a equação

de dano agregado [2]. O primeiro relaciona prejuízos e probabilidade, ou tempo de retorno, para tanto é necessário obter as relações de curva de descarga, probabilidade de vazões máximas e curva de nível versus prejuízo, como mostrado na figura 1.1. O segundo método baseia-se na determinação dos prejuízos de cheias ocorridas nos últimos anos, e apresenta limitações, como crescimento nulo da região e valores uniformizados para os prejuízos. O último método é baseado no crescimento linear entre o dano e o nível médio de inundação, segundo a equação estabelecida por JAMES [3]:

$$C_d = k_d h M p_{id} A_T \quad (1.1)$$

onde: C_d - dano total,
 k_d - índice de dano de enchente,
 h - profundidade média de inundação,
 M - índice do valor de mercado da área de inundação,
 p_{id} - proporção da área desenvolvida pela área total inundada,
 A_T - área total de inundação.

Figura 1.1 - Curva Nível - Prejuízo

As condições meteorológicas e hidrológicas propiciam a ocorrência de inundações. O conhecimento do comportamento meteorológico de longo prazo é muito pequeno devido ao grande número de fatores envolvidos nestes fenômenos e à interdependência dos processos físicos a que a atmosfera da Terra está sujeita. As condições hidrológicas que produzem a inundação podem ser naturais ou artificiais. As condições naturais são aquelas propiciadas pela própria bacia hidrográfica, tais como relevo, tipo de precipitação, cobertura vegetal, capacidade de drenagem. Já as condições artificiais são aquelas provocadas pela mão do homem, tais como urbanização, desmatamento e uso agrícola. As bacias hidrográficas rurais possuem maior interceptação vegetal, maiores áreas permeáveis e com isso menor escoamento na superfície do solo. As bacias urbanas possuem superfícies impermeáveis e produzem aceleração no escoamento, o que resulta num aumento da vazão máxima e do escoamento superficial, reduzindo o tempo de pico t_p (intervalo entre o centro de massa C_g da precipitação e o tempo da vazão máxima) e o tempo de base t_b (intervalo entre o início da precipitação e aquele em que o rio retorna às suas condições anteriores). O hidrograma, na figura 1.2, nos mostra um típico comportamento da onda de cheia após uma sequência de precipitações $P(t)$, onde se observa um aumento considerável na vazão natural [2]:

Figura 1.2 - Hidrograma típico de uma onda de cheia onde : $P(t)$ - precipitação em função do tempo; C_g - centro de massa da precipitação; Q - vazão no tempo; t_p - tempo de pico; t_b - tempo de base.

O hidrograma pode ser caracterizado por três partes: ascensão, relacionado com a intensidade da precipitação $P(t)$, dada em mm/h , e o gradiente (variação do nível aquífero); região de pico, próximo ao valor máximo, quando o hidrograma começa a mudar de inflexão; recessão, começa a partir do ponto de inflexão PI , onde apenas o escoamento subterrâneo contribui para a vazão do rio.

As medidas para o controle de inundação podem ser do tipo estrutural e não estrutural [2,4]. As medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial (controle da cobertura vegetal, controle da erosão do solo, diques, modificações do rio, reservatórios). Na tabela 1.1 são resumidas as principais características das medidas estruturais que podem evitar os prejuízos decorrentes das cheias.

Tabela 1.1 - Medidas Estruturais

MEDIDA		PRINCIPAL VANTAGEM	PRINCIPAL DESVANTAGEM	APLICAÇÃO
Cobertura vegetal		Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas	Pequenas bacias
Controle de erosão		Reduz o assoreamento	Idem ao anterior	Pequenas bacias
Diques		Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes rios
Redução da rugosidade por desobstrução		Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
Reservatório	Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil	Bacias intermediárias
	Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
	Reservatórios para cheias	Operação com o mínimo de perdas	Custo não partilhado	Restrito ao controle de enchentes
Mudança de canal	Caminho da cheia	Amortecimento de volume	Depende da topografia	Grandes bacias
	Desvios	Reduz vazão do canal	Idem ao anterior	Bacias médias e grandes

As medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes. Estas medidas podem ser agrupadas em: regulamentação do uso da terra, onde é necessário estabelecer o risco de inundação

das diferentes cotas das áreas ribeirinhas; construções à prova de enchentes, medidas projetadas para reduzir as perdas de prédios localizados em áreas de risco de inundação; seguro de enchente, que permite uma proteção econômica; previsão e alerta, Plano da Defesa Civil que envolve ações para reduzir perdas durante enchentes.

Em nosso país, a maior parte das obras hidráulicas, em especial usinas hidroelétricas, foram desenvolvidas buscando atender apenas objetivos locais ou setoriais da economia, com vistas restritas à geração de energia, não sendo portanto, considerado no projeto, o controle de enchentes para se evitar danos a jusante dos aproveitamentos, em virtude da dificuldade em partilhar os custos entre os agentes que dele se beneficiariam. Com isso, o Planejamento da Expansão do sistema de aproveitamento do potencial hidroelétrico tem sido feito sem grandes considerações quanto ao impacto observado nos demais usos dos recursos hídricos.

A partir da década de setenta, com a ocorrência de algumas grandes enchentes que provocaram diversos danos, inclusive o rompimento de algumas barragens, observou-se a necessidade de metodologias que coordenassem simultaneamente a geração de energia e o controle de cheias. Por este motivo, em 1977 foi instituída, pelo então Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), uma Comissão de Estudos para Controle de Cheias e Armazenamentos (CECCA) [5], com o objetivo de estudar uma metodologia destinada à operação de controle de cheias, inicialmente para o sistema de reservatórios da bacia do rio Grande, sendo aplicada, por conseguinte, aos rios Paranaíba e Paraná. Com a necessidade de aumentar os esforços destinados ao estudo de controle de cheias, foi criado em 1979 o Grupo de Trabalho de Estudos Hidrológicos (GTEH) ligado ao Subcomitê de Estudos Energéticos (SCEN). Também o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), ligado à ELETROBRÁS, iniciou os seus estudos envolvendo o controle de cheias nesta mesma época.

A evolução no estudo do controle de cheias passou a exigir uma maior organização no setor de operação, com relação ao planejamento da operação hidráulica. A operação das usinas para fins de geração de energia objetiva atender a carga, já o controle de cheias objetiva a segurança da população e do próprio sistema de geração, o

que nos leva a pontos críticos conflitantes. Para maximizar a geração de energia é necessário manter o reservatório o mais cheio possível, para que as usinas trabalhem com produtividade elevada, enquanto o controle de cheias requer basicamente a alocação de um certo volume vazio de espera no reservatório para contenção de eventuais picos de vazões afluentes. A figura 1.3 ilustra a situação de um reservatório utilizado no controle de cheias, onde o volume de espera é uma percentagem do volume útil. Uma usina hidroelétrica pode ser representada por alguns detalhes relacionados com a constituição da usina tais como tomada d'água, condutos forçados, casa de máquinas, turbinas, etc., no nosso caso, o que interessa são índices operativos tais como nível máximo e mínimo, queda de referência, capacidade do reservatório, etc

Figura 1.3 - Reservatório utilizado no controle de cheias.

A manutenção dos volumes de espera nos reservatórios induz a um aumento do risco de que os mesmos não sejam totalmente recuperados ao final da estação chuvosa. Isto implica numa redução das disponibilidades energéticas e um aumento do risco de geração térmica. Desta forma, a geração de energia mantém sua prioridade, porém, sujeita a restrições do controle de cheias. De qualquer forma, o efeito de regularização causado pelos reservatórios produziu segurança às populações. No hidrograma da figura 1.4 é observada a atenuação do pico de cheia propiciado pela interferência do reservatório no ciclo hidrológico, onde o volume de espera (visualizado na figura 1.3) é utilizado para conter o volume afluente amenizando a onda de cheia.

Figura 1.4 - Atenuação do pico de cheia.

Para que o plano de controle de cheias tenha bom andamento é necessário: definir com clareza as restrições do sistema (seções que se deve proteger e limites de vazões); garantir que o risco de emergência mantenha-se abaixo de um valor previamente estabelecido (probabilidade de rompimento das restrições); antecipar ou evitar operações de emergência com a previsão de vazões; determinar a alocação ótima dos volumes de espera, selecionando os reservatórios que, no sistema, realizam o controle de cheias e decidir a quantidade de volume de espera a ser alocada.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar a utilização dos reservatórios no controle de cheias, por meio dos métodos empregados no cálculo dos volumes de espera, analisando as principais linhas de atuação no controle de cheias em vigor, Método da Curva Volume x Duração e Método das Trajetórias Críticas, realizar uma revisão crítica dos modelos e comparar os resultados destes métodos com o Método por Equações Diferenciais Estocásticas, que aplica uma abordagem bayesiana em sua metodologia. Também incluir entre os métodos uma modificação do Método da Curva Volume x Duração, idealizado nesta pesquisa, que se pode chamar Método da Curva Volume x Duração por Janelas. A análise envolve o desempenho e a adaptabilidade dos modelos ao Sistema Hidroelétrico Brasileiro e o conflito com a geração de energia.

1.3 Disposição do Trabalho

Apresentamos na introdução os objetivos e aspectos envolvendo o controle de cheias. No Capítulo II, apresentamos uma revisão dos métodos existentes para o cálculo do volume de espera no controle de cheias. No Capítulo III, apresentamos os métodos implementados e aplicados em usinas reais do Sistema Hidroelétrico Brasileiro. O Capítulo IV trás o modelo de simulação adotado, a partir do qual obtemos bases para análise do desempenho de cada método. O Capítulo V apresenta o estudo de caso, onde encontram-se as características da usina utilizada nos testes de aplicação dos modelos de cálculo de volume de espera, e os resultados da simulação da operação do reservatório, com os volumes de espera obtidos em cada método. No Capítulo VI, a avaliação dos métodos em relação a capacidade de cada um deles em controlar as inundações decorrentes das elevadas vazões afluentes, levando em consideração a influência nos parâmetros de geração de energia elétrica.

CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE NO CONTROLE DE CHEIAS

As estruturas hidráulicas, em especial as voltadas para proteção contra inundações, têm seu dimensionamento condicionado às vazões máximas prováveis. Uma das primeiras ferramentas empregadas para determinação destas vazões é o estudo de previsão de cheias máximas. Em situações onde os dados de cheias disponíveis são poucos, empregam-se fórmulas empíricas estabelecidas em função das características de cada bacia. Em regiões mais desenvolvidas, onde a coleta de dados é bem maior, são aplicados métodos estatísticos de previsão de enchentes.

Um dos primeiros métodos empregados para previsão de enchente é o método de Fuller (1913) encontrado em [6]. Neste método são consideradas sucessivamente a máxima enchente no período estudado, depois a maior excetuando a máxima, e assim sucessivamente. É então, traçado um gráfico tomando como ordenadas as razões dos valores das máximas enchentes (vazão máxima) pelo valor médio anual e como abscissas os logaritmos dos tempos. Os pontos obtidos estão próximos da reta de equação:

$$Q_T = \bar{Q} (a + b \log T) \quad (2.1)$$

onde: $\bar{Q}$ - média anual das vazões máximas diárias,
 Q_T - vazão máxima provável em T anos,
 a, b - parâmetros determinados caso a caso,
 T^* - período de recorrência em anos.

Em [7] Foster procurou determinar uma curva de probabilidades válida na distribuição das vazões, adotando a curva de probabilidade tipo III de Pearson, para análise das vazões de cheias, com os parâmetros:

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{n} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

$$C_o = \frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^3}{2\sigma \sum (Q_i - \bar{Q})^2}$$

onde: $\bar{Q}$ - média das vazões,
 Q_i - máximas vazões diárias de cada ano,
 σ - desvio da variável Q_i a partir da média,
 n - número de anos,
 C_o - coeficiente de obliquidade de Pearson.

Com o tempo de recorrência determinado, obtém-se a probabilidade de ocorrência de valores de vazão iguais ou superiores. O complementar desta probabilidade, que determina a área sob a curva de probabilidades, e o coeficiente de obliquidade determinam a relação x / σ a partir da tabela da distribuição Pearson, obtendo a variável auxiliar x . A vazão relacionada a um dado período de recorrência é dada por: $Q = \bar{Q} + x$

Segundo Gumbel [6,7] a probabilidade P de um certo valor extremo Q ser atingido é dada por:

$$P_i = e^{-e^{-y_i}} \quad (2.3)$$

Sendo y_i uma variável reduzida, dada por: $y_i = (Q_i - Q_f) \sigma_y / \sigma$

* Engenheiros hidráulicos, trabalhando com dados de igual espaçamento no tempo, preferem substituir o conceito mais ou menos abstrato de probabilidade por um significado físico mais concreto, que é o período de retorno T ou Tr : $Tr = 1 / p(x)$.

- onde Q_f - moda dos valores extremos: $Q_f = \bar{Q} - \sigma (\bar{y}/\sigma_y)$
 Q_i - vazões máximas anuais,
 $\bar{Q}$ - média das vazões máximas anuais,
 σ - desvio padrão dos valores extremos,
 $\bar{y}$ - média da variável reduzida,
 σ_y - desvio padrão da variável reduzida.

Em 1951 Ven te Chow [6,7] realizou modificações na distribuição Gumbel, para determinar seus coeficientes pelo método dos Mínimos Quadrados, e mostrou que questões de frequência de cheias podem ser resolvidas por equações do tipo:

$$Q_T = \bar{Q} + f_k \sigma \quad (2.4)$$

onde o fator de frequência f_k , função do período de recorrência T e do número n de valores extremos que constituem a série, é dado por: $f_k = (y - \bar{y}) / \sigma_y$, sendo y uma variável reduzida definida em (2.3) e σ o desvio padrão da amostra.

Quando os dados relativos às vazões máximas são insuficientes, porém os dados pluviométricos abrangem um período de tempo razoável, aplicam-se métodos que correlacionam as enchentes e as chuvas que as originaram. Tais métodos são ditos indiretos, onde os principais são: método Racional, Fluvograma Unitário e *streamflow routing*. Estes métodos podem ser encontrados em [6,7,8].

No planejamento da operação, os reservatórios direcionados ao controle de cheias caracterizam-se pelos volumes vazios de espera distribuídos em cada um deles para amortecer as cheias em um período de recorrência (inverso da frequência com que ocorre o fenômeno) adotado, tais valores proporcionam elementos para decisão operativa adequada em cada estado do sistema, ou seja, visam uma melhor definição operativa a partir das regras de operação aplicadas ao reservatório.

Este trabalho está voltado para a definição do volume vazio de espera e, portanto, os métodos aqui revisados têm alguma relação com este cálculo. A determinação do volume vazio é baseada na equação de continuidade [2,8,9], disposta a seguir:

$$s(t) = s(t-1) + y(t) - q(t) \quad (2.5)$$

onde: $s(t)$ - armazenamento do reservatório no instante t ,

$y(t)$ - volume afluente no intervalo $(t-1, t)$,

$q(t)$ - volume defluente no intervalo $(t-1, t)$.

A questão tem como ponto central a procura da menor capacidade, K_s , que deve ser alocada de maneira a garantir que o volume defluente mantenha-se abaixo de um valor previamente estabelecido, $q(t) \leq q_r$ para toda a estação chuvosa $t = t_0, \dots, t_n$, a partir do qual ocorrem danos a jusante dos aproveitamentos, supondo uma série de volumes afluentes, $\{y(t_0), y(t_{0+1}), \dots, y(t_n)\}$. O problema então, pode ser definido como segue:

$$\text{Minimizar } K_s \quad (2.6)$$

sujeito a:

$$s(t) = s(t-1) + y(t) - q(t), \quad t = t_0, \dots, t_n \quad (2.7)$$

$$0 \leq s(t) \leq K_s, \quad t = t_0-1, \dots, t_n$$

$$0 \leq q(t) \leq q_r, \quad t = t_0, \dots, t_n$$

Apresentado desta forma, o problema tem todas as equações lineares, então pode-se aplicar programação linear para sua solução.

O modelo mais simples é o Método do Reservatório Linear [2,9], considerado um modelo hidrológico. A hipótese básica desse método é que o armazenamento é somente função da vazão de saída, envolvendo a equação de continuidade e a seguinte equação de armazenamento:

$$S = k q \quad (2.8)$$

onde k é a defasagem no tempo entre os picos dos hidrogramas de entrada e saída e q a vazão de saída.

Outro modelo hidrológico é o método Muskingum [2,7,8,9,10], de caráter empírico e baseado na equação da continuidade. Utiliza uma função linear relacionando o armazenamento e as vazões de entrada e saída:

$$S = k [x_g y + (1 - x_g) q] \quad (2.9)$$

onde x_g é o fator de ponderação ou coeficiente que define a relação entre o armazenamento e as vazões de entrada e saída sobre o reservatório; k é a defasagem no tempo entre os picos dos hidrogramas de entrada e saída; y e q são, respectivamente, as vazões de entrada e saída do reservatório.

Cunge (1969) demonstrou que o método de Muskingum não proporciona amortecimento dinâmico. Contudo, suas equações, quando escritas em termos de diferenças finitas, podem ser uma representação da equação da onda cinética ou da onda difusa pela seleção apropriada dos parâmetros k e x_g . O método Muskingum-Cunge [2,8,9] relacionou os parâmetros k e x_g com características físicas, cuja relação vem a ser uma aproximação das equações de Saint Venant [8] (equações de continuidade quantidade de movimento).

O modelo SSARR (Streamflow Syntesis and Reservoir Regulation) [2,8,9] é outro método baseado no modelo de Muskingum fazendo $x_g = 0$. Desenvolvido a partir de 1956 pelo U.S. Corps of Engineer, tem como objetivo servir a usos operacionais e previsões diárias de vazões. Tendo sido aperfeiçoado, o modelo é aplicado também ao estudo de cheias. A sua metodologia de cálculo para propagação da cheia baseia-se na equação fundamental da continuidade para reservatórios, supondo também que o armazenamento é função da vazão defluente. Derivando-se a equação de continuidade, obtemos a equação básica utilizada pelo método:

$$y(t) = q(t) + x_g \frac{dq}{dt} \quad (2.10)$$

onde: x_g - fator de proporcionalidade entre armazenamento e defluência.

Para utilização destes modelos são necessários somente os hidrogramas de montante e jusante. Este tipo de modelo pode ser usado quando o efeito preponderante é o amortecimento devido ao armazenamento.

O grau de proteção provido no projeto de reservatórios depende das conseqüências da perda de controle de uma inundação. Beard [11] considerou apropriado prover

proteção contra inundações de magnitude tal que só é excedida uma vez em aproximadamente 50 anos, em média. A determinação do espaço vazio necessário para prover um grau selecionado de proteção é baseado na análise detalhada da hidrografia. Beard apresenta uma avaliação geral que pode ser feita a partir das Curvas Volume x Duração, figura 2.1, obtidas do estudo de freqüência de volumes afluentes. Na figura 2.1, as abscissas representam as durações, as ordenadas os volumes das cheias para uma determinada recorrência e o coeficiente angular ϕ da reta representa uma vazão. Considerando esta vazão igual a restrição qr e fazendo tal reta tangenciar a curva volume x duração, o volume de espera é dado pela interseção com o eixo dos volumes.

Figura 2.1 - Modelo da Curva Volume x Duração (método gráfico)

O Método da Curva Volume x Duração introduzido por Beard* *apud* Damázio [12] foi o primeiro método adotado pelo Setor Elétrico Brasileiro para o cálculo do volume de espera. Este método relaciona cada período de tempo, com uma certa duração de dias consecutivos, com o volume máximo afluente deste período; e, a partir das séries históricas de vazões, considerando a vazão defluente de restrição qr , define-se o volume vazio necessário para conter a cheia. A aplicação do método tem como obstáculo a variação amostral que torna a curva de máximos volumes afluentes não côncava. O fato de o método informar apenas um volume de espera para toda a estação chuvosa também constitui um problema. Apesar das dificuldades encontradas, o método é ainda aplicado.

* BEARD, L.; *Hypothetical Floods*, Hydrologic Engineering Center, Corps of Engineers, U.S. Army, Davis, California, March 1975, *apud* DAMÁZIO [12].

Loucks e Dorfman [14] realizaram uma avaliação das regras de decisão lineares, aplicadas na estimação da capacidade de armazenamento e defluência dos reservatórios, e políticas de operação. Os modelos em problemas de controle de reservatórios apresentam dois grupos de restrições: limites, inferior S_{LI} e superior S_{LS} , do volume de armazenamento e limites, inferior q_{LI} e superior q_{LS} , de defluência (regularização) dos reservatórios. Como as afluições futuras são em princípio desconhecidas, as vazões defluentes e os volumes de armazenamento são considerados aleatórios, o que conduz à necessidade de se especificar uma porcentagem de vezes em que estes limites podem ser excedidos, o que se traduz em restrições de risco que definem a confiabilidade requerida:

$$P\{S_{LI} \leq S(t)\} \geq \alpha_s \quad (2.11)$$

$$P\{S_{LS} \geq S(t)\} \geq \alpha_s$$

$$P\{q_{LI} \leq q(t)\} \geq \beta_q \quad (2.12)$$

$$P\{q_{LS} \geq q(t)\} \geq \beta_q$$

Considerando o problema de operação de reservatórios, para cada período t e afluição $y(t)$, a distribuição de probabilidade dos valores de volume $S(t)$ e defluência $q(t)$ são aleatórios e dependentes da política de operação. Estas distribuições são desconhecidas, não sendo possível derivar equivalentes determinísticos para as restrições de risco, a menos que tais distribuições de S e q estejam em função da distribuição de afluição $y(t)$, que é conhecida. É justamente o que as regras de decisão fazem, definem $S(t)$ e $q(t)$ em função de $y(t)$:

$$S(t+1) = \lambda(t) y(t) + b_s(t) \quad \forall t \quad (2.13)$$

$$q(t) = S(t) + (1 - \lambda(t)) y(t) - b(t)$$

onde $\lambda(t)$ é um coeficiente conhecido ($0 \leq \lambda(t) \leq 1$) que indica o quanto a afluição é considerada na determinação da defluência, a cada instante t , e $b_s(t)$ é uma variável determinística irrestrita ($b_s > 0$), definida para cada período t . Uma limitação básica para estes modelos é sua característica conservativa, sendo especificada uma capacidade de armazenamento maior do que realmente é necessária.

Sobel [15] desenvolve uma analogia entre modelos de operação de reservatórios e “Teoria de Estoque”, analisando a estrutura de controle em tempo discreto para armazenamento e regularização das quantidades de água descarregadas dos reservatórios. Considerando o reservatório com capacidade C , o armazenamento mínimo necessário é definido como um problema determinístico baseado na equação da continuidade:

$$s(t) = \min \{C, s(t-1) + y(t) - q(t)\} \quad (2.14)$$

Sujeito a

$$s_{LI} \leq s(t) \leq C \quad q_{LI} \leq q(t) \leq q_r$$

Sendo $s(t)$ o volume armazenado no período t , $q(t)$ a quantidade defluída do reservatório no final do período t , $y(t)$ a afluência, s_{LI} limite inferior para o armazenamento, q_{LI} limite inferior para a defluência, e q_r descarga de restrição. Substituindo $s(t-1) - q(t)$ por uma variável de decisão $w(t)$ que representa o armazenamento depois da descarga e antes da defluência, então (2.14) é equivalente a:

$$s(t) = \min \{C, w(t) + y(t)\} \quad (2.15)$$

Sujeito a

$$0 \leq w(t) \leq s(t-1)$$

A relação $C - s(t-1)$ indica o armazenamento disponível¹ no reservatório no começo do período t e é representada por $u(t)$. De modo similar, $v(t) = C - w(t)$ pode ser interpretado como sendo o armazenamento disponível depois da defluência $q(t)$ e antes da afluência $y(t)$: $v(t) = C - w(t) = C - s(t-1) + q(t) = u(t) + q(t)$

Agora (2.14) e (2.15) são equivalentes a:

$$u(t) = v(t) - y(t) \quad u(t) \leq v(t) \leq C \quad (2.16)$$

O propósito de transformar $(s, w) \rightarrow (u, v)$ é observar que (2.16) é a equação recorrente para sucessivos níveis de estoque.

Kelman [12,18,19], no CEPEL, desenvolveu o Método das Trajetórias Críticas, que calcula recursivamente o limite inferior para o volume vazio necessário, $Ve(t)$, a cada instante de tempo t , para uma probabilidade de emergência p' , através de:

$$Ve(t) = \max [0, q(t+1) - q_r + Ve(t+1)] \quad (2.17)$$

¹ Também pode ser entendido como espaço vazio.

A evolução do volume de espera define a trajetória crítica para cada série e a fronteira para operação do reservatório. A envoltória das trajetórias chama-se curva limite, que garante a não ocorrência de uma vazão defluente superior à descarga de restrição. Como não é conveniente alocar a curva limite para proteger todas as trajetórias, pois comprometeria a geração de energia, define-se as trajetórias críticas não protegidas, para uma probabilidade p' de emergência. O algoritmo só se torna viável com o emprego de séries de comprimento significativo (séries sintéticas de vazões). O método das trajetórias críticas representa um grande progresso, pois soluciona o problema de determinação e alocação temporal dos volumes de espera.

Barros e Araújo [20] apresentam um modelo de amortecimento de uma onda de cheia ao passar por um reservatório. Neste método, as vazões defluentes $q(t)$ são determinadas a partir das vazões afluentes $y(t)$, dos parâmetros da estrutura de descarga (k_o, l, a_o, b_o) , da variação do nível do reservatório $h(t)$ e das condições de operação:

$$q(t) = k l h(t)^{a/b} \quad (2.18)$$

substituindo na equação de balanço, temos:

$$y(t) + \frac{s(t)}{\Delta t} - \frac{1}{2} \left[k_o l h(t)^{a_o / b_o} \right] = \frac{s(t+1)}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left[k_o l h(t+1)^{a_o / b_o} \right] \quad (2.19)$$

esta equação não linear pode ser resolvida por técnicas iterativas, como por exemplo o Método de Newton.

Tsukumo et al. [21] aplicaram a metodologia que tem por princípio básico o tratamento estocástico das vazões naturais para cada períodos de d dias consecutivos. Os estudos probabilísticos são baseados na estimativa da vazão máxima média $\hat{y}_{vr}$ (que é a média das máximas) de d dias consecutivos, obtida em função da média e desvio padrão do logaritmo das vazões relativas x_d (admitindo ser Normal a distribuição dos logaritmo das vazões relativas) e do tempo de recorrência adotado. O volume de espera é definido em função do anti-logaritmo da vazão máxima média $\hat{x}_d$, do logaritmo da média das vazões relativas, de d dias consecutivos, e uma constante de transformação de unidades:

$$Ve = y(t) k_m d = \hat{x}_d \bar{y}_{vr} k_m d \quad (2.20)$$

$$\hat{x}_d = \text{antilog } \hat{y}_{vr} \quad \hat{y}_{vr} = \bar{y}_{vr} + Tr \sigma y_{vr}$$

onde: x_d - vazão relativa: $y(t)/\bar{y}$,
 y_{vr} - logaritmo da vazão relativa,
 $\bar{y}_{vr}$ - média de y_{vr} ,
 σy_{vr} - desvio padrão de y_{vr} ,
 Tr - tempo de recorrência,
 k_m - constante de transformação de unidades,
 $\hat{y}_{vr}$ - vazão máxima média estimada.

Vieira et al. [22] apresentam uma metodologia alternativa ao Método da Curva Volume x Duração, denominada Método dos Volume Excedentes. A técnica implica em se obter os volumes de espera a partir do levantamento da série histórica de volumes excedentes a uma dada descarga de restrição. Ajusta-se uma distribuição de probabilidades para a série de volumes excedentes. No caso a opção escolhida por Vieira foi uma distribuição mista exponencial, expressa como segue:

$$P(Y_{ex} > y_{ex}) = (1 - p_n) e^{-\lambda_{ex} y_{ex}} \quad (2.21)$$

$$p_n = \frac{n_1}{n_o} \quad \lambda_{ex} = \frac{n_2}{\sum y_{ex}}$$

onde: n_1 - número de volumes excedentes nulos,
 n_2 - número de volumes excedentes superiores a zero,
 n_o - número de observações,
 y_{ex} - série de volumes excedentes superiores a zero,
 p_n, λ_{ex} - parâmetros da função distribuição de probabilidades.

O volume de espera V_e , para uma probabilidade fixada p' de emergência, é estimado como segue:

$$V_e = - \frac{\ln(p' / (1 - p_n))}{\lambda_{ex}}, \quad \lambda_{ex} > 0 \quad (2.22)$$

O método tem seu maior problema relacionado a variação amostral, e sua aplicação fica prejudicada nos casos em que as descargas de restrição são pouco rigorosas, ou seja, as imprecisões variam inversamente ao rigor das descargas. O ajuste do polinômio de segundo grau, aos pares (volume, duração), produz os maiores desvios nas durações

menores, o que implica em imprecisão na determinação dos volumes de espera para períodos de retorno baixos.

Nascimento e Buba [23] efetuaram um estudo relacionado com a caracterização da bacia e dos sistemas de reservatórios localizados ao longo do rio Iguaçu, para quantificação das vazões de restrição e determinação do potencial de cheias e alocação de volumes de espera. O método utilizado no estudo foi o Método da Curva Volume $\times$ Duração, utilizando o processo gráfico para a definição do volume de espera, depois que ajustes de polinômios do segundo grau, pelo Método dos Mínimos Quadrados [10,13,16], não apresentaram melhorias de qualidade, resultando em volumes de espera inferiores aos obtidos pelo método gráfico.

Vieira e Sales [24] apresentam uma ferramenta auxiliar para alocação temporal de volumes de espera para amortecer cheias. O primeiro passo nessa metodologia é estimar as probabilidades $\hat{p}_i$ de ocorrência de vazões acima da vazão de restrição, no intervalo considerado (i,m) , onde m é o último dia do período estudado e i é o dia corrente. De posse da curva de estimativas de probabilidades e escolhido o tempo de retorno, calcula-se o volume de espera Ve , por exemplo, pelo método da Curva Volume $\times$ Duração. O procedimento baseia-se na idéia de se determinar o volume a ser alocado $Ve(i)$ como uma proporção do volume de espera calculado Ve , usando a relação das estimativas das probabilidades de emergência:

$$Ve(i) = \frac{\hat{p}_i}{\hat{p}^*} Ve \quad \hat{p}_i = \frac{\sum_{i=i}^m n_s(i)}{(m - i + 1) n} \quad (2.23)$$

onde: $n_s(i)$ - número de vazões superiores a vazão de restrição para o dia i ,

m - último dia do período estudado,

n - número de anos do histórico,

$\hat{p}_i$ - probabilidades de ocorrência de vazões acima da vazão de restrição para o dia i .

Meon [25] apresentou o problema formulado em função da carga e da resistência, que são tidos como processos aleatórios. A carga refere-se ao volume da inundação S_{in} expresso como uma função densidade de probabilidade $f_s(S_{in})$ dos volumes máximos

anuais de cheias. A resistência é expressa como uma distribuição de probabilidades $f_r(S_r)$ do armazenamento disponível S_r no reservatório. Cargas e resistências são expressas em unidades de volume. A falha no sistema acontece quando a carga excede a resistência, sendo a estimação da falha dada pela solução da integral de falha da função densidade de probabilidade conjunta $f_{rs}(S_r, S_{in})$:

$$P_f = P(S_{in} > S_r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^s f_{rs}(S_{in}, S_r) d_r d_s = \int_{-\infty}^{\infty} F_r(S_r) f_s(S_{in}) ds \quad (2.24)$$

$$F_r(S_r) = \int_0^s f_r(S_r) dr \quad f_s(S_{in}) = \mu_s e^{-\mu_s (S_{in} - \tau)} \quad (2.25)$$

onde: μ_s e τ - parâmetros da distribuição exponencial para valores extremos.

O método é prático, pois requer informações que normalmente são obtidas na fase de projeto da barragem, ou a partir de registros de operação de uma barragem existente (regras de operação). Duas aproximações básicas são mais usadas: uso da cheia máxima provável (*PMF*), e uso de uma inundação de período de retorno selecionado. Este último é baseado em uma análise de frequência de inundação ou em uma simulação que emprega chuvas de frequências especificadas. Estas aproximações do risco de falha são especialmente apropriadas para quantificar a atual segurança das barragens e a eficiência de medidas alternativas para melhorar a segurança.

Um modelo estocástico baseado em análise de confiabilidade, denominado Método por Equações Diferenciais Estocásticas, é apresentado por Andrade et al. [26,27,28,29], visando o controle de cheias. Neste modelamento, para o período de cheia, a afluência que chega a um reservatório é considerada uma carga, e a capacidade desse reservatório para amortizar esta onda de cheia é considerada como resistência por parte do reservatório contra a projeção da onda de cheia. Um dos pontos interessantes neste método é que o mesmo considera a variação potencial da cheia no decorrer do período chuvoso, possibilitando o cálculo dos volumes de espera e dos respectivos riscos para diferentes intervalos de tempo. A carga e a resistência são tratados como um processo estocástico do tipo difusão [30], e o risco de falha associado é determinado pela resolução do problema de valor de contorno de Dirichlet [30,31]. Portanto, proporciona uma alocação dinâmica para o volume de espera não implicando em dificuldades

encontradas por outros processos que tradicionalmente são usados pelo Setor Elétrico Brasileiro.

O modelamento do problema de controle de cheias para um sistema de reservatórios leva em conta: a equação de balanço da água baseada no princípio da continuidade, onde a afluência deve ser igual ao volume defluído mais ou menos uma variação no armazenamento do reservatório; restrições de armazenamento, onde cada reservatório é caracterizado por seu volume de armazenamento máximo, S_{LSj} ; restrições de defluência dos reservatórios, que são limitados pela capacidade dos vertedouros; restrições de fluxo nos pontos de risco, onde a descarga deve ser inferior a uma vazão máxima estipulada q_{LSj} ; restrições de não negatividade, estabelecendo que para cada reservatório as afluências, defluências, armazenamentos e fluxos não podem ser negativos. Para um sistema de reservatórios, é necessário incluir uma função objetivo às restrições, que tem a finalidade de relacionar volume armazenado e volume de espera levando em conta os benefícios de cada um, podendo ser usado como critério, por exemplo, a maximização da energia armazenada Es do sistema. Desse modo, tem-se, por exemplo, o problema:

$$\text{Maximizar } \sum Es_j \quad (2.26)$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} s_j(t) &= s_j(t-1) + y_j(t) + \sum_{k=1}^n c_{jk} r(t) - r_j(t) & j &= 1, n & t &= t_0, t_n \\ 0 \leq s_j(t) &\leq S_{LSj} & j &= 1, n & t &= t_0-1, t_n \\ q_{LIj} &\leq q_j(t) \leq q_{LSj} & j &= 1, n & t &= t_0, t_n \end{aligned} \quad (2.27)$$

onde: Es_j - energia armazenada no reservatório j ,

S_{LS} - limite superior do volume de armazenamento

j e k - referem-se aos reservatórios do sistema,

$y_j(t)$ - afluência não controlada ao reservatório j ,

q_{LIj} - limite inferior para defluência do reservatório j ,

q_{LSj} - limite superior para defluência do reservatório j ,

c_{jk} - $c_{jk} = 1$ se o reservatório k está imediatamente à montante de j , e 0 caso contrário.

Quanto maior o número de reservatórios e períodos de tempo, tanto maior o número de restrições e o nível de complexidade das mesmas. Selecionar o melhor plano pelas técnicas convencionais envolve processos de tentativa e erro baseados na análise individual dos reservatórios. Então, Windsor [33] apresentou uma metodologia que emprega programação inteira mista como ferramenta de otimização para controle de cheias em sistemas de multi-reservatórios. A idéia é construir um modelo de otimização no qual pedaços de segmentos lineares são usados para aproximar as funções de custos não lineares, na suposição de que o sistema pode ser linearizado, e então usar um conjunto de inteiros para definir um critério de múltipla escolha. Os pontos limitantes mais significativos na aplicação deste método são os seguintes: os danos são relacionados apenas aos picos de cheias nos pontos de riscos, sendo a velocidade de fluxo e a duração do tempo de inundação de segunda importância; a análise considera só um único propósito, que é o controle do desenvolvimento da inundação, sendo que a cheia está limitada a uma estação no ano, e portanto, deveria ser tratada como variável dependente no tempo; outro problema é a dificuldade de definir a variabilidade da cheia no espaço e no tempo, pois a variedade entre picos de cheias individuais e volumes de cheias é considerada. O sistema de controle de inundação é projetado com base de que serão providos armazenamento de inundação suficiente e capacidade de saída para controlar a inundação máxima provável. Contudo esse alto nível de proteção pode ser impraticável e caro, sendo uma possível alternativa formular o problema num ambiente estocástico com um certo risco de violação das restrições.

Algum tempo depois, Windsor [34] introduziu modificações no modelamento anterior, tendo por finalidade o desempenho ótimo de um sistema, composto de estruturas de controle de cheias, em adição aos reservatórios, também consideradas opções alternativas como, por exemplo, melhorias no canal de fluxo em pontos chaves ao longo do rio. O modelo é considerado como um dispositivo de seleção preliminar que permite comparar configurações alternativas e determinar, aproximadamente, a solução de menor custo para um dado problema. A formulação do problema considera as restrições de armazenamento, restrições de defluência dos reservatórios, equação de balanço de massa do reservatório, variação da onda de cheia, áreas protegidas e restrição de fluxo do canal, continuidade nas junções do canal e restrição de não negatividade.

Para este modelo são observadas algumas limitações significativas: o modelo é estruturado para selecionar a locação ótima e a capacidade das estruturas de controle de cheias para um nível específico de proteção; a metodologia compara os planos alternativos baseada somente nos custos; o modelo considera apenas uma opção de controle de cheias em cada extensão do canal de fluxo.

Costa [19] propõe usar um método de cálculo de volume de espera unido a um modelo de simulação, aplicando de montante para jusante. Desta forma o cálculo de cada volume de espera leva em conta os efeitos dos volumes alocados à montante, contudo, este método não aloca volumes de espera com finalidade de se reduzir as necessidades de volume de espera em reservatórios de jusante. Objetivando solucionar esta questão, Costa² *apud* Damázio [12] considerou os limites de defluência de cada reservatório como variável de decisão μ_j sujeita ao limite superior qr_j . Fez-se uma série de hipóteses referentes à forma da curva Volume x Duração de cada reservatório e a sua variação em função dos limites de defluência dos reservatórios a montante, propondo assim, uma expressão analítica para o volume de espera de cada reservatório. Adotando uma formulação não-linear para energia armazenada, elaborou-se o seguinte problema:

$$\text{Maximizar } Es(S_1, \dots, S_n) \quad (2.28)$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} \mu_j &\leq qr_j & j &= 1, \dots, n \\ Ve_j &\geq f_j(\mu_1, \dots, \mu_n) & j &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2.29)$$

Com essa formulação, o número de restrições do problema se reduz bastante. Contudo, o método encontra como dificuldades a formação das funções $f_i(\cdot)$, que necessitam de várias hipóteses, bem como a não linearidade destas funções.

Loucks et al. [32,35], para reduzir a complexidade do problema, propuseram a idéia de “Volume de Espera Equivalente”. Considerando um sistema com dois reservatórios, sendo R_1 a jusante e R_2 a montante, procura-se uma função que relacione volumes de espera alocados em R_2 com volumes de espera alocados em R_1 , para a proteção da seção

² COSTA, J. P.; *Controle de Cheias em Reservatórios de Usinas Hidroelétricas*, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 1982.

a jusante de R_1 . Ou seja, pretende-se encontrar o volume equivalente no reservatório R_1 , que forneça a mesma segurança a jusante de R_1 que um dado volume de espera alocado em R_2 o faria. A simulação é realizada utilizando várias alocações de volumes de espera em R_2 desconsiderando a existência de R_1 e o mesmo acontecendo para R_1 em relação a R_2 . A comparação dos resultados das simulações fornece a relação de equivalência em R_1 para os volumes alocados em R_2 , $EQ_{1|2}(K_2)$. Com esta relação, as restrições se resumem a duas:

$$Ve_2 \geq Ve_2^{\min} \quad (2.30)$$

$$Ve_1 + EQ_{1|2}(Ve_2) \geq Ve_1^{\min}$$

Onde os lados direitos são os volumes de espera mínimos em cada local para a proteção a jusante, sem considerar a existência de outros reservatório.

SCEN-GTEH [36] expõe outra maneira de aproximação com base no problema de dois reservatórios em cascata, sendo R_1 reservatório a jusante e R_2 reservatório a montante. O volume de espera alocado em R_2 , deve ser suficiente para controlar toda a afluência a R_2 ; então, calcula-se um $Ve_2^{\min}$ (volume de espera mínimo), utilizando para tanto, o Método da Curva Volume x Duração obtida da análise das afluências $y_2(t)$ ao reservatório R_2 ; do mesmo modo, considerando que o volume de espera alocado em R_1 deva ser suficiente para controlar toda a afluência incremental $y_1(t)$ adicionada da defluência mínima q_{m2} de R_2 , calcula-se um valor mínimo $Ve_1^{\min}$ através da Curva Volume x Duração obtida da análise de $(y_1(t) + q_{m2})$. Obtem-se então, as restrições:

$$Ve_2 \geq Ve_2^{\min} \quad (2.31)$$

$$Ve_1 \geq Ve_1^{\min}$$

O volume de espera total alocado deve ser suficiente para controlar toda a afluência $y_1(t) + y_2(t)$, o que é alcançado supondo um reservatório fictício $R_{1,2}$, tendo como afluência a soma das afluências ao sistema e cujo limite de defluência é qr_1 . Monta-se então uma Curva Volume x Duração para $y_1(t) + y_2(t)$ no cálculo de $Ve_{1,2}^{\min}$, obtendo a restrição:

$$Ve_1 + Ve_2 \geq Ve_{1,2}^{\min} \quad (2.32)$$

Com essa formulação as restrições do problema inicial com n reservatórios reduzem-se a três restrições lineares.

Marien [37] introduziu a teoria de controlabilidade, visando a otimização da alocação dos volumes de espera, onde a idéia é substituir as restrições ao problema por um conjunto menor de restrições baseadas na necessidade de controle de parcelas do sistema original. As condições de controlabilidade englobam as condições necessárias e suficientes para a existência de uma regulação que previne todas as cheias em um sistema de reservatórios com um simples ponto de controle localizado imediatamente abaixo do reservatório mais a jusante. Num sistema considerado normal, partindo-se de qualquer reservatório, existe apenas um caminho que leva a água por gravidade até o ponto de saída do sistema. Para este sistema, a descrição das condições de controlabilidade para cada reservatório do sistema usa notação de sistemas parciais, obtidos desconsiderando alguns reservatórios do sistema original normal. Com isso, as condições necessárias e suficientes para um sistema de reservatórios normal ser controlável são definidas por:

$$\sum_{j \in u_o} Ve_j \geq Ve_{u_o}^{\min} \quad \forall u_o \in U \quad (2.33)$$

onde u_o é um sistema parcial obtido do sistema original; U é o conjunto dos sistemas parciais que contém o reservatório mais a jusante do sistema, e $Ve_u^{\min}$ pode ser obtido pelo Método das Trajetórias Críticas. A equivalência entre as equações de operação do sistema e as equações de rede de fluxo com arcos capacitados possibilita encontrar, também, as condições de controlabilidade através de análises de diagramas de massa, para o caso de um único ponto de controle situado à jusante do sistema.

Em Damázio e Marien [38] e Damázio [12] ampliaram-se os resultados alcançados por Marien para sistemas com um único ponto de controle e sem defluências mínimas, conseguindo as condições de controlabilidade para sistemas com varias seções de controle com ou sem limites de defluências mínimas.

O conceito de envoltória é utilizado por Rocha et al. [39] numa abordagem estocástica das condições de controlabilidade aplicada ao controle de cheias. Neste

modelo, os espaços vazios necessários são associados a riscos de inundação através do conceito de tempo de retorno, tendo por objetivo a redução do risco de inundação em relação a um risco meta. A metodologia alcançada por ROCHA et al. pode ser aplicada a qualquer sistema de reservatórios nos quais as condições de controlabilidade são efetivamente utilizadas.

O método apresentado por BALL et al. [40] permite aproximar qualquer política operacional razoável e admite a inclusão de limites de outras opções de controle de inundação. O método de otimização de limites e derivação, proposto por BALL et al., examina as alternativas estruturais para identificar as que são válidas para proteger uma área de terra especificada de uma determinada inundação de projeto. A técnica usa o método de Muskingum [41] no controle de fluxo e para definir os efeitos das medidas de controle de cheias, tendo assim, informação e precisão suficientes para uma avaliação preliminar das medidas estruturais, que inclui capacidade de armazenamento das cheias nos reservatórios e bacias de armazenamento de inundações temporárias, diques, e melhorias de capacidade do canal.

CAPÍTULO III - METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE VOLUME DE ESPERA

3.1 Introdução

O amortecimento de cheias tem se destacado nos últimos anos entre os diversos aspectos na utilização dos recursos hídricos, pela ocorrência periódica de enchentes que causam prejuízos econômicos e sociais. Em primeira instância são recomendadas medidas estruturais visando o controle de enchentes [1,2]. Dentre estas medidas podemos citar a construção de diques e cais, urbanização de áreas, elevação de estradas, reconstrução de tomadas d'água etc. Contudo, na maioria das vezes tais medidas não são implantadas, ou são insuficientes para resolver o problema. Desta forma, os reservatórios passaram a exercer papel relevante, em termos de medidas não estruturais, para reduzir os danos que certas cheias podem causar, através da prática de alocação de volume de espera ao longo dos períodos mais críticos.

Os reservatórios podem ser classificados em dois grupos, segundo a sua capacidade de regularização: compensação e acumulação. Os reservatórios de compensação têm, geralmente, pouca capacidade de regularização com volume suficiente para regularizar apenas vazões semanais ou diárias. Estes reservatórios trabalham praticamente a fio

d'água, ou seja, todo volume afluyente que chega ao reservatório é defluído. Já os reservatórios de acumulação têm capacidade de regularização bem maior, podendo regularizar vazões de um mês, um ano ou até mesmo de vários anos. Os reservatórios de acumulação atenuam bastante o efeito da variabilidade das afluições naturais e assumem importante função no controle de cheias em suas bacias. Nos períodos úmidos deixa-se vazio um espaço no reservatório, proporcionando um volume capaz de armazenar afluições elevadas caso ocorram, reduzindo os eventuais danos nas áreas ribeirinhas a jusante. A aplicação destes volumes de espera é definida em função de restrições de vazão defluente máxima [42].

O sistema de geração de energia elétrica brasileiro tem sua base fundamentada na geração hidráulica, proveniente de usinas hidroelétricas, responsável por cerca de 94% do total de energia gerada no país. A operação das usinas para fins de geração de energia, objetivando atender a carga, e o controle de cheias, objetivando a segurança da população e das próprias usinas, são pontos críticos conflitantes. O primeiro requer produtividade elevada para suprir a demanda. O segundo, em sentido inverso, pretende regularizar a vazão defluente das usinas hidroelétricas, alocando espaços vazios nos reservatórios para amortizar ou absorver parcelas de afluições que, por ventura, causariam danos a jusante dos aproveitamentos. O conflito está intimamente ligado à característica aleatória das afluições, pois a conservação dos volumes de espera nos reservatórios pode levar a uma redução da disponibilidade de energia, o que implica em um aumento da geração térmica, aumentando o custo da energia; no entanto, a não alocação destes volumes pode levar a danos irreparáveis. Além disso, o fato de que a maioria dos reservatórios do sistema foram projetados e construídos visando unicamente a geração de energia elétrica dificulta mais ainda o problema. Por isso a necessidade de se alocar os menores volumes de espera possíveis, considerando o risco de que os mesmos não sejam capazes de controlar a cheia, com o intuito de conciliar geração de energia e controle de cheias [5,12,18,26,42].

O presente trabalho procura estudar o problema do amortecimento de cheias utilizando apenas os reservatórios existentes para reduzir os efeitos das inundações. Apresentamos, neste estudo, alguns dos métodos mais tradicionais usados pelo Setor

Elétrico Brasileiro para o cálculo dos volumes vazios de espera no controle de cheias. Os métodos implementados para estudo são: o Método da Curva Volume $\times$ Duração [11,12,18], primeiro método para cálculo de volume de espera aplicado em sistemas brasileiros; o Método da Curva Volume $\times$ Duração por Janelas, idealizado nesta pesquisa, onde o cálculo de volume de espera é baseado na vazão afluente acumulada e duração crítica associada, com a introdução do conceito de janelas de aflúências com a finalidade de efetuar alocação diária de volume de espera, removendo a principal desvantagem do Método da Curva Volume $\times$ Duração tradicional; o Método das Trajetórias Críticas [12,18,19,22], que usa a idéia de envoltória das trajetórias no cálculo dos volumes vazios; finalmente o Método por Equações Diferenciais Estocásticas [26,27,28,29], onde a aflúência que chega ao reservatório é considerada como carga, e a capacidade em absorver a onda como resistência, sendo ambos modelados como processos estocásticos do tipo difusão, e o volume de espera determinado a partir da formula de Ito [30]. Os testes aplicados a esses métodos são realizados com usinas reais do Sistema Brasileiro, em particular a Usina Hidroelétrica de Chavantes, que é caracterizada como uma das usinas onde se pode aplicar o controle de enchentes.

3.2 Método da Curva Volume $\times$ Duração

O método da Curva Volume $\times$ Duração foi desenvolvido por Beard [11] em 1963 com o intuito de se encontrar uma maneira de resolver o problema, cada vez mais freqüente, de inundações no estado da Califórnia. Este método foi o primeiro a ser adotado pelo Sistema Elétrico Brasileiro, em 1975, sendo implantado com a crescente necessidade de aliar produtividade e segurança com relação à ocupação das áreas ribeirinhas de risco [12,18,22,23,24].

Caracterizado por ser conservador, este método é baseado no cálculo de valores acumulados de vazões médias de diferentes durações, é suscetível à variação amostral, e o tipo de distribuição teórica de probabilidade empregada sobre os valores acumulados é de grande importância no desempenho do método, o que nos revela a necessidade de um histórico de vazões tal que permita uma melhor escolha do tipo de distribuição.

Este método relaciona, para cada intervalo de tempo com duração de d dias consecutivos, o máximo volume afluente acumulado, definido por:

$$va(d) = \max_{0 < t < h-d+1} \left[\sum_{j=0}^{d-1} (y(t+j)) \Delta t \right] \quad (3.1)$$

onde:

- $va(d)$ - máximo volume afluente acumulado para duração de d dias,
- d - duração em dias,
- $y(t+j)$ - vazão média no dia $t+j$,
- Δt - intervalo de discretização,
- h - número de dias da estação chuvosa,
- t - tempo em dias.

A partir da série histórica de vazões naturais médias diárias e admitindo uma vazão defluente acumulada máxima para cada série, pode-se definir, para cada ano hidrológico, o volume vazio necessário para absorver cheias com qualquer duração, sendo a duração associada a este volume definida como duração crítica. Desse modo, o volume de espera para o i -ésimo ano é representado como segue:

$$Ve(i) = \max [va(d) - d.qr. \Delta t, d=1, \dots, h] \quad (3.2)$$

onde:

- $Ve(i)$ - volume de espera para o período chuvoso do ano hidrológico i ,
- qr - descarga de restrição.

Os passos anteriores são repetidos para cada uma das m séries dos histórico, sendo o volume de espera a ser adotado definido como o valor máximo entre os volumes de espera calculados para cada série:

$$Ve = \max [Ve(i), i=1, \dots, m] \quad (3.3)$$

O ajuste de uma função distribuição de probabilidades a cada duração de d dias possibilita a construção da curva Volume $\times$ Duração, cuja forma é mostrada na figura 3.1. Entretanto, as incertezas quanto às vazões afluentes futuras nos leva a um estudo de

freqüência para a adoção de uma distribuição teórica de probabilidades que melhor se adapte ao conjunto de dados de vazões afluentes, para podermos definir a curva de volumes afluentes acumulados $va(d)$.

Figura 3.1 - Curva Volume x Duração associada a uma probabilidade p' fixa de emergência.

São levantadas, da série histórica, amostras de eventos máximos de várias durações. Realizamos os testes de aderência, Qui Quadrado e Kolmogorov-Smirnov [4,7,10,13,16,31], em diferentes conjuntos amostrais para observar o desempenho de diferentes distribuições teóricas de probabilidades em relação à distribuição amostral. As distribuições teóricas de probabilidades testadas foram: Normal, Lognormal, Gamma e Gumbel [2,4,7,9,10,13,16]. No Anexo B, são apresentadas as distribuições teóricas mais aplicadas, em estudos estatísticos, ao fenômeno hidrológico de vazões afluentes diárias, contendo uma descrição rápida dos modelos probabilísticos de distribuição. Neste contexto, a vazão afluente é definida como uma variável aleatória e contínua, o que determina o emprego de distribuições contínuas de probabilidade. Os testes de aderência utilizados estão descritos no Anexo C. O resultado dos testes efetuados indicaram que as distribuições Lognormal, Gamma e Gumbel podem ser aplicadas ao conjunto de dados. Escolhemos a distribuição Gumbel por ter apresentado melhor aderência aos conjuntos de dados do histórico de vazões naturais médias diárias, e também por representar

melhor os eventos extremos, ou seja, vazões máximas ocorridas entre as vazões catalogadas no histórico, as quais são de maior interesse no estudo de controle de cheias. As funções densidade e distribuição de probabilidade da distribuição Gumbel são dadas, respectivamente, por:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\theta)} - e^{-\alpha(x-\theta)}, \quad x \geq 0 \quad (3.4)$$

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_0^x f(x)dx = e^{-e^{-\alpha(x-\theta)}}$$

onde $\alpha > 0$ e $-\infty < \theta < \infty$ são parâmetros da distribuição Gumbel.

O Ajuste da distribuição de freqüência de probabilidades para cada duração de d dias aplica o mesmo tempo de retorno, para a construção da curva Volume $\times$ Duração, associado a uma probabilidade p' fixa de emergência, geralmente definida em torno de 5%, ou seja $p' = 0.05$. A probabilidade de que um certo volume afluente $Va(d)$ seja maior que o máximo volume afluente acumulado $va(d)$ é:

$$P[Va(d) > va(d)] = p' = 1 - P(X \leq x) \quad (3.5)$$

Esta probabilidade de risco é aplicada não apenas a este método como também aos outros em análise.

Este método nos leva a uma solução conservadora, informando somente um único volume de espera para toda estação chuvosa. Isto significa uma superproteção desnecessária, pelo menos para o início e o final da estação, acarretando perda de capacidade de geração, já que a potencialidade das afluições varia ao longo do período, apresentando a maior concentração de vazões críticas próximo ao centro da estação.

O modelo computacional implementado para o método da Curva Volume $\times$ Duração é apresentado no fluxograma da figura 3.2. O programa é inicializado com a leitura dos seguintes itens: arquivo de vazões afluentes (q.dat) em m^3/s ; número das séries contidas no arquivo; comprimento das séries. Em seguida, são lidas as características e restrições da usina, e a probabilidade de risco de falhas. São gerados alguns vetores vazios para armazenamento interno do programa, que servem também como arquivos de saída. A primeira subrotina está relacionada à construção da matriz M de volumes afluentes

acumulados. Esta subrotina está ligada diretamente com a subrotina que realiza os cálculos de volume afluente acumulado e volume de espera para cada duração. Nesta última subrotina são realizados os somatórios das vazões afluentes, e definido o volume de espera e duração crítica associada, sem a aplicação da probabilidade de risco de falhas.

Figura 3.2a - Fluxograma parcial (1/3) do Método da Curva Volume x Duração

Figura 3.2b - Fluxograma parcial (2/3) do Método da Curva Volume x Duração

Figura 3.2c - Fluxograma parcial (3/3) do Método da Curva Volume x Duração

Após a construção da matriz de volumes afluentes acumulados é inicializada a subrotina para formação do vetor de volumes de espera estocásticos, com seus elementos definidos para cada duração. Nesta subrotina, a matriz M é particionada formando vetores de volumes afluentes acumulados relacionados à cada duração, de onde são extraídos o valor esperado e variância destes vetores, que são conjuntos de dados, usados na determinação dos parâmetros da distribuição a ser aplicada (no caso a distribuição Gumbel para valores extremos) na definição do volume afluente acumulado estocástico para uma probabilidade de risco de falha de 5%. Por conseguinte, é efetuado o cálculo do volume de espera em função do volume afluente acumulado estocástico, sendo o valor armazenado num vetor de volumes de espera estocásticos. O volume de espera final a ser aplicado, é o maior elemento contido neste vetor de volumes de espera, e a duração associada a este valor é definida pela posição deste elemento no vetor (por exemplo, para o 10º elemento do vetor de volumes de espera, a duração associada é 10).

3.3 Método da Curva Volume x Duração por Janelas

Com o objetivo de compatibilizar a manutenção do risco com a evolução temporal dos volumes de espera alocados, introduzimos o conceito de janelas aplicado à censura contínua das séries de vazões naturais médias diárias, ou seja, as vazões afluentes são tomadas em blocos deslocados gradativamente ao longo da estação chuvosa, figura 3.3.

Figura 3. 3 - Formação dos blocos de vazões afluentes

Para se calcular o volume de espera de um certo dia n consideramos, a partir do arquivo de histórico de vazões afluentes médias, apenas uma faixa de dados, tendo n como índice central dessa faixa, figura 3.3, variando de 0 até h . O número de dias fixado para a faixa versos o número de séries existentes no histórico define uma janela de dados de largura h_J (esta largura deverá ser fixa para todos os dias) para o n -ésimo dia, sendo aplicada nos cálculos para determinação do volume de espera para este mesmo dia [50,51], e assim sucessivamente até o último dia da estação chuvosa.

As características básicas do método da Curva Volume x Duração por Janelas não mudam em relação à metodologia original. A diferença está no tratamento inicial dos dados. Os máximos volumes afluentes acumulados são relacionados para cada intervalo com duração de d dias consecutivos, onde a duração máxima está vinculada com a largura da janela (não podendo ser superior):

$$va_J(d) = \max_{0 < t < h_J - d + 1} \left[\sum_{j=0}^{d-1} (y(t+j)) \Delta t \right] \quad (3.6)$$

onde: $va_J(d)$ - máximo volume afluente acumulado para duração de d dias,

d - duração em dias,

$y(t+j)$ - vazão afluente média no dia $t+j$,

Δt - intervalo de discretização,

h_J - largura da janela,

t - tempo, em dias.

Admitindo uma vazão defluente máxima, relacionada para cada dia através dos blocos de afluências, pode-se definir o volume vazio necessário para absorver cheias com qualquer duração d vinculada à largura da janela. Desse modo, o volume de espera para o n -ésimo dia é representado como segue:

$$Ve_J(n) = \max [va_J(d) - d.qr, \Delta t, d=1, \dots, h_J] \quad (3.7)$$

onde: $Ve_J(n)$ - volume de espera para o n -ésimo dia,

qr - descarga de restrição, descarga máxima admissível,

h_J - largura da janela.

O conceito de janelas de dados aplicado ao modelo da Curva Volume $\times$ Duração possibilita o acompanhamento da variação temporal, pois permite traçar curvas de probabilidade das vazões afluentes acumuladas para cada dia, definindo o volume vazio de espera dia a dia. A distribuição teórica de probabilidade aplicada às vazões afluentes acumuladas, para a formação das curvas de volume acumulado $\times$ duração, figura 3.1, é a distribuição Gumbel em virtude dos motivos já mencionados. Os parâmetros de proteção são: a probabilidade de risco associado à proteção; a largura da janela, que representa a variabilidade, incertezas e deslocamento das vazões. A probabilidade de risco empregada p' também é de 5%.

O cálculo dos volumes afluentes acumulados, bem como o cálculo dos volumes de espera alocados, basicamente são os mesmos. O fluxograma da figura 3.4 representa o processo computacional realizado pelo Método das Curvas Volume $\times$ Duração por Janelas. A etapa seguinte à leitura do arquivo de vazões, restrições de vazão mínima e máxima e probabilidade de risco, se destina ao processo de formação das janelas ou blocos de dados, que servirão como base para o cálculo do volume de espera diário. As demais etapas do processo não diferem do modelo original, com a diferença de que são montadas matrizes de volumes acumulados para cada dia.

Figura 3.4a - Fluxograma parcial (1/4) para o Método da Curva Volume x Duração por Janelas

Figura 3.4b - Fluxograma parcial (2/4) para o Método da Curva Volume x Duração por Janelas

Figura 3.4c - Fluxograma parcial (3/4) para o Método da Curva Volume x Duração por Janelas

Figura 3.4d - Fluxograma parcial (4/4) para o Método da Curva Volume x Duração por Janelas

3.4 Método das Trajetórias Críticas

O Método das Trajetórias Críticas foi desenvolvido no CEPEL por J. Kelman em 1987, e permite determinar para cada dia da estação chuvosa, o volume de espera para uma probabilidade de emergência p' , pré-fixada [18,19,36].

Essa metodologia emprega um algoritmo recursivo sobre as vazões naturais médias diárias, sendo que, para cada registro anual identifica-se um período chuvoso de h dias. Ao início do último dia, o volume de espera deverá ser igual a:

$$V_e(h,i) = \max [0, (y(h,i) - qr) \cdot \Delta t] \quad (3.8)$$

onde:

- V_e volume de espera,
- h índice do último dia,
- $y(h,i)$ vazão afluente diária no dia h do ano i ,
- qr descarga de restrição,
- Δt intervalo de discretização,

Ao início do penúltimo dia, o volume de espera deverá ser:

$$V_e(h-1, i) = \max [0, (y(h-1,i) - qr) \cdot \Delta t + V_e(h,i)] \quad (3.9)$$

Genericamente, o cálculo para o volume de espera obedece à seguinte equação:

$$V_e(t-i,i) = \max [0, (y(t-i,i) - qr) \cdot \Delta t + V_e(t,i)] \quad (3.10)$$

onde: $t = 1, 2, \dots, h$.

A evolução do volume de espera para o i -ésimo ano determina, pela sua subtração do volume máximo operativo, a trajetória crítica de volume para o mesmo ano, que por sua vez define uma fronteira para operação do reservatório com relação ao respectivo ano. A figura 3.5 traz a configuração da trajetória crítica de volume para um ano i , para um período chuvoso com duração de h dias.

Figura 3.5 – Evolução do volume de espera para o i -ésimo ano

Um conjunto com m séries de vazões afluentes gera m trajetórias críticas de volume. A envoltória destas trajetórias garante a não ocorrência de vazões superiores à descarga de referência e é representada pela curva limite, figura 3.6. A curva limite é definida pelo máximo volume de espera para cada dia:

$$CL = \max [Ve(t,i) ; \quad i = 1, \dots, m; \quad t = 1, \dots, h] \quad (3.11)$$

Figura 3.6 - Traçado da curva limite para todas as trajetórias

A alocação da curva limite garante que, para uma série histórica de m anos, não haverá o rompimento da restrição de descarga para qualquer hipótese observada no histórico. Contudo, a aplicação da curva limite englobando todas as trajetórias torna-se um tanto inviável economicamente. Para solucionar este problema aplica-se uma probabilidade de risco p' sobre as trajetórias de volume, o que conduz à formação de um

conjunto Cp' , de k trajetórias não protegidas pela curva limite a ser alocada. O objetivo desse procedimento é minimizar o efeito danoso que a alocação de volume de espera causa em relação à geração de energia. É então selecionada como curva limite de volume de espera diário a envoltória de 95% de todas as trajetórias obtidas da simulação. Assim, a envoltória escolhida só não controla 5% das ocorrências de cheias, como mostra a figura 3.7. A probabilidade p' é o risco avaliado para o Método, que determina a evolução temporal do volume de espera.

Figura 3.7 - Curva Limite para uma probabilidade p'

O método das Trajetórias Críticas não é próprio para séries de vazões naturais do histórico de vazões médias diárias: supondo um histórico de $m = 30$ anos e uma probabilidade $p' = 0.02$ (tempo de recorrência de 50 anos), o número de séries não protegidas seria de $k = p' \cdot m = 0.6$, número insuficiente de trajetórias para compor o conjunto Cp' . Só se torna viável para séries sintéticas de vazões diárias, sendo, portanto, necessário acoplar ao método um gerador de séries sintéticas. O Anexo D apresenta um modelo de gerador de séries de vazões diárias, construído para suprir as necessidades inerentes a este método.

O fluxograma para o método das Trajetórias Críticas é mostrado na figura 3.8. Inicialmente, é efetuada a leitura do arquivo de vazões afluentes, que determina tanto o comprimento das séries como o número total de séries disponíveis no arquivo de vazões. Nesta fase é também definida a probabilidade de risco de falhas, características e restrições da usina. Passada a fase de leitura de dados, é iniciada a subrotina para cálculo

das trajetórias de volume do reservatório, onde é efetuado o cálculo recursivo dos volumes de espera diários em cada série, sendo, em seguida, definida a trajetória de volume. Esta subrotina é efetuada para todas as séries.

Figura 3.8a - Fluxograma parcial (1/3) para o Método das Trajetórias Críticas

Figura 3.8b - Fluxograma parcial (2/3) para o Método das Trajetórias Críticas

Figura 3.8c - Fluxograma parcial (3/3) para o Método das Trajetórias Críticas

Passamos então, para a definição da envoltória total, ou seja, incluindo todas as séries, e a envoltória considerando a probabilidade do risco de falha. No segundo caso, é efetuada a subrotina para encontrar e descartar as trajetórias com maiores volumes de espera. Primeiramente, nesta subrotina, é determinado o número de séries a serem descartadas em função do número de séries e probabilidade de falha. É realizada, então, uma varredura em todas as trajetórias de volume para identificar as trajetórias com maiores volumes de espera e removê-las, sendo esta subrotina realizada até que seja descartado o número de trajetórias determinado no início da subrotina. A envoltória é, então, recalculada finalizando o programa. Este programa tem saídas gráficas e resultados gravados em arquivos ascii do tipo *.out, que são os volumes de espera.

3.5 Método por Equações Diferenciais Estocásticas

O modelo desenvolvido por Andrade [26,27,29] considera, num período chuvoso, as afluições como carga $Y(t)$ e a capacidade do reservatório de absorver a onda de cheia como resistência $X(t)$ à sua propagação. Esta metodologia considera a variação potencial da cheia, possibilitando o cálculo dos volumes de espera e os respectivos riscos de falha para diferentes intervalos de tempo.

Seja uma onda de cheia que chega a um reservatório no instante t com volume $Y(t)$, definida como carga que chega ao reservatório. Sendo S_{max} o volume máximo do reservatório e $S(t)$ o volume no instante t , a resistência é dada por:

$$X(t) = S_{max} - S(t) \quad (12)$$

considerando o intervalo de tempo $[t, t + \Delta t]$ tem-se a variação da resistência dada por:

$$X(t + \Delta t) - X(t) = -[S(t + \Delta t) - S(t)] \quad (13)$$

Figura 3.9 - Modelamento para o Método por Equações Diferenciais Estocásticas

$$q(t) = z(t) + u(t)$$

onde: $q(t)$ - vazão defluída ou defluência,

$z(t)$ - vazão vertida,

$u(t)$ - vazão turbinada.

A defluência que o reservatório pode liberar é limitada pela descarga de referência q_r , a qual representa a vazão máxima que pode ser liberada pelo reservatório sem causar danos, de modo que a equação de continuidade é dada por:

$$S(t + \Delta t) = S(t) + \int_t^{t+\Delta t} y(s) ds - \int_t^{t+\Delta t} q_r ds \quad (14)$$

A primeira integral de (14) representa a carga que atinge o reservatório no intervalo $[t, t+\Delta t]$, escrita como:

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + \int_t^{t+\Delta t} y(s)ds \quad (15)$$

Substituindo (15) e (14) em (13), obtemos a variação da resistência dada por:

$$\Delta X(t + \Delta t) = -\Delta Y(t + \Delta t) + q_r \Delta t \quad (16)$$

Considerando o modelo para as vazões $y(t)$ como: $y(t) = \alpha(t) + \sigma(t) a(t)$, onde $\alpha(t)$ representa a média e sazonalidade das vazões e $a(t)$ um ruído estocástico não correlacionado (ruído branco), devido a relação entre o ruído branco e o processo de Winer ARNOLD [30] podemos escrever que:

$$Y(t + \Delta t) - Y(t) = \int_t^{t+\Delta t} \alpha(s)ds + \int_t^{t+\Delta t} \sigma(s)dB(s) \quad (17)$$

onde $\{B(t), t \geq 0\}$ é o processo estocástico de Winer. Uma forma de representar essa equação é escrevendo:

$$\Delta Y(t) = Y(t+\Delta t) - Y(t) = \alpha(t) dt + \sigma(t) dB(t) \quad (18)$$

Sendo assim, considera-se a carga como processos de difusão markovianos, regulados por equações diferenciais estocásticas de Itô, dadas por:

$$dY(t) = \alpha(t)dt + \sigma(t)dB(t) \quad (19)$$

Substituindo (19) em (16), podemos deduzir a equação diferencial estocástica para a resistência, dada por:

$$dX(t) = (q_r - \alpha(t))dt - \sigma(t)dB(t) \quad (20)$$

No problema de controle de cheias, as vazões são consideradas em intervalos de tempo diário, portanto o período de cheia $[0, T]$ pode ser representado como a união de intervalos $I_i = [t_i, t_i + \Delta t]$, e quando $\Delta t = 1$ significa que cada intervalo I_i representa um

dia do período de cheia. Assim, $[0, T] = \bigcup_{i=1}^N I_i$, onde N representa o número de dias da estação chuvosa. Considerando que os parâmetros são constantes no intervalo I_i , a equação estocástica para a resistência pode ser escrita como:

$$dX(t) = (qr - \alpha_i)dt - \sigma_i dB(t) \quad (21)$$

Esta equação proporciona calcular o risco de falha do reservatório para cada dia do intervalo $[0, T]$.

Um reservatório falha em relação ao controle de cheia, quando a defluência do reservatório excede a descarga de referência q_r , e isto ocorre se a carga $Y(t)$ é maior que a resistência $X(t)$ em algum instante de tempo, obrigando a uma operação de emergência para defluir mais que o permitido, para evitar o transbordamento da barragem. Assim, o risco de falha é definido como uma função do processo $\{X(t), t \geq 0\}$ que representa a resistência. O cálculo do risco de falha pode ser feito definindo-se o instante em que a falha ocorre:

$$\tau = \inf \{t \geq 0 : X(t) \leq 0\} \quad (22)$$

O risco de falha é, então, definido por:

$$\rho(X(t_i)) = P\{\tau \leq t_i + \Delta t \mid X(t_i) \geq 0\} \quad (23)$$

A avaliação do risco, a partir da equação (22), considera que a carga $X(t)$ é limitada pela capacidade do reservatório: $X(t) \in R_x = [0, S_{max}]$ em que X_t representa um ponto nesse intervalo. Denotando $\mathbb{C}^k(\cdot)$ a classe de funções que são contínuas e possuem derivadas contínuas até a ordem k , o risco de falha é definido como uma função $\rho(X_t) \in \mathbb{C}^2(R_x)$. Se $\{X(t), t \in I_i\}$ é um processo de difusão de Markov no espaço de probabilidade (R_x, F, P) que satisfaz a equação diferencial estocástica (21), então o risco de falha $\rho(X_t)$ satisfaz o seguinte problema de valor de contorno:

$$\frac{d^2 \rho(X_t)}{dX_t^2} + \frac{2(qr - \alpha_i)}{\sigma_i^2} \frac{d\rho(X_t)}{dX_t} = 0, \quad 0 < X_t < S_{\max} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \rho(0) &= 1; \\ \rho(S_{\max}) &= 0. \end{aligned}$$

A solução deste problema de valor de contorno é dada por:

$$\rho(X_t) = \frac{1 - \exp\left\{-2(qr - \alpha_i)(S_{\max} - X_t)/\sigma_i^2\right\}}{1 - \exp\left\{-2(qr - \alpha_i)S_{\max}/\sigma_i^2\right\}} \quad (25)$$

Este método utiliza inferência bayesiana [43] e processos de Monte Carlo em Cadeia de Markov [44], ver Anexo E, para avaliar a alocação dinâmica do volume de espera, sem incorrer em dificuldades encontradas por outros métodos, tais como: definição da melhor função distribuição de probabilidades a ser empregada, variação amostral, necessidade de um conjunto de séries de tamanho significativo (séries sintéticas de vazão).

No contexto bayesiano, os parâmetros α_i e σ_i^2 são considerados variáveis aleatórias, assumindo-se conhecidas a probabilidade conjunta *a priori* para esses parâmetros $\pi_0(\alpha, \Sigma)$. Combinando estas densidades com a função de verossimilhança, através do teorema de Bayes, obtemos a densidade *a posteriori* conjunta dos parâmetros, $\pi(\alpha, \Sigma)$, onde os estimadores bayesianos para as equações diferenciais estocásticas são os valores esperados desta densidade *a posteriori*:

$$\pi(\alpha, \Sigma \mid D) \propto \prod_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{\frac{M}{2}-1} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_i^2} \left[(M-1)S_i^2 + M(\alpha_i - \bar{q}_i)^2 \right] \right\} \quad (26)$$

Esta distribuição *a posteriori* é usada para gerar amostras de α_i e σ_i^2 que podem ser empregadas para o cálculo do volume de espera para um risco de falha fixado. Fixando-se o risco de falha em um valor ρ , a partir da equação (25), e aplicando um algoritmo de

simulação de Monte Carlo (no caso o amostrador de Gibbs), o volume de espera associado a este risco de falha pode ser calculado como :

$$X_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{(\sigma_i^{(k)})^2}{2(qr - \alpha_i^{(k)})} \ln \left[\frac{1 - \rho(1 - f(\alpha_i^{(k)}, \sigma_i^{2(k)}))}{f(\alpha_i^{(k)}, \sigma_i^{2(k)})} \right] \quad (27)$$

onde,

$$f(\alpha_i^{(k)}, \sigma_i^{2(k)}) = \exp \left\{ -2(qr - \alpha_i^{(k)}) S_{\max} / (\sigma_i^2)^{(k)} \right\}$$

O fluxograma para o Método por Equações Diferenciais Estocásticas é apresentado na figura 3.10. Inicia-se o programa com a leitura do arquivo de vazões afluentes (carga), em m^3/s , definição da probabilidade de risco e número total de iterações realizadas pelo amostrador de Gibbs para cálculo dos estimadores bayesianos de difusão e drift. Num primeiro passo são calculadas média e variância para a carga, definidas como condições iniciais no processo de estimação dos parâmetros. São gerados valores para o cálculo dos parâmetros das distribuições marginais, onde a média segue uma distribuição Normal e a variância segue uma distribuição Gamma inversa, através do amostrador de Gibbs. Gerados os valores, efetua-se a seleção dos mesmos, devido à necessidade de se excluir a influência por parte das condições iniciais, desprezando metade dos valores, e a partir deste ponto é selecionado 1 a cada 15 valores, de modo a formar vetores contendo 100 elementos para cada dia da estação. Os estimadores são, então, calculados pela média de cada vetor correspondente. Com os parâmetros definidos, calcula-se o volume de espera e o risco de falha para cada dia.

Figura 3.10a - Fluxograma parcial (1/2) para o Método por Equações Diferenciais Estocásticas

Figura 3.10b - Fluxograma parcial (2/2) para o Método por Equações Diferenciais Estocásticas

CAPÍTULO IV - MODELO DE SIMULAÇÃO

4.1 Introdução

Simular a operação de um sistema hidroelétrico de geração visa avaliar computacionalmente como as usinas hidroelétricas comportam-se em função de vários fatores: condições de carga, condições de aflúências, política de operação, etc. Para que estes estudos sejam desenvolvidos é necessário que as usinas sejam modeladas matematicamente a partir de uma quantidade considerável de equações. Os dados que envolvem a modelagem de uma usina hidroelétrica devem representar as características do reservatório (volume mínimo e máximo, dados do reservatório), dos componentes da usina (tipo de turbina, engolimento máximo), o comportamento do canal de fuga além de restrições operativas.

O modelo desenvolvido para este trabalho tem como principal objetivo simular a operação de uma usina hidroelétrica com vistas ao controle de cheias. Nesta simulação o objetivo da operação da usina é seguir uma trajetória de volumes de espera, deixando espaços vazios no reservatório, que podem eventualmente ser utilizados para amortecer grandes picos de aflúências. Os detalhes de implementação do modelo e suas características são descritos na sequência.

4.2 Modelo de Simulação

O modelo de simulação adotado segue algumas características do modelo de simulação a usinas individualizadas OPUS [45], empregando operação diária de um reservatório. Baseado nos conceitos de operação em Carneiro e Soares [46], apresenta as seguintes propriedades básicas:

1. Opera em base diária o reservatório segundo a regra de operação para controle de cheias, supondo que se conheçam as afluições.
2. Não considera operação de emergência.
3. O programa objetiva controlar o nível do reservatório seguindo o volume de espera, dia a dia.
4. Abaixo do nível máximo operativo normal não se rompem as restrições de defluência.
5. Quando é atingido o nível máximo normal operativo, o reservatório é operado a fio d'água até que a afluição seja menor que a descarga de restrição. A partir deste estado, tenta-se voltar para o nível do volume de espera, mantendo-se a descarga de restrição.
6. A descarga do vertedor é calculada para um determinado dia em função do volume final do dia anterior e da turbinagem ou vazão turbinada no dia em questão.
7. Como estamos trabalhando somente com um reservatório e medindo as afluições na entrada do reservatório, não há tempo de viagem da água.

Duas condições físicas devem ser obedecidas pelo armazenamento final em qualquer intervalo de tempo S_{t+1} . O armazenamento deve ser menor ou igual à capacidade útil do reservatório e não deve ser inferior a zero. Caso ocorra um valor superior ao volume útil, o excedente deverá ser vertido. Caso seja calculado um S_{t+1} inferior a zero é observada uma incompatibilidade entre capacidade útil do reservatório e demanda mínima a ser suprida. Quando falamos em armazenamento nos referimos ao armazenamento útil do reservatório e não ao real. O primeiro é aquele que pode ser usado para atender aos requisitos de operação e o último é dado pela soma do

armazenamento útil e o volume morto (formado para reter sedimentos e atender às exigências dos equipamentos de captação de água), figura 4.1 abaixo.

Figura 4.1 - Corte esquemático de uma Usina Hidroelétrica

Na simulação, as usinas são modeladas matematicamente, sendo representadas por dados e equações, as quais definem as regras de operação da usina. O modelo de simulação simplificado é baseado na equação de balanço hídrico, obedece a lei de conservação de massa, nas restrições operativas de armazenamento, vazão turbinada e defluência, e na regra ditada pelos volumes de espera definidos a partir de cada método. Calcula-se, como segue, o volume armazenado no final do intervalo:

$$\begin{aligned} S_{t+\Delta t} &= S_t + (y_t - q_t)\Delta t \\ q_t &= u_t + z_t \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} 0 &\leq S_t \leq S_{util} \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \\ Q_{min} &\leq q_t \leq Q_{ref} \\ U_{min} &\leq u_t \leq U_{max} \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde:

- S_{t+1} - volume armazenado no instante $t+1$;
- S_t - volume armazenado no instante t ;
- S_{util} - volume útil do reservatório;

y_t	- vazão afluyente ao reservatório no instante t ;
q_t	- volume defluente do reservatório no instante t ;
Q_{min}	- volume defluente mínimo;
Q_{ref} ou q_r	- descarga de referência ou volume defluente máximo;
u_t	- vazão turbinada ou turbinagem no instante t ;
U_{min}	- vazão turbinável mínima;
U_{max}	- vazão turbinável máxima;
z_t	- vazão vertida ou vertimento no instante t ;
Ve_t	- volume de espera no instante t ;
Δt	- discretização no tempo, em dias.

Inicia-se o programa com a leitura dos arquivos de vazão afluyente e volume de espera, os quais estão em m^3/s e km^3 , sendo efetuada a transformação de unidades para dm^3 e dm^3/dia respectivamente. Em seguida são lidos os limites de volume do reservatório, vazão turbinada e defluência da usina. Calculam-se, então, as metas de volume MS_t , definidas pelos volumes de espera: $MS_t = S_{max} - Ve_t$.

De posse das metas de volume, inicia-se a determinação da vazão turbinada u_t , vazão vertida z_t e volume armazenado S_t em cada instante t , tendo por regra básica seguir as metas de volume. É, então, calculada dS , a diferença entre o volume do dia anterior S_{t-1} e a meta de volume do dia i : $dS_i = S_{i-1} - MS_i$

Figura 4.2a - Diagrama de simulação

Figura 4.2b - Subrotina $U_{max} < y(i) < Q_{ref}$, complemento do diagrama de simulação

A defluência total necessária para seguir a meta de volume é dada pela adição de dS_i e da afluência ao reservatório: $YT_i = dS_i + y_i$

A utilização dos recursos que excedam o volume máximo operativo é feita baseada na seguinte ordem de prioridade :

- aumentar a vazão turbinada até atingir a restrição de geração máxima,
- liberar vertimento até atingir a restrição de defluência máxima,
- violar os volumes de espera,
- violar limite de defluência.

O programa de simulação tem como saída quantificada as seguintes variáveis: vazão turbinada (vazão que passa através dos condutos forçados à turbina); vazão vertida (quantidade de água que passa através dos extravazadores); volume diário do reservatório; falhas ocorridas e respectivas dimensões, relacionadas com a quebra da restrição de vazão máxima; fator de uso do reservatório. O processo para a determinação destas variáveis pode ser visualizado nos diagramas das Figuras 4.2a e 4.2b.

O reservatório falha, no que concerne ao controle de cheias, quando a vazão defluente no instante t ultrapassa a descarga de referência, que é a defluência máxima permissível no ponto de controle: $q_t > Q_{ref}$

A indicação de ocorrência de falhas e a quantificação das mesmas, só e exclusivamente, não é suficiente como critério de comparação dos métodos de cálculo do volume de espera. Os índices de volume, vazão turbinada e defluência obtidos na simulação nos permitem calcular outros parâmetros, tais como energia armazenada, energia perdida, fator de uso, disponibilidades média e diária de ponta e energia, auxiliando na análise, comparação e quantificação do desempenho dos métodos em relação ao compromisso do controle de cheias.

4.3 Parâmetros de Comparação

O objetivo de simular a operação com os volumes vazios de espera como regra de operação é visualizar o desempenho de cada método sob as mesmas condições de afluentes. As variáveis quantificadas, acima mencionadas, possibilitam a determinação dos parâmetros de comparação. Estes parâmetros são definidos a seguir.

O *Fator de Uso* é considerado como a razão entre a parcela de volume útil ocupado de um reservatório em um instante t e o volume útil máximo do reservatório. Este parâmetro representa a quantidade de água disponível no reservatório:

$$Fator\ de\ Uso = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{S_{max} - S(i)}{S_{util}} \right) \right] \quad (4.3)$$

onde:

- n - período da estação chuvosa, em dias;
- S_{max} - volume máximo do reservatório;
- S_{util} - volume útil do reservatório;
- $S(i)$ - volume do reservatório no instante i .

A *Energia Armazenada* [42,46] avalia o potencial de geração hidroelétrica da usina num dado instante t , representando a geração que o volume armazenado poderia gerar caso fosse turbinado. Seu cálculo está fundamentado na aceleração da gravidade g ,

densidade da água δ , rendimento do conjunto turbina-gerador η , perda de carga³ pc , e nos níveis do reservatório e do canal de fuga, que são determinados por seus respectivos polinômios: polinômio cota de montante-volume $h_{mon}(S)$ e polinômio defluência-cota de jusante $h_{jus}(q)$. Na simulação, torna-se difícil calcular exatamente a altura do canal de fuga através do polinômio por não se saber exatamente o quanto vai ser defluído a cada instante ao longo do dia. Assim, usa-se uma aproximação que nos dá uma altura média do canal de fuga Cf_{md} .

$$dEs = \delta g \eta (h_{mon}(S) - Cf_{md} - pc) ds \quad (4.4)$$

Para calcularmos a energia armazenada máxima contida no reservatório, integramos a equação acima, tendo como limites S_{min} e S_{max} :

$$\begin{aligned} Es_{max} &= \delta g \eta \int_{S_{min}}^{S_{max}} (h_{mon}(S) - Cf_{md} - pc) ds \\ &= \delta g \eta \left[\int_{S_{min}}^{S_{max}} h_{mon}(S) ds - (Cf_{md} + pc)(S_{max} - S_{min}) \right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

O polinômio cota-volume apresenta a seguinte forma característica: $h_{mon}(x) = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^4$, então a energia armazenada máxima é dada por:

$$Es_{max} = \delta g \eta \left\{ \left[A_0 S + \frac{A_1}{2} S^2 + \frac{A_2}{3} S^3 + \frac{A_3}{4} S^4 + \frac{A_4}{5} S^5 \right]_{s=S_{min}}^{s=S_{max}} - (Cf_{md} - pc)(S_{max} - S_{min}) \right\} \quad (4.6)$$

Do mesmo modo, a energia armazenada para um dado volume S_t é dada por:

$$Es_t = \delta g \eta \left\{ \left[A_0 S_t + \frac{A_1}{2} S_t^2 + \frac{A_2}{3} S_t^3 + \frac{A_3}{4} S_t^4 + \frac{A_4}{5} S_t^5 \right]_{S_{min}}^{S_t} - (Cf_{md} - pc)(S_t - S_{min}) \right\} \quad (4.7)$$

³ Perdas de energia que ocorrem nos condutor forçados, devido ao atrito e ao formato das tubulações, que refletem como uma redução na altura de queda.

A *Energia Perdida*, assim como a energia armazenada, está diretamente relacionada com os polinômios de cota de montante e jusante, e define a energia associada ao espaço vazio alocado no reservatório, que é o complemento da energia armazenada. Portanto, é dada pela diferença entre a energia armazenada máxima e a energia armazenada no instante t :

$$Ep = Es_{max} - Es_t \quad (4.8)$$

onde

- η - rendimento do conjunto turbina-gerador,
- g - aceleração da gravidade (m/s^2),
- δ - peso específico da água (kg/m^3),
- Cf_{md} - nível médio do canal de fuga (m),
- $h_{mon}(s)$ - polinômio cota de montante-volume,
- Es_{max} - energia armazenada máxima,
- Ep - energia perdida.

A energia é calculada em MJ e depois transformada em $MW.dia$. A transformação de unidade se dá conforme demonstração abaixo:

$$E = P \Delta t \quad \Rightarrow \quad P = \delta g \eta \Delta h S / \Delta t$$

$$[P] = \frac{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m \cdot m^3}{s} = \frac{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m \cdot 10^6 \text{ } hm^3}{s} = 10^6 \text{ } W$$

$$[E] = 10^6 \text{ } W \cdot s \frac{dia}{24 \times 3.600} = MW.dia$$

A energia armazenada no reservatório da Usina Hidroelétrica de Chavantes (estudo de caso), no seu volume máximo operativo, é de $21556 \text{ } MW.dia$. Tendo a usina uma potência instalada de $416 \text{ } MW$, se não houvesse afluência chegando, este reservatório levaria aproximadamente 52 dias para defluir seu volume útil:

$$\frac{2.1556 \times 10^4 \text{ } MW.dia}{416 \text{ } MW} \sim 52 \text{ } dias$$

A *Disponibilidade de Potência* [42,45,46] de uma usina corresponde à sua produção máxima instantânea, considerando todas as suas máquinas operando. A produção de uma

unidade geradora, num dado instante, é definida pelas condições de operação da turbina e gerador em termos de queda líquida, vazão turbinada e rendimento do conjunto turbina-gerador.

A vazão máxima turbinável e a disponibilidade de potência no eixo turbina-gerador variam em função da altura de queda. Tendo como queda de referência h_{ref} a altura de queda nominal, podemos observar estas relações nas Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.4 - Potência máxima do conjunto turbina-gerador

Figura 4.3 - Turbinagem máxima do conjunto turbina-gerador

As curvas indicam as limitações dos equipamentos, de modo que, para alturas de queda inferiores à nominal, a turbina produz uma potência inferior à nominal. Por outro lado, para alturas de queda maiores que a nominal, a turbina seria capaz de produzir potência superior à nominal do gerador, no entanto, por limitações do mesmo, a potência é mantida em seu valor nominal.

O engolimento máximo total ou vazão turbinada máxima total de uma usina pode ser calculado, numa abordagem simplificada [45], como segue:

$$QU(t) = N_{maq} u_{ef} \left(\frac{H_l(t)}{h_{nm}} \right)^a \quad (4.9)$$

onde:

- N_{maq} - número de máquinas;
- u_{ef} - engolimento efetivo por máquinas;
- h_{nm} - queda nominal de cada conjunto;
- $H_l(t)$ - queda líquida;
- $h_{mon}(t)$ - cota de montante-volume;
- $h_{jus}(t)$ - cota de jusante-defluência;
- a - $\begin{cases} 0.5 & \text{para } H_l(t) \leq h_{nm}; \\ -1 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

A queda líquida é definida em função da queda bruta H_B (calculada a partir dos polinômios montante e jusante) e perda de carga (calculada a partir do coeficiente de perdas hidráulicas nas tubulações e queda bruta):

$$H_B(t) = h_{mon}(t) - h_{jus}(t) \quad pc_t = C_{pc} H_B(t) \quad \Rightarrow \quad H_l(t) = H_B(t) - pc_t$$

As cotas de montante e jusante são dadas por seus respectivos polinômios cota-volume e cota-jusante:

$$\begin{aligned} h_{mon}(s_t) &= A_0 + A_1 s_t + A_2 s_t^2 + A_3 s_t^3 + A_4 s_t^4 \\ h_{jus}(q_t) &= B_0 + B_1 q_t + B_2 q_t^2 + B_3 q_t^3 + B_4 q_t^4 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Um cálculo simplificado da disponibilidade de potência por grupo de máquinas pode ser realizado da seguinte forma [45]:

$$Pt_g = Pt_{ef} \left(\frac{H_l(t)}{h_{nm}} \right)^b \quad (4.11)$$

onde:

- Pt_{ef} - potência efetiva por máquina em cada conjunto,
- b - $\begin{cases} 1.5 & \text{para } H_l(t) \leq h_{nm}; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

A ponta disponível é, então, calculada em função do número de máquinas e da potência por grupo:

$$Ponta\ disponível = N_{maq} \cdot Pt_g \quad (4.12)$$

A disponibilidade de potência do período é definida como o menor valor de disponibilidade entre o início e o final do período: $DPp = \min(Ponta\ disponível)$

A **Energia Gerada** [45] pela usina a cada instante t , pode ser calculada, de modo simplificado, em função da vazão turbinada e da produtibilidade média R_{md} da usina. Esta produtibilidade média é estimada a partir das condições médias de montante e jusante e da produtibilidade específica R_{esp} (coeficiente de valorização energética de cada unidade de vazão turbinada a cada metro de queda líquida no aproveitamento):

$$Eg(t) = R_{md} u(t) \quad (4.13)$$

$$R_{md} = R_{esp} H_l(t)$$

$$R_{esp} = \delta g \eta = [MW/(m^3/s)/m]$$

A **Energia Vertida** é definida como produto da vazão vertida da usina pela produtibilidade média:

$$Ev(t) = R_{md} z(t) \quad (4.14)$$

O cálculo da vazão turbinada máxima, potência disponível, energia gerada e energia vertida são representações simplificadas dos mesmos, visto que o nosso interesse é visualizar o impacto dos diferentes métodos de cálculo de volume de espera em relação ao objetivo de contenção de cheias.

CAPÍTULO V - ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Os métodos anteriormente descritos estão aqui aplicados à Usina Hidroelétrica de Chavantes, que faz parte do Sistema Sudeste Brasileiro. Esta usina é pertencente à CESP, Companhia Energética de São Paulo⁴, e situa-se no rio Paranapanema, que é um dos afluentes do rio Paraná, na divisa entre os estados de Paraná e São Paulo, próximo às cidades Chavantes (SP) e Ribeirão Claro (PR). Concluída em 1971, tem 4 turbinas Francis, potência instalada de 416 MW e reservatório que toma uma área de 400,30 Km². A Usina de Chavantes, ver Figura 5.1 a seguir, é parte de um complexo de usinas interligadas hidraulicamente, estando a Usina de Itaipu a jusante de todas elas.

O desenho esquemático de uma usina hidroelétrica visto no capítulo anterior (apresentando detalhes de construção, tomada d'água, tubulação forçada, turbina, gerador) foi colocado com o objetivo de melhor visualização e entendimento de como trabalha uma usina hidroelétrica e como a energia elétrica é gerada a partir da energia

⁴ Chavantes e as outras usinas do rio Paranapanema estão sendo vendidas em conjunto, dentro do programa de privatização do Setor Elétrico Brasileiro.

5.2 Dados da Usina de Chavantes

Os principais dados técnicos estruturais relacionados às regras operacionais de segurança e geração de energia elétrica da usina em estudo encontram-se discriminados na Tabela 5.1, inclusive dados referentes às restrições de vazão mínima, onde abaixo da mesma tanto a navegação quanto a irrigação tornam-se críticas, e vazão máxima, acima da qual ocorrem inundações causadoras de danos econômicos e sociais.

TABELA 5.1 - Dados principais da Usina de Chavantes

Potência Instalada (MW)		416
Engolimento (turbinagem) Máximo (m^3/s)		648
Engolimento Mínimo (m^3/s)		100
Mínimo Operativo (Volume Morto)	Volume (km^3)	5.754
	Cota (m)	465.23
Máximo Operativo Normal	Volume (km^3)	8.795
	Cota (m)	474
Máximo Maximorum (Máximo admissível)	Volume (km^3)	9.410
	Cota (m)	475.50
Volume útil (km^3)		3.041
Nível Médio do Canal de Fuga (m)		398.70
Coroamento da Barragem (m)		479
Número de conjuntos de máquinas		1
Número de máquinas por conjunto		4
Produtibilidade específica ($\text{MW}/(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$)		0.008731
Rendimento Turbina-Gerador		0.889
Coeficiente de perdas hidráulicas (%)		1.34
Perda de Carga média (m)		0.986
Capacidade Total de Vertimento (m^3/s)		3252
Restrições de Jusante (m^3/s)	Mínima	100
	Máxima	1800

O polinômio característico cota de montante-volume, para a Usina de Chavantes, o qual retorna a cota do espelho d'água em função do volume do reservatório num dado instante t , tem seus coeficientes apresentados na Tabela 5.2. Os coeficientes do polinômio característico defluência-cota de jusante, que retorna a cota do canal de fuga em função da defluência total ou vazão turbinada mais vertimento, também encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Coeficientes dos polinômios característicos da Usina de Chavantes

<i>Coeficientes dos polinômios</i>		
<i>Cota-volume</i>	A_0	4.41809e2
	A_1	4.85539e-3
	A_2	-1.35939e-7
	A_3	0
	A_4	0
<i>Defluência-cota</i>	B_0	3.96226e2
	B_1	6.07516e-3
	B_2	-4.91266e-6
	B_3	2.26816e-9
	B_4	-3.82946e-13

As trajetórias de vazões afluentes diárias, $Y_{i,j}$, de um histórico de 9 anos, $i = 1, \dots, 9$, de 1981 a 1989, relacionadas ao período chuvoso, $j = 1, \dots, 181$ dias, estão relacionadas na Figura 5.3. Estes foram os dados usados no presente estudo onde podemos observar alguns picos de vazão bastante acentuados. Contudo, observamos que apenas algumas seqüências apresentam valores extremos de vazão, acima da descarga de referência, e isto pode ser encarado como uma barreira ao bom desempenho dos métodos.

Figura 5.3 - Histórico de vazões afluentes

5.3 Resultados Adquiridos com a Simulação

Os resultados obtidos com a aplicação dos diferentes modelos para os cálculos de volume de espera podem ser melhor visualizados graficamente. As curvas de volume do reservatório nos auxiliam na análise, destacando o volume vazio e proporcionando uma primeira análise dos métodos a partir das relações : volume / volume útil e indiretamente queda líquida / queda nominal. Estão salientados nos gráficos os volumes operativos máximo e mínimo, os quais delimitam o volume útil para o reservatório. Para uma análise mais clara, mostraremos nos gráficos o volume resultante no reservatório após a alocação do volume de espera, ou seja, o volume máximo operativo subtraído do volume de espera, ao qual chamaremos de volume rebaixado. Os volumes de espera máximo e médio para cada método encontram-se na Tabela 5.3, e podem ser visualizados como porcentagem de volume útil na Figura 5.4.

Tabela 5.3 - Volume de Espera máximo e médio

Método	Volume de espera calculado (km ³)	
	máximo	médio
Curva Volume x Duração	0.4986	0.4986
Curva Volume x Duração por Janelas	0.4901	0.0432
Equações Diferenciais Estocásticas	0.3854	0.0948
Trajetoórias Críticas (série histórica)	0.0647	0.0007
Trajetoórias Críticas (séries sintéticas)	0.5069	0.3099

Figura 5.4 - (a) Volume de espera máximo e (b) volume de espera médio em cada método

Caracterizado por determinar um único volume de espera que deve ser alocado por toda a estação chuvosa, começamos com o modelo da Curva Volume x Duração, Figura 5.5. Este modelo de cálculo de volume de espera determina um deplecionamento, para o reservatório, da ordem de 16.39% do volume útil durante toda a estação, implicando uma variação de 2% na sua queda líquida em relação à queda nominal.

Figura 5.5 - Trajetória de volume para o Método da Curva Volume x Duração

O modelo da Curva Volume x Duração por Janelas apresenta uma alocação variável para o volume de espera, determinando assim um deplecionamento de, no máximo, 16.11% em relação ao volume útil, Figura 5.6. O reservatório é mantido no seu volume

máximo em grande parte da estação. A queda líquida é conduzida a uma redução de, no máximo, 1.71% em relação à nominal.

Figura 5.6 - Trajetória de volume para o Método da Curva Volume $\times$ Duração por Janelas

O Método das Trajetórias Críticas não tem um bom desempenho quando aplicado somente a séries do histórico de vazões, como pode ser notado na Figura 5.7, onde o volume de espera a ser alocado é insignificante em relação ao volume útil do reservatório. O reservatório tem o seu volume deplecionado em, no máximo, 2.2% de seu volume útil. A variação na queda líquida não passa de 0.3% em relação à nominal. Desta forma, embora favoreça a geração de energia elétrica, não consegue uma atuação efetiva no controle das cheias, levando a muitas falhas. Com o auxílio do gerador de séries sintéticas, descrito no anexo D, obtemos a quantidade de séries necessárias para aplicação deste método. As séries são geradas a partir do histórico de vazões naturais médias diárias (uma amostra das séries geradas pode ser visualizada no anexo D), sendo esta a base para gerar novas séries segundo um modelo de séries temporais autoregressivo de ordem 1, AR(1). Foram geradas 10000 séries a partir das quais definiram-se os volumes de espera apresentados na Figura 5.8, sob a forma de volume rebaixado, que determinam um deplecionamento máximo de 16.67% do volume útil, representando uma variação na altura de queda de no máximo 2.05% em relação à nominal

Figura 5.7 - Trajetória de volume para o Método das Trajetórias Críticas (usando histórico de vazões naturais)

Figura 5.8 - Trajetória de volume para o Método das Trajetórias Críticas (usando séries sintéticas de vazões)

O método por Equações Diferenciais Estocásticas apresenta uma alocação variável para o volume de espera, com um deplecionamento máximo de 12.70% em relação ao volume útil, Figura 5.9. A queda líquida mostra uma variação máxima de 1.47% em relação à queda nominal. Este método em particular proporciona a elaboração de curvas de probabilidade de risco para cada dia, Figura 5.10, possibilitando um melhor monitoramento do risco de emergência. A Figura 5.11 mostra a estimativa dos parâmetros α_i e σ_i^2 das equações diferenciais, por inferência bayesiana.

Figura 5.9 - Trajetória de volume para o Método das Equações Diferenciais Estocásticas

Figura 5.10 - Curvas de risco para os dias mais críticos do histórico

Figura 5.11 - Estimativa bayesiana dos coeficientes α_i e σ_i^2

A quantidade de dados em disponibilidade é de fundamental importância para os métodos, em especial para o método das Trajetórias Críticas, que depende de séries sintéticas de vazão diárias e com isso depende de um bom histórico de vazões para calibrar o gerador destas séries. Entretanto, este não chega a ser problema crucial para o método por Equações Diferenciais Estocásticas.

Os gráficos de trajetórias de volume vistos até então, representam os volumes de espera calculados por cada método. Estas trajetórias serviram como metas de volume quando aplicados à simulação, sendo consideradas como regra na operação do reservatório. Utilizamos os 9 anos do histórico de vazões afluentes para servir como teste para os métodos. Na simulação são levadas em consideração as restrições operativas de volume, vazão turbinada e defluência total, e as avaliações efetuadas seguem tais restrições como podemos observar nas figuras F.1 a F.5 do Anexo F, onde cada figura está relacionada a um método, sendo que as figuras F.4 e F.5 referem-se ao Método das Trajetórias Críticas aplicado com histórico de vazões afluentes e com séries sintéticas, respectivamente. Já as falhas, acontecem quando a restrição de defluência máxima é rompida, ocorrendo quando o reservatório está em seu nível operativo máximo e a vazão que chega ao mesmo é superior à descarga de referência, constituindo a falha o volume defluente excedente. Os valores máximo, médio e mínimo destas variáveis, para cada série simulada, estão quantificados nas tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, que trazem também volume vazio resultante e fator de uso, apresentados graficamente nas figuras F.6 a F.11 do Anexo F.

Os parâmetros que auxiliam na análise do desempenho dos métodos, tais como energia armazenada, energia perdida, engolimento máximo, disponibilidade de potência, energia gerada e energia vertida, podem ser visualizados nas figuras F.12 a F.16. Os valores médios destes parâmetros estão indicados nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9, e mostrados graficamente nas figuras F.17 a F.21. A energia gerada, sujeita às restrições de turbina, gerador e defluência, é definida indiretamente pelas metas de volume que ditam as regras de operação do reservatório. O somatório da energia gerada durante o período úmido somado com a energia armazenada no último dia do mesmo período nos fornece a energia total da usina, sendo avaliada para cada método em cada série simulada, estes

valores se encontram na tabela 5.10. Uma avaliação geral é feita tendo os valores médios apresentados na tabela 5.11.

Podemos observar que o método da Curva Volume x Duração (MCVD) é conservativo na medida em que aloca um único volume de espera para toda a estação, rebaixando o nível do reservatório. Este procedimento interfere diretamente na disponibilidade de potência, que alcança não mais que 407 MW, sendo sua média de 381.48 MW, o equivalente a 91.7% da capacidade de geração da usina. É o método que menos falhou nos testes realizados, apresentou 6 dias de falhas no ano de 89, num total excedente de $2.49 \times 10^5 \text{ dm}^3$ a uma taxa média de $1.97020 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$ ou $2280.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Contudo é o que mais comprometeu a geração de energia para o próximo período, com uma energia armazenada média de $1.7871 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, apresentando os índices mais elevados de energia perdida, com uma média em torno de $3.6845 \times 10^3 \text{ MW.dia}$, que representa cerca de 12.21% da energia armazenada máxima, $2.1556 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, e menor fator de uso médio, que representa o uso efetivo do volume útil do reservatório, na faixa de 83.6%. A energia gerada média, para este método, ficou em torno de 233 MW.dia e uma energia vertida média de aproximadamente 43 MW.dia. A energia total média para este método foi de $6.0177 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, tendo uma mínima de $4.1432 \times 10^4 \text{ MW.dia}$. Embora alguns indicadores possam levar à ilusória conclusão de que o método é razoável, tais como energia gerada média elevada e número de falhas reduzido, este é um método ineficiente devido ao fato de não considerar a variação do risco em relação ao volume de espera durante o período úmido, bem como finaliza o período úmido com o volume do reservatório baixo (volume vazio mínimo e médio bem mais elevado), podendo comprometer o atendimento durante o período seco que se inicia.

O método da Curva Volume x Duração por Janelas (MCVDJ) apresentou bom desempenho, com uma disponibilidade média de potência de 385.22 MW, 92.6% da disponibilidade máxima. Este método apresentou 13 dias de falhas para um total de $6.529 \times 10^5 \text{ dm}^3$, volume excedente não controlado. As falhas ocorreram em 82, que apresentou em 2 dias de falhas um volume defluente excedente de $1.18 \times 10^4 \text{ dm}^3$ a uma taxa média de $1.6142 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $1868.3 \text{ m}^3/\text{s}$, e 89 que em 11 dias de falhas apresentou um volume defluente excedente não controlado de $6.41 \times 10^5 \text{ dm}^3$ a uma taxa média de $2.1379 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $2474.5 \text{ m}^3/\text{s}$. A energia armazenada alcançou uma média

de $2.1093 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, que representa 97.86% da energia armazenada máxima, e a energia perdida média, 462.2363 MW.dia , que representa 2.14% da energia armazenada máxima, para um fator de uso em torno de 97.96%. A energia gerada média foi de 230.48 MW.dia , que representa 55.45% da capacidade de produção da usina. Já a energia vertida teve sua média em 50.26 MW.dia , 12.08% da capacidade da usina. Devemos lembrar que, na simulação, a usina só verte quando a turbinagem está em seu valor máximo. A energia total apresentou uma média de $6.3273 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, e mínima de $4.5206 \times 10^4 \text{ MW.dia}$. Apesar de ter falhado um pouco mais que o método anterior, a taxa média de falha não foi muito superior, sendo assim este método atingiu a meta de acompanhar a variação do risco na definição do volume de espera procurando manter as taxas de disponibilidade de energia elevadas.

O método por Equações Diferenciais Estocásticas (MEDE) apresentou uma disponibilidade de potência média de 377.73 MW , que representa 90.8% da disponibilidade máxima. Ocorreram 9 dias de falhas no ano de 89, totalizando um volume excedente não controlado de $6.61 \times 10^5 \text{ dm}^3$ a uma taxa de defluência média de $2.2896 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $2650.1 \text{ m}^3/\text{s}$. A energia armazenada média ficou em $2.0900 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, 96.96% em relação à máxima, sendo que a energia perdida média ficou em 655.7266 MW.dia , 3.04% da energia armazenada máxima, com um fator de uso na faixa de 97.11%. Em relação à energia gerada, apresentou uma média de 209.83 MW.dia , que corresponde a 50.44% da capacidade de geração. A energia vertida alcançou uma média de 69 MW.dia , que representa 16.64% da capacidade da usina. A energia total média foi de $5.9451 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, tendo uma mínima de $4.2437 \times 10^4 \text{ MW.dia}$. Este método, assim como o MCVDJ, também acompanhou a evolução do risco na determinação de seus volumes de espera, além de proporcionar a quantificação mais precisa do risco para cada dia, através das curvas de risco definidas para cada dia.

Observamos que o método das Trajetórias Críticas (MTC-h), quando aplicado apenas com o histórico para o cálculo do volume de espera, apresenta, dentre os métodos estudados, o menor volume vazio a ser alocado. Comprovamos, com a simulação, que este método não é próprio para poucas séries que usualmente estão disponíveis no histórico, pois apesar da disponibilidade média de potência, em torno de 389.62 MW (93.66% da disponibilidade máxima), ter sido superior em relação aos outros métodos, o

número e intensidade de falhas foi elevado, apresentando falhas nos anos 82, 84, 88 e 89 (as simulações foram realizadas com o histórico), num total de 19 dias de falhas, com um volume excedente não controlado de $9.0171 \times 10^5 \text{ dm}^3$. Foram 3 dias de falhas no ano de 82, tendo um volume defluente excedente de $6.69 \times 10^4 \text{ dm}^3$ a uma taxa média de $1.7782 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $2058.5 \text{ m}^3/\text{s}$; no ano de 84 ocorreu 1 dia de falha com um volume defluente excedente de $4.23 \times 10^3 \text{ dm}^3$ a uma taxa média de $1.5975 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $1849 \text{ m}^3/\text{s}$; no ano de 88 ocorreram 2 dias de falhas com um volume defluente excedente de $2.13 \times 10^4 \text{ dm}^3$ a uma taxa de defluência de média de $1.6617 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $1923.3 \text{ m}^3/\text{s}$; finalmente o ano de 89, que é o mais crítico, apresentou 13 dias de falhas com um volume defluente excedente de $8.09 \times 10^5 \text{ dm}^3$ a uma taxa de defluência média de $2.1775 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $2520.3 \text{ m}^3/\text{s}$. A energia armazenada média ficou em torno de $2.1543 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, cerca de 99.94% da energia armazenada máxima, e a energia perdida média ficou em 13.1808 MW.dia , que representa 0.06% da energia armazenada máxima, para um fator de uso de 99.96%. A energia gerada média ficou em 236.79 MW.dia , que representa 56.92% da capacidade produtiva da usina, e a energia vertida obteve uma média de 44.85 MW.dia , correspondendo a 10.78% da capacidade geradora. A energia total média para este método foi de $6.4416 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, tendo uma mínima de $4.5446 \times 10^4 \text{ MW.dia}$.

O método das Trajetórias Críticas, quando aplicado com as séries sintéticas (MTC-ss), teve um comportamento bem diferente. Foram geradas 10000 séries a partir do histórico de vazões, para definir o volume de espera. Com as séries sintéticas, este método apresentou uma disponibilidade de potência média de 379.53 MW , que representa 91.23% da disponibilidade máxima. As falhas ocorreram em 6 dias do ano de 89, tendo um volume defluente excedente de $2.4 \times 10^5 \text{ dm}^3$ a uma taxa média de $1.9552 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{dia}$, $2263 \text{ m}^3/\text{s}$. A energia armazenada alcançou a média de $1.8923 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, que corresponde a 87.79% em relação a máxima, e a energia perdida ficou em torno de $2.6329 \times 10^3 \text{ MW.dia}$, 12.21% da energia armazenada máxima, para um fator de uso médio de 88.38%. A energia gerada teve uma média de 195.9 MW.dia (47.09% do potencial de geração) e a energia vertida média teve um índice de 88.18 MW.dia (21.2% da capacidade total de geração). A energia total apresentou média de $5.5567 \times 10^4 \text{ MW.dia}$, tendo uma mínima de $4.1420 \times 10^4 \text{ MW.dia}$.

Tabela 5.4 - Resultado da simulação: Vazão Turbinada e Vertimento

Série		Vazão Turbinada (m ³ /s)		Vertimento (m ³ /s)	
		Máxima	Média	Máximo	Médio
Curva Volume x Duração	81	648.00	271.80	332.00	8.35
	82	648.00	587.63	1152.00	225.57
	83	648.00	355.37	289.10	7.83
	84	648.00	298.54	1152.00	13.93
	85	648.00	201.46	829.00	7.20
	86	648.00	373.96	617.70	33.78
	87	648.00	326.70	857.00	12.06
	88	648.00	432.65	1152.00	100.43
	89	648.00	434.88	1908.00	208.08
Curva volume x Duração por Janelas	81	648.00	265.66	413.94	14.48
	82	648.00	581.64	1239.40	231.57
	83	648.00	338.42	961.38	24.77
	84	648.00	283.70	1152.00	28.77
	85	648.00	199.49	468.94	9.17
	86	648.00	357.51	765.54	50.22
	87	648.00	315.30	857.00	23.46
	88	648.00	411.10	1152.00	121.98
	89	648.00	436.70	2832.00	206.27
Trajetórias Críticas (histórico)	81	648.00	270.80	332.00	9.35
	82	648.00	587.25	1828.50	225.96
	83	648.00	353.43	350.30	9.76
	84	648.00	296.16	1201.00	16.31
	85	648.00	200.79	829.00	7.86
	86	648.00	371.02	656.60	36.71
	87	648.00	324.24	857.00	14.52
	88	648.00	430.48	1378.00	102.60
	89	648.00	434.88	2832.00	208.08
Trajetórias Críticas (séries sintéticas)	81	648.00	236.15	1152.00	57.59
	82	648.00	460.84	1152.00	363.43
	83	648.00	293.63	1152.00	82.15
	84	648.00	260.52	1152.00	63.47
	85	648.00	183.30	1028.05	38.91
	86	648.00	317.29	1152.00	103.65
	87	648.00	275.44	1131.82	75.17
	88	648.00	364.51	1152.00	180.23
	89	648.00	360.00	1908.00	295.10
Equações Diferenciais Estocásticas	81	648.00	236.33	1152.00	43.27
	82	648.00	545.28	1152.00	266.77
	83	648.00	298.45	1152.00	63.58
	84	648.00	251.36	1152.00	59.95
	85	648.00	177.65	1152.00	30.43
	86	648.00	320.68	1152.00	86.13
	87	648.00	279.37	1152.00	58.22
	88	648.00	395.76	1152.00	136.15
	89	648.00	404.67	2832.00	237.13

Tabela 5.5 - Resultado da simulação: Defluência e Volume Vazio

Série		Defluência (m³/s)			Volume Vazio (dm³)		
		Máxima	Média	Mínima	Máximo	Médio	Mínimo
Curva Volume x Duração	81	980.00	280.15	100.00	5.06e+005	4.99e+005	4.99e+005
	82	1800.00	813.20	207.20	4.99e+005	4.98e+005	4.34e+005
	83	937.10	363.20	100.00	5.00e+005	4.99e+005	4.99e+005
	84	1800.00	312.47	100.00	5.06e+005	4.99e+005	4.94e+005
	85	1477.00	208.66	100.00	5.34e+005	5.03e+005	4.99e+005
	86	1265.70	407.74	100.00	4.99e+005	4.99e+005	4.99e+005
	87	1505.00	338.76	100.00	5.00e+005	4.99e+005	4.99e+005
	88	1800.00	533.08	100.00	5.03e+005	4.99e+005	4.79e+005
	89	2556.00	642.96	109.00	4.99e+005	4.60e+005	00
Curva volume x Duração por Janelas	81	1061.94	280.15	100.00	4.90e+005	7.74e+004	00
	82	1887.40	813.20	118.86	4.90e+005	4.33e+004	00
	83	1609.38	363.20	100.00	4.90e+005	5.52e+004	00
	84	1800.00	312.47	100.00	4.90e+005	9.77e+004	00
	85	1116.94	208.66	100.00	4.94e+005	1.11e+005	00
	86	1413.54	407.74	100.00	4.90e+005	5.58e+004	00
	87	1505.00	338.76	100.00	4.90e+005	6.52e+004	00
	88	1800.00	533.08	100.00	4.90e+005	4.28e+004	00
	89	3480.00	642.96	109.00	1.22e+005	8.72e+003	00
Trajetórias Críticas (históricas)	81	980.00	280.15	100.00	6.79e+004	2.33e+003	00
	82	2476.50	813.20	207.20	1.95e+004	1.95e+002	00
	83	998.30	363.20	100.00	6.47e+004	1.34e+003	00
	84	1849.00	312.47	100.00	6.47e+004	1.62e+003	00
	85	1477.00	208.66	100.00	6.80e+004	7.23e+003	00
	86	1304.60	407.74	100.00	6.47e+004	1.18e+003	00
	87	1505.00	338.76	100.00	6.47e+004	1.03e+003	00
	88	2026.00	533.08	100.00	6.11e+004	6.11e+002	00
	89	3480.00	642.96	109.00	1.95e+004	2.60e+002	00
Trajetórias Críticas (séries sintéticas)	81	1800.00	293.74	100.00	5.07e+005	3.83e+005	00
	82	1800.00	824.27	100.00	5.07e+005	3.24e+005	00
	83	1800.00	375.78	100.00	5.07e+005	3.76e+005	00
	84	1800.00	323.99	100.00	5.07e+005	3.57e+005	1728
	85	1676.05	222.21	100.00	5.32e+005	3.85e+005	00
	86	1800.00	420.94	100.00	5.07e+005	3.62e+005	00
	87	1779.82	350.61	100.00	5.07e+005	3.49e+005	00
	88	1800.00	544.73	100.00	5.07e+005	3.36e+005	00
	89	2556.00	655.11	100.00	5.07e+005	3.04e+005	00
Equações Diferenciais Estocásticas	81	1800.00	279.61	100.00	5.33e+005	1.07e+005	2.46e+003
	82	1800.00	812.04	100.00	4.98e+005	5.02e+004	2.32e+003
	83	1800.00	362.03	100.00	5.37e+005	8.09e+004	2.32e+003
	84	1800.00	311.31	100.00	5.82e+005	1.25e+005	2.32e+003
	85	1800.00	208.07	100.00	6.06e+005	1.65e+005	2.32e+003
	86	1800.00	406.81	100.00	5.59e+005	8.24e+004	2.32e+003
	87	1800.00	337.60	100.00	5.67e+005	9.13e+004	2.32e+003
	88	1800.00	531.92	100.00	3.05e+005	5.34e+004	2.32e+003
	89	3480.00	641.80	100.00	1.48e+005	3.42e+004	00

Tabela 5.6 - Resultado da simulação: Falhas e Fator de Uso

Série		Falhas (dm ³ /dia)				Fator de Uso do Reservatório
		máxima	taxa média de defluência	vol. excedente Σ (dm ³)	número	
Curva Volume x Duração	81	00	0	00	00	0,836
	82	00	0	00	00	0,836
	83	00	0	00	00	0,836
	84	00	0	00	00	0,836
	85	00	0	00	00	0,834
	86	00	0	00	00	0,836
	87	00	0	00	00	0,836
	88	00	0	00	00	0,836
	89	6.53e+004	1.970e+05	2.49e+005	06	0,849
Curva volume x Duração por Janelas	81	00	0	00	00	0,975
	82	7.55e+003	1.614e+05	1.18e+004	02	0,986
	83	00	0	00	00	0,982
	84	00	0	00	00	0,968
	85	00	0	00	00	0,963
	86	00	0	00	00	0,982
	87	00	0	00	00	0,979
	88	00	0	00	00	0,986
	89	145152	2.138e+05	6.41e+005	11	0,997
Trajetórias Críticas (histórico)	81	00	0	00	00	0,999
	82	5.84e+004	1.778e+05	6.69e+004	03	1,000
	83	00	0	00	00	1,000
	84	4.23e+003	1.598e+05	4.23e+003	01	0,999
	85	00	0	00	00	0,998
	86	00	0	00	00	1,000
	87	00	0	00	00	1,000
	88	1.95e+004	1.662e+05	2.13e+004	02	1,000
	89	145152	2.178e+05	8.09e+005	13	1,000
Trajetórias Críticas (séries sintéticas)	81	00	0	00	00	0,874
	82	00	0	00	00	0,894
	83	00	0	00	00	0,876
	84	00	0	00	00	0,882
	85	00	0	00	00	0,873
	86	00	0	00	00	0,881
	87	00	0	00	00	0,885
	88	00	0	00	00	0,889
	89	6.53e+004	1.955e+05	2.40e+005	06	0,900
Equações Diferenciais Estocásticas	81	00	0	00	00	0,965
	82	00	0	00	00	0,983
	83	00	0	00	00	0,973
	84	00	0	00	00	0,959
	85	00	0	00	00	0,946
	86	00	0	00	00	0,973
	87	00	0	00	00	0,970
	88	00	0	00	00	0,982
	89	145152	2.289e+05	6.61e+005	09	0,989

Tabela 5.7 - Resultado da simulação: Energia Armazenada e Energia Perdida

Série		Energia Armazenada (MW.dia)			Energia Perdida (MW.dia)		
		Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima
Curva Volume x Duração	81	17842.90	17840.65	17788.70	3767.02	3715.07	3712.82
	82	18321.22	17846.98	17842.90	3712.82	3708.74	3234.50
	83	17842.90	17842.82	17834.29	3721.43	3712.90	3712.82
	84	17874.16	17842.41	17785.51	3770.21	3713.31	3681.56
	85	17842.90	17808.41	17584.76	3970.96	3747.31	3712.82
	86	17842.90	17842.86	17837.36	3718.37	3712.86	3712.82
	87	17842.90	17842.80	17831.42	3724.30	3712.92	3712.82
	88	17987.09	17843.11	17810.38	3745.34	3712.61	3568.63
	89	21555.72	18131.29	17842.90	3712.82	3424.43	0.00
Curva volume x Duração por Janelas	81	21555.72	20978.10	17905.84	3649.88	577.62	0.00
	82	21555.72	21232.61	17905.84	3649.88	323.11	0.00
	83	21555.72	21143.40	17905.84	3649.88	412.32	0.00
	84	21555.72	20826.30	17905.84	3649.88	729.42	0.00
	85	21555.72	20726.38	17873.94	3681.78	829.34	0.00
	86	21555.72	21139.30	17905.84	3649.88	416.42	0.00
	87	21555.72	21069.06	17905.84	3649.88	486.66	0.00
	88	21555.72	21235.90	17905.84	3649.88	319.82	0.00
	89	21555.72	21490.31	20638.88	916.84	65.41	0.00
Trajetórias Críticas (histórico)	81	21555.72	21538.26	21046.27	509.45	17.46	0.00
	82	21555.72	21554.26	21409.14	146.58	1.46	0.00
	83	21555.72	21545.66	21070.22	485.50	10.06	0.00
	84	21555.72	21543.54	21070.22	485.50	12.18	0.00
	85	21555.72	21501.43	21045.62	510.10	54.29	0.00
	86	21555.72	21546.84	21070.22	485.50	8.89	0.00
	87	21555.72	21547.97	21070.22	485.50	7.75	0.00
	88	21555.72	21551.13	21097.09	458.63	4.59	0.00
	89	21555.72	21553.77	21409.14	146.58	1.95	0.00
Trajetórias Críticas (séries sintéticas)	81	21555.72	18700.91	17779.71	3776.01	2854.81	0.00
	82	21555.72	19140.70	17781.48	3774.24	2415.02	0.00
	83	21555.72	18749.44	17781.48	3774.24	2806.28	0.00
	84	21542.75	18890.49	17781.48	3774.24	2665.23	12.98
	85	21555.72	18685.77	17598.23	3957.49	2869.95	0.00
	86	21555.72	18854.00	17781.48	3774.24	2701.72	0.00
	87	21555.72	18950.93	17781.48	3774.24	2604.79	0.00
	88	21555.72	19048.52	17781.48	3774.24	2507.20	0.00
	89	21555.72	19284.69	17781.48	3774.24	2271.03	0.00
Equações Diferenciais Estocásticas	81	21537.28	20755.20	17591.80	3963.93	800.53	18.44
	82	21538.28	21179.69	17848.67	3707.05	376.04	17.45
	83	21538.28	20951.13	17556.51	3999.21	604.59	17.45
	84	21538.28	20619.24	17230.93	4324.79	936.48	17.45
	85	21538.28	20327.45	17048.47	4507.25	1228.27	17.45
	86	21538.28	20939.72	17400.97	4154.75	616.00	17.45
	87	21538.28	20873.01	17338.42	4217.30	682.72	17.45
	88	21538.28	21155.37	19274.53	2281.19	400.35	17.45
	89	21555.72	21299.15	20445.36	1110.36	256.57	0.00

Tabela 5.8- Resultado da simulação: Engolimento Máximo, Disponibilidade de Potência

Série		Engolimento Máximo (m ³ /s)			Disponibilidade de Potência (MW)		
		Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima
Curva Volume x Duração	81	643.420	640.317	632.785	407.241	401.396	387.380
	82	641.241	634.384	627.533	403.117	390.347	377.815
	83	643.411	639.023	633.077	407.224	398.967	387.917
	84	643.420	639.820	627.533	407.241	400.462	377.814
	85	643.420	641.505	629.614	407.241	403.633	381.585
	86	643.418	638.607	630.956	407.237	398.195	384.030
	87	643.415	639.360	629.432	407.232	399.597	381.255
	88	643.420	637.376	627.505	407.241	395.913	377.764
	89	643.222	637.028	627.490	406.866	395.269	377.737
Curva volume x Duração por Janelas	81	647.988	644.739	633.736	416.000	410.153	389.129
	82	647.181	639.419	628.562	416.000	399.736	379.675
	83	647.940	643.974	631.722	416.000	408.438	385.431
	84	647.967	644.272	632.373	416.000	409.125	386.623
	85	647.988	645.144	634.449	416.000	411.432	390.443
	86	647.955	643.534	632.584	416.000	407.668	387.011
	87	647.996	644.214	633.368	416.000	408.886	388.452
	88	647.983	642.365	627.786	416.000	405.504	378.271
	89	647.926	642.199	629.792	416.000	405.003	381.910
Trajetórias Críticas (histórico)	81	647.988	645.405	638.273	416.000	411.467	397.546
	82	646.657	639.858	629.802	413.419	400.539	381.928
	83	647.940	644.363	637.458	416.000	409.195	396.026
	84	647.967	645.068	632.698	416.000	410.653	387.221
	85	647.988	645.916	635.129	416.000	413.301	391.701
	86	647.955	643.941	636.181	416.000	408.435	393.651
	87	647.967	644.713	634.949	416.000	409.855	391.368
	88	647.983	642.687	631.588	416.000	406.073	385.186
	89	647.926	642.396	629.792	416.000	405.377	381.910
Trajetórias Críticas (series sintéticas)	81	647.414	642.123	628.521	416.000	404.873	379.602
	82	647.744	637.267	627.496	416.000	395.915	377.747
	83	647.134	641.161	627.729	416.000	403.049	378.168
	84	647.949	641.883	628.448	416.000	404.510	379.470
	85	647.593	643.072	630.507	416.000	406.650	383.212
	86	647.981	640.756	628.498	416.000	402.336	379.560
	87	647.901	641.721	629.963	416.000	404.149	382.220
	88	647.783	639.803	627.610	416.000	400.620	377.953
	89	647.816	639.496	627.547	416.000	400.081	377.839
Equações Diferenciais Estocásticas	81	647.979	644.788	627.094	416.000	410.299	377.022
	82	647.809	639.612	627.494	416.000	400.161	377.743
	83	647.947	644.074	627.039	416.000	408.781	376.923
	84	647.993	644.367	626.529	416.000	409.370	376.004
	85	647.992	645.277	626.242	416.000	411.146	375.487
	86	647.986	643.625	626.796	416.000	407.937	376.485
	87	647.963	644.321	626.698	416.000	409.203	376.308
	88	647.998	642.539	629.671	416.000	405.761	381.688
	89	647.984	642.211	629.792	416.000	405.182	381.910

Tabela 5.9 - Resultado da simulação: Energia Gerada e Energia Vertida

Série		Energia Gerada (MW.dia)			Energia Vertida (MW.dia)		
		Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima
Curva Volume x Duração	81	413.291	175.358	65.404	210.077	5.296	0.000
	82	413.267	373.250	134.635	718.467	141.931	0.000
	83	413.377	228.545	65.418	183.100	4.973	0.000
	84	413.136	192.420	65.403	716.891	8.753	0.000
	85	413.219	130.354	65.341	519.315	4.530	0.000
	86	413.176	239.991	65.419	388.600	21.373	0.000
	87	413.101	210.410	65.417	536.546	7.614	0.000
	88	413.339	276.439	65.411	717.290	63.158	0.000
	89	413.376	277.682	71.265	1195.917	130.570	0.000
Curva volume x Duração por Janelas	81	420.434	173.755	65.447	263.593	9.285	0.000
	82	420.410	375.214	78.972	783.415	147.807	0.000
	83	420.392	220.806	65.532	607.388	15.741	0.000
	84	420.279	185.219	65.466	728.984	18.320	0.000
	85	420.362	130.749	65.430	298.286	5.870	0.000
	86	420.319	232.701	65.550	484.094	32.190	0.000
	87	420.162	205.891	65.481	545.992	15.006	0.000
	88	420.482	266.631	65.828	729.326	77.089	0.000
	89	428.169	283.350	72.466	1871.256	131.066	0.000
Trajetórias Críticas (histórico)	81	420.434	177.658	66.377	213.737	6.033	0.000
	82	420.410	379.477	136.919	1146.123	144.616	0.000
	83	420.520	231.148	66.389	224.943	6.302	0.000
	84	420.279	194.097	66.409	759.738	10.433	0.000
	85	420.362	132.078	66.376	528.453	5.039	0.000
	86	420.319	242.127	66.424	419.943	23.626	0.000
	87	420.162	212.349	66.433	545.992	9.326	0.000
	88	420.482	279.799	66.514	868.649	65.573	0.000
	89	428.169	282.382	72.466	1871.256	132.702	0.000
Trajetórias Críticas (séries sintéticas)	81	419.364	152.091	65.401	722.451	36.341	0.000
	82	418.116	292.815	65.532	725.473	228.580	0.000
	83	417.109	188.534	65.446	726.071	51.869	0.000
	84	419.037	167.746	65.421	718.984	40.100	0.000
	85	417.684	118.597	65.345	646.167	24.596	0.000
	86	417.230	203.461	65.440	719.098	65.375	0.000
	87	419.672	177.225	65.418	709.798	47.587	0.000
	88	419.222	233.085	65.405	722.547	113.601	0.000
	89	418.180	229.549	65.415	1195.917	185.592	0.000
Equações Diferenciais Estocásticas	81	419.478	154.227	65.372	721.420	27.337	0.000
	82	420.176	351.470	65.522	728.645	169.709	0.000
	83	419.777	194.243	65.371	725.190	40.263	0.000
	84	419.805	163.687	65.255	729.324	37.897	0.000
	85	419.353	116.182	65.197	720.947	19.138	0.000
	86	420.087	208.249	65.336	726.791	54.678	0.000
	87	419.823	182.010	65.285	728.063	36.826	0.000
	88	419.880	256.401	66.176	728.695	86.405	0.000
	89	428.169	261.968	66.229	1871.256	150.749	0.000

Tabela 5.10 - Resultado da simulação Energia Total: Somatório da Energia Gerada e Energia Armazenada no último dia do período úmido

Série		Σ Energia Gerada ΣEg (MW.dia)	Energia Armazenada Último dia do período Es_{ud} (MW.dia)	$\Sigma Eg + Es_{ud}$ (MW.dia)
Curva Volume x Duração	81	3.1754e+004	1.7793e+004	4.9547e+004
	82	6.7588e+004	1.7843e+004	8.5431e+004
	83	4.1385e+004	1.7843e+004	5.9228e+004
	84	3.4843e+004	1.7843e+004	5.2686e+004
	85	2.3604e+004	1.7828e+004	4.1432e+004
	86	4.3457e+004	1.7843e+004	6.1300e+004
	87	3.8101e+004	1.7843e+004	5.5944e+004
	88	5.0057e+004	1.7843e+004	6.7900e+004
	89	5.0283e+004	1.7843e+004	6.8126e+004
Curva volume x Duração por Janelas	81	3.1463e+004	2.1495e+004	5.2958e+004
	82	6.7943e+004	2.1546e+004	8.9489e+004
	83	3.9983e+004	2.1546e+004	6.1529e+004
	84	3.3539e+004	2.1546e+004	5.5085e+004
	85	2.3676e+004	2.1530e+004	4.5206e+004
	86	4.2137e+004	2.1546e+004	6.3683e+004
	87	3.7282e+004	2.1546e+004	5.8828e+004
	88	4.8281e+004	2.1546e+004	6.9827e+004
	89	5.1309e+004	2.1546e+004	7.2855e+004
Trajetórias Críticas (histórico)	81	3.2170e+004	2.1495e+004	5.3665e+004
	82	6.8715e+004	2.1546e+004	9.0261e+004
	83	4.1856e+004	2.1546e+004	6.3402e+004
	84	3.5147e+004	2.1546e+004	5.6693e+004
	85	2.3916e+004	2.1530e+004	4.5446e+004
	86	4.3844e+004	2.1546e+004	6.5390e+004
	87	3.8452e+004	2.1546e+004	5.9998e+004
	88	5.0665e+004	2.1546e+004	7.2211e+004
	89	5.1133e+004	2.1546e+004	7.2679e+004
Trajetórias Críticas (séries sintéticas)	81	2.7541e+004	1.9906e+004	4.7447e+004
	82	5.3023e+004	2.0251e+004	7.3274e+004
	83	3.4139e+004	2.0074e+004	5.4213e+004
	84	3.0375e+004	2.0197e+004	5.0572e+004
	85	2.1475e+004	1.9945e+004	4.1420e+004
	86	3.6843e+004	2.0001e+004	5.6844e+004
	87	3.2092e+004	2.0159e+004	5.2251e+004
	88	4.2207e+004	2.0182e+004	6.2389e+004
	89	4.1567e+004	2.0125e+004	6.1692e+004
Equações Diferenciais Estocásticas	81	2.7927e+004	2.1359e+004	4.9286e+004
	82	6.3644e+004	2.1482e+004	8.5126e+004
	83	3.5173e+004	2.1482e+004	5.6655e+004
	84	2.9640e+004	2.1482e+004	5.1122e+004
	85	2.1038e+004	2.1399e+004	4.2437e+004
	86	3.7709e+004	2.1455e+004	5.9164e+004
	87	3.2958e+004	2.1482e+004	5.4440e+004
	88	4.6429e+004	2.1482e+004	6.7911e+004
	89	4.7437e+004	2.1482e+004	6.8919e+004

Em uma análise global, podemos ver na tabela 5.11 a comparação entre os métodos baseada em alguns parâmetros importantes. Como já dito anteriormente, pode-se ver que o MCVD, embora apresente poucas falhas e uma geração média razoável, tem um fator de uso baixo, baixa disponibilidade de potência, além da energia armazenada também baixa, definindo indicadores de energia com níveis baixos. Já o MTC não é próprio para poucas séries, como as disponíveis no histórico, dependendo de um gerador de séries sintéticas, o qual necessita de dados suficientes para calibrar seus parâmetros, e isto pode perturbar seu desempenho como pode-se observar abaixo, apresentando indicadores de energia reduzidos em relação aos demais métodos. Os métodos MCVDJ e MEDE representam, ao nosso ver, uma boa contribuição ao estudo de cheias, por se tratarem de métodos que buscam compatibilizar as taxas de falhas com os indicadores de energia, procurando uma melhor adequação para os pontos de conflito.

Tabela 5.11 - Resultados Gerais

<i>Métodos</i>	Falhas			F.U. (%)	D.P. (MW)	E.A. (MW.dia)	E.G. (MW.dia)	E.Total (MW.dia)
	<i>n</i>	<i>Taxa</i> (m ³ /s)	<i>V. excedente</i> (dm ³)					
MCVD	6	2280	2.49x10 ⁵	83.56	389.48	1.787x10 ⁴	233	6.017x10 ⁴
MCVDJ	13	2474	6.41x10 ⁵	97.96	408.22	2.109x10 ⁴	230.48	6.328x10 ⁴
MEDE	9	2650	6.61x10 ⁵	97.11	407.73	2.090x10 ⁴	209.83	5.945x10 ⁴
MTC_ss	6	2263	2.4x10 ⁵	88.38	379.53	1.8923x10 ⁴	195.9	5.557x10 ⁴
MTC_h	19	2520	9.02x10 ⁵	99.96	405.62	2.154x10 ⁴	236.79	6.441x10 ⁴

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

O estudo analítico dos métodos de controle de cheias não é um processo fácil, visto que estão envolvidos diferentes parâmetros. Vimos que, em virtude da complexidade do problema, o número de falhas e o volume vazio de espera alocado no reservatório são informações importantes mas não suficientes. Outros fatores contribuem no processo e devem ser levados em consideração, tais como a intensidade de falha quando esta ocorre, o fator de uso do reservatório no decorrer do período estudado, a disponibilidade de potência, a energia armazenada e perdida, a energia gerada e vertida. A observação destes parâmetros conjuntamente, propiciam um exame mais completo dos métodos.

Os testes foram realizados com o histórico de vazões naturais médias diárias, num período de 9 anos (1981-1989), sendo considerada apenas a estação chuvosa, contendo 181 dias, referentes aos meses de novembro a maio. O histórico utilizado, apesar de expressar situações reais, é considerado restrito (o tamanho do histórico aplicado é limitado em função apenas dos dados disponíveis), o que significa um problema no desempenho dos métodos, pois em virtude disto torna-se difícil a escolha da melhor distribuição teórica de probabilidades bem como uma definição mais precisa dos seus coeficientes, dificulta também uma melhor calibração nos modelos probabilísticos para geração de séries sintéticas de vazões, que necessitam de uma boa quantidade de dados para o ajuste do modelo.

Este estudo permitiu mostrar que o reservatório da Usina de Chavantes, através da alocação de volumes de espera, pode contribuir para o amortecimento de cheias. Devemos salientar, no entanto, o risco de não enchimento do volume útil ao final do período úmido, que poderá trazer problemas futuros quanto ao uso, principalmente em relação à geração de energia elétrica.

O Método da Curva Volume x Duração apresentou um dos menores índices de falhas, com menores taxas de defluência e volumes excedentes. Contudo, apresentou o menor fator de uso, menores índices de energia armazenada e disponibilidade de potência, e maiores índices de energia perdida. Como para esta usina o efeito cota* não é muito forte, a variação do nível do reservatório, causada pelo método da Curva Volume x Duração, reduzindo o volume armazenado, não chega a afetar sensivelmente a produtividade da usina, de modo que a energia gerada, energia vertida e energia total foram pouco afetadas.

O Método da Curva Volume x Duração por Janelas teve um bom desempenho pois, apesar de apresentar um número de falhas, taxa média de defluência e volume excedente maiores que o Método da Curva Volume x Duração, apresentou um fator de uso elevado, maiores índices de energia armazenada e disponibilidade de potência, menores índices de energia perdida. A energia gerada também apresentou índices elevados, contribuindo para disponibilizar um dos índices mais elevados de energia total entre os métodos (energia armazenada no último dia do período úmido mais o somatório das energias geradas, em cada série).

O Método por Equações Diferenciais Estocásticas também demonstrou um excelente desempenho, apresentando poucas falhas, tendo as taxas médias defluentes e volumes excedentes com valores próximos aos do Método da Curva Volume x Duração por Janelas. A energia armazenada e disponibilidade de potência tiveram índices elevados, com baixos valores de energia perdida.

* O efeito cota refere-se a influência que a variação do nível de montante exerce sobre a capacidade de geração de uma usina. É calculado em função dos níveis máximo operativo, mínimo operativo e canal de fuga médio, como segue:

$$(H_{max} - C_{fmed}) = a \quad (H_{min} - C_{fmed}) = b$$

$$influência\ do\ efeito\ cota\ (\%) = (a - b) / a = 1 - b / a$$

No caso da Usina de Chavantes, este valor é de 11.78%. Em geral, o efeito cota pode ser considerado alto acima de 20%.

O Método das Trajetórias Críticas, quando aplicado apenas ao histórico, não tem um bom desempenho, pois, apesar de obter valores elevados de disponibilidade de potência, energia armazenada e energia gerada, apresentando a maior energia total, o número de falhas ocorridas é muito superior aos outros métodos, bem como o volume defluente excedente. Este método, quando aplicado a séries sintéticas (para a obtenção de seus volumes de espera), apresentou poucas falhas e menores índices de volume excedente, contudo, também apresentou baixos valores de energia armazenada, disponibilidade de potência, energia gerada e energia total, e os maiores índices de energia vertida, tendo um desempenho regular. Um ponto crucial neste método está relacionado ao gerador de séries sintéticas, para o qual adotamos o modelo AR de primeira ordem, escolhido pelo fato de sua implementação ser razoavelmente simples, considerando também que um outro modelo mais elaborado demandaria um tempo bem maior, sendo que persistia a possibilidade de não haver melhorias no desempenho.

Um dos maiores problemas do Método da Curva Volume $\times$ Duração, sob o ponto de vista de formulação, está na variação amostral que dificulta o processo de escolha da distribuição teórica de probabilidades empregada. Já sob o ponto de vista prático, uma deficiência muito importante no método é que, por determinar apenas um volume de espera para toda a estação úmida, no início do período seco o reservatório sempre está baixo, podendo trazer grandes transtornos relacionados ao atendimento à carga. O Método da Curva Volume $\times$ Duração por Janelas enfrenta o mesmo problema de variação amostral, contudo este método acompanha a variação temporal da intensidade da cheia, permitindo manter a produtividade elevada; este método pode ser ainda melhor estudado, por exemplo, com a variação da dimensão das janelas de dados. O Método das Trajetórias Críticas, como foi observado, requer necessariamente séries de comprimento significativo, o que só é possível com o uso de séries sintéticas, no entanto, se os dados não forem suficientes para calibrar o gerador de séries, então o método torna-se no máximo eficaz, e não eficiente. Já o Método por Equações Diferenciais Estocásticas, por empregar modelos probabilísticos mais sofisticados, apresenta como uma de suas vantagens a de não depender da distribuição a ser adotada ao conjunto de dados, o que vem a facilitar a sua aplicação. Este método apresenta a melhor avaliação global, junto com o Método da Curva Volume $\times$ Duração por Janelas, pois ao nosso ver, expressaram

a melhor relação entre volume de espera, risco de falhas e capacidade de energia, visando elevar as perspectivas da usina para o período seco vindouro.

Os resultados referentes à energia total, contidos na tabela 5.10, representam um ponto importante para os métodos, na medida em que quantifica a capacidade de geração de energia em função da energia gerada durante o período e da energia armazenada no último dia do mesmo período.

É interessante ressaltar que não é intenção do trabalho determinar categoricamente qual o melhor método, até porque testados em outras usinas, novas condições hidrológicas e séries históricas maiores, os comportamentos podem ser um pouco diferentes. A análise é mais global, mostrando os métodos que tem potencial de eficiência.

O trabalho implementou os principais métodos usados no controle de cheias por alocação de volume de espera, criou uma variação (MCVDJ) que melhorou a eficiência em um deles (MCVD) e comparou-os, juntamente com um método mais recente, com maior sofisticação estocástica (MEDE).

Os métodos foram aplicados em um caso real, com uma usina do Sistema Sudeste Brasileiro, destacando-se a abrangência das comparações efetuadas, que mostraram os mais diversos aspectos envolvidos tanto no controle de cheias, como no desempenho das usinas geradoras de energia elétrica. Isto vem permitir avaliações mais seguras e amplas sobre os métodos, mostrando suas vantagens e desvantagens, tornando possível escolhas mais conscientes.

O trabalho sugere continuidade como, por exemplo, a aplicação dos métodos em outras usinas, com comportamentos distintos. Um caso imediato seria verificar como os métodos se comportam em uma usina hidroelétrica com forte influência do efeito cota.

Outra necessidade importante é a utilização de usinas com registros históricos de vazões diárias por períodos mais longos, o que significa bancos de dados mais consistentes para os estudos estocásticos e simulações.

Um passo importante seria introduzir modificações tanto nos métodos de cálculo de volume de espera quanto no modelo de simulação para podermos aplicá-los em sistemas mais complexos como cascatas.

ANEXO A - PROGRAMAS

Os programas foram implementados com o uso do softwer **MATLAB[®]** versão 5.2 [48], elaborado pela empresa Matworks Inc.. Este softwer foi escolhido por sua clareza e ambiente amigável, além de dispor de ferramentas como o **Statistics Toolbox** versão 2.1 [49], que facilitam a aplicação da estatística aos modelos estudados.

Este anexo traz a listagem dos programas implementados e utilizados no decorrer deste trabalho, relacionados a seguir:

1. **Método da Curva Volume x Duração**
2. **Método da Curva Volume x Duração por Janelas**
3. **Método das Trajetórias Críticas**
4. **Método por Equações Diferenciais Estocásticas**
5. **Modelo de Simulação**
6. **Testes de Aderência**
7. **Gerador de Séries Sintéticas**

A.1 Método da Curva Volume x Duração

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa - mcvd.m: Método da Curva Volume x Duração %
% -Programa para o Cálculo dos volumes de espera a partir dos %
% Máximos Volume Afluentes %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
t0 = clock;
%-----%
% Carregar arquivo de vazões diárias: %
%-----%
cd \users\
load q.dat %Arquivo com vazões diárias em m3/s (histórico)
cd \users\testes
%-----%
% Constantes utilizadas: %
%-----%
deltat=86400; %Intervalo de discretização em segundos
h=181; %Número de dias da estação chuvosa
qr=1800; %Descarga de restrição em m3/s
volesp=[];
drcrit=[];
qn=q;
Kmax = 8.795e6 ; % Volume maximo do reservatorio (dm3)
M=[]; %Matriz que recebera todos os vads calculados
%-----%
% Subrotina para cálculo dos volumes Afluentes e Volume de Espera : %
%-----%
for i=1:9
    ANO=1980+i
    Comp=[]; %Vetor dos somatorios das vazões para todas as durações
    %-----%
    %Subrotina efetua somatório das vazões afluentes e calcula o va(d)%
    %-----%
    for d=1:50
        compara=[]; %receberá os somatorios das vazões para cada duração
        for t=1:h-d+1
            s=0;
            %-----%
            % Somatório das vazões: %
            %-----%
            for j=0:d-1
                s=s+qn(t+j,i)*deltat/10^9;
            end
            compara=[compara s]; % O vetor 'compara' acumula cada somatória s
        end
        comp=max(compara);
        Comp=[Comp comp]; % Acumula o máximo do vetor 'compara'
        % Cálculo do Va(d) para cada duração:
        va(d)=max(compara);
        % Cálculo da descarga de restrição para cada duração
        funcao(d)=qr*d*deltat/10^9;
        % Cálculo do Volume de Espera para cada duração
        ve(d)=va(d)-funcao(d);
        if ve(d)>0
            ve(d)=ve(d);
        end
    end
end

```



```

else
    ve(d)=0;
end
%-----%
% Determinação do Máximo Volume de Espera e Duração Crítica associada%
%-----%
    vemax=max(ve);          % Volume de Espera Máximo
    maximove(d)=ve(d);
    if maximove(d)==vemax
        maximove(d)=ve(d);
        dcr=d;              % Duração Crítica associada
    else
        maximove(d)=0;
    end
    totva(d)=max(va(d));
end
M=[M;Comp];
end
%-----%
% Salvar a Matriz dos Va(d)                                     %
%-----%
cd \users\testes\
save Mq0t0.out M -ascii %Salva a Matriz M em arquivo ascii
cd \users\

%-----%
% Aplicação da distribuição de probabilidades (Gumbel)          %
%-----%
t=1;
probvad=[];      % Vetor vazio que receberá os Va(d)'s estocásticos.
vamax=[];        % Vetor vazio que receberá os máximos Va(d)'s.
probve=[];       % Vetor vazio que receberá os ve's estocásticos
volesp=[];
drcrit=[];
MediaX=[];
VarX=[];
Alfa=[];
Theta=[];
for d=1:50
    x=M(:,d);    % Subdivide a matriz M em submatrizes relacionadas
                  % para cada duração.

    m=0;
    v=0;
    mi=mean(x);
    sigma=std(x);
    s=(sigma)^2;
    %-----%
    % Cálculo da Média %
    %-----%
    for t=1:9
        m=(m+x(t));
    end
    media=m/9;
    MediaX=[MediaX media];
    %-----%
    % Cálculo da Variância e Desvi Padrão %
    %-----%

```

```

for t=1:9
    v=(v+(x(t)-media)^2);
end
variancia=v/8;
VarX=[VarX variancia];
desvio_padrao=sqrt(variancia);
%-----%
% parâmetros da Distribuição Gumbel %
%-----%
% Valor sperado e Variancia do conjunto de dados: %
Ey=media;
Vy=variancia;
% Parametros da Distribuição Gumbel: %
alfa= pi/sqrt(6*Vy);
Alfa=[Alfa alfa];
theta= Ey - (0.577/alfa);
Theta=[Theta theta];
% Probabilidade de Risco adotada: %
p=0.95;
% Calculo do volume de Espera: %
Yp= theta - (log(-log(p))/alfa);
probvad=[probvad Yp];
vam=max(x); % Procura o Máximo Va para cada duração d.
vamax=[vamax vam];
funcao(d)=qr*d*deltat/10^9;
% Cálculo do Volume de Espera probabilistico para cada duração:
vep=Yp-funcao(d);
if vep>0
    vep=vep;
else
    vep=0;
end
probve=[probve vep];
end
maxvegam=max(probve)
gumbel=probvad;
%-----%
% Determinação do Máximo Volume de Espera estocástico e %
% a Duração Crítica associada %
%-----%
vmax=max(probve)
maxv=probve;
for d=1:50
    if maxv(d)~=vmax
        maxv(d)=0;
    else
        maxv(d)=vmax;
        r=d
    end
end
volesp=[volesp vmax];
drccrit=[drccrit r];
tempo=etime(clock,t0)/60;
tempo_total=fix(tempo/60)+((tempo/60)-fix(tempo/60))*0.6;
Kmax(1:181)=Kmax/1e6; % transformando de dm3 para km3
vespera(1:181)=vmax;
K=Kmax-vespera;

```

```
vespera=vespera';
%-----%
% Salvar variaveis (volume de espera, duração critica, tempo total) %
%-----%
cd \users\testes\
save Ve0t2.dat vespera -ascii
diary var0t2.out
%diary var0t1.out
disp('% resultados do programa - gumbel0t0.m - %')
disp('%## volume de espera, duração crítica e tempo total #####')
probve'
drcrit'
tempo_total
disp('%#####')
diary off
cd \users\testes
```


A.2 Método da Curva Volume x Duração por Janelas

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa- mcvdj.m: Método da Curva Volume x Duração por Janelas%
%   -Programa para o Cálculo dos volumes de espera a partir dos %
%   Máximos Volume Afluentes levando-se em consideração a %
%   variação temporal dos volumes de espera alocados a partir %
%   da censura contínua, em blocos, da série de vazões naturais %
%   médias diárias. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
t0 = clock;
%-----%
% Carregar arquivo de vazões diárias: %
%-----%
%cd \users
load q.dat %Arquivo com vazões diárias em m3/s (histórico)
%cd \users
%-----%
% Constantes utilizadas: %
%-----%
deltat = 86400 ; %Intervalo de discretização em segundos
h = 15 ; %Número de dias da estação chuvosa
qr = 1800; %Descarga de restrição em m3/s
volesp = [] ;
drcrit = [] ;
w1 = 0 ;
w2 = 6 ;
z1 = 8 ;
z2 = 1 ;
for k = 1:181
    % Matriz que receberá os valores de volumes afluentes para cada
    k
    M = [] ; %Matriz que recebera todos os vads calculados
    qn = zeros(15,9) ;
    if k <= 7
        qn(z1-w1:15,:) = q(k-w1:k+7,:) ;
        w1 = w1+1 ;
    elseif (k>=8 & k<=174)
        qn(1:15,:) = q(k-7:k+7,:) ;
    else k > 174
        qn(1:15-z2,:) = q(k-7:k+w2,:) ;
        w2 = w2-1 ;
        z2 = z2+1 ;
    end
%-----%
% Subrotina para cálculo dos volumes Afluentes e Volume de Espera: %
%-----%
    for i = 1:9
        ANO = 1980+i
        Comp = [] ; %vetor que rebera as somatorias das vazões
%-----%
% Subrotina para o somatório das vazões afluentes e cálculo do va(d): %
%-----%
        for d = 1:15
            compara = [] ; %Vetor que reberá as somatorias das vazões para
            %cada duração

```

```

for t = 1:h-d+1
    s = 0 ;
    % Somatório das vazões:
    for j = 0:d-1
        s = s + qn(t+j,i) * deltat / 10^9 ;
    end
    compara = [compara s] ; %acumula cada somatória s
end
comp = max(compara) ;
Comp = [Comp comp] ; %acumula o máximo do vetor 'compara'
% Cálculo do Va(d) para cada duração:
va(d) = max(compara) ;
% Cálculo da descarga de restrição para cada duração
funcao(d) = qr * d * deltat / 10^9 ;
% Cálculo do Volume de Espera para cada duração
ve(d) = va(d) - funcao(d) ;
if ve(d) > 0
    ve(d) = ve(d) ;
else
    ve(d) = 0 ;
end
end
%-----%
% Definição do Máximo Volume de Espera e a Duração Crítica associada %
%-----%
vemax = max(ve) ; % Volume de Espera Máximo
maximove(d) = ve(d) ;
if maximove(d) == vmax
    maximove(d) = ve(d) ;
    dcr = d ; % Duração Crítica associada
else
    maximove(d) = 0 ;
end
totva(d) = max(va(d)) ;
end
%-----%
% Fim subrotina somatorio e calculo de Va(d) %
%-----%
M = [M;Comp] ;
end
%-----%
% Fim subrotina calculo volume afluente e volume de espera %
%-----%
save M.dat M -ascii %Salva a Matriz M dos Va(d)'s num arquivo M.dat

%-----%
% Aplicação da distribuição de probabilidades (Gumbel) %
%-----%
probvad = [] ; %Vetor vazio que receberá os Va(d)'s estocásticos.
vamax = [] ; % Vetor vazio que receberá os máximos Va(d)'s.
probve = [] ; % Vetor vazio que receberá os ve's estocásticos
MediaX = [] ;
VarX = [] ;
for d = 1:15
    X = M(:,d) ; % Subdivide a matriz M em submatrizes relacionadas
                % para cada duração.
    m = 0 ;
    v = 0 ;

```

```

mi = mean(X) ;
sigma = std(X) ;
s = (sigma)^2 ;
%-----%
% Cálculo da Média %
%-----%
for t = 1:9
    m = (m+X(t)) ;
end
media = m / 9 ;
%-----%
% Cálculo da Variância e Desvi Padrão %
%-----%
for t = 1:9
    v = (v + (X(t) - media)^2) ;
end
variancia = v / 8 ;
desvio_padrao = sqrt(variancia) ;
%-----%
% Parâmetros da Distribuição Gumbel %
%-----%
% Valor sperado e Variância do conjunto de dados: %
Ey = media ;
Vy = variancia ;
% Parametros da Distribuição Gambel: %
alfa = pi / sqrt(6 * Vy) ;
theta = Ey - (0.577 / alfa) ;

% Probabilidade de Risco adotada: %
p = 0.95 ;
% Calculo do volume de Espera: %
Yp = theta - (log(-log(p)) / alfa) ;
probvad = [probvad Yp] ;
vam = max(X) ; % Procura o Máximo Va para cada duração d.
vamax = [vamax vam] ;
funcao(d) = qr * d * deltat / 10^9 ;
%-----%
% Cálculo do Volume de Espera probabilistico para cada duração %
%-----%
vep = Yp - funcao(d) ;
if vep > 0
    vep = vep ;
else
    vep = 0 ;
end
probve = [probve vep] ;
t = t + 1 ;
end
maxvegumb = max(probve) ;
gumbel = probvad ;
%-----%
% Determinação do Máximo Volume de Espera estocástico e %
% a Duração Crítica associada %
%-----%
vmax = max(probve) ;
maxv = probve ;
for d = 1:15

```

```

        if maxv(d) ~= vmax
            maxv(d) = 0 ;
        else
            maxv(d) = vmax ;
            r = d;
        end
    end
    end
    volesp = [volesp vmax] ;
    drcrit = [drcrit r];
%-----%
% Gravando em arquivo as variaveis                                     %
%-----%
save var.out k qn M vmax r -ascii
tempo = etime(clock,t0) / 60      % tempo em minutos
    if k == 1
        tempo_esperado = tempo * 181
    end
    k = k + 1 ;
end
volespera = volesp ;
volespera = volespera' ;
tempo_total = fix(tempo / 60) + ((tempo / 60) - fix(tempo / 60)) * 0.6
%          = horas.minutos ; (duas casas decimais representam minutos)
cd \users
save vevd2t2.dat volespera -ascii

```

A.3 Método das Trajetórias Críticas

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa tc2: apresenta o Método das Trajetórias Críticas:      %
%   -Método utilizado no controle de cheias, sendo baseado nas    %
%   Trajetórias Críticas para determinação da curva limite que   %
%   define o volume de espera para cada dia.                     %
%% Obs.:O ajuste do modelo das séries sintéticas é baseado no    %
%   histórico de vazões.                                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
t0 = clock;
%load q.dat
Kmax(1:181) = 8.795; % Volume máximo do reservatório
qr=1800;           % Descarga de restrição (qr=1800 m3/s)
h=size(q,2);      % Numero de dias da estação chuvosa(colunas)
deltat=86400;      % Discretização do tempo(1 dia = 86400 segundos)
n = size(q,1) ;    % Numero de série de vazões(linhas)
p=5;               % probabilidade de risco em (%)
TC=[];
% Subrotina para cálculo dos Volumes de Espera
for i=1:n
    ano=0+i
    qt=q(i,1:h);
    vesp=[];
    for j=h:-1:1
        if j==h
            dif=(qt(j)-qr)*deltat/10^9;
            ve=max(0,dif);
        else
            dif=((qt(j)-qr)*deltat/10^9)+vep;
            ve=max(0,dif);
        end
        vep=ve;
        vesp=[vesp vep];
    end

    vesp=fliplr(vesp);
    TCn=Kmax-vesp;
    TC=[TC; TCn];
end

figure(1)
% hold on
%plot(j,fliplr(vesp))
%plot(fliplr(TC'))
plot((TC'))
% hold off
title('Trajetórias Críticas');
xlabel('tempo em dias');
ylabel('volume de espera (km3)');
grid

%figure(2)
% plot(j,TCn1r)
% title('Trajetórias Críticas');
% xlabel('tempo em dias');

```

```

%      ylabel('volume de espera (km3)');
%%      AXIS([0 182 -0.035 0]);
%      grid

h=1:181;
TC;
v=1;
tc0min=[];

% subrotina para achar os menores volumes armazenados
for k=1:181
    dia=k
    Matriz=TC(:,v);
    Matriz2=min(Matriz);
    tc0min=[tc0min Matriz2];
    valor0min=min(tc0min);
    v=v+1;
end

k=1:181;
figure(3)
    %plot(tcmax)
    plot(tc0min)
    title('Envoltória das Trajetórias Críticas');
    xlabel('tempo em dias');
    ylabel('volume de espera (km3)');
    %axis([0 182 0 8.8]);
    grid

% Subrotina para encontrar (descartar) trajetórias com os maiores
% volumes de espera, ou seja, menores volumes armazenados.
TTC=TC;
r=ceil(n*(p/100))
for m=1:r
    minimo = Kmax(1,1) ;
    for i=1:n
        min_linha = min(TTC(i,:)) ;
        if min_linha < minimo
            minimo = min_linha ;
            linha_min = i ;
        end
    end
    novaTC=TTC;
    novaTC(linha_min,:)=[];
    TTC=novaTC;
    n=n-1;
end

figure(4)
    plot(novaTC)
    title('Trajetórias considerando uma probabilidade de risco de
proteção(10%)');
    xlabel('tempo em dias');
    ylabel('volume de espera (km3)');
    %axis([0 182 0 8.8]);
    grid

```



```

% subrotina para achar o a trajetória com os menores volumes
h=1:181;
novaTC;
v=1;
tcmin=[];
for k=1:181
    dia=k
    Matriz=novaTC(:,v);
    Matriz2=min(Matriz);
    tcmin=[tcmin Matriz2];
    valormin=min(tcmin);
    v=v+1;
end
volespera = Kmax - tcmin ;
volespera = volespera' ;

% SALVAR VOLUME DE ESPERA %
%-----
cd z:\
save VeTCserie1000.out volespera -ascii

k=1:181;
figure(5)
plot(tcmin)
%plot(-fliplr(tcmax))
title('Envoltória das Trajetórias Críticas com prob. de risco');
xlabel('tempo em dias');
ylabel('volume de espera (km3)');
%axis([0 182 0 8.8]);
grid
tempo=etime(clock,t0)/60

```

A.4 Método por Equações Diferenciais Estocásticas

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa - mede.m
% -Método por Equações Diferenciais Estocásticas
% -Aplica inferência bayesiana na definição dos volumes de espera %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;

%-----
% Inferência Bayesiana
%-----
% Cálculo do drift e da matriz difusao via Inferencia Bayesiana
%-----
% leitura dos dados
%-----
format long e
load q.dat

%-----
% Condições iniciais
%-----
y = 0.864e-4 * q;
n=3000; % numero de interacoes
nmeio=0.5*n; % 50 porc. das interações
M=size(q,2);
p=0.05;

y1=y';
ymed=mean(y1);
yvar=(M-1)/M * var(y1);

% -----
% estimadores de maxima verossimilhanca
% -----
miv=ymed;
for i=1:size(q,1)
    ss=(y1(:,i)-ymed(i)).^2;
    s2(i)=sum(ss)/(M-1);
end
sigv2=(M-1). * s2./M;
sigv=sqrt(sigv2);

% -- condicoes iniciais ---
% -----
miy(1,:)=ymed;
sig(1,:)=yvar;
%-----
% Algoritmo Gibbs para miy e sig
%-----
for k=2:n
    for i=1:size(q,1)
        miy(k,i)=normrnd(ymed(i),sqrt(sig(k-1,i)/M));
        b(i)=(M-1)*s2(i)+M*(miy(k,i)-ymed(i))^2;
        a=(M-4)/2;
        sig(k,i)=1./gamrnd(a,2./b(i));
    end
end
end

```

```

%-----
% Seleção dos valores para estimação
%-----
miys=miy(nmeio+1:15:n,:);      % seleção dos mis para a carga (Y)
sigs=sig(nmeio+1:15:n,:);      % seleção dos sigmas para a carga (Y)
end

%-----
% Cálculo dos estimadores
%-----
mib =mean(miys);                % Estimador da média para a carga (Y)
sigb =mean(sqrt(sigs));         % Estimador da sigma para a carga (Y)
sigb2=mean(sigs);

%-----
% Calculo do volume de espera
%-----
qr=1800*0.864e-4;
Smax=8.795-5.754;
Smin=0;
L=length(miys(:,1));

for j=1:size(q,1)
    psib(j)=2*(qr-mib(j))/sigb2(j);
    psiv(j)=2*(qr-miv(j))/sigv2(j);
    xb(j)= -(1./psib(j)).*log(p.*(1-exp(-psib(j).*Smax))+exp(-
psib(j).*Smax));
    xv(j)= -(1./psiv(j)).*log(p.*(1-exp(-psiv(j).*Smax))+exp(-
psiv(j).*Smax));
end

% -----
% Calculo do Risco de falha
% -----
nd=20;
xmax=max(xb);
delta=xmax/(nd-1);
xrb=0:delta:xmax;
for i=1:nd;
    for j=1:size(q,1)
        rb(i,j)=(exp(-psib(j).*xrb(i))-exp(-psib(j).*Smax))./(1-exp(-
psib(j).*Smax));
    end
end

nd=20;
xmax=max(xv);
delta=xmax/(nd-1);
xrv=0:delta:xmax;
for i=1:nd;
    for j=1:size(q,1)
        rv(i,j)=(exp(-psiv(j).*xrv(i))-exp(-psiv(j).*Smax))./(1-exp(-
psiv(j).*Smax));
    end
end
end

```



```
%-----  
% Resultados por graficos  
%-----  
figure  
plot(xrb(2:nd),rb(2:nd,[60 70 75 80 90]))  
  
figure  
plot(xrv(2:nd),rv(2:nd,[60 70 75 80 90]))  
  
figure  
plot(xb,'o')  
hold on  
plot(xv,'*')  
legend('Bayesian','Likelihood');  
xlabel('dias')  
ylabel('Volume de Espera em Km3')  
hold off  
  
figure  
plot(mib,'o')  
hold on  
plot(miv,'*')  
plot(mib)  
plot(miv)  
legend('Bayesian','Likelihood');  
xlabel('dias')  
ylabel('drifts em Km3')  
hold off  
  
figure  
plot(sigb,'o')  
hold on  
plot(sigv,'*')  
plot(sigb)  
plot(sigv)  
legend('Bayesian','Likelihood');  
xlabel('dias')  
ylabel('coef. de difusão em Km3')
```

A.5 Modelo de Simulação

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa - Simulador.m                                                    %
% - Simulador para séries sintéticas                                       %
%   -Considera volume de espera na regra de operação                     %
%   -Calcula:  -Números de Falhas,                                       %
%               -Energia Armazenada e Perdida,                          %
%               -Disponibilidade de Potência,                           %
%               -Energia Gerada e Vertida,                               %
%               -Energia Total                                           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
% leitura de dados:
%-----
load q.dat                %Arquivo com vazões diárias em m3/s
%ve = load vemcvd0t0.dat   %Arquivo contendo volumes de espera
%ve = load vemcvdj2t0.dat  %Arquivo contendo volumes de espera
%ve = load vemtcht0.dat    %Arquivo contendo volumes de espera
ve = load veTCserie9000.dat %Arquivo contendo volumes de espera
%ve = load vemedeXb02.dat  %Arquivo contendo volumes de espera
%Transformação de unidades:
%-----
ve = ve * 1e6 ; % Transformando volumes de espera de (km3) em (dm3)
q  = q  * 86.4 ; % Transformando afluências de (m3/s) em (dm3/dia)
n = size(q,2) ; % Número de séries de afluências (9)
m = size(q,1) ; % Número de dias de cada série de afluências (181)
%Valores máximos de afluências:
%-----
qmax = max(q, [], 2) ; % Afluências máximas
% Dados da Usina > { Chavantes } <
%-----
Kmax = 8.795e6 ; % Volume maximo do reservatorio (dm3)
Kmin = 5.754e6 ; % Volume minimo do reservatorio (dm3)
%vetores para cacumular dados:
%-----
Vol=[];
Turb=[];
Vert=[];
Deflu=[];
Resist=[];
Falhas=[];
% Metas de Volume (MK):
%-----
for t=1:m
    MK(t) = Kmax - ve(t) ; % Metas de volume em (dm3)
    if MK(t) ~= Kmax
        chuvas(t) = 1 ;
    else
        chuvas(t) = 0 ;
    end
end
K0 = MK(1) ;
% Restrições operativas:
%-----
Umax = 55987.2 ; % Turbinagem maxima (dm3/dia)
Umin = 8640. ; % Turbinagem minima permitida (dm3/dia)

```

```

Qref = 155520. ;           % Defluencia maxima permitida (dm3/dia)
nfalhas=0;
for j = 1:n      % j refere-se a número de anos (n = 9)
    y = q(:,j) ;      % afluências para a série j
    % Determinando Volumes(k(i)), Turbinagens(u(i)) e vertimentos(z(i))
    % diários seguindo trajetória ótima de volumes(Metas de volume) :
    %-----
    for i = 1:m
        % Calculo de DK (diferença entre o volume anterior(k(i-1)) e a
        % meta de volume do dia i):
        if i == 1
            DK(i) = K0 - MK(i) ;
        else
            DK(i) = k(i-1) - MK(i) ;
        end
        % definindo defluencia total necessária para seguir meta de
        % volume :
        YT(i) = DK(i) + y(i) ;
        % testa se afluência(y(i)) ultrapassa a descarga de
        % referência(Qref):
        if y(i) > Qref
            u(i) = Umax ;
            z(i) = Qref - u(i) ;
            espaco = Kmax - k(i-1) ;
            % Verifica se espaço vazio no reservatório suporta afluência
            % exedente:
            if espaco > (y(i)-Qref)
                if i == 1
                    k(i) = K0 + y(i) - Qref ;
                else
                    k(i) = k(i-1) + y(i) - Qref ;
                end
            else
                z(i) = z(i) + y(i) - Qref - espaco ;
                k(i) = Kmax ;
            end
        else
            % Verifica se afluência(y(i)) ultrapassa turbinagem
            % máxima(Umax):
            if y(i) > Umax
                u(i) = Umax;
                z(i) = y(i) - Umax;
                if YT(i) > Qref
                    z(i) = Qref - Umax;
                    if i == 1
                        k(i) = K0 + y(i) - Qref ;
                    else
                        k(i) = k(i-1) + y(i) - Qref ;
                    end
                else
                    if YT(i) > Umax
                        u(i) = Umax;
                        z(i) = YT(i) - Umax;
                        k(i) = MK(i);
                    else
                        if YT(i) > 0
                            u(i) = YT(i);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```



```

        z(i) = 0;
        k(i) = MK(i);
        if YT(i) < Umin
            u(i) = Umin;
            if i == 1
                k(i) = K0 + y(i) - Umin;
            else
                k(i) = k(i-1) + y(i) - Umin;
            end
        end
    else
        u(i) = Umin;
        z(i) = 0;
        if i == 1
            k(i) = K0 + y(i) - u(i);
        else
            k(i) = k(i-1) + y(i) - u(i);
        end
    end
end
end
else
    u(i) = y(i);
    z(i) = 0;
    k(i) = MK(i);
    if YT(i) > Qref
        u(i) = Umax;
        z(i) = Qref - Umax;
        if i == 1
            k(i) = K0 + y(i) - Qref;
        else
            k(i) = k(i-1) + y(i) - Qref;
        end
    end
else
    if YT(i) > Umax
        u(i) = Umax;
        z(i) = YT(i) - u(i);
        k(i) = MK(i);
    else
        u(i) = YT(i);
        k(i) = MK(i);
        if u(i) < Umin
            u(i) = Umin;
            if i == 1
                k(i) = K0 + y(i) - u(i);
            else
                k(i) = k(i-1) + y(i) - u(i);
            end
        end
    end
end
end
end
end
defl(i) = u(i) + z(i);
r(i) = Kmax - k(i);
falha(i) = u(i) + z(i);
if falha(i) > Qref

```

```

        falha(i) = falha(i) - Qref ;
        nfalhas= nfalhas+1;
    else
        falha(i) = 0 ;
    end
end
end
Vol = [Vol; k];
Turb = [Turb; u];
Vert = [Vert; z];
Deflu = [Deflu; defl];
Resist = [Resist; r];
Falhas = [Falhas; falha];
end
nfalhas;
sumfalhas=sum(falha);
Turbmax = max(Turb')/86.4;    % m3/s
Turbmed = mean(Turb')/86.4;
Turbmin = min(Turb')/86.4;
Vertmax = max(Vert')/86.4;    % m3/s
Vertmed = mean(Vert')/86.4;
Vertmin = min(Vert')/86.4;
Deflmax = max(Deflu')/86.4; % m3/s
Deflmed = mean(Deflu')/86.4;
Deflmin = min(Deflu')/86.4;
resismax = max(Resist')/1e6;    % km3
resimed = mean(Resist')/1e6;
resimin = min(Resist')/1e6;
turbvert = [Turbmax; Turbmed; Turbmin; Vertmax; Vertmed; Vertmin];
defluvol = [Deflmax; Deflmed; Deflmin; resismax; resimed;
resimin];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      Cálculo de Falhas e Fator de Uso do Reservatório      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Kutil = Kmax - Kmin ;          % Volume útil do reservatório.
Falhasmax = max(Falhas,[],2) ;
Falhasum = sum(Falhas,2) ;
Totfalhas = sum(sum(Falhas));
NFalhas_ano = [] ;
for i = 1:n
    nf = Falhas(i,:);
    Nfalhas = 0 ;
    for j = 1:m
        if nf(j) ~= 0
            Nfalhas = Nfalhas + 1 ;
        end
    end
    NFalhas_ano = [NFalhas_ano Nfalhas] ;
end
% Fator de Uso do reservatório e volume vazio máximo:
KVmax = [] ;
KVmed = [] ;
Fator = [] ;
for i = 1:n
    k = Vol(i,:) ;
    % Cálculo do volume vazio máximo:
    kv = Kmax - k ;
    KVmed = [KVmed mean(kv)] ;
end

```

```

KVmax = [ KVmax max(kv) ] ;
% Cálculo do Fator de uso do reservatório para cada série:
fator = ( 1 / 181 ) * sum( 1 - ( (Kmax - k) / Kutil ) ) ;
Fator = [Fator fator] ;
end
falhasfuso = [Falhasmax'; Falhasum'; NFalhas_ano; Fator; KVmax;
KVmed];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% -Cálculo da Energia Armazenada, Energia Armazenada máxima %
% e Energia Perdida %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Kmax = 8.795e3 ; % Volume máximo do reservatório (hm3)
Kmin = 5.754e3 ; % Volume mínimo do reservatório (hm3)
g = 9.81 ; % Aceleração da gravidade (m/s2) .
gama = 1000 ; % Densidade da água (Kg/m3) .
re = 0.89 ; % Rendimento do conjunto turbina-gerador
ruv = 1e6 ; % ajuste de unidade de volume (m3 para hm3)
dtd = 8.64e4 ; % ajuste de unidade de tempo (dia para s)
de = 1e6 ; % ajuste de unidade de energia (W para MW)
ro = 0.008731 ; % produtibilidade especifica (MW/(m3/s)m)
ctd = 8.64e-2 ; % constante relacionada ao tempo (dia)
cfmed = 398.70 ; % Nível médio do canal de fuga (m) .
h_nmcj = 76.0 ; % Queda nominal de cada conjunto (m) .
perdas = 0.0134 ; % percentual de perda de queda.
Resp = 0.008731 ; % produtibilidade especifica
pc = perdas * h_nmcj ; % perda de carga
% Coeficientes do polinômio Cota - Volume (fornece cota de montante)
A0 = 4.41809e2 ;
A1 = 4.85539e-3 ;
A2 = -1.35939e-7 ;
A3 = 0 ;
A4 = 0 ;
% Cálculo da Energia Armazenada Máxima (para volume Kmax):
h11Kmax = (A0-cfmed-pc)*Kmax + (A1/2)*(Kmax)^2 + (A2/3)*(Kmax)^3 +
(A3/4)*(Kmax)^4 + (A4/5)*(Kmax)^5 ;
h11Kmin = (A0-cfmed-pc)*Kmin + (A1/2)*(Kmin)^2 + (A2/3)*(Kmin)^3 +
(A3/4)*(Kmin)^4 + (A4/5)*(Kmin)^5 ;
Emax = (h11Kmax-h11Kmin)*ro/ctd;
EnergiaA=[]; % Energia Armazenada
EnergiaP=[]; % Energia Perdida
EAud=[]; % Energia Armazenada no ultimo dia do periodo umido
EPud=[]; % Energia Perdida no ultimo dia do periodo umido
for i = 1:n
k = Vol(i,:)/1e3 ;
% Cálculo da Energia Armazenada para volume k(j):
for j = 1:m
% Cálculo da cota de montante :
h11(j) = (A0-cfmed-pc)*k(j) + (A1/2)*(k(j))^2 + (A2/3)*(k(j))^3 +
(A3/4)*(k(j))^4 + (A4/5)*(k(j))^5 ;
% Cálculo da Energia (MW.dia) :
EA(j) = g * gama * re * (h11(j) - h11Kmin) / (de * dtd) ;
Evazio(j) = Emax - EA(j) ;
ea(j) = (h11(j)-h11Kmin)*ro/ctd;
ep(j) = Emax - ea(j) ;;
end
EnergiaA = [EnergiaA; ea];
EnergiaP = [EnergiaP; ep];

```



```

EAud=[EAud; ea(m)];
EPud=[EPud; ep(m)];
medEA(i) = mean(ea) ;
maxEA(i) = max(ea) ;
minEA(i) = min(ea) ;
medEvz(i) = mean(ep) ;
maxEvz(i) = max(ep) ;
minEvz(i) = min(ep) ;
end
energia = [maxEA; medEA; minEA; maxEvz; medEvz; minEvz];
mdmEA = mean(medEA);
mdmEvz = mean(medEvz);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% - Cálculo da disponibilidade de potência. %
%                               Usina Chavantes %
% Obs.: Representação simplificada tanto para os cálculos: %
% engolimento máximo e disponibilidade de potência %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Tipo de turbina: Francis
Nmccj = 4 ; % Número de máquinas por conjunto.
pt_efcj = 104; % Potência efetiva por máquina de cada conjunto (MW).
q_efcj = 162; % Engolimento efetivo por máquina (m3/s).
h_nmcj = 73.60; % Queda nominal de cada conjunto (m).
cfmed = 398.7 ; % nível médio do canal de fuga (m).
perdas = 0.0134 ; % percentual de perda de queda.
Resp = 0.008731; % produtividade específica
% Coeficientes do polinômio de jusante (fornece cota de jusante):
B0 = 3.96226e2 ;
B1 = 6.07516e-3 ;
B2 = -4.91266e-6 ;
B3 = 2.26816e-9 ;
B4 = -3.82946e-13 ;
QUM=[];
DPP=[];
EnergiaG=[];
EnergiaV=[];
SomEnerG1=[];
for i = 1:n
    k = Vol(i,:)/1e3 ;
    u = Turb(i,:)/86.4 ;
    z = Vert(i,:)/86.4 ;
    defl = u + z ; % Defluência total (m3/s).
    for t = 1:m
        % Cálculo da altura de montante (m):
        hmon(t) = A0 + A1 * k(t) + A2 * (k(t))^2 + A3 * (k(t))^3 +
            A4 * (k(t))^4;
        % Cálculo da altura de jusante (m):
        hjus(t) = B0 + B1 * defl(t) + B2 * (defl(t))^2 + B3 * (defl(t))^3 +
            B4 * (defl(t))^4 ;
        % Cálculo da queda bruta (m):
        HB(t) = hmon(t) - hjus(t) ;
        % perda de carga:
        pc = perdas * h_nmcj ;
        %pc = perdas * HB(t) ;
        % Cálculo da queda líquida (m):
        HL(t) = HB(t) - pc;
        % Cálculo do engolimento máximo por máquina (Qu) (m3/s):

```

```

    if HL(t) < h_nmcj
        expo1 = 0.5 ;
    else
        expo1 = -1.0 ;
    end
    QU(t) = q_efcj * (HL(t)/h_nmcj)^expo1 ;
    % Cálculo do engolimento máximo total da usina:
    QU_tot(t) = Nmqcj * QU(t);
    % Cálculo da disponibilidade de potência (PONTA) da usina:
    if HL(t) < h_nmcj
        expo2 = 1.5 ;
    else
        expo2 = 0.0 ;
    end
    PU(t) = pt_efcj * (HL(t)/h_nmcj)^expo2 ;
    PONTA(t) = Nmqcj * PU(t);
    %Cálculo da energia gerada:
    Rmd(t) = HL(t) * Resp ;
    Eg(t) = Rmd(t) * u(t) ;
    %Cálculo da energia vertida:
    Ev(t) = Rmd(t) * z(t) ;
end
Eg_max(i) = max(Eg) ;
Eg_med(i) = mean(Eg) ;
Eg_min(i) = min(Eg) ;
Ev_max(i) = max(Ev) ;
Ev_med(i) = mean(Ev) ;
Ev_min(i) = min(Ev) ;
PONTAmax(i) = max(PONTA) ;
PONTAmed(i) = mean(PONTA) ;
PONTAmin(i) = min(PONTA) ;
QU_totmax(i) = max(QU_tot) ;
QU_totmed(i) = mean(QU_tot) ;
QU_totmin(i) = min(QU_tot) ;
SomEnerG1=[SomEnerG1; sum(Eg)] ;
QUM = [QUM; QU_tot];
DPP = [DPP; PONTA];
EnergiaG = [EnergiaG; Eg];
EnergiaV = [EnergiaV; Ev];
end
PONTAmdm = mean(PONTAmed) ;
disppot = [QU_totmax; QU_totmed; QU_totmin; PONTAmax; PONTAmed;
PONTAmin];
gera = [Eg_max; Eg_med; Eg_min; Ev_max; Ev_med; Ev_min];

```

A.6 Testes de Aderência

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% testadr7d.m :
% =====
% > Realisa testes de Aderencia para cada dia do histórico
% aplicando os seguintes métodos:
% - Qui Quadrado
% - Kolmogorov-Smirnov
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Leitura da Matriz de Dados
%-----
clear all
clc
load q.dat % arquivo de vazões afluentes
load Fun.m % Tabela de Distribuição Normal Padronizada
Q2_glob = [];
KS_glob = [];
for dia=1:size(q,1)
    q1 = q(dia,:);
    q2 = log(q1);
    % Cálculo dos Parâmetros das Distribuições
    % Normal:
    mi = mean(q1);
    sig = std(q1);
    var = (std(q1))^2;
    % LogNormal
    miln = mean(q2);
    sigln = std(q2);
    % Gamma
    path = gamfit(q1);
    alfg = path(1);
    beta = path(2);
    % Gumbel
    alfa = pi/sqrt(6*var);
    theta = mi - (0.577/alfa);
    % Definição do Número de Classes e seus Limite
    % para o Teste Qui Quadrado pode assumir os seguintes valores:
    % (1,2,3,...,31,41,51,61,71,81,91,101)
    % para o Teste Kolmogorov-Smirnov pode assumir os seguintes valores:
    % (1,2,3,...,20,25,30)
    % Numero de clases:
    n_c = 3;
    passo = 100/n_c;
    for j=1:n_c
        if j==1
            prob(j) = passo;
        else
            prob(j) = prob(j-1) + passo;
        end
    end
    % Limites:
    L = prctile(q1,[prob(1:n_c-1) 100]);
    % Número de eventos por classe:
    ne = (passo*size(q1,1))/100;

```



```

% Função de densidade Acumulada
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for j=1:1:n_c
    % Normal
    Fa_n(j) = normcdf(L(j),mi,sig);
    % Log-Normal
    Fa_ln(j) = logncdf(L(j),miln,sigln);
    % Gamma
    Fa_gm(j) = gamcdf(L(j),alfg,beta);
    % Gumbel
    Fa_gb(j) = exp(-exp(-alfa*(L(j)-theta)));
    if j == 1
        pgb(j) = Fa_gb(j);
        pgm(j) = Fa_gm(j);
        pln(j) = Fa_ln(j);
        pn(j) = Fa_n(j);
    else
        pgb(j) = Fa_gb(j) - Fa_gb(j-1);
        pgm(j) = Fa_gm(j) - Fa_gm(j-1);
        pln(j) = Fa_ln(j) - Fa_ln(j-1);
        pn(j) = Fa_n(j) - Fa_n(j-1);
    end
    % Número de eventos por classe para cada distribuição teórica:
    ne_gb(j) = pgb(j) * size(q1,1);
    ne_gm(j) = pgm(j) * size(q1,1);
    ne_ln(j) = pln(j) * size(q1,1);
    ne_n(j) = pn(j) * size(q1,1);
end

% Definição do Nível de Significancia aplicado aos testes:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% para o Teste Qui Quadrado pode assumir os seguintes valores:
% (0.995,0.99,0.975,0.95,0.05,0.025,0.01,0.005)
% para o Teste Kolmogorov-Smirnov pode assumir os seguintes valores:
% (0.1,0.05,0.01)
% Nível de Significancia:
nsig = 0.05;
% Teste do Qui Quadrado (erro)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Leitura da Matriz de Valores Críticos para Qui2:
load qui2.dat
% Graus de Liberdade:
grlb = n_c - 1;
if nsig == 0.995
    bx = 1;
elseif nsig == 0.99
    bx = 2;
elseif nsig == 0.975
    bx = 3;
elseif nsig == 0.95
    bx = 4;
elseif nsig == 0.05
    bx = 5;
elseif nsig == 0.025
    bx = 6;
elseif nsig == 0.01
    bx = 7;
elseif nsig == 0.005

```

```

    bx = 8;
end
if grlb <= 30
    cx = grlb;
else
    cx = 31 - (grlb - 40)/10;
end
% Valor Crítico de Qui2:
qui2_vc = qui2(cx,bx);
for k=1:n_c
    Qgb(k) = (ne_gb(k) - ne)^2 / ne;
    Qgm(k) = (ne_gm(k) - ne)^2 / ne;
    Qln(k) = (ne_ln(k) - ne)^2 / ne;
    Qn(k) = (ne_n(k) - ne)^2 / ne;
end
Q2_gb = sum(Qgb);
Q2_gm = sum(Qgm);
Q2_ln = sum(Qln);
Q2_n = sum(Qn);

Q2 = [Q2_gb Q2_gm Q2_ln Q2_n];
Q2_glob = [Q2_glob; Q2];
rd = [];
for i=1:size(Q2,2)
    if Q2(i) <= qui2_vc
        rd = [rd i];
    end
end
disp('O Teste Qui Quadrado Aceita as distribuições:')
ac = ['Gumbel ' ; 'Gamma ' ; 'LogNormal'; 'Normal '];
ac1 = cellstr(ac);
for i=1:size(rd,2)
    resultado(i) = ac1(rd(i));
end
if size(rd) > 0
    resultado
else
    disp(' ')
    disp('Todas as Distribuições Rejeitadas')
    disp(' ')
end
sprintf('valor critico de qui2 = %f',qui2_vc)
sprintf('Qui Quadrado = %g %g %g %g', Q2 )
clear resultado rd
% Teste Kolmogorov-Smirnov
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Leitura da Matriz de Valores Críticos para D:
load D_cv.dat
if nsig == 0.10
    ax = 1;
elseif nsig == 0.05
    ax = 2;
elseif nsig == 0.01
    ax = 3;
end
% Valor Crítico de D:
D_vc = D_cv(n_c,ax);

```

```

for k=1:n_c
    KSgb(k) = abs(prob(k)/100 - Fa_gb(k));
    KSgm(k) = abs(prob(k)/100 - Fa_gm(k));
    KSln(k) = abs(prob(k)/100 - Fa_ln(k));
    KSn(k) = abs(prob(k)/100 - Fa_n(k));
end
KS_gb = max(KSgb);
KS_gm = max(KSgm);
KS_ln = max(KSln);
KS_n = max(KSn);
KS = [KS_gb KS_gm KS_ln KS_n];
KS_glob = [KS_glob; KS];
rd = [];
for i=1:size(KS,2)
    if KS(i) <= D_vc
        rd = [rd i];
    end
end
disp('O Teste Kolmogorov-Smirnov Aceita as distribuições:')
ac = ['Gumbel ' ; 'Gamma ' ; 'LogNormal'; 'Normal '];
ac1 = cellstr(ac);
for i=1:size(rd,2)
    resultado(i) = ac1(rd(i));
end
if size(rd) > 0
    resultado
else
    disp('')
    disp('Todas as Distribuições Rejeitadas')
    disp('')
end
sprintf('valor critico de D = %f',D_vc)
sprintf('Kolmogorov = %g %g %g %g',KS)
end
i = 1:181;
%===== Fim Programa =====

```


A.7 Gerador de Séries Sintéticas

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa - geradorSS.m
% Gerador de séries sintéticas de vazões médias diárias. (log-Normal) %
% utilizando o modelo AR(1).
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
load q.dat % arquivo do do histórico
[m,n] = size(q) ; % m=181 n=9
Lq=log(q) ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SUBROTINA MI
% Cálculo das médias para cada dia do histórico (mi_ch):
for t=1:m
    x = Lq(t,:) ;
    mi_ch(t) = mean(x) ; % média p/ o dia t
    si_ch(t) = std(x) ; % desvio-padrão p/ o dia t
end
% fim subrotina MI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SUBROTINA FI
% Cálculo dos parâmetros de correlação (fi_ch):
ro_ch(1)=1;
fi_ch(1)=1;
sig(1)=1;
for t=2:m
    x2=(Lq(t,:)-mi_ch(t))/si_ch(t) ;
    x1=(Lq(t-1,:)-mi_ch(t-1))/si_ch(t-1) ;
    for i=1:n
        M(i)=x1(i)*x2(i) ;
        N(i)=x1(i)^2 ;
        L(i)=x2(i)^2;
    end
    f=sum(M) ;
    g=sum(N) ;
    h=sum(L) ;
    ro_ch(t)=f/sqrt(g*h) ;
    fi_ch(t)=ro_ch(t)*std(x1)/std(x2) ;
    sig(t)=sqrt((1-ro_ch(t)^2))*std(x2) ;
end
% fim subrotina fi
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SUBROTINA GERAÇÃO
% Geração de séries sintéticas de vazões médias diárias:
r = 100 ; % Número de séries a serem geradas.
sg_nd = 0; % Número de séries não descartadas.
va_g = [];
for j=1:r
    y(1,j)=0;
    v(1,j)=q(1,1) ;
    q_ch(1,j)=Lq(1,1) ;
    for t=2:m
        a(t,j) = normrnd(0,sig(t));
    end
end

```

```
y(t,j) = fi_ch(t)*y(t-1,j)+a(t,j);
q_ch(t,j) = mi_ch(t)+si_ch(t)*y(t,j);
v(t,j) = exp(q_ch(t,j));
end
aux1 = max(v(:,j));
if aux1 < 5e+003
    va_g = [va_g v(:,j)];
    sg_nd = sg_nd + 1;
end
end
%                                fim subrotina geração                                %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
total_series = sg_nd;
save serie1000dat v -ascii
```

ANEXO B-DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS APLICADAS À HIDROLOGIA

B.1 Introdução

O estudo de frequência de cheias através do ajuste de distribuição de probabilidades para os eventos máximos é um ponto de fundamental importância, no processo de cálculo de volume de espera, para o método das Curvas Volume $\times$ Duração. Portanto, este anexo é destinado à apresentação das distribuições de frequências mais empregadas no problema do amortecimento de cheias, sendo avaliada a distribuição mais indicada para ser aplicada ao método.

Os processos hidrológicos são aleatórios, ou seja, não é possível saber qual a evolução dos valores de vazão em determinada seção fluvial, ao longo do tempo ou espaço [2]. Neste sentido, o planejamento das atividades humanas deparou com a necessidade de tratamento da aleatoriedade. Foram, então, desenvolvidos modelos teóricos para processos com determinadas características. Comparando as características do processo teórico com o processo natural é possível selecionar alguns modelos probabilísticos para o ajuste do processo. No caso de processos hidrológicos, não é

possível deduzir um modelo teórico *a priori*. O estudo é baseado em amostras observadas historicamente. Apresentaremos, aqui, alguns dos modelos probabilísticos mais comuns da prática hidrológica.

Os processos hidrológicos são geralmente contínuos, como é o caso de nossa variável em estudo (vazão). Entendemos por processo contínuo aquele em que a variável que o quantifica assume valores ao longo de qualquer ponto, temporal ou espacial. O tratamento computacional exige que as variáveis aleatórias temporais sejam discretizadas, ou seja, são tratados os valores das variáveis obtidos em instantes ou períodos sucessivos do tempo. Os valores de vazão empregados neste estudo estão sob a forma de séries de valores médios diários relacionados à estação úmida, ou estação das águas, que denomina o período chuvoso do ano hidrológico. Como as amostras dependem do histórico, então a análise dependerá do período disponível de dados. Se existem 10 anos ou 50 anos os resultados poderão ser totalmente diferentes [7]. O ideal é que o período de dados utilizado seja igual ao horizonte do estudo, que em geral é da ordem de 30 a 50 anos. A análise é realizada através de histogramas de frequência que servem para esboçar a distribuição de frequências da amostra, por isso a precisão da análise é limitada pelo tamanho da amostra.

B.2 Parâmetros Numéricos de Variáveis

Os principais parâmetros numéricos de uma variável aleatória são tendência central, variabilidade em torno da média e assimetria:

Tendência central está relacionada com a parte central do histograma, sendo representada por: média aritmética que é o valor médio da variável aleatória e pode ser considerado o centro de massa da distribuição; moda: é o valor representativo do intervalo de classe onde ocorre máxima frequência; mediana: é ponto que divide a massa da distribuição em duas partes iguais.

Variabilidade em torno da média nos dá a noção de dispersão de uma variável aleatória, é representada por: variância que é a diferença entre a média dos quadrados da variável e

o quadrado da média; desvio padrão: é a raiz quadrada da variância. Quanto maior for o desvio padrão ou a variância, maior é a flutuação da variável em torno da média.

Assimetria: quando uma distribuição tem uma cauda dominante à direita a assimetria é dita positiva, apresentando uma forma côncava; assimetria negativa caso contrário. A assimetria positiva é típica das distribuições de variáveis hidrológicas que costumam ser limitadas inferiormente no valor zero, e não tem limite superior conhecido. O parâmetro de quantificação para a assimetria é denominado coeficiente de assimetria.

B.3 Distribuições Teóricas de Probabilidades

O hidrograma amostral de frequência caracteriza a distribuição empírica da variável aleatória obtida de observações do fenômeno. Já a distribuição populacional de probabilidades representa exatamente as probabilidades de ocorrência de suas realizações. De posse da distribuição empírica tenta-se inferir qual é a sua distribuição populacional, contudo o uso de distribuição empírica esbarra no problema de não apresentarem ocorrência de eventos raros. A solução deste problema está no ajuste de funções matemáticas, com algumas propriedades características tais como extrapolação e adequação ao fenômeno estudado, batizadas de distribuições teóricas de probabilidades, que apresentaremos sob a forma de função densidade de probabilidade.

A Distribuição Normal ou Gaussiana

Esta é uma importante distribuição, tanto teórica quanto nas aplicações. O uso da distribuição Normal em hidrologia é bastante generalizado, mais comumente é adotada no ajuste de valores transformados de variáveis. A grande autocorrelação entre os valores de vazões médias diárias pode representar um problema para o ajuste dessa distribuição, por isso há uma tendência de empregá-la em análises de médias anuais. Sua densidade de probabilidade tem a forma

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0,5\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

onde: μ e σ são respectivamente os parâmetros média e desvio padrão da distribuição.

A Distribuição Log-Normal

Esta distribuição leva em consideração efeitos aleatórios multiplicativos, por exemplo, o estágio de um fenômeno em um dado instante se deve, em parte, a uma proporção do estágio do fenômeno no instante anterior. Este pode ser o caso das vazões médias diárias em uma bacia. Este modelo, embora simplificado, apresenta resultados aproximados. Sua função densidade de probabilidade é dada por

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

onde:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$$

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \mu)^2$$

$$z_i = \ln(x_i), \quad i = 1, \dots, n$$

A Distribuição Gamma

A distribuição Gamma, também conhecida como Pearson tipo III, é unilateral e bastante versátil, sendo freqüentemente aplicada para modelar quantidades físicas que só tomam valores positivos como é o caso das vazões médias. Sua função densidade de probabilidade assume a forma

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta \cdot x}$$

sendo seus parâmetros, calculados pelo método de verossimilhança condicional, dados por:

$$\alpha = \mu \beta \quad \beta = \frac{\sigma^2}{\mu}$$

A Distribuição Gumbel

Esta distribuição, também conhecida como Distribuição Assintótica de Extremos Tipo I, tem grande aplicação em hidrologia no ajuste de chuvas e vazões máximas. O ajuste desta distribuição requer as seguintes suposições: os valores de X são independentes; os valores da série X são identicamente distribuídos; X é ilimitada apenas na direção positiva; a parte superior da distribuição, ou seja, a parte dos valores máximos menos frequentes, é do tipo exponencial. Como as vazões médias diárias seguem tais características e nos preocupamos mais com os eventos máximos, esta distribuição é de fundamental importância em nosso trabalho. Com isso, a função cumulativa de probabilidade assume a forma:

$$P(Y \leq y) = e^{-e^{-\alpha(y-\theta)}}$$

sua função densidade de probabilidade assume a forma:

$$f(y) = \alpha e^{-\alpha(y-\theta) - e^{-\alpha(y-\theta)}}$$

onde α e θ são os parâmetros da distribuição. Os dois primeiros momentos da distribuição Gumbel são usados para estimar os parâmetros da seguinte forma

$$E(y) = \theta + \frac{\gamma}{\alpha} \quad V(y) = \frac{\pi^2}{6\alpha^2}$$

onde a constante de Euler γ é aproximadamente 0,577, com isso os valores estimados dos parâmetros são

$$\hat{\theta} = \hat{E}(y) - \frac{0,577}{\alpha} \quad \hat{\alpha} = \frac{\pi}{\sqrt{6\hat{V}(y)}}$$

com a média e variância calculados como segue:

$$\mu = \hat{E}(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \sigma^2 = \hat{V}(y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{E}(y))^2$$

B.4 Ajustes das Distribuições

Dispomos de um histórico com 9 anos de vazões afluentes médias diárias para observarmos a melhor distribuição teórica a ser ajustada, ou seja, existem apenas 9 séries para realizarmos os testes de aderência, o que pode nos levar a resultados não muito realísticos. Contudo, sabemos que as distribuições descritas acima têm sido aplicadas a este fenômeno apresentando resultados, ao menos, satisfatórios [2]. Isto nos leva a crer que, apesar do número reduzido de dados disponíveis, a curva teórica de probabilidade que mais se aproximar do histograma amostral será aceita como a melhor distribuição a ser ajustada. As figuras B1 e B2 representam os ajustes para cada distribuição teórica ao conjunto de dados.

Figura b.1 - Função Densidade de Probabilidade

Figura B.2 - Função Distribuição Acumulada

ANEXO C - TESTES DE ADERÊNCIA

C.1 Introdução

Muitos dos métodos de inferência são baseados na suposição que as observações originam-se de populações normalmente distribuídas. Contudo, a suposição de normalidade pode ser duvidosa em muitas situações. Por isso, técnicas alternativas têm sido desenvolvidas, baseadas em suposições menos rigorosas, conhecidas como testes Não Paramétricos. Tais testes dependem apenas da ordem de relação sobre as observações, ou seja, muito menos tem que ser assumido sobre a forma das populações subjacentes. A vantagem principal dos testes Não Paramétricos é que inferências exatas podem ser feitas quando suposições básicas não podem ser obtidas [10,13].

Os testes de aderência são realizados com o objetivo de validar ou não a aproximação de uma distribuição teórica à distribuição amostral ou observada. As figuras C.1a e C.1b representam as funções distribuição de probabilidade e densidade acumulada teórica e amostral para um conjunto de dados. Nesta seção aplicaremos alguns testes não paramétricos: Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov, que são descritos abaixo.

Figura C.1-(a)Função distribuição de probabilidade;(b)Função densidade acumulada teórica e amostral

C.2 O Teste Qui Quadrado χ^2 de Aderência

Este teste é usado para verificar o ajuste de uma dada distribuição teórica de probabilidade a um conjunto de dados [13]. Para isso, classificamos os dados em k classes ou categorias mutuamente exclusivas, e verificamos se as frequências observadas em cada categoria são diferentes das frequências esperadas:

Sejam $p_1, p_2, \dots, p_k$ as probabilidades em cada categoria onde $\sum_{i=1}^k p_i = 1$.

Considere o teste de hipóteses
$$\begin{cases} H_0 : p_i = p_{i0}, i = 1, 2, \dots, k \\ H_1 : p_i \neq p_{i0} \end{cases}$$

Assumimos n experimentos, onde o valor esperado que ocorre na i -ésima classe é dado por $E_i = np_i$ e a frequência observada na i -ésima classe é dada por $O_i, i = 1, 2, \dots, k$.

Se $O_1, O_2, \dots, O_k$ e $np_1, np_2, \dots, np_k$ são as frequências observadas e esperadas para k resultados em um experimento, temos:

$$\chi_o^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - np_i)^2}{np_i}$$

Rejeita-se $H_0 : p_i = p_{i0}, i = 1, 2, \dots, k$ num nível de significância α se $\chi_o^2 \geq \chi_{k-1}^2(\alpha)$, onde $\alpha = P\{\chi_o^2 \geq \chi_{k-1}^2(\alpha)\}$. Encontramos o valor de $\chi_{(k-1)}^2(\alpha)$ a partir da tabela C.1 da distribuição Qui-Quadrado. O nível de significância pode ser entendido

como a probabilidade máxima para rejeitar H_0 . Usamos o nível de significância $\alpha = 0.05$, com $k-1$ graus de liberdade associado ao número de classes. Quanto menor o grau de liberdade maior o erro [31].

A aplicação do teste Qui-Quadrado requer duas ou mais classes, e apresenta resultados satisfatórios quando as frequências esperadas, em todas as k classes, forem no mínimo superiores a 5, pois para frequências menores a curva contínua não dá bom ajustamento à variável discreta de χ^2 .

Os testes de aderência foram realizados para cada dia do histórico de vazões. O número de elementos de cada amostra representou um problema para a aplicação do teste, pois continham apenas 9 valores de vazões médias diárias em cada uma das amostras. As figuras C.2 e C.3 apresentam as distribuições teóricas e densidades cumulativas amostral e teóricas, aplicadas a um dos conjuntos testados (amostra relativa ao primeiro dia da estação chuvosa). Os demais conjuntos seguem o mesmo padrão.

Figura C.2-(a)Função distribuição de probabilidade;(b)Função densidade acumulada teórica e amostral

Subdividimos cada amostra em três classes, para um nível de significância igual a 0.05. O valor crítico, igual a 5.991 para o teste Qui-Quadrado, definido em função do número de graus de liberdade e nível de significância a partir da tabela C.1, limita a hipótese nula. O resultado dos teste, figura C.3, mostra que o valor crítico não foi ultrapassado, portanto o teste não rejeita nenhuma distribuição. Não é demais lembrar

que as amostras continham um número reduzido de elementos, o que dificulta o bom desempenho dos testes.

Figura C.3 - Resultado do teste Qui-Quadrado para cada dia

Apesar do resultado, os testes de aderência nos mostra que, dentre as quatro distribuições aplicadas à amostra, as curvas de densidade das distribuições Log-Normal Gamma e Gumbel apresentaram melhores níveis de aderência.

C.3 O Teste Kolmogorov-Smirnov

Este é um teste não-paramétrico para diferenças entre distribuições acumuladas. Realizado para uma amostra, refere-se ao ajuste entre a distribuição cumulativa observada da amostra e uma função distribuição contínua especificada. Quando realizado para duas amostras, refere-se ao ajuste entre duas distribuições cumulativas observadas. O teste é sensível a diferenças amostrais com respeito a posição, dispersão em relação à média e assimetria das amostras.

O teste Kolmogorov-Smirnov é, em geral, mais eficiente que o teste Qui-quadrado, com relação a amostras pequenas, e pode ser usado em amostras muito pequenas onde o teste Qui-Quadrado não é aplicado. Contudo, o teste Qui-Quadrado pode ser usado em distribuições discretas, enquanto o Kolmogorov-Smirnov não pode.

O teste é baseado na diferença absoluta máxima D entre os valores de distribuição cumulativa de uma amostra aleatória de tamanho n e uma distribuição teórica especificada. Para determinar se esta diferença é maior do que se pode esperar para um dado nível de significância, comparamos com o valor crítico, que é função do número de classes e do nível de significância, obtido a partir da tabela C.2. O valor crítico, definido para os testes de aderência em cada amostra, é igual a 0.708. Os resultados do teste Kolmogorov-Smirnov podem ser observados no gráfico da figura C.4. Este teste é bem mais rigoroso do que o teste Qui-Quadrado, para amostras pequenas, no entanto, também não rejeitou nenhuma distribuição testada.

Figura C.4 - Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov para cada dia

As distribuições Log-Normal, Gamma e Gumbel apresentaram melhores níveis de aderência, nos testes realizados. Aplicaremos em nossos modelos de cálculo de volume de espera a distribuição Gumbel por ter comprovado o bom desempenho nos testes, e também por ser a mais indicada para valores extremos, que é ponto crítico no estudo de controle de cheias.

Tabela C. 1- Distribuição Qui-Quadrado - Valores Críticos

$K-1$	$\alpha = 0.995$	$\alpha = 0.99$	$\alpha = 0.975$	$\alpha = 0.95$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.025$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.005$
1	0.0000393	0.000157	0.000982	0.00393	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.0100	0.0201	0.0506	0.103	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.0717	0.115	0.216	0.352	7.815	9.348	11.345	12.838
4	0.207	0.297	0.484	0.711	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	11.070	12.832	15.086	16.750
6	0.676	0.872	1.237	1.635	12.592	14.449	16.812	18.548
7	0.989	1.239	1.690	2.167	14.067	16.013	18.475	20.278
8	1.344	1.646	2.180	2.733	15.507	17.535	20.090	21.955
9	1.735	2.088	2.700	3.325	16.919	19.023	21.666	23.589
10	2.156	2.558	3.247	3.940	18.307	20.483	23.209	25.188
11	2.603	3.053	3.816	4.575	19.675	21.920	24.725	26.757
12	3.074	3.571	4.404	5.226	21.026	23.337	26.217	28.300
13	3.565	4.107	5.009	5.892	22.362	24.736	27.688	29.819
14	4.075	4.660	5.629	6.571	23.685	26.119	29.141	31.319
15	4.601	5.229	6.262	7.261	24.996	27.488	30.578	32.801
16	5.142	5.812	6.908	7.962	26.296	28.845	32.000	34.267
17	5.697	6.408	7.564	8.672	27.587	30.191	33.409	35.718
18	6.265	7.015	8.231	9.390	28.869	31.526	34.805	37.156
19	6.844	7.633	8.907	10.117	30.144	32.852	36.191	38.582
20	7.434	8.260	9.591	10.851	31.410	34.170	37.566	39.997
21	8.034	8.897	10.283	11.591	32.671	35.479	38.932	41.401
22	8.643	9.542	10.982	12.338	33.924	36.781	40.289	42.796
23	9.260	10.196	11.689	13.091	35.172	38.076	41.638	44.181
24	9.886	10.856	12.401	13.844	36.415	39.364	42.980	45.558
25	10.520	11.524	13.120	14.611	37.652	40.646	44.314	46.928
26	11.160	12.198	13.844	15.379	38.885	41.923	45.642	48.290
27	11.808	12.879	14.573	16.151	40.113	43.194	46.963	49.645
28	12.461	13.565	15.308	16.928	41.337	44.461	48.278	50.993
29	13.121	14.256	16.047	17.708	42.557	45.772	49.588	52.336
30	13.787	14.953	16.791	18.493	43.773	46.979	50.892	53.672
40	20.706	22.164	24.433	26.509	55.758	59.342	63.691	66.766
50	27.991	29.707	32.357	34.764	67.505	71.420	76.154	79.490
60	35.535	37.485	40.482	43.118	79.082	83.298	88.379	91.952
70	43.275	45.442	48.758	51.739	90.531	95.023	100.425	104.215
80	51.172	53.540	57.153	60.391	101.879	106.629	112.329	116.321
90	59.196	61.754	65.646	69.126	113.145	118.136	124.116	128.299
100	67.328	70.065	74.222	77.929	124.342	129.561	135.807	140.169

Tabela C.2 - Valores Críticos de D para o Teste Kolmogorov-Smirnov

n	$D_{.10}$	$D_{.05}$	$D_{.01}$
1	0.950	0.975	0.995
2	0.776	0.842	0.929
3	0.642	0.708	0.828
4	0.564	0.624	0.733
5	0.510	0.565	0.669
6	0.470	0.521	0.618
7	0.438	0.486	0.577
8	0.411	0.457	0.543
9	0.388	0.432	0.541
10	0.368	0.410	0.490
11	0.352	0.391	0.468
12	0.338	0.375	0.450
13	0.325	0.361	0.433
14	0.314	0.349	0.418
15	0.304	0.338	0.404
16	0.295	0.328	0.392
17	0.286	0.318	0.381
18	0.278	0.309	0.371
19	0.272	0.301	0.363
20	0.264	0.294	0.356
25	0.240	0.270	0.320
30	0.220	0.240	0.290

ANEXO D - GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS

D.1 Introdução

Séries sintéticas podem ser definidas como um conjunto de observações de uma variável aleatória, geradas aleatoriamente. O hidrograma diário, a sequência anual de vazões mínimas e máximas são exemplos de séries temporais hidrológicas.

O estudo das séries temporais tem por objetivo a geração de dados com as mesmas propriedades observadas no histórico. Para conhecer as propriedades de uma série histórica, quebram-se as séries em componentes individuais e analisa-se separadamente, para entender o comportamento dos diferentes componentes. Uma vez definidas as propriedades, pode-se gerar um conjunto de séries temporais futuras, com as mesmas propriedades e combinando os componentes.

Na previsão de eventos futuros, devemos confiar na informação relacionada aos eventos que ocorreram no passado. A análise dos dados ajuda na identificação do modelo a ser empregado para a previsão. A suposição básica é que o modelo, ou padrão identificado, ocorra no futuro. Se o padrão dos dados não persistir, a técnica usada produzirá previsões incorretas.

A produção de energia por um sistema hidroelétrico, ou por cada unidade do sistema, depende da série cronológica de vazões afluentes. Adota-se a hipótese de que o registro das vazões observadas seja uma representação do que pode acontecer no futuro. Os estudos com séries históricas apresentam limitações na medida em que é impossível saber, por exemplo, a probabilidade de ocorrer situações mais severas que as registradas no histórico. Portanto, imagina-se que a série histórica é apenas uma realização de um processo estocástico.

A escolha de um modelo estocástico mais adequado à geração de séries sintéticas depende do intervalo de discretização das afluições, que pode ser anual, mensal ou diário. No estudo do controle de cheias, é utilizado o intervalo de discretização diário. O processo estocástico de vazões diárias é não estacionário, e os registros de vazões diárias indicam características peculiares, tais como irreversibilidade temporal, que tornam complexa a modelagem de vazões diárias. Um modelo considerado adequado para a representação de vazões, no Sistema Brasileiro, é o modelo auto regressivo de ordem 1 (AR-1).

D.2 Séries Sintéticas aplicando o Modelo auto-regressivo AR

Analisar uma série temporal $\{Z_t, t \in N_+\}$ consiste em ajustar um modelo que explique o valor Z_t , utilizando um conjunto de observações $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$. Tais observações não devem ser encaradas como amostras aleatórias independentes da série Z_t , pois a covariância $cov(Z_i, Z_j) \neq 0$ para $i \neq j$. Então os modelos em geral expressam o valor da série Z_t em função de valores passados $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots$, e quando a relação é uma função linear os modelos recebem o nome de auto-regressivo (AR):

$$y_i(t) = f_i(\bar{x}) + z_i(t)$$

onde $f_i = \mu_i$ e $z_i(t)$ tem uma estrutura auto regressiva de primeira ordem (AR(1)):

$$z_i(t) = \phi_i z_i(t-1) + a_i(t)$$

Quando existe uma dependência tal entre eventos sequenciais num processo aleatório em que o próximo passo depende do estado presente e não de outros estados passados, o processo é chamado Markoviano, sendo o modelo AR(1) considerado como

tal. Então $P(X_{t+1} = j \mid X_t = i)$ representa a probabilidade condicional de transferência do estado i no período t para o estado j no período $t + 1$.

Seja $y_t, t = 1, 2, \dots, n$ vazões diárias no dia $t = 1, 2, \dots, n$, onde n é igual ao número de dias da estação chuvosa. Admitimos aqui a hipótese de que y_t tenha distribuição Log-Normal, com média μ_t e variância σ_t^2 . Portanto, a função densidade de probabilidade condicional de y_t , dado y_{t-1} , é apresentada como segue:

$$f(y_t \mid y_{t-1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{t|t-1} y_t} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(\log y_t - \mu_{t|t-1})^2}{\sigma_{t|t-1}^2} \right\} \quad (D.1)$$

sendo a média $\mu_{t|t-1}$ e a variância $\sigma_{t|t-1}^2$ condicionais dadas, respectivamente, por:

$$\mu_{t|t-1} = E(\log y_t \mid \log y_{t-1}) \quad \sigma_{t|t-1}^2 = \text{var}(y_t \mid y_{t-1}) \quad (D.2)$$

$$\mu_{t|t-1} = \mu_t + \rho \frac{\sigma_t}{\sigma_{t-1}} (\log y_{t-1} - \mu_{t-1})$$

$$\text{onde } \mu_t = E(\log y_t) \quad \mu_{t-1} = E(\log y_{t-1})$$

$$\sigma_t^2 = \text{Var}(\log y_t) \quad \sigma_{t-1}^2 = \text{Var}(\log y_{t-1})$$

$$\rho = \text{cov}(\log y_t, \log y_{t-1})$$

A partir do valor esperado de $\log y_t$ dado y_{t-1} , $E(\log y_t \mid \log y_{t-1})$, obtemos o y_t como segue:

$$\log y_t = \mu_t + \rho \frac{\sigma_t}{\sigma_{t-1}} (\log y_{t-1} - \mu_{t-1}) + a_t \quad (D.3)$$

$$y_t = \exp \left\{ \mu_t + \rho \frac{\sigma_t}{\sigma_{t-1}} (\log y_{t-1} - \mu_{t-1}) + a_t \right\}$$

onde a_t é um ruído independente identicamente distribuído, com a média 0 e a variância $\sigma_a^2 = (1 - \rho^2) \sigma_t^2$, segundo uma distribuição Normal $a_t \sim N(0, \sigma_a^2)$. Com a equação (D.3) podemos gerar y_t , a partir do ruído $a_t \sim N(0, \sigma_a^2)$, Figura D.1, que é gerado aleatoriamente:

Figura D.1 - ruído independente identicamente distribuído $a_t \sim N(0, \sigma_a^2)$,

As estimativas dos parâmetros μ_t , μ_{t-1} , σ_t^2 , σ_{t-1}^2 são efetuadas pelo método dos momentos.

Seja $f(x; \theta_1, \dots, \theta_k)$ função densidade com k parâmetros, e $\mu_1', \mu_2', \dots, \mu_k'$ os primeiros k momentos:

$$\mu_t' = \int_{-\infty}^{\infty} x^t f(x; \theta_1, \dots, \theta_k) dx \quad t = 1, 2, \dots, k \quad (D.5)$$

Seja $x_1, \dots, x_n$ uma amostra aleatória de tamanho n com densidade $f(x; \theta_1, \dots, \theta_k)$. A partir dessa amostra têm-se os primeiros k momentos dados por: $m_t' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^t$. Seja

$\theta_1, \dots, \theta_k$ a solução para θ_i das k equações, então $m_t' = \mu_t'$ para $t = 1, 2, \dots, k$. Essas soluções são os estimadores obtidos pelo método dos momentos. Para a variável aleatória x com média μ e variância σ^2 , temos $\mu_1' = \mu$ e $\mu_2' = \sigma^2 + \mu^2$. Sendo $x_1, \dots, x_n$ uma amostra aleatória de tamanho n com essa distribuição, os momentos são dados por:

$$\mu_1' = \frac{1}{n} \sum x_i \quad \mu_2' = \frac{1}{n} \sum x_i^2 \quad (D.6)$$

Equacionando os momentos da população e das amostras, temos:

$$\hat{\mu} = \bar{x} \quad \hat{\sigma}^2 + \hat{\mu}^2 = \frac{1}{n} \sum x_i^2 \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \left(\sum x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \quad (D.7)$$

Como a distribuição empregada no gerador de séries sintéticas é a Log-Normal, aplicando o logaritmo em (D.6) e (D.7), os estimadores dos parâmetros são definidos como segue:

$$\mu_t = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \log y_{t,j} \quad \sigma_t^2 = \frac{1}{(m-1)} \sum_{j=1}^m \left(\log y_{t,j} - \mu_t \right)^2, t = 1, 2, \dots, 181 \quad (D.8)$$

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^m (\log y_{t,j} - \mu_t)(\log y_{t-1,j} - \mu_{t-1})}{\sqrt{\sigma_t^2 \sigma_{t-1}^2}}$$

$$\phi = \rho \frac{\sigma_{t-1}}{\sigma_t}$$

onde $y_{t,j}$ é a vazão do dia t no ano j , sendo m o número de anos do histórico.

Figura D.2 - estimadores de ϕ

Estimados os valores dos parâmetros, efetua-se a geração das séries sintéticas de afluições médias diárias baseada nestes valores, utilizando um algoritmo auto regressivo de ordem 1.

Figura D.3 - Séries Sintéticas geradas por AR(1)

ANEXO E - INFERÊNCIA BAYESIANA E PROCESSOS DE MARKOV

E.1 Inferência Bayesiana

O valor do teorema de Bayes como base para inferência estatística tem oscilado entre aceitação e rejeição desde que foi publicado em 1763. Durante períodos nos quais pensou-se que argumentos alternativos proviam uma base satisfatória para uma inferência estatística, os resultados bayesianos alcançados foram vistos como uma interessante mas incorreta tentativa de solucionar importantes problemas. Quando descobriu-se que dificuldades iniciais não esperadas acompanhavam os modelos alternativos, o interesse foi renovado e o modo de raciocínio bayesiano se desenvolveu acentuadamente [43].

Seja uma variável aleatória y que apresenta uma distribuição de probabilidade com os parâmetros θ e σ^2 . Conhecido o valor desses parâmetros é possível calcular a densidade de probabilidade $p(y | \theta, \sigma^2)$ associado com qualquer conjunto hipotético de dados antes de conhecermos os dados. No entanto, quando conhecemos os dados mas não os parâmetros, podemos usar $p(y | \theta, \sigma^2)$ indiretamente para fazer inferências sobre

os valores de θ e σ^2 . isto pode ser feito, por exemplo, empregando-se a teoria da amostragem ou o teorema de Bayes.

Na inferência bayesiana tem-se uma distribuição a *priori* $p(\theta, \sigma^2)$ como parte do modelo, que expressa o estado de conhecimento ou ignorância sobre os parâmetros θ e σ^2 antes dos dados serem obtidos. Com a distribuição a *priori*, a probabilidade $p(y | \theta, \sigma^2)$ e os dados y , é possível calcular a distribuição de probabilidade $p(\theta, \sigma^2 | y)$ de θ e σ^2 , a partir de y . Esta é chamada distribuição a *posteriori* de θ e σ^2 .

Sendo y uma variável aleatória com n observações e apresentando distribuição de probabilidade $p(y | \theta)$ dependente dos valores de k parâmetros $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$, supondo que os θ parâmetros tenham uma distribuição de probabilidade $p(\theta)$:

$$p(y | \theta) p(\theta) = p(y, \theta) = p(\theta | y) p(y)$$

$$p(\theta | y) = \frac{p(\theta) p(y | \theta)}{p(y)}$$

onde,

$p(y, \theta)$ - denota a função densidade de probabilidade conjunta para a variável aleatória y e os parâmetros θ ;

$p(\theta | y)$ - é a função densidade de probabilidade a *posteriori* para os parâmetros θ , dado uma amostra y ;

$p(\theta)$ - é uma função densidade a *priori* para os parâmetros θ ;

$p(y | \theta)$ - considerada uma função não de y mas de θ , é chamada de função de verossimilhança de θ dado y , sendo escrita $l(\theta | y)$.

Como $p(y)$ não dependendo de θ , podemos escrever a formula de Bayes como segue:

$$\begin{aligned} p(\theta | y) &\propto p(\theta) p(y | \theta) \\ &\propto p(\theta) l(\theta | y) \end{aligned}$$

$$\text{distribuição a } \textit{posteriori} \propto (\text{distribuição a } \textit{priori} \times \text{Função de verossimilhança})$$

O teorema de Bayes nos diz que a distribuição de probabilidade a *posteriori* para θ , dado y , é proporcional à distribuição a *priori* de θ e à verossimilhança de θ , dado y . A função de verossimilhança representa uma importante regra na formula de Bayes, pois é a função através da qual os dados modificam o conhecimento a *priori* de θ .

E.2 Processos de Markov

Quando existe uma dependência entre eventos sequenciais num processo aleatório e a dependência é tal que o próximo passo depende do estado presente e não de outros estados passados, o processo é chamado Markoviano [7]. O processo de Markov define uma dependência passo a passo chamada de processo de primeira ordem. A relação de probabilidade para um processo de Markov é provido por probabilidades condicionais do processo de mudança de algum estado no período t para um estado subsequente no período $t + 1$. Então $P(X_{t+1} = j \mid X_t = i)$ representa a probabilidade de transição do estado i no período t para o estado j no período $t + 1$.

O método de Monte Carlo em Cadeias de Markov (MCMC) é usado para realizar aproximação e avaliação numérica de densidades a posteriori $\pi(\theta \mid y)$ quando estas não podem ser diretamente simuladas. Os algoritmos geraram aleatoriamente $\theta_1, \dots, \theta_k$ a partir de $\pi(\theta \mid y)$ ou, mais especificamente, usam um gerador pseudo-aleatório determinístico que simula a geração a partir de π . Existem alguns algoritmos que apresentam estas características, dentre eles foi escolhido o amostrador de Gibbs para gerar as amostras de densidade a posteriori condicionais [44]. Este algoritmo pode ser descrito da forma seguinte.

Considere as densidades condicionais para os coeficientes de dispersão α , que segue uma distribuição normal, e para os coeficientes de difusão σ_i^2 , $i = 1, 2, \dots, N$, que segue uma distribuição Gamma inversa:

$$\pi_1(\alpha_i \mid \alpha_{-i}, \Sigma, D) \sim \text{Normal}(\bar{q}_i, \sigma_i^2 / M)$$

$$\pi_2(\sigma_i^{-2} \mid \alpha, \sigma_{-i}^2, D) \sim \text{Gamma}\left(\frac{M}{2}, \frac{[(M-1)S_i^2 + M(\alpha_i - \bar{q}_i)^2]}{2}\right)$$

onde: D - conjunto de dados contendo M trajetórias de vazões afluentes,

S - matriz diagonal da soma dos quadrados de α com elementos dados por

$$S_{ii} = \sum_{j=1}^M (q_{j,i} - \alpha_i)^2 \quad i = 1, \dots, N$$

$\bar{q}_i$ - média para cada dia i ;

α_{-i} e σ_{-i}^2 são vetores contendo os componentes de α e $\sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_N^2)$ exceto as componentes α_i e σ_i^2 ,

$$\alpha_{-i} = (\alpha_1, \dots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_N) \quad \sigma_{-i}^2 = (\sigma_1^2, \dots, \sigma_{i-1}^2, \sigma_{i+1}^2, \dots, \sigma_N^2)$$

O algoritmo do amostrador de Gibbs consiste em:

Passo1 - Iniciar o contador de iterações $k = 1$ e arbitrar valores iniciais $\alpha_i^{(1)}, (\sigma_i^2)^{(1)}$,
 $i = 1, \dots, N$.

Passo2 - Gerar novos valores das densidades condicionais

$$\alpha_i^{(k)} \sim \text{Normal}(\alpha_i | \alpha_{-i}, \Sigma, D)$$

$$(\sigma_i^2)^{(k)} \sim \text{Gamma}(\sigma_i^2 | \alpha, \sigma_{-i}^2, D)$$

Passo3 - Incrementar o numero de iterações $k = k + 1$ e retornar ao Passo 2 até completar K iterações.

Após completar K iterações, desprezam-se os valores iniciais em cada cadeia gerada para eliminar a interferência das condições iniciais arbitrárias. Verifica-se então, a convergências dos valores gerados, onde todas as cadeias geradas devem apresentar o mesmo comportamento. Para verificar a convergência adotou-se o critério de Gelman e Rubin [47], baseado na análise de variância, onde a variância entre cadeias V_{EC} deve ser pequena em relação à variância dentro de cada cadeia V_{DC} :

$$V_{EC} = \frac{n}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{\theta}_i - \bar{\theta})^2$$

$$V_{DC} = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\theta_i^{(j)} - \bar{\theta}_i)^2$$

$$\sqrt{\hat{V}} = \sqrt{\hat{\sigma}^2 + V_{EC}/m}$$

$$\sqrt{\hat{R}} = \sqrt{(\hat{V}/V_{DC}) df / (df - 2)}$$

onde: $\bar{\theta}_i$ - médias das observações na cadeia i ;

$\bar{\theta}$ - médias das médias;

m - número de cadeias geradas;

n - número de observações em cada cadeia;

df - graus de liberdade, dado por: $df = 2\hat{V} / \text{Var}(\hat{V})$;

$\hat{\sigma}^2$ - pode ser estimado como: $\hat{\sigma}^2 = \frac{n-1}{n} V_{DC} + \frac{1}{n} V_{EC}$.

A convergência se dá quando R está próximo de 1, $R \leq 1.1$, para todas as estimativas, e com isto as amostras são consideradas independentes e identicamente distribuídas.

ANEXO F - GRÁFICOS DEMONSTRATIVOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO

Introdução

Os gráficos de turbinagem, vertimento, defluência, volume vazio e fator de uso, volume e falhas podem ser observar nas figuras F.1 a F.5. Os valores máximo , médio e mínimo destas variáveis, para cada série simulada, indicados nas tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, estão apresentados graficamente nas figuras F.6 a F.11. Cada figura está relacionada a um método, sendo que as figuras F.4 e F.5 referem-se ao método das Trajetórias Críticas aplicado ao histórico de vazões afluentes e às séries sintéticas respectivamente.

Os parâmetros que auxiliam na análise do desempenho dos métodos, tais como energia armazenada, energia perdida, engolimento máximo, disponibilidade de potência, energia gerada e energia vertida, podem ser visualizados nas figuras F.12 a F.16. Os valores médios destes parâmetros, indicados nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9, estão demonstrados graficamente nas figuras F.17 a F.21.

Figura F.1 - Resultados da simulação para o Método da Curva Volume x Duração

Figura F.2 - Resultados da simulação para o Método da Curva Volume x Duração por Janelas

Figura F.3 - Resultados da simulação para o Método por Equações Diferenciais Estocásticas

Figura F.4 -Resultados da simulação para o Método das Trajetórias Críticas aplicado o histórico

Figura F.5 - Resultados da simulação para o Método das Trajetórias Críticas aplicando séries sintéticas

Figura F.6 - Turbinagem média

Figura F.7 - Vertimento máximo e médio

Figura F.8 - Defluência média e máxima

Figura F.9 - Volume Vazio médio e máximo

Figura F.10 - Falhas ocorridas: volume excedente e taxa defluente média

Figura F.11 - Fator de Uso

Figura F.12 - Resultados da simulação para MCVD: parâmetros auxiliares

Figura F.13 - Resultados da simulação para MCVDJ: parâmetros auxiliares

Figura F.14 - Resultados da simulação para MEDE: parâmetros auxiliares

Figura F.15 - Resultados da simulação para MTC-h: parâmetros auxiliares

Figura F.16 - Resultados da simulação para MTC-s: parâmetros auxiliares

Figura F.17 - Energia Armazenada média e Energia Perdida média

Figura F.18 - Engolimento Máximo médio e mínimo

Figura F.19 - Disponibilidade de potência média e mínima

Figura F.20 - Energia Gerada média e mínima

Figura F.21 - Energia Vertida máxima e média

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HOLTZ, A.C.T.; Impactos do Aproveitamento dos Recursos Hídricos, *Revista Brasileira de Engenharia*, vol. 2, n. 2, p. 73-95, 1984.
- [2] TUCCI, C.E.M.; *Hidrologia – Ciência e Aplicação*, Editora da Universidade de São Paulo, Edusp, coleção ABRH, vol. 4, São Paulo, 1993.
- [3] JAMES, L.D.; Role of Economics in Planning Flood Plain Land Use, *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, vol. 98, n. 6, p. 981-92, New York, 1972.
- [4] GORDON, N.D.; McMAHON, T.A.; FINLAYSON, B.L.; *Stream Hydrology*, John Wiley & Sons Ltd., Ontario, 1996.
- [5] ELETROBRÁS/SCEN-CECCA; *Determinação de Volumes para Controle de Cheias nos Reservatórios do Rio Grande*, Subcomitê de Estudos Energéticos do GCOI (Grupo Coordenador para Operação Interligada), CECCA (Comissão de Estudos para Controle de Cheias e Armazenamentos), novembro, 1977.
- [6] GARCEZ, L.N.; *Hidrologia*, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1967.

- [7] MUTREJA, K.N.; *Applied Hydrology*, Tata McGraw Hill Publishing Company Limited-New Delhi, 1990.
- [8] ANDERSON, M.G.; BURT, T.P.; *Hydrological Forecasting*, John Willey & Sons Ltd., Chichester, 1985.
- [9] PONCE, V.M.; *Engineering Hydrology Principles and Practices*, Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- [10] GRAY, D.M.; *Handbook on the Principles of Hydrology*, Water Information Center Inc., New York, 1973.
- [11] BEARD, L.R.; "Flood Control Operation of Reservoir", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, v. 89, Proc. Paper 3380, p. 1-23, 1963.
- [12] DAMÁZIO, J.M.; *Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu Uso na Operação de Sistemas com Múltiplos Usos*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1988.
- [13] MILLER, I.; FREUND, J.E.; JOHNSON, R.A.; *Probability and Statistics for Engineers*, Prentice-Hall International Editions, fourth edition, London, 1990.
- [14] LOUCKS, D.P.; DORFMAN, P.J.; An Evaluation of Some Linear Decision Rules in Chance-Constrained Models for Reservoir Planning and Operation, *Water Resources Research*, v. 11, n. 6, p. 777-782, December, 1975.
- [15] SOBEL, M.J.; Reservoir Management Models, *Water Resources Research*, v. 11/6, December, 1975.
- [16] MOOD, A.M.; GRAYBILL, F.A.; BOES, D.C.; *Introduction to the Theory of Statistics*, 3th ed., Mc-Graw Hill Book Company - Singapore, 1974.
- [17] BYRKIT, D.R.; *Statistics Today — A Comprehensive Introduction*, Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Menlo Park, 1987.

- [18] LOPES, A.L.; DANTAS, H.M.G.; DIB, K.R.; *Uma década de Trabalho do Setor Elétrico Brasileiro no Controle de Cheias*, Divisão de Hidrologia Operacional, DEOP/DOS – ELETROBRÁS, Rio de Janeiro - Brasil, 1991.
- [19] COSTA, J.P.; DAMÁZIO, J.M.; PEREIRA, M.V.F.; KELMAN, J.; *Uma Metodologia para Controle de Cheias, VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Grupo I - Produção Hidráulica (GPH), p. 1-21, Balneário Camboriú - SC - Brasil, 1981.
- [20] BARROS, M.C.; ARAÚJO, A.M.; *Um Modelo de Simulação de Amortecimento de Enchentes em Reservatórios, III Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, v. 1, p. 410-422, Brasília, 1979.
- [21] TSUKUMO, O.; ASBAHR, L.; TAKIISHI, M.; *Alocação de Volume para Contenção de Cheias, V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, v. 2, p. 294-302, Blumenau, 1983.
- [22] VIEIRA, A.M.; SALES, P.R.H.; DANTAS, H.M.G.; *Método dos Volumes Excedentes para Determinação de Volumes de Espera para Amortecimento de Cheias, VI Simpósio de Hidrologia e Recursos Hídricos*, v. 1, p. 125-134, São Paulo, 1985.
- [23] NASCIMENTO, C.E.S.; BUBA, H.; *Controle de Cheias na Bacia do Rio Iguaçu - 1ª Parte: Determinação do Volume de Espera para Amortecimento de Cheias nos Reservatórios da Bacia do Rio Iguaçu, Revista Brasileira de Engenharia*, v. 3, n. 3, p. 83-116, 1985.
- [24] VIEIRA, A.M.; SALES, P.R.H.; *Alocação Variável de Volume de Espera, VI Simpósio de Hidrologia e Recursos Hídricos*, v. 1, p. 104-111, São Paulo, 1985.
- [25] MEON, G.; *Overtopping Probability of Dams Under Flood Load, proceedings of the Sixth IAHR Symposium on Stochastic Hydraulics*, p. 99-106, Taipei, 1992.

- [26] ANDRADE, M.G.; MEIRA, S.A.; CARNEIRO, A.A.F.M.; FRAGOSO, M.D.; Cálculo do Risco de Falha no Controle de Cheias: Uma Abordagem por Equação Diferencial Estocástica, *12^o SINAPE – Simpósio Nacional de Probabilidades e Estatística*, julho/agosto, 1996.
- [27] ANDRADE, M.G.; CARNEIRO, A.A.F.M.; FRAGOSO, M.D.; Equações Diferenciais Estocásticas no Cálculo do Risco de Falha, *XX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Gramados-RS, setembro, 1997.
- [28] ANDRADE, M.G.; MEIRA, S.A.; CARNEIRO, A.A.F.M.; FRAGOSO, M.D.; Aspectos Numéricos no Cálculo do Risco de Falha em controle de Cheias, *XVIII CILAMCE – Congresso Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia*, p. 195-202, Brasília, outubro, 1997.
- [29] VAL, B.R.; ANDRADE, M.G.; *On the Numerical Solution of the Dirichlet Problem for Helmholtz Equation*, *American Mathematic Letter*, v. 9, n. 2, pp. 85-89, 1996.
- [30] ARNOLD, L.; *Stochastic differential Equation: Theory and Applications*, USA, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [31] WILKS, S.S.; *Mathematical Statistics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., Tokyo, 1963.
- [32] BIALAS, W.F.; LOUCKS, D.P. ; Nonstructural Floodplain Planning, *Water Resources Research*, v. 14, n. 1, p. 67-74, February, 1978.
- [33] WINDSOR, J.S.; A Programing Model for the Design of Multireservoir Flood Control Systems, *Water Resources Research*, v. 11, n.1, p. 30-36, February, 1975.
- [34] WINDSOR, J.S. ; Model for the Optimal Planning of Structural Flood Control Systems, *Water Resources Research*, v.17, n. 2, p. 289-292, April, 1981.

- [35] LOUCKS, D.P.; STEDINGER, J.R.; HAIT, D.A.; *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, 1981.
- [36] SCEN-GTEH; *Determinação de Volumes de Espera para Controle de Cheias nos reservatórios da Bacia do Rio Paraná*, Grupo Coordenador para Operação Interligada, GCOI, Rio de Janeiro, outubro, 1980.
- [37] MARIEN, J.L.; Controllability Conditioms for Reservoir Flood Control Systems With Applications, *Water Resources Research*, v. 20, n. 11, p. 1477-1488, November, 1984.
- [38] DAMÁZIO, J.M.; MARIEN, J.L.; Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias, *Revista Brasileira de Engenharia*, v. 7, n. 1, p. 5-31, 1989.
- [39] ROCHA, V.F.; DAMÁZIO, J.M.; KELMAN, J.; Modelo de programação da Operação de Controle de Cheias com a Utilização das Condições de Controlabilidade, *X Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, p. 93-102, Gramado, 1993.
- [40] BALL, M.; BIALAS, W.F.; LOUCKS, D.P. ; Structural Flood Control Planning, *Water Resources Research*, v. 14/1, p. 62-66, February, 1978.
- [41] HENDERSON, F.M.; *Open Channel Flow*, MacMillan, New York, 1966.
- [42] FORTUNATO, L.A.M.; ALBUQUERQUE, J.C.R.; PEREIRA, M.V.F.; *Introdução ao planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica*, EDUFF-Editora Universitária, Niterói, 1990.
- [43] BOX, G.E.P.; TIAO, G.C.; *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, addison-Wesley Publishing Company, Inc., California, 1973.
- [44] ROBERT, C.P.; *The Bayesian Choice - A Decision-Theoretic Motivation*, ed. Springer, New York, 1996.

-
- [45] OPUS; *Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas*, DOE - ELETROBRÁS, julho, 1992.
- [46] CARNEIRO, A.A.F.M.; SOARES, S.; "Optimal Operation of Reservoirs for Electric Generation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 3, p. 1101-1107, July (1991).
- [47] GELMIN, A.; RUBIN, D.R.; "Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences", *Statistical Sciences*. vol. 7, pp. 457-511, 1992.
- [48] Matlab; "The language of Technical Computing", The Math Works Inc., version 5.2, 1998.
- [49] Statistic Toolbox User's Guide; "For Use With Matlab 5.2", version 2.1, The Math Works Inc., 1998.
- [50] Carneiro, A.A.F.M.; Paz, M.A.; Andrade, M.G.; Controle de Cheias: Comparação de Diferentes Métodos Computacionais, (CD ROM), *XX CILAMCE - Congresso Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia*, artigo 112, São Paulo, novembro, 1999.
- [51] Paz, M.A.; Carneiro, A.A.F.M.; Andrade, M.G.; Fragoso, M.D.; Controle de Cheias: Novas Abordagens ao Problema, artigo aceito em: *XIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, dezembro, 1999.