

TICIANA MARINHO DE CARVALHO STUDART

**ANÁLISES DE INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DE
VAZÕES REGULARIZADAS EM CLIMAS SEMI-ÁRIDOS**

**Tese apresentada ao Curso de Doutorado
em Recursos Hídricos da Universidade
Federal do Ceará como requisito parcial
para a obtenção de grau de Doutor.**

Orientador: Prof. José Nilson B. Campos, PhD

**FORTALEZA – CE
2000**

Esta Tese foi submetida como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Doutor em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta Tese é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

Ticiania Marinho de Carvalho Studart

Tese aprovada com louvor em 10.05.2000

Prof. José Nilson B. Campos, PhD (orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Fazal Hussein Chaudhry, PhD
EESC/Universidade de São Paulo

Prof. Antônio Eduardo Leão Lanna, PhD
IPH/Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Ernesto da Silva Pitombeira, PhD
Universidade Federal do Ceará

Prof. Vicente de Paulo P. Barbosa Vieira, PhD
Universidade Federal do Ceará

“ Solum certum nihil esse certi”

Plinius, o Velho, Historia Naturalis, livro ii, 7

Ao meu marido Rogério e ao meu filho Rogerinho pelo carinho, constante incentivo e compreensão pelas muitas horas dedicadas a este trabalho.

Aos meus pais Eduardo e Gelma e ao meu irmão Ricardo pelo carinho, estímulo e apoio incondicionais de toda uma vida.

Aos cinco, meus maiores amigos, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Gostaria de expressar a minha mais sincera gratidão ao professor José Nilson Campos por sua orientação segura e competente. Sua sólida formação teórica, aliada à sua imensa experiência prática no campo dos Recursos Hídricos, redirecionou inúmeras vezes minha linha de pensamento, dando mais lógica e substância a esta Tese. Com ele divido os eventuais méritos deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao professor e querido amigo Raimundo Oliveira de Souza, ex-Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela atenção, pelas muitas palavras de estímulo e por se fazer sempre presente, mesmo quando a milhares de quilômetros de distância.

Ao professor Vicente Vieira pelas sugestões valiosas dadas ao longo da elaboração desta pesquisa. Sua influência se encontra refletida ao longo deste texto.

Aos professores Antônio Eduardo Leão Lanna e Fazal Hussein Chaudhry pelas observações pertinentes que certamente engrandeceram o conteúdo deste trabalho.

Ao estimado professor Horst Frischkorn, ex-orientador de Mestrado e eterno orientador honorário, pelo apoio e consideração sempre a mim dispensados.

Ao professor Ernesto da Silva Pitombeira, ex-Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e atual Diretor do Centro de Tecnologia, pelo empenho em tornar o Doutorado em Recursos Hídricos uma realidade irreversível.

Ao professor Joaquim Bento Cavalcante, pelo apoio demonstrado desde as primeiras horas, decisivo para a liberação das minhas atividades docentes; e ao

professor Suetônio Bastos Mota, pelas sugestões durante o período de Qualificação.

Meus agradecimentos também a Umbelina Caldas Neta, Mariza Lopes Freire e Karine Pontes, que têm como denominador comum a competência, pela valiosa ajuda em inúmeras oportunidades.

À Fundação Cearense de Amparo à Pesquisa (FUNCAP) pelo suporte financeiro sem o qual não teria sido possível realizar esta pesquisa.

Aos amigos Mauro Melo, Carlos Luiz Navas e David Martinz pela valiosa ajuda na confecção da versão eletrônica e na apresentação deste trabalho.

Por último, mas nem por isso menos importante, agradeço aos meus estimados colegas do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental pelo apoio e estímulo recebidos, os quais, sem sombra de dúvida, tornaram esta árdua tarefa bem mais aprazível.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
I - INTRODUÇÃO	1
1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2. ESCOPO	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. ESTUDO DAS INCERTEZAS	9
2.1.1 . DEFINIÇÃO DE INCERTEZA	11
2.1.2 . TIPOS DE INCERTEZAS	11
2.2. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	16
III - METODOLOGIA	21
3.1. DADOS UTILIZADOS	23
3.1.1. VAZÕES AFLUENTES AO AÇUDE CAXITORÉ	23
3.1.2. PRECIPITAÇÃO	25
3.1.3. EVAPORAÇÃO	25
3.1.4. EVAPORAÇÃO LÍQUIDA NO LAGO	25
3.1.5. O AÇUDE CAXITORÉ	26

3.2. OPERAÇÃO SIMULADA DO RESERVATÓRIO	28
3.2.1. EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO	29
3.3. GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS	31
3.4. DESAGREGAÇÃO DOS DEFLÚVIOS ANUAIS	32
3.5. O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA VAZÃO REGULARIZADA	34
3.5.1. O VALOR A SER ASSUMIDO PARA A VAZÃO REGULARIZADA	37
3.5.2. OS CENÁRIOS ANALISADOS	38
3.6. A DETERMINAÇÃO DE UM ESTIMADOR PARA A VAZÃO DE EQUILÍBRIO	40
IV – RESULTADOS	42
<hr/>	
4.1. A VAZÃO REGULARIZADA NO ESTADO DE EQUILÍBRIO	43
4.2 . A INFLUÊNCIA DO VOLUME INICIAL	46
4.2.1. A VARIABILIDADE DAS VAZÕES REGULARIZADAS	49
4.2.1. OS ERROS NA ESTIMATIVA DA VAZÃO REGULARIZADA	54
4.3. A INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS INFLUXOS	57
4.3.1. A VARIABILIDADE DAS VAZÕES REGULARIZADAS	59
4.3.2. OS ERROS NA ESTIMATIVA DA VAZÃO REGULARIZADA	69
4.4 . A INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO	70
4.4.1. A VARIABILIDADE DAS VAZÕES REGULARIZADAS	73
4.4.2. OS ERROS NA ESTIMATIVA DA VAZÃO REGULARIZADA	76
4.5. A INFLUÊNCIA DA GARANTIA	77
4.5.1. A VARIABILIDADE DAS VAZÕES REGULARIZADAS	80
4.6. OS ESTIMADORES DA VAZÃO DE EQUILÍBRIO	82
4.6.1. O ESTIMADOR $f_M^*_{VIMC}$	82
4.6.2. O ESTIMADOR $f_M^*_\chi$	91
4.6.3. ANÁLISE DOS DOIS ESTIMADORES	112
V - CONCLUSÕES	125
<hr/>	

ANEXOS	131
GLOSSÁRIO	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estudo das incertezas e quantificação dos riscos como elementos da Análise de Risco e etapas precedentes ao Gerenciamento dos Riscos.	7
Figura 2.2 - Representação esquemática do Método de Monte Carlo para a obtenção de 200 séries de vazões.	22
Figura 3.1 – Vazões médias mensais (em hm^3) do Rio Caxitoré	23
Figura 3.2 – Vazões anuais (em hm^3) do Rio Caxitoré – Ceará - no período compreendido entre 1912 e 1990.	24
Figura 3.3 – O Açude Caxitoré na Bacia do Curu e sua localização no Estado do Ceará	26
Figura 3.4 - Representação esquemática do funcionamento de um reservatório.	34
Figura 3.5 – Exemplo do comportamento da vazão regularizada em função do horizonte de simulação	34
Figura 3.6 – Série de 200 vazões regularizadas ajustada a uma distribuição Normal, adotando-se $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_K=2,5$, $V_0=\text{cheio}$, $G=90\%$ e $H=50$ anos.	38
Figura 4.1 – Valores médios da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (traduzida por f_M), assumindo o coeficiente de variação dos deflúvios afluentes (CV_{def}) igual a 1,2, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$ e volumes iniciais iguais a cheio, metade da capacidade, metade do deflúvio médio anual afluente ao reservatório e vazio	48
Figura 4.2 - Coeficientes de variação das vazões regularizadas (CV_{reg}), considerando $f_E=0,17$, $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_K=1,5$, $G=90\%$ e volume inicial assumido para o reservatório igual a “cheio”, “metade da capacidade”, “metade da vazão afluente média” e “vazio”.	50
Figura 4.3 - Série de 200 valores assumidos por f_M considerando $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_E=0,17$, $f_K=1,5$, $H=10$, $G=90\%$ e considerando o reservatório inicialmente cheio (a) e inicialmente vazio (b)	53
Figura 4.4 - O erro médio cometido na estimativa da vazão regularizada para $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$, considerando $V_0 = K, K/2, \mu/2$ e $5\%K$ e H variando de 10 a 100 anos	56

Figura 4.5 - O efeito do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) na vazão regularizada (f_M), considerando $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV=0,2$, $0,8$ e $1,6$, V_0 =cheio e vazio e H variando de 10 a 100 anos	58
Figura 4.6 – O efeito do coeficiente de variação do influxos na vazão regularizada (f_M) considerando $f_K =1,5$, $G=90\%$ e V_0 =cheio	60
Figura 4.7 - Influência do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) na vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*)	64
Figura 4.8 - A influência do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) na variabilidade das vazões regularizadas, considerando $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, CV_{def} variando entre $0,2$ e $1,6$ e assumindo volume inicial igual a a) cheio e b) vazio	67
Figura 4.9 – Efeito da capacidade do reservatório (traduzido por f_K) na vazão regularizada pelo reservatório (traduzido por f_M) assumindo $G=90\%$, $f_K=1,0$ e $2,0$, $f_E=0,17$, o reservatório inicialmente cheio (marcador preenchido), vazio (marcador vazado) e na sua condição de equilíbrio (linha tracejada) e coeficiente de variação dos influxos igual a a) $CV_{def}=0,2$ e b) $CV_{def}=1,2$.	72
Figura 4.10 - Coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e $1,2$ e $f_K=1,0$, $1,5$ e $2,0$	74
Figura 4.11 – O efeito da Garantia na vazão regularizada (f_M) considerando $f_E=0,17$, $f_K =1,5$, $CV_{def}=1,2$, V_0 =cheio e $G=85\%$, 90% e 95%	79
Figura 4.12 – Coeficientes de variação das vazões regularizadas (CV_{reg}) considerando $f_E=0,17$, $f_K =1,5$, $CV_{def}=1,2$, V_0 =cheio e $G=85\%$, 90% e 95%	81
Figura 4.13 – O Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC) para $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$	84
Figura 4.14 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$, $0,4$, $0,6$, $0,8$, $1,0$, $1,2$, $1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,0$	97
Figura 4.15 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$, $0,4$, $0,6$, $0,8$, $1,0$, $1,2$, $1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,5$	97
Figura 4.16 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$, $0,4$, $0,6$, $0,8$, $1,0$, $1,2$, $1,4$ e $1,6$ e $f_K=2,0$	98
Figura 4.17 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$, $0,4$, $0,6$, $0,8$, $1,0$, $1,2$, $1,4$ e $1,6$ e $f_K=2,5$	98

Figura 4.18 – Ajuste dos valores de χ_{90} e H a uma curva de regressão do tipo potência, considerando $f_E=0,17$, $CV_{def}=1,4$, $V_0=$ cheio, $f_K=1,0$, $G=90\%$	101
Figura 4.19 – Cálculo dos coeficientes C_1 (a) e C_2 (b) da reta de regressão	106
Figura 4.20 – Comportamento da variável χ_{90} calculada a partir da equação geral, em função dos coeficientes de variação dos deflúvios (CV_{def}) e do horizonte de simulação (H)	108
Figura 4.21 – Erros médios modulares cometidos ao estimar-se a vazão adimensional de equilíbrio com os estimadores $f_M^*_{\chi}$ e $f_M^*_{VIMC}$, considerando-se $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2$ e $1,6$, $f_K=1,0$, $f_E=0,17$, $G=90\%$ e $H=10$ a 100 anos	123
Figura 4.22 – Erros médios modulares cometidos ao estimar-se a vazão adimensional de equilíbrio com os estimadores $f_M^*_{\chi}$ e $f_M^*_{VIMC}$, considerando-se $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2$ e $1,6$, $f_K=2,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$ e $H=10$ a 100 anos	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. - Precipitações médias mensais no posto pluviométrico do Açude Caxitoré (Pentecoste)	27
Tabela 3.2 - Evaporação média na estação de Sobral	27
Tabela 3.3 - Evaporação líquida sobre o lago do Açude Caxitoré	27
Tabela 3.4 – Relações cota x volume acumulado x altura da água do Açude Caxitoré	28
Tabela 3.5 – Valores de μ e σ (em hm^3/ano) utilizados para a geração das séries sintéticas de vazões afluentes anuais para coeficiente de variação variando de 0,2 a 1,6.	32
Tabela 4.1 - Vazão regularizada (f_M) considerando $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_E=0,17$, $f_k=1,5$, $G=90\%$, $H=5.000$ anos e $V_0 =$ cheio e vazio (20 simulações para cada condição de volume inicial).	45
Tabela 4.2 - Vazão regularizada (f_M) considerando $CV_{\text{def}}=0,2$, $f_E=0,17$, $f_k=1,5$, $G=90\%$, $H=5.000$ anos e $V_0 =$ cheio e vazio (6 simulações para cada condição de volume inicial).	45
Tabela 4.3 – Valores de f_M em função do horizonte de simulação e do volume inicial assumido para o reservatório, considerando $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_k=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$	47
Tabela 4.4 – Coeficiente de variação das séries de 200 valores de vazão regularizada (CV_{reg}) para H variando de 10 a 100 anos e $V_0 = K$, $K/2$, $\mu/2$ e $5\%K$, considerando $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_k=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$	51
Tabela 4.5 - Coeficientes de variação de precipitações anuais em algumas localidades do Brasil	52
Tabela 4.6 – Erros médios cometidos na estimativa da vazão regularizada para $CV_{\text{def}}=1,2$, $f_k=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$, considerando $V_0 = K$, $K/2$, $\mu/2$ e $5\%K$ e H variando de 10 a 100 anos	55
Tabela 4.7 – Valores médios da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (em hm^3/ano), considerando $f_k=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, volume inicial =cheio e vazio e o coeficiente de variação das vazões naturais (CV_{def}) variando entre 0,2 e 1,6	61
Tabela 4.8 – Valores médios da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (em termos de fator adimensional de retirada f_m), considerando $f_k=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, volume inicial =cheio e vazio e o coeficiente de variação das vazões naturais (CV_{def}) variando entre 0,2 e 1,6	62

Tabela 4.9 - Coeficiente de variação de aflúências anuais em vários rios do mundo	63
Tabela 4.10 - Coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré (CV_{reg}), considerando $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, volume inicial = cheio e vazio e coeficiente de variação das vazões naturais variando entre 0,2 e 1,6	65
Tabela 4.11 - Erros médios na estimativa da vazão regularizada, considerando $f_E=0,17$, $f_K=1,5$, $G=90\%$, volume inicial = cheio e vazio e coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV_{def}) variando entre 0,2 e 1,6	68
Tabela 4.12 – Vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (em termos de fator adimensional de retirada f_m), considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e 1,2 e $f_K=1,0$, 1,5 e 2,0	71
Tabela 4.13 – Coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e 1,2 e $f_K=1,0$, 1,5 e 2,0	75
Tabela 4.14 – Erros médios na estimativa da vazão regularizada, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e 1,2 e $f_K=1,0$, 1,5 e 2,0	76
Tabela 4.15 – Valores de f_M em função do horizonte de simulação e da Garantia considerando $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e V_0 =cheio.	78
Tabela 4.16 – Valores dos coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas (CV_{reg}), considerando $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, V_0 =cheio e G variando entre 85 e 95%.	80
Tabela 4.17 – Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC), em fração da capacidade do reservatório (K), considerando $CV_{def}=0,2$ a 1,6, $f_K=1,0$ a 2,5, $f_E=0,17$, e $G=90\%$.	85
Tabela 4.18 – Erros Médios (ε_m) na estimativa da vazão regularizada, considerando V_0 =cheio, $CV_{def}=0,4$, $f_K=1,0$ a 2,5, $f_E=0,17$, e $G=90\%$.	87
Tabela 4.19 – Erros Médios (ε_m) na estimativa da vazão regularizada, considerando V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=1,0$ a 1,6, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, e $G=90\%$.	88
Tabela 4.20 - Valores das estimativas da vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*), utilizando-se V_0 =VIMC e considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,4$, 0,8, 1,2, e 1,6 e $f_K=1,0$ e 2,5.	90
Tabela 4.21 - Erros Médios (ε_m) na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*) utilizando-se V_0 =VIMC e considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,4$, 0,8, 1,2, e 1,6 e $f_K=1,0$ e 2,5.	91
Tabela 4.22 – Valores da vazão regularizada (f_{M90}), vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*) e χ_{90} , considerando $CV_{def}=1,4$, $f_K=1,0$, $f_E=0,17$, V_0 =cheio e $G=90\%$.	93

Tabela 4.23 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,0$	94
Tabela 4.24 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,5$	95
Tabela 4.25 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=2,0$	95
Tabela 4.26 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=2,5$	96
Tabela 4.27 – Equações das curvas de regressão $\chi_{90} \times H$, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$ a $1,6$ e $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$	101
Tabela 4.28 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=1,0$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	103
Tabela 4.29 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=1,5$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	103
Tabela 4.30 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=2,0$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	104
Tabela 4.31 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=2,5$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	104
Tabela 4.32 – Valores médios das constantes C_1 e C_2 da equação da curva de regressão	105
Tabela 4.33 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=1,0$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	109
Tabela 4.34 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=1,5$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	110
Tabela 4.35 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=2,0$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	110
Tabela 4.36 – Erros médios (ϵ_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=$ cheio, $f_K=2,5$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$	111

Tabela 4.37 – Coeficientes de variação das séries de estimativas de f_M^* (CV_{eqI}) utilizando-se os estimadores $f_M^*_{\chi}$ e $f_M^*_{\text{VIMC}}$, considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{\text{def}}=0,4, 0,8, 1,2, \text{ e } 1,6$ e $f_K=1,0$ e $2,5$. 116

Tabela 4.38 – Valores do erro médio modular (E) cometidos ao estimar-se a vazão adimensional de equilíbrio pelos estimadores $f_M^*_{\chi}$ e $f_M^*_{\text{VIMC}}$, considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{\text{def}}=0,4, 0,8, 1,2, \text{ e } 1,6$ e $f_K=1,0$ e $2,5$. 121

LISTA DE SÍMBOLOS

CV - Coeficiente de variação

CV_{def} - Coeficiente de variação dos deflúvios

CV_{eq} - Coeficiente de variação das estimativas da vazão de equilíbrio

ε_i - Erro Individual

$|\varepsilon_i|$ - Erro Individual Modular

ε_m - Erro Médio

E - Erro Médio Modular

F_a - Probabilidade de falha anual

f_E - Fator adimensional de evaporação

f_K - Fator adimensional de capacidade

f_M - Fator adimensional de retirada

f_M^* - Vazão adimensional de equilíbrio

$f_M^*_{VIMC}$ - Estimador da vazão adimensional de equilíbrio obtido através da simulação do reservatório considerando $V_0=VIMC$.

$f_M^*\chi$ - Estimador da vazão adimensional de equilíbrio obtido através da simulação do reservatório considerando $V_0=cheio$, e posterior divisão do valor da vazão regularizada resultante pelo fator de correção do viés (χ_{90}), correspondente ao horizonte de simulação adotado.

H - Horizonte de simulação

G - Nível de garantia

K - Capacidade do reservatório

M_G - Volume anual regularizado com $G\%$ de garantia anual

Q^* - Vazão de equilíbrio

Q_{90} – Vazão regularizada anual com 90% de garantia

Q_G - Vazão regularizada com $G\%$ de garantia anual

T - Estimador

T_i – Estimativa

VIMC - Volume Inicial de Máxima Convergência

α - Fator de forma do reservatório

σ - Desvio padrão

χ_{90} – Fator de correção do viés

θ - Estimando

μ - Volume afluente médio anual

RESUMO

O comportamento aleatório das vazões naturais, e as incertezas a ele associadas, configuram-se, sem sombra de dúvida, no maior obstáculo para a determinação das reais disponibilidades hídricas de um dado reservatório, notadamente em regiões semi-áridas. Tais incertezas não podem ser reduzidas pela elaboração de um modelo matemático mais preciso ou pelo aumento da série de observações. Elas, simplesmente, existem e precisam ser estudadas através de metodologias apropriadas, agregando informação valiosa ao planejamento de recursos hídricos.

É prática corrente a simulação do comportamento de um reservatório, valendo-se unicamente dos deflúvios observados, tidos como a melhor estimativa das vazões futuras. A desvantagem deste procedimento reside no fato da série histórica ser apenas *uma* das *muitas seqüências possíveis* deste processo, “sorteada” pela Natureza. O Método de Monte Carlo, por outro lado, proporciona meios para a geração de inúmeras seqüências independentes de vazões, diferentes da série histórica, mas igualmente prováveis, permitindo o planejador tomar sua decisão fundamentado, não apenas em um evento isolado, mas na análise probabilística do fenômeno estudado. O Método de Monte Carlo, embora não estenda a série histórica, permite extrair da mesma o máximo de informação possível.

A presente pesquisa analisa, através da simulação estocástica do sistema, o efeito do volume inicial (V_0), do coeficiente de variação das vazões naturais (CV_{def}), do fator adimensional de capacidade (f_K) e do nível de garantia (G) nas avaliações e nos erros das estimativas do fator adimensional de retirada (f_M). Identifica, ainda, o melhor estimador para a vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*), considerando as propriedades de um bom estimador, quais sejam, as de não-tendenciosidade e eficiência.

ABSTRACT

The uncertainties inherent of the random variability of natural discharges are, undoubtedly, the biggest obstacle that the determination of the actual reservoir yield has to face, mostly in semi-arid areas. Such uncertainties cannot be reduced by the elaboration of a more precise mathematical model or by increasing the length of observations. They, simply, exist and must be studied through appropriate methodologies, joining valuable information to the water resources planning.

It is very usual simulate a given reservoir using the historical data as being the best estimate for the future discharges. The inconvenience of this analysis is that the historical series is just *one* from *all possible sequences*, "raffled" by Nature. The use of Monte Carlo Method, otherwise, provides means for the generation of countless independent sequences of discharge, each one different from the historical one, but with the same statistical properties and as equally probable. Once each sequence is different from the other, several results are obtained from simulation, instead of only one, in case of just the historical series was available, allowing the planner to take his decision based not only on an isolated event, but in a probabilistic analysis of the phenomenon. Although Monte Carlo Method do not extend the historical series, it allows to extract the maximum possible information from the data.

This research analyzes, using stochastic simulation, the effects of the reservoir initial storage (V_0), coefficient of variation of natural inflows (CV_{def}), dimensionless capacity factor (f_K) and reliability level (G) on the *evaluations* and *errors* of the release dimensionless factor estimates (f_M). It also determines the best estimator for the steady state dimensionless discharge (f_M^*), regarding to unbiasedness and efficiency properties of a good estimator.

I - INTRODUÇÃO

Considerada por muito tempo um bem inesgotável, a água surge hoje como um recurso estratégico. Anuncia-se a questão da água - ou a falta dela – como a grande crise do século 21. A verdade é que, no grau de complexidade da economia dos dias de hoje, os recursos hídricos desempenham um papel fundamental, posto que, não obstante a água ser essencial à vida, é também utilizada nos processos produtivos. Um suprimento adequado e confiável de água, tanto em termos quantitativos como qualitativos, constitui-se, assim, em condição indispensável para assegurar o crescimento econômico e o desenvolvimento de uma região.

No Brasil, a escassez qualitativa, ligada à poluição dos corpos hídricos, tem sido associada, principalmente, às regiões sul e sudeste do país. No Estado do Ceará, a poluição constitui-se não no foco principal, mas em um problema adicional. Mesmo com este problema resolvido, a necessidade de um gerenciamento permaneceria, uma vez que a escassez é fruto da alta variabilidade temporal (intra e interanual) e espacial das precipitações, altas taxas de evaporação e solos predominantemente cristalinos, condições estas agravadas pelas demandas urbanas e industriais crescentes e uso ineficiente

O crescimento populacional e a urbanização são fatores relevantes na demanda por água no Ceará. Segundo projeções do PROJETO ÁRIDAS (GONDIM FILHO, 1994), a expectativa é de que, no ano 2020, a população do Estado atinja a casa dos 9 milhões de habitantes, dos quais 82% se localizarão nas áreas urbanas incrementando ainda mais as pressões por água, para os usos doméstico, municipal e industrial.

Após anos praticando uma política de gerenciamento de recursos hídricos baseada unicamente na gestão da oferta de água, onde se buscava atender a demanda a qualquer custo, a atual política de águas do Estado do Ceará enfatiza a gestão da demanda da água. Entre 1988 e 1990, foi desenvolvido o Plano Estadual de Recursos Hídricos, no qual uma nova filosofia de manejo da água foi inserida, fortemente influenciada pelos novos paradigmas que permeiam a moderna gestão dos recursos hídricos.

1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O regime hidrológico dos rios cearenses tem como característica marcante a intermitência interanual, com cerca de 90% do escoamento ocorrendo entre os meses de fevereiro e maio. Considerando ainda a predominância de solos cristalinos no Estado, a disponibilidade hídrica está basicamente dependente dos estoques de água acumulados em reservatórios superficiais. Sendo assim, a questão da outorga, um dos instrumentos da nova política de águas do Estado, deverá passar, obrigatoriamente, pelo estudo da real capacidade de regularização de seus reservatórios.

A determinação da quantidade máxima outorgável, no entanto, é uma questão delicada, notadamente em regiões semi-áridas, onde as irregularidades nas precipitações, tanto mensais como anuais, são enormes. Caso sejam seguidos critérios técnicos, menores volumes serão adotados como referência; caso o critério seja político, a tendência será a de se aumentar a quantidade de água passível de outorga, o que, logicamente, acarretará decréscimo nos níveis de garantia.

Este grande desafio dos tomadores de decisões foi aparentemente solucionado com a publicação do Decreto Estadual nº 23.067/94, o qual estipula que o valor máximo outorgável nos rios cearenses deverá ser de 9/10 da vazão regularizada com garantia de 90% - Q_{90} , ou seja, 90% da vazão regularizada com 10% de probabilidade de falha.

A determinação de Q_{90} se dá, usualmente, através da simulação do comportamento do reservatório em estudo, valendo-se unicamente dos dados da série histórica observada, tida como a melhor estimativa das vazões futuras. Este procedimento, no entanto, ao ignorar o grande componente aleatório existente nas vazões naturais dos rios, equivale a tratar um fenômeno probabilístico como determinístico. Assim sendo, o planejador é induzido à uma falsa sensação de certeza, ao adotar um valor que, embora previsto em lei, pode não ser um estimador confiável das reais disponibilidades do sistema hídrico.

1.2. ESCOPO

A incerteza ou aleatoriedade do futuro é a maior dificuldade com que qualquer processo decisório se defronta. Tudo que se conhece é o passado e tudo que

importa no processo decisório é o futuro. Esta afirmação de LANNA (1997) traduz muito bem o grau de complexidade envolvido no processo de outorga do direito da água. Tais incertezas, inerentes ao comportamento aleatório das vazões naturais, não podem ser reduzidas, mas podem, sim, ser estudadas através de metodologias apropriadas, agregando informação valiosa ao planejamento de recursos hídricos.

Entendendo que o estudo das incertezas é etapa fundamental para o gerenciamento dos riscos no processo de outorga, a presente pesquisa busca analisar, fazendo uso de ferramentas da hidrologia estocástica, os efeitos do volume inicial, da variabilidade das vazões naturais, da capacidade de armazenamento e do nível de garantia *nas avaliações e nos erros das estimativas* das vazões regularizadas por um reservatório isolado. É ainda objeto deste trabalho a identificação do melhor estimador para a vazão regularizada no seu estado de equilíbrio, no que diz respeito às propriedades de não tendenciosidade e eficiência. Serão consideradas as seguintes premissas:

- a unidade de tempo é um mês;
- a retirada do reservatório é constante ao longo dos anos e ao longo dos meses;
- a contribuição líquida sobre o lago - precipitação menos evaporação - é admitida constante ao longo dos anos, mas variável ao longo dos meses;
- as séries de vazões afluentes anuais são estacionárias;
- as vazões anuais são independentes.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi organizado em cinco capítulos. O presente capítulo trata da formulação do problema, do escopo do trabalho e discorre sobre a maneira como o documento foi organizado.

O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica da Incerteza, suas definições, fontes e classificações sob as mais variadas metodologias, indo do geral ao particular e procurando sintetizar o estado-da-arte do estudo das incertezas no campo dos recursos hídricos. A segunda parte deste capítulo aborda a Simulação de Monte Carlo, sob a ótica da Análise de Risco e da Hidrologia Estocástica.

O Capítulo III descreve o procedimento a ser seguido para o estudo da variabilidade das vazões regularizadas. Este capítulo faz ainda um levantamento dos dados existentes e consolida-os no sentido de utilizá-los no desenvolvimento do Capítulo IV.

O Capítulo IV estuda o comportamento da vazão regularizada sob diversos cenários e analisa dois estimadores da vazão regularizada no estado de equilíbrio.

E finalmente, o Capítulo V apresenta as conclusões desta pesquisa e faz algumas sugestões de estudos complementares.

No intuito de facilitar o entendimento do trabalho, incluiu-se, no final do mesmo, um Glossário com a conceituação de alguns termos e parâmetros adotados ao longo do texto.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo principal da gestão dos recursos hídricos é satisfazer a demanda, considerando as possibilidades e limitações da oferta de água. Embora configurem exceções, existem situações na engenharia de recursos hídricos as quais podem ser consideradas como não-probabilísticas. Nestes casos, uma vez que as incertezas envolvidas são muito pequenas, a abordagem determinística, relacionando oferta à demanda, é suficiente. Este é o caso, por exemplo, de um reservatório operado por comportas, no qual existe uma relação determinística entre a vazão liberada e o nível de água no reservatório. No caso particular citado, não há qualquer motivação para utilização de técnicas de análise de risco, uma vez que os resultados são perfeitamente previsíveis (GANOULIS, 1994).

Entretanto, quando o sistema hídrico é alimentado por influxos espacial e temporalmente variáveis, as incertezas presentes na avaliação dos futuros níveis da água resultam em volumes liberados os quais não mais podem ser considerados determinísticos. Nestes casos, as incertezas têm um importante papel na gestão dos recursos hídricos e a técnica apropriada para lidar com o problema se constitui na **análise de risco**.

Segundo VIEIRA (1997) a **análise de risco** compreende duas etapas seqüenciadas:

- A **qualificação ou identificação dos riscos** - esta fase diz respeito ao levantamento das incertezas existentes, dos riscos associados, suas causas e formas de ocorrência.
- A **quantificação ou avaliação dos riscos** – esta fase materializa em números as probabilidades ou possibilidades de ocorrência de eventos indesejáveis ou falhas de projetos, bem como quantifica, sempre que necessário e exeqüível, as conseqüências destes eventos.

O **gerenciamento dos riscos**, por sua vez, diz respeito ao comportamento dos tomadores de decisão, através da análise sistêmica, seleção de alternativas, e minimização dos riscos envolvidos.

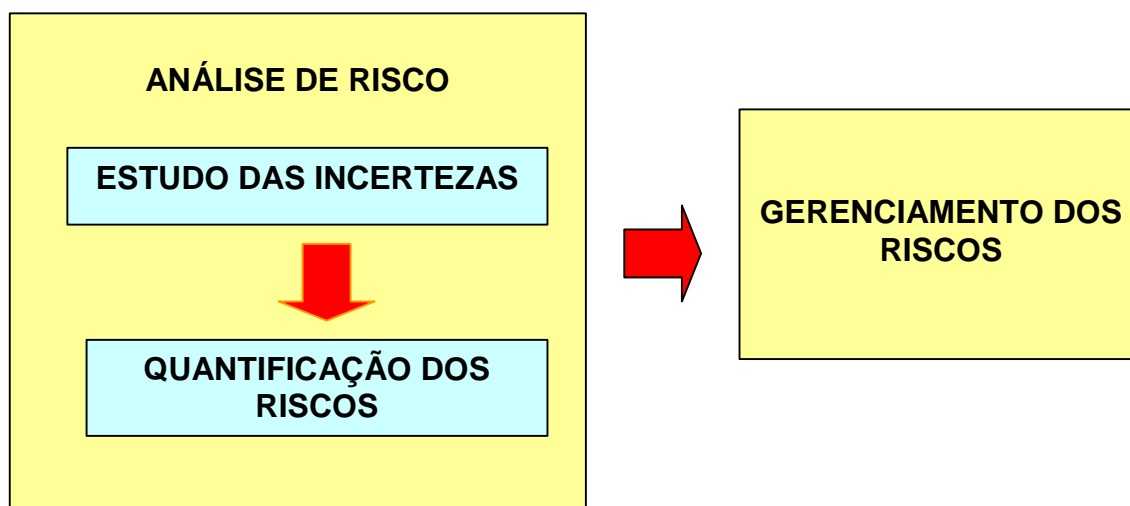


Figura 2.1 – Estudo das incertezas e quantificação dos riscos como elementos da Análise de Risco e etapas precedentes ao Gerenciamento dos Riscos.

Assim sendo, embora o objetivo principal da análise de risco seja o gerenciamento do sistema hídrico, isto não será possível caso as incertezas não tenham sido identificadas e os riscos quantificados *a priori* (Figura 2.1). No que diz respeito à análise das incertezas, são duas as metodologias mais citadas na literatura: a de abordagem probabilística, na qual a Simulação de Monte Carlo se insere, e a fundamentada na teoria dos conjuntos difusos.

Sendo o objetivo maior do presente trabalho o estudo aprofundado das incertezas existentes na avaliação das disponibilidades hídricas de um reservatório, o presente capítulo se apresenta dividido em duas partes distintas. Na primeira, as fontes de incertezas são identificadas e as incertezas, propriamente ditas, classificadas segundo as mais variadas metodologias. Não se tem a pretensão de apresentar um levantamento exaustivo de toda a literatura existente na área, uma vez que o estudo das incertezas, nos mais variados campos da ciência, têm recebido crescente atenção na última década, resultando em inúmeras publicações sobre o assunto em todo o mundo. Procura-se, na verdade, apresentar o estudo das incertezas de uma maneira clara e didática, indo do geral ao específico, na tentativa de sintetizar o estado-da-arte das incertezas em recursos hídricos.

A segunda parte da Revisão Bibliográfica apresenta a Simulação de Monte Carlo, sob a ótica da Análise de Risco e da Hidrologia Estocástica. Tal metodologia será utilizada, ao longo do presente trabalho, como o instrumento de análise das incertezas existentes no processo de armazenamento em reservatórios.

2.1. ESTUDO DAS INCERTEZAS

O mundo está repleto de incertezas. As incertezas podem advir de uma informação incompleta ou de discordâncias entre diferentes fontes da informação. Podem advir de uma imprecisão lingüística, ou podem se referir a uma variabilidade natural. Mesmo diante de uma informação completa, as incertezas podem estar presentes devido a simplificações ou aproximações para tornar os modelos mais tratáveis matematicamente. As incertezas podem ser acerca do que se gosta, sobre que atitude tomar, sobre o que irá acontecer... Pode-se estar incerto até do grau da própria incerteza.

Apesar de tudo, aprendeu-se, inconscientemente, a conviver com as incertezas do dia-a-dia, desenvolvendo diferentes critérios e preferências para definir regras de decisões sob sua presença, tais como ouvir previsões de tempo, escolher entre viajar de carro ou avião, ou escolher um dado caminho para o trabalho.

Obviamente, as incertezas não se limitam a atuar na vida privada de cada um. Elas estão presentes nas pequenas e grandes decisões, nas situações individuais e nas que envolvem a coletividade. Entretanto, continuou-se lidando com elas, anos a fio, de forma amadorística.

Segundo BERNSTEIN (1997), somente há poucas décadas se começou a ter, em termos mundiais, um interesse em se entender, quantificar e administrar as mais variadas situações de risco, convertendo o futuro incerto - de ameaça - em oportunidade. O autor traduz muito bem esta transição, ao afirmar que *“a idéia revolucionária que define a fronteira entre os tempos modernos e o passado é o domínio do risco: a noção de que o futuro é mais do que um capricho dos deuses*

e de que homens e mulheres não são passíveis ante a natureza. Até os seres humanos descobrirem como transpor esta fronteira, o futuro era um espelho do passado ou o domínio obscuro de oráculos e adivinhos que detinham o monopólio sobre o conhecimento.”

Como bem adverte ARROW (1992), “o nosso conhecimento do funcionamento das coisas, na sociedade ou na natureza, vem a reboque de nuvens de imprecisões. Grandes males têm se seguido a uma crença de certeza”, o que significa que, a administração do risco deverá obrigatoriamente ser precedida pela identificação e o estudo aprofundado das incertezas inerentes ao processo em enfoque. É, sobretudo, a valorização de se reconhecer a vastidão do seu desconhecimento.

Como bem avalia ERMOLIEV (1993), a incerteza é uma característica inerente a qualquer estudo voltado para o futuro e a tendência na tomada de decisão sob a incerteza é adiar a decisão até que as incertezas sejam dissipadas, o que obviamente, nem sempre é possível.

Segundo CANTER (1996) são quatro as atitudes que se pode tomar em um cenário de incertezas: ignorá-las completamente (uma atitude pouco prudente a se tomar); tentar evitá-las, através de medidas mitigadoras (o que reduz os impactos negativos de eventos incertos, mas não elimina a fonte dos riscos); tentar reduzi-las através de aprofundamento da pesquisa, coleta de mais dados e informações durante a fase de planejamento (algumas incertezas são reduzidas, outras não podem ser eliminadas) e, finalmente, incorporar os riscos e incertezas ao processo de planejamento.

2.1.1 . Definição de Incerteza

Incerteza é um termo difícil de definir, englobando múltiplas conceituações. A variedade de fontes de incertezas gera, sem dúvida, sérias confusões. Vários são os significados atribuídos aos verbetes “*incerteza*” e “*incerto*” nos vários dicionários da língua portuguesa. O dicionário AURÉLIO mostra vários significados para a palavra “*incerto*”: *não certo, indeterminado, impreciso, duvidoso, aleatório, ambíguo, vago, inconstante e variável*. O substantivo “*incerteza*” deriva dos conceitos acima descritos e pode ser sintetizado como “*o estado (ou qualidade) de estar incerto*”.

Como bem avalia KUNDZEWICZ (1995), não existe consenso acerca do que significa realmente o termo “*incerteza*”, o qual vem agregando em torno de si os mais variados significados e conotações, em função da formação daquele que o conceitua, os quais muitas vezes não são consistentes com seu significado coloquial.

No presente trabalho adota-se o conceito de “*incerteza*” proposto por VIEIRA (1997), o qual afirma que, no sentido mais amplo, “*as incertezas são as fontes geradoras dos riscos*”.

2.1.2 . Tipos de Incertezas

É importante distinguir claramente os diferentes tipos e fontes de incertezas, uma vez que os mesmos necessitam ser tratados de diferentes formas.

Vários autores na literatura têm analisado diferentes tipos de incerteza e feito várias distinções, tais como objetivas e subjetivas, primárias e secundárias,

naturais e tecnológicas. As mais variadas classificações de tipos de incertezas podem ser encontradas em MORGAN & HENRION (1993).

Segundo KUNDZEWICZ (1995), os hidrólogos, de uma maneira geral, afirmam que já dominam as incertezas há muito tempo. E pondera que esta afirmação pode ser considerada verdadeira no sentido de reconhecer que os mesmos sempre foram obrigados a conviver com as incertezas e, por conseguinte,, desenvolveram ferramentas para lidar com elas. A determinação da cheia máxima de T_r anos é um exemplo. Mas pergunta: quão incertos são estes números? Ou ainda, fazendo um trocadilho: são confiáveis as estimativas de confiabilidade?

Várias têm sido as tentativas de identificar os variados tipos de incertezas no campo da Hidrologia e dos Recursos Hídricos. PLATE e DUCKSTEIN (1987) identificaram os grupos de incertezas no dimensionamento hidráulico. Eles classificaram as incertezas em incertezas hidrológicas, incertezas na amostragem e incertezas na função densidade de probabilidade escolhida. Identificaram ainda as incertezas hidráulicas, as incertezas no modelo (equações empíricas) e incertezas estruturais, associadas ao material utilizado e o projeto estrutural.

BERNIER (1987) fez distinção entre as incertezas naturais, devidas à aleatoriedade dos processos naturais e as incertezas tecnológicas, as quais envolvem erros de amostragem e na adequabilidade do modelo adotado.

BECK (1987) examinou detalhadamente as incertezas na estrutura do modelo, na estimativa dos parâmetros e a propagação dos erros nas estimativas.

KLIR (1989) analisou incerteza versus complexidade: ao se reduzir a complexidade, a incerteza aumenta. Segundo o autor, a incerteza está

relacionada à informação, sendo reduzida a medida que mais dados são coletados, através de informação direta e geração de experimentos, entre outros.

GANOULIS (1995) adota classificação semelhante a de PLATE e DUCKSTEIN (1987), agrupando as incertezas em quatro categorias: incertezas hidrológicas, incertezas hidráulicas, incertezas econômicas (flutuações nos preços e custos) e incertezas estruturais.

Ainda segundo GANOULIS (1995), as incertezas, de um modo geral, podem ser classificadas em dois grandes grupos: incertezas aleatórias (ou naturais) e incertezas epistêmicas. As incertezas aleatórias (ou naturais) são inerentes ao processo e não podem ser reduzidas com a utilização de modelo mais sofisticado ou com a coleta de dados adicionais. As incertezas epistêmicas podem ser de diferentes tipos: Incerteza nos dados - devido a métodos de amostragem, erros de medição ou nos métodos de análise dos dados; Incerteza do modelo - devido a modelos matemáticos inadequados ou erro na estimativa dos parâmetros, e Incerteza operacionais - relacionadas à construção, operação e manutenção de obras de engenharia.

Diferentemente das incertezas naturais, as epistêmicas podem ser reduzidas pela coleta de mais informações ou pelo aperfeiçoamento do modelo matemático.

FREY (1998) separa as incertezas no modelo definidas por GANOULIS (1994) em duas: incertezas no modelo matemático e incertezas na estimativas dos parâmetros. Segundo o autor, a estrutura matemática empregada para representar cenários e fenômenos são uma das principais fontes de incertezas, devido ao fato dos modelos serem apenas uma representação simplificada do

fenômeno e que os limites de aplicação do modelo podem estar incompletos ou incorretos. Quanto às incertezas na estimativa dos parâmetros, o autor segue a mesma metodologia proposta por MORGAN & HENRION (1993), que identifica as incertezas nas quantidades medidas empiricamente (medidas de concentração de poluentes, por exemplo), nas constantes utilizadas por convenção (constante de Plank, velocidade da luz, etc), nas variáveis de decisão, nos valores dos parâmetros e nos parâmetros associados ao modelo utilizado.

No caso específico de modelagem matemática de sistemas hidrológicos, VINCENS et al.(1975) propuseram outra metodologia e classificam as incertezas inerentes a estes estudos em três tipos: Incertezas do Tipo I - ocasionadas pelo desconhecimento do verdadeiro modelo que rege o processo natural; Incertezas do Tipo II - geradas na avaliação dos parâmetros dos modelos matemáticos e Incertezas do Tipo III - aquelas inerentes aos processos naturais.

Incertezas do Tipo I - As incertezas do Tipo I são de difícil avaliação, uma vez que todo modelo é, inevitavelmente, uma simplificação da realidade. Os fenômenos hidrológicos apresentam comportamento tão complexo que, mesmo modelos matemáticos detalhados não conseguem reproduzir, com exatidão, os processos naturais. Segundo MORGAN & HENRION (1993), “ todo modelo é, definitivamente, falso”, uma vez que mesmo quando o modelo resulta em boas aproximações de um sistema natural, em particular, ele nunca será completamente exato. Afirma ainda que, embora se possa determinar se um modelo é melhor que outro - no que se refere à precisão de suas previsões - não se pode dizer se ele é o mais provável. Desta forma, não se pode atribuir probabilidades a modelos.

Em estudos hidrológicos é freqüente a necessidade de se ajustar os dados, quer sejam de vazão ou precipitação, a uma distribuição de probabilidades teórica. Nos rios intermitentes do Nordeste Brasileiro é comum as séries de vazões diárias, mensais e mesmo anuais, apresentarem valores nulos. Assim sendo, a verdadeira distribuição de probabilidades das vazões naturais é uma distribuição mista, formada pela função densidade de probabilidade(para valores não-nulos) e pela função massa de probabilidades(para os valores nulos). Isto significa que a função distribuição de probabilidades verdadeira tem três parâmetros, o que dificulta a sua aplicação.

Uma simplificação que se faz é utilizar uma função distribuição de probabilidades continua a qual preserve a média e o desvio padrão da função verdadeira. CAMPOS (1987) analisou a influência desta simplificação no dimensionamento de reservatórios no Nordeste do Brasil, concluindo que a utilização da função de distribuição de probabilidades contínua como substituta da função de probabilidades mista induz o hidrólogo a um erro, o qual aumenta a medida em que a probabilidade de falha diminui (ou seja, com o aumento da garantia) e em que a probabilidade dos influxos anuais serem nulos aumenta.

Incertezas do Tipo II - Mesmo que a complexidade dos fenômenos hidrológicos pudesse ser fielmente reproduzida por um modelo, restaria ainda estimar os parâmetros da população, tais como média (μ) e variância (σ^2), a partir da única informação disponível - a série histórica - e não se pode esperar que, sendo as estimativas dos parâmetros populacionais feitos a partir de amostras relativamente pequenas, não contenham uma grande dose de incerteza.

Costuma-se admitir, em estudos hidrológicos, que séries de 30 anos de dados permitem a obtenção de resultados com a precisão aceitável. CAMPOS (1997) adverte que a validade desta assertiva depende da variabilidade do fenômeno em análise e mostra que, considerando que se 30 anos de dados sejam suficientes para um estudo de vazões no Nordeste dos Estados Unidos, o qual apresenta, em termos médios, um CV_{def} da ordem de 0,25, para que se cometa o mesmo erro em um rio do Nordeste Brasileiro, ou na Austrália, que apresentam CV_{def} próximos a 1,2, seria necessária uma série de medições de 690 anos.

Incertezas do Tipo III - As incertezas do Tipo III são aquelas inerentes aos processos naturais, e não podem ser reduzidas pelo uso de um modelo mais sofisticado ou pela coleta de mais informações. Elas não podem mudar e, assim, deve-se conhecê-las e incorporá-las ao planejamento.

2.2. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Segundo ANG & TANG (1984) *simulação* é o processo de reprodução do mundo real baseado em certas suposições e em modelos concebidos da realidade. Ela pode ser efetuada teórica ou experimentalmente; na prática, a simulação teórica é usualmente feita numericamente, com o auxílio de computadores, e através de repetidas simulações, a performance do sistema, sob diferentes cenários, pode ser avaliada. No caso de se utilizar variável aleatória com distribuição de probabilidade conhecida, faz-se uso da **Simulação de Monte Carlo**, cujo surgimento remonta ao ano 1949, com a publicação do artigo “The Monte Carlo Method” por Metropolis e Ulam (SOBOL, 1994).

A simulação estocástica do sistema oferece meios para a geração de inúmeras seqüências independentes do fenômeno. Cada sorteio gera uma nova série, diferente da histórica, mas com as mesmas propriedades estatísticas e igualmente provável. Como as séries são distintas entre si, são obtidos diversos resultados provenientes das simulações, ao invés de um único resultado, caso apenas a série histórica estivesse disponível, permitindo o planejador tomar sua decisão, baseado, não em um evento isolado, mas na análise probabilística do fenômeno estudado (VOSE, 1996).

Como bem aponta FREY (1998), embora o processo como um todo seja estocástico, para cada uma das séries sintéticas geradas, a simulação é um processo determinístico.

A Simulação de Monte Carlo é uma metodologia adotada com bastante freqüência no campo da Análise de Risco, seja para analisar a variabilidade das características estudadas, sob diversos cenários diferentes, seja para quantificar o risco de certos eventos (BECK, 1987; MOLAK, 1997).

Outras abordagens são também utilizadas para a avaliação do risco, quais sejam: Integração Direta, Métodos MFOSM, AFOSM e PEM e a dos conjuntos difusos (VIEIRA,1997). Segundo VOSE (1996), a Simulação de Monte Carlo oferece inúmeras vantagens sobre os demais métodos e as enumera:

- As distribuições de probabilidades das variáveis não precisam ser aproximadas,
- Correlações e outras interdependências podem ser modeladas

- O nível de matemática envolvido na simulação não é muito alto
- Existem *softwares* comercialmente disponíveis
- Níveis mais elevados de precisão podem ser obtidos pelo aumento do número de interações
- Cálculos matemáticos complexos podem ser incluídos sem muita dificuldade
- O Método de Monte Carlo é amplamente reconhecido como uma técnica válida, de modo que os resultados de sua utilização podem ser facilmente aceitos
- Mudanças no modelo podem ser feitas rapidamente

A Simulação de Monte Carlo também vem sendo largamente utilizada no campo da Hidrologia há muitos anos, existindo na literatura inúmeros trabalhos utilizando esta metodologia.

O primeiro a reconhecer a importância de se estender os dados hidrológicos históricos disponíveis foi HAZEN (1914), combinando vazões padronizadas anuais para 14 rios do Nordeste Americano, com o intuito de produzir uma série sintética de 300 anos. Sua técnica apresentava algumas limitações: os rios se encontravam geograficamente muito próximos, e mais da metade dos dados basearam-se no período de observação compreendido entre 1900 a 1910, tendo assim a tendência de se repetirem.

É atribuído a SUDLER (1927) uma das primeiras tentativas de geração sintética de deflúvios, que consistiu em assinalar em 50 cartões os registros de descarga

anual da série observada, embaralhando-os, e retirando-os sem reposição para produzir uma seqüência de 50 anos. O procedimento foi repetido 20 vezes, obtendo, desta maneira, 1000 anos de dados de vazão. Embora limitado, este método significou grande avanço perante a metodologia até então utilizada, sendo considerado o primeiro modelo verdadeiramente estocástico de geração de vazões da história .

BARNES (1954), ao estimar a capacidade do Reservatório Upper Yarra em Vitória, Austrália, verificou que as vazões anuais eram independentes e normalmente distribuídas, e gerou 1000 valores de deflúvios anuais utilizando o Método de Monte Carlo. Historicamente, este procedimento contrasta com os anteriores por assumir que os dados seguiam uma dada distribuição de probabilidades.

HURST et. al.(1965), nos seus estudos para a bacia do Rio Nilo, desenvolveram uma série de técnicas de amostragens para gerar sinteticamente vazões anuais, as quais foram utilizadas para simular o comportamento do reservatório Aswan High.

A utilização de simulação estocástica no dimensionamento de reservatórios foi discutida por FIERING (1961), FIERING (1966) e McMAHON et al. (1972). HAAN (1972) discutiu um procedimento geral para a distribuição de probabilidades do erro em função do tamanho da amostra. Várias aplicações em hidrologia do Método de Monte Carlo são abordadas por HAAN (1979).

No que diz respeito a resolução de problemas estocásticos que envolvam o processo de armazenamento em reservatórios, os métodos experimentais

(Método de Monte Carlo) apresentam como vantagem, em relação aos demais – Rippl e teorias de Moran e do Range – a sua grande versatilidade, uma vez que permitem ensaiar diversas regras de operação, diversas vazões afluentes e diversas capacidades, entre outros, tendo como limite unicamente a capacidade computacional. Já em 1972 o professor Vujica Yevjevich YEVJEVICH (1972) preconizava que a tendência universal seria a aplicação de métodos experimentais com o auxílio de métodos analíticos. A prática tem mostrado que ele não se enganou. Inúmeros trabalhos vem sendo publicados, desde então, tendo o Método de Monte Carlo como ferramenta básica. Os trabalhos de CAMPOS (1997), STEPHENSON (1997), CAMPOS et al. (1998) e CAMPOS et al. (1999) são uma pequena amostra.

III - METODOLOGIA

A metodologia a ser adotada neste trabalho, para a identificação e classificação das incertezas presentes no processo de armazenamento, é aquela proposta por VINCENS et. al. (1975). Não serão abordadas as incertezas do Tipo I, ocasionadas pelo desconhecimento do modelo matemático utilizado na avaliação, ou seja, considerar-se-á que as vazões afluentes anuais podem ser descritas pela distribuição de probabilidades Gama II. Não serão estudadas também as incertezas do Tipo II, geradas na avaliação dos parâmetros populacionais μ e σ a partir da amostra, formada pela série histórica.

Este trabalho focaliza, unicamente, as incertezas do Tipo III, causadas pela aleatoriedade das vazões naturais. Tais incertezas não podem ser reduzidas pela elaboração de um modelo matemático mais preciso ou pelo aumento da série de observações. Elas, simplesmente, existem.

Sendo a variabilidade das vazões naturais um aspecto determinante para o cálculo da vazão regularizada, as incertezas do Tipo III precisam ser incorporadas no planejamento em recursos hídricos e, para isto, precisam ser melhor conhecidas.

Para se determinar a vazão regularizada, sob diferentes cenários, inclusive para outros níveis de garantia além de 90%, e estudar, deste modo, a sua variabilidade, utilizar-se-á o **Método de Monte Carlo** (Figura 2.2). Este método admite que os deflúvios naturais afluentes ao reservatório seguem uma determinada lei de distribuição de probabilidade, gera n séries sintéticas de vazões e executa a operação simulada do reservatório (YEVJEVICH, 1972). A metodologia a ser adotada encontra-se detalhada nos itens que se seguem.

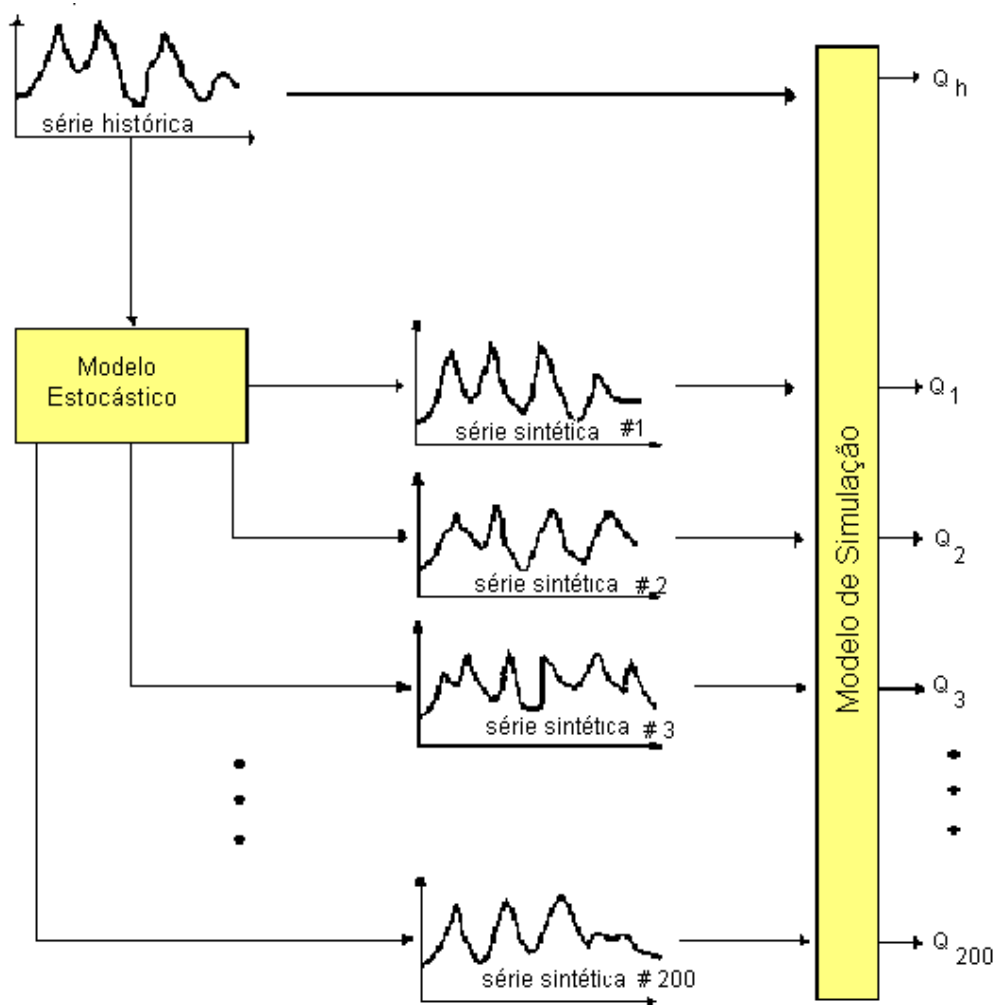


Figura 2.2 - Representação esquemática do Método de Monte Carlo para a obtenção de 200 séries de vazões.
 Fonte: adaptado de KELMAN (1987)

3.1. DADOS UTILIZADOS

No sentido de analisar a variabilidade das vazões regularizadas por um reservatório, sob diferentes cenários, selecionou-se um rio típico do semi-árido cearense: o rio Caxitoré, localizado no norte do Estado do Ceará. Embora este trabalho utilize dados de um reservatório em particular – o Açude Caxitoré - os resultados obtidos não são válidos unicamente para ele. Procurou-se dar o caráter geral ao adotar-se diferentes valores de capacidade e influxos, com a mesma média, mas distribuídos temporalmente de maneira diferente da real. Busca-se pois, o universal pelo individual.

3.1.1. Vazões Afluentes ao Açude Caxitoré

O rio Caxitoré, um dos principais afluentes do rio Curu, apresenta um regime hidrológico típico dos rios cearenses: intermitente, com 90% do escoamento ocorrendo entre os meses de fevereiro a maio (Figura 3.1) e grande variabilidade interanual (Figura 3.2).

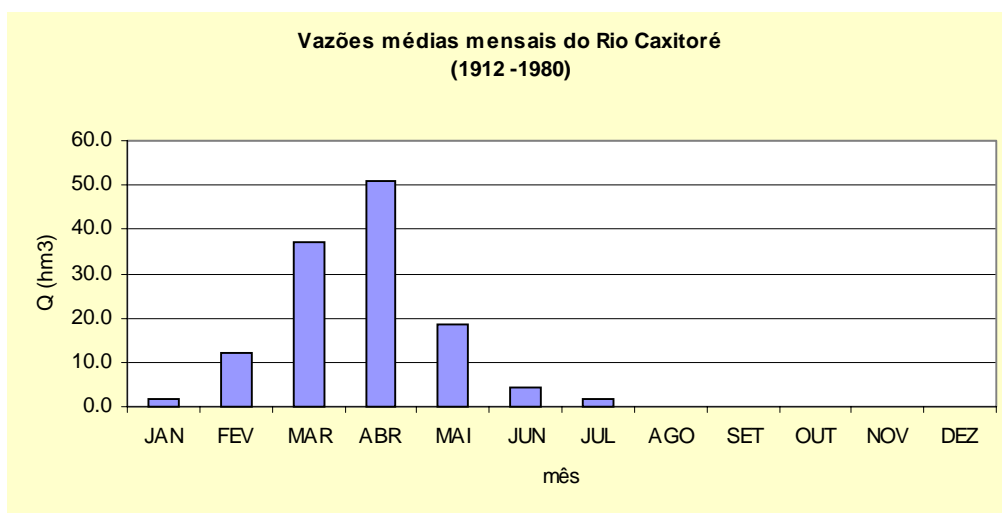


Figura 3.1 – Vazões médias mensais (em hm^3) do Rio Caxitoré

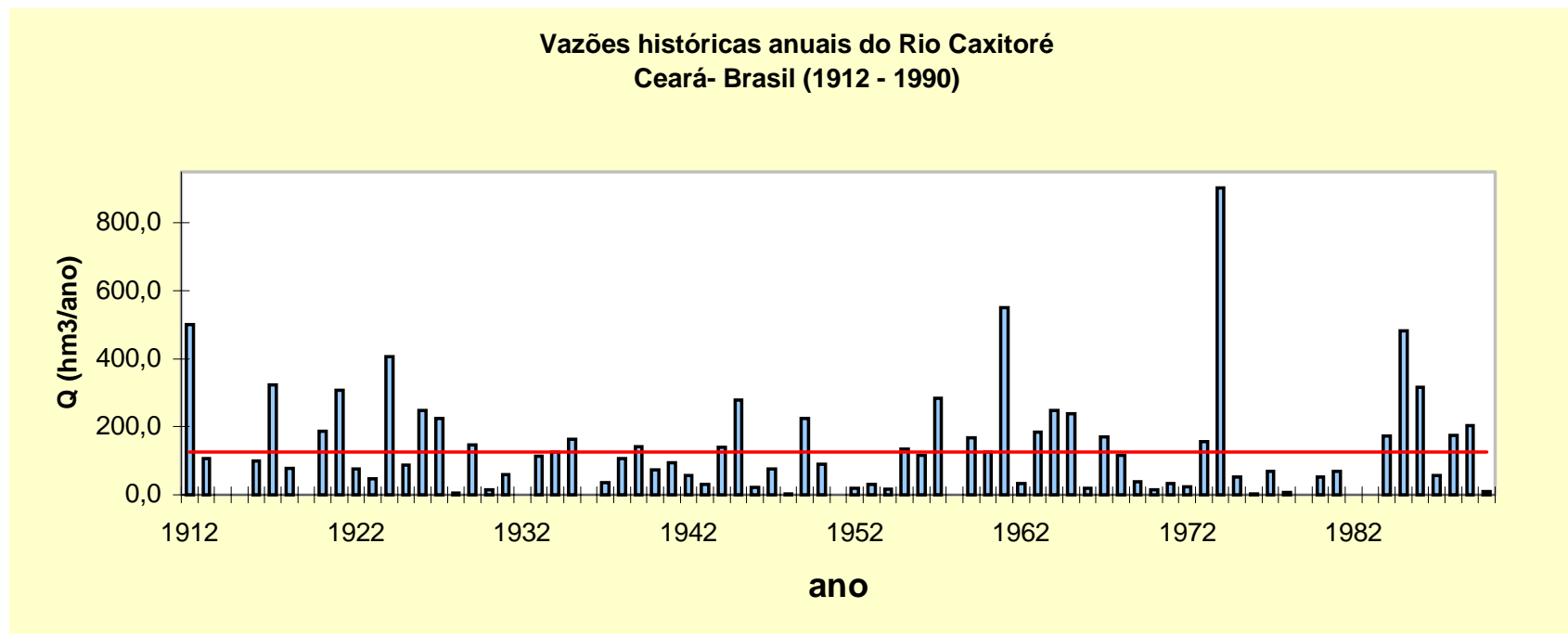


Figura 3.2 – Vazões anuais (em hm³) do Rio Caxitoré – Ceará - no período compreendido entre 1912 e 1990.

A série histórica do rio Caxitoré encontra-se na Tabela A1 do Anexo. O seu regime hidrológico pode ser definido pelos parâmetros:

- Volume afluente médio anual (μ): 126,3 hm³/ ano
- Desvio padrão dos deflúvios anuais (σ):151,4 hm³/ ano
- Coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV_{def}): 1,2

3.1.2. Precipitação

Para a simulação do reservatório foi selecionado o posto Açude Caxitoré, em Pentecostes. A precipitação média anual é de 912mm, distribuída ao longo dos meses conforme Tabela 3.1. Observa-se que o quadrimestre fevereiro/março/abril/maio corresponde a cerca de 78% do total médio precipitado em um ano, sendo o mês de março, em média, o de maior índice pluviométrico.

3.1.3. Evaporação

Foi considerado o posto de Sobral como característico das evaporações na bacia do rio Caxitoré. A evaporação média anual observada em evaporímetro Piché é de 1.840 mm, distribuída ao longo dos meses, segundo a Tabela 3.2. O trimestre setembro/outubro/novembro apresenta os maiores valores de evaporação, sendo o máximo em outubro (247,0 mm).

3.1.4. Evaporação líquida no lago

Os dados de evaporação líquida e dos coeficientes de distribuição das evaporações utilizados nas simulações do reservatório Caxitoré foram retirados das tabelas 3.1 e 3.2 e estão consolidados na Tabela 3.3.

3.1.5. O Açude Caxitoré

O Açude Caxitoré é o terceiro maior da Bacia do Curu, tendo capacidade de acumulação (K) de 202 milhões de metros cúbicos. Sua localização é mostrada na Figura 3.3 .



Figura 3.3 – O Açude Caxitoré na Bacia do Curu e sua localização no Estado do Ceará (Fonte: Kemper, 1996)

Tabela 3.1. - Precipitações médias mensais no posto pluviométrico do Açude Caxitoré (Pentecostes)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Pi(mm)	66,8	121,4	235,8	212,8	143,5	58,1	40,4	6,1	4,6	5,2	5,5	18,5	918,0

Fonte: CEARÀ (1996)

Tabela 3.2 - Evaporação média na estação de Sobral

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Ei (mm)	158,0	105,0	75,0	71,0	78,0	108,0	154,0	199,0	215,0	247,0	220,0	210,0	1.840,0

Fonte: DNEMET (1992)

Tabela 3.3 - Evaporação líquida sobre o lago do Açude Caxitoré

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Ei (mm)	158,0	105,0	75,0	71,0	78,0	108,0	154,0	199,0	215,0	247,0	220,0	210,0	1.840,0
Pi (mm)	66,8	121,4	235,1	212,8	143,5	58,1	40,4	6,1	4,6	5,2	5,5	18,5	918,0
Ei-Pi (mm)	91,2	-16,4	-160,1	-141,8	-65,5	49,9	113,6	192,9	210,4	241,8	214,5	191,5	922,0
$ei = (Ei - Pi) / \sum (Ei - Pi)$	0,10	-0,02	-0,17	-0,15	-0,07	0,05	0,12	0,21	0,23	0,26	0,23	0,21	1,00

As relações cota x volume acumulado de água do Açude Caxitoré são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Relações cota x volume acumulado x altura da água do Açude Caxitoré

Cotas (m)	Volume (m ³)	Altura (m)
50	0	0
55	10.000.000	5
60	25.000.000	10
65	65.000.000	15
70	140.000.000	20
75	240.000.000	25
80	385.000.000	30

Fonte: CEARÀ (1996)

3.2. OPERAÇÃO SIMULADA DO RESERVATÓRIO

A capacidade de regularização de um reservatório pode ser analisada a partir da sua operação simulada, através da solução da equação do seu balanço hídrico, utilizando as séries de vazões afluentes ao mesmo. São consideradas as seguintes premissas:

- a unidade de tempo é um mês;
- a retirada do reservatório é constante ao longo dos anos e ao longo dos meses;
- a contribuição líquida sobre o lago - precipitação menos evaporação - é admitida constante ao longo dos anos, mas variável ao longo dos meses.

3.2.1. Equação do Balanço Hídrico

A determinação do comportamento de um reservatório é feita pela equação do balanço hídrico, que consiste em igualar as entradas e saídas do mesmo como se segue:

$$dV/dt = E - S \quad (3.1)$$

onde:

dV/dt - é a variação do volume ao longo do tempo,

E - é o resultado de todas as entradas no sistema, e

S - é o resultado de todas as saídas.

As entradas são compostas dos deflúvios afluentes e das precipitações diretas sobre o espelho d'água do lago; as saídas, por sua vez, são formadas pelas evaporações e pelas retiradas para fins utilitários. A equação do balanço hídrico usada neste modelo é dada por:

$$V_{i+1} = V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) + I_i - M_i - S_i \quad (3.2)$$

onde:

V_{i+1} e V_i = representam os volumes de água estocados no reservatório no início dos meses $i+1$ e i respectivamente;

P_i = precipitação média sobre o espelho de água do açude durante o mês i ;

E_i = lâmina média evaporada da superfície do lago durante o mês i ;

A_{i+1} e A_i = representam as áreas do lago do reservatório no início dos meses $i+1$ e i respectivamente;

I_i = volumes afluentes ao reservatório durante o mês i ;

M_i = retirada do reservatório durante o mês i ;

S_i = volume sangrado do reservatório.

Considerando-se um volume inicial V_0 , simula-se, para uma garantia G , o reservatório a nível mensal para a respectiva série histórica de vazões durante H anos, onde H é a extensão da série de vazões. Inicialmente considera-se a retirada $M = \min (K/2, \mu/2)$. Ao final de cada ano é calculado se o volume anual armazenado é suficiente para atender a demanda (= retirada M); se não for, é considerado que naquele ano ocorreu uma falha.

A regra de operação é definida por:

$$V_{i+1} = 0, \text{ se } (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) - M_i + I_i) \leq 0 \quad (3.3)$$

$$V_{i+1} = (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) + I_i), \text{ se:}$$

$$0 < (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) - M_i + I_i) < K \quad (3.4)$$

$$V_{i+1} = K, \text{ se } (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) - M_i + I_i) \geq K \quad (3.5)$$

No final dos H anos é verificado se a retirada M assumida inicialmente ($\min (K/2, \mu/2)$) corresponde à frequência de falhas pretendida. Caso seja superior, diminui-se a retirada, caso contrário, eleva-se a retirada e simula-se novamente o comportamento do reservatório para H anos e assim sucessivamente até que a retirada correspondente a uma frequência de falhas pretendida seja encontrada.

3.3.GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS

Os rios intermitentes do Nordeste Brasileiro apresentam, como característica marcante, uma longa estação de vazões nulas após a curta estação úmida. Essas características fazem com que os deflúvios anuais sejam serialmente independentes e, que as séries de vazões anuais possam ser obtidas a partir da geração de números aleatórios seguindo uma função densidade de probabilidade (CAMPOS,1996). Segundo o mesmo autor, tanto a distribuição Gama como a Log-normal podem ser utilizadas, sem que se possa afirmar qual das duas dá melhores resultados.

Neste trabalho foram geradas 8 séries de 20.000 valores de vazões anuais afluentes ao Açude Caxitoré , seguindo uma distribuição Gamma II, cuja equação é:

$$P(x) = (\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}) / \Gamma(\alpha) \quad (3.6)$$

onde $\Gamma(\alpha)$ é a Função Gamma e α e β , os parâmetros da distribuição, calculados pelo método dos momentos a partir das equações 3.7 e 3.8:

$$\mu = \alpha/\beta \quad (3.7)$$

$$\sigma^2 = \alpha/\beta^2 \quad (3.8)$$

Conservou-se a média histórica ($\mu=126,3 \text{ hm}^3/\text{ano}$) e variou-se o coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV_{def} variando de 0,2 a 1,6). Os valores assumidos para μ e σ , para cada uma das oito séries de 20.000 anos geradas, são os constantes na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores de μ e σ (em hm^3/ano) utilizados para a geração das séries sintéticas de vazões afluentes anuais ao Açude Caxitoré para coeficientes de variação variando de 0,2 a 1,6.

	Coeficiente de Variação dos Deflúvios (CV_{def})							
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
μ	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3
σ	25,3	50,5	75,8	101,1	126,3	151,4	176,8	208,1

3.4. DESAGREGAÇÃO DOS DEFLÚVIOS ANUAIS

Considerando o objetivo de trabalhar a nível mensal, apresentou-se a necessidade de desagregar as vazões anuais em mensais.

Seguiu-se metodologia proposta por SVARNIDZE (1964) - o Método dos Fragmentos - o qual produz vazões mensais por desagregação de vazões anuais pré-geradas por um modelo apropriado, no caso em questão, uma distribuição Gamma II. Este método produz bons resultados para os rios intermitentes do Semi-Árido Nordeste (ARAÚJO,1991).

O uso dessa técnica supõe a existência de uma série histórica de vazões mensais - porém de curta duração - e visa aumentar as informações fluviométricas do posto, de forma a dar subsídios ao êxito em projetos e operação de sistemas de recursos hídricos. Para cada mês e para cada ano da série histórica é determinado um fragmento dado por:

$$f_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} Q_{i,j}} \quad (3.8)$$

onde: $Q_{i,j}$ é a vazão no mês j do ano i .

De posse dos fragmentos calculados, as vazões da série anual são ordenadas de forma crescente e são gerados tantos intervalos de classe quanto o número de anos da série histórica. Como cada mês tem o seu fragmento e, durante o ano existem doze fragmentos, cada intervalo de classe contempla doze fragmentos.

Na obtenção da série sintética de vazões mensais (com um determinado número de anos) associa-se cada valor anual de vazão da série previamente gerada ao intervalo de classe correspondente, sendo desagregado pelo respectivo fragmento. Dessa forma, as vazões mensais sintéticas são estimadas por meio da seguinte expressão:

$$Q_{i,j} = f_j^k Q_i^k \quad (3.9)$$

onde:

$Q_{i,j}$ é a vazão mensal sintética para o mês j do ano i ;

f_j^k é o fragmento de desagregação no mês j associado ao intervalo de classe k ;

Q_i^k é a vazão anual gerada pelo modelo anual, pertencente a classe k .

É fácil observar que a soma dos fragmentos, para um determinado ano i é igual à unidade, ou seja:

$$\sum f_{i,j} = 1 \quad (3.10)$$

No presente trabalho, os duzentos valores de vazões anuais de cada série serão fragmentados pela série histórica do Rio Caxitoré.

3.5. O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA VAZÃO REGULARIZADA

Um reservatório superficial consiste em uma intervenção do homem na natureza com o objetivo de adaptar os padrões naturais dos rios aos padrões demandados pela sociedade (Figura 3.4).

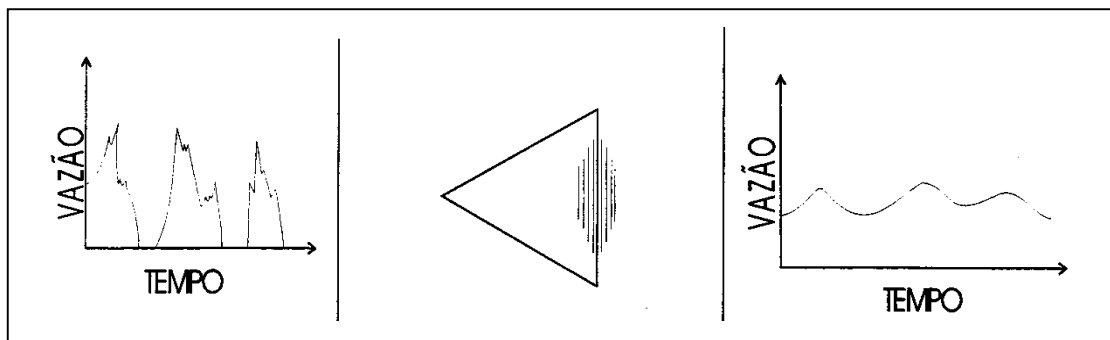


Figura 3.4 - Representação esquemática do funcionamento de um reservatório.
Fonte: CAMPOS (1987)

A Figura 3.5 mostra o comportamento da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré, considerando diferentes volumes iniciais assumidos para o reservatório e diferentes horizontes de simulação.

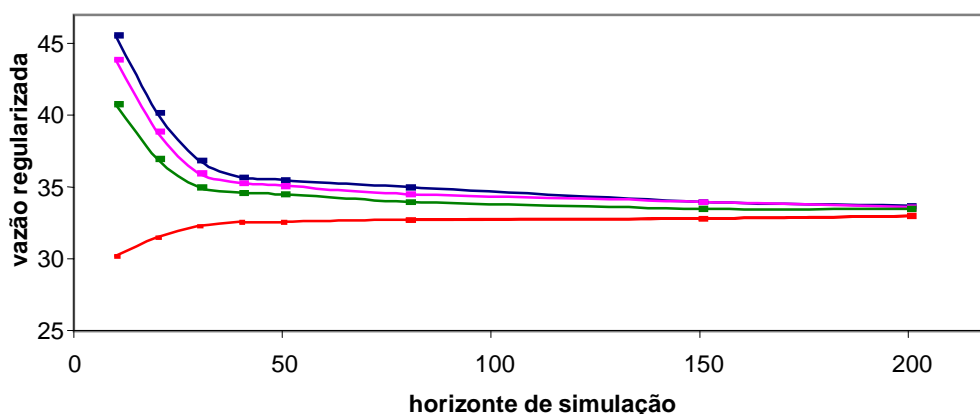


Figura 3.5 – Exemplo do comportamento da vazão regularizada em função do horizonte de simulação (Açude Caxitoré – Ce).

Considerando-se os demais parâmetros constantes observa-se que, embora inicialmente as condições iniciais tenham grande influência nos valores da vazão regularizada, com o passar do tempo esta influência vai se tornando cada vez mais tênue e, após um longo período o processo se estabiliza em uma condição de equilíbrio no qual a vazão regularizada independe do volume V_0 assumido inicialmente e do horizonte de simulação.

Pode-se então considerar que o processo de armazenamento passa por dois estados distintos:

Estado transiente:

$$Q_r = f (\mu, \sigma, V_0, H, K, G, E, \alpha) \quad (3.11)$$

Estado de equilíbrio:

$$Q_r = f (\mu, \sigma, K, G, E, \alpha) \quad (3.12)$$

Onde:

Q_r – vazão a ser regularizada pelo reservatório em questão;

μ - média dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório;

σ - desvio padrão dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório;

V_0 - volume inicial assumido para o reservatório;

H – horizonte de planejamento (em anos);

K – capacidade do reservatório;

G – garantia (em %);

E – evaporação no reservatório;

α - fator de forma do reservatório.

Sabendo-se que o coeficiente de variação da séries dos deflúvios afluentes ao reservatório é dado por:

$$CV_{def} = \sigma/\mu \quad (3.13)$$

E utilizando-se os fatores adimensionais de capacidade (f_k), de evaporação (f_E) e de retirada (f_M) definidos por CAMPOS (1987):

$$f_k = K/\mu \quad (3.14)$$

$$f_E = (3\alpha^{1/3}E_L) / \mu^{1/3} \quad (3.15)$$

$$f_M = M/K \quad (3.16)$$

Se terá que:

Estado Transiente

$$f_M = f(CV_{def}, G, f_k, f_E, V_0, H) \quad (3.17)$$

Estado de Equilíbrio

$$f_M = f(CV_{def}, G, f_k, f_E) \quad (3.18)$$

Como observado na Equação 3.17, o estado transiente é função de seis parâmetros; sendo assim a vazão regularizada (representada pelo fator

adimensional f_M) só pode ser corretamente identificada ao se dizer, além do coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV_{def}), da capacidade do reservatório (representada por f_K), da evaporação sobre a superfície do lago (representada por f_E) e da garantia (G), o volume inicial assumido para o reservatório (V_0) e o horizonte de simulação adotado (H). A Equação 3.18 mostra que, no estado de equilíbrio, a vazão regularizada é função apenas dos quatro primeiros parâmetros citados.

3.5.1. O valor a ser assumido para a vazão regularizada

Para cada uma das oito séries de 20.000 anos de vazões mensais produzidas conforme relatado em item anterior – cada uma gerada com um determinado CV_{def} - serão formadas 200 séries de 10 anos, 200 séries de 20 anos, 200 séries de 30 anos, e assim sucessivamente, até 200 séries de 100 anos. Uma série de 5.000 anos também será gerada para calcular a vazão regularizada no estado de equilíbrio.

O valor adotado para a vazão regularizada (aqui definida como uma fração da vazão média afluyente – f_M), para cada conjunto de simulações, será a média dos 200 valores de vazões regularizadas obtidas pela operação simulada do reservatório para cada cenário de CV_{def} , f_K , G e V_0 .

A Figura 3.6 mostra a série de 200 vazões regularizadas ajustada a uma Distribuição Normal e o valor a ser adotado para este cenário.

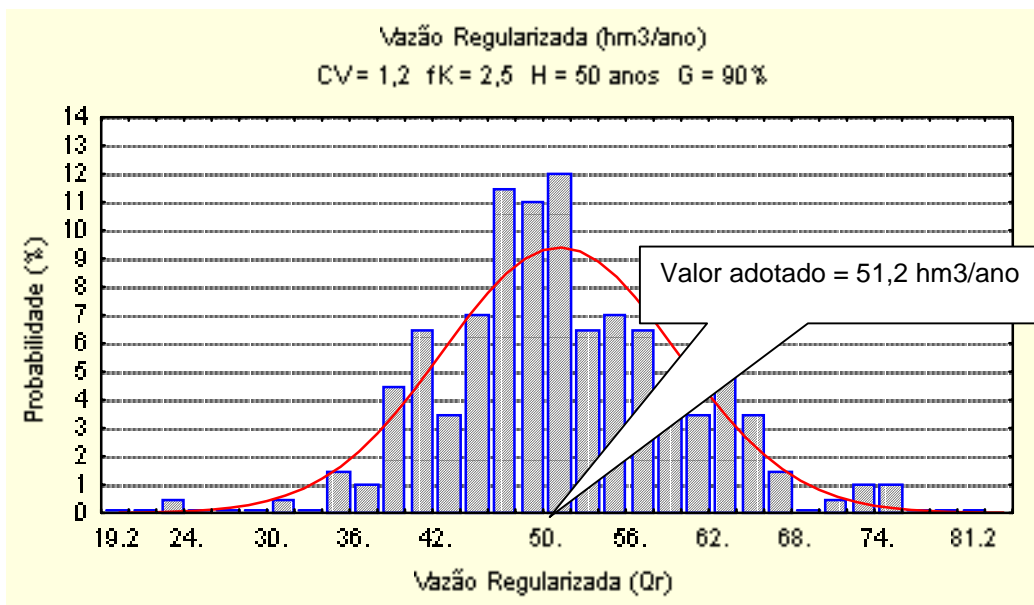


Figura 3.6 – Série de 200 vazões regularizadas ajustada a uma distribuição Normal, adotando-se $CV_{def} = 1,2$, $f_K = 2,5$, $V_0 = \text{cheio}$, $G = 90\%$ e $H = 50$ anos.

3.5.2. Os cenários analisados

A adoção de diferentes valores para os vários parâmetros intervenientes no processo de armazenamento permitirá analisar-se, além do comportamento da vazão regularizada – definida como a média dos 200 valores de cada simulação – a variabilidade da mesma, e conseqüentemente, as incertezas inerentes a cada cenário.

No presente trabalho assumir-se-ão os seguintes valores para os parâmetros V_0 , G , H , CV_{def} , V_0 , f_K e f_e :

- **Garantia (G):** Serão simulados três níveis de garantia ($G = 85\%$, 90% e 95%)

- **Horizonte de simulação (H):** Serão adotados 11 horizontes de simulação ($H = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ e 5.000 anos). No caso de 5.000 anos, simular-se-á o processo de armazenamento no seu estado de equilíbrio.
- **Coefficiente de variação dos deflúvios naturais (CV_{def}):** Será analisado, além do $CV_{def}=1,2$, qual seria o comportamento das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré, caso o CV dos deflúvios anuais afluentes ao mesmo assumissem valores entre $0,2$ e $1,6$.
- **Volume inicial assumido para o reservatório (V_0):** Serão simulados diversos valores de volume inicial: cheio ($C = K$), metade da capacidade ($V_0 = K/2$), metade do volume médio afluente anual ($V_0 = \mu/2$) e vazio ($V_0 = 5\%K$). O reservatório será simulado ainda com V_0 correspondente ao seu Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC), com o qual o processo de armazenamento converge mais rapidamente para o estado de equilíbrio.
- **Fator adimensional de capacidade (f_K):** Serão simulados quatro capacidades do reservatórios ($f_K = 1, 1,5, 2,0$ e $2,5$).
- **Fator adimensional de evaporação (f_E):** Neste estudo considerar-se-á as altas taxas de evaporação ocorridas na superfície do lago, entretanto, não se estudará a sua variabilidade, ou seja adotar-se-á, em todos os cenários, o mesmo valor de f_E , o qual corresponde àquele calculado para o Açude Caxitoré, nas suas condições reais.

O fator adimensional de evaporação é calculado através da equação 3.15, onde α denota o fator de forma da bacia, μ representa o volume afluente médio anual ao

reservatório (em metros cúbicos) e E_L , a lâmina evaporada a partir da superfície do lago durante a estação seca (em metros).

Estimativa do fator de forma da bacia hidráulica (α) do Açude Caxitoré: Este fator é determinado na suposição que a equação da bacia hidráulica do reservatório pode ser representada pela equação:

$$V = \alpha h^3 \quad (3.19)$$

Onde h denota a profundidade da superfície do reservatório medida em relação ao ponto mais profundo da bacia hidráulica e V representa o volume acumulado correspondente a esta profundidade. Com os dados da Tabela 3.4, obtém-se, pelo método dos mínimos quadrados, que $\alpha = 14.259,25$.

Estimativa da evaporação durante a estação seca: Considera-se o período de *junho a janeiro* como representativo da estação sem escoamento superficial no Rio Caxitoré. O valor da lâmina evaporada no lago neste período (Tabela 3.2) é de 1,15 metros. Aplicando-se os valores de α , E_L e μ na equação 3.15, obtém-se:

$$f_E = 0,17$$

3.6. A DETERMINAÇÃO DE UM ESTIMADOR PARA A VAZÃO DE EQUILÍBRIO

Com base no estudo da variabilidade da vazão regularizada, sob diversos cenários, procurar-se-á estimadores para a vazão de equilíbrio. Dentre eles, será escolhido aquele que melhor satisfizer as principais propriedades de um bom estimador, quais sejam: *Justeza, Eficiência e Consistência*.

Serão determinados ainda fatores de correção de viés, se necessário, para o caso de estimadores eficientes, mas não justos.

IV – RESULTADOS

A determinação do valor a ser adotado para a vazão regularizada por um dado reservatório é um processo de decisão. Várias podem ser as metodologias adotadas para o seu cálculo, sejam elas empíricas, analíticas ou experimentais.

Ao optar-se pela operação simulada do reservatório, dois caminhos distintos podem ser seguidos: a simulação estocástica (método experimental) e a simulação utilizando unicamente a série histórica (método empírico). Para fins didáticos os dois serão analisados separadamente.

I - Na simulação estocástica, metodologia adotada no desenvolvimento da primeira parte deste capítulo (itens 4.1 a 4.5), várias seqüências independentes de vazões são geradas. E, uma vez que diversos resultados são obtidos, o planejador pode estimar a vazão regularizada baseado na análise probabilística do comportamento da mesma. Após a escolha do horizonte de planejamento desejado, a vazão regularizada pode ser estimada seguindo duas metodologias também distintas:

- a) Simular o reservatório para o horizonte de planejamento desejado, ou seja, fazer o horizonte de simulação igual ao horizonte de planejamento. Neste

caso, o Volume Inicial (V_0) a ser assumido para o reservatório tem que ser arbitrado.

- b) Simular o reservatório no seu estado de equilíbrio, adotando um horizonte de simulação longo o bastante para que o processo de armazenamento esteja na sua condição de equilíbrio.

II - No caso da simulação do reservatório utilizando apenas a série histórica de vazões, prática corrente no meio técnico, apenas a opção “a” pode ser seguida, ou seja:

- a) Simular-se o reservatório para o horizonte de planejamento desejado, ou seja, faz-se o horizonte de simulação igual ao horizonte de planejamento (ou igual à extensão da série histórica) e arbitra-se o Volume Inicial (V_0) a ser assumido para o reservatório.

A opção de simular o reservatório para um horizonte de tempo longo o suficiente para que o processo alcance o seu estado de equilíbrio está totalmente descartada. Séries históricas, obviamente, não dispõem de períodos de observação tão longos. É preciso pois, que se procure estimadores da vazão de equilíbrio. É na escolha do melhor estimador da vazão regularizada no seu estado de equilíbrio que este trabalho pretende dar sua contribuição. Antes, entretanto, há que se estudar o processo de armazenamento sob diferentes cenários.

4.1. A VAZÃO REGULARIZADA NO ESTADO DE EQUILÍBRIO

No sentido de verificar se para $H=5000$ anos o processo de armazenamento já atingiu o seu estado de equilíbrio, ou seja, não mais depende das condições

iniciais assumidas para o reservatório, gerou-se 20 séries de vazões afluentes com $CV_{def} = 1,2$ (20 séries diferentes entre si, mas igualmente prováveis), e simulou-se o comportamento do reservatório, iniciando **cheio** e **vazio**, para cada série. Admitindo-se $f_k=1,5$ e $G=90\%$, verificou-se a permanência dos valores das vazões regularizadas nas seguintes condições:

- para uma mesma série, com diferentes volumes iniciais
- entre as várias séries, com a mesma condição inicial

Observou-se que, considerando a mesma série com condições iniciais diametralmente opostas, a vazão regularizada (traduzida aqui pelo f_M) assume praticamente o mesmo valor para o horizonte de simulação de 5.000 anos, o que indica que, após esse tempo, o processo de armazenamento independe das condições iniciais assumidas para o reservatório. Considerando o conjunto das vinte simulações, para uma mesma condição inicial, verificou-se pouca variabilidade nas vazões regularizadas, apresentando um coeficiente de variação de 0,028 (Tabela 4.1).

Simulou-se ainda o reservatório sob as mesmas condições já descritas, mas com os deflúvios afluentes apresentando um coeficiente de variação de 0,2, ou seja, simulou-se o mesmo reservatório sob as condições de um clima temperado. Não se precisou de muitas simulações para verificar a estabilidade do processo. As vazões regularizadas praticamente não variam, apresentando um coeficiente de variação igual a 0,0021 (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 - Vazão regularizada (f_M) considerando $CV_{def} = 1,2$, $f_E = 0,17$, $f_k = 1,5$, $G = 90\%$, $H = 5.000$ anos e $V_0 =$ cheio e vazio (20 simulações para cada condição de volume inicial).

cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,24	0,23	0,24	0,24	0,26	0,26	0,24	0,24
0,25	0,25	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
0,25	0,25	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26

Tabela 4.2 - Vazão regularizada (f_M) considerando $CV_{def} = 0,2$, $f_E = 0,17$, $f_k = 1,5$, $G = 90\%$, $H = 5.000$ anos e $V_0 =$ cheio e vazio (6 simulações para cada condição de volume inicial).

cheio	vazio
0,73	0,73
0,73	0,73
0,73	0,73
0,73	0,73
0,73	0,73
0,73	0,73

Em virtude da permanência dos valores para condições iniciais distintas e dos baixos valores dos coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas para $H = 5.000$ anos, tanto para climas semi-áridos ($CV_{def} = 1,2$) como temperados ($CV_{def} = 0,2$), pode-se considerar que 5.000 anos é um tempo suficientemente longo para que o processo seja considerado em seu estado de equilíbrio. Sendo assim, neste trabalho adotar-se-á como **a vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*)** a vazão regularizada encontrada através da simulação do reservatório para aquele horizonte de tempo.

4.2 . A INFLUÊNCIA DO VOLUME INICIAL

A influência do volume inicial (V_0) já foi objeto de estudo de alguns pesquisadores, de maneira que se pode encontrar na literatura alguns procedimentos de como lidar com o problema. JENG (1967), usando um método analítico, criou uma equação para o processo de armazenamento baseada em cerca de 2.000 pontos os quais representavam várias combinações entre capacidade do reservatório, volume inicial assumido para o reservatório e variância dos influxos, mostrou que quando V_0 é igual a 50% da capacidade do reservatório, o processo de armazenamento converge mais rápido para o estado de equilíbrio.

Para avaliar esta assertiva simulou-se 200 vezes, para cada conjunto de CV_{def} (0,2 a 1,6), f_K (1,0 a 2,5) e H (10 a 100 anos), o comportamento do reservatório Caxitoré para o nível de garantia de 90% e volumes iniciais – cheio (K), metade da capacidade ($K/2$), metade dos influxos médios anuais ($\mu/2$) e 5% da capacidade (volume mínimo assumido para o reservatório). Os valores a serem analisados são os valores médios obtidos nas simulações de 200 traços para cada conjunto de CV_{def} , f_K , H , G e V_0 . Os valores médios de f_M adotados para $CV_{def}=1,2$, $G=90\%$, $f_E=0,17$, $f_K=1,5$, $H=10$ a 100 anos e várias condições de volume inicial encontram-se na Tabela 4.3 e Figura 4.1.

Observa-se que para os volumes iniciais – cheio, metade da capacidade e metade do volume afluente médio anual – a vazão regularizada diminui com o aumento do horizonte de simulação. No caso específico do reservatório iniciar “cheio”, o mesmo consegue regularizar, inicialmente, 34% de sua vazão média afluente (μ), passando a regularizar apenas 28% de μ quando $H=100$ anos.

Tabela 4.3 – Valores de f_M em função do horizonte de simulação e do volume inicial assumido para o reservatório, considerando $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$

H (anos)	Volume Inicial (V_0)			
	K	K/2	$\mu/2$	5%K
10	0.34	0.33	0.31	0.25
20	0.31	0.31	0.30	0.26
30	0.30	0.29	0.29	0.26
40	0.30	0.29	0.28	0.27
50	0.29	0.29	0.29	0.27
60	0.29	0.29	0.28	0.27
70	0.29	0.28	0.28	0.27
80	0.29	0.28	0.28	0.27
90	0.28	0.28	0.28	0.27
100	0.28	0.28	0.28	0.27

Ao assumir-se o reservatório praticamente vazio (volume mínimo = 5% da capacidade), no entanto, o inverso ocorre, ou seja, a vazão regularizada aumenta com o tempo. Conforme observado na Tabela 4.3 e Figura 4.1, o reservatório regulariza, inicialmente 25% de μ , aumentando sua vazão regularizada para 27% de μ quando $H=100$ anos.

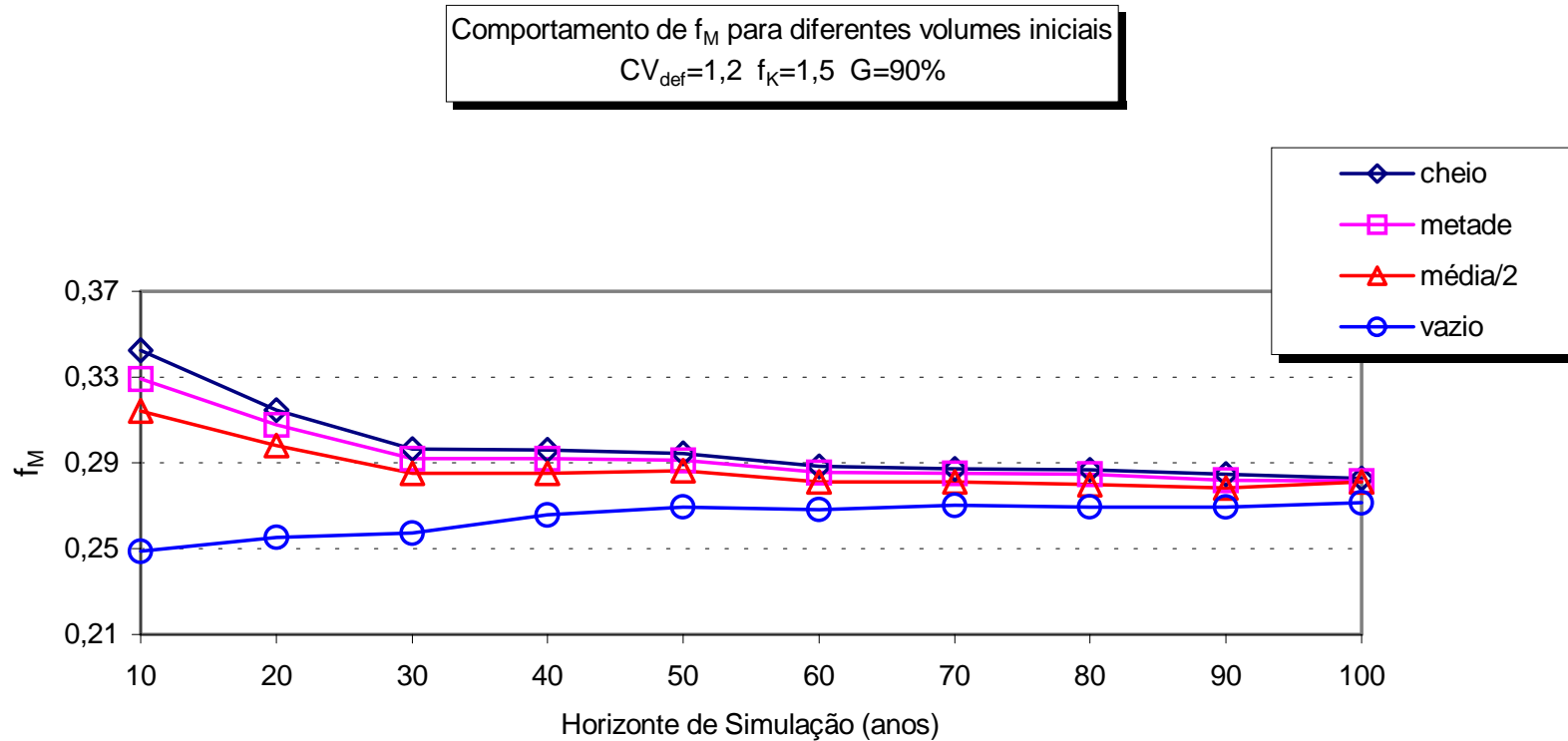


Figura 4.1 – Valores médios da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (traduzida por f_M), assumindo o coeficiente de variação dos deflúvios afluentes (CV_{def}) igual a 1,2, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$ e volumes iniciais iguais a cheio, metade da capacidade, metade do deflúvio médio anual afluente ao reservatório e vazio

4.2.1. A variabilidade das vazões regularizadas

A função primordial de um reservatório é transformar influxos muito variáveis no tempo em vazões constantes (ou não muito variáveis). Para estudar a dispersão dos valores da vazão regularizada em torno de sua média, calculou-se o coeficiente de variação das séries obtidas pela operação simulada do reservatório (CV_{reg}) para os quatro cenários de volume inicial.

Observa-se que, independentemente da condição inicial assumida, os coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas (CV_{reg}) decrescem com o tempo, assim como suas amplitudes, variando de valores situados entre 0,28 e 0,52 para horizonte de planejamento de 10 anos, para 0,13 no horizonte de 100 anos (Figura 4.2 e Tabela 4.4).

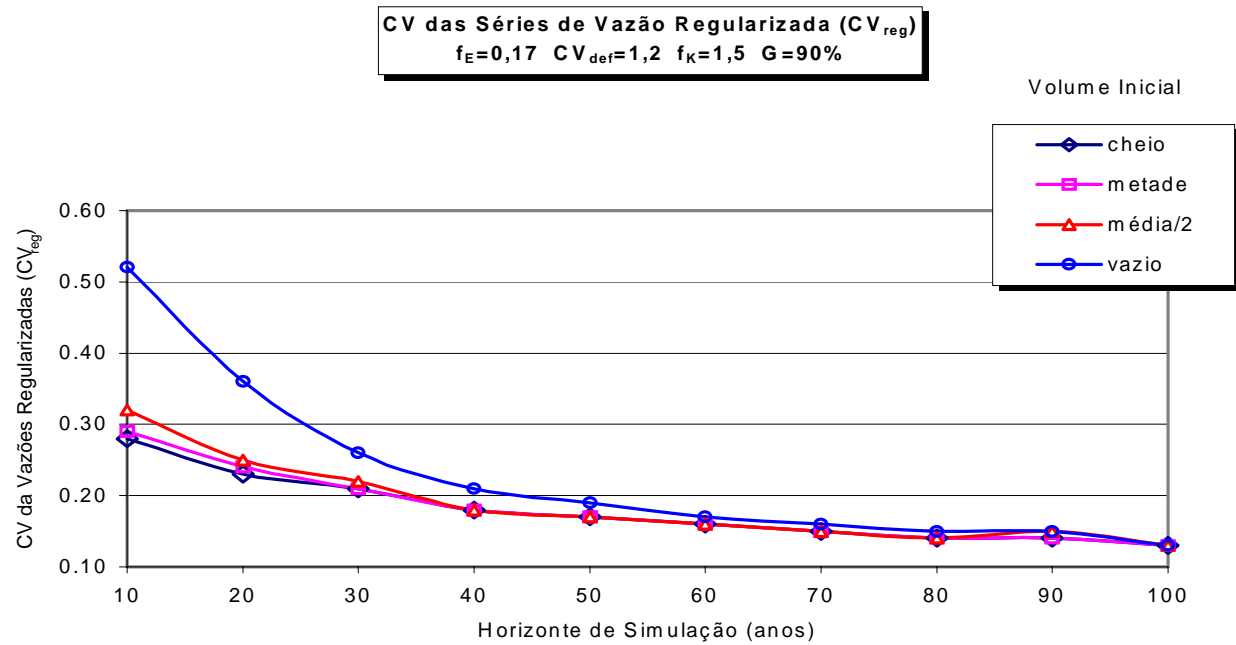


Figura 4.2 - Coeficientes de variação das vazões regularizadas (CV_{reg}), considerando $f_E=0,17$, $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $G=90\%$ e volume inicial assumido para o reservatório igual a “cheio”, “metade da capacidade”, “metade da vazão afluente média” e “vazio”.

Tabela 4.4 – Coeficiente de variação das séries de 200 valores de vazão regularizada (CV_{reg}) para H variando de 10 a 100 anos e $V_0 = K, K/2, \mu/2$ e $5\%K$, considerando $CV_{def}=1,2, f_K=1,5, f_E=0,17$ e $G=90\%$

H (anos)	Volume Inicial (V_0)			
	K	K/2	$\mu/2$	5%K
10	0.28	0.29	0.32	0.52
20	0.23	0.24	0.25	0.36
30	0.21	0.21	0.22	0.26
40	0.18	0.18	0.18	0.21
50	0.17	0.17	0.17	0.19
60	0.16	0.16	0.16	0.17
70	0.15	0.15	0.15	0.16
80	0.14	0.14	0.14	0.15
90	0.14	0.14	0.15	0.15
100	0.13	0.13	0.13	0.13

Embora todos converjam para $CV_{reg}=0,13$ quando $H=100$ anos, observa-se que a dispersão em torno da média (captada pelo CV_{reg}) é menor quando o reservatório é assumido inicialmente cheio ($CV_{reg} = 28\%$ para $H=10$ anos), dispersão esta que, para um mesmo H, vai aumentando a medida que se diminui o volume inicial (Figura 4.3). Ao adotar-se o reservatório inicialmente “vazio”, tem-se CV_{reg} da ordem de 52% (para $H=10$ anos). Isto indica que, para um mesmo H, a média das 200 simulações, assumida como o valor a ser adotado para a vazão regularizada naquele cenário, vai se tornando cada vez menos representativa a medida que se assume volumes iniciais cada vez menores.

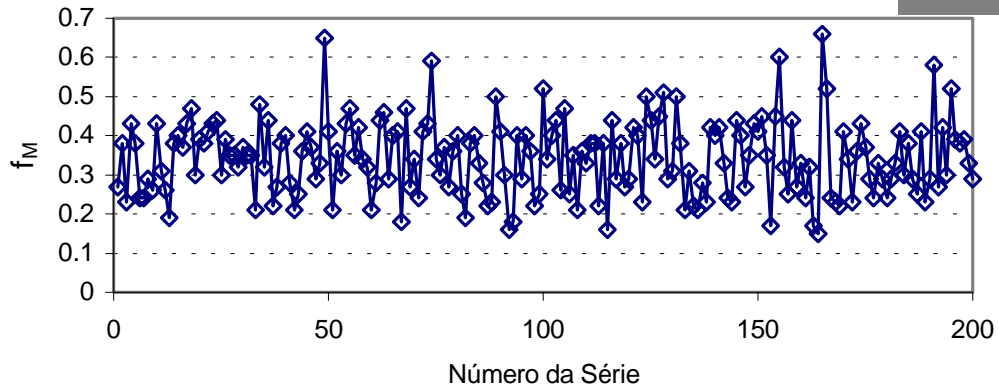
O Açude Caxitoré, no cenário analisado – $CV_{def}=1,2$, $f_E=0,17$, $f_K=1,5$, $G=90\%$ - transformou os deflúvios afluentes, altamente variáveis - com CV_{def} 's da ordem de 1,2 - em vazões regularizadas com menor variabilidade. Embora a variabilidade tenha sido sensivelmente reduzida, há que se considerar que coeficientes de variação (Cv_{reg}) da ordem de 0,21 a 0,26 (no caso de $H=30$ anos), embora pequenos, quando comparados ao valor anterior (1,2), são comparáveis a coeficientes de variação de precipitações em climas temperados (Tabela 4.5), ou seja, neste caso em particular, a variabilidade das vazões regularizadas para um horizonte de simulação de 30 anos é comparável à variabilidade das precipitações anuais em climas temperados.

Tabela 4.5 - Coeficientes de variação de precipitações anuais em algumas localidades do Brasil

Localidade	CV	Fonte
São Carlos – SP	0,21	VILLELA E MATOS (1975)
Porto Alegre – RS	0,22	ABRH (1993)
Cariús -CE	0,38	SRH
França - BA	0,41	ABRH (1993)

Variabilidade das Vazões Regularizadas
 $CV_{def}=1,2$ $f_E=0,17$ $f_K=1,5$ $H=10$ $G=90\%$

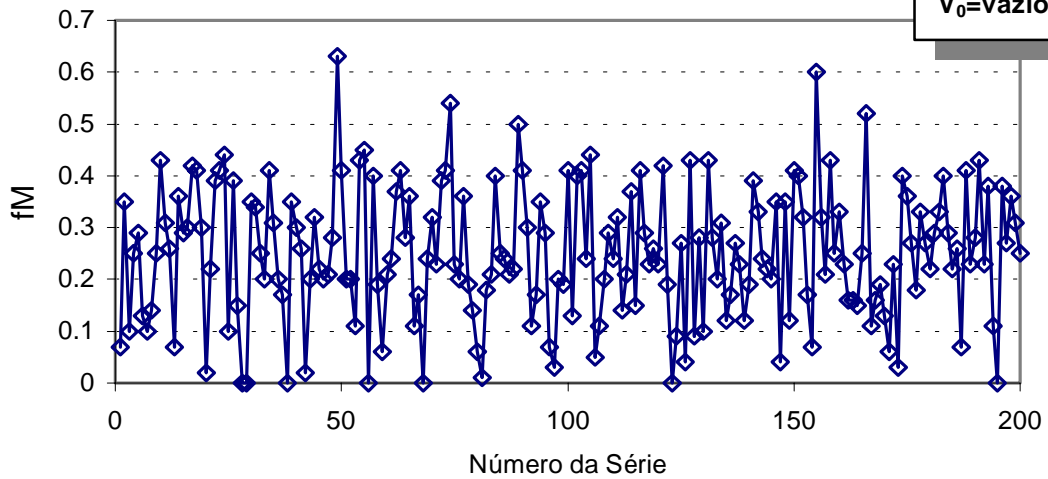
$V_0=cheio$



a)

Variabilidade das Vazões Regularizadas
 $CV_{def}=1,2$ $f_E=0,17$ $f_K=1,5$ $H=10$ $G=90\%$

$V_0=vazio$



b)

Figura 4.3 - Série de 200 valores assumidos por f_M considerando $CV_{def}=1,2$, $f_E=0,17$, $f_K=1,5$, $H=10$, $G=90\%$ e considerando o reservatório inicialmente cheio (a) e inicialmente vazio (b)

4.2.1. Os erros na estimativa da vazão regularizada

Tomando-se como referência a vazão adimensional de equilíbrio f_M^* e, considerando que ela representa a *real* capacidade de regularização daquele reservatório para o cenário estabelecido, têm-se que o **erro médio** (ε_m) cometido na estimativa da vazão regularizada é dado por:

$$\varepsilon_m = [(f_M - f_M^*)/f_M^*] \times 100 \quad (4.1)$$

onde:

f_M – fator adimensional de retirada para um dado CV, f_K , f_E , G, V_0 e H

f_M^* – vazão adimensional de equilíbrio para um dado CV, f_K , f_E e G

O **erro médio** traduz o desvio, em termos percentuais, do valor assumido para a vazão regularizada (definida como a média das 200 simulações segundo um determinado cenário de CV_{def} , f_K , f_E , G, V_0 e H) em relação a vazão de equilíbrio. Assim sendo, o erro médio representa o desvio da média das 200 simulações em relação à vazão de equilíbrio.

Os valores dos erros médios cometidos para $CV_{def}=1,2$, $G=90\%$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $H=10$ a 100 anos e $V_0=cheio(K)$, metade da capacidade($K/2$), metade da vazão média afluyente($\mu/2$) e vazio($5\%K$) encontram-se na Tabela 4. 6 e na Figura 4.4.

Observa-se que os menores erros médios em relação à vazão adimensional de equilíbrio, para este cenário, são obtidos ao considerar-se o reservatório inicialmente vazio ($5\%K$), erros estes variando de $-9,1\%$ ($H=10$ anos) a $-1,0\%$

(H=100 anos). O sinal “-“ significa que a vazão regularizada encontrada é inferior ao valor da vazão adimensional de equilíbrio (coerente com a Figura 4.1).

Tabela 4.6 – Erros médios cometidos na estimativa da vazão regularizada para $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$, considerando $V_0 = K, K/2, \mu/2$ e $5\%K$ e H variando de 10 a 100 anos

H (anos)	Volume Inicial (V_0)			
	K	K/2	$\mu/2$	5%K
10	24,6	19,8	14,7	-9,1
20	14,6	12,0	8,8	-6,8
30	7,9	6,2	4,1	-6,1
40	7,7	6,2	4,0	-3,0
50	7,1	6,1	4,5	-1,6
60	4,9	3,9	2,6	-2,1
70	4,6	3,5	2,6	-1,4
80	4,3	3,7	2,6	-1,6
90	3,6	2,6	1,6	-1,6
100	2,9	2,4	2,6	-1,0

As diferenças maiores encontradas entre a média das 200 simulações (valor adotado para a vazão regularizada) e a vazão adimensional de equilíbrio se dão ao considerar-se o reservatório inicialmente cheio. Estes erros variam de 24,6% (H=10 anos) a 2,9% (H=100 anos).

Erro Médio na Estimativa da Vazão Regularizada
 $CV_{def}=1,2$ $f_K=1,5$ $f_E=0,17$ $G=90\%$

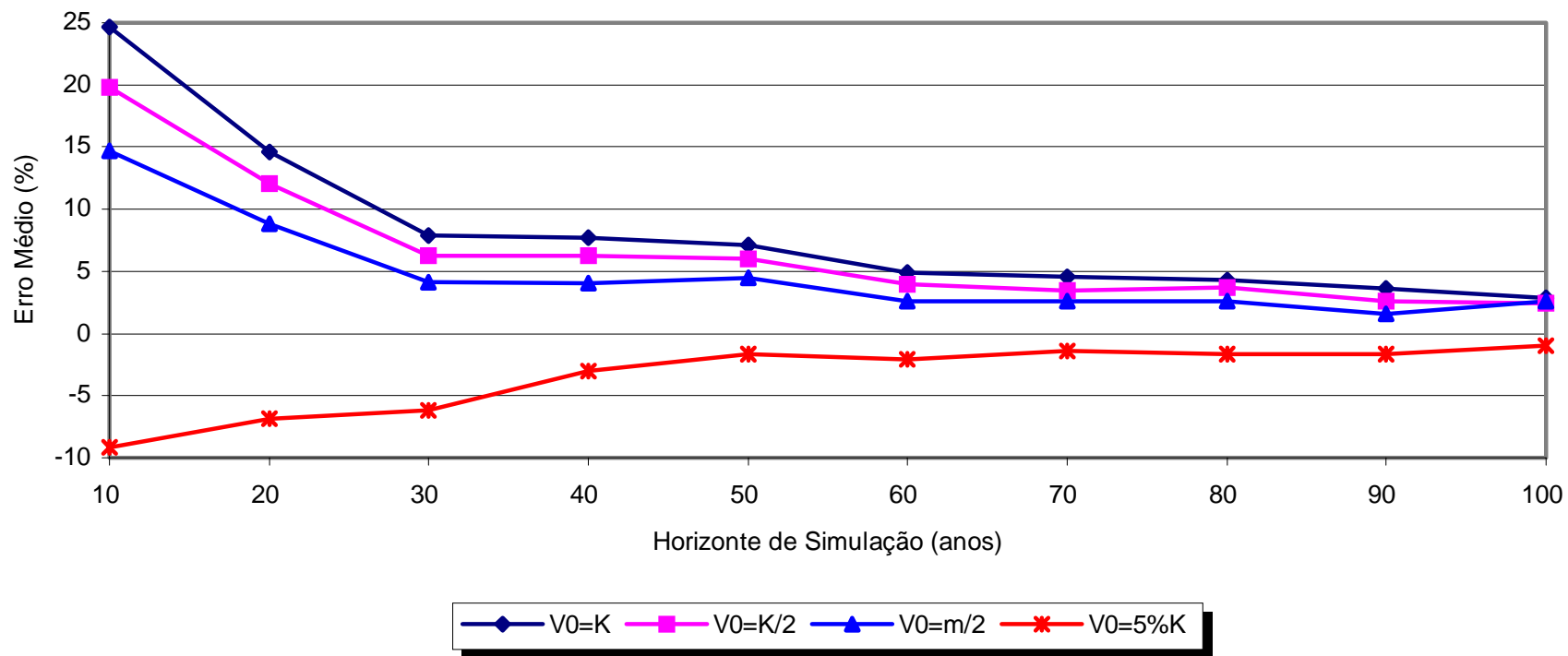


Figura 4.4 - O erro médio cometido na estimativa da vazão regularizada para $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$, considerando $V_0 = K$, $K/2$, $\mu/2$ e $5\%K$ e H variando de 10 a 100 anos

4.3. A INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS INFLUXOS

A capacidade de regularização de um reservatório é altamente influenciada pelo grau de variabilidade de suas vazões naturais. Para analisar como o processo de armazenamento é afetado por essa variabilidade, efetuou-se a operação simulada do reservatório Caxitoré considerando oito cenários de vazões afluentes, ou seja, CV_{def} variando de 0,2 a 1,6. Adotou-se $f_K=1,5$, nível de garantia de 90%, condições iniciais “cheio” e “vazio” e horizontes de simulação entre 10 e 100 anos. Os resultados obtidos encontram-se dispostos nas tabelas 4.7 e 4.8 e figuras 4.5 a 4.7.

Observa-se que, considerando todos os demais parâmetros inalterados, o processo de armazenamento é bastante influenciado pelo coeficiente de variação de seus influxos e que, independentemente do volume inicial adotado, reservatórios, cujos influxos são menos variáveis (aqueles como menores valores de CV) regularizam maiores valores de vazão que aqueles que tem influxos mais variáveis (altos valores de CV). A Figura 4.5 compara a vazão regularizada (em termos de f_M) para $CV=0,2$, $0,8$ e $1,6$. As linhas com marcadores cheios representam os valores de f_M para a condição inicial “cheio”; as linhas com marcadores vazados representam os valores de f_M para a condição inicial “vazio”.

As linhas pontilhadas da Figura 4.5 fazem referência às vazões adimensionais de equilíbrio (f_M^*) para cada cenário de CV dos deflúvios naturais (CV_{def}).

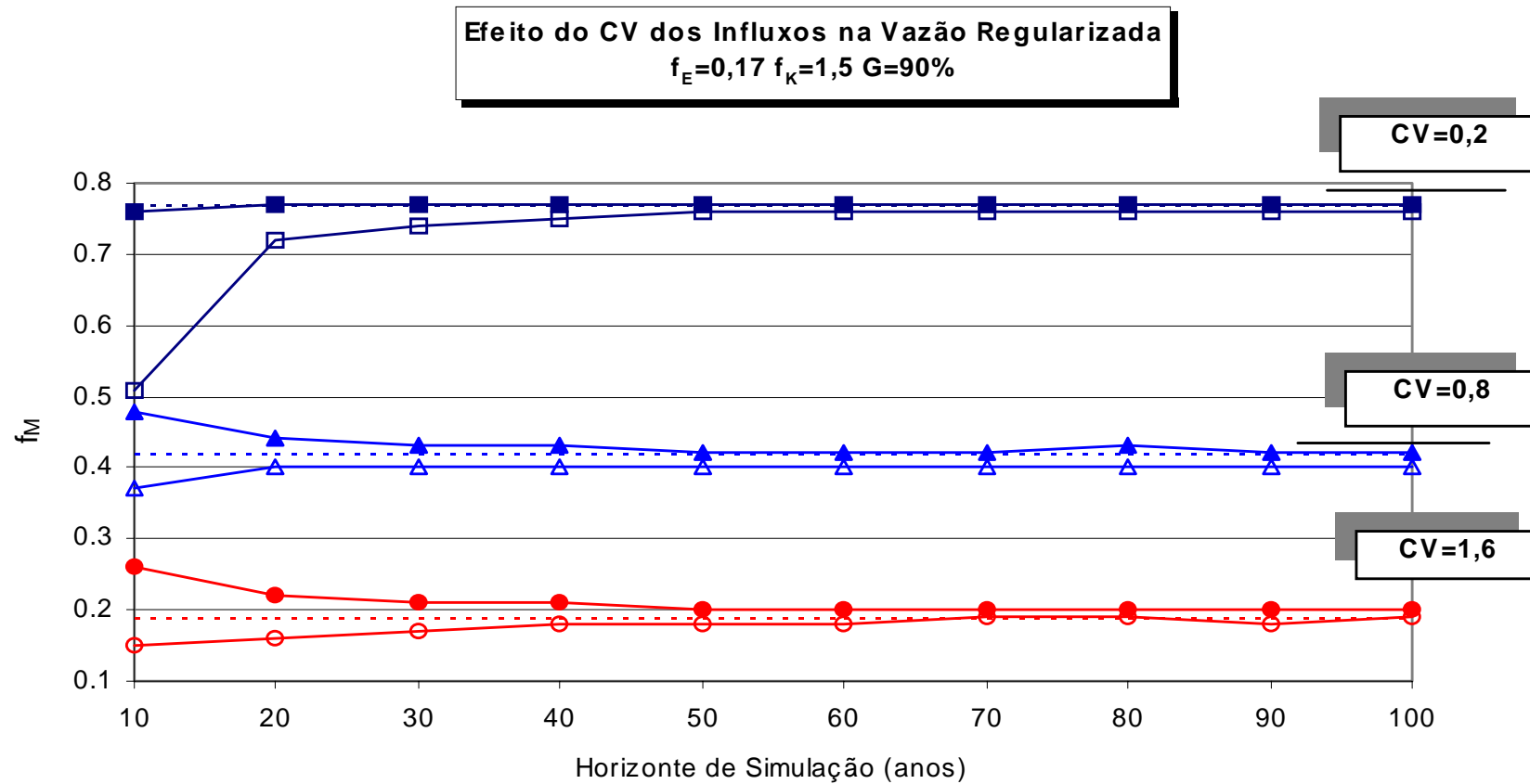


Figura 4.5 - O efeito do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) na vazão regularizada (f_M), considerando $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV=0,2, 0,8$ e $1,6$, V_0 =cheio e vazio e H variando de 10 a 100 anos

Observa-se ainda na Figura 4.5 que, para pequenos valores de coeficiente de variação dos influxos ($CV_{def}=0,2$), a vazão adimensional de equilíbrio é bastante próxima àquela regularizada quando se assume o reservatório inicialmente cheio. Para altos valores de coeficiente de variação dos influxos ($CV_{def}=1,6$), a vazão adimensional de equilíbrio está mais próxima daquela regularizada ao se assumir o reservatório praticamente vazio.

O efeito do CV dos influxos (CV_{def}) pode ainda ser melhor visualizado, considerando-se apenas a condição inicial “cheio”. A Figura 4.6 mostra claramente o decréscimo da vazão regularizada para aquele cenário conforme a variabilidade das vazões naturais aumenta.

4.3.1. A variabilidade das vazões regularizadas

Outro fator que influencia a maior ou menor dispersão dos valores de vazão regularizada em torno de sua média é a variabilidade de suas vazões naturais. A Tabela 4.10 mostra os valores do coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas (CV_{reg}) pelo reservatório Caxitoré, tendo, como influxo, vazões com diferentes graus de variabilidade. Independentemente do volume inicial e do horizonte de simulação assumidos, a variabilidade das vazões regularizadas (traduzida pelo coeficiente de variação) é maior quanto maior for a variabilidade dos influxos.

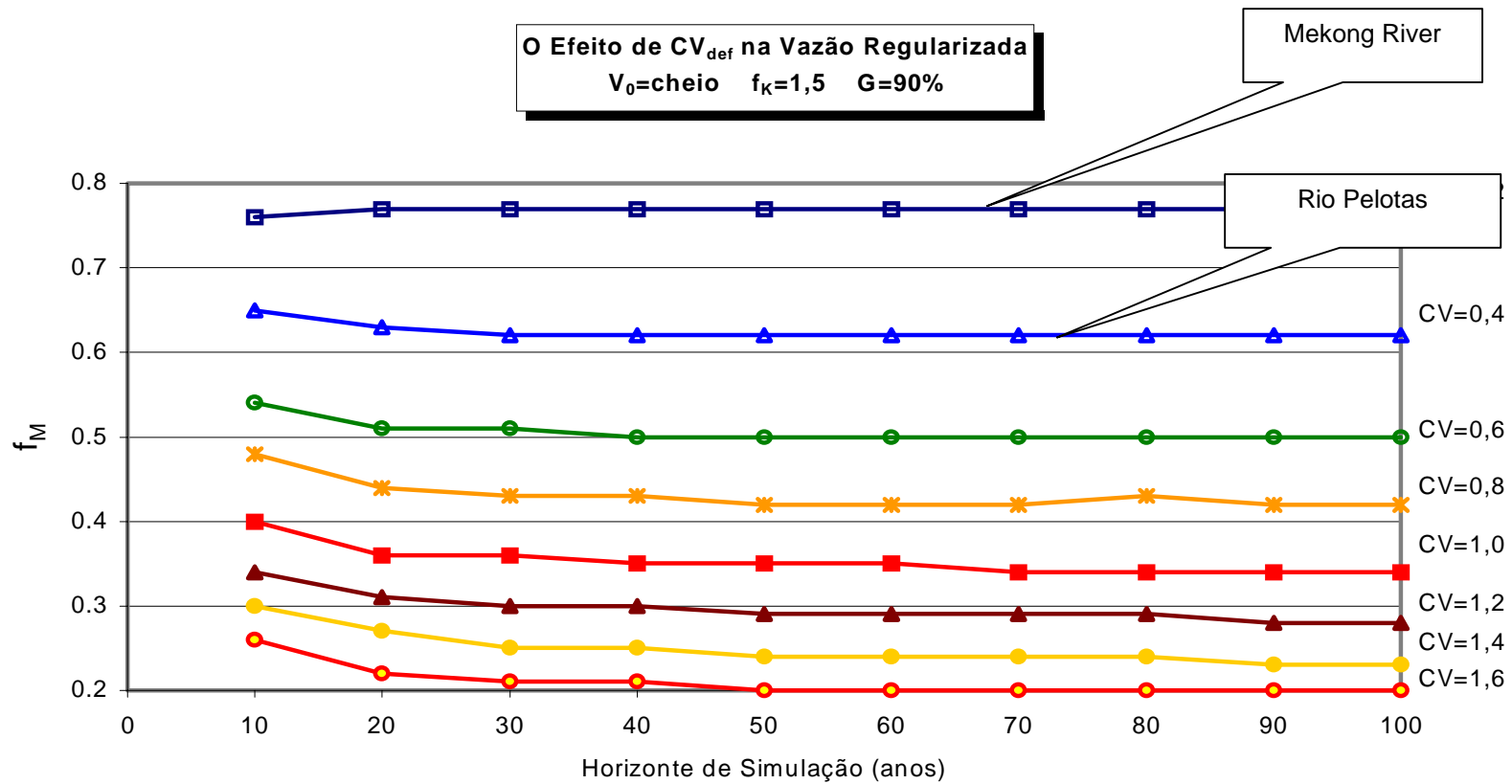


Figura 4.6 – O efeito do coeficiente de variação do influxos na vazão regularizada (f_M) considerando $f_K = 1,5$, $G=90\%$ e $V_0=cheio$

Tabela 4.7 – Valores médios da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (em hm³/ano), considerando $f_k=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, volume inicial =cheio e vazio e o coeficiente de variação das vazões naturais (CV_{def}) variando entre 0,2 e 1,6

H	$CV_{def}=0,2$		$CV_{def}=0,4$		$CV_{def}=0,6$		$CV_{def}=0,8$		$CV_{def}=1,0$		$CV_{def}=1,2$		$CV_{def}=1,4$		$CV_{def}=1,6$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	96.33	64.00	81.87	61.94	68.25	55.64	60.07	47.30	51.01	36.89	43.25	31.44	38.34	23.99	33.02	19.03
20	96.63	91.09	79.12	72.13	64.73	58.57	56.03	50.23	46.01	39.30	39.76	32.24	33.70	26.06	28.38	20.17
30	96.81	93.91	78.70	73.91	63.90	59.84	54.91	50.07	45.29	42.42	37.43	32.48	31.46	26.44	26.44	21.90
40	96.79	94.91	78.78	75.13	63.70	60.54	54.39	50.92	44.45	40.82	37.37	33.55	31.12	27.33	25.95	22.76
50	96.88	95.41	78.86	75.77	63.62	61.27	53.32	50.48	44.35	41.55	37.18	34.04	30.38	28.04	25.41	23.06
60	96.79	95.56	78.66	76.58	63.28	61.01	52.98	50.76	44.10	41.62	36.40	33.88	30.17	27.91	25.30	23.16
70	96.97	95.91	78.62	76.77	63.59	61.77	53.09	50.92	43.36	41.35	36.28	34.13	30.05	28.10	25.18	23.49
80	96.85	95.96	78.55	76.99	63.54	61.93	53.75	50.91	43.35	41.55	36.20	34.03	29.82	28.12	25.04	23.44
90	96.85	95.97	78.57	77.09	63.32	61.96	52.55	51.13	43.27	41.61	35.95	34.04	29.56	28.11	24.92	23.33
100	96.86	96.14	78.88	77.66	63.58	62.35	52.47	51.14	43.28	41.68	35.70	34.26	29.39	28.09	24.82	23.50
Q*	97.20	97.20	78.00	78.00	61.90	61.80	52.50	52.50	42.30	42.20	34.70	34.60	28.60	28.50	23.50	23.50

Tabela 4.8– Valores médios da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (em termos de fator adimensional de retirada f_m) , considerando $f_k=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, volume inicial =cheio e vazio e o coeficiente de variação das vazões naturais (CV_{def}) variando entre 0,2 e 1,6

H	$CV_{def}=0,2$		$CV_{def}=0,4$		$CV_{def}=0,6$		$CV_{def}=0,8$		$CV_{def}=1,0$		$CV_{def}=1,2$		$CV_{def}=1,4$		$CV_{def}=1,6$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	0.76	0.51	0.65	0.49	0.54	0.44	0.48	0.37	0.40	0.29	0.34	0.25	0.30	0.19	0.26	0.15
20	0.77	0.72	0.63	0.57	0.51	0.46	0.44	0.40	0.36	0.31	0.31	0.26	0.27	0.21	0.22	0.16
30	0.77	0.74	0.62	0.59	0.51	0.47	0.43	0.40	0.36	0.34	0.30	0.26	0.25	0.21	0.21	0.17
40	0.77	0.75	0.62	0.59	0.50	0.48	0.43	0.40	0.35	0.32	0.30	0.27	0.25	0.22	0.21	0.18
50	0.77	0.76	0.62	0.60	0.50	0.49	0.42	0.40	0.35	0.33	0.29	0.27	0.24	0.22	0.20	0.18
60	0.77	0.76	0.62	0.61	0.50	0.48	0.42	0.40	0.35	0.33	0.29	0.27	0.24	0.22	0.20	0.18
70	0.77	0.76	0.62	0.61	0.50	0.49	0.42	0.40	0.34	0.33	0.29	0.27	0.24	0.22	0.20	0.19
80	0.77	0.76	0.62	0.61	0.50	0.49	0.43	0.40	0.34	0.33	0.29	0.27	0.24	0.22	0.20	0.19
90	0.77	0.76	0.62	0.61	0.50	0.49	0.42	0.40	0.34	0.33	0.28	0.27	0.23	0.22	0.20	0.18
100	0.77	0.76	0.62	0.61	0.50	0.49	0.42	0.40	0.34	0.33	0.28	0.27	0.23	0.22	0.20	0.19
f_M^*	0.77	0.77	0.62	0.62	0.49	0.49	0.42	0.42	0.33	0.33	0.27	0.27	0.23	0.23	0.19	0.19

A título de ilustração, a Tabela 4.9 apresenta vários exemplos de rios com diferentes coeficientes de variação das afluências anuais (CV_{def}), variando de 0,17 no rio Mekong, no Laos, a 1,24 no rio Jaguaribe, no semi-árido brasileiro.

Tabela 4.9 - Coeficiente de variação de afluências anuais em vários rios do mundo

RIO	LOCAL	CV_{def}	FONTE
Mekong	Laos	0,17	(1)
King	Austrália	0,19	(1)
Piscataquis / Dover-Foxcroft	Maine/EUA	0,22	(2)
Sieber/ Herzberg	Alemanha	0,25	(1)
Barragem Camargos	MG/Brasil	0,25	(1)
Barragem Emborcação	MG/Brasil	0,27	(1)
Barragem Nova Ponte	MG/Brasil	0,29	(1)
São Francisco/Três Marias	MG/Brasil	0,34	(1)
Pelotas/P.Socorro	RS/Brasil	0,37	(1)
Tapacurá/Vitória de Santo Antão	PE/Brasil	0,60	(3)
Capibaribe/São Lourenço da Mata	PE/Brasil	0,80	(3)
Capibaribe/Limoeiro	PE/Brasil	1,00	(3)
Warrangaba	Austrália	1,11	(4)
Diamantina	Austrália	1,19	(4)
Jaguaribe/Orós	CE/Brasil	1,24	(5)

Fontes: (1) CAMPOS (1987); (2) HAAN (1977); (3) CPRM; (4) McMAHON(1976) e (5) SRH – Ce

Considerando apenas a vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*) para os oito cenários de coeficiente de variação dos influxos, têm-se que, para $CV_{def}=0,2$ o reservatório é capaz de regularizar 77% da vazão média afluyente (μ); para

$CV_{def}=0,4$, este valor é de $62\%\mu$; para $CV_{def}=0,6$, este valor reduz ainda mais, para $49\%\mu$; e assim sucessivamente, chegando a somente $19\%\mu$ de μ quando os influxos naturais apresentam CV_{def} da ordem de 1,6 (Figura 4.7).

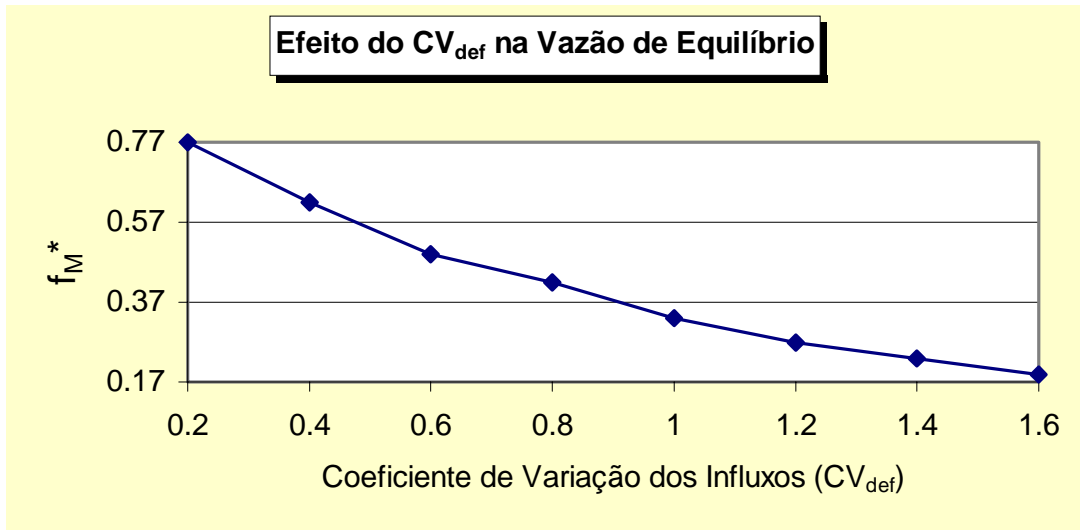


Figura 4.7 - Influência do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) na vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*)

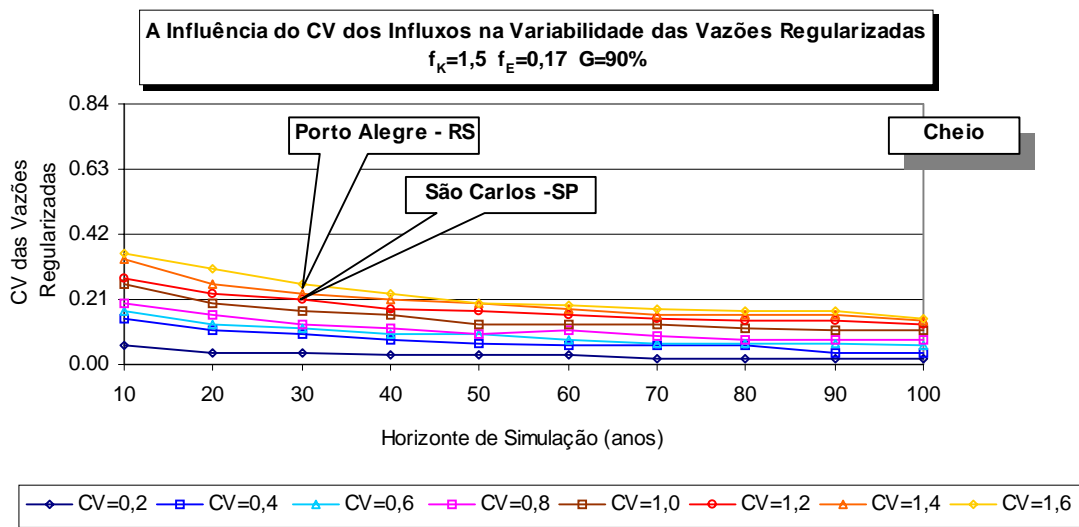
Tabela 4.10 - Coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré (CV_{reg}), considerando $f_k=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, volume inicial = cheio e vazio e coeficiente de variação das vazões naturais variando entre 0,2 e 1,6

H	$CV_{def=0,2}$		$CV_{def=0,4}$		$CV_{def=0,6}$		$CV_{def=0,8}$		$CV_{def=1,0}$		$CV_{def=1,2}$		$CV_{def=1,4}$		$CV_{def=1,6}$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	0.06	0.08	0.15	0.16	0.17	0.26	0.20	0.38	0.26	0.50	0.28	0.52	0.34	0.75	0.36	0.82
20	0.04	0.08	0.11	0.13	0.13	0.15	0.16	0.22	0.20	0.27	0.23	0.36	0.26	0.42	0.31	0.50
30	0.04	0.05	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.18	0.17	0.21	0.21	0.26	0.23	0.35	0.26	0.36
40	0.03	0.04	0.08	0.09	0.10	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.18	0.21	0.21	0.27	0.23	0.27
50	0.03	0.03	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10	0.12	0.13	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.20	0.24
60	0.03	0.03	0.06	0.07	0.08	0.08	0.11	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17	0.18	0.21	0.19	0.21
70	0.02	0.03	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.18	0.20
80	0.02	0.03	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.20
90	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.07	0.08	0.09	0.11	0.11	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.19
100	0.02	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.11	0.11	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.16

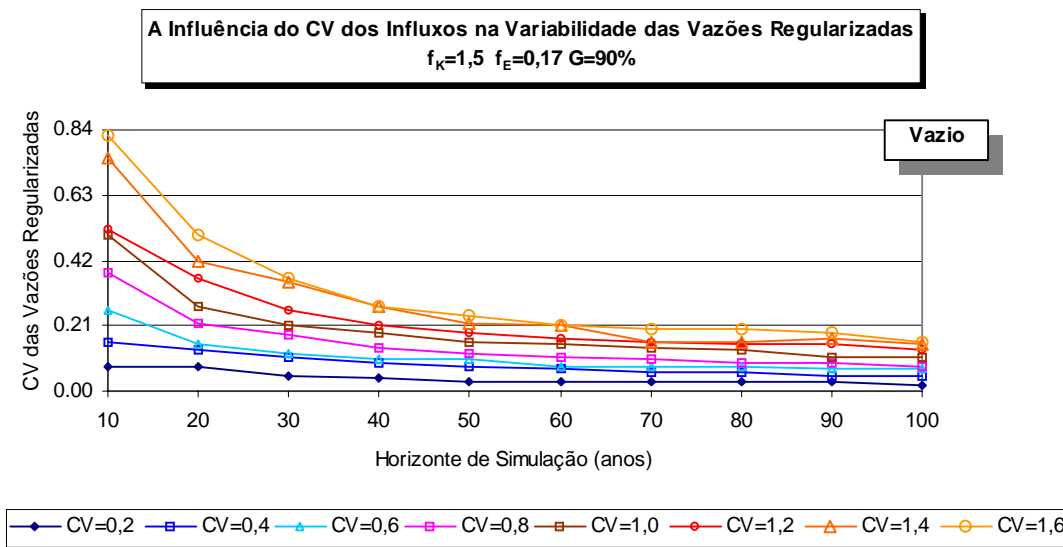
Conforme já observado no item 4.2.1 a variabilidade das vazões regularizadas é bastante influenciada pelo volume inicial assumido para o reservatório. O cenário de menor variabilidade das vazões efluentes é aquele que considera o reservatório inicialmente “cheio”.

Para vazões afluentes com baixos coeficiente de variação ($CV_{def}=0,2$), a variabilidade das vazões regularizadas também é bastante reduzida, variando de 0,06 (quando $H=10$ anos) a 0,02 (quando $H=100$ anos). Para vazões afluentes com altos coeficientes de variação ($CV_{def}=1,6$), estes valores são muito superiores, variando de 0,36 (quando $H=10$ anos) a 0,15 (quando $H=100$ anos).

Para o cenário no qual o volume inicial é considerado “vazio”, os valores acima são bem superiores, principalmente para vazões afluentes com CV_{def} mais altos. No caso de $CV_{def}=0,2$, o coeficiente de variação das vazões regularizadas (CV_{reg}) passa a assumir valores entre 0,08 e 0,02, para $H=10$ e 100 anos, respectivamente. A diferença maior é sentida no caso do $CV_{def}=1,6$, no qual as vazões regularizadas passam a assumir valores entre 0,82 e 0,16, para $H=10$ e 100 anos, respectivamente. A variabilidade das vazões regularizadas em função do CV das vazões afluentes (CV_{def}) e do volume inicial assumido pode ser observada na Figura 4.8. Vê-se claramente que para horizontes de simulação inferiores a 40 anos, as séries com CV_{def} 's a partir de 0,6 apresentam uma maior dispersão.



a)



b)

Figura 4.8 - A influência do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) na variabilidade das vazões regularizadas, considerando $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$, CV_{def} variando entre 0,2 e 1,6 e assumindo volume inicial igual a a) cheio e b) vazio

Tabela 4.11 - Erros médios na estimativa da vazão regularizada, considerando $f_E=0,17$, $f_K=1,5$, $G=90\%$, volume inicial = cheio e vazio e coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV_{def}) variando entre 0,2 e 1,6

H	$CV_{def}=0,2$		$CV_{def}=0,4$		$CV_{def}=0,6$		$CV_{def}=0,8$		$CV_{def}=1,0$		$CV_{def}=1,2$		$CV_{def}=1,4$		$CV_{def}=1,6$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	-1.30	-33.77	4.84	-20.97	10.20	-10.20	14.29	-11.90	21.21	-12.12	25.93	-7.41	30.43	-17.39	36.84	-21.05
20	0.00	-6.49	1.61	-8.06	4.08	-6.12	4.76	-4.76	9.09	-6.06	14.81	-3.70	17.39	-8.70	15.79	-15.79
30	0.00	-3.90	0.00	-4.84	4.08	-4.08	2.38	-4.76	9.09	3.03	11.11	-3.70	8.70	-8.70	10.53	-10.53
40	0.00	-2.60	0.00	-4.84	2.04	-2.04	2.38	-4.76	6.06	-3.03	11.11	0.00	8.70	-4.35	10.53	-5.26
50	0.00	-1.30	0.00	-3.23	2.04	0.00	0.00	-4.76	6.06	0.00	7.41	0.00	4.35	-4.35	5.26	-5.26
60	0.00	-1.30	0.00	-1.61	2.04	-2.04	0.00	-4.76	6.06	0.00	7.41	0.00	4.35	-4.35	5.26	-5.26
70	0.00	-1.30	0.00	-1.61	2.04	0.00	0.00	-4.76	3.03	0.00	7.41	0.00	4.35	-4.35	5.26	0.00
80	0.00	-1.30	0.00	-1.61	2.04	0.00	2.38	-4.76	3.03	0.00	7.41	0.00	4.35	-4.35	5.26	0.00
90	0.00	-1.30	0.00	-1.61	2.04	0.00	0.00	-4.76	3.03	0.00	3.70	0.00	0.00	-4.35	5.26	-5.26
100	0.00	-1.30	0.00	-1.61	2.04	0.00	0.00	-4.76	3.03	0.00	3.70	0.00	0.00	-4.35	5.26	0.00

4.3.2. Os erros na estimativa da vazão regularizada

Para o cenário adotado – $f_E=0,17$, $f_K=1,5$ e $G=90\%$ - pode-se identificar na Tabela 4.11 quatro tipos de comportamento do processo de armazenamento em função do coeficiente de variação dos influxos:

- Para CV_{def} variando entre 0,2 e 0,4, e adotando-se o reservatório inicialmente cheio, o processo já pode ser considerado no seu estado de equilíbrio, independentemente do horizonte de simulação, uma vez que os erros médios cometidos são insignificantes - inferiores a 5%.
- Para CV_{def} variando entre 0,6 e 0,8 e também adotando-se o reservatório inicialmente cheio, o processo rapidamente converge para seu estado de equilíbrio, atingindo-o no horizonte de simulação igual a 20 anos.

Em ambos os casos, mesmo ao adotar-se o reservatório inicialmente vazio, o processo também converge rapidamente para o estado de equilíbrio, uma vez que, de uma maneira geral, a partir do horizonte de simulação igual a 20 anos, os erros médios, em relação à vazão adimensional de equilíbrio, são inferiores a 8%. Os erros só se tornam relevantes ao adotar-se o horizonte de simulação igual a 10 anos, uma vez que são atingidos patamares da ordem de 34%, 21%, 10% e 14%, para $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6$ e $0,8$, respectivamente.

- No caso de CV_{def} variando entre 1,0 e 1,2 e, por outro lado, adotando-se o reservatório inicialmente vazio, processo converge rapidamente para o estado de equilíbrio, atingindo-o no horizonte de simulação igual a 20 anos.

- No caso de CV_{def} variando entre 1,4 e 1,6 o processo converge lentamente para o estado de equilíbrio, atingindo-o, independentemente de adotar-se o reservatório inicialmente cheio ou vazio, a partir de 40 a 50 anos.

4.4 . A INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO

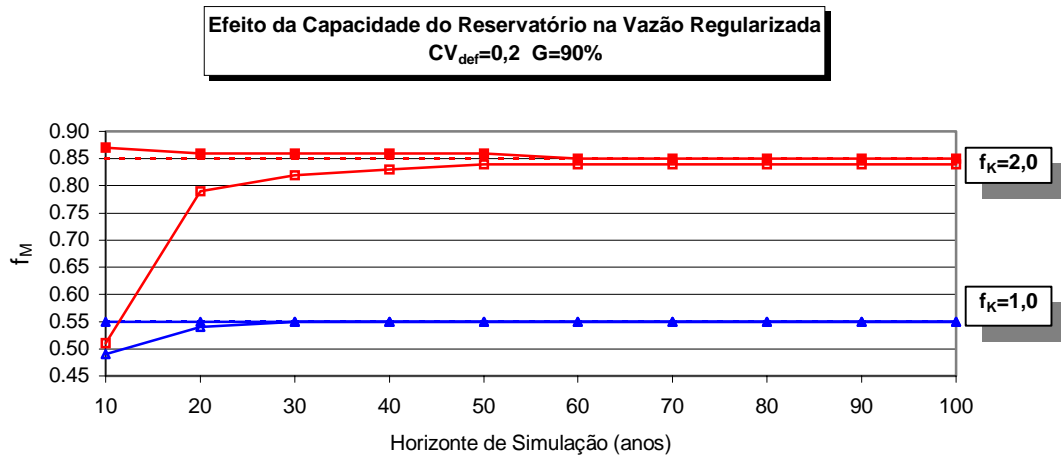
Como era de se esperar, a vazão regularizada por um reservatório é influenciada pela sua capacidade de acumulação. Para analisar esta influência no processo de armazenamento, simulou-se o Açude Caxitoré para três diferentes capacidades – $f_k = 1,0$, $f_k = 1,5$ e $f_k = 2,0$ – assumindo nível de garantia de 90%, volumes iniciais “cheio” e “vazio”. Considerou-se os influxos tendo diferentes graus de variabilidade – $CV = 0,2$ (típicos de climas temperados) e $CV = 1,2$ (típico dos rios do Ceará). Tomando-se como referência a vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*), quanto maior a capacidade, maior a vazão regularizada observada.

A Tabela 4.12 mostra que, simulando o reservatório com influxos pouco variáveis ($CV_{def} = 0,2$), ao duplicar-se a capacidade, passando de $f_k = 1,0$ para $f_k = 2,0$, a vazão regularizada sofre um acréscimo de cerca de 55%, ou seja, se antes regularizava 55% da vazão média afluyente (μ), passa a regularizar 85% de μ . O mesmo ocorre com vazões naturais com CV_{def} da ordem de 1,2. Para $f_k = 1,0$, o reservatório regulariza 21% de μ , passando a regularizar 33% de μ quando $f_k = 2,0$, um acréscimo de 57%.

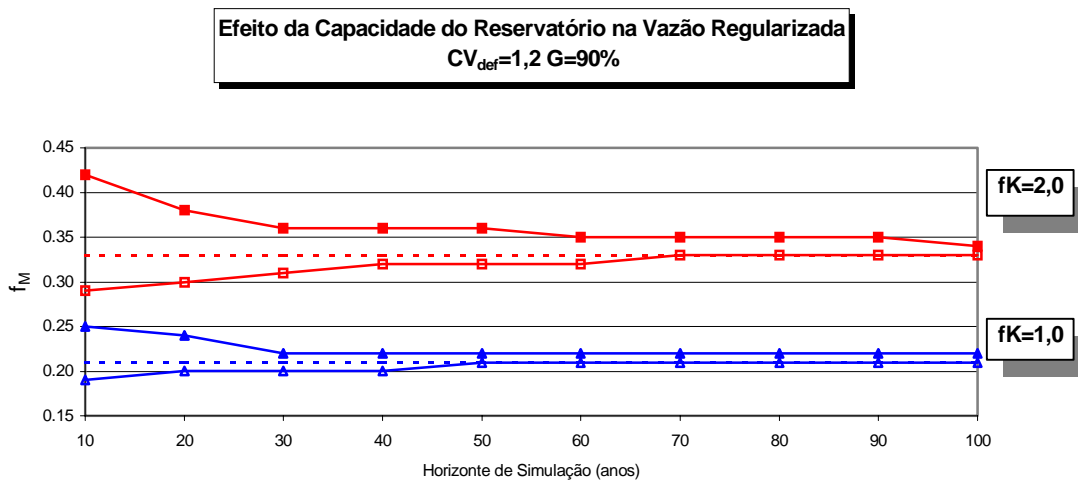
Tabela 4.12– Vazão regularizada pelo Açude Caxitoré (em termos de fator adimensional de retirada f_m) , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e $1,2$ e $f_K=1,0, 1,5$ e $2,0$

H	$CV_{def}=0,2$						$CV_{def}=1,2$					
	$f_K=1,0$		$f_K=1,5$		$f_K=2,0$		$f_K=1,0$		$f_K=1,5$		$f_K=2,0$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	0,55	0,49	0,76	0,51	0,87	0,51	0,25	0,19	0,34	0,25	0,42	0,29
20	0,55	0,54	0,77	0,72	0,86	0,79	0,24	0,20	0,31	0,26	0,38	0,30
30	0,55	0,55	0,77	0,74	0,86	0,82	0,22	0,20	0,30	0,26	0,36	0,31
40	0,55	0,55	0,77	0,75	0,86	0,83	0,22	0,20	0,30	0,27	0,36	0,32
50	0,55	0,55	0,77	0,76	0,86	0,84	0,22	0,21	0,29	0,27	0,36	0,32
60	0,55	0,55	0,77	0,76	0,85	0,84	0,22	0,21	0,29	0,27	0,35	0,32
70	0,55	0,55	0,77	0,76	0,85	0,84	0,22	0,21	0,29	0,27	0,35	0,33
80	0,55	0,55	0,77	0,76	0,85	0,84	0,22	0,21	0,29	0,27	0,35	0,33
90	0,55	0,55	0,77	0,76	0,85	0,84	0,22	0,21	0,28	0,27	0,35	0,33
100	0,55	0,55	0,77	0,76	0,85	0,84	0,22	0,21	0,28	0,27	0,34	0,33
f_M^*	0,55	0,55	0,77	0,77	0,85	0,85	0,21	0,21	0,27	0,27	0,33	0,33

Observa-se na Figura 4.9 que, independentemente do grau de variabilidade dos fluxos, a medida em que se aumenta a capacidade do reservatório, as vazões regularizadas calculadas a partir de V_0 =cheio e V_0 =vazio, se afastam da vazão adimensional de equilíbrio, para um dado horizonte de simulação. Este comportamento, não obstante seja observado para ambos os volumes iniciais adotados, é mais acentuado quando ao adotar-se, para $CV_{def}=0,2$ com V_0 =vazio e para $CV_{def}=1,2$ com V_0 =cheio.



a)



b)

Figura 4.9 – Efeito da capacidade do reservatório (traduzido por f_K) na vazão regularizada pelo reservatório (traduzido por f_M) assumindo $G=90\%$, $f_K=1,0$ e $2,0$, $f_E=0,17$, o reservatório inicialmente cheio (marcador preenchido), vazio (marcador vazado) e na sua condição de equilíbrio (linha tracejada) e coeficiente de variação dos influxos igual a a) $CV_{def}=0,2$ e b) $CV_{def}=1,2$.

4.4.1. A variabilidade das vazões regularizadas

O efeito da capacidade de armazenamento do reservatório também influencia a dispersão dos valores da série das vazões regularizadas em torno de sua média, embora esta influência não se faça sentir tão fortemente como nos casos do volume inicial assumido para o reservatório e coeficientes de variação dos influxos. A Figura 4.10 mostra o efeito conjunto do CV_{def} , V_0 e f_K na variabilidade das vazões regularizadas. Verifica-se claramente a influência do CV_{def} , uma vez que os gráficos correspondentes a $CV_{def}=0,2$ e $CV_{def}=1,2$ estão bem afastados entre si. Para um mesmo CV_{def} , o efeito do volume inicial também pode ser nitidamente identificado, notadamente quando $CV_{def}=1,2$, uma vez que as linhas contínuas ($V_0=cheio$) se situam abaixo das tracejadas ($V_0=vazio$), respectivamente. O efeito da capacidade do reservatório pode ser observada na diferença entre as linhas azuis ($f_K=1$) e vermelhas ($f_K=2$). Para um mesmo CV_{def} e um mesmo volume inicial - linha contínua ($V_0=cheio$) ou tracejada ($V_0=vazio$), os valores dos coeficientes de variação não são muito diferentes.

Os valores assumidos pelos coeficientes de variação das vazões regularizadas encontram-se dispostos na Tabela 4.13. Para baixos valores de CV_{def} (0,2) e considerando-se pequenos valores de horizonte de simulação ($H=10$ a 30 anos), o coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo reservatório assume, para $f_K=1,0$, valores entre 0,02 e 0,04. Ao duplicar-se a capacidade de armazenamento ($f_K=2,0$), estes valores passam a variar entre 0,05 e 0,08, independentemente do volume inicial assumido.

Coefficientes de Variação da Vazão Regularizada
 $f_E=0,17$ $G=90\%$ $f_K=1,0$ e $2,0$ $CV=0,2$ e $1,2$

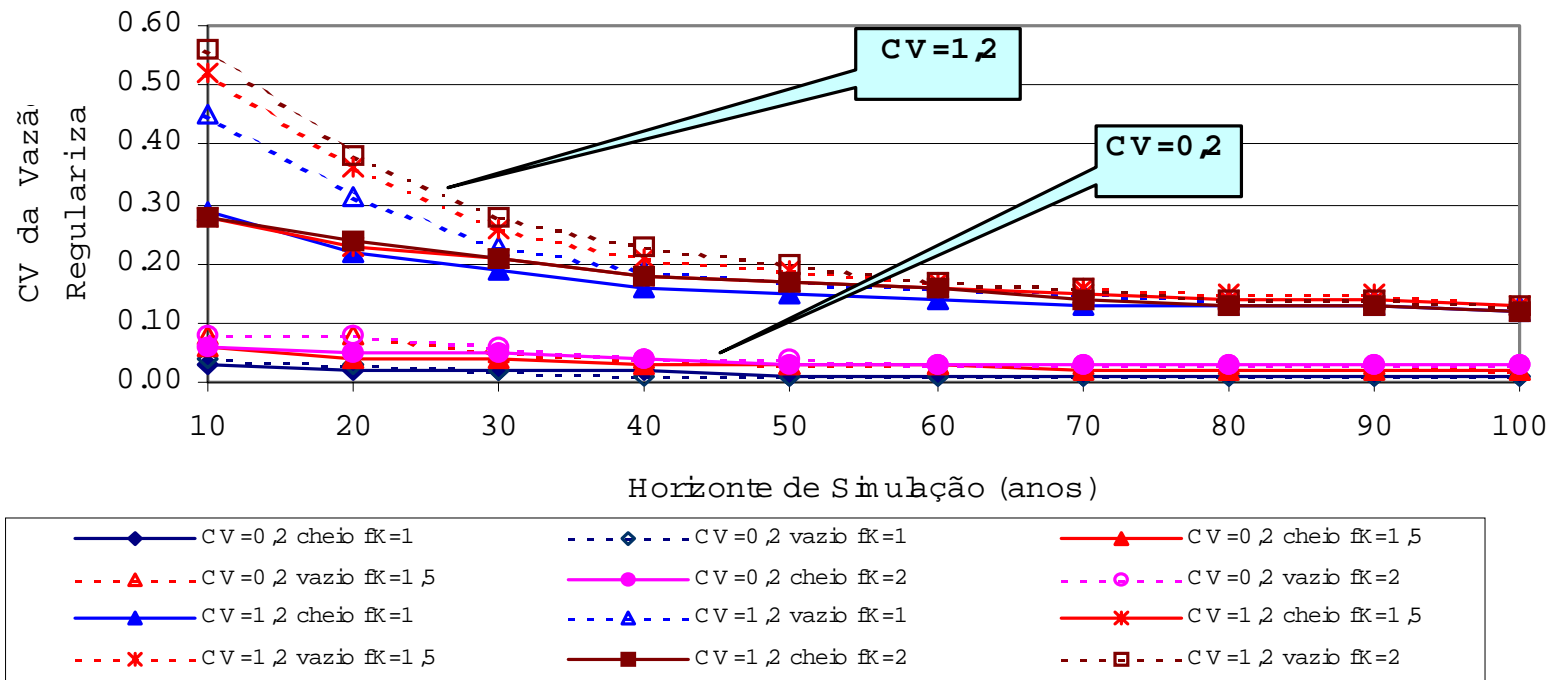


Figura 4.10 - Coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e $1,2$ e $f_K=1,0, 1,5$ e $2,0$

Tabela 4.13– Coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e $1,2$ e $f_K=1,0, 1,5$ e $2,0$

H	$CV_{def}=0,2$						$CV_{def}=1,2$					
	$f_K=1,0$		$f_K=1,5$		$f_K=2,0$		$f_K=1,0$		$f_K=1,5$		$f_K=2,0$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	0.03	0.04	0.06	0.08	0.06	0.08	0.29	0.45	0.28	0.52	0.28	0.56
20	0.02	0.03	0.04	0.08	0.05	0.08	0.22	0.31	0.23	0.36	0.24	0.38
30	0.02	0.02	0.04	0.05	0.05	0.06	0.19	0.23	0.21	0.26	0.21	0.28
40	0.02	0.01	0.03	0.04	0.04	0.04	0.16	0.19	0.18	0.21	0.18	0.23
50	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.04	0.15	0.17	0.17	0.19	0.17	0.20
60	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14	0.16	0.16	0.17	0.16	0.17
70	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.13	0.15	0.15	0.16	0.14	0.16
80	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.13	0.14	0.14	0.15	0.13	0.14
90	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.13	0.14	0.14	0.15	0.13	0.14
100	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13

A influência da capacidade do reservatório pode ser melhor avaliada ao considerar-se altos valores de $CV_{def}(1,2)$. Considerando também pequenos horizontes de simulação ($H=10$ a 30 anos) e o reservatório inicialmente cheio, o coeficiente de variação das vazões regularizadas assume, para $f_K=1,0$, valores entre $0,19$ e $0,29$. Ao duplicar-se a capacidade do reservatório estes mesmos valores passam a ser $0,21$ e $0,28$. Ao considerar-se o reservatório inicialmente vazio, os valores de CV das vazões regularizadas (CV_{reg}), para $f_K=1,0$ e $2,0$, variam entre $0,23$ e $0,45$ ($f_K=1,0$) e $0,28$ e $0,56$ ($f_K=2,0$).

4.4.2. Os erros na estimativa da vazão regularizada

Calculou-se os erros cometidos, em relação à vazão adimensional de equilíbrio, ao dobrar-se a capacidade do reservatório. Independentemente dos coeficientes de variação dos influxos, os erros cometidos aumentam com o acréscimo da capacidade, principalmente na fase transiente do processo de armazenamento. Na Tabela 4.14, os erros médios acima de 6% estão grafados em vermelho.

Tabela 4.14– Erros médios na estimativa da vazão regularizada, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=0,2$ e $1,2$ e $f_K=1,0, 1,5$ e $2,0$

H	$CV_{def}=0,2$						$CV_{def}=1,2$					
	$f_K=1,0$		$f_K=1,5$		$f_K=2,0$		$f_K=1,0$		$f_K=1,5$		$f_K=2,0$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	0.00	-10.91	-1.30	-33.77	2.35	-40.00	19.05	-9.52	25.93	-7.41	27.27	-12.12
20	0.00	-1.82	0.00	-6.49	1.18	-7.06	14.29	-4.76	14.81	-3.70	15.15	-9.09
30	0.00	0.00	0.00	-3.90	1.18	-3.53	4.76	-4.76	11.11	-3.70	9.09	-6.06
40	0.00	0.00	0.00	-2.60	1.18	-2.35	4.76	-4.76	11.11	0.00	9.09	-3.03
50	0.00	0.00	0.00	-1.30	1.18	-1.18	4.76	0.00	7.41	0.00	9.09	-3.03
60	0.00	0.00	0.00	-1.30	0.00	-1.18	4.76	0.00	7.41	0.00	6.06	-3.03
70	0.00	0.00	0.00	-1.30	0.00	-1.18	4.76	0.00	7.41	0.00	6.06	0.00
80	0.00	0.00	0.00	-1.30	0.00	-1.18	4.76	0.00	7.41	0.00	6.06	0.00
90	0.00	0.00	0.00	-1.30	0.00	-1.18	4.76	0.00	3.70	0.00	6.06	0.00
100	0.00	0.00	0.00	-1.30	0.00	-1.18	4.76	0.00	3.70	0.00	3.03	0.00

Para $CV=0,2$ e V_0 =cheio, ao dobrar-se a capacidade do reservatório, os erros médios passam de 0% para 2,4% ($H=10$ anos) e de 0% para 1,2% ($H=20$). O mesmo acontece quando se considera V_0 =vazio. Ao dobrar-se a capacidade do

reservatório, os erros médios passam de 11% para 40% (H=10 anos) e de 2% para 7% (H=20 anos).

Para $CV_{def}=1,2$ e $V_0=$ cheio, ao dobrar-se a capacidade do reservatório, os erros médios passam de 19% para 27% (H=10 anos) e de 14,3% para 15,2% (H=20 anos). Ao considerar-se $V_0=$ vazio, e também ao dobrar-se a capacidade de armazenamento, os erros médios passam de 9,5% para 12% (H=10 anos) e de 4,7% para 9% (H=20 anos).

4.5. A INFLUÊNCIA DA GARANTIA

Considerando-se os demais parâmetros constantes ($CV_{def}=1,2$, $f_k=1,0$, $f_E=0,17$ e $V_0=$ cheio), estudou-se o comportamento da vazão regularizada para 3 níveis de Garantia - 85, 90 e 95%, utilizando horizontes de simulação iguais a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 e 5.000 anos. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.15.

Observa-se na Figura 4.11 que, independentemente do horizonte de simulação assumido, a vazão regularizada decresce com a garantia, o que já era de se esperar, uma vez que a frequência de falhas tende a diminuir quando se reduz o volume de água a ser retirado do lago. Considerando-se apenas a vazão adimensional de equilíbrio (Tabela 4.15) verifica-se que quando se aumenta o nível de garantia de 85% para 95%, a vazão regularizada pelo reservatório decresce de 31% para 24% da vazão média anual afluyente ao reservatório (μ), ou seja, há uma redução de 22,6% na vazão regularizada.

Tabela 4.15 – Valores de f_M em função do horizonte de simulação e da Garantia considerando $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $V_0=cheio$.

H (anos)	Garantia (%)		
	85	90	95
10	0.35	0.34	0.32
20	0.34	0.31	0.28
30	0.32	0.30	0.25
40	0.33	0.30	0.26
50	0.32	0.29	0.25
60	0.32	0.29	0.25
70	0.32	0.29	0.24
80	0.32	0.29	0.24
90	0.32	0.28	0.24
100	0.32	0.28	0.24
f_M^*	0.31	0.27	0.24

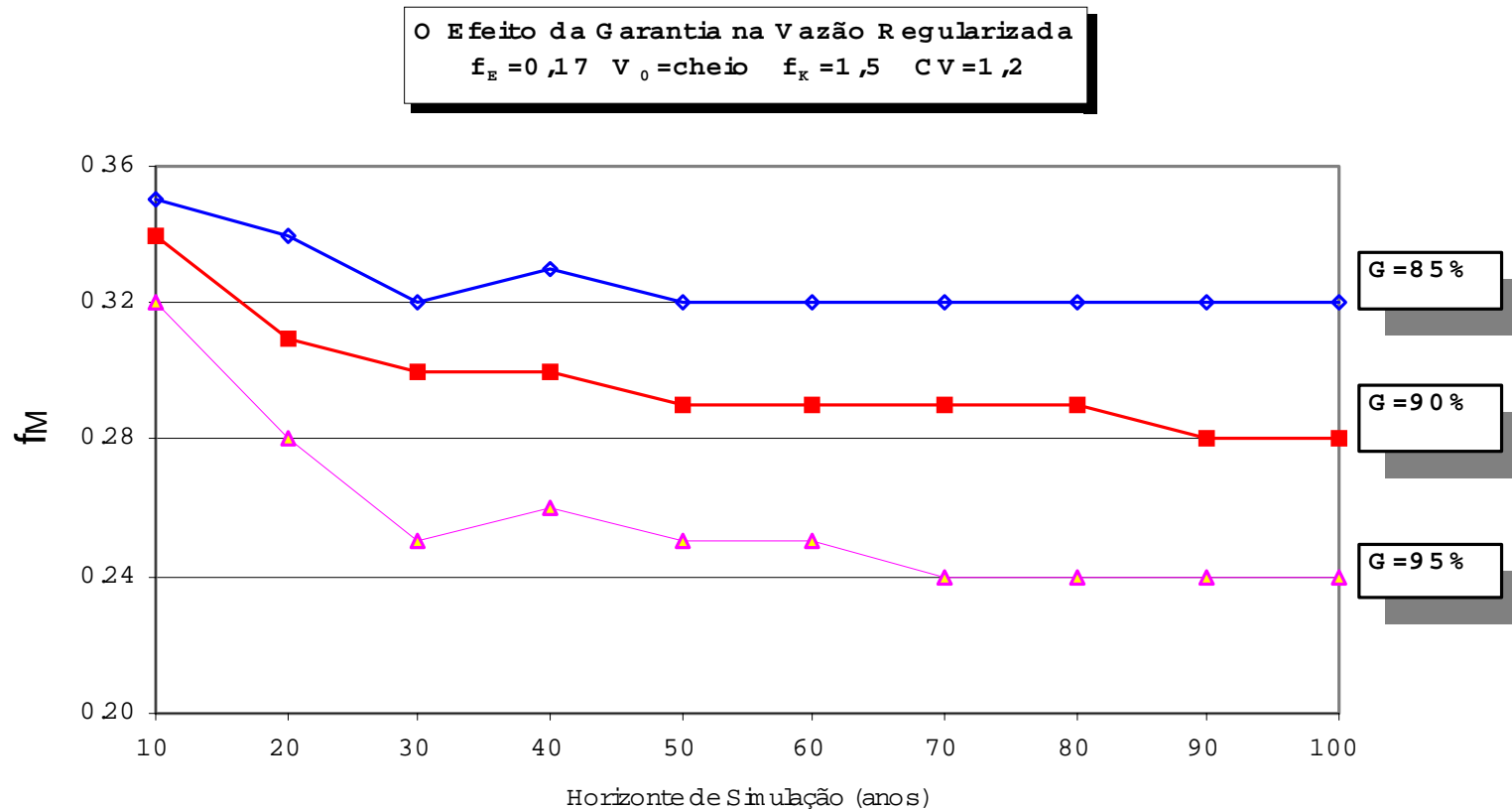


Figura 4.11 – O efeito da Garantia na vazão regularizada (f_M) considerando $f_E=0,17$, $f_K = 1,5$, $CV_{def}=1,2$, $V_0=cheio$ e $G=85\%$, 90% e 95%

4.5.1. A variabilidade das vazões regularizadas

Ao analisar-se o comportamento dos coeficientes de variação das vazões regularizadas, observa-se que os mesmos têm comportamento contrário ao da vazão regularizada, ou seja, independentemente do horizonte de simulação, a variabilidade das vazões regularizadas tende a aumentar com o aumento da garantia (Tabela 4.16 e Figura 4.12).

Tabela 4.16 – Valores dos coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas (CV_{reg}), considerando $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, $V_0=$ cheio e G variando entre 85 e 95%.

H (anos)	Garantia (%)		
	85	90	95
10	0.29	0.28	0.28
20	0.21	0.23	0.26
30	0.20	0.21	0.23
40	0.17	0.18	0.21
50	0.16	0.17	0.20
60	0.15	0.16	0.18
70	0.14	0.15	0.17
80	0.13	0.14	0.16
90	0.13	0.14	0.16
100	0.12	0.13	0.15

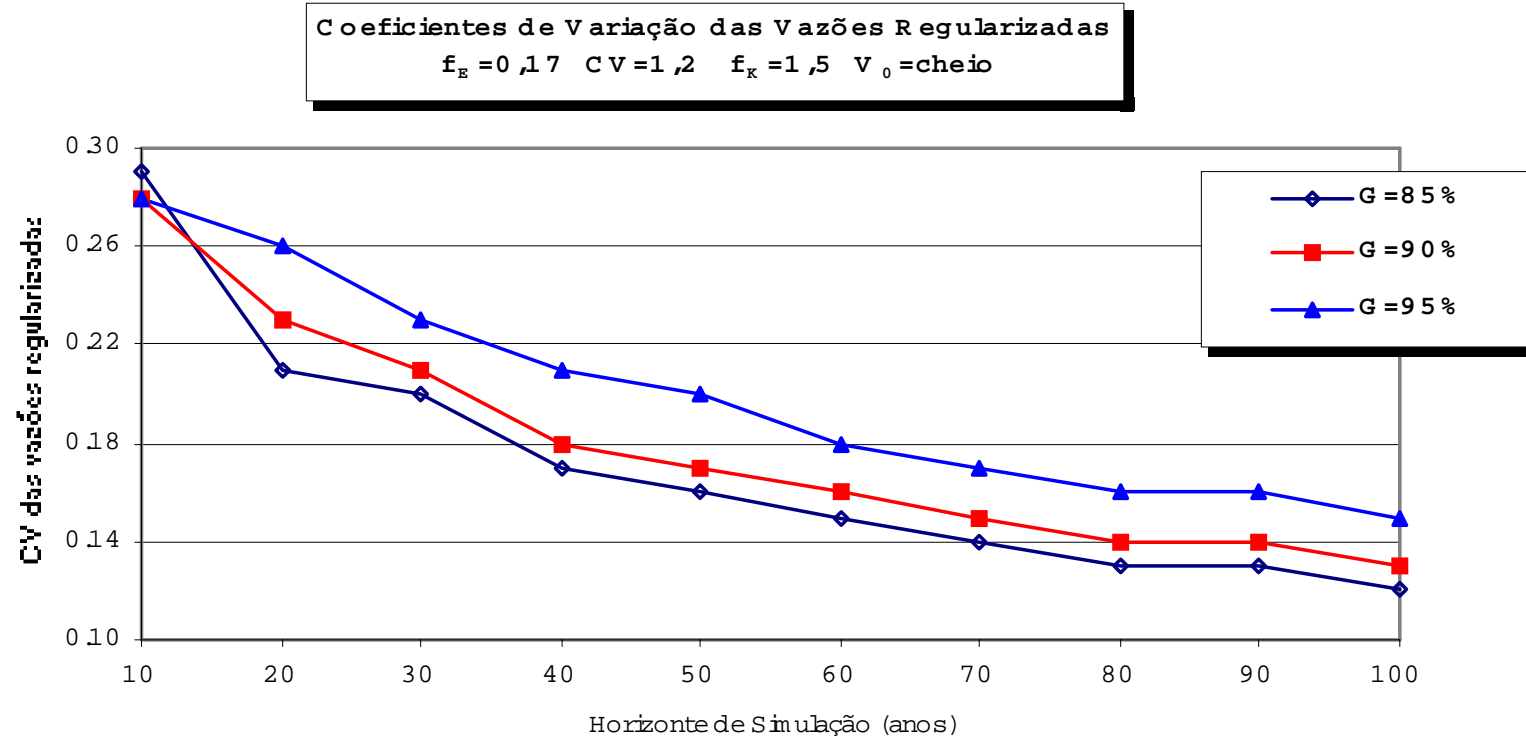


Figura 4.12 – Coeficientes de variação das vazões regularizadas (CV_{reg}) considerando $f_E=0,17$, $f_K = 1,5$, $CV_{def}=1,2$, $V_0=cheio$ e $G=85\%$, 90% e 95%

Não se deve concluir erroneamente que os riscos de não se obter a vazão regularizada de projeto aumentam com o acréscimo do nível de garantia – obviamente um paradoxo. A maior dispersão dos valores em torno da média observadas nas séries com altos valores de CV_{def} indicam apenas que, para maiores níveis de Garantia, são necessárias séries de maior extensão.

4.6. OS ESTIMADORES DA VAZÃO DE EQUILÍBRIO

A estimativa do parâmetro populacional desejado - no caso em questão, a *vazão de equilíbrio* – é na sua essência, extremamente simples. Porém a *qualidade* dos resultados depende, fundamentalmente, da escolha conveniente do estimador. Assim sendo, dentre os vários estimadores que podem ser imaginados para o parâmetro *vazão de equilíbrio*, deve-se escolher aquele que melhor satisfaça às principais propriedades de um bom estimador, quais sejam: *Justeza*, *Eficiência* e *Consistência*.

Ao analisar-se as propriedades de um bom estimador, dois potenciais candidatos a estimadores se destacam – um por parecer ser *justo*, outro, por parecer ser mais *eficiente*. Estes estimadores, doravante denominados neste texto, respectivamente de $f_M^*_{VIMC}$ e $f_M^*_{\chi}$ serão abordados, em maior profundidade, nos itens que se seguem.

4.6.1. O Estimador $f_M^*_{VIMC}$

Ao observar-se o comportamento da vazão regularizada no capítulo anterior, verifica-se que, no estado transiente do processo de armazenamento, independentemente do CV dos deflúvios naturais e das capacidade e garantia adotadas, as vazões regularizadas assumem valores maiores (se V_0 =cheio) ou

menores (se V_0 =vazio) que a vazão adimensional de equilíbrio. Logo, deve existir um volume inicial, entre cheio e vazio, no qual os valores das vazões regularizadas sejam iguais (ou muito próximos) ao da vazão adimensional de equilíbrio. Este volume inicial seria aquele no qual o processo de armazenamento convergiria mais rapidamente para o estado de equilíbrio, sendo chamado neste texto, a partir de agora, de **Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC)**.

Considerando-se o cenário $H=10$ anos, $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$ (Figura 4.13) e assumindo-se o reservatório em suas condições extremas, observa-se que quando o mesmo é considerado inicialmente cheio, sua vazão regularizada corresponde a 34% da vazão média afluente anual ($f_M=0,34$). Por outro lado, assumindo-se o reservatório inicialmente vazio, f_M corresponde a 25% da vazão média afluente anual (μ). Considerando-se os demais parâmetros constantes e apenas variando-se o valor do horizonte de simulação (agora $H=50$ anos – ainda no estado transiente), estes valores passam a ser iguais a 29% (cheio) e 27% (vazio), bem mais próximos da vazão adimensional de equilíbrio $f_M^*=0,27$. Simulando-se novamente o reservatório e, assumindo-se, desta feita, $V_0=15\%K$, os valores de f_M se estabilizam em 28% de μ , correspondendo a um erro médio (ϵ_m) em torno de 3,7%. Considerando *aceitáveis* erros médios situados no intervalo – 6% a +6%, pode-se dizer então que, para esta condição inicial, o processo pode ser considerado no seu estado de equilíbrio, mesmo para pequenos valores de H ; ou seja, $V_0=15\%K$ é o VIMC para o cenário $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$.

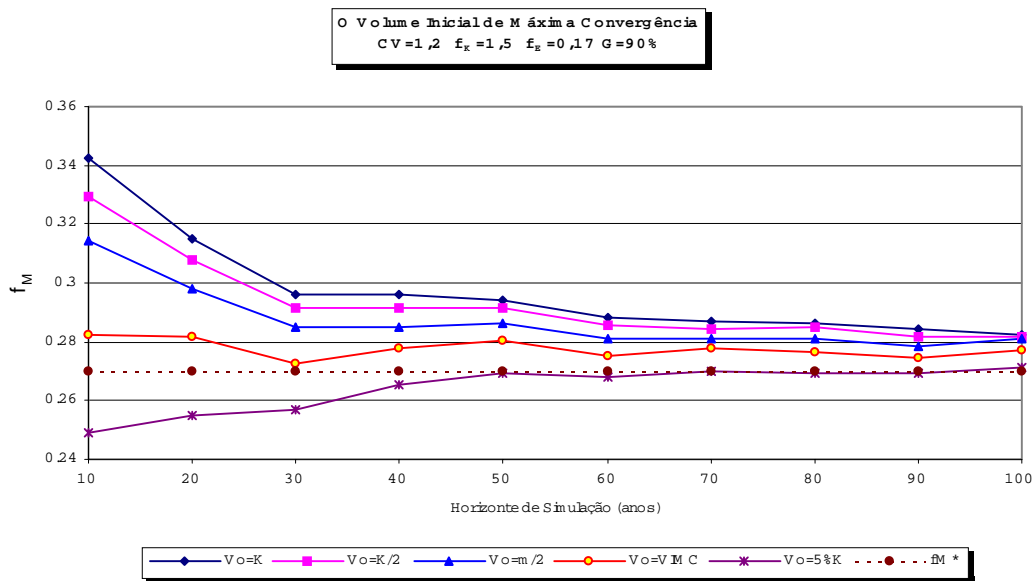


Figura 4.13 – O Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC) para $CV_{def}=1,2$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$

Para determinar-se o VIMC para diversos cenários, simulou-se o reservatório Caxitoré considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $H=10$ a 100 anos, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$, e procurou-se, para cada combinação de CV_{def} e f_K , o volume inicial V_0 no qual o Erro Médio - da vazão regularizada em relação à vazão adimensional de equilíbrio – se situasse em torno dos 6% admissíveis, com H variando de 10 a 100 anos. Os VIMC, para cada cenário, encontram-se dispostos na Tabela 4.17.

Como pode ser observado na Tabela 4.17, o valor do VIMC não assume um valor fixo de 50% da capacidade do reservatório, como afirmado por JENG (1967). Pelo contrário, é dependente do coeficiente de variação dos influxos e da capacidade do reservatório.

Tabela 4.17 – Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC), em fração da capacidade do reservatório (K), considerando $CV_{def}=0,2$ a $1,6$, $f_K=1,0$ a $2,5$, $f_E=0,17$, e $G=90\%$.

CV_{def}	$f_K=1,0$	$f_K=1,5$	$f_K=2,0$	$f_K=2,5$
0,2	0,25K – 1,00K	0,25K – 1,00K	0,25K – 1,00K	0,25K – 1,00K
0,4	0,25K – 1,00K	0,25K – 1,00K	0,20K – 0,50K	0,20K – 0,40K
0,6	0,05K – 0,20K	0,15K – 0,30K	0,15K – 0,35K	0,15K – 0,30K
0,8	0,05K – 0,15K	0,15K – 0,25K	0,15K – 0,30K	0,15K – 0,25K
1,0	0,10K – 0,20K	0,15K – 0,25K	0,15K – 0,25K	0,15K – 0,25K
1,2	0,15K – 0,20K	0,10K – 0,20K	0,15K – 0,20K	0,15K – 0,20K
1,4	0,10K – 0,15K	0,15K – 0,20K	0,15K – 0,20K	0,15K – 0,20K
1,6	0,15K – 0,20K	0,15K – 0,20K	0,15K – 0,20K	0,20K

Observa-se que, para $CV_{def}=0,2$, o processo de armazenamento é pouco sensível à variação do volume inicial, ou seja, assumindo-se valores distintos para este parâmetro – V_0 variando entre K a $\frac{1}{4}$ K – a vazão regularizada encontrada pode ser considerada como sendo a própria vazão adimensional de equilíbrio.

Para os outros valores de CV_{def} (exceto para $CV_{def}=0,4$ e $f_K = 1,0$ e $1,5$), o VIMC está definido em intervalos bem menores, o que significa que o processo de armazenamento é sensível ao volume inicial. Observa-se ainda que, para CV_{def} 's a partir de 0,6, o volume inicial igual a 15%K está incluído em todos os intervalos de VIMC (com uma única exceção de $CV_{def}=1,6$ e $f_K=2,5$).

A Tabela 4.18 mostra os erros médios cometidos na estimativa da vazão regularizada, em relação à vazão adimensional de equilíbrio, ao simular-se o reservatório, não com o VIMC - mas com V_0 =cheio - considerando-se $CV_{def}=0,4$ a $0,8$, $f_K=1,0$ a $2,5$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$. Na tabela em questão apenas os valores

correspondentes a $H=10$ a 50 anos são mostrados, por apresentarem os maiores valores de ε_m . Os erros médios superiores a $\pm 6\%$ estão grafados em vermelho.

Em relação aos cenários analisados, a determinação do VIMC parece não ser de fundamental importância em algumas situações, a saber:

- Para $CV_{def}=0,4$ e $f_K = 1,0$ e $1,5$ – considerando-se $V_0=cheio$, o processo de armazenamento já se encontra no seu estado de equilíbrio, independentemente do H assumido. Para maiores valores de f_K , o processo de armazenamento converge para o estado de equilíbrio em $H=20$ anos
- Para $CV_{def}=0,6$ e $f_K = 1,0$ – considerando-se $V_0=cheio$, o processo de armazenamento converge para o estado de equilíbrio em $H=30$ anos. Para os demais valores de f_K , isto ocorre a partir de $H=20$ anos.
- Para $CV_{def}=0,8$ e $f_K = 1,0$ a $2,5$ – considerando-se $V_0=cheio$, o processo de armazenamento converge para o estado de equilíbrio em $H=30$ anos.

É observado que, para os cenários acima citados, só precisar-se-ia determinar o VIMC quando o erro médio cometido fosse maior que os 6% admissíveis, ou seja, $H = 10$ ou 20 anos, conforme o cenário.

Tabela 4.18 – Erros Médios (ε_m) na estimativa da vazão regularizada, considerando V_0 =cheio, $CV_{def}=0,4$, $f_K=1,0$ a $2,5$, $f_E=0,17$, e $G=90\%$.

CV _{def} =0,4 V ₀ =cheio				
H	f _K =1,0	f _K =1,5	f _K =2,0	f _K =2,5
10	-0,37	3,79	6,07	8,09
20	-0,09	0,30	1,31	2,44
30	-0,16	-0,23	0,15	0,82
40	-0,40	-0,13	0,16	0,31
50	-0,25	-0,03	0,21	0,39
CV _{def} =0,6 V ₀ =cheio				
H	f _K =1,0	f _K =1,5	f _K =2,0	f _K =2,5
10	11,56	10,26	10,25	12,87
20	8,48	4,57	2,67	3,93
30	4,82	3,23	2,79	3,45
40	4,67	2,91	2,33	2,65
50	3,81	2,78	2,36	2,42
CV _{def} =0,8 V ₀ =cheio				
H	f _K =1,0	f _K =1,5	f _K =2,0	f _K =2,5
10	17,22	14,42	15,00	17,68
20	9,95	6,72	5,61	6,34
30	5,13	4,59	4,34	5,36
40	4,97	3,60	3,19	4,15
50	2,45	1,56	1,73	1,99

Para maiores valores de CV_{def} , no entanto, a determinação do VIMC é fundamental, uma vez que a escolha inadequada do volume inicial pode levar o planejador a conclusões inadequadas quanto a real capacidade de regularização do reservatório. Na tentativa de não adentrar pela prolixidade, é mostrado o efeito

do volume inicial assumido para o reservatório, ao assumir-se condições iniciais extremas (cheio e vazio), nos erros médios cometidos na estimativa da vazão regularizada, apenas para $f_K=1,5$. Para a demais capacidades o comportamento é semelhante ao mostrado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Erros Médios (ϵ_m) na estimativa da vazão regularizada, considerando V_0 =cheio e vazio, $CV_{def}=1,0$ a $1,6$, $f_K=1,5$, $f_E=0,17$, e $G=90\%$.

H	$CV_{def}=1,0$		$CV_{def}=1,2$	
	V_0 =cheio	V_0 = vazio	V_0 =cheio	V_0 = vazio
10	21,21	-12,12	25,93	-7,41
20	9,09	-6,06	14,81	-3,70
30	9,09	3,03	11,11	-3,70
40	6,06	-3,03	11,11	0,00
50	6,06	0,00	7,41	0,00
H	$CV_{def}=1,4$		$CV_{def}=1,6$	
	V_0 =cheio	V_0 = vazio	V_0 =cheio	V_0 = vazio
10	30,43	-17,39	36,84	-21,05
20	17,39	-8,70	15,79	-15,79
30	8,70	-8,70	10,53	-10,53
40	8,70	-4,35	10,53	-5,26
50	4,35	-4,35	5,26	-5,26

Observa-se na Tabela 4.19 que, para influxos com altos valores de CV_{def} , como seria de se esperar, a pior opção consiste em considerar-se o reservatório inicialmente cheio. Para $H=10$, os erros cometidos variam entre 21 a 37%, conforme a variabilidade das vazões naturais.

Ao considerar-se o reservatório inicialmente vazio, os erros são bem inferiores aos anteriormente citados. Para $H=10$, os erros cometidos variam entre 7 e 21%, conforme o CV_{def} . Observa-se ainda que a determinação do VIMC é fundamental para CV_{def} 's da ordem de 1,4 a 1,6. Nestes casos, mesmo considerando $V_0=vazio$, o processo de armazenamento passa a convergir para o estado de equilíbrio somente a partir de $H=40$ anos.

A Tabela 4.20 mostra os valores da vazão regularizada – em termos de f_M – para diversos cenários de CV_{def} e f_K , quando o reservatório é simulado com $V_0=VIMC$. Observa-se que o valor encontrado para a vazão regularizada é próximo, ou muito próximo, do da vazão adimensional de equilíbrio f_M^* para o mesmo cenário.

Na simulação dos cenários supracitados foram utilizados os seguintes valores de VIMC:

- $CV_{def}=0,4$ e $f_K=1,0$ – VIMC=25%K
- $CV_{def}=0,4$ e $f_K=2,5$ – VIMC=20%K
- $CV_{def}=0,8$ e $f_K=1,0$ – VIMC=15%K
- $CV_{def}=0,8$ e $f_K=2,5$ – VIMC=25%K
- $CV_{def}=1,2$ e $f_K=1,0$ – VIMC=15%K
- $CV_{def}=1,2$ e $f_K=2,5$ – VIMC=15%K
- $CV_{def}=1,6$ e $f_K=1,0$ – VIMC=20%K
- $CV_{def}=1,6$ e $f_K=2,5$ – VIMC=20%K

Tabela 4.20 - Valores das estimativas da vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*), utilizando-se $V_0=VIMC$ e considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2, e 1,6$ e $f_K=1,0$ e $2,5$.

Estimativas de f_M^*								
H	$CV_{def}=0,4$		$CV_{def}=0,8$		$CV_{def}=1,2$		$CV_{def}=1,6$	
	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$
10	0,50	0,73	0,32	0,56	0,22	0,37	0,14	0,27
20	0,50	0,73	0,32	0,54	0,22	0,38	0,14	0,26
30	0,50	0,74	0,31	0,54	0,21	0,37	0,14	0,27
40	0,50	0,75	0,32	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27
50	0,51	0,75	0,31	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27
60	0,51	0,75	0,31	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27
70	0,51	0,75	0,31	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27
80	0,51	0,76	0,31	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27
90	0,51	0,76	0,31	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27
100	0,51	0,76	0,31	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27
f_M^*	0,51	0,76	0,31	0,54	0,21	0,38	0,14	0,27

Os erros médios (ε_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio com a utilização do estimador $f_M^*_{VIMC}$ são mostrados na Tabela 4.21. Observa-se que todos os valores de ε_m são inferiores a 6%, o que, por definição, caracteriza o volume inicial que conduz o processo mais rapidamente para o estado de equilíbrio, ou seja o VIMC.

Tabela 4.21 - Erros Médios (ε_m) na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*) utilizando-se $V_0=V_{IMC}$ e considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2, e 1,6$ e $f_K=1,0$ e $2,5$.

Erros Médios (ε_m) na estimativa f_M^*								
H	$CV_{def}=0,4$		$CV_{def}=0,8$		$CV_{def}=1,2$		$CV_{def}=1,6$	
	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$
10	-1,96	-3,95	3,23	3,70	4,76	-2,63	0,00	0,00
20	-1,96	-3,95	3,23	0,00	4,76	0,00	0,00	-3,70
30	-1,96	-2,63	0,00	0,00	0,00	-2,63	0,00	0,00
40	-1,96	-1,32	3,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	-1,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	0,00	-1,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	-1,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4.6.2. O Estimador $f_M^* \chi$

Ao longo do capítulo anterior analisou-se o comportamento da vazão regularizada em função do volume inicial assumido, coeficiente de variação dos influxos, capacidade do reservatório e garantia. Dentre todos os volumes iniciais estudados, aquele com o qual as vazões regularizadas apresentam menor variabilidade é o $V_0=$ cheio. Observa-se, no entanto, que, embora este volume inicial apresente menor variabilidade, para altos valores de coeficientes de variação dos influxos e pequenos valores de horizontes de simulação, o Erro Médio cometido é significativo. Como já observado na Tabela 4.19, para $H=10$ anos, o Erro Médio cometido na estimativa da vazão regularizada é de: 21,2% ($CV_{def}=1,0$), 25,9% ($CV_{def}=1,2$), 30,4% ($CV_{def}=1,4$) e 36,8% ($CV_{def}=1,6$). Assim sendo, o estimador “vazão adimensional no estado de equilíbrio calculada através

da simulação do reservatório considerando $V_0=cheio$, para altos valores de CV_{def} , não é um estimador justo para a vazão adimensional de equilíbrio.

Este trabalho introduz, a partir de agora, o fator de correção do viés (χ) o qual transporta toda a curva definida pelos valores da vazão regularizada para valores muito próximos da vazão adimensional de equilíbrio, eliminando, por conseguinte, o viés originado ao simular-se o reservatório com $V_0=cheio$. Uma vez que no Ceará, por lei, deve-se adotar a vazão regularizada com garantia de 90%, o presente fator de correção será definido somente para este nível de garantia, ficando a análise de outros níveis de garantia para estudos posteriores.

O Fator de Correção do Viés ou simplesmente χ_{90} , para um dado cenário, é definido pela relação:

$$\chi_{90} = (Q/Q^*)_{90} = (f_M/f_M^*)_{90} \quad (4.2)$$

Observa-se que o valor de χ_{90} independe de se adotar a vazão em termos absolutos (Q em hm^3/ano) ou relativos (f_M), uma vez que, ao utilizar-se este último, os denominadores – ambos iguais a μ - são eliminados.

Para analisar-se o comportamento do fator de correção de viés χ_{90} , simulou-se o reservatório Caxitoré, considerando-se $f_E=0,17$, $V_0=cheio$, $G=90\%$, $H=10$ a 100 anos, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$. Calculou-se, para cada H, o valor da vazão regularizada com garantia de 90% (como já mencionado anteriormente, f_{M90} é a média das 200 simulações para um dado cenário).

Dividindo-se o valor da vazão regularizada f_M (para um determinado H) pela vazão adimensional de equilíbrio f_M^* daquele mesmo cenário, se terá o χ_{90} para aquela situação. A Tabela 4.22 mostra a obtenção do χ_{90} para $CV_{def}=1,4$, $f_K=1,0$, $G=90\%$, $f_E=0,17$ e $H=10$ a 100 anos.

Tabela 4.22 – Valores da vazão regularizada (f_{M90}), vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*) e χ_{90} , considerando $CV_{def}=1,4$, $f_K=1,0$, $f_E=0,17$, $V_0=$ cheio e $G=90\%$.

H	f_{M90}	f_M^*	$\chi_{90} = f_{M90}/f_M^*$
10	0,22	0,17	1,29
20	0,20	0,17	1,18
30	0,19	0,17	1,12
40	0,19	0,17	1,12
50	0,18	0,17	1,06
60	0,18	0,17	1,06
70	0,18	0,17	1,06
80	0,18	0,17	1,06
90	0,18	0,17	1,06
100	0,18	0,17	1,06

No sentido inverso, a vazão adimensional de equilíbrio (supondo desconhecida) pode ser estimada caso se tenha o valor de χ_{90} (para um dado H) e f_{M90} , obtido pela simulação da série histórica para aquele mesmo horizonte de simulação. Assim sendo, para o exemplo da Tabela 4.22 e $H=30$ anos, ter-se-ia que:

$$f_{M90} = 0,19$$

$$\chi_{90} = 1,12$$

Assim,

$$f_M^* = 0,17$$

As tabelas 6.7 a 6.10 mostram os valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$, $0,4$, $0,6$, $0,8$, $1,0$, $1,2$, $1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,0$, $1,5$, $2,0$ e $2,5$.

Tabela 4.23 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$, $0,4$, $0,6$, $0,8$, $1,0$, $1,2$, $1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,0$

H	$f_K=1,0$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	1,34	1,34	1,18	1,19	1,17	1,12	0,99	1,00
20	1,16	1,20	1,10	1,07	1,10	1,08	1,00	1,01
30	1,09	1,14	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01
40	1,08	1,12	1,04	1,04	1,05	1,05	0,99	1,01
50	1,07	1,10	1,04	1,04	1,02	1,04	1,00	1,00
60	1,06	1,10	1,02	1,03	1,02	1,03	1,00	1,00
70	1,05	1,09	1,02	1,01	1,02	1,03	1,00	1,00
80	1,04	1,08	1,02	1,01	1,01	1,03	0,99	1,00
90	1,04	1,07	1,01	1,01	1,01	1,03	1,00	1,00
100	1,04	1,07	1,02	1,02	1,01	1,03	1,00	1,00

Tabela 4.24 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,5$

H	$f_K=1,5$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	1,41	1,34	1,25	1,21	1,14	1,10	1,05	0,99
20	1,21	1,18	1,15	1,09	1,07	1,05	1,01	0,99
30	1,13	1,10	1,08	1,07	1,05	1,03	1,01	1,00
40	1,10	1,09	1,08	1,05	1,04	1,03	1,01	1,00
50	1,08	1,06	1,07	1,05	1,02	1,03	1,01	1,00
60	1,08	1,05	1,05	1,04	1,01	1,02	1,01	1,00
70	1,07	1,05	1,05	1,03	1,01	1,03	1,01	1,00
80	1,07	1,04	1,04	1,02	1,02	1,03	1,01	1,00
90	1,06	1,03	1,04	1,02	1,00	1,02	1,01	1,00
100	1,06	1,03	1,03	1,02	1,00	1,03	1,01	1,00

Tabela 4.25 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=2,0$

H	$f_K=2,0$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	1,43	1,34	1,26	1,23	1,15	1,10	1,07	1,03
20	1,22	1,16	1,14	1,10	1,06	1,03	1,02	1,01
30	1,15	1,10	1,08	1,09	1,04	1,03	1,01	1,01
40	1,12	1,08	1,08	1,06	1,03	1,02	1,01	1,01
50	1,10	1,05	1,07	1,07	1,02	1,02	1,01	1,01
60	1,09	1,06	1,05	1,05	1,01	1,02	1,01	1,00
70	1,09	1,05	1,05	1,04	1,01	1,02	1,01	1,00
80	1,08	1,04	1,04	1,04	1,01	1,02	1,01	1,00
90	1,07	1,04	1,04	1,04	1,00	1,02	1,01	1,00
100	1,06	1,03	1,03	1,04	1,00	1,02	1,01	1,00

Tabela 4.26 – Valores de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=2,5$

H	$f_K=2,5$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	1,41	1,37	1,28	1,25	1,18	1,13	1,09	1,05
20	1,21	1,17	1,15	1,10	1,06	1,04	1,04	1,03
30	1,14	1,12	1,09	1,08	1,05	1,03	1,02	1,01
40	1,10	1,09	1,08	1,06	1,04	1,03	1,01	1,01
50	1,09	1,06	1,08	1,06	1,02	1,02	1,01	1,01
60	1,08	1,07	1,06	1,05	1,01	1,02	1,01	1,01
70	1,08	1,06	1,05	1,04	1,02	1,02	1,01	1,00
80	1,06	1,05	1,04	1,04	1,01	1,02	1,01	1,00
90	1,06	1,05	1,04	1,03	1,01	1,02	1,01	1,00
100	1,06	1,04	1,03	1,03	1,00	1,03	1,01	1,00

O comportamento de χ_{90} para $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$ pode também ser observado nas figuras 4.14 a 4.17. Os influxos com $CV_{def}=0,2$ a $0,8$ são mostrados com linhas tracejadas; os influxos $CV_{def}=1,0$ a $1,6$ são mostrados com linhas contínuas.

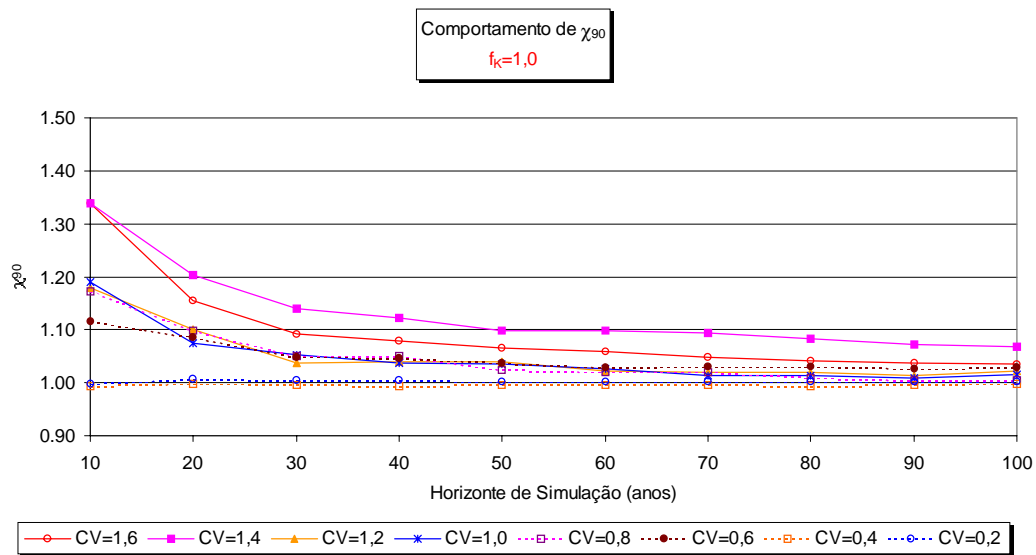


Figura 4.14 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_k=1,0$

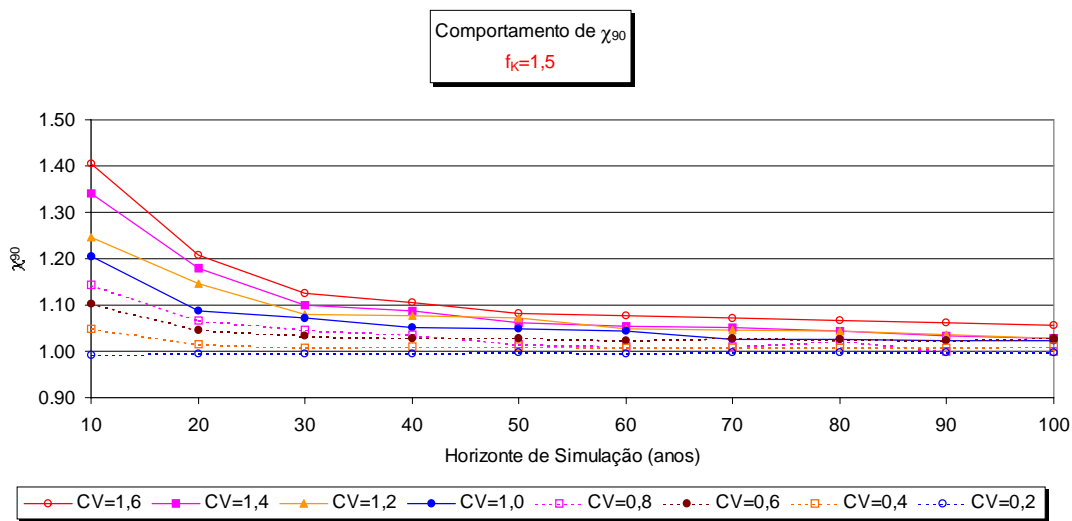


Figura 4.15 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_k=1,5$

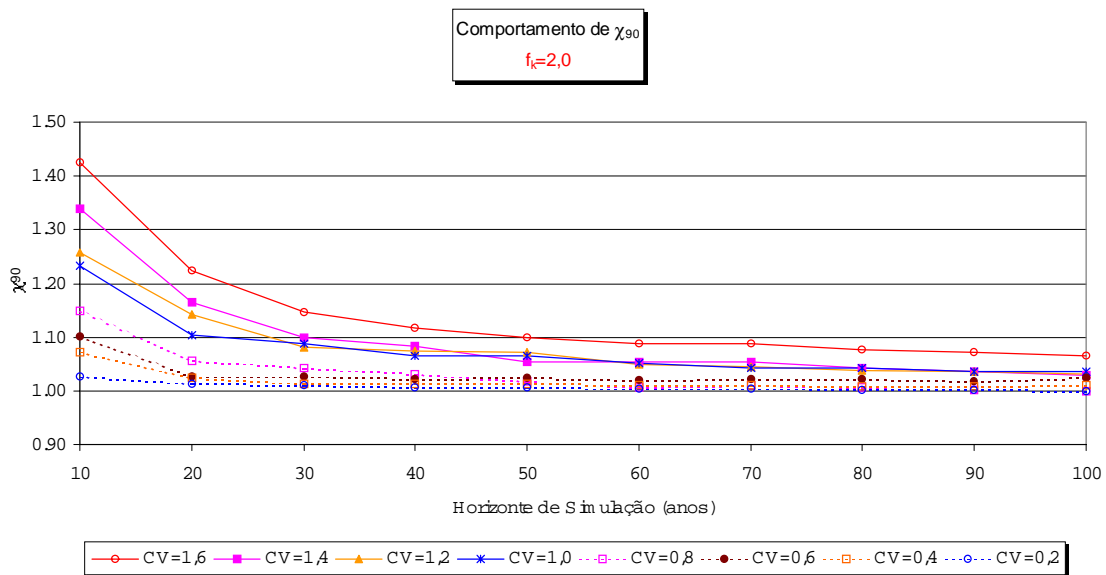


Figura 4.16 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_k=2,0$

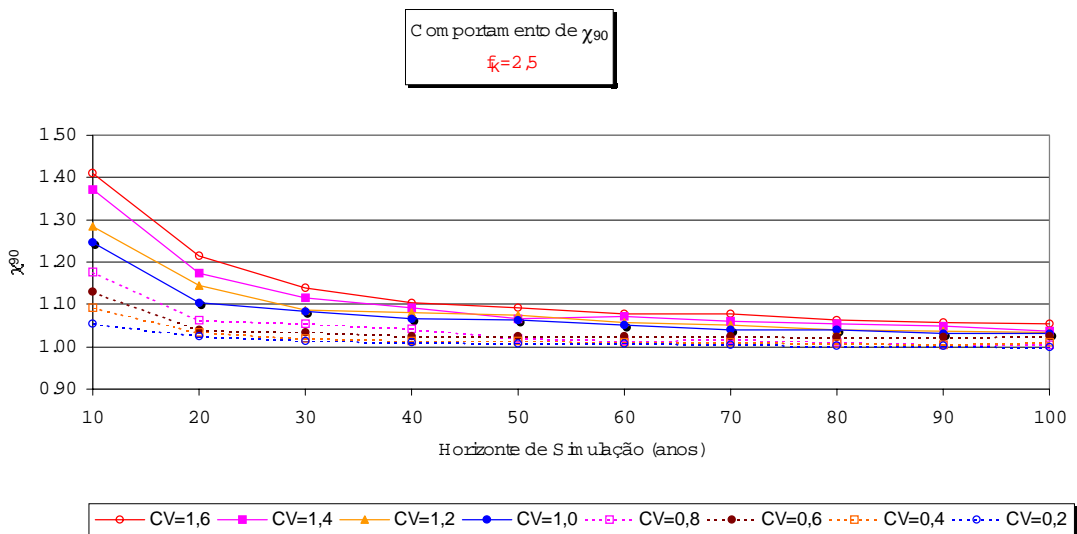


Figura 4.17 – Comportamento de χ_{90} , considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$ e $f_k=2,5$

Observa-se nas figuras 4.14 a 4.17 que, para influxos com $CV_{def}=0,2$ independentemente de H e f_k , a variável χ_{90} assume valores muito próximos da unidade, o que significa que a vazão adimensional de equilíbrio pode ser estimada simulando-se o reservatório com $V_0=$ cheio. Para este cenário, o estudo

mais aprofundado dos estimadores da vazão regularizada é irrelevante. O mesmo não se pode afirmar, para influxos com CV_{def} maiores que 0,2, notadamente no estado transiente, e para elevados valores de f_K .

4.6.2.1. Uma equação para χ_{90}

A determinação de equações para a estimativa da vazão regularizada por um dado reservatório tem sido objeto de estudo por parte de pesquisadores do mundo inteiro. McMAHON e MEIN (1976) apresentam um levantamento de diversos procedimentos e equações para a avaliação expedita em estudos de reservatórios. Todos os procedimentos são simplificados e têm, como consequência de suas próprias simplificações, aplicação restrita às condições hidrológicas dos locais para onde foram desenvolvidas. É possível o desenvolvimento de uma sistemática de parametrização e de um processo matemático que chegue a uma equação regional que possa ser aplicada a diversos locais diferentes, resultando, por conseguinte, em diversas equações distintas (CAMPOS e IBIAPINA, 1997).

É, neste espírito, que o presente trabalho busca estabelecer uma equação regional para χ_{90} , específica para o clima semi-árido nordestino, especificidade esta traduzida pela utilização de um padrão de distribuição temporal de vazões, típica de rios intermitentes, utilizada para desagregar as vazões totais anuais em mensais.

Embora a equação pretendida tenha sua aplicabilidade restrita ao Nordeste Semi-Árido, a metodologia para obtenção da mesma pode ser aplicada para obtenção de equações em climas completamente diferentes.

Desenvolvimento da equação

A combinação de oito valores de coeficientes de variação de influxos e quatro valores de f_K resulta na existência de 32 cenários diferentes (tabelas 4.23 a 4.26). Ao ajustar-se, em cada cenário, os dez valores de χ_{90} (H=10 a 100 anos) a uma curva, obtém-se a equação da curva de regressão, ajustada pelo método dos mínimos quadrados, que melhor define o comportamento da variável χ_{90} em função de H, para aquele cenário. A equação geral da curva do tipo potência têm a forma de:

$$y = C_1 \cdot x^{C_2} \quad (4.3)$$

onde C_1 e C_2 são constantes.

A Figura 4.18 mostra o ajuste da curva aos pontos de $\chi_{90} \times H$ para o cenário $CV_{def}=1,4$, $f_K=1,0$, $G=90\%$, $f_E=0,17$. Para este cenário, a equação da curva de regressão é dada por:

$$\chi_{90} = 1,598 \times H^{-0,091} \quad (4.4)$$

O coeficiente de explicação r^2 encontrado indica que 92% da variância em χ_{90} pode ser atribuída à variância em H, indicando um ótimo ajustamento da curva.

*Comparação entre $f_M^*_{\chi}$ e $f_M^*_s$*

Na Tabela 4.27 encontram-se dispostas as equações para o cálculo de χ_{90} , em função de H para os 32 cenários. Necessita-se, no entanto, verificar se os valores encontrados para a vazão adimensional de equilíbrio, a partir da equação de χ_{90} ($f_M^*_{\chi}$), são iguais (ou muito próximos) daqueles encontrados pela simulação

estocástica do reservatório (f_M^*s), considerados, para esta análise, como sendo os parâmetros populacionais.

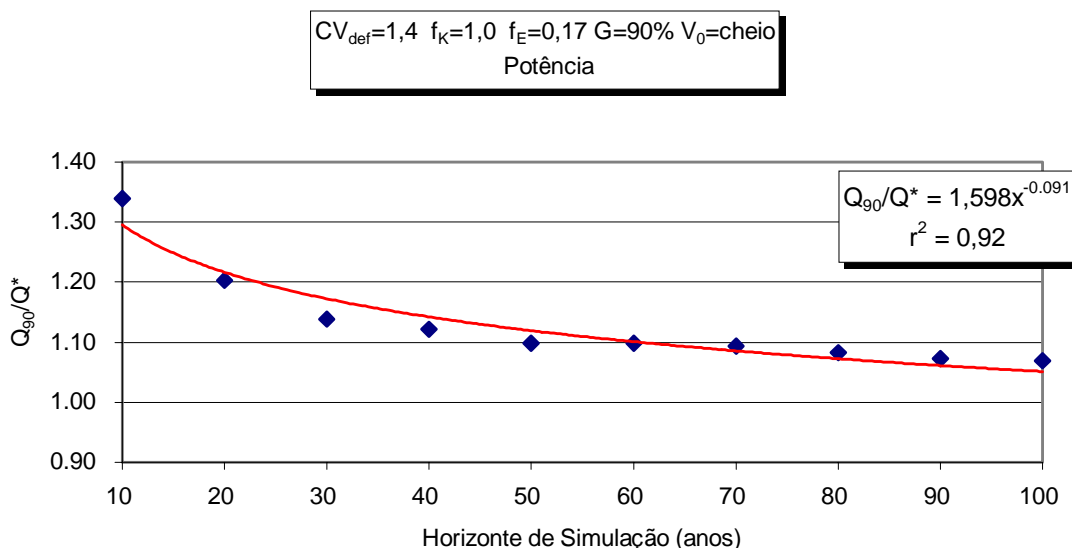


Figura 4.18 – Ajuste dos valores de χ_{90} e H a uma curva de regressão do tipo potência, considerando $f_E=0,17$, $CV_{def}=1,4$, $V_0=cheio$, $f_K=1,0$, $G=90\%$

Tabela 4.27 – Equações das curvas de regressão $\chi_{90} \times H$, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{def}=0,2$ a $1,6$ e $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$

CV_{def}	$f_K=1,0$	$f_K=1,5$	$f_K=2,0$	$f_K=2,5$
0,2	$\chi_{90}= 1,00 \times H^{-0,00002}$	$\chi_{90}= 0,99 \times H^{0,0023}$	$\chi_{90}= 1,49 \times H^{-0,0106}$	$\chi_{90}= 1,09 \times H^{-0,0205}$
0,4	$\chi_{90}= 0,99 \times H^{-0,0002}$	$\chi_{90}= 1,07 \times H^{-0,0134}$	$\chi_{90}= 1,10 \times H^{-0,0215}$	$\chi_{90}= 1,14 \times H^{-0,03}$
0,6	$\chi_{90}= 1,20 \times H^{-0,036}$	$\chi_{90}= 1,15 \times H^{-0,0265}$	$\chi_{90}= 1,13 \times H^{-0,0252}$	$\chi_{90}= 1,18 \times H^{-0,0339}$
0,8	$\chi_{90}= 1,33 \times H^{-0,0651}$	$\chi_{90}= 1,27 \times H^{-0,0531}$	$\chi_{90}= 1,27 \times H^{-0,0547}$	$\chi_{90}= 1,31 \times H^{-0,0613}$
1,0	$\chi_{90}= 1,33 \times H^{-0,0629}$	$\chi_{90}= 1,35 \times H^{-0,0643}$	$\chi_{90}= 1,39 \times H^{-0,0673}$	$\chi_{90}= 1,52 \times H^{-0,073}$
1,2	$\chi_{90}= 1,49 \times H^{-0,0889}$	$\chi_{90}= 1,45 \times H^{-0,0773}$	$\chi_{90}= 1,47 \times H^{-0,0802}$	$\chi_{90}= 1,50 \times H^{-0,0853}$
1,4	$\chi_{90}= 1,60 \times H^{-0,0908}$	$\chi_{90}= 1,64 \times H^{-0,1067}$	$\chi_{90}= 1,62 \times H^{-0,1039}$	$\chi_{90}= 1,67 \times H^{-0,1086}$
1,6	$\chi_{90}= 1,60 \times H^{-0,1002}$	$\chi_{90}= 1,73 \times H^{-0,1138}$	$\chi_{90}= 1,77 \times H^{-0,116}$	$\chi_{90}= 1,76 \times H^{-0,117}$

Observa-se nas tabelas 4.28 a 4.31 que as vazões regularizadas obtidas pela divisão pelos valores χ_{90} (equações específicas de cada cenário, definidas na Tabela 4.27), reproduzem fielmente os valores obtidos na simulação.

Observa-se que ainda nas tabelas citadas que, na sua grande maioria, os erros médios (ε_m) se situam em torno de 5% (H=10 a 20 anos) ou bem abaixo deste valor (para H> 20 anos). A única exceção se deu para cenário $CV_{def}=1,0$ e $f_K=2,5$ onde os erros médios se situaram entre 6 e 9%.

Os cálculos detalhados para a obtenção dos erros médios em cada cenário encontram-se nas tabelas A2 e A3 do Anexo.

Tabela 4.28 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio, $f_K=1,0$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=1,0$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	5.29	3.00	-2.35	2.66	2.37	1.00	0.00	-0.11
20	-2.58	-1.56	-3.23	-3.34	0.44	0.70	0.30	0.67
30	-4.17	-2.87	-5.35	-2.87	-1.40	-1.28	0.24	0.50
40	-2.53	-1.80	-2.66	-2.68	0.32	-0.39	0.00	0.55
50	-1.50	-1.87	-0.86	-1.55	-0.67	-0.41	0.16	0.32
60	-0.21	-0.23	-0.80	-1.29	-0.03	-0.60	0.12	0.25
70	0.13	0.69	0.44	-1.69	1.15	0.13	0.12	0.25
80	0.99	0.94	1.58	-0.90	0.92	0.53	0.01	0.25
90	1.59	1.08	2.07	-0.72	1.24	0.56	0.14	0.22
100	2.56	1.69	3.87	0.68	1.94	1.14	0.42	0.19

Tabela 4.29 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio, $f_K=1,5$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=1,5$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	5.55	4.51	2.70	3.58	1.81	2.27	1.17	0.94
20	-1.84	-1.09	-0.39	-2.31	-1.48	-1.21	-1.32	1.42
30	-4.23	-3.58	-3.24	-1.30	-1.34	-1.42	-1.31	1.70
40	-2.87	-1.65	-1.22	-1.32	-0.77	-0.98	-0.82	1.75
50	-2.45	-1.68	-0.01	-0.12	-1.57	-0.52	-0.43	1.90
60	-0.83	-0.44	-0.72	0.48	-1.24	-0.57	-0.44	1.84
70	0.44	0.81	0.14	-0.22	-0.22	0.32	-0.28	2.07
80	1.41	1.47	0.95	0.62	1.73	0.60	-0.19	1.97
90	2.29	1.86	1.17	1.20	0.09	0.57	-0.01	2.03
100	3.11	2.42	1.29	1.91	0.50	1.26	0.53	2.04

Tabela 4.30 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio, $f_K=2,0$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=2,0$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	5.32	5.08	3.13	3.63	2.71	2.97	1.96	0.32
20	-2.07	-1.83	-0.99	-2.92	-2.03	-2.42	-1.16	-0.22
30	-3.68	-3.32	-3.23	-1.54	-1.04	-1.30	-1.44	-0.20
40	-3.14	-1.82	-1.56	-1.83	-0.58	-1.02	-0.81	-0.15
50	-2.02	-2.31	0.05	-0.18	-0.79	-0.43	-0.28	-0.02
60	-1.09	-0.34	-0.64	-0.26	-0.81	-0.34	-0.10	0.04
70	0.69	1.08	0.17	-0.10	0.49	0.17	0.15	0.05
80	1.22	1.53	0.60	0.69	0.68	0.56	0.28	0.00
90	2.29	2.14	1.21	0.88	0.80	0.56	0.49	0.10
100	2.74	2.45	1.60	1.58	1.30	1.44	1.00	0.14

Tabela 4.31 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pelas equações individuais, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio, $f_K=2,5$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=2,5$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	5.15	5.58	3.77	-2.88	3.45	3.42	2.17	0.92
20	-1.78	-2.62	-1.75	-9.68	-2.46	-2.51	-1.13	-0.43
30	-3.56	-3.25	-3.48	-8.56	-0.93	-1.62	-1.50	-0.73
40	-3.21	-2.30	-1.60	-8.29	-0.33	-1.42	-1.15	-0.45
50	-1.63	-2.51	-0.19	-7.04	-1.05	-0.89	-0.40	-0.26
60	-1.01	0.19	-0.37	-6.84	-0.65	-0.30	-0.16	0.01
70	0.82	0.70	0.39	-6.63	0.75	0.31	0.17	0.08
80	1.04	1.66	0.46	-5.85	0.97	0.64	0.42	0.18
90	2.07	2.24	1.15	-5.73	1.10	0.84	0.48	0.34
100	3.02	2.33	1.79	-5.05	1.71	1.58	1.29	0.40

Equação geral para χ_{90}

Sabe-se que, em termos gerais, a equação da curva que reproduz o comportamento da vazão regularizada é dada pela equação (4.3):

$$y = C_1 \cdot x^{C_2}$$

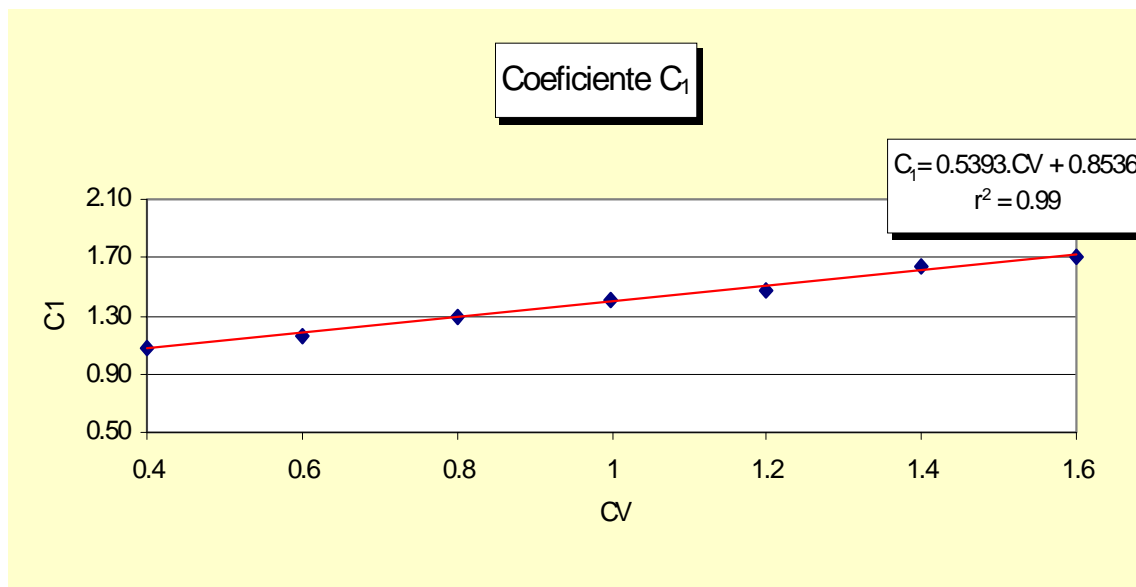
Para cada CV_{def} , calculou-se a média dos coeficientes C_1 e C_2 (considerando ambos independentes de f_k) das equações da Tabela 4.27. Os valores médios de C_1 e C_2 , para cada coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}), encontram-se na Tabela 4.32. Observa-se o crescimento dos valores (em termos absolutos) tanto de C_1 como de C_2 , com o acréscimo de CV_{def} .

Tabela 4.32 – Valores médios das constantes C_1 e C_2 da equação da curva de regressão

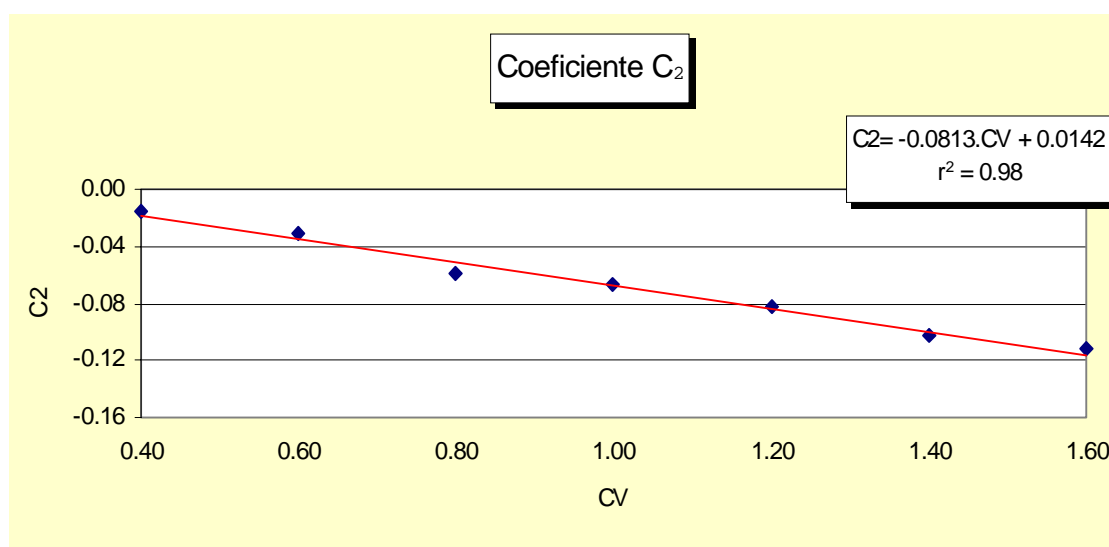
CV_{def}	C_1	C_2
0,4	1,08	-0,0163
0,6	1,16	-0.0304
0,8	1,29	-0,0586
1,0	1,40	-0,0669
1,2	1.48	-0,0829
1,4	1.63	-0,1025
1,6	1,71	-0.1118

O estabelecimento de uma equação geral que represente o comportamento de χ_{90} , em função do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) e do horizonte de simulação (H), é obtido ao determinar-se uma equação de regressão entre os

valores C_1 e CV_{def} e C_2 e CV_{def} . A Figura 4.19 mostra o ajuste da reta aos pontos, a equação que descreve a regressão e o coeficiente de explicação r^2 .



a)



b)

Figura 4.19 – Cálculo dos coeficientes C_1 (a) e C_2 (b) da reta de regressão

Observa-se, em ambos os casos, a ótima qualidade do ajustamento, traduzida pelo coeficiente de explicação r^2 , que assume os valores 0,99, para $C_1 \times CV_{def}$ e 0,98, para $C_2 \times CV_{def}$.

Sendo assim, a equação geral para a variável χ_{90} em função do coeficiente de variação dos deflúvios afluentes (CV_{def}) e do horizonte de planejamento (H) é do tipo:

$$\chi_{90} = (0,54.CV_{def} + 0,85).H^{(-0,0813.CV_{def} + 0,0142)} \quad (4.5)$$

O comportamento de χ_{90} para $CV_{def}= 0,2$ a $1,6$, $f_K=1,0$ a $2,5$ e $H=10$ a 100 anos pode ser visualizado na Figura 4.20. Observa-se que, a partir de $H=30$ anos, a relação χ_{90} independe de CV_{def} , sendo função apenas do horizonte de simulação adotado. Isto não quer dizer que a vazão adimensional de equilíbrio ($f_M^* \chi$), calculada a partir de χ_{90} , independe de CV_{def} ; quer dizer apenas que a *relação* entre o fator adimensional de retirada (para um dado H) e a vazão adimensional de equilíbrio é constante, independentemente do coeficiente de variação dos influxos.

É preciso agora verificar se a vazão regularizada (em termos de f_M), obtida pela divisão das vazões regularizadas pelos valores de χ_{90} calculados pela equação geral (para cada CV_{def} e f_K) reproduz os resultados obtidos pela simulação estocástica (tidos aqui como os valores *verdadeiros* ou seja, os populacionais).

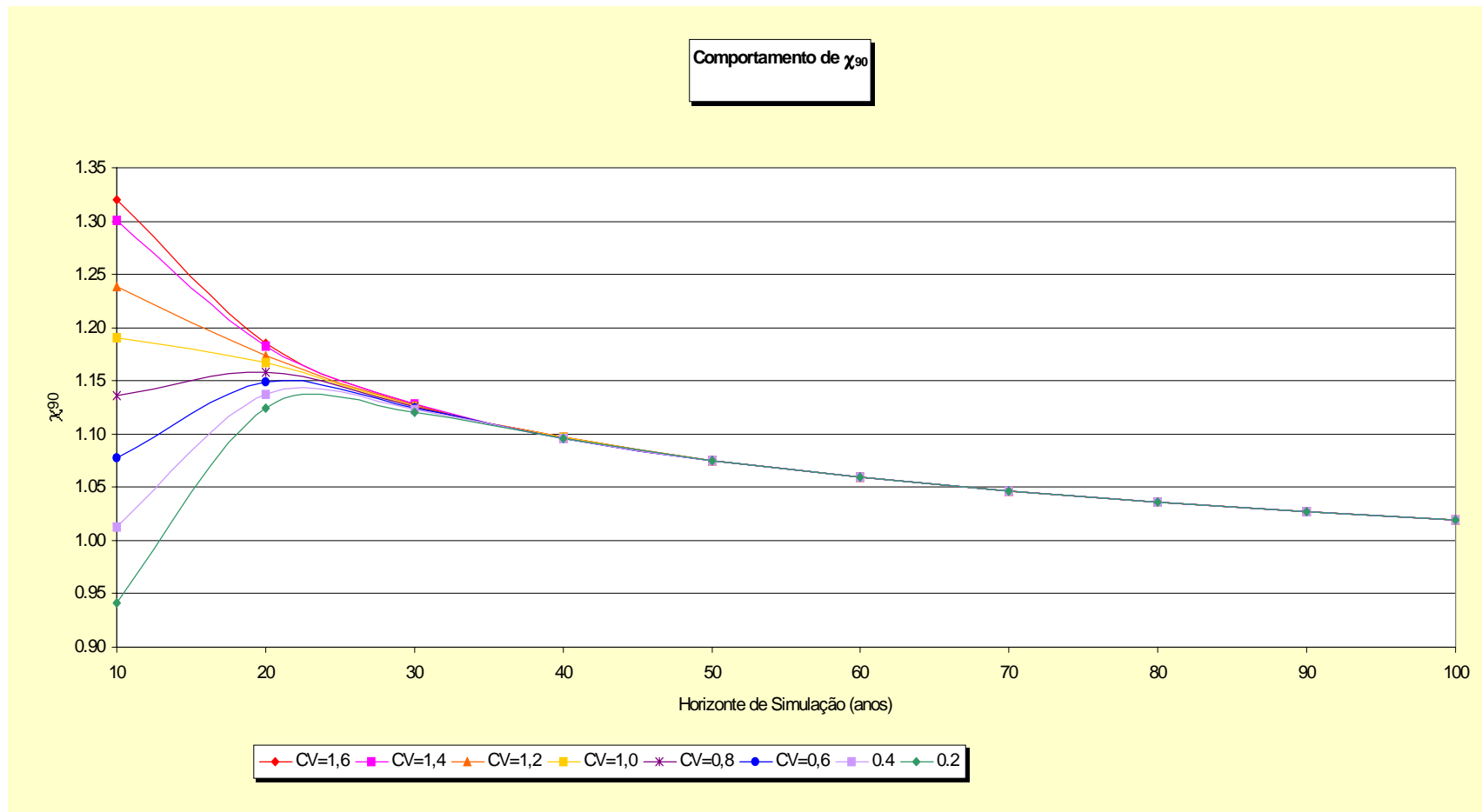


Figura 4.20 – Comportamento da variável χ_{90} calculada a partir da equação geral, em função dos coeficientes de variação dos deflúvios (CV_{def}) e do horizonte de simulação (H)

As tabelas 4.33 e 4.36 mostram os Erros Médios (ε_m) cometidos na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio, $f_K=1,0$ a $2,5$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$). Um Erro Médio (ε_m) de f_M^* , em relação a f_M^* , inferior a 6% é considerado aceitável. Nestes casos f_M^* é considerado igual a f_M^* .

Observa-se que os valores de f_M^* e f_M^* podem ser considerados iguais para todos os cenários estabelecidos. As raras exceções se dão para $H=10$ anos quando $CV_{def}=1,4$ e $1,6$ (e somente para alguns valores de f_K). Mesmo nestes casos, os erros médios são bem pequenos, variando em torno de 6 e 8%.

Tabela 4.33 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, V_0 =cheio, $f_K=1,0$ e $CV_{def}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=1,0$							
	$CV_{def}=1,6$	$CV_{def}=1,4$	$CV_{def}=1,2$	$CV_{def}=1,0$	$CV_{def}=0,8$	$CV_{def}=0,6$	$CV_{def}=0,4$	$CV_{def}=0,2$
10	1.37	4.65	-4.62	-0.07	1.93	2.35	-3.44	4.06
20	-5.31	1.08	-5.89	-5.78	-0.95	2.34	-1.25	5.98
30	-5.93	-0.95	-8.11	-5.10	-3.55	-0.18	-1.31	5.79
40	-3.71	1.07	-5.40	-4.83	-1.89	0.65	-0.57	5.85
50	-2.23	0.79	-3.82	-3.22	-3.35	0.79	-0.42	5.61
60	-0.91	2.67	-4.44	-3.13	-2.96	0.91	0.54	5.54
70	-0.24	4.13	-2.76	-3.50	-1.86	1.09	0.54	5.54
80	0.24	4.12	-1.89	-2.57	-1.98	2.01	0.43	5.54
90	1.61	4.16	-1.52	-2.13	-2.42	1.61	0.56	5.51
100	2.51	4.81	0.25	-0.42	-1.47	1.81	1.87	5.48

Tabela 4.34 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=\text{cheio}$, $f_K=1,5$ e $CV_{\text{def}}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=1,5$							
	$CV_{\text{def}}=1,6$	$CV_{\text{def}}=1,4$	$CV_{\text{def}}=1,2$	$CV_{\text{def}}=1,0$	$CV_{\text{def}}=0,8$	$CV_{\text{def}}=0,6$	$CV_{\text{def}}=0,4$	$CV_{\text{def}}=0,2$
10	6.45	4.73	0.52	1.34	-0.51	1.15	1.90	3.23
20	-1.01	-0.98	-2.07	-4.59	-3.85	-1.35	0.43	4.65
30	-3.01	-4.35	-4.54	-3.54	-4.05	-1.68	-0.10	4.84
40	-1.41	-1.97	-2.10	-3.59	-3.18	-1.05	1.00	4.82
50	-0.80	-2.55	-0.79	-2.01	-4.19	-0.21	1.10	4.92
60	0.62	-1.41	-1.96	-1.65	-3.89	0.22	1.86	4.82
70	2.05	0.07	-0.43	-2.38	-2.77	0.72	1.81	5.01
80	2.45	0.26	0.31	-1.46	-0.60	1.63	1.72	4.88
90	3.96	0.35	0.58	-0.69	-2.82	1.28	1.75	4.92
100	4.57	0.75	0.86	0.31	-2.02	1.70	3.19	4.89

Tabela 4.35 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=\text{cheio}$, $f_K=2,0$ e $CV_{\text{def}}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=2,0$							
	$CV_{\text{def}}=1,6$	$CV_{\text{def}}=1,4$	$CV_{\text{def}}=1,2$	$CV_{\text{def}}=1,0$	$CV_{\text{def}}=0,8$	$CV_{\text{def}}=0,6$	$CV_{\text{def}}=0,4$	$CV_{\text{def}}=0,2$
10	8.00	4.70	1.51	3.67	0.00	1.15	4.10	6.98
20	0.26	-2.10	-2.31	-3.25	-4.85	-3.15	1.39	6.73
30	-1.06	-4.35	-4.29	-1.93	-4.28	-2.10	0.23	6.30
40	-0.33	-2.33	-2.27	-2.34	-3.56	-1.60	1.24	6.03
50	0.95	-3.31	-0.63	-0.34	-4.03	-0.62	1.30	5.92
60	1.64	-1.39	-1.84	-0.71	-4.10	-0.01	2.11	5.77
70	3.58	0.30	-0.40	-0.64	-2.73	0.11	2.03	5.62
80	3.51	0.31	-0.08	0.20	-2.32	1.16	1.87	5.41
90	5.20	0.65	0.55	0.57	-2.83	0.86	1.82	5.38
100	5.42	0.84	1.07	1.54	-1.96	1.47	3.15	5.30

Tabela 4.36 — Erros médios (ε_m) cometidos na estimativa de f_M^* pela equação geral, considerando $f_E=0,17$, $G=90\%$, $V_0=\text{cheio}$, $f_K=2,5$ e $CV_{\text{def}}=0,2$ a $1,6$

H	$f_K=2,5$							
	$CV_{\text{def}}=1,6$	$CV_{\text{def}}=1,4$	$CV_{\text{def}}=1,2$	$CV_{\text{def}}=1,0$	$CV_{\text{def}}=0,8$	$CV_{\text{def}}=0,6$	$CV_{\text{def}}=0,4$	$CV_{\text{def}}=0,2$
10	6.84	7.27	3.48	4.86	2.33	3.55	6.07	9.81
20	-0.43	-1.30	-2.12	-3.23	-4.20	-1.96	2.51	7.93
30	-1.94	-2.89	-3.83	-2.31	-3.34	-1.48	0.89	6.72
40	-1.44	-1.53	-1.72	-2.30	-2.67	-1.30	1.39	6.39
50	0.27	-2.33	-0.39	-0.75	-3.79	-0.56	1.47	6.10
60	0.63	0.24	-1.18	-0.93	-3.57	0.39	2.19	6.00
70	2.57	0.96	0.14	-0.88	-2.19	0.47	2.05	5.73
80	2.17	1.43	0.03	-0.07	-1.84	1.35	1.90	5.54
90	3.79	1.69	0.68	0.16	-2.42	1.15	1.60	5.46
100	4.50	1.61	1.40	1.09	-1.50	1.52	3.14	5.30

A equação geral parece não dar bons resultados apenas para $CV_{\text{def}}=0,2$ e $f_K=2,0$ e $2,5$. Para este valor de coeficiente de variação de influxos, a metodologia adequada é simular o reservatório com $V_0=\text{cheio}$, uma vez o processo de armazenamento já se encontra em seu estado de equilíbrio a partir de $H=10$ anos, quando esta condição inicial é adotada.

As tabelas A3 e A4 do Anexo mostram os valores de χ_{90} para cada grupo de CV_{def} , em função de H . Mostram ainda a vazão adimensional de equilíbrio obtida pela simulação estocástica (f_{M^*s}) para cada CV_{def} e f_K (utilizando $H=5.000$ anos) e compara com a vazão adimensional de equilíbrio obtida pela divisão por χ_{90} da equação geral ($f_{M^*\chi}$).

4.6.3. Análise dos dois estimadores

Os estimadores da vazão adimensional de equilíbrio a serem analisados são:

- f_{M^*VIMC} – *vazão regularizada adimensional, em estado de equilíbrio, calculada através da simulação do reservatório considerando $V_0=VIMC$.*
- $f_{M^*\chi}$ - *vazão regularizada adimensional, em estado de equilíbrio, calculada através da simulação do reservatório considerando $V_0=$ cheio, ajustada pelo fator de correção do viés (χ_{90}) correspondente ao horizonte de simulação adotado.*

Estes estimadores serão referidos neste texto, a partir de agora, simplesmente por f_{M^*VIMC} e $f_{M^*\chi}$, respectivamente. A qualidade de ambos é analisada ao verificar-se se os mesmos satisfazem as propriedades desejáveis de um bom estimador: justeza, eficiência e consistência.

4.6.3.1. Justeza

O estimador da vazão adimensional de equilíbrio T (no caso em questão - f_{M^*VIMC} ou $f_{M^*\chi}$) é dito justo (ou não tendencioso ou não viesado) quando a sua média (ou valor esperado) for igual ao parâmetro θ que se pretende estimar, isto é:

$$E[T] = \theta \quad (4.6)$$

Assim sendo, o valor esperado (média) de T nas 200 simulações para um dos 32 cenários deve ser igual ao valor da vazão adimensional de equilíbrio, para aquele cenário, obtida pela simulação estocástica do reservatório (f_{M^*s}), tida como o parâmetro populacional *vazão adimensional de equilíbrio* (f_{M^*}).

Esta propriedade é de fácil verificação:

- **Estimador $f_M^*_{VIMC}$**

Uma vez que o valor adotado para a vazão regularizada (em termos de f_M) é, por definição, a média das 200 simulações efetuadas para cada cenário, $f_M^*_{VIMC}$ é um estimador JUSTO, uma vez que, também por definição, o VIMC é “o volume inicial, entre cheio e vazio, no qual os valores das vazões regularizadas sejam iguais (ou muito próximos) ao da vazão adimensional de equilíbrio. Ou seja, a média da séries das 200 vazões regularizadas para cada cenário é igual, ou muito próxima, do parâmetro populacional estimado - *vazão de equilíbrio*. O erro médio admissível, tanto para ser considerado VIMC e como estimador justo, se situa em torno de 6%.

Assim sendo,

$$E[f_M^*_{VIMC}] = f_M^*_s \quad (4.7)$$

- **Estimador $f_M^*_\chi$**

Para um dado horizonte de simulação H , existem 200 valores da variável aleatória “ f_{M90} ”. Dividindo-se, para este H , os valores individuais da vazão regularizada “ f_{M90} ” pelo valor de “ χ_{90} ” (calculado pela equação - constante para um dado CV_{def} e H), obtém-se os 200 valores individuais “ $f_M^*_{\chi}$ ” assumidos pelo estimador “ $f_M^*_\chi$ ”.

Por definição, o valor adotado para o f_{M90} é a média das 200 simulações (para um dado cenário e H). Sendo assim, não será necessário o cálculo da média dos 200 valores individuais de “ $f_M^*_\chi$ ”, uma vez que uma das propriedades da média é “*multiplicando-se uma variável aleatória X por uma constante K , sua média será*

multiplicada por esta constante K". Fazendo-se a constante $K = 1/\chi_{90}$, a média dos $f_{M\chi_i}$ é determinada simplesmente pela divisão da média dos f_{M90i} (o valor f_{M90} adotado) pelo valor de χ_{90} .

Assim sendo:

$$E[f_{M\chi}^*] = E[f_{M90i}] / \chi_{90} \quad (4.8)$$

Mas, por definição

$$E[f_{M90i}] / \chi_{90} = f_{M90} / \chi_{90} \quad (4.9)$$

e

$$E[f_{M\chi}^*] = f_{M\chi}^* \quad (4.10)$$

Ou seja, há que se comparar os valores estimados para $f_{M\chi}^*$ pela equação (4.8) com os valores da vazão adimensional de equilíbrio obtida pela simulação estocástica do reservatório, ou seja:

$f_{M\chi}^* \cong f_{M^*s} \quad ?$

Conforme estabelecido no item 6.2.1.3. deste capítulo, *“um erro médio (ϵ_m) de $f_{M\chi}^*$, em relação a f_{M^*s} , em torno de 6% é considerado aceitável. Nestes casos $f_{M\chi}^*$ é considerado igual a f_{M^*s} ”*. Sendo assim o erro médio (ϵ_m) cometido na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio, a partir do estimador $f_{M\chi}^*$, será o parâmetro que avaliará a justeza, ou não, deste estimador.

A rigor, a verificação da não tendenciosidade já foi efetuada no item supracitado, quando é observado que *“os valores de $f_{M\chi}^*$ e f_{M^*s} podem ser considerados iguais*

para todos os cenários estabelecidos. As raras exceções se dão em $H=10$ anos quando $CV_{def}=1,4$ e $1,6$ (e somente para alguns valores de f_K). Mesmo nestes casos, os erros médios são bem pequenos, variando em torno de 6 e 8%”.

Como os erros médios cometidos, para todos os cenários, são considerados aceitáveis, conclui-se que $f_M^* \chi$ é um estimador JUSTO.

4.6.3.2. Eficiência

O estimador T é dito como o estimador mais eficiente do parâmetro θ se ele for justo e sua variância, para o mesmo tamanho da amostra, for menor que a de qualquer outro estimador justo.

A propriedade da eficiência complementa a da não-tendenciosidade, visto que esta última não garante que uma dada estimativa individual T_i seja igual, ou mesmo próxima de θ . Significa apenas que a média de várias estimativas independentes de T é igual, ou muito próxima do parâmetro θ . A eficiência, por sua vez, avalia o quão próximo as estimativas individuais de T estão do parâmetro θ .

No intuito de se determinar o estimador mais eficiente de f_M^* , simulou-se o reservatório Caxitoré, sob diferentes cenários, e determinou-se, para cada simulação individual, a estimativa da vazão regularizada (em termos de f_M) utilizando-se ambos os estimadores. Os valores dos coeficientes de variação das séries das estimativas da vazão adimensional de equilíbrio, utilizando-se $f_M^* \chi$ e $f_M^* \text{VMC}$ encontram-se na Tabela 4.37.

Tabela 4.37 – Coeficientes de variação das séries de estimativas de f_M^* (CV_{eql}) utilizando-se os estimadores $f_M^* \chi$ e $f_M^*_{\text{VIMC}}$, considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{\text{def}}=0,4, 0,8, 1,2, \text{ e } 1,6$ e $f_K=1,0$ e $2,5$.

Coeficientes de Variação das Séries das Estimativas de f_M^* (CV_{eql})									
H	T	$CV_{\text{def}}=0,4$		$CV_{\text{def}}=0,8$		$CV_{\text{def}}=1,2$		$CV_{\text{def}}=1,6$	
		$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$
10	Q*e	0,11	0,14	0,22	0,19	0,29	0,28	0,35	0,34
	Q* _{VIMC}	0,11	0,17	0,31	0,28	0,38	0,45	0,52	0,51
20	Q*e	0,07	0,11	0,18	0,18	0,22	0,24	0,28	0,30
	Q* _{VIMC}	0,08	0,17	0,19	0,21	0,26	0,32	0,34	0,38
30	Q*e	0,06	0,09	0,15	0,15	0,19	0,21	0,25	0,27
	Q* _{VIMC}	0,08	0,11	0,17	0,18	0,22	0,25	0,29	0,32
40	Q*e	0,06	0,08	0,13	0,13	0,16	0,18	0,22	0,24
	Q* _{VIMC}	0,06	0,08	0,13	0,15	0,18	0,21	0,23	0,26
50	Q*e	0,05	0,07	0,11	0,11	0,15	0,17	0,20	0,22
	Q* _{VIMC}	0,06	0,07	0,11	0,12	0,16	0,19	0,22	0,24
60	Q*e	0,05	0,06	0,11	0,11	0,14	0,16	0,18	0,20
	Q* _{VIMC}	0,05	0,06	0,10	0,12	0,16	0,17	0,20	0,22
70	Q*e	0,05	0,06	0,10	0,10	0,13	0,15	0,17	0,19
	Q* _{VIMC}	0,05	0,06	0,10	0,11	0,14	0,16	0,19	0,20
80	Q*e	0,05	0,05	0,09	0,10	0,13	0,13	0,17	0,19
	Q* _{VIMC}	0,05	0,06	0,10	0,10	0,13	0,14	0,18	0,20
90	Q*e	0,04	0,05	0,08	0,09	0,13	0,13	0,16	0,17
	Q* _{VIMC}	0,04	0,05	0,08	0,10	0,14	0,14	0,16	0,19
100	Q*e	0,04	0,05	0,08	0,09	0,12	0,12	0,14	0,15
	Q* _{VIMC}	0,04	0,05	0,07	0,09	0,12	0,13	0,15	0,16

Os coeficientes de variação das séries de estimativas de f_M^* utilizando o estimador $f_M^*_{\text{VIMC}}$ foram obtidos simulando-se o reservatório utilizando um valor de V_0 incluído no intervalo definido para o VIMC para cada cenário, conforme definido no item 6.1, a saber:

- $CV_{\text{def}}=0,4$ e $f_K=1,0$ – VIMC=25%K

- $CV_{def}=0,4$ e $f_K=2,5$ – $VIMC=20\%K$
- $CV_{def}=0,8$ e $f_K=1,0$ – $VIMC=15\%K$
- $CV_{def}=0,8$ e $f_K=2,5$ – $VIMC=25\%K$
- $CV_{def}=1,2$ e $f_K=1,0$ – $VIMC=15\%K$
- $CV_{def}=1,2$ e $f_K=2,5$ – $VIMC=15\%K$
- $CV_{def}=1,6$ e $f_K=1,0$ – $VIMC=20\%K$
- $CV_{def}=1,6$ e $f_K=2,5$ – $VIMC=20\%K$

Os coeficientes de variação das séries de estimativas de f_M^* , utilizando o estimador $f_M^* \chi$, são os mesmos das séries de vazões regularizadas f_{M90} originais (ou seja, com V_0 =cheio), devido às propriedades da média e variância que se seguem:

Sabe-se que:

$$f_M^* e = f_{M90} / \chi_{90} \quad (4.11)$$

Mas, pela propriedade da média:

$$E[f_{M90} \cdot 1/\chi_{90}] = 1/\chi_{90} \cdot E[f_{M90}] \quad (4.12)$$

E da variância:

$$\sigma^2[f_{M90} \cdot 1/\chi_{90}] = (1/\chi_{90})^2 \cdot \sigma^2 [f_{M90}] \quad (4.13)$$

Mas por definição, o desvio padrão (σ) é a raiz quadrada da variância (σ^2):

$$\sigma[f_{M90}] = \sqrt{\sigma^2[f_{M90}]} \quad (4.14)$$

Também por definição, o coeficiente de variação de uma variável X é a razão entre o seu desvio padrão($\sigma[X]$) e sua média ($E[X]$). Sendo assim:

$$CV[f_M^*] = \sigma[f_M^*] / E[f_M^*] \quad (4.15)$$

$$CV[f_M^*] = \sigma[f_{M90} \cdot 1/\chi_{90}] / E[f_{M90} \cdot 1/\chi_{90}] \quad (4.16)$$

$$CV[f_M^*] = (1/\chi_{90} \cdot \sigma[f_{M90}]) / (1/\chi_{90} \cdot E[f_{M90}]) \quad (4.17)$$

$$CV[f_M^*] = \sigma[f_{M90}] / E[f_{M90}] \quad (4.18)$$

Como era de se esperar, os coeficientes de variação das séries de estimativas de f_M^* utilizando-se o estimador $f_M^*_{\chi}$ são, para todos os cenários mostrados na Tabela 4.37, inferiores aos das séries de estimativas de f_M^* utilizando-se o estimador $f_M^*_{VIMC}$, o que evidencia que o estimador “*vazão regularizada adimensional, em estado de equilíbrio, calculada através da simulação do reservatório considerando $V_0=cheio$, ajustada pelo fator de correção do viés (χ_{90}) correspondente ao horizonte de simulação adotado*”, ou simplesmente $f_M^*_{\chi}$ é um estimador mais eficiente da vazão adimensional de equilíbrio f_M^* que o estimador “*vazão regularizada adimensional, em estado de equilíbrio, calculada através da simulação do reservatório considerando $V_0=VIMC$* ”, ou $f_M^*_{VIMC}$. Para deflúvios com baixos valores de CV_{def} , a diferença entre os dois estimadores não parece ser significativa.

O erro médio modular (E)

Outra estatística que pode se utilizada na avaliação da eficiência do estimador T , é o que definimos neste texto de **erro médio modular (E)**, o qual, como a variância e o coeficiente de variação, também expressa a variabilidade das estimativas individuais T_i em relação ao parâmetro θ a ser estimado, mas que permite extrair outras informações a cerca do estimador analisado.

Como já referido anteriormente, a simulação estocástica de um determinado cenário CV_{def} , f_K , f_E , G e V_0 consiste, no presente trabalho, na geração de 200 traços de vazões afluentes com H anos de extensão e a operação simulada do reservatório considerando estes influxos. São gerados, assim, 200 valores de vazão regularizada (em termos de f_M) para este cenário, cada uma correspondente a uma série de vazões afluentes diferente. Considera-se como erro individual (ε_i) o desvio de cada valor individual de vazão regularizada em relação à vazão adimensional de equilíbrio (eq. 6.19). Em algumas simulações este erro é positivo, em outras, negativo, o que significa que o valor encontrado para a vazão regularizada é, respectivamente, maior ou menor que a vazão adimensional de equilíbrio.

$$\varepsilon_i = [(f_{M_i} - f_M^*) / f_M^*] \times 100 \quad (4.19)$$

onde,

f_{M_i} – fator adimensional de retirada da simulação individual i para um dado

CV , f_K , f_E , G , V_0 e H

f_M^* – vazão adimensional de equilíbrio, para um dado CV_{def} , f_K , f_E e G

O **erro médio modular (E)** é a média (ou esperança matemática) dos módulos dos erros individuais – $|\varepsilon_i|$ – e traduz o desvio médio de cada valor individual das 200 simulações em relação à vazão adimensional de equilíbrio; ou ainda, traduz a dispersão dos valores individuais de f_M em torno de f_M^* .

$$E = E[|\varepsilon_i|] = E[|[(f_{M_i} - f_M^*)/f_M^*] \times 100|] \quad (4.20)$$

No intuito de se determinar o estimador mais eficiente de $f_M^* - f_M^*_{VIMC}$ e $f_M^*_{\chi}$ - simulou-se o reservatório Caxitoré, sob diferentes cenários, e determinou-se, para cada simulação individual, a estimativa da vazão regularizada utilizando-se ambos os estimadores.

A Tabela 4.38 e as figuras 4.21 e 4.22 mostram os **erros médios modulares (E)** cometidos ao se estimar a vazão adimensional de equilíbrio f_M^* utilizando-se os estimadores $f_M^*_{VIMC}$ e $f_M^*_{\chi}$, considerando-se $f_K=1,0$ e $2,5$, $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2$ e $1,6$, $f_E=0,17$ e $G=90\%$.

Observa-se claramente nas figuras 4.21 e 4.22 que, para um mesmo cenário, os erros médios modulares cometidos ao estimar-se f_M^* pelo $f_M^*_{VIMC}$ (linhas contínuas) são sempre superiores que aqueles cometidos ao estimar-se f_M^* pelo $f_M^*_{\chi}$ (linhas tracejadas), excetuando-se os cenários em que $CV_{def}=0,4$, nos quais os erros médios modulares cometidos ao utilizar-se ambos os estimadores são praticamente iguais, mesmo na fase transiente do processo de armazenamento.

Tabela 4.38 – Valores do erro médio modular (E) cometidos ao estimar-se a vazão adimensional de equilíbrio pelos estimadores $f_M^* \chi$ e $f_M^* \text{VIMC}$, considerando-se $f_E=0,17$, $G=90\%$, $CV_{\text{def}}=0,4, 0,8, 1,2, \text{ e } 1,6$ e $f_K=1,0$ e $2,5$.

Erro Médio Modular (E)									
H	T	$CV_{\text{def}}=0,4$		$CV_{\text{def}}=0,8$		$CV_{\text{def}}=1,2$		$CV_{\text{def}}=1,6$	
		$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$	$f_K=1,0$	$f_K=2,5$
10	$f_M^* \chi$	8,0	12,8	18,0	20,8	20,8	23,3	28,2	29,0
	$f_M^* \text{VIMC}$	8,6	13,5	24,1	23,4	30,4	36,6	41,8	40,5
20	$f_M^* \chi$	5,8	9,0	13,4	15,4	16,3	18,5	22,8	23,6
	$f_M^* \text{VIMC}$	6,1	13,5	14,2	16,6	20,2	24,2	27,1	29,7
30	$f_M^* \chi$	5,2	7,6	11,6	12,3	15,7	16,3	19,5	20,9
	$f_M^* \text{VIMC}$	5,8	8,5	12,1	13,3	16,9	19,2	23,0	25,4
40	$f_M^* \chi$	4,7	6,3	10,6	11,5	13,0	14,3	16,9	18,8
	$f_M^* \text{VIMC}$	4,7	6,4	10,3	11,4	14,1	15,9	18,2	20,5
50	$f_M^* \chi$	4,2	5,4	9,0	9,3	11,9	12,9	16,0	17,2
	$f_M^* \text{VIMC}$	4,5	5,7	8,5	9,7	13,2	14,7	17,8	19,5
60	$f_M^* \chi$	4,1	5,3	8,4	9,3	11,3	12,4	14,4	16,4
	$f_M^* \text{VIMC}$	4,1	5,2	7,6	9,1	12,5	13,8	15,8	17,2
70	$f_M^* \chi$	4,2	4,9	7,6	8,8	10,8	11,5	13,4	15,7
	$f_M^* \text{VIMC}$	4,1	4,7	7,5	8,7	11,1	12,2	15,1	16,8
80	$f_M^* \chi$	3,9	4,6	7,0	8,5	9,8	10,1	13,0	15,1
	$f_M^* \text{VIMC}$	3,8	4,4	6,7	8,2	10,7	10,5	14,4	15,7
90	$f_M^* \chi$	3,4	4,2	6,8	7,7	10,2	9,9	12,5	14,1
	$f_M^* \text{VIMC}$	3,3	4,0	6,5	7,5	11,1	10,7	13,1	14,7
100	$f_M^* \chi$	3,6	4,6	6,1	7,5	9,8	10,0	11,9	13,4
	$f_M^* \text{VIMC}$	3,2	3,8	5,9	7,1	10,2	10,4	12,1	13,4

As maiores diferenças são observadas nos cenários com altos CV_{def} (1,2 a 1,6), notadamente para horizontes de simulação inferiores a 40 anos. Para $H=10$, por exemplo, os erros médios modulares cometidos ao estimar-se f_M^* com $f_M^* \text{VIMC}$ são cerca de 40 a 60% maiores que os cometidos ao estimar-se f_M^* com $f_M^* \chi$, o que significa que, embora os dois estimadores resultem, em média, em um mesmo

valor para a vazão adimensional de equilíbrio f_M^* - uma vez que ambos são justos – os valores das estimativas individuais utilizando-se $f_{M\chi}^*$ estão mais próximas de f_M^* , ou seja $f_{M\chi}^*$ é um estimador mais eficiente da vazão adimensional de equilíbrio f_M^* que o estimador $f_{M_VIMC}^*$.

4.6.3.3. Consistência

Se o estimador for justo, a condição de consistência equivale a dizer que sua variância tende a zero quando o tamanho da amostra tende ao infinito, isto é:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sigma^2 (T) = 0 \quad (4.21)$$

Não é objeto desta pesquisa demonstrar esta propriedade. Admitir-se-á neste trabalho que ambos os estimadores estudados são consistentes, uma vez que parece natural assumir que o estimador T aproxima-se do verdadeiro parâmetro θ , na medida em que a amostra cresce.

Erro Médio Modular - f_M^* VIMC e fM_e^*
 $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2$ e $1,6$ $f_K=1,0$ $f_E=0,17$ $G=90\%$

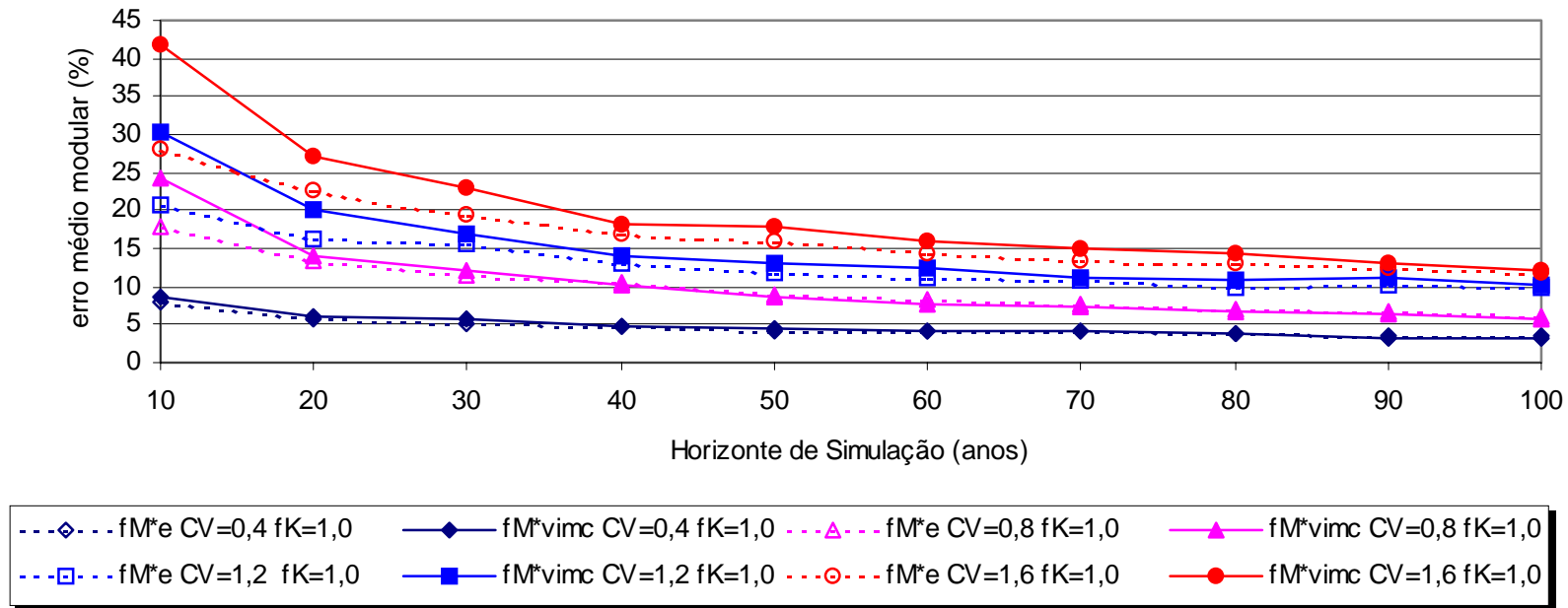
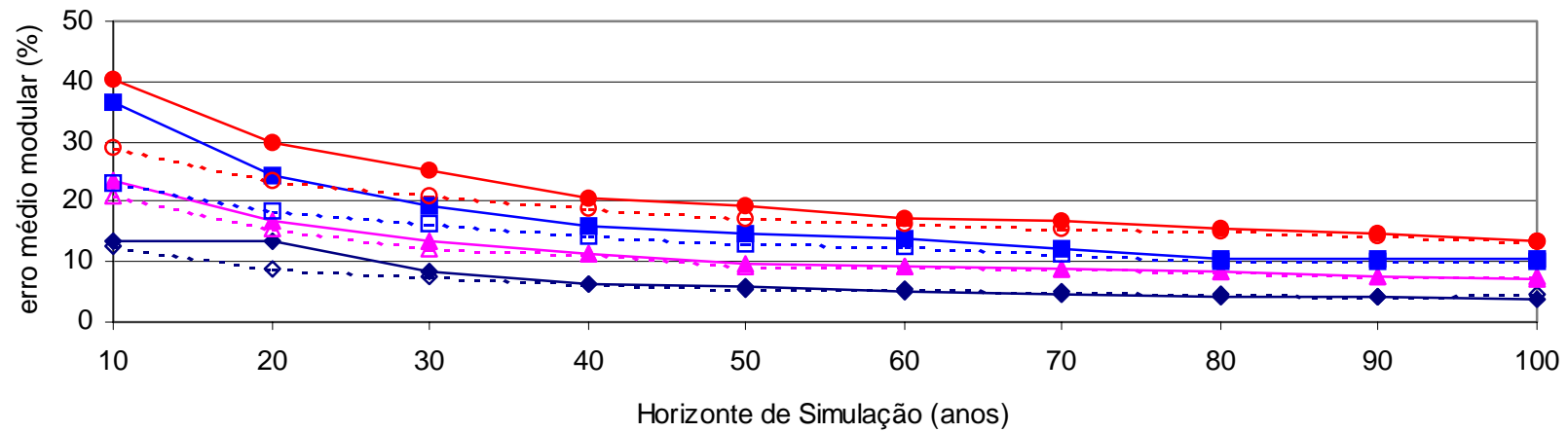


Figura 4.21 – Erros médios modulares cometidos ao estimar-se a vazão adimensional de equilíbrio com os estimadores f_M^* e f_M^* VIMC, considerando-se $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2$ e $1,6$, $f_K=1,0$, $f_E=0,17$, $G=90\%$ e $H=10$ a 100 anos

Erro Médio Modular - fM^*_{VIMC} e fM^*_e
 $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2$ e $1,6$ $f_K=2,5$ $f_E=0,17$ $G=90\%$



---◇--- fM^*_e CV=0,4 $f_K=2,5$ —◆— fM^*_{vimc} CV=0,4 $f_K=2,5$ ---△--- fM^*_e CV=0,8 $f_K=2,5$ —▲— fM^*_{vimc} CV=0,8 $f_K=2,5$
 ---□--- fM^*_e CV=1,2 $f_K=2,5$ —■— fM^*_{vimc} CV=1,2 $f_K=2,5$ ---○--- fM^*_e CV=1,6 $f_K=2,5$ —●— fM^*_{vimc} CV=1,6 $f_K=2,5$

Figura 4.22 – Erros médios modulares cometidos ao estimar-se a vazão adimensional de equilíbrio com os estimadores fM^*_χ e fM^*_{VIMC} , considerando-se $CV_{def}=0,4, 0,8, 1,2$ e $1,6$, $f_K=2,5$, $f_E=0,17$, $G=90\%$ e $H=10$ a 100 anos

V - CONCLUSÕES

O estudo das incertezas na determinação das vazões regularizadas causadas pela aleatoriedade dos deflúvios naturais foi o principal objetivo deste trabalho. Utilizou-se como estudo de caso o Açude Caxitoré, localizado no Semi-Árido cearense; a validade do estudo, no entanto, não se restringe unicamente ao local citado, uma vez que buscou-se o caráter geral ao adotar-se diferentes valores de capacidades para o reservatório e diferentes distribuições temporais dos influxos, estas últimas refletidas pelos diferentes coeficientes de variação assumidos para as vazões anuais, conservadas a média e a distribuição de probabilidades.

Quanto ao comportamento do processo de armazenamento sob diferentes cenários de volume inicial, variabilidade das vazões naturais, capacidade do reservatório e nível de garantia, as principais conclusões desta pesquisa são as que se seguem:

1. Verificou-se que se pode considerar como uma boa estimativa das reais disponibilidades de um dado reservatório, o fator adimensional de retirada (f_M) obtido pela simulação do mesmo, tendo como influxo uma série sintética com 5.000 anos de extensão. Neste caso, f_M é denominado de *vazão adimensional de equilíbrio* (f_M^*).

2. Considerando-se os demais parâmetros inalterados, o processo de armazenamento mostrou-se altamente influenciado pelo coeficiente de variação de seus influxos (CV_{def}). Observou-se que reservatórios com influxos menos variáveis regularizam maiores valores de vazão que aqueles cujos influxos são mais variáveis. Tomando como referência a vazão adimensional de equilíbrio, e simulando o reservatório em condições idênticas ($f_K=1,5$, $V_0=$ cheio e $G=90\%$), exceto pela variabilidade dos influxos - CV_{def} assumindo valores iguais a 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4 e 1,6 - verificou-se que o mesmo regularizou 77%, 62%, 49%, 42%, 33%, 27%, 23% e 19% da vazão média afluyente anual (μ), respectivamente. Ou seja, ao considerar-se CV_{def} diametralmente opostos - 0,2 e 1,6 - mas simulados em condições idênticas, observou-se que o primeiro foi capaz de regularizar um valor aproximadamente cinco vezes superior ao segundo.
3. Verificou-se que, no estado transiente do processo de armazenamento, independentemente do coeficiente de variação dos deflúvios naturais, da capacidade e da garantia adotadas, o fator adimensional de retirada (f_M) assume valores maiores que a vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*), se $V_0=$ cheio, e menores, se $V_0=$ vazio. Concluiu-se, portanto, pela existência de um volume inicial V_0 - entre cheio e vazio - para o qual os valores de f_M assumem valores iguais (ou muito próximos) aos de f_M^* . Este volume inicial é aquele no qual o processo de armazenamento converge mais rapidamente para o estado de equilíbrio, tendo sido denominado neste texto de **Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC)**.

4. Quanto à sensibilidade do processo de armazenamento ao volume inicial adotado para a simulação, observou-se três padrões distintos de comportamento, em função da variabilidade dos deflúvios naturais:

CV_{def} = 0,2 - Observou-se que o processo de armazenamento é pouco sensível à variação do volume inicial, ou seja, ao assumir-se valores distintos para este parâmetro – V_0 variando entre 25% e 100% da capacidade do reservatório (K) – o fator adimensional de retirada, para qualquer horizonte de simulação (H), pode ser considerado como sendo a própria vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*). Mesmo ao considerar-se V_0 =vazio, o processo de armazenamento convergiu para a condição de equilíbrio para H=30 anos.

CV_{def} = 0,4 - Observou-se o processo de armazenamento tem um comportamento considerado como sendo de *transição*. Para $f_K=1,0$ e 1,5, o mesmo apresentou comportamento semelhante ao acima descrito, ou seja, pouco sensível a V_0 . Para maiores valores de f_K , no entanto, se mostrou influenciado por V_0 , apresentando VIMC definido, de uma maneira geral, entre 20% e 50%K.

CV_{def} = 0,8 a 1,6 – O processo de armazenamento se mostrou muito sensível ao volume inicial e, conseqüentemente, o VIMC definiu-se em intervalos de menor amplitude. Observou-se que, assumindo-se $V_0=15\%K$, o f_M obtido, para quaisquer valores de H e f_K , pode ser considerado igual à vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*).

Conclui-se, por conseguinte, que o valor do VIMC não assume um valor fixo - igual 50% da capacidade do reservatório - como afirmado por JENG (1967). Pelo contrário, é função do coeficiente de variação dos influxos (CV_{def}) e do fator adimensional de capacidade (f_K).

5. Como seria de se esperar, o fator adimensional de retirada (f_M) é influenciado pela capacidade de acumulação do reservatório. Observou-se que a convergência do processo de armazenamento se deu de uma maneira mais rápida para menores valores de f_K . Independentemente do cenário adotado, verificou-se um acréscimo da ordem de 50% no valor de f_M , ao duplicar-se a capacidade do reservatório de $f_K=1,0$ para $f_K=2,0$. Observou-se que maiores valores de f_K resultam em uma maior variabilidade nas séries de vazões regularizadas.
6. Observou-se que, independentemente do horizonte de simulação assumido, os valores do fator adimensional de retirada decrescem com o aumento do nível de garantia adotado, o que faz sentido, vez que a frequência de falhas tende a diminuir quando se reduz o volume de água a ser retirado do lago.
7. Independentemente das condições iniciais assumidas, verificou-se que a *variabilidade* das vazões regularizadas (CV_{reg}) é proporcional à *variabilidade* das vazões naturais (CV_{def}), e ainda que, dentre os vários cenários de volume inicial adotados, o que resulta na menor variabilidade das vazões regularizadas é aquele no qual o reservatório é assumido inicialmente cheio.

O presente estudo procurou ainda analisar estimadores para a vazão regularizada no estado de equilíbrio (f_M^*), tomando como base as propriedades de um bom estimador, a saber: justeza, eficiência e consistência.

Concluiu-se que $f_{M^* \chi}$ é o melhor estimador da vazão adimensional de equilíbrio de um dado reservatório. A determinação de f_M^* através deste estimador consiste, basicamente, em simular o reservatório, considerando-o inicialmente cheio e, posteriormente, dividir o resultado obtido para f_M pelo Fator de Correção do Viés (χ_{90}). A equação geral obtida para χ_{90} é específica para o clima semi-árido nordestino, especificidade esta traduzida pelo padrão de distribuição temporal de vazões, típicas de rios intermitentes, estando definida para $CV_{def}=0,2$ a $1,6$, $f_K=1,0$ a $2,5$ e $H=10$ a 100 anos. Fora desse campo de valores a equação não foi testada.

Para a sua faixa de aplicação – razoavelmente ampla - o estimador $f_{M^* \chi}$ reproduziu com grande precisão a vazão adimensional de equilíbrio obtida a partir da simulação do reservatório com uma série sintética de vazões com extensão igual a $H=5.000$ anos.

Há que se considerar, no entanto, que, não obstante a utilização de $f_{M^* \chi}$ resulte, em média, em valores iguais (ou muito próximos) de f_M^* , e que este cenário seja aquele de menor variabilidade dentre todos os estudados, as incertezas na estimativa da vazão adimensional de equilíbrio ainda persistem. Tais incertezas, decorrentes do caráter aleatório das vazões naturais, são significativas, não podem ser reduzidas, e configuram-se, certamente, na maior dificuldade imposta

ao processo de outorga do direito de uso da água, notadamente em regiões semi-áridas.

ANEXOS

Tabela A1 - Vazões históricas mensais do Rio Caxitoré - Ceará - Brasil (1912 – 1990)

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1912	36,5	98,9	179,9	96,7	78,1	6,0	3,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1913	0,0	28,1	18,4	48,6	5,8	3,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1914	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1915	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1916	0,0	0,1	65,1	25,3	7,7	1,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1917	18,0	100,9	86,2	35,5	73,7	6,2	2,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1918	0,0	0,1	51,7	21,5	2,1	1,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1919	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1920	0,0	0,0	124,0	50,4	5,8	4,6	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1921	0,0	23,9	138,4	63,8	71,8	5,6	2,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1922	0,0	0,0	0,0	59,5	13,7	1,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1923	0,0	0,0	17,2	26,8	2,2	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1924	17,9	24,1	86,8	195,3	71,7	6,3	3,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1925	0,0	0,0	20,9	36,8	28,4	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1926	0,0	13,2	98,2	127,3	6,3	3,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1927	0,1	20,0	54,3	104,7	28,5	10,6	5,4	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
1928	0,0	0,0	0,1	4,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1929	0,0	20,6	39,6	78,7	5,0	2,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1930	0,0	9,0	2,9	1,7	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1931	0,0	33,6	14,4	8,4	2,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1932	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1933	0,1	0,2	28,3	80,8	3,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1934	0,0	28,9	63,4	13,1	14,3	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1935	0,0	7,0	14,1	119,7	12,8	5,3	3,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
1936	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1937	0,0	0,0	0,0	32,4	1,4	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1938	0,0	0,0	44,3	57,0	3,6	1,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1939	0,0	35,9	99,1	4,3	2,7	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1940	0,0	0,1	0,2	51,5	18,8	2,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A1 - Vazões históricas mensais do Rio Caxitoré - Ceará - Brasil (1912 - 1990) (cont)

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1941	0,0	0,1	62,8	25,6	4,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1942	0,0	0,0	23,4	29,6	3,6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1943	0,0	12,4	1,0	17,3	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1944	0,0	0,0	61,5	64,1	8,1	5,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1945	0,1	84,8	104,5	22,3	49,8	11,1	5,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1946	0,1	0,0	0,1	20,3	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1947	0,0	6,8	51,7	4,6	9,3	2,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1948	0,0	0,0	0,2	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1949	0,0	0,0	36,7	73,7	96,9	11,7	5,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1950	0,0	0,0	27,7	53,3	6,0	2,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1951	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
1952	0,0	0,0	0,0	8,9	10,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1953	0,0	0,0	0,3	27,6	2,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1954	0,0	13,0	1,1	1,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1955	0,0	0,0	3,3	84,9	40,2	5,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1956	0,0	0,0	25,3	82,3	5,9	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1957	0,0	0,0	101,6	152,3	19,2	8,5	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1958	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1959	0,0	34,3	79,9	7,8	36,1	7,5	2,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1960	0,0	0,0	63,8	50,2	7,3	3,6	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1961	0,0	88,0	163,9	264,1	19,8	9,8	3,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
1962	0,0	2,8	11,6	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1963	0,0	0,6	111,6	62,7	8,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0
1964	0,1	40,1	45,7	129,9	20,9	11,9	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1965	0,8	0,0	0,0	96,2	78,5	32,4	27,6	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1966	0,0	1,5	0,0	0,4	2,3	2,4	0,0	3,2	3,2	0,0	5,5	0,0
1967	4,1	3,6	32,5	42,2	83,7	3,3	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1968	0,0	1,9	4,1	42,6	64,8	0,0	1,9	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
1969	0,0	0,0	0,0	33,4	3,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A1 - Vazões históricas mensais do Rio Caxitoré - Ceará - Brasil (1912 - 1990) (cont)

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1970	0,0	0,0	0,1	14,2	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1971	0,0	0,0	0,3	26,8	4,2	2,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	0,0	0,0	0,1	8,1	16,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1973	0,1	0,1	58,4	57,1	20,6	11,5	6,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1974	46,4	56,8	147,4	477,1	145,9	19,0	8,5	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	0,0	0,1	30,1	3,0	14,8	3,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1976	0,0	0,1	0,8	1,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1977	0,0	0,2	27,1	29,4	5,0	3,7	1,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	0,0	0,1	2,9	0,6	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1979	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	0,0	0,0	48,6	2,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	0,0	0,0	34,5	32,1	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1984	0,0	0,0	56,7	81,7	21,9	8,1	3,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
1985	6,3	129,5	73,8	218,5	37,8	11,2	5,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	0,0	6,3	109,1	101,8	50,3	47,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	0,0	0,0	27,4	21,8	3,3	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1988	7,1	9,4	52,3	93,4	6,5	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	2,8	5,1	84,5	81,4	12,5	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	0,0	1,5	2,2	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[Anexos\Tabelas A2 eA3 erros eq individuais.xls](#)

Continuação tabela anexo

[Anexos\Tabelas A4 e A5_ erros eq geral.xls](#)

Continuação Tabela

GLOSSÁRIO

No intuito de facilitar o entendimento do trabalho, apresentar-se-á a conceituação e a simbologia (quando necessário) de alguns termos e parâmetros citados ao longo do texto.

- **Capacidade do Reservatório (K)**- Representa o volume total acumulado no reservatório quando o nível da água encontra-se na cota da soleira do sangradouro.
- **Coefficiente de Variação (CV)** – é a razão entre o desvio padrão (σ) e a média (μ) da variável aleatória X.
- **Coefficiente de Variação dos Deflúvios (CV_{def})** – é a razão entre o desvio padrão (σ) e a média (μ) da série de vazões naturais afluentes ao reservatório.
- **Coefficiente de Variação das Estimativas da Vazão de Equilíbrio (CV_{eqI})** – é a razão entre o desvio padrão (σ) e a média (μ) das séries de vazões de equilíbrio estimadas pelos estimadores $f_M^*_{\chi}$ e $f_M^*_{VIMC}$.
- **Coefficiente de Variação das Vazões Regularizadas (CV_{reg})** – é a razão entre o desvio padrão (σ) e a média (μ) da série de vazões regularizadas pelo reservatório.

- **Erro Individual (ε_i)** – É o desvio observado, em termos percentuais, entre um valor individual assumido pela vazão regularizada (em termos de Q_{Gi} ou f_{Mi}), considerando um dado cenário, em relação à vazão de equilíbrio (Q^* ou f_M^*) deste mesmo cenário. Em termos de f_M é dado por:

$$\varepsilon_i = [(f_{Mi} - f_M^*) / f_M^*] \times 100$$

- **Erro Individual Modular ($|\varepsilon_i|$)** – É o módulo do Erro Individual (ε_i). Ou seja, é desvio observado (em módulo) entre um valor individual assumido pela vazão regularizada, considerando um dado cenário, em relação à vazão adimensional de equilíbrio deste mesmo cenário.
- **Erro Médio (ε_m)** – É o desvio da média das 200 simulações, considerando um dado cenário, em relação à vazão de equilíbrio. Uma vez que a média das 200 simulações, por definição, é o valor adotado para a vazão regularizada (Q_g ou f_M) para aquele cenário, tem-se que o erro médio, em termos de f_M é dados por:

$$\varepsilon_m = [(f_M - f_M^*) / f_M^*] \times 100$$

- **Erro Médio Modular (E)** - é a média dos módulos dos erros individuais – $|\varepsilon_i|$ – e traduz o média dos desvios de cada valor individual das 200 simulações em relação à vazão adimensional de equilíbrio; ou ainda, traduz a dispersão dos valores individuais de f_M em torno de f_M^* . É definido por:

$$E = E[|\varepsilon_i|] = E[|[(f_{Mi} - f_M^*) / f_M^*] \times 100|]$$

- **Estimando (θ)** – É o parâmetro a ser estimado. É uma característica numérica da população.
- **Estimador (T)** – É a fórmula que descreve o modo de calcular a estimativa de determinado parâmetro.
- **Estimador $f_M^*_{VIMC}$** - É um estimador da vazão adimensional de equilíbrio para um dado cenário. Significa “*vazão regularizada adimensional, em estado de equilíbrio, calculada através da simulação do reservatório considerando $V_0=VIMC$* ”.
- **Estimador $f_M^*_{\chi}$** – É um estimador da vazão adimensional de equilíbrio para um dado cenário. Significa “*vazão regularizada adimensional, em estado de equilíbrio, calculada através da simulação do reservatório considerando $V_0=cheio$, ajustada pelo fator de correção do viés (χ_{90}) correspondente ao horizonte de simulação adotado*”.
- **Estimativa (T_i)** – É o valor assumido por um estimador T.
- **Estimador justo** – O estimador T é dito justo quando a sua média (ou valor esperado) for igual ao parâmetro θ que se pretende estimar.
- **Estimador consistente** - Um estimador T é dito consistente se aproximar-se do verdadeiro parâmetro θ , na medida em que a amostra cresce. Se o estimador for justo, a condição de consistência equivale a dizer que sua variância tende a zero quando o tamanho da amostra tende ao infinito.

- **Estimador eficiente** - Um estimador T é dito como o estimador mais eficiente do parâmetro θ se ele for justo e sua variância, para o mesmo tamanho da amostra, for menor que a de qualquer outro estimador justo. A eficiência avalia o quão próximo as estimativas individuais de T estão do parâmetro θ .
- **Fator adimensional de capacidade (f_K)** - Representa a razão entre a capacidade do reservatório (K) e o volume médio afluente anual (μ).
- **Fator adimensional de evaporação (f_E)** - Obtido da equação adimensional do balanço hídrico, é igual a $(3\alpha^{1/3} \cdot E_L / \mu^{1/3})$, onde E_L representa a lâmina evaporada durante a estação seca.
- **Fator adimensional de retirada (f_M)** - Representa a razão entre a vazão regularizada – Q_G (ou volume regularizado anual – M_G) e o volume afluente médio anual (μ). Em uma simulação estocástica, f_M é entendido como a média dos n valores individuais de f_{Mi} encontrados de nas n simulações para um dado cenário.
- **Fator adimensional de retirada em estado de equilíbrio ou vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*)** – É a vazão regularizada pelo reservatório (em fração do volume afluente médio anual (μ)), quando o processo de armazenamento se encontra em seu estado de equilíbrio, segundo um determinado cenário de CV_{def} , f_K , f_E e G .

- **Fator de correção do viés (χ_{90})** – É a razão entre a vazão regularizada com 90% de garantia, considerando-se $V_0=\underline{\text{cheio}}$, e a vazão adimensional de equilíbrio com 90% de garantia para um dado cenário de CV_{def} , f_M e f_E .
- **Fator de forma do reservatório (α)** - A forma da bacia hidráulica do lago pode ser representada pela equação $Z(h) = \alpha h^3$; onde $Z(h)$ denota o volume da reserva quando a superfície do lago encontra-se na altura h ; h é medido em relação ao ponto mais profundo do açude, isto é: $Z(0) = 0$. O adimensional α , fator de forma, pode ser obtido a partir da regressão linear, passando pela origem, de $Z(h)$ vs. h^3 .
- **Horizonte de Planejamento** – É o horizonte para o qual se planeja obter a vazão regularizada. Os horizontes de simulação e planejamento podem, ou não coincidir.
- **Horizonte de Simulação (H)** – É o horizonte de tempo (em anos) utilizado para simular o reservatório.
- **Incertezas do Tipo I** – São as incertezas ocasionadas pelo desconhecimento do modelo matemático utilizado na avaliação.
- **Incertezas do Tipo II** – São as incertezas geradas na avaliação dos parâmetros populacionais μ e σ a partir da amostra, formada pela série histórica.
- **Incertezas do Tipo III** – São as incertezas causadas pela aleatoriedade das vazões naturais.

- **Nível de garantia (G)** - Representa a probabilidade do reservatório prover sem restrições, em um ano qualquer, a vazão regularizada Q_G .
- **Probabilidade de falha anual (Fa)** - Representa a probabilidade do reservatório não dispor de um volume suficiente para atender à demanda (= Q_G), mais as perdas por evaporação a partir do lago. É igual ao complemento do nível de garantia anual.
- **Vazão regularizada (Q_G)** - É a vazão, associada a uma garantia G, programada para ser retirada do reservatório sempre que houver disponibilidade. Neste texto M_G e Q_G são equivalentes (mas em unidades diferentes), uma vez que o volume a ser retirado *anualmente*, para uma dada garantia, pode ser entendido como a *vazão regularizada anual*, para esta garantia. Numa simulação estocástica, Q_{90} (quando $G=90\%$) é entendido como a média dos n valores individuais da vazão regularizada - Q_{90i} encontrados de nas n simulações para um dado cenário.
- **Volume afluyente médio anual (μ)** - Volume médio (em hm^3) que anualmente escoa para o reservatório.
- **Volume anual regularizado (M_G)** - É entendido como o volume programado para retirar anualmente do reservatório sempre que houver disponibilidade. Esse volume está associado a uma garantia. Ex: M_{90} significa que o volume anual regularizado tem 90% de garantia anual, isto é: existe disponibilidade para retirada desse volume em 90% dos anos. Em uma simulação estocástica,

M_{90} (quando $G=90\%$) é entendido como a média dos n valores de volume anual regularizado - M_{90i} encontrados nas n simulações para um dado cenário.

- **Vazão de Equilíbrio (Q^*)** – É a vazão regularizada (em hm^3/ano) pelo reservatório, quando o processo de armazenamento se encontra em seu estado de equilíbrio, segundo um determinado cenário de CV_{def} , f_K , f_E e G .
- **Viés** – tendência, influência.
- **Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC)** – É o volume inicial, utilizado na operação simulada do reservatório, no qual o processo de armazenamento converge mais rapidamente para o estado de equilíbrio. Por definição, para que um volume V_0 seja considerado o VIMC para um dado cenário, é preciso que os **erros médios (ϵ_m)**, para todos os horizontes de simulação H , sejam inferiores a 6%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J.K. (1991). Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios. Fortaleza, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará (Dissertação de Mestrado).
- ARROW, K. J. (1992). "I Know a Hawk from a Handsaw" . In: M. SZENBERG (Ed.), *Eminent Economists: Their Life and Philosophies*. Cambridge University Press, Cambridge.
- BARNES, F. B. (1954). *Storage Required for a City Water Supply*. Journal of the Institution of Engineers, Australia, 26:198.
- BECK, M.B. (1987). *Water Quality Modeling: A Review of the Analysis of Uncertainty*. In: Water Resources Research, vol. 23 No 8, august.
- BERNIER, J.M. (1987). *Elements of Bayesian Analysis of Uncertainty in Hydrological Reliability and Risk Models*. In: DUCKSTEIN, L. & PLATE, E.J. (Eds), Engineering Reliability and Risk in Water Resources, NATO ASI Series, Serie E: Applied Sci., No. 124, Nijhoff, Dordrecht, Netherlands.
- BERNSTEIN, P.L. (1997). Desafios aos Deuses – A Fascinante História do Risco. Rio de Janeiro, Editora Campus.

- CAMPOS, J.N.B. (1987). A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers Under High Evaporation Rate. Fort Collins, Colorado State University. PhD thesis.
- CAMPOS, J.N.B. (1996). Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangular de Regularização, Edições UFC.
- CAMPOS, J.N.B. e IBIAPINA, N. (1997). *Uma Equação para a Máxima Capacidade de Regularização em um Reservatório*. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Anais - vol. 2 p. 175-180 Vitória – Novembro.
- CAMPOS, J.N.B.; SOUZA Fº, F.A.; ARAÚJO, J.C. (1997). *Errors and Variability of Reservoir Yield Estimation as a Function of the Coefficient of Variation of Annual Inflows*. In: Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance.. Proceedings of 27th IARH Congress, San Francisco, USA.
- CAMPOS, J.N.B, SOUZA Fº FRANCISCO DE A .A . , LIMA, H.V. C. E LIMA, L.C (1998). *Erros e Incertezas nos Estudos de Vazões Regularizadas: O Caso do Açude Castanhão*. In: XVII Congresso Nacional Del Agua/II Simpósio De Recursos Del Cono Sur. Santa Fé, Argentina, Agosto.
- CAMPOS, J.N.B, STUDART, T.M.C, LUNA, R. E. FRANCO, S. (1999). *Liquid Discharges From Jaguaribe River To Atlantic Ocean After Large Scale Dam-Construction: Variability Analysis*. In: International Symposium On Hydrological, Geochemical Process In Large – Scale Dam Construction. Manaus, Novembro.
- CANTER, L.W. (1996). *Scientific Uncertainty and Water Resources Management* .In: LEMONS, J. (Ed.), Scientific Uncertainty and Environmental Problem Solving, Blackwell Science Inc., Cambridge.
- CEARÁ (1996). Plano Diretor da Bacia do Curu. Volume I, Tomo 2. COGERH/ Secretaria de Recursos Hídricos.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - DNMET (1992). Normais Climatológicas (1961 – 1990). Secretaria Nacional de Irrigação, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária.
- ERMOLIEV, Y.M. (1993). Uncertainties and Decision Making. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- FIERING, M.B. (1961). Queueing Theory and Simulation in Reservoir Design. Proceedings American Society of Civil Engineering.
- FIERING, M.B. (1966). *Synthetic Hydrology: an Assessment*. In: A . V. KNEESE AND S.C. SMITH. Water Research, Resources for the Future, Washington, DC.
- FREY, H.C. (1998). *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Energy and Environmental Systems*. In: AYYUB, B.M. (Ed.), Uncertainty Modeling and Analysis in Civil Engineering. CRC Press LLC, Florida.
- GANOULIS, J.G. (1994). Engineering Risk Analysis of Water Pollution. VCH Publishers Inc., New York, NY.
- GONDIM F^o, J. G. C. (1994). Sustentabilidade do Desenvolvimento do Semi-Árido sob o ponto de vista dos Recursos Hídricos. Projeto ÁRIDAS.
- HAAN, C. T. (1972). *Evaluation of Prediction Errors Probabilities from Stochastics Models by Simulation*. In: Proceedings of International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water resources Systems. Tucson, Arizona.
- HAAN, C. T. (1979). Statistical Methods in Hydrology. Iowa State University Press, Iowa.
- HAZEN, A . (1914). Storage to be Provided in Impounding Reservoirs for Water Supply. Transactions, American Society of Civil Engineers, vol.77.

- HURST, H.E., BLACK, R.P. and SIMAIKA, Y.M. (1965). Long Term Storage. Constable, London.
- KELMAN, J. (1987). *Modelos Estocásticos no Gerenciamento dos Recursos Hídricos*. In: BARTH, F.T. (organizador), Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos. Editora Nobel/ABRH, São Paulo, 1987.
- KEMPER, KARIN E. (1996). The Cost of Free Water: Water Resources Allocation and Use in the Curu Valley, Northeast Brazil. Linköping.
- KLIR, G. J. (1989). *Methodological Principles of Uncertainty in Inductive Modelling: a New Perspective*. In: ERICKSON, G. J. & SMITH, C.R. (Eds), Maximum-Entropy and Bayesian Methods in Science and Engineering Vol. I.
- KUNDZEWICZ, Z.W. (1995). *Hydrological Uncertainty in Perspective*. In: KUNDZEWICZ, Z.W.(Ed.), New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources. International Hydrology Series, Cambridge University Press, Cambridge.
- LANNA, A .E. (1997). *Introdução*. In: PORTO, R. L. (organizador). Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos. ABRH, Porto Alegre, 1997.
- MACMAHON, T. A ., LODNER, G.P. & JOY, C.S. (1972). Reservoir Storage Yield Estimates Based on Historical and Generated Streamflows. Civil Engineers Transactions, Institute of Engineers, Australia.
- McMAHON, T.A. e MEIN, R.G. (1976). Reservoir Capacity and Yield. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- MOLAK, V. (1997). Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management. Lewis Publishers, CRC Press, Florida, USA.

- MORGAN, M.G. & HENRION, M. (1993). Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge University Press, New York.
- PLATE, E.J. & DUCKSTEIN, L. (1987). *Reliability in Hydraulics Design*. In: DUCKSTEIN, L. & PLATE, E.J. (Eds), Engineering Reliability and Risk in Water Resources, NATO ASI Series, Serie E: Applied Sci., No. 124, Nijhoff, Dordrecht, Netherlands.
- SOBOL, I.M. (1994). A Primer for the Monte Carlo Method. CRC Press, Florida, 1994.
- SRIKANTHAN, R. and McMAHON, T.A. (1980). *Stochastic Generation of Monthly Flows for Ephemeral Streams*. In: Journal of Hydrology, n.47.
- STEPHENSON, D (1997) . *Reservoir Management during Drought*. In: Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance,. Proceedings of 27th IARH Congress, San Francisco, USA.
- SUDLER, C.E. (1927). Storage Required for the Regulation of Streamflow. Transactions of the American Society of Civil Engineers vol.91.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1992). Guidelines for Exposure Assessment, Federal Register, 57(104);22888-22938, May 29.
- VIEIRA, V.P.P.B.(1997). Análise de Risco Aplicada a Recursos Hídricos. Notas de Aula. Curso de Doutorado em Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará.
- VINCENS, G.J., I. RODRIGUES-ITURBE E J.C. SHAAKE (1975). A Bayesian Framework for the use of Regional Information in Hydrology. Res.,11(3). p.405-4114, 1975.

- VOGEL, R. M., NEIL, M. F. & RALPH, A. B. (1995). *Storage-Reliability-Resilience-Yield Relations for Northeastern United States*. In: Journal of Water Resources Planning and Management, set/oct.
- VOSE, D. (1996). Quantitative Risk Analysis: A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling. John Wiley & Sons, England.
- YEVJEVICH, V. (1972). Stochastic Processes in Hydrology. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado.