

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

VITOR MOREIRA DA ROCHA PONTE

MODELO SIMPLIFICADO DE SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.
REGRESSÕES DOS VOLUMES EVAPORADO, VERTIDO E REGULARIZADO.

FORTALEZA - CEARÁ

2008

VITOR MOREIRA DA ROCHA PONTE

MODELO SIMPLIFICADO DE SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.
REGRESSÕES DOS VOLUMES EVAPORADO, VERTIDO E REGULARIZADO.

Tese submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia Civil, área de concentração em recursos hídricos, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor

ORIENTADOR: PROF. JOSÉ NILSON B. CAMPOS, Ph.D.
CO-ORIENTADOR: MARCO AURÉLIO H. DE CASTRO, Ph.D.

FORTALEZA - CEARÁ

2008

VITOR MOREIRA DA ROCHA PONTE

MODELO SIMPLIFICADO DE SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.
REGRESSÕES DOS VOLUMES EVAPORADO, VERTIDO E REGULARIZADO.

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

A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas de ética científica.

Tese aprovada no dia 10 de Junho de 2008

Orientador: Prof. José Nilson B. Campos, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará

Co-orientador: Prof. Marco Aurélio H. de Castro, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará

Profa. Ticianá Marinho C. Studart, Dra.
Universidade Federal do Ceará

Henrique Vieira C. Lima, Dr.
Companhia de Água e Esgoto do Ceará

Prof. Alain Marie B. P. de Silans, Dr.
Universidade Federal da Paraíba

Aos meus pais, irmãos, familiares, amigos e à minha namorada, pela paciência e compreensão, dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores José Nilson B. Campos e Marco Aurélio H. de Castro, pela clareza e objetividade na orientação desta Tese.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental desta Universidade que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À República Federativa do Brasil, que através da CAPES e do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, proporcionaram os meios necessários ao desenvolvimento desta Tese.

Aos familiares e amigos.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo identificar equações simplificadas que permitam determinar o comportamento de reservatórios a partir de um reduzido número de parâmetros. São identificados quatro parâmetros: i) coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais ao reservatório; ii) volume adimensional do reservatório, razão entre a capacidade de armazenamento do reservatório e o volume médio afluente anual ao mesmo; iii) fator de evaporação adimensional, função do volume médio afluente anual ao reservatório, dos coeficientes de forma deste reservatório e da evaporação potencial líquida do espelho d'água, em metros; e iv) garantia, sendo esta considerada mensal ou anual. A partir destes quatro parâmetros, são determinadas equações que permitem prever, para um determinado reservatório, os volumes adimensionais: i) evaporado; ii) vertido; e iii) regularizado. Para a determinação destas equações são utilizados dados de reservatórios gerados aleatoriamente. Estes reservatórios foram simulados, determinando os volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado, variáveis estas ditas dependentes, assim como determinados os valores dos quatro parâmetros independentes. A partir destas variáveis dependentes e independentes, são determinadas as equações simplificadas através da técnica de regressão linear, determinando os limites de validade e os erros inerentes à aplicação das mesmas. Em um segundo momento, as equações determinadas no decorrer deste trabalho são validadas através da análise de setenta e cinco reservatórios localizados no Estado da Paraíba. Destas equações, é possível identificar, tanto o comportamento de reservatórios, bem como o efeito individual de cada uma das variáveis independentes no comportamento dos mesmos. As equações desenvolvidas nesta Tese são de fácil aplicação, reduzido dispêndio de tempo e apresentam, em certa medida, erros reduzidos.

ABSTRACT

The present research identifies simplified equations capable to determine the behavior of reservoirs. It considers four independent variables: i) coefficient of variation of annual inflow; ii) dimensionless reservoir capacity; iii) dimensionless evaporation factor, function of the average annual inflow, reservoir shape coefficients and potential net evaporation; and iv) probability of failure. The dependents variables are: i) dimensionless evaporation loss volume; ii) dimensionless spill loss volume; and iii) dimensionless release volume. Initially, were used data from reservoirs generated randomly. The reservoirs dependents and independents variables values were determined after its simulation. It was used linear regression to determine the relationship between the dependents and independents variables. Limits of validity and errors were also determined. The equations determined in this research were used in seventy-five reservoirs located in the state of Paraíba, Brazil, in order to validate them. By using the equations determined in this research, it is possible to identify: i) the behavior of reservoirs; and ii) the individual effect of each independent variable in the reservoir dependents variables. The equations developed in this thesis are easy to apply, time saving and have acceptable errors.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
SUMARIO	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xx
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Organização do Trabalho.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Comportamento de Reservatórios	5
2.1.1 Indicadores de Desempenho.....	5
2.1.2 Porte dos Reservatórios.....	6
2.1.3 Volumes Afluentes.....	7
2.2 Técnicas de Dimensionamento de Reservatórios.....	9
2.2.1 Técnicas Preliminares.....	9
2.2.2 Técnicas Avançadas.....	12
3 METODOLOGIA	14
3.1 Simulação dos Reservatórios.....	15
3.1.1 Equação do Balanço Hídrico.....	15
3.1.2 Aplicação da Equação do Balanço Hídrico.....	17
3.1.3 Adimensionalização dos Resultados da Equação da Continuidade.....	20
3.2 Modelos de Regressão.....	21
3.3 Procedimentos.....	26

4	RESULTADOS	30
4.1	Dados Primários e Correlações.....	32
4.1.1	Reservatórios Gerados e Simulados Com Garantia Mensal.....	32
4.1.2	Reservatórios Gerados e Simulados Com Garantia Anual.....	40
4.2	Regressões Considerando os Dados dos Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Mensal	46
4.2.1	Volume Evaporado Adimensional.....	47
4.2.2	Volume Vertido Adimensional.....	53
4.2.3	Volume Regularizado Adimensional.....	58
4.2.4	Considerações.....	63
4.3	Regressões Considerando os Dados dos Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Mensal.....	64
4.3.1	Volume Evaporado Adimensional.....	65
4.3.2	Volume Vertido Adimensional.....	71
4.3.3	Volume Regularizado Adimensional.....	76
4.3.4	Considerações.....	81
4.4	Determinação Alternativa do Volume Adimensional Regularizado...	82
4.4.1	Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Mensal.....	84
4.4.2	Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Anual.....	88
4.5	Validação das Regressões.....	92
4.5.1	Dados Primários e Correlações dos Reservatórios da Paraíba...	93
4.5.2	Validação dos Modelos Considerando Garantia Mensal.....	106
4.5.3	Validação dos Modelos Considerando Garantia Anual.....	111
4.5.4	Considerações Sobre a Validação das Regressões.....	116
4.6	Gráficos da Influência das Variáveis Independentes nos Volumes Adimensionais Evaporado, Vertido e Regularizado.....	118
4.7	Resumo das Regressões	121
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	126
	REFERÊNCIAS.....	129
	APENDICE A - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE REGRESSÕES LINEARES....	137
	APENDICE B - GRÁFICOS DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NOS VOLUMES ADIMENSIONAIS EVAPORADO, VERTIDO E REGULARIZADO.....	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores de desagregação dos volumes afluentes anuais e da evaporação potencial líquida anual.....	18
Figura 2 – Histograma do coeficiente a da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	33
Figura 3 – Histograma do coeficiente b da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	33
Figura 4 – Histograma da evaporação líquida, ev , do espelho d'água dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, em metros.....	33
Figura 5 – Histograma do volume médio afluente anual aos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, I , em hm^3	33
Figura 6 – Histograma do fator adimensional de evaporação, FE , dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	33
Figura 7 – Histograma do volume adimensional do reservatório, FK , dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	33
Figura 8 – Histograma do coeficiente de variação das afluições anuais aos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, CV	34
Figura 9 – Histograma do volume adimensional regularizado, VR dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	34
Figura 10 – Histograma do volume adimensional vertido, VS dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	34
Figura 11 – Histograma do volume adimensional evaporado, VE dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	34
Figura 12 – Dispersão dos valores de FK versus CV , dos reservatórios fictícios simulados com garantia mensal.....	38
Figura 13 – Dispersão dos valores de FE versus CV , dos reservatórios fictícios simulados com garantia mensal.....	38

Figura 14 – Dispersão dos valores de a versus I , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	38
Figura 15 – Dispersão dos valores de VR versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	38
Figura 16 – Dispersão dos valores de VS versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	38
Figura 17 – Dispersão dos valores de VE versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	38
Figura 18 – Dispersão dos valores de VR versus FK , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	39
Figura 19 – Dispersão dos valores de VS versus FK , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	39
Figura 20 – Dispersão dos valores de VE versus FK , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	39
Figura 21 – Dispersão dos valores de VR versus FE , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	39
Figura 22 – Dispersão dos valores de VS versus FE , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	39
Figura 23 – Dispersão dos valores de VE versus FE , dos reservatórios simulados com garantia mensal.....	39
Figura 24 – Histograma do coeficiente a da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	41
Figura 25 – Histograma do coeficiente b da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	41
Figura 26 – Histograma da evaporação líquida, ev , do espelho d'água dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, em metros.....	41
Figura 27 – Histograma do volume médio afluyente anual dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, I , em hm^3	41
Figura 28 – Histograma do fator adimensional de evaporação, FE , dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	41
Figura 29 – Histograma do volume adimensional do reservatório, FK , dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	41

Figura 30 – Histograma do coeficiente de variação das aflúências anuais dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, CV	42
Figura 31 – Histograma do volume adimensional regularizado, VR , dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	42
Figura 32 – Histograma do volume adimensional vertido, VS dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	42
Figura 33 – Histograma do volume adimensional evaporado, VE , dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	42
Figura 34 – Dispersão dos valores de FK versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	44
Figura 35 – Dispersão dos valores de FE versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	44
Figura 36 – Dispersão dos valores de a versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	44
Figura 37 – Dispersão dos valores de VR versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	44
Figura 38 – Dispersão dos valores de VS versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	44
Figura 39 – Dispersão dos valores de VE versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	44
Figura 40 – Dispersão dos valores de VR versus FK , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	45
Figura 41 – Dispersão dos valores de VS versus FK , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	45
Figura 42 – Dispersão dos valores de VE versus FK , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	45
Figura 43 – Dispersão dos valores de VR versus FE , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	45
Figura 44 – Dispersão dos valores de VS versus FE , dos reservatórios simulados com garantia a nual.....	45
Figura 45 – Dispersão dos valores de VE versus FE , dos reservatórios simulados com garantia anual.....	45

Figura 46 – Valores de VE determinados por regressão versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	48
Figura 47 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VE versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	49
Figura 48 – Erros observados versus CV para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	49
Figura 49 – Erros observados versus FK para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	49
Figura 50 – Erros observados versus FE para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	50
Figura 51 – Erros observados versus G para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	50
Figura 52 – Erros observados versus VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	50
Figura 53 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	51
Figura 54 – Valores de VS determinados por regressão versus os valores de VS determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	54
Figura 55 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VS versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	55
Figura 56 – Erros observados versus CV para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	55
Figura 57 – Erros observados versus FK para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	55
Figura 58 – Erros observados versus FE para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	56
Figura 59 – Erros observados versus G para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	56

Figura 60 – Erros observados versus VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	56
Figura 61 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VS , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	57
Figura 62 – Valores de VR determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	59
Figura 63 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VR versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	60
Figura 64 – Erros observados versus CV para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	60
Figura 65 – Erros observados versus FK para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	60
Figura 66 – Erros observados versus FE para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	61
Figura 67 – Erros observados versus G para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	61
Figura 68 – Erros observados versus VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	61
Figura 69 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VR , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	62
Figura 70 – Valores de VE determinados por regressão versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	66
Figura 71 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VE versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	67
Figura 72 – Erros observados versus CV para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	67

Figura 73 – Erros observados versus FK para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	67
Figura 74 – Erros observados versus FE para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	68
Figura 75 – Erros observados versus G para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	68
Figura 76 – Erros observados versus VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	68
Figura 77 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	69
Figura 78 – Valores de VS determinados por regressão versus os valores de VS determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	72
Figura 79 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VS versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	73
Figura 80 – Erros observados versus CV para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	73
Figura 81 – Erros observados versus FK para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	73
Figura 82 – Erros observados versus FE para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	74
Figura 83 – Erros observados versus G para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	74
Figura 84 – Erros observados versus VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	74
Figura 85 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VS , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	75
Figura 86 – Valores de VR determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	77

Figura 87 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VR versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	78
Figura 88 – Erros observados versus CV para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	78
Figura 89 – Erros observados versus FK para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	78
Figura 90 – Erros observados versus FE para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	79
Figura 91 – Erros observados versus G para a regressão de VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	79
Figura 92 – Erros observados versus VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	79
Figura 93 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VR , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	80
Figura 94 – Fluxograma de cálculo de VE , VS e VR	83
Figura 95 – Valores de VR determinados pela equação $VR=1-VE-VS$ versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	84
Figura 96– Erros máximos, em módulo, da aplicação da equação $VR=1-VE-VS$ versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	85
Figura 97 – Erros observados versus CV para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	85
Figura 98 – Erros observados versus FK para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	85
Figura 99 – Erros observados versus FE para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	86
Figura 100 – Erros observados versus G para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	86
Figura 101 – Erros observados versus $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	86

Figura 102 – Histograma e estatística dos resíduos de $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	87
Figura 103 – Valores de VR determinados pela equação $VR=1-VE-VS$ versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	88
Figura 104 – Erros máximos, em módulo, da aplicação da equação $VR=1-VE-VS$ versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	89
Figura 105 – Erros observados versus CV para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	89
Figura 106 – Erros observados versus FK para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	89
Figura 107 – Erros observados versus FE para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	90
Figura 108 – Erros observados versus G para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	90
Figura 109 – Erros observados versus $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	90
Figura 110 – Histograma e estatística dos resíduos de $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	91
Figura 111 – Estatística do coeficiente a da equação cota-área-volume dos reservatórios da Paraíba.....	99
Figura 112 – Estatística do coeficiente b da equação cota-área-volume dos reservatórios da Paraíba.....	99
Figura 113 – Estatística da evaporação líquida, ev , do espelho d'água dos reservatórios da Paraíba, em metros.....	99
Figura 114 – Estatística do volume médio afluyente anual aos reservatórios da Paraíba, I , em hm ³	99
Figura 115 – Estatística do fator adimensional de evaporação, FE , dos reservatórios da Paraíba.....	99

Figura 116 – Estatística do volume adimensional dos reservatórios da Paraíba, <i>FK</i>	99
Figura 117 – Estatística do coeficiente de variação das afluições anuais aos reservatórios da Paraíba, <i>CV</i>	100
Figura 118 – Estatística do volume adimensional regularizado, <i>VR</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	100
Figura 119 – Estatística do volume adimensional vertido, <i>VS</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	100
Figura 120 – Estatística do volume adimensional evaporado, <i>VE</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	100
Figura 121 – Dispersão dos valores de <i>FK</i> versus <i>CV</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	104
Figura 122 – Dispersão dos valores de <i>FE</i> versus <i>CV</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	104
Figura 123 – Dispersão dos valores de <i>a</i> versus <i>I</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	104
Figura 124 – Dispersão dos valores de <i>VR</i> versus <i>CV</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	104
Figura 125 – Dispersão dos valores de <i>VS</i> versus <i>CV</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	104
Figura 126 – Dispersão dos valores de <i>VE</i> versus <i>CV</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	104
Figura 127 – Dispersão dos valores de <i>VR</i> versus <i>FK</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	105
Figura 128 – Dispersão dos valores de <i>VS</i> versus <i>FK</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	105
Figura 129 – Dispersão dos valores de <i>VE</i> versus <i>FK</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	105
Figura 130 – Dispersão dos valores de <i>VR</i> versus <i>FE</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	105
Figura 131 – Dispersão dos valores de <i>VS</i> versus <i>FE</i> , dos reservatórios da Paraíba.....	105

Figura 132 – Dispersão dos valores de VE versus FE , dos reservatórios da Paraíba.....	105
Figura 133 – Valores de VE determinados por regressão versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.....	107
Figura 134 – Valores de VS determinados por regressão versus os valores de VS determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.....	107
Figura 135 – Valores de VR determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.....	108
Figura 136 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.....	108
Figura 137 – Valores de VE determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal....	110
Figura 138 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.....	110
Figura 139 – Valores de VE determinados por regressão versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.....	112
Figura 140 – Valores de VS determinados por regressão versus os valores de VS determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.....	112
Figura 141 – Valores de VR determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.....	113
Figura 142 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.....	113

- Figura 143 – Valores de VE determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual..... 115
- Figura 144 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual..... 115
- Figura 145 – Exemplo de utilização dos gráficos do Apêndice C..... 119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comportamento médio de 40 reservatórios da bacia do Jaguaribe apresentado por CAMPOS(2003), simulados com garantia de 90%...	6
Tabela 2 – Fatores de desagregação dos volumes afluentes anuais e da evaporação potencial líquida anual.....	18
Tabela 3 – Correlação das variáveis dependentes e independentes para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal	35
Tabela 4 – Correlação entre o fator adimensional de evaporação e suas variáveis explicativas para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	35
Tabela 5 – Correlação das variáveis dependentes e independentes para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	43
Tabela 6 – Correlação entre o fator adimensional de evaporação e suas variáveis explicativas para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	43
Tabela 7 – Resultado da regressão para VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	48
Tabela 8 – Teste de hipótese $H_0 : C(4) = 1$ para a regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	52
Tabela 9 – Resultado da regressão para VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	54
Tabela 10 – Resultado da regressão para VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.....	59
Tabela 11 – Resultado da regressão para VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	66

Tabela 12 – Teste de hipótese $H_0 : C(4) = 1$ para a regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	70
Tabela 13 – Resultado da regressão para VE , considerando $C(4) = 1$ e os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	70
Tabela 14 – Resultado da regressão para VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	72
Tabela 15 – Resultado da regressão para VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.....	77
Tabela 16 – Bacias hidrográficas e reservatórios da Paraíba.....	94
Tabela 17 – Lista dos 75 reservatórios da Paraíba considerados no estudo.....	94
Tabela 18 – Dados básicos dos 75 reservatórios da Paraíba selecionados.....	95
Tabela 19 – Resultados da aplicação das regressões nos 75 reservatórios da Paraíba, considerando garantia mensal de 90%.....	97
Tabela 20 – Correlação das variáveis dependentes e independentes para os dados dos reservatórios da Paraíba.....	101
Tabela 21 – Correlação entre o fator adimensional de evaporação e suas variáveis explicativas para os dados dos reservatórios da Paraíba	101
Tabela 22 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.....	109
Tabela 23 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual, considerando o fator de correção para VE	111
Tabela 24 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.....	114
Tabela 25 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual, considerando o fator de correção para VE	116
Tabela 26 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios gerados e simulados com garantia mensal. Informações obtidas da seção 4.2, quando da determinação das regressões.....	116

Tabela 27 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da gerados e simulados com garantia anual. Informações obtidas da seção 4.3, quando da determinação das regressões.....	116
Tabela 28 – Valores dos coeficientes das regressões considerando garantia mensal.....	123
Tabela 29 – Valores dos coeficientes das regressões considerando garantia anual....	124
Tabela 30 – Valores dos erros médios esperados e erros máximos esperados com confiabilidade de 90% considerando garantia mensal.....	124
Tabela 31 – Valores dos erros médios esperados e erros máximos esperados com confiabilidade de 90% considerando garantia anual.....	124
Tabela 32 – Limites de validade das regressões de VE , VS e VR	125

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>a</i> e <i>b</i>	Coeficientes da equação cota-área-volume do reservatório.
<i>A</i>	Área do espelho d'água máximo do reservatório.
<i>A(h)</i>	Área do espelho d'água, em m^2 , do reservatório para uma determinada altura da lâmina d'água <i>h</i> , em metros.
<i>A_t</i>	Área do espelho d'água referente ao volume Z_t .
<i>A_{t,2}</i>	Área do espelho d'água referente ao volume $Z_{t,2} = Z_t + I_t - R_t$.
<i>C_(j)</i>	Coeficiente da variável $X_{(j)}$, que também pode ser reescrita como: $C(j)$.
<i>CV</i>	Coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais ao reservatório.
<i>D</i>	Variável binário.
<i>e</i>	Exponencial neperiano.
<i>E_t</i>	Volume evaporado líquido no instante <i>t</i> , onde: $E_t = E_{t,1} + E_{t,2}$.
<i>E_{t,1}</i>	Primeiro subtermo do volume evaporado líquido no instante <i>t</i> .
<i>E_{t,2}</i>	Segundo subtermo do volume evaporado líquido no instante <i>t</i> .
<i>ev</i>	Evaporação potencial líquida anual sobre o espelho d'água, em metro.
<i>ev_t</i>	Evaporação potencial líquida sobre o espelho d'água em metros para o instante <i>t</i> .
<i>FE</i>	Fator adimensional de evaporação.
<i>FK</i>	Volume adimensional do reservatório.
<i>G</i>	Garantia de atendimento da demanda, garantia simulada.
<i>h</i>	Altura da lâmina d'água do reservatório em metros.
<i>H₀</i>	Hipótese nula ou sustentada.
<i>H₁</i>	Hipótese alternativa.
<i>I</i>	Volume médio afluente anual ao reservatório em metros cúbicos.

I_t	Volume afluyente ao reservatório no instante t .
k	Número de variáveis do modelo.
K	Capacidade máxima de armazenamento do reservatório.
L ,	Litros
$\ln()$	Logaritmo neperiano.
n	Número de observações.
N	Número total de períodos simulados.
N_f	Número de períodos falhos da simulação.
Q_r	Vazão regularizada em litros por segundo.
R	Volume de regularização simulado por unidade de tempo.
R^2	Coeficiente de determinação da regressão.
\bar{R}^2	Coeficiente de determinação ajustado da regressão.
R_t	Volume regularizado no instante t .
s	Segundo
S_t	Volume vertido no instante t .
u_i	Resíduo referente à observação i .
valor-p	Menor nível de significância em que se pode rejeitar a hipótese nula.
VE	Volume adimensional evaporado.
VR	Volume adimensional regularizado.
VS	Volume adimensional vertido, ou sangrado.
$X_{(j)}$	Variável independente j .
Y	Variável dependente.
$Z(h)$	Volume armazenado, em m^3 , no reservatório para uma determinada altura da lâmina d'água h , em metros.
Z_m	Volume morto do reservatório.
Z_t	Volume do reservatório no instante t .
Z_{t+1}	Volumes do reservatório no instante $t+1$.

1 INTRODUÇÃO

A região semi-árida do Brasil caracteriza-se por uma grande variabilidade nas precipitações, solos cristalinos rasos e altas taxas de evaporação. Em decorrência destas condições ambientais ocorrem longos períodos de secas, impactando negativamente nas comunidades locais.

A série “Estudos sobre as secas no Nordeste”, BNB & FJN (2002a, 2002b, 2002c, 2002d, 2002e, 2002f, 2002g) e o trabalho de ALVES (2003) apresentam, de forma detalhada, uma descrição das principais secas que atingiram a região nordestina, seus impactos, assim como uma extensa bibliografia sobre o assunto. DUQUE (2004.a, 2004.b) apresenta um descritivo da região semi-árida, detalhando, dentre outros assuntos, a exploração dos reservatórios.

A solução historicamente adotada para minimizar os efeitos das secas no semi-árido nordestino passa pela construção de reservatórios. Apesar desta solução já ser adotada como padrão há muito tempo, somente nas últimas décadas é que o comportamento destes vem sendo melhor compreendido.

Qualitativamente, já existe um bom entendimento dos efeitos de diversas variáveis climáticas, físicas e de operação, no comportamento dos reservatórios. Apesar deste entendimento, poucos trabalhos tratam de quantificar a influência destas variáveis.

Outra questão importante é a disponibilidade de dados climáticos. A reduzida malha de estações de coletas e os curtos períodos de registro, dentre outros fatores, implicam em dados pouco robustos. Devido a maior variabilidade das precipitações, a região nordestina, em comparação com a região sul/sudeste, necessita, proporcionalmente, de séries de dados mais longas para se obter respostas a um mesmo nível de precisão.

Em muitos casos, o ganho inerente ao uso de metodologias mais robustas se perde na qualidade dos dados disponíveis. Nestes casos, a utilização de uma metodologia simplificada, com baixo custo de processamento, que trabalhe com parâmetros,

deve apresentar resultados com nível de confiança similar aos métodos mais robustos.

Fica clara a necessidade de uma metodologia simplificada capaz de determinar o comportamento dos reservatórios, identificando a influência de cada parâmetro do sistema.

1.1 Objetivos.

O objetivo central deste trabalho é a determinação de equações simplificadas capazes de determinar o comportamento do reservatório a partir de parâmetros do sistema.

De forma complementar será possível determinar, através destas equações simplificadas, quantitativamente, a influência de cada parâmetro no comportamento do reservatório.

Serão desenvolvidas regressões para a determinação dos volumes adimensionais evaporado, VE , vertido, VS , e regularizado, VR . Os volumes adimensionais VE , VS e VR são definidos como a somatória dos volumes evaporado, vertido e regularizado, respectivamente, dividido pelo somatório dos volumes afluentes ao reservatório, no longo prazo.

Selecionaram-se as seguintes variáveis explicativas: i) *hidro-climáticas*: volume médio afluente anual ao reservatório, coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais e evaporação potencial líquida anual; ii) *físicas do reservatório*: volume máximo e coeficientes de forma; e iii) *de operação*: garantia de atendimento da demanda. Estas variáveis são consolidadas em quatro parâmetros adimensionalizadas.

O modelo desenvolvido no decorrer desta Tese originou-se da aplicação de regressão linear por mínimos quadrados nos dados de reservatórios simulados, determinando assim, equações simplificadas para os volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado, considerando garantias mensais e anuais.

1.2 Organização do Trabalho

Quanto à organização do trabalho, tem-se:

No *segundo capítulo* é apresentada a revisão bibliográfica dividida em duas seções: i) a primeira seção apresenta sucintamente algumas questões referentes a reservatórios; e ii) na segunda seção apresenta uma revisão das técnicas de dimensionamento de reservatórios

No *terceiro capítulo* é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, estando dividida em três seções: i) na primeira seção é apresentada a metodologia utilizada na simulação dos reservatórios; ii) na segunda seção é apresentada a metodologia utilizada na determinação das regressões, identificando as variáveis dependentes e independentes, assim como os modelos utilizados; e iii) na terceira seção são apresentados os procedimentos utilizados no presente trabalho.

No *quarto capítulo* são apresentados os resultados divididos em sete seções: i) na primeira seção são apresentadas as estatísticas das variáveis dos reservatórios gerados e simulados aleatoriamente; ii) na segunda seção são apresentados os resultados das regressões dos volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado, considerando reservatórios gerados aleatoriamente e simulados com garantia mensal; iii) na terceira seção são apresentados os resultados das regressões dos volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado, considerando reservatórios gerados aleatoriamente e simulados com garantia anual; iv) na quarta seção é apresentada uma forma alternativa de determinação do volume adimensional regularizado a partir dos volumes adimensionais evaporado e vertido; v) na quinta seção, validação, as regressões e equações desenvolvidas nas seções 4.2 a 4.4 são testadas em 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba; vi) na sexta seção e no Apêndice B são apresentados gráficos gerados a partir das regressões desenvolvidas nas seções 4.2 e 4.3, relacionando as variáveis dependentes com as variáveis independentes; e vii) na sétima seção é apresentado um resumo geral do presente trabalho.

No *quinto capítulo* são apresentadas as conclusões deste trabalho, assim como são propostos trabalhos complementares.

No *apêndice A* é apresentado um resumo teórico referente a regressões lineares, técnica esta utilizada para a determinação das regressões.

No *apêndice B* são apresentados gráficos gerados a partir das regressões desenvolvidas nas seções 4.2 e 4.3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na seção 2.1 são apresentados: i) indicadores de desempenho; ii) considerações sobre o porte dos reservatórios; e iii) considerações sobre os volumes afluentes. Na seção 2.2 são apresentadas as técnicas de dimensionamento de reservatórios.

2.1 Comportamento de Reservatórios.

2.1.1 Indicadores de Desempenho

HASHIMOTO *et. al.* (1982) define três indicadores de desempenho de um sistema hídrico: i) confiabilidade; ii) resiliência; e iii) vulnerabilidade.

Confiabilidade é a probabilidade de ocorrência dos eventos satisfatórios de um determinado sistema, ou seja, sua garantia. O risco é seu complemento, ou seja, a probabilidade de ocorrência de eventos não satisfatórios. O não atendimento da demanda, ou seja, o não fornecimento de determinada vazão contratada em um determinado período, é o evento não satisfatório, também denominado de falha, quando da análise de reservatórios.

Resiliência, segundo HASHIMOTO *et. al.* (1982), é “a probabilidade de um sistema se recuperar de uma falha quando esta ocorrer”. HAZEN (1914) define um índice de resiliência. Já PAIXÃO (2003) define matematicamente a resiliência como sendo o inverso do valor esperado para o tempo que o sistema permanece insatisfatório após a ocorrência de uma falha.

Vulnerabilidade é um indicador da magnitude provável dos efeitos das falhas. CORREIA *et. al.* (1991), observa que a vulnerabilidade expressa a severidade das falhas em termo de suas conseqüências.

No decorrer deste trabalho será considerada apenas a *confiabilidade* como indicador de desempenho, podendo, em trabalhos futuros, serem considerados outros indicadores, em especial a resiliência.

2.1.2 Porte dos Reservatórios

Com relação à classificação dos reservatórios, MOTA (1995) define: i) pequenos reservatórios, denominados anuais, com volumes entre 1 e 3hm³; ii) médios reservatórios, denominados inter-anuais, com volumes compreendidos entre 3 e 10hm³; e iii) grandes reservatórios, denominados estratégicos, com volumes superiores a 10hm³.

De forma mais adequada, os reservatórios podem ser classificados de acordo com sua capacidade de regularização, ou seja: i) *reservatórios anuais*, os quais não resistem a um ano de seca, armazenando água durante o período chuvoso para ser usada rapidamente antes que a evaporação a consuma; e ii) *reservatórios inter- anuais*, os quais resistem a diversas secas sem que entrem em colapso, admitindo um baixo nível de falha. No decorrer deste trabalho serão considerados apenas reservatórios inter- anuais.

Na Tabela 1 é apresentado o comportamento médio de 40 reservatórios da Bacia do Jaguaribe, classificados em função do volume médio afluente anual, sendo este um indicativo do porte do reservatório, observados por CAMPOS *et. al.* (2003), considerando garantia de 90%. Observa-se que o aumento do porte dos reservatórios implica num significativo acréscimo no volume adimensional regularizado, associado a um significativo decréscimo do volume adimensional evaporado. O procedimento de adimensionalização é apresentado na seção 3.1.3.

Tabela 1 – Comportamento médio de 40 reservatórios da bacia do Jaguaribe apresentado por CAMPOS *et. al.* (2003), simulados com garantia de 90%.

Classe dos Reservatórios Volume Médio Afluente (hm ³)	Volume Adimensional Regularizado	Volume Adimensional Evaporado	Volume Adimensional Vertido
0 – 10	0,23	0,18	0,59
10 – 20	0,27	0,13	0,60
20 – 30	0,25	0,16	0,59
40 – 50	0,28	0,12	0,60
50 – 100	0,30	0,10	0,60
100 – 200	0,31	0,09	0,60
200 - 1200	0,33	0,07	0,61

MENEZES (2003) observa que as perdas por evaporação são consideradas as mais indesejadas pois são irreversíveis e não trazem benefício algum. SILANS (2003) apresenta uma revisão do estado da arte das técnicas de redução da evaporação potencial. O adequado dimensionamento dos reservatórios, associado às técnicas de redução da evaporação potencial, ainda se apresenta como a melhor solução para o problema.

O dimensionamento hídrico eficiente de um sistema de reservatórios, reservatórios de grande porte em número reduzido, contrapõe-se à necessidade da descentralização da oferta hídrica. Há pois, um dilema em relação ao porte dos reservatórios.

MARWELL (2005) observa a importância dos pequenos reservatórios no fornecimento d'água para as pequenas comunidades, ao mesmo tempo em que o impacto cumulativo destes reduz consideravelmente os volumes afluentes aos reservatórios de jusante de maior porte, implicando na redução da eficiência hídrica destes reservatórios de interesse estratégico.

2.1.3 Volumes Afluentes.

As séries de *volumes afluentes* podem ser de três tipos: i) *histórica*, medida diretamente no corpo d'água imediatamente a montante do ponto de construção do reservatório; ii) *pseudo-histórica*, determinada através de modelos de transformação chuva-deflúvio; e iii) *estocásticas*, geradas a partir das estatísticas das séries históricas ou pseudo-históricas, através de um modelo estatístico apropriado.

Devido à limitada disponibilidade de dados de estações fluviométricas e pluviométricas associada aos elevados valores dos coeficientes de variação dos volumes afluentes anuais, observados principalmente na região nordestina, a utilização de séries históricas ou pseudo-históricas pode trazer dificuldades consideráveis na determinação do real comportamento dos reservatórios. De forma a superar esta dificuldade, faz-se uso da geração de séries estocásticas.

Como bem observa FLETCHER & PONNAMBALAM (1996), quando se procura determinar o volume de um reservatório capaz de atender uma determinada demanda em um determinado período de tempo, é possível identificar diferentes respostas, a depender dos dados da série de afluência utilizada. Com a geração de diversas séries estocásticas é possível determinar uma distribuição de probabilidade das capacidades dos reservatórios que atendem uma determinada demanda, fornecendo um melhor entendimento do comportamento aleatório do sistema. Apesar da nítida vantagem do procedimento apresentado por Fletcher e Ponnambalam, no decorrer deste trabalho adotar-se-á uma única série estocástica de longa duração, visto que o objetivo não é determinar uma distribuição de probabilidade para os valores possíveis, mas sim, o valor no estado de equilíbrio.

Com relação à estatística das séries histórica ou pseudo-histórica, MACMAHON *et. al.* (2007a), verificaram que, das quatro principais estatísticas que caracterizam o volume afluente anual ao reservatório, a média e o desvio padrão são as que mais influenciam os resultados finais, enquanto que o coeficiente de assimetria “skew” e a auto-correlação ou correlação serial influenciam significativamente menos.

Historicamente as distribuições Gama e Log-normal vêm sendo utilizadas para representar os volumes afluentes anuais. No entanto, MACMAHON *et. al.* (2007b), analisando dados de afluência anuais de 729 rios distribuídos pelo globo, verificaram que a distribuição Gama melhor representa marginalmente os dados em comparação com a distribuição Log-normal. VOGEL & WILSON (1996), analisando dados de afluências anuais de 1.481 rios dos Estados Unidos, chegaram à mesma conclusão.

FARIAS (2003), analisando métodos de geração de volumes mensais, observou que: i) para o Estado do Ceará é adequado considerar as afluências anuais independentes entre si; e ii) a distribuição Gama de dois parâmetros adequou-se a todas as séries históricas de volumes afluentes analisados.

ARAUJO (1991), analisando o método dos fragmentos aplicados a rios intermitentes, verificou que a desagregação do volume anual em volumes mensais não apresenta erros consideráveis.

2.2 Técnicas de Dimensionamento de Reservatórios

YEVJEVICH (1965) e MCMAHON & MEIN (1986) classificam os métodos de dimensionamento de reservatórios em: i) *técnicas baseadas no período crítico*, estimando a capacidade do reservatório a partir da série histórica; ii) *analíticos*, baseados em soluções matemáticas a partir de considerações sobre os fatores que influenciam o comportamento do reservatório; e iii) *experimentais*, baseadas em simulações de séries estocásticas.

Segundo MCMAHON (2007b):

“Historicamente os estudos que correlacionam o volume do reservatório com a vazão regularizada tiveram início há 125 anos com a metodologia proposta por RIPPL(1883), seguido pelos trabalhos de HAZEN(1914) e SUDLER (1927). Porém, foi somente a partir da década de 1950 que foram desenvolvidos modelos matemáticos mais rigorosos, destacando os trabalhos de HURST(1951), MORAN (1959), GANI(1955), PRABHU(1958), GHOSAL(1960), LANGBEIN(1958) e LLOYD(1963). No início da década de sessenta foi introduzido o conceito de geração de dados estocásticos fazendo com que modelos baseados na metodologia de Rippl voltassem ao centro das atenções. Nas décadas de sessenta a oitenta diversas técnicas foram desenvolvidas por ALEXANDER(1962), GOULD(1964a) e HARDISON (1971), incluindo as baseadas em dados estocásticos e simulação, destacando-se os trabalhos de GOULD(1961), VOGEL(1987) e PHIEN(1993). PEGRAM(1975) e BUCHBERGER & MAIDMENT (1989) desenvolveram soluções exatas para situações específicas. Nos anos oitenta e noventa, os trabalhos de HASHIMOTO et. al. (1982), KLEMES(2000), LOUCKS(1997) e SIMONOVIC(1998) dedicaram especial atenção para questões relativas a performance e sustentabilidade de reservatórios.”

2.2.1 Técnicas Preliminares

As técnicas preliminares de dimensionamento de reservatórios devem ser aplicadas com moderação e em fases iniciais de projeto devido aos erros, destacando-se:

A *Curva de Massa*, baseado em RIPPL (1883), foi apresentado como o primeiro método racional para a estimação do volume de um reservatório associada a uma determinada demanda. Este método baseia-se na prerrogativa de que a série futura de afluência não possuirá seca mais severa do que a apresentada na série considerada no estudo. Este método possui ainda duas outras limitações: i) não considera a componente evaporação líquida sobre o espelho d'água; e ii) não considera um indicador de desempenho, no caso o risco de não se atender a demanda ou seja, a probabilidade de falha.

O Método da *Curva de Massa Residual* é uma variante do método da Curva de Massa, diferenciando-se por possuir uma escala gráfica mais adequada, associado a um maior esforço matemático e mantendo as mesmas limitações do método original.

O Método da *Vazão Mínima*, proposto por WAITT (1945), retorna resultado igual aos dos métodos de Curva de Massa, descritos anteriormente, assim como apresenta as mesmas limitações.

ALEXANDER (1962) apresentou um método gráfico capaz de estimar o volume de um reservatório associado a uma determinada garantia. Alexander desenvolveu séries de vazões mínimas, ou de seca, associadas a diferentes probabilidades de ocorrência, e destas derivou relações generalizadas para a determinação do volume do reservatório em função da vazão regularizada e da garantia. São características do *Método de Alexander*: i) os volumes afluentes anuais possuem distribuição do tipo Gama e são consideradas independentes; ii) não considera a componente evaporação líquida sobre o espelho d'água; e iii) considera a variável Garantia de atendimento da demanda.

O Método *Gama de Gould*, apresentado por GOULD (1964b), faz uso das propriedades matemáticas da distribuição normal acrescido de fatores de transformação para a distribuição Gama, de forma a determinar o volume de um reservatório associado a uma garantia e a uma demanda. Este método possui as mesmas limitações do método de Alexander, porém com o diferencial de não requerer a utilização de gráfico específico, mas sim, da tabela de distribuição normal.

GOULD (1964c), a partir de volumes afluentes anuais gerados estocasticamente considerando a distribuição Log-normal de três parâmetros, desenvolveu um

procedimento sintético baseado em gráficos para o dimensionamento de reservatórios. Este procedimento, além de não contabilizar a componente evaporação líquida sobre o espelho d'água, possui limitação com relação aos valores das variáveis. Segundo MACMAHON & MEIN (1986), foi observado que este procedimento possui a tendência de subestimar a capacidade dos reservatórios que possuem curtos períodos críticos.

MACMAHON (1976), baseado em dados de 156 rios Australianos e na aplicação da Matriz de Probabilidade de Gould, desenvolveu métodos específicos para a determinação do volume de reservatórios associados a determinadas probabilidades de falha (2,5%, 5% e 10%) e determinado volume regularizado adimensional (90%, 70%, 50% e 30%). Este método apresenta as mesmas limitações do método da Matriz de Probabilidade de Gould, por ter sido desenvolvido a partir deste último, acrescido das limitações dos valores da probabilidade de falha e dos volumes regularizados adimensionais.

O *Método do Diagrama Triangular* de regularização apresentado por CAMPOS (1990, 1996 e 2005), diferentemente dos métodos apresentados até o momento, considera a componente evaporação. O procedimento desenvolvido a partir da simulação de reservatórios, consiste na determinação de três fatores adimensionais definidos por CAMPOS (1987): i) coeficiente de variação das aflúncias anuais; ii) volume adimensional do reservatório; e iii) fator adimensional de evaporação. Determinados estes fatores adimensionais e de posse da figura do diagrama triangular adequado, determinam-se os volumes médios adimensionais evaporados, vertidos e regularizados, para a garantia de 90%.

CAMPOS & IBIAPINA (2006) apresentam uma equação simplificada capaz de estimar a vazão regularizada por um reservatório de tamanho infinito, ou seja, considera reservatórios suficientemente grandes de forma que não ocorra o evento vertimento. A referida equação está limitada à garantia de 90%.

Não foram identificados trabalhos adicionais baseados em regressões simplificadas capazes de determinar o comportamento de reservatórios a partir de parâmetros.

Observa-se que os trabalhos apresentados nesta seção possuem limitações consideráveis. De forma a superar tais limitações, é desenvolvido nesta Tese um

procedimento de simulação de reservatório que considera: i) equações matemáticas simplificadas que correlacionam as variáveis dependentes aos parâmetros independentes; ii) reservatório finito com grande amplitude nos valores das variáveis; iii) reservatório na condição de equilíbrio; iv) um indicador de desempenho, a garantia; v) a componente evaporação sobre o espelho d'água; e vi) volumes afluentes anuais independentes com distribuição do tipo gama de dois parâmetros.

2.2.2 Técnicas Avançadas

Quando maior precisão for requerida, no caso específico do dimensionamento executivo de reservatórios de médio e grande porte, devem ser utilizadas técnicas mais robustas, a exemplo das duas técnicas apresentadas abaixo.

Método da Matriz de Probabilidade

Como bem observa CAMPOS (1987), MORAN (1954 e 1955) desenvolveu o primeiro modelo capaz de trabalhar com um reservatório de tamanho finito de forma analítica, aplicando o conceito de matriz de transição para problemas de armazenagem.

O modelo de Moran consiste basicamente em discretizar o volume do reservatório em N camadas, computando uma matriz de transição [Q], e resolver um sistema de equações $n \times n$ para obter a função de probabilidade de armazenagem após atingida a condição de equilíbrio.

GOULD (1961) modificou o trabalho de Moran de forma a considerar dados mensais, além de possibilitar a determinação de falhas intra-anuais,.

Método da Análise Comportamental ou Simulação do Reservatório

Consiste na simulação do reservatório a partir do uso da equação do balanço hídrico, assim definida: A variação do volume do reservatório é igual ao somatório dos volumes afluentes subtraído do somatório dos volumes efluentes ao reservatório, $\Delta(\text{Volume Reservatório}) = \sum(\text{Volume Afluente}) - \sum(\text{Volume Efluente})$, sujeito às restrições do modelo.

Podem ser considerados na simulação os seguintes volumes afluentes: i) escoamento da bacia hidrográfica a montante; ii) precipitação direta sobre o espelho d'água; e iii) volume aportado pelo aquífero subterrâneo. Do ponto de vista prático são considerados o escoamento superficial da bacia e a precipitação direta sobre o espelho d'água.

Podem ser considerados na simulação os seguintes volumes efluentes: i) volume vertido, quando atingida a capacidade do reservatório; ii) volume regularizado; iii) volume evaporado, sendo geralmente considerado o volume evaporado líquido; e iv) o volume perdido pelo reservatório devido a fatores secundários, tais como: abastecimento de aquífero subterrâneo e liberação de vazão ecológica, geralmente desconsiderados.

Com relação ao *volume regularizado*, este pode ser simulado considerando demanda constante, ou seja, assumindo valor único, não variando no decorrer do tempo, ou demanda variável.

Com relação ao *intervalo de simulação*, o modelo mensal tende a retornar resultados mais precisos. No entanto, VOGEL & STEDINGER (1987) e VOGEL & BOLOGNESE (1995) verificaram que o modelo Markov de dois estágios retornou bons resultados, independentemente dos reservatórios serem do tipo anual ou interanual. CAVALCANTE (2007), analisando 50 reservatórios, observou que as vazões regularizadas considerando garantia mensal foram em média 5% menores do que as vazões regularizadas considerando garantias anuais, modelo de dois estágios.

Garantia é definida como a razão entre o número de períodos simulados não falhos e o número total de períodos simulados. A garantia pode ser do tipo mensal, quando a unidade de cálculo é o mês, ou do tipo anual, quando a unidade de cálculo é o ano.

Na seção 3.1 é detalhado o procedimento de cálculo da simulação aplicado neste trabalho.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho, de forma resumida, consiste na: i) determinação de um conjunto de reservatórios; ii) simulação destes reservatórios pelo método da análise comportamental; iii) determinação das regressões simplificadas a partir dos dados obtidos destas simulações; e iv) validação do modelo.

Na seção 3.1 é apresentado o procedimento utilizado para a simulação dos reservatórios. Esta seção está dividida em três subseções: i) na subseção 3.1.1 é apresentada a equação do balanço hídrico desenvolvida; ii) na subseção 3.1.2 é apresentado o procedimento para a aplicação da equação do balanço hídrico; e iii) na subseção 3.1.3 são apresentadas as variáveis dependentes, obtidas através das simulações.

Na seção 3.2 são definidas: i) as variáveis independentes do modelo ou variáveis explicativas; e ii) os modelos de regressões testados.

Na seção 3.3 é apresentado o procedimento adotado no decorrer deste trabalhos abrangendo: i) a geração e seleção dos reservatórios; ii) a simulação dos reservatórios; e iii) a determinação das regressões.

No Apêndice A é apresentado um resumo sobre a técnica de regressões lineares.

3.1 Simulação dos Reservatórios

3.1.1 Equação do Balanço Hídrico

A simulação dos reservatórios consiste na aplicação da equação do balanço hídrico apresentada abaixo:

$$\Delta(\text{Volume Reservatório}) = \sum(\text{Volume Afluente}) - \sum(\text{Volume Efluente})$$

No decorrer desta dissertação será considerado como volume afluente ao reservatório o escoamento da bacia hidrográfica, ou seja, I_t .

São considerados como volumes efluentes ao reservatório: i) o volume evaporado líquido E_t , ou seja, a diferença entre a evaporação e a precipitação sobre o espelho d'água; ii) o volume regularizado R_t ; e iii) o volume vertido S_t .

Os demais volumes afluentes e efluentes ao reservatório são considerados desprezíveis e não considerados no modelo.

A equação da continuidade pode ser reescrita como:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - E_t - R_t - S_t,$$

Z_{t+1} e Z_t são os volumes do reservatório no instante $t+1$ e t , respectivamente, com valores contidos no intervalo entre zero e K , inclusive, onde K é a capacidade do reservatório ou seja, o seu volume máximo de armazenamento.

Os volumes afluentes I_t são determinados a partir das séries de volumes afluentes pseudo-históricas ou estocásticas do reservatório, assumindo valores não negativos. São dados de entrada do modelo.

O termo referente à evaporação líquida do espelho d'água do reservatório, E_t , é sub-dividido em dois sub-termos: $E_t = E_{t,1} + E_{t,2}$: i) $E_{t,1} = \frac{ev_t}{2} \times A_t$, onde ev_t é a

evaporação potencial líquida sobre o espelho d'água em metros para o intervalo de tempo t e A_t é a área do espelho d'água referente ao volume Z_t ; e

ii) $E_{t,2} = \frac{ev_t}{2} \times A_{t,2}$, onde $A_{t,2}$ é a área do espelho d'água referente ao volume $Z_{t,2} = Z_t + I_t - R_t$. As áreas A_t e $A_{t,2}$ assumem valores contidos entre zero e A , onde A é a área do espelho d'água máximo do reservatório, referente ao volume máximo do reservatório, K . A equação $Z_{t+1} = Z_t + I_t - E_t - R_t - S_t$ é reescrita como:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - (E_{t,1} + E_{t,2}) - R_t - S_t, \text{ ou ainda, } Z_{t+1} = Z_t + I_t - ev_t \times \left(\frac{A_t + A_{t,2}}{2} \right) - R_t - S_t.$$

O volume regularizado, R_t , será igual a R , volume de regularização simulado, quando a inequação $Z_t + I_t - E_t - R_t > Z_m$ for atendida, onde Z_m é o volume morto. Quando não for possível atender esta restrição, o período será computado como falho e o volume regularizado, neste período, R_t , será dado pela equação:

$$R_t = \left(Z_t + I_t - ev_t \times \frac{A_t}{2} \right) - Z_m, \text{ desde que não assumam valores negativos. } Z_m \text{ é o}$$

volume morto do reservatório, ou seja, é o volume indisponível para efeito de regularização.

A garantia, G , calcula a probabilidade de atendimento da demanda, R , ou seja, calcula a probabilidade da não ocorrência de falha, sendo definida como:

$$G = \left(1 - \frac{N_f}{N} \right), \text{ onde } N_f \text{ é o número de períodos falhos e } N \text{ é o número total de}$$

períodos simulados.

O volume vertido, S_t , será computado quando: $Z_t + I_t - E_t - R_t > K$, ou seja, quando o volume do reservatório acrescido da afluência e diminuído dos volumes evaporados e regularizados no instante t for maior que o volume máximo do reservatório, neste caso: $S_t = (Z_t + I_t - E_t - R_t) - K$.

3.1.2 Aplicação da Equação do Balanço Hídrico

Há dois tipos de problemas: i) dada a vazão que se pretende regularizar, o que corresponde a um determinado volume regularizado, R , determina-se a garantia G associada a esta retirada; e ii) dada uma garantia G , determina-se o volume regularizado, R .

O primeiro problema é de solução direta, ou seja, aplica-se o modelo uma única vez e determina-se G . Para o segundo problema a solução é interativa, por tentativa e erro, ou seja, adota-se um valor inicial para R e determina-se G , repetindo esta operação, após adequar R em função do valor obtido de G , até que o erro entre a garantia requerida e a garantia simulada for aceitável. Neste trabalho adotou-se como aceitável um erro máximo de 0,1%.

Com relação ao período da simulação, foram considerados dois tipos: i) simulação mensal; e ii) simulação anual.

Para a simulação mensal são aplicadas as equações apresentadas na seção 3.1.1. Neste caso, tanto os volumes afluentes anuais quanto a evaporação líquida anual deverão ser desagregados mês a mês, sendo utilizados os fatores apresentados na Tabela 2 e visualizados na Figura 1. Observa-se que o mês 1 refere-se ao primeiro mês do ano hidrológico.

Os fatores de desagregação utilizados neste trabalho foram determinados pelo autor após a análise de 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba, devendo estes fatores representar adequadamente os reservatórios do semi-árido nordestino.

Pela análise dos fatores de desagregação verifica-se a existência de um período úmido, com duração de seis meses onde ocorrem a totalidade dos aportes ao reservatório e um período seco onde ocorrem praticamente a totalidade das evaporações.

A desagregação das vazões afluentes anuais em vazões mensais se dá pela multiplicação do respectivo fator de desagregação pelo volume afluente anual ao reservatório do ano considerado. Da mesma forma, a desagregação da evaporação

potencial líquida anual em evaporações potenciais líquidas mensais se dá pela multiplicação do respectivo fator de desagregação pela evaporação potencial líquida anual. ARAUJO (1991) apresenta uma análise dos métodos de desagregação aplicados a rios intermitentes, avaliando os erros induzidos no cálculo da disponibilidade de reservatórios, os quais são aceitáveis.

Tabela 2 – Fatores de desagregação dos volumes afluentes anuais e da evaporação potencial líquida anual.

Mês	Fatores de Desagregação do Volume Afluente Anual	Fatores de Desagregação da Evaporação Potencial Líquida Anual
1	0,05	0,08
2	0,15	0
3	0,30	0
4	0,30	0
5	0,15	0
6	0,05	0,08
7	0	0,14
8	0	0,14
9	0	0,14
10	0	0,14
11	0	0,14
12	0	0,14
Total	1.00	1.00

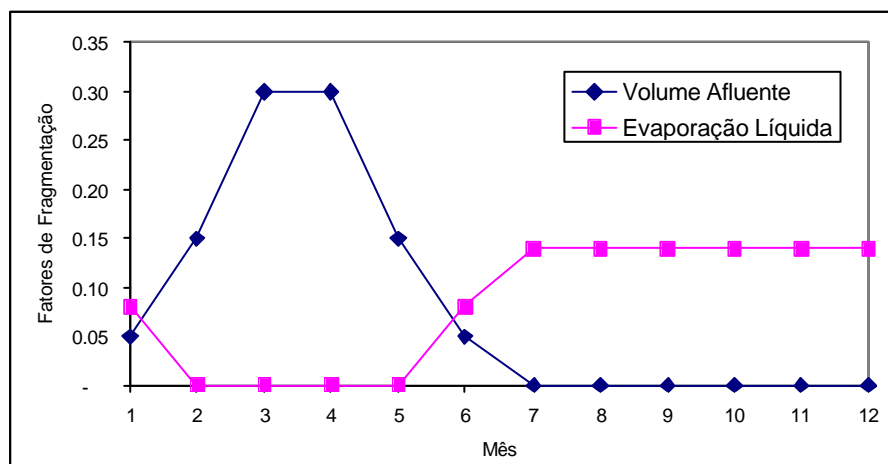


Figura 1 – Fatores de desagregação dos volumes afluentes anuais e da evaporação potencial líquida anual

Para a simulação anual, a unidade de tempo é o ano, sendo a aplicação da equação da continuidade dividida em dois sub-períodos com duração de seis meses cada. No primeiro sub-período, período-úmido, é computada apenas a afluência e determinada a ocorrência de vertimento. No segundo sub-período, período-seco, são computadas a evaporação e a regularização, caso ocorra.

O modelo de simulação anual, por considerar uma demanda localizada apenas no período seco, é mais adequado à análise de reservatórios que atendem o setor agrícola. O modelo de simulação mensal, por considerar uma demanda constante ao longo do ano, é mais adequado à simulação de reservatórios que atendem aos setores urbano/industrial.

Com relação às simulações dos reservatórios:

- Foi desenvolvido programa específico em Visual Basic para as simulações com garantia anual e mensal.
- O volume inicial de cada simulação é dado pela metade da capacidade do reservatório.
- Não há restrição com relação ao volume do reservatório ao final da simulação.
- O volume morto do reservatório, ou seja, o volume abaixo da tomada d'água o qual não está disponível para regularização, é de 10% da capacidade máxima de armazenamento do reservatório.
- Os reservatórios foram simulados com séries sintéticas de duração de mil anos.
- Os volumes afluentes foram gerados através da função INVGAMA() do Excel e segue a distribuição Gama de dois parâmetros.
- Na seção 3.3 são apresentadas a forma de geração e as características principais dos reservatórios considerados no âmbito este trabalho.

3.1.3 Adimensionalização dos Resultados da Equação da Continuidade

Após simulado o reservatório e determinada a vazão regularizada Q_r , associada a uma garantia G , e de posse dos volumes totais, afluente, regularizado, vertido e evaporado, podem ser determinados:

O volume adimensional regularizado, VR , definido como a razão entre o somatório dos volumes regularizados e o somatório dos volumes afluentes, ou seja:

$$VR = \frac{\sum_{t=1}^N R_t}{\sum_{t=1}^N I_t}, \text{ onde } \mathbf{N} \text{ é o número de períodos simulados.}$$

O volume adimensional vertido, VS , definido como a razão entre o somatório dos volumes vertidos, ou sangrados, e o somatório dos volumes afluentes, ou seja:

$$VS = \frac{\sum_{t=1}^N S_t}{\sum_{t=1}^N I_t}, \text{ onde } \mathbf{N} \text{ é o número de períodos simulados.}$$

O volume adimensional evaporado, VE , definido como a razão entre o somatório dos volumes evaporados e o somatório dos volumes afluentes, ou seja:

$$VE = \frac{\sum_{t=1}^N E_t}{\sum_{t=1}^N I_t}, \text{ onde } \mathbf{N} \text{ é o número de períodos simulados.}$$

Como $\sum_{t=1}^N R_t + \sum_{t=1}^N S_t + \sum_{t=1}^N E_t = \sum_{t=1}^N I_t$, ou seja, o somatório dos volumes regularizados,

vertidos e evaporados é igual ao somatório do volume afluente, desde que a simulação seja suficientemente longa e/ou os volumes inicial e final da simulação sejam iguais, conclui-se que: $VR + VS + VE = 1$.

Dada o volume regularizado adimensional, VR , a garantia simulada, G , e o volume médio afluente anual, I em hectômetro cúbico por ano, é possível determinar a vazão regularizada, Q_r , em litros por segundo, como apresentado abaixo:

Considerando a simulação mensal, com atendimento da demanda nos períodos úmido e seco:

$$Q_r \left[\frac{L}{s} \right] \times G = VR \times I \left[\frac{hm^3}{ano} \right] \times \left[\frac{10^9 L}{1hm^3} \right] \times \left[\frac{1ano}{365 \times 24 \times 3600s} \right], \text{ que reordenando, obtêm-se:}$$

$$Q_r \left[\frac{L}{s} \right] = 31,71 \times \frac{VR \times I \left[\frac{hm^3}{ano} \right]}{G}$$

Considerando a simulação anual, com atendimento da demanda apenas no período seco, nos seis meses secos do :

$$Q_r \left[\frac{L}{s} \right] \times G \times \left[\frac{6meses}{12meses} \right] = VR \times I \left[\frac{hm^3}{ano} \right] \times \left[\frac{10^9 L}{1hm^3} \right] \times \left[\frac{1ano}{365 \times 24 \times 3600s} \right], \text{ que reordenando,}$$

obtêm-se:

$$Q_r \left[\frac{L}{s} \right] = 63,42 \times \frac{VR \times I \left[\frac{hm^3}{ano} \right]}{G}$$

3.2 Modelos de Regressão

Com relação às variáveis independentes dos modelos de regressão:

As variáveis independentes dos modelos de regressão podem ser classificadas em três categorias:

Variáveis climáticas:

- Volume médio afluente anual, I , decorrente do escoamento da bacia hidrográfica a montante do reservatório.

- Coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais, CV , definido como a razão entre o desvio padrão dos volumes afluentes anuais pelo volume médio afluente anual, sendo esta variável adimensional.
- Evaporação potencial líquida anual sobre o espelho d'água, ev , em metros, definida como a diferença entre a média das evaporações anuais e a média das precipitações anuais sobre o espelho d'água do reservatório.

Variáveis físicas do reservatório:

- Capacidade do reservatório, K , em metros cúbicos, definido como o volume máximo de armazenamento do reservatório.
- Coeficientes de forma do reservatório, a e b , que atendem à relação cota-volume $Z(h) = a \times h^b$, onde h é a altura da lâmina d'água do reservatório em metros para um determinado volume Z em metros cúbicos. Estes coeficientes podem ser determinados por mínimos quadrados.

Variável de operação:

- Garantia, G , adimensional, dada pela equação: $G = \left(1 - \frac{N_f}{N}\right)$.

Observa-se que apenas duas das variáveis apresentadas acima são adimensionais, CV e G . As demais variáveis apresentadas anteriormente podem ser adimensionalizadas em dois coeficientes, como observado abaixo:

- Volume adimensional do reservatório, FK , definido como a razão entre o volume máximo do reservatório, K , e o volume médio afluente anual, I , ou seja: $FK = \frac{K}{I}$.
- Fator de evaporação adimensional, FE , dado por: $FE = \left(\frac{\mathbf{b} \times \mathbf{a}^{\left(\frac{1}{\mathbf{b}}\right)} \times ev}{I^{\left(\frac{1}{\mathbf{b}}\right)}}\right)$.

Este fator de evaporação adimensional é definido a partir do procedimento apresentado por CAMPOS (1987), que considerou o caso específico de $b = 3$, como apresentado a seguir:

Dada a relação cota-volume, $Z(h) = \mathbf{a} \times h^b$, determina-se a equação cota-área, $A(h) = \frac{dZ(h)}{d(h)} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} \times h^{(b-1)}$. Substituindo e reordenando os termos

das duas equações apresentadas anteriormente obtêm-se a equação área-volume $A(h) = \mathbf{b} \times \mathbf{a}^{\left(\frac{1}{b}\right)} \times Z(h)^{\left(1-\frac{1}{b}\right)}$. Substituindo a equação área-volume

na equação da continuidade, $Z_{t+1} = Z_t + I_t - ev \times \left(\frac{A_{t+1} + A_t}{2}\right) - R_t - S_t$, e dividindo os termos pelo volume médio afluente anual, obtêm-se:

$$\frac{Z_{t+1}}{I} = \frac{Z_t}{I} + \frac{I_t}{I} - \left(\frac{\mathbf{b} \times \mathbf{a}^{\left(\frac{1}{b}\right)} \times ev}{I^{\left(\frac{1}{b}\right)}}\right) \times \left(\frac{Z_{t+1}^{\left(1-\frac{1}{b}\right)} + Z_t^{\left(1-\frac{1}{b}\right)}}{2 \times I^{\left(1-\frac{1}{b}\right)}}\right) - \frac{R_t}{I} - \frac{S_t}{I}. \text{ Fica definido,}$$

desta forma, o fator de evaporação adimensional como:

$$FE = \left(\frac{\mathbf{b} \times \mathbf{a}^{\left(\frac{1}{b}\right)} \times ev}{I^{\left(\frac{1}{b}\right)}}\right).$$

A adimensionalidade de FE pode ser confirmada pelo seguinte procedimento: Dada a equação cota-volume $Z(h) = \mathbf{a} \times h^b$ verifica-se que \mathbf{b} é adimensional e \mathbf{a} tem

dimensão de $[L^{(3-b)}]$. A dimensão de $FE = \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{a}^{\left(\frac{1}{b}\right)} \times ev}{I^{\left(\frac{1}{b}\right)}}$ é: $FE = \frac{[L]^0 \times [L]^{\left(\frac{3-b}{b}\right)} \times [L]}{[L]^{\left(\frac{3}{b}\right)}}$,

ou ainda: $FE = [L]^{\left(0 + \left(\frac{3-b}{b}\right) + 1 - \left(\frac{3}{b}\right)\right)} = [L]^0$, logo FE é adimensional.

No decorrer deste trabalho serão considerados as seguintes variáveis independentes: CV , FK , FE e G , todas adimensionais.

As variáveis dependentes, também adimensionais, consideradas neste estudo, são: VR , VS e VE , definidas na seção 3.1.3.

Com relação aos modelos de regressão, foram testados:

i) Modelo Linear – Linear:

$$Y = c(0) + c(1) \times CV + c(2) \times FK + c(3) \times FE + c(4) \times G + \\ c(5) \times CV^2 + c(6) \times FK^2 + c(7) \times FE^2 + c(8) \times G^2 + \\ c(9) \times CV^3 + c(10) \times FK^3 + c(11) \times FE^3 + c(12) \times G^3 + u$$

ii) Modelo Linear – Logarítmico:

$$Y = c(0) + c(1) \times \ln(CV) + c(2) \times \ln(FK) + c(3) \times \ln(FE) + c(4) \times \ln(G) + \\ c(5) \times \ln(CV)^2 + c(6) \times \ln(FK)^2 + c(7) \times \ln(FE)^2 + c(8) \times \ln(G)^2 + \\ c(9) \times \ln(CV)^3 + c(10) \times \ln(FK)^3 + c(11) \times \ln(FE)^3 + c(12) \times \ln(G)^3 + u$$

iii) Modelo Logarítmico – Linear:

$$\ln(Y) = c(0) + c(1) \times CV + c(2) \times FK + c(3) \times FE + c(4) \times G + \\ c(5) \times CV^2 + c(6) \times FK^2 + c(7) \times FE^2 + c(8) \times G^2 + \\ c(9) \times CV^3 + c(10) \times FK^3 + c(11) \times FE^3 + c(12) \times G^3 + u$$

iv) Modelo Logarítmico – Logarítmico:

$$\ln(Y) = c(0) + c(1) \times \ln(CV) + c(2) \times \ln(FK) + c(3) \times \ln(FE) + c(4) \times \ln(G) + \\ c(5) \times \ln(CV)^2 + c(6) \times \ln(FK)^2 + c(7) \times \ln(FE)^2 + c(8) \times \ln(G)^2 + \\ c(9) \times \ln(CV)^3 + c(10) \times \ln(FK)^3 + c(11) \times \ln(FE)^3 + c(12) \times \ln(G)^3 + u$$

Aplicado o exponencial nos dois lados da igualdade e reordenados os termos, a equação acima pode ser reescrita como:

$$Y = e^{c(0)} \times CV^{(c(1)+c(5) \times \ln(CV)+c(9) \times \ln(CV)^2)} \times \\ FK^{(c(2)+c(6) \times \ln(FK)+c(10) \times \ln(FK)^2)} \times \\ FE^{(c(3)+c(7) \times \ln(FE)+c(11) \times \ln(FE)^2)} \times \\ G^{(c(4)+c(8) \times \ln(G)+c(12) \times \ln(G)^2)} \times e^u$$

v) Modelo duplo Logarítmico – Logarítmico

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{Y}\right)\right) = c(0) + c(1) \times \ln(CV) + c(2) \times \ln(FK) + c(3) \times \ln(FE) + c(4) \times \ln(G) + \\ c(5) \times \ln(CV)^2 + c(6) \times \ln(FK)^2 + c(7) \times \ln(FE)^2 + c(8) \times \ln(G)^2 + \\ c(9) \times \ln(CV)^3 + c(10) \times \ln(FK)^3 + c(11) \times \ln(FE)^3 + c(12) \times \ln(G)^3 + u$$

Aplicado o exponencial nos dois lados da igualdade e reordenados os termos, a equação acima pode ser reescrita como:

$$Y = \frac{1}{e^X}, \text{ ou ainda: } Y = e^{-X}, \text{ onde:}$$

$$X = e^{c(0)} \times CV^{(c(1)+c(5) \times \ln(CV)+c(9) \times \ln(CV)^2)} \times \\ FK^{(c(2)+c(6) \times \ln(FK)+c(10) \times \ln(FK)^2)} \times \\ FE^{(c(3)+c(7) \times \ln(FE)+c(11) \times \ln(FE)^2)} \times \\ G^{(c(4)+c(8) \times \ln(G)+c(12) \times \ln(G)^2)} \times e^u$$

Com relação aos modelos apresentados anteriormente:

- Y representa uma das variáveis dependentes, VR , VS e VE .
- Não necessariamente todos os coeficientes da regressão serão estatisticamente significantes, sendo eliminados da regressão os coeficientes que não agregam valor à explicação do problema.
- Não foram analisadas regressões que considerem efeito cruzado entre as variáveis independentes, ou seja, é possível, através dos modelos apresentados acima, definir a real influência de cada variável, independentemente dos valores assumidos pelas demais variáveis.

3.3 Procedimentos

O trabalho está dividido em duas etapas. Na primeira etapa são gerados e simulados um conjunto de reservatórios aleatórios, assim como quantificados os valores das variáveis dependentes e independentes. Ainda nesta etapa são determinadas as regressões. Na segunda etapa, etapa de validação, as regressões previamente determinadas são aplicadas a 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba, comparando os resultados com os obtidos por simulação.

Na **primeira etapa**, *determinação das regressões*, o procedimento adotado consiste em:

1. Geração das séries de volumes afluentes anuais. Foram geradas 80 séries estocásticas com duração de mil anos cada, considerando a distribuição Gama de dois parâmetros, sendo utilizada a função INVGAMA() do Excel. Estas séries apresentam:
 - i. coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais, CV , variando de 0,1 a 2,86; e
 - ii. volume médio afluente anual, I , variando de 0,2 a 815hm³.

Considerando os dados dos 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba, os quais serão utilizados para validação do modelo, o valor máximo observado para CV foi de 1,9, valor bastante inferior ao limite máximo adotado neste trabalho. A adoção de valores de CV acima de dois, os quais poderiam ser qualificado como extremamente altos, não traz prejuízo à qualidade das regressões, como poderá ser observado no capítulo de resultados. O limite inferior adotado para CV também não traz prejuízo à regressão. Observa-se que as regressões apresentadas neste trabalho se aplicam a regiões com diferentes valores de CV , dentro de uma extensa faixa.

Os valores adotados para I estão condizentes com os valores dos 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba, representando bem reservatórios de pequeno médio e grande porte.

2. Geração aleatória, considerando distribuição uniforme, de reservatórios com:

- i. volume adimensional do reservatório, FK , variando de 0,2 a 6,0;
- ii. coeficiente a da equação cota-área-volume variando de 200 a 20.000;
- iii. coeficiente b da equação cota-área-volume variando de 2 a 4;
- iv. evaporação potencial líquida anual, ev , variando de 0,05 a 4,00m; e
- v. um dos volumes afluentes determinados no item anterior.

A região semi-árida nordestina caracteriza-se por reservatórios com elevados valores de FK e ev , enquanto que na região sul/sudeste e na região da mata nordestina os reservatórios possuem menores valores de FK e ev . Os valores adotados para FK e ev procuram contemplar estes diferentes espaços geográficos, inclusive ampliando os limites superiores. A adoção destes valores para FK e ev não traz prejuízo à qualidade das regressões, como poderá ser observado no capítulo de resultados.

Com relação aos valores adotados para a e b , estes estão de acordo com o observado nos dados dos 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba, os quais serão utilizados para validação do modelo. É de se esperar uma correlação positiva entre a e a capacidade máxima de armazenamento do reservatório, $K = FK \times I$, sendo esta correlação desconsiderada no decorrer deste trabalho.

3. Simulação dos reservatórios gerados aleatoriamente em programa desenvolvido pelo autor, considerando garantias anuais e mensais de: 80%, 85%, 90%, 95%, 97,5%, 99% e 99,9%. Foram eliminados do banco de dados os reservatórios incapazes de:

- i. Regularizar no mínimo 5% do volume médio afluyente anual, reservatórios estes considerados como extremamente subdimensionados; e
 - ii. verter no mínimo 5% do volume médio afluyente anual, reservatórios estes considerados como extremamente superdimensionados.
4. Determinação dos valores e das estatísticas das variáveis dependentes (VE , VS e VR) e independentes (CV , FK , FE e G) dos reservatórios selecionados, como apresentado nas subseções 3.1.3 e 3.2.
5. Determinação das regressões para as variáveis dependentes: VE , VS e VR , através do programa *Eviews*, versão 3.1 da *Quantitative Micro Software*. Foram testados os cinco modelos de regressão descritos na subseção 3.2, sendo selecionado o modelo, para cada uma das variáveis dependentes, que melhor se ajustam aos dados, sendo estas regressões robustas apresentadas no capítulo de resultados.

Informações sobre a utilização do programa *Eviews* podem ser encontradas em SOARES & CASTELAR (2003).

Na Seções 4.1 são apresentadas as estatísticas dos reservatórios gerados aleatoriamente e simulados com garantia mensal e anual.

Nas Seções 4.2 e 4.3 são apresentados os resultados das regressões considerando garantia mensal e anual, respectivamente.

Na **segunda etapa**, *validação*, são analisados 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba, cujos dados foram coletados do “*estudos hidrológicos e estruturação de um sistema preliminar de monitoramento e gestão dos reservatórios relacionados com o abastecimento humano no estado da Paraíba*”, SEMARH (2002). O procedimento adotado nesta etapa consiste em:

1. Determinar, para cada um dos 75 reservatórios da Paraíba, os valores de CV , I , K , FK , a , b , ev e FE
2. Gerar, para cada um dos reservatórios, uma série estocástica com duração de mil anos de volumes afluentes anuais, considerando os valores de CV e I determinados anteriormente e a distribuição Gama de dois parâmetros, sendo utilizada a função $INVGAMA()$ do Excel.
6. Simular os reservatórios da Paraíba, através de programa desenvolvido pelo autor, considerando garantias anuais e mensais de: 80%, 85%, 90%, 95%, 97,5%, 99% e 99,9%, determinando os valores de VE , VS e VR , por simulação.
7. Determinar os valores de VE , VS e VR através das regressões previamente determinadas.
8. Comparar os resultados de VE , VS e VR obtidos pela regressão com os valores obtidos por simulação, eliminando os reservatórios que não regularizam e/ ou não vertem 5% do volume médio afluente anual, de acordo com a restrição de aplicação da regressões desenvolvidas neste trabalho.

Na seção 4.5 são apresentados os resultados da etapa de validação das regressões, considerando garantias mensal e anual.

4 RESULTADOS

O presente trabalho, de forma resumida, consiste na: i) determinação de um conjunto de reservatórios; ii) simulação destes reservatórios pelo método da análise comportamental; iii) determinação das regressões simplificadas a partir dos dados obtidos destas simulações; e iv) validação do modelo.

Na seção 4.1 são apresentadas as estatísticas das variáveis dependentes (VR , VS e VE) e independentes (CV , FK , FE e G) do modelo, assim como as estatísticas das variáveis acessórias, após gerados e simulados os reservatórios de acordo com o especificado no Capítulo 3. Esta seção está dividida em duas subseções, de acordo com o tipo de garantia simulada: i) na subseção 4.1.1 são apresentadas as estatísticas dos reservatórios gerados e simulados considerando garantia mensal; e ii) na subseção 4.1.2 são apresentadas as estatísticas dos reservatórios gerados e simulados considerando garantia anual.

Na seção 4.2 e suas subseções, são apresentados os resultados das regressões dos volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado (VR , VS e VE), considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, cujas estatísticas foram apresentadas na subseção 4.1.1.

Na seção 4.3 e suas subseções, são apresentados os resultados das regressões dos volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado (VR , VS e VE), considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, cujas estatísticas foram apresentadas na subseção 4.1.2.

Na seção 4.4 é apresentado procedimento alternativo para a determinação do VR , visto que a regressão desenvolvida para esta variável foi a que apresentou maiores níveis de erro. Esta seção está dividida em duas subseções: i) subseção 4.4.1 a qual apresenta os resultados do procedimento alternativo de determinação de VR considerando garantia mensal; e ii) subseção 4.4.2 a qual apresenta os resultados do procedimento alternativo de determinação de VR considerando garantia anual.

Na seção 4.5 é apresentada a validação das regressões desenvolvidas para as variáveis dependentes (VR , VS e VE) e apresentadas nas seções 4.2 e 4.3, assim como a validação do procedimento alternativo apresentado na seção 4.4. Serão utilizados dados de 75 reservatórios localizados no Estado da Paraíba para a validação destes modelos. Esta seção está dividida em quatro subseções: i) subseção 4.5.1 apresenta as estatísticas dos reservatórios da Paraíba; ii) subseção 4.5.2 apresenta a validação das regressões e do procedimento alternativo de cálculo de VR considerando garantia mensal; iii) subseção 4.5.3 apresenta a validação das regressões e do procedimento alternativo de cálculo de VR considerando garantia anual; e iv) subseção 4.5.4 onde são apresentadas considerações sobre a validação das regressões

Na seção 4.6 e no Apêndice B são apresentados gráficos desenvolvidos a partir das equações desenvolvidas e apresentadas nas seções 4.2 e 4.3 e que permitem um bom entendimento da influência de cada variável independente nas variáveis dependentes.

Na seção 4.7 é apresentado o resumo das regressões desenvolvidas nesta Tese.

4.1 Dados Primários e Correlações

Nas seções 4.1.1 e 4.1.2 são apresentadas, respectivamente, as estatísticas dos: i) reservatórios gerados e simulados considerando garantia mensal; e ii) reservatórios gerados e simulados considerando garantia anual.

São apresentadas as seguintes estatísticas: i) histograma e estatística descritiva das variáveis dependentes e independentes; ii) correlações lineares entre as variáveis dependentes e independentes; e iii) gráficos de dispersão.

4.1.1 Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Mensal

Foram gerados e simulados, com garantia mensal, diversos reservatórios aleatórios, sendo eliminados os reservatórios considerados “atípicos”. Neste trabalho, são considerados reservatórios “atípicos”: i) reservatórios sub-dimensionados que regularizam volumes inexpressivos; e ii) reservatórios super-dimensionados que vertem volumes inexpressivos. Foram eliminados os reservatórios que regularizam e/ou vertem volumes adimensionais inferiores a 0,05, ou seja, 5% do volume afluyente.

Os reservatórios gerados aleatoriamente foram simulados com garantias mensais de: 80%, 85%, 90%, 95%, 97,5%, 99% e 99,9%. No total, foram selecionadas 7.710 simulações, sendo aproximadamente 1.100 simulações por cada garantia especificada anteriormente.

Nas Figuras 2 a 11 são apresentados os histogramas e as estatísticas descritivas das 7.710 simulações selecionadas dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

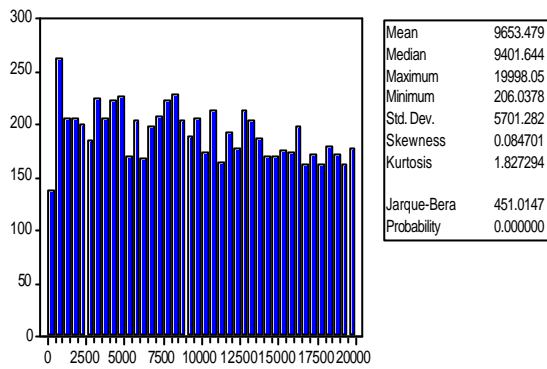


Figura 2 – Histograma do coeficiente a da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

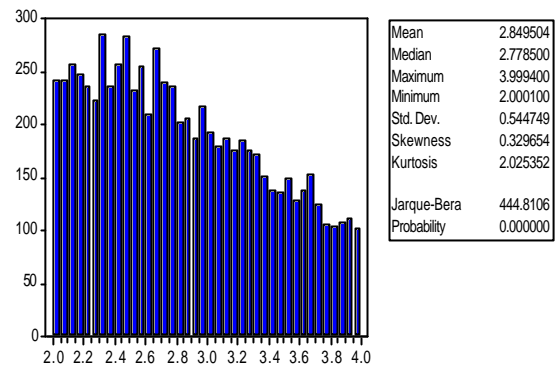


Figura 3 – Histograma do coeficiente b da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

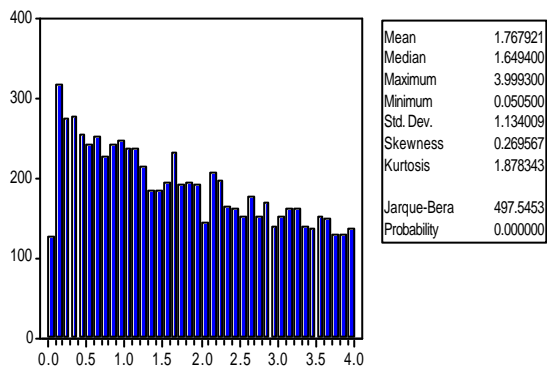


Figura 4 – Histograma da evaporação líquida, ev , do espelho d'água dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, em metros.

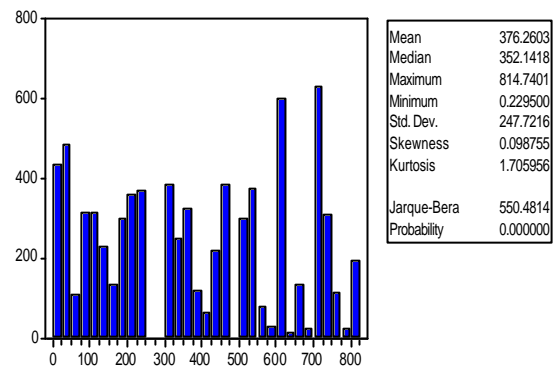


Figura 5 – Histograma do volume médio afluente anual aos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, I , em hm^3 .

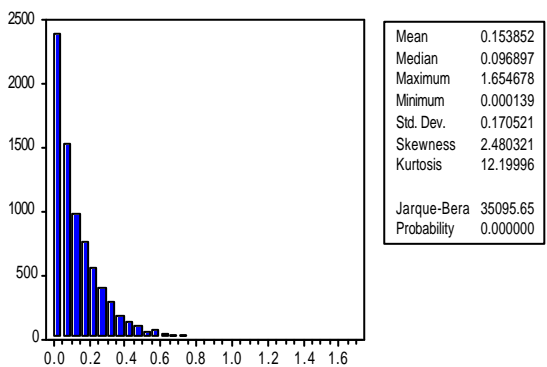


Figura 6 – Histograma do fator adimensional de evaporação, FE , dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

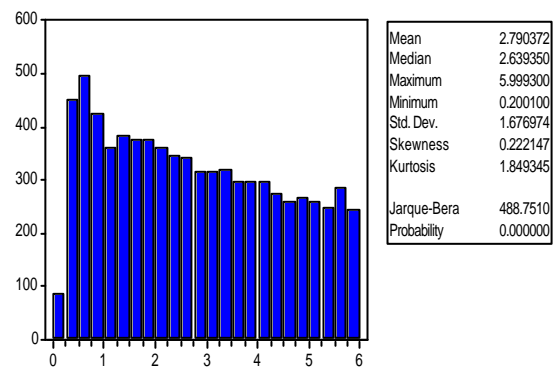


Figura 7 – Histograma do volume adimensional do reservatório, FK , dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

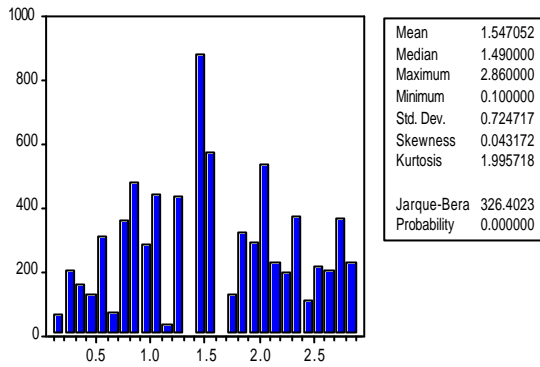


Figura 8 – Histograma do coeficiente de variação das afluições anuais aos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, CV .

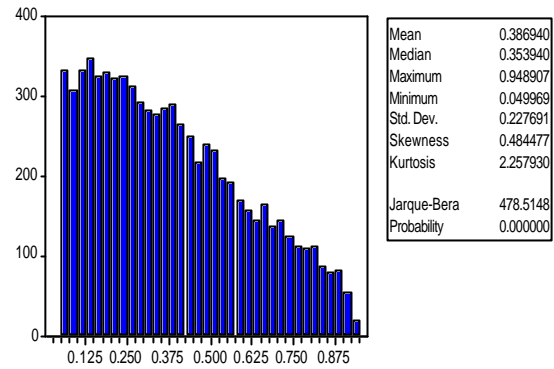


Figura 9 – Histograma do volume adimensional regularizado, VR dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

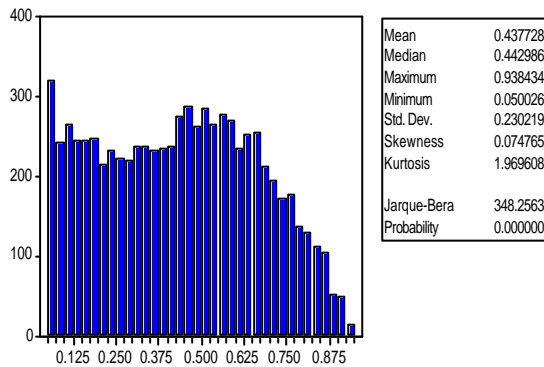


Figura 10 – Histograma do volume adimensional vertido, VS dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

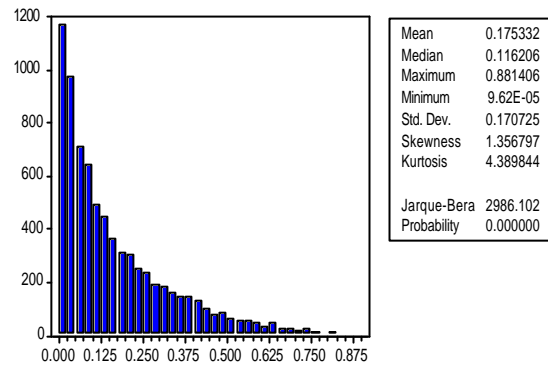


Figura 11 – Histograma do volume adimensional evaporado, VE dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Dos histogramas apresentados acima, observa-se que:

- O eixo-X representa os valores da variável e o eixo-Y indica o número de observações dentro de cada faixa. Das estatísticas anexas aos histogramas é possível verificar os limites de validade das regressões desenvolvidas a partir destes dados.
- O histograma do FE e conseqüentemente o histograma de VE , indicam uma grande concentração de pontos nos valores mais baixos. Isto ocorre, principalmente, pelo fato de que reservatórios sujeitos a altos valores de CV e FE , quando simulados, não terão capacidade de regularizar volumes expressivos, sendo eliminados do banco de dados.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, as correlações lineares das variáveis dependentes e independentes.

Tabela 3 – Correlação das variáveis dependentes e independentes para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal

	<i>CV</i>	<i>FK</i>	<i>FE</i>	<i>G</i>	<i>VR</i>	<i>VS</i>	<i>VE</i>
<i>CV</i>	1						
<i>FK</i>	0,30002	1					
<i>FE</i>	-0,26816	-0,16374	1				
<i>G</i>	-0,14758	0,04586	-0,11817	1			
<i>VR</i>	-0,57630	0,16295	-0,31794	-0,17418	1		
<i>VS</i>	0,64337	-0,36801	-0,24514	0,15073	-0,72204	1	
<i>VE</i>	-0,09897	0,27893	0,75458	0,02905	-0,36002	-0,38551	1

Tabela 4 – Correlação entre o fator adimensional de evaporação e suas variáveis explicativas para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

	<i>I</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>ev</i>	<i>FE</i>
<i>I</i>	1				
<i>a</i>	0,03387	1			
<i>b</i>	0,06088	-0,06064	1		
<i>ev</i>	0,06590	-0,05045	-0,17447	1	
<i>FE</i>	-0,22363	0,10735	0,49125	0,40007	1

Observa-se que:

- Não são verificadas correlações significativas entre as variáveis independentes do modelo, no entanto destacam-se, como seria de se esperar: i) correlação positiva, apesar de fraca, entre CV e FK ; e ii) correlação negativa, apesar de fraca, entre CV e FE .
- Existe uma forte correlação negativa entre o VR e o CV .
- Existe uma forte correlação positiva entre o VS e o CV .
- Existe uma forte correlação positiva entre VE e o FE .
- Com relação às variáveis dependentes, destaca-se a forte correlação negativa entre VR e VS .
- Em reservatórios reais espera-se uma forte correlação positiva entre a e I , o que não foi observado nos dados. Este fato não traz prejuízos ao desenvolvimento do trabalho.
- Existe uma forte correlação entre FE e as variáveis explicativas b e ev .

Nas Figuras 12 a 23 são apresentados gráficos de dispersão das variáveis dependentes e independentes, onde:

- Na Figura 12 observa-se relação positiva entre FK e CV , como esperado. Reservatórios sujeitos a pequenos valores de CV e grandes valores de FK tendem a vertimentos nulos, sendo eliminados no âmbito deste trabalho.
- Na Figura 13 observa-se uma relação negativa entre FE e CV , como esperado. Reservatórios sujeitos a grandes valores de CV e grandes valores de FE tendem a regularizar valores nulos, sendo eliminados no âmbito deste trabalho.
- Na Figura 14 não se observa relação entre a e I .
- Nas Figuras 15 a 17 observam-se a influência dos valores de CV nos valores das variáveis dependentes VR , VS e VE , respectivamente. Observa-se também que com o aumento de CV há: i) decréscimo

significativo de VR ; ii) acréscimo significativo de VS ; e iii) relativa estabilidade de VE . Nota-se também que as áreas sem informações indicam situações “atípicas”, dentro dos limites impostos neste trabalho.

- Nas Figuras 18 a 20 observam-se a influência dos valores de FK nos valores das variáveis dependentes VR , VS e VE , respectivamente. Nota-se que as áreas sem informações indicam situações “atípicas”, dentro dos limites impostos neste trabalho.
- Nas Figuras 21 a 23 observam-se a influência dos valores de FE nos valores das variáveis dependentes VR , VS e VE , respectivamente, indicando os limites de validade dos modelos desenvolvidos. Observa-se também que com o aumento de FE há: i) decréscimos de VR e VS ; e ii) acréscimo significativo de VE . Nota-se também que as áreas sem informações indicam situações “atípicas”, dentro dos limites impostos neste trabalho.

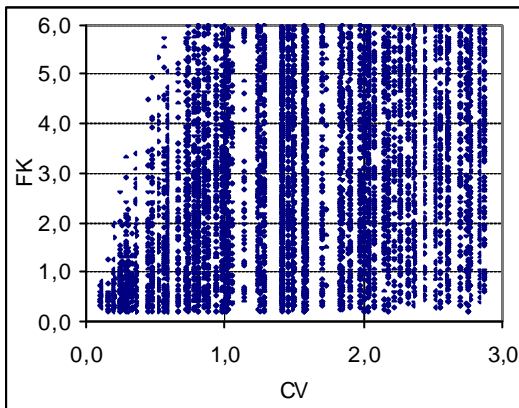


Figura 12 – Dispersão dos valores de FK versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.

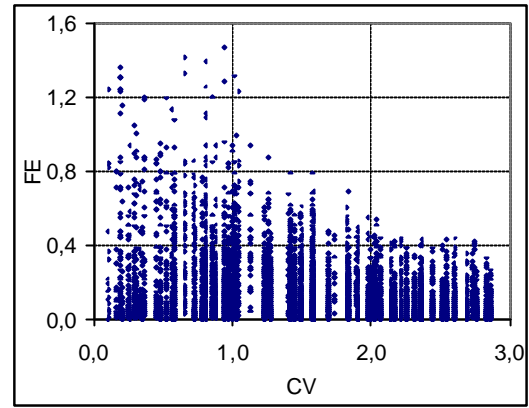


Figura 13 – Dispersão dos valores de FE versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.

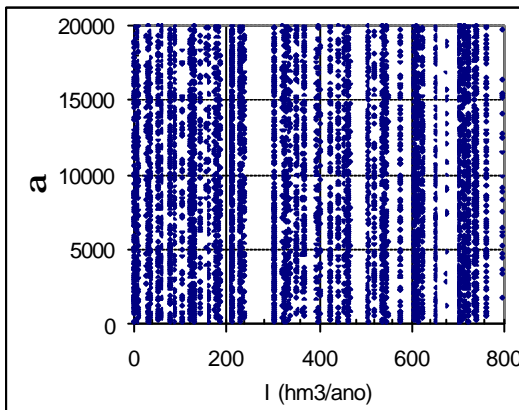


Figura 14 – Dispersão dos valores de a versus I , dos reservatórios simulados com garantia mensal.

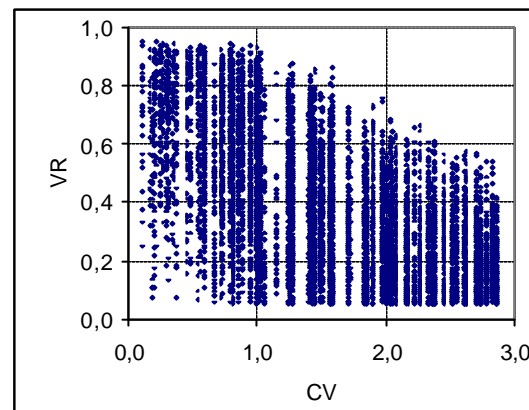


Figura 15 – Dispersão dos valores de VR versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.

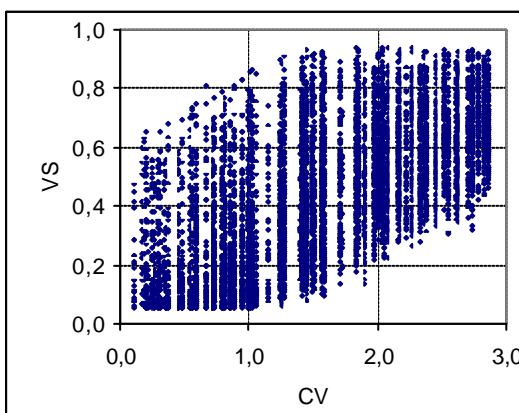


Figura 16 – Dispersão dos valores de VS versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.

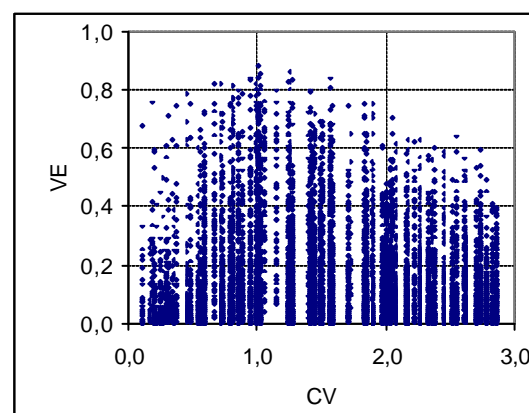


Figura 17 – Dispersão dos valores de VE versus CV , dos reservatórios simulados com garantia mensal.

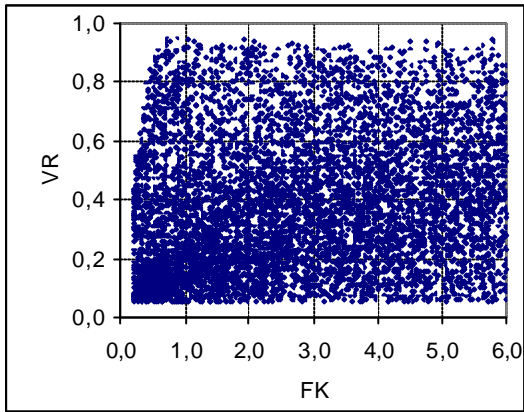


Figura 18 – Dispersão dos valores de *VR* versus *FK*, dos reservatórios simulados com garantia mensal.

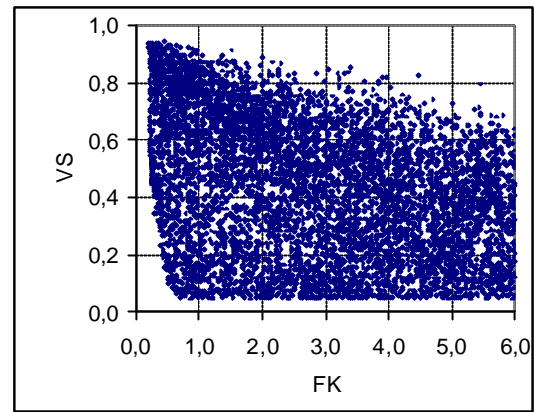


Figura 19 – Dispersão dos valores de *VS* versus *FK*, dos reservatórios simulados com garantia mensal.

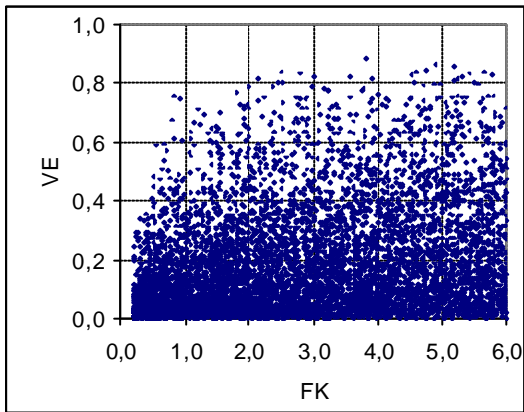


Figura 20 – Dispersão dos valores de *VE* versus *FK*, dos reservatórios simulados com garantia mensal.

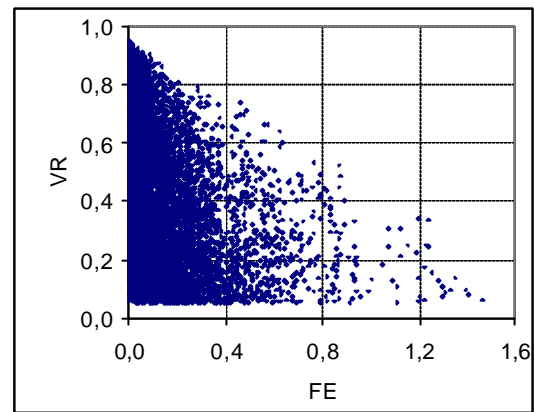


Figura 21 – Dispersão dos valores de *VR* versus *FE*, dos reservatórios simulados com garantia mensal.

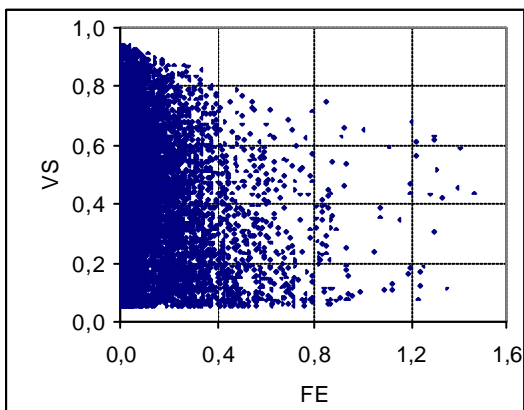


Figura 22 – Dispersão dos valores de *VS* versus *FE*, dos reservatórios simulados com garantia mensal.

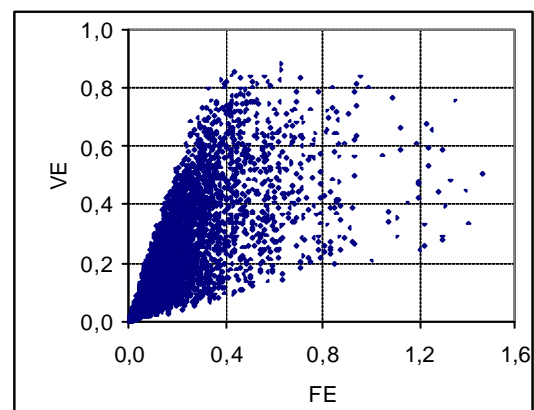


Figura 23 – Dispersão dos valores de *VE* versus *FE*, dos reservatórios simulados com garantia mensal.

4.1.2 Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Anual

Foram gerados e simulados, com garantia anual, diversos reservatórios aleatórios, sendo eliminados os reservatórios considerados “atípicos”. Neste trabalho, são considerados reservatórios “atípicos”: i) reservatórios sub-dimensionados que regularizam volumes inexpressivos; e ii) reservatórios super-dimensionados que vertem volumes inexpressivos. Foram eliminados os reservatórios que regularizam e/ou vertem volumes adimensionais inferiores a 0,05, ou seja, 5% do volume afluyente.

Os reservatórios gerados aleatoriamente foram simulados com garantias anuais de: 80%, 85%, 90%, 95%, 97,5%, 99% e 99,9%. No total, foram seleccionadas 7.267 simulações, sendo aproximadamente 1.040 simulações por cada garantia especificada anteriormente.

Os resultados apresentados nesta seção são similares aos resultados apresentados na seção anterior, 4.1.2, sendo válidas as observações apresentadas na referida seção. As diferenças verificadas decorrem das especificidades dos modelos, em especial, da forma como ocorre a retirada dos volumes regularizados. No modelo desta seção as retiradas ocorrem apenas no período seco, implicando, comparativamente, em um menor volume adimensional regularizado associado a um maior volume adimensional vertido.

Nas Figuras 24 a 33 são apresentados os histogramas e as estatísticas descritivas das 7.267 simulações seleccionadas dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentadas, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, as correlações lineares das variáveis dependentes e independentes.

Nas Figuras 34 a 45 são apresentados gráficos de dispersão das variáveis dependentes e independentes.

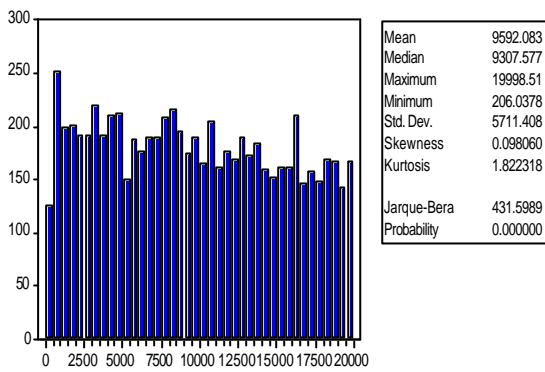


Figura 24 – Histograma do coeficiente a da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

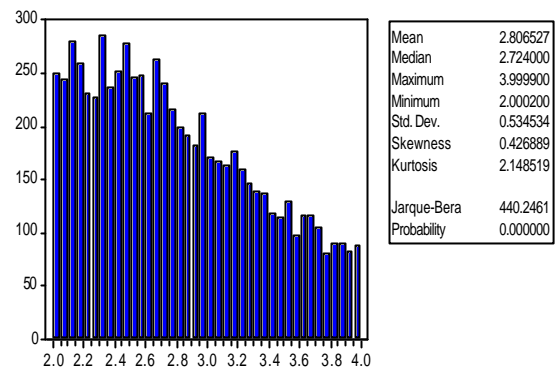


Figura 25 – Histograma do coeficiente b da equação cota-área-volume dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

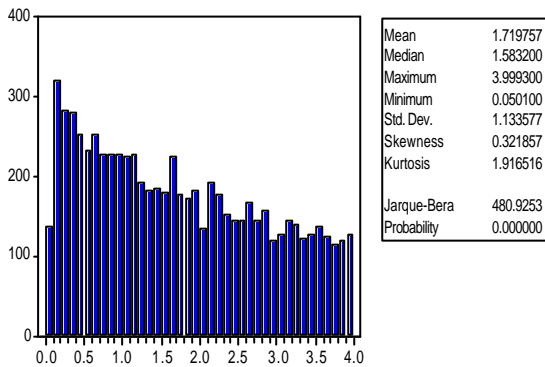


Figura 26 – Histograma da evaporação líquida, ev , do espelho d'água dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, em metros.

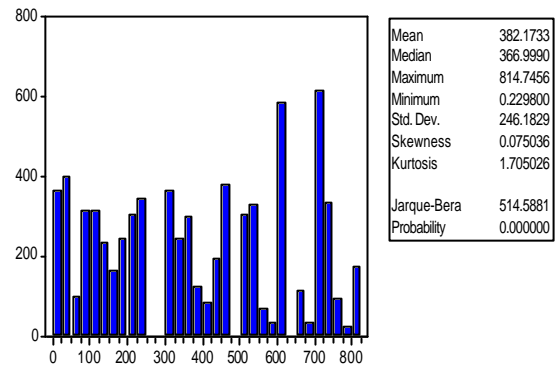


Figura 27 – Histograma do volume médio afluente anual dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, I , em hm^3 .

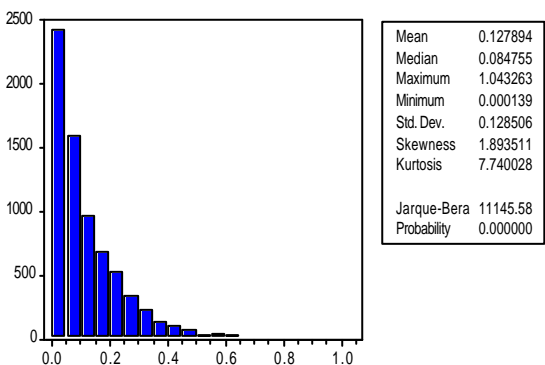


Figura 28 – Histograma do fator adimensional de evaporação, FE , dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

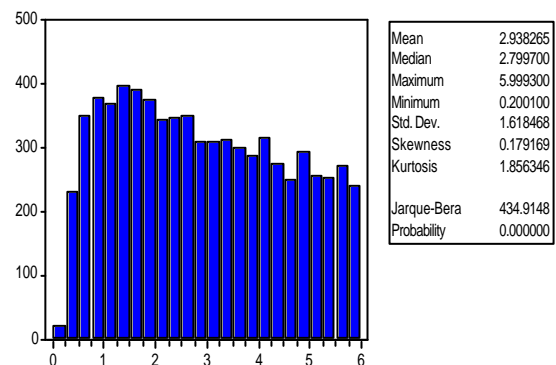


Figura 29 – Histograma do volume adimensional do reservatório, FK , dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

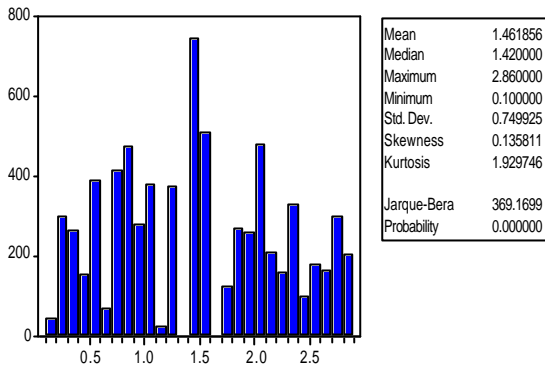


Figura 30 – Histograma do coeficiente de variação das afluições anuais dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual, *CV*.

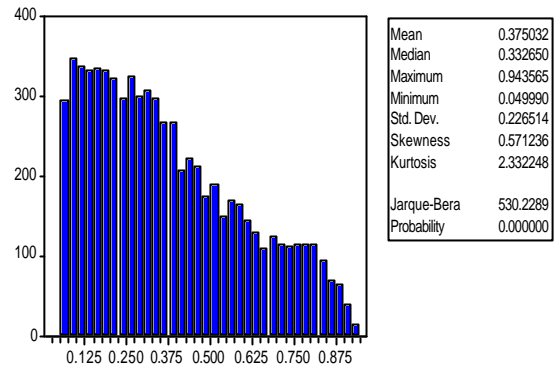


Figura 31 – Histograma do volume adimensional regularizado, *VR*, dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

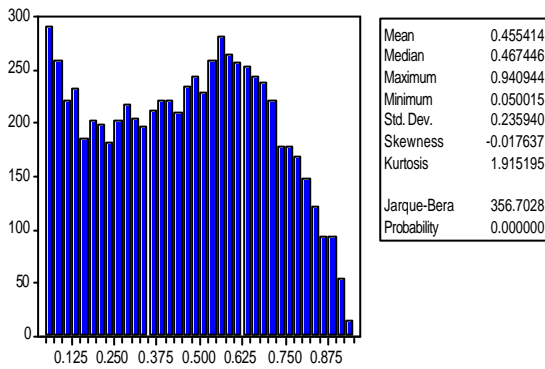


Figura 32 – Histograma do volume adimensional vertido, *VS*, dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

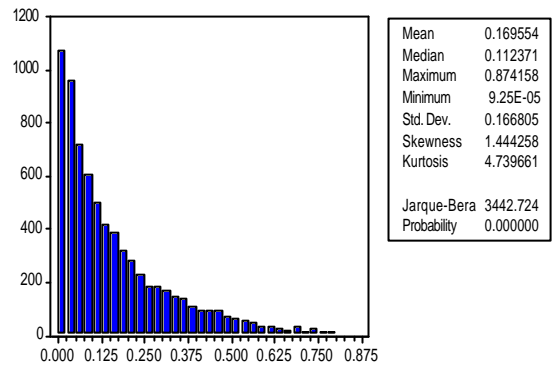


Figura 33 – Histograma do volume adimensional evaporado, *VE*, dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Tabela 5 – Correlação das variáveis dependentes e independentes para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual

	<i>CV</i>	<i>FK</i>	<i>FE</i>	<i>G</i>	<i>VR</i>	<i>VS</i>	<i>VE</i>
<i>CV</i>	1						
<i>FK</i>	0,23916	1					
<i>FE</i>	-0,24292	-0,10841	1				
<i>G</i>	-0,15834	0,03913	-0,12269	1			
<i>VR</i>	-0,59959	0,24144	-0,34137	-0,08803	1		
<i>VS</i>	0,66600	-0,41532	-0,27613	0,09752	-0,74052	1	
<i>VE</i>	-0,12782	0,25959	0,85415	-0,01839	-0,31052	-0,40887	1

Tabela 6 – Correlação entre o fator adimensional de evaporação e suas variáveis explicativas para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

	<i>I</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>ev</i>	<i>FE</i>
<i>I</i>	1				
<i>a</i>	0,04230	1			
<i>b</i>	0,07465	-0,06841	1		
<i>ev</i>	0,07728	-0,04944	-0,24322	1	
<i>FE</i>	-0,19238	0,10742	0,48626	0,37671	1

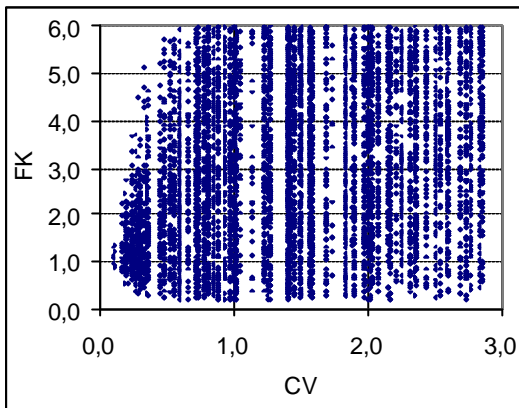


Figura 34 – Dispersão dos valores de FK versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.

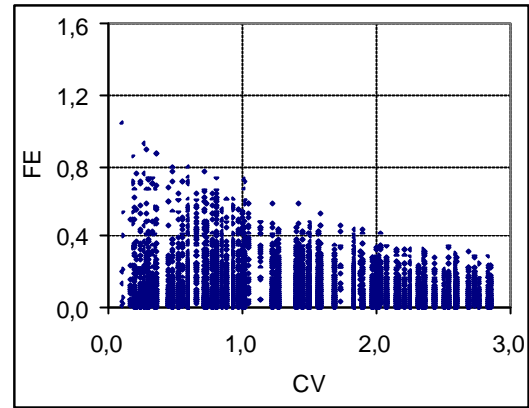


Figura 35 – Dispersão dos valores de FE versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.

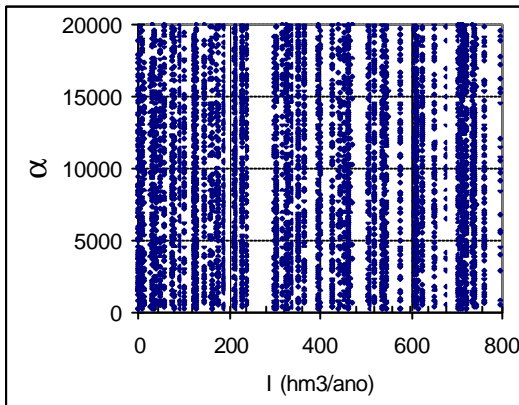


Figura 36 – Dispersão dos valores de a versus I , dos reservatórios simulados com garantia anual.

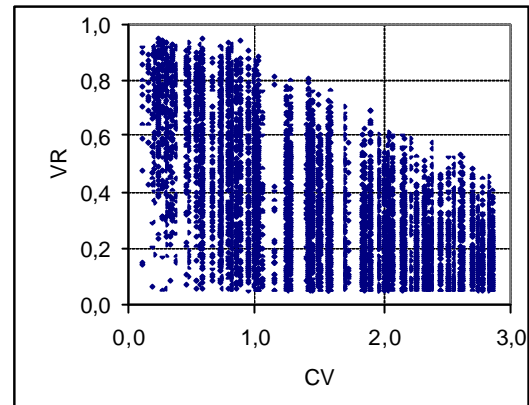


Figura 37 – Dispersão dos valores de VR versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.

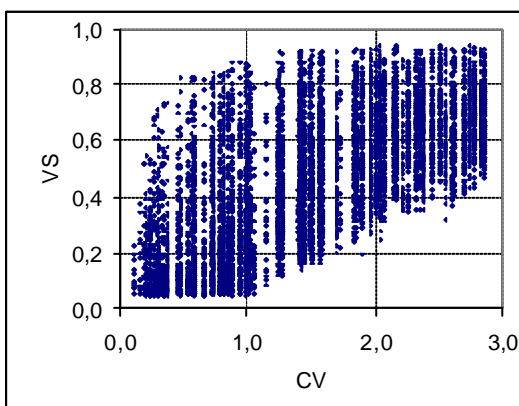


Figura 38 – Dispersão dos valores de VS versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.

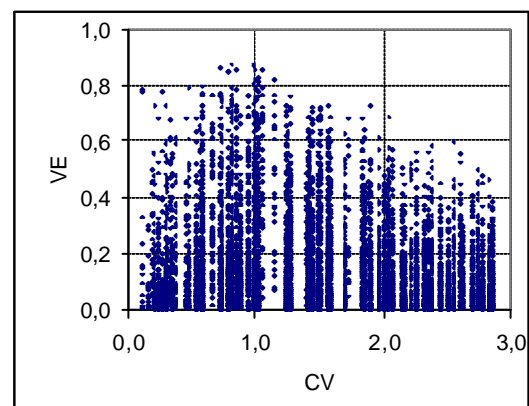


Figura 39 – Dispersão dos valores de VE versus CV , dos reservatórios simulados com garantia anual.

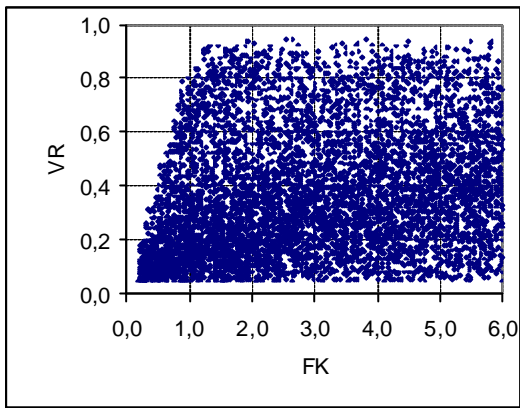


Figura 40 – Dispersão dos valores de *VR versus FK*, dos reservatórios simulados com garantia anual.

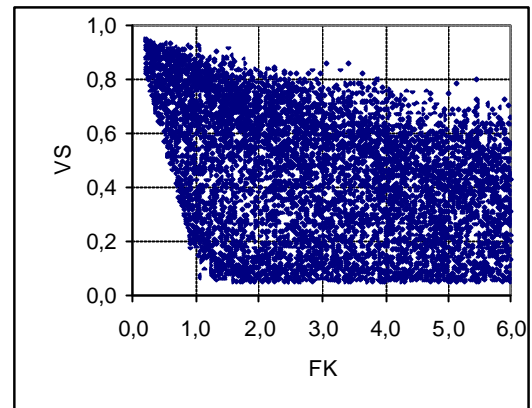


Figura 41 – Dispersão dos valores de *VS versus FK*, dos reservatórios simulados com garantia anual.

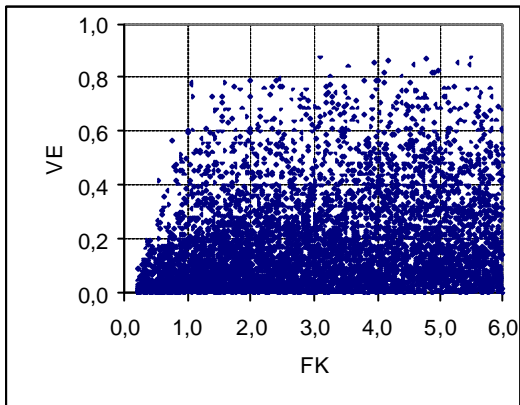


Figura 42 – Dispersão dos valores de *VE versus FK*, dos reservatórios simulados com garantia anual.

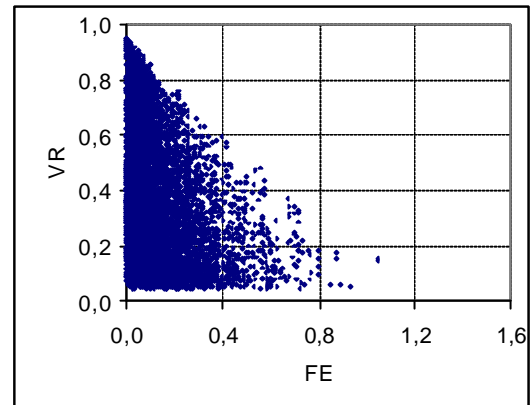


Figura 43 – Dispersão dos valores de *VR versus FE*, dos reservatórios simulados com garantia anual.

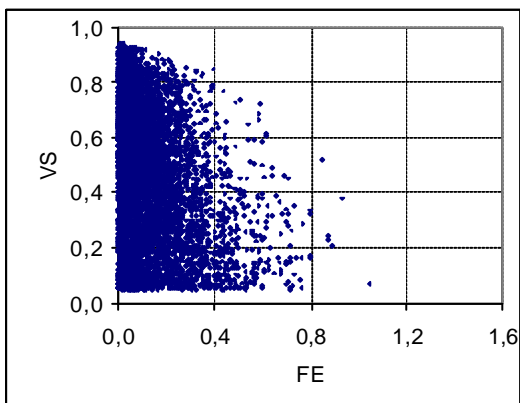


Figura 44 – Dispersão dos valores de *VS versus FE*, dos reservatórios simulados com garantia anual.

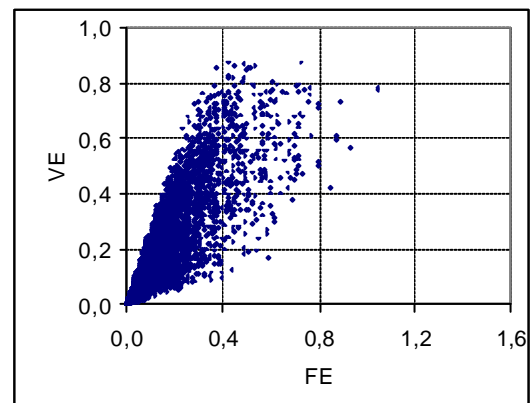


Figura 45 – Dispersão dos valores de *VE versus FE*, dos reservatórios simulados com garantia anual.

4.2 Regressões Considerando os Dados dos Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Mensal

Os 7.710 reservatórios gerados e simulados com garantia mensal, cujas estatísticas foram apresentadas na seção 4.1.1, são utilizados para a determinação das regressões das variáveis dependentes: VR , VS e VE .

Para cada variável dependente foram testados os cinco modelos apresentados na seção 3.2, “modelos de regressão”, a saber: i) linear – linear; ii) linear – logarítmico; iii) logarítmico – linear; iv) logarítmico – logarítmico; e v) duplo logarítmico – logarítmico. Os modelos apresentados na seção 3.2 poderão ser simplificados através da eliminação de alguns dos seus coeficientes quando estes não agregam suficientemente valor ao modelo. Este fato é observado nas subseções 4.2.1 a 4.2.3.

Após uma análise comparativa dos valores de \bar{R}^2 , dos critérios de Akaike e de Schwarz, das dispersões dos resíduos e das estatísticas dos coeficientes, foram selecionados os modelos que melhor representaram os dados para cada uma das variáveis dependentes.

Na subseção 4.2.1 são apresentados os resultados da regressão do volume adimensional evaporado, VE , com a adoção do modelo “logarítmico – logarítmico”.

Na subseção 4.2.2 são apresentados os resultados da regressão do volume adimensional vertido, VS , com a adoção do modelo “duplo logarítmico – logarítmico”.

Na subseção 4.2.3 são apresentados os resultados da regressão do volume adimensional regularizado, VR , com a adoção do modelo “duplo logarítmico – logarítmico”.

Na subseção 4.2.4 são apresentadas considerações sobre os modelos de VE , VS e VR .

4.2.1 Volume Evaporado Adimensional

Determinou-se a regressão:

$$VE = e^{c(1)} \times CV^{c(2)} \times FK^{c(3)} \times FE^{c(4)} \times G^{(c(5)+c(6)\times\ln(G))} \times e^u$$

Que linearizada retorna:

$$\ln(VE) = c(1) + c(2) \times \ln(CV) + c(3) \times \ln(FK) + c(4) \times \ln(FE) + c(5) \times \ln(G) + c(6) \times \ln(G)^2 + u$$

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da regressão.

Na Figura 46 são apresentados os valores de VE determinados por regressão *versus* os valores de VE determinados por simulação.

Na Figura 47 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, *versus* a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela regressão.

Nas Figuras 48 a 52 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela regressão, *versus* as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 53 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, u , da regressão.

Tabela 7 – Resultado da regressão para VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Dependent Variable: $\ln(VE)$
 Method: Least Squares
 Sample: 1 7710
 $\ln(VE) = C(1) + C(2) \cdot \ln(CV) + C(3) \cdot \ln(FK) + C(4) \cdot \ln(FE) + C(5) \cdot \ln(G) + C(6) \cdot \ln(G)^2$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-0,207944	0,002224	-93,48142	0,0000
C(2)	0,054039	0,001391	38,84194	0,0000
C(3)	0,589307	0,001019	578,3314	0,0000
C(4)	0,978417	0,000616	1589,516	0,0000
C(5)	3,004036	0,037570	79,95775	0,0000
C(6)	6,028450	0,167197	36,05588	0,0000
R-squared	0,997306	Mean dependent var	-2,343374	
Adjusted R-squared	0,997304	S.D, dependent var	1,284259	
S.E. of regression	0,066683	Akaike info criterion	-2,576970	
Sum squared resid	34,25628	Schwarz criterion	-2,571561	
Log likelihood	9940,219			

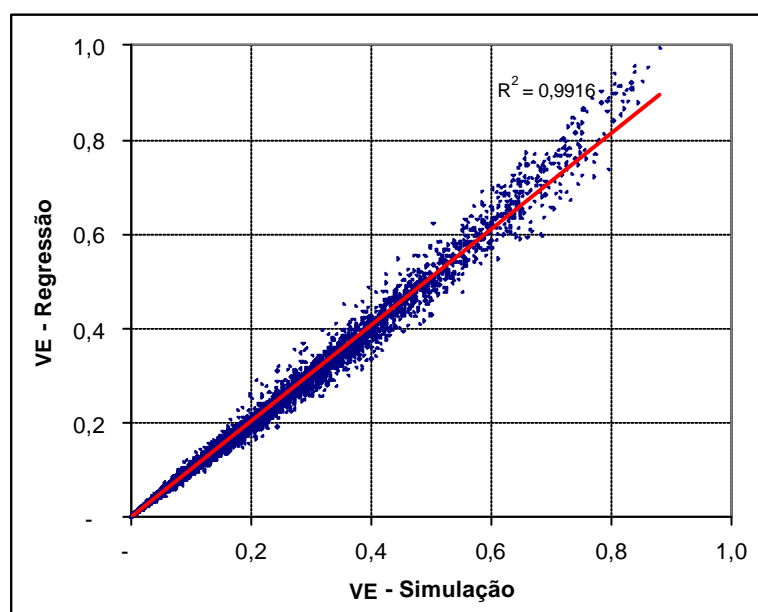


Figura 46 – Valores de VE determinados por regressão *versus* os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

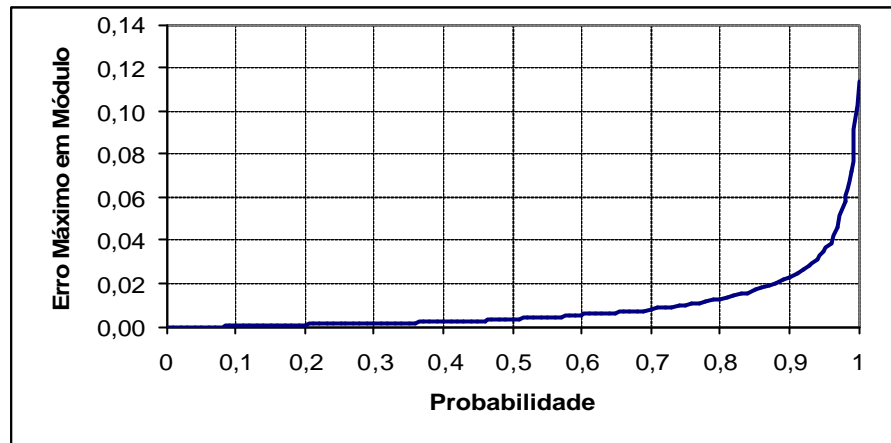


Figura 47 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de *VE* versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

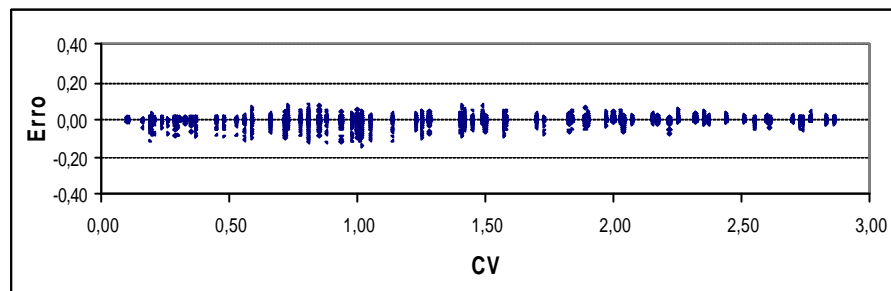


Figura 48 – Erros observados versus *CV* para a regressão de *VE* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

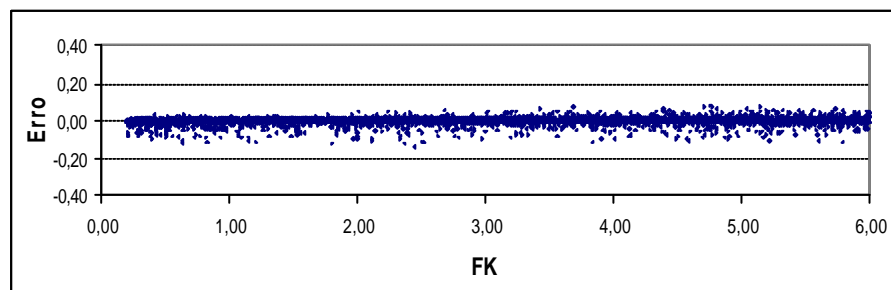


Figura 49 – Erros observados versus *FK* para a regressão de *VE* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

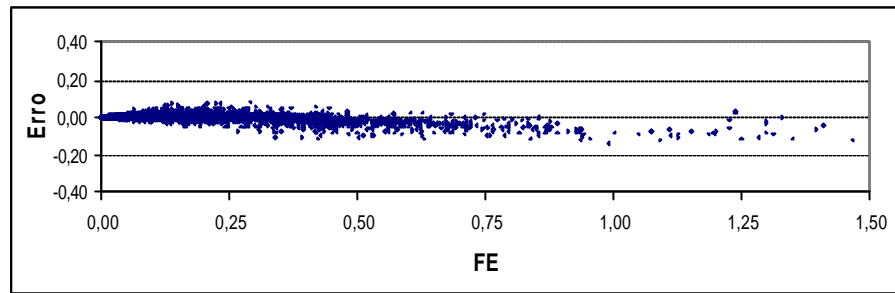


Figura 50 – Erros observados *versus* FE para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

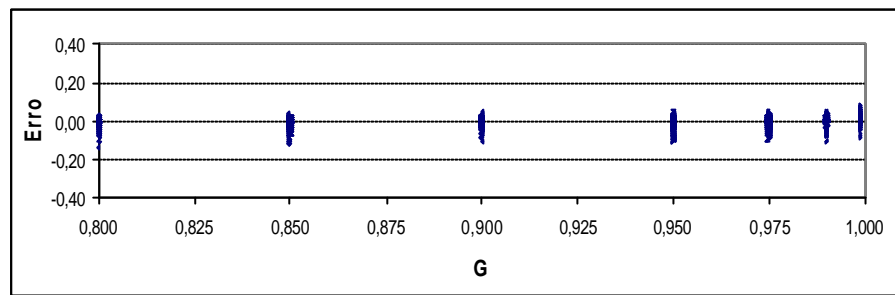


Figura 51 – Erros observados *versus* G para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

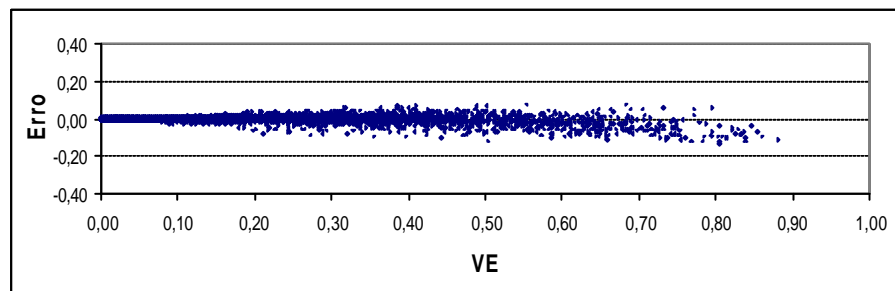


Figura 52 – Erros observados *versus* VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

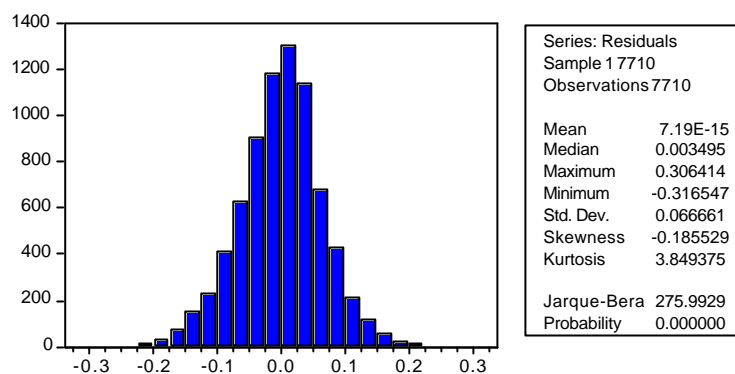


Figura 53 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa bem VE . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0088 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,0230.
- Os sinais dos coeficientes da regressão estão coerentes com o esperado *a priori*, ou seja, valores positivos para os coeficientes de CV , FK , FE e G . No Apêndice B são apresentados gráficos indicativos da influência de cada variável independente em VE .
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera, o que traz alguma incerteza na aplicação de testes de hipóteses. Apesar desta limitação, testou-se a hipótese nula $H_0 : c(4) = 1$, sendo observado que a mesma não possui respaldo estatístico, como observado na Tabela 8.
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependente e independentes são homocedásticas e não tendenciosas, à exceção, em certa medida, dos resultados apresentados nas Figuras 46, 50 e 52, indicando que valores grandes de FE tendem a superestimar sistematicamente os valores de VE , valores estes de grandes magnitudes. Isto decorre devido ao fato de que grande parte dos reservatórios utilizados para a determinação desta regressão apresentarem pequenos valores de

FE , e conseqüentemente pequenos valores de VE , como pode ser observado nas Figuras 6 e 11. Desta forma, a regressão procurará maximizar o ajuste para os reservatórios que possuam pequenos valores de VE , penalizando os reservatórios com valores altos de VE . Possivelmente um ajuste no coeficiente $C(1)$, seguido ou não de ajuste no coeficiente $C(4)$, deverá reduzir substancialmente os erros quando considerado reservatórios com altos valores de VE . Considerações adicionais sobre esta questão serão fornecidas na seção 4.5.

Tabela 8 – Teste de hipótese $H_0 : C(4) = 1$ para a regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Wald Test:			
Null Hypothesis: $C(4)=1$			
F-statistic	1229,478	Probability	0,000000
Chi-square	1229,478	Probability	0,000000

4.2.2 Volume Vertido Adimensional

Determinou-se a regressão:

$$VS = \frac{1}{e^X}, \text{ onde:}$$

$$X = e^{c(1)} \times CV^{(c(2)+c(6)\times\ln(CV))} \times FK^{(c(3)+c(7)\times\ln(FK))} \times FE^{(c(4)+c(8)\times\ln(FE))} \times G^{(c(5)+c(9)\times\ln(G)+c(10)\times\ln(G)^2)} \times e^u$$

Que linearizada retorna:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{VS}\right)\right) = c(1) + c(2)\times\ln(CV) + c(3)\times\ln(FK) + c(4)\times\ln(FE) + c(5)\times\ln(G) + c(6)\times\ln(CV)^2 + c(7)\times\ln(FK)^2 + c(8)\times\ln(FE)^2 + c(9)\times\ln(G)^2 + c(10)\times\ln(G)^3 + u$$

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da regressão.

Na Figura 54 são apresentados os valores de *VS* determinados por regressão *versus* os valores de *VS* determinados por simulação.

Na Figura 55 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, *versus* a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela regressão.

Nas Figuras 56 A 60 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela regressão, *versus* as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 61 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, *u*, da regressão.

Tabela 9 – Resultado da regressão para VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal .

Dependent Variable: $\ln(\ln(1/VS))$
Method: Least Squares
Sample: 1 7710
 $\ln(\ln(1/VS)) = C(1) + C(2) * \ln(CV) + C(3) * \ln(FK) + C(4) * \ln(FE) + C(5) * \ln(G) + C(6) * \ln(CV)^2 + C(7) * \ln(FK)^2 + C(8) * \ln(FE)^2 + C(9) * \ln(G)^2 + C(10) * \ln(G)^3$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-0,535315	0,006367	-84,08120	0,0000
C(2)	-1,171884	0,002612	-448,5938	0,0000
C(3)	0,748562	0,002536	295,2038	0,0000
C(4)	0,129334	0,003889	33,26041	0,0000
C(5)	-12,16768	0,165806	-73,38482	0,0000
C(6)	-0,192154	0,002712	-70,86042	0,0000
C(7)	-0,018183	0,001952	-9,313418	0,0000
C(8)	0,011752	0,000629	18,68847	0,0000
C(9)	-81,90224	1,862089	-43,98405	0,0000
C(10)	-191,1170	5,452998	-35,04806	0,0000
R-squared	0,973945	Mean dependent var	-0,235216	
Adjusted R-squared	0,973915	S,D, dependent var	0,761874	
S.E. of regression	0,123049	Akaike info criterion	-1,351165	
Sum squared resid	116,5869	Schwarz criterion	-1,342151	
Log likelihood	5218,742			

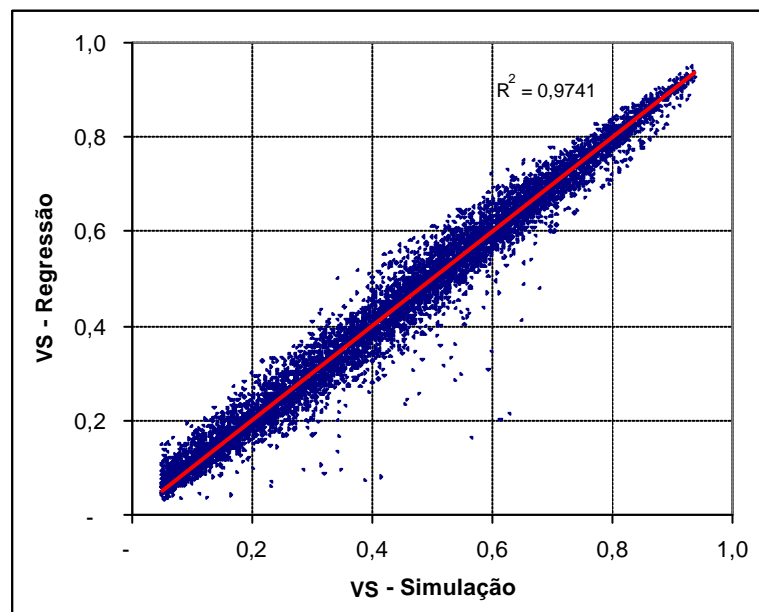


Figura 54 – Valores de VS determinados por regressão versus os valores de VS determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

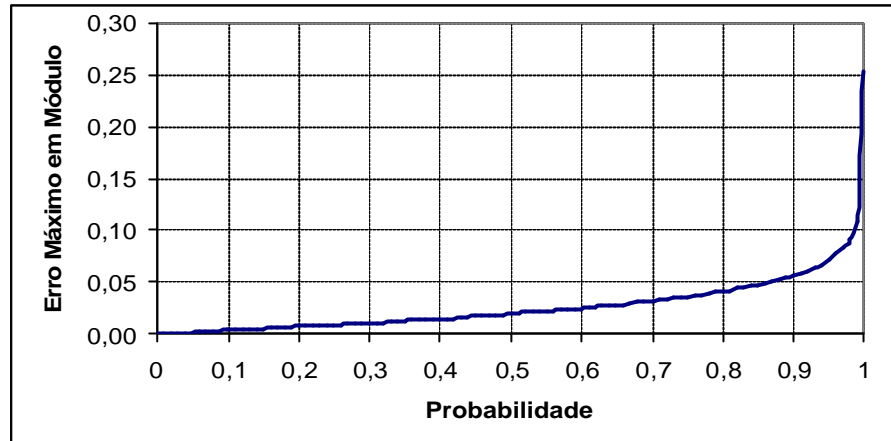


Figura 55 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VS versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

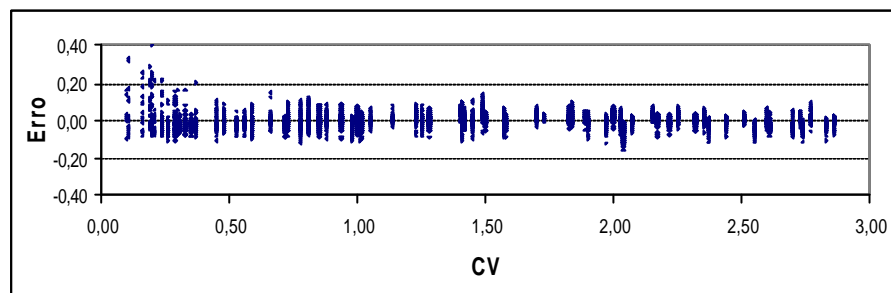


Figura 56 – Erros observados versus CV para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

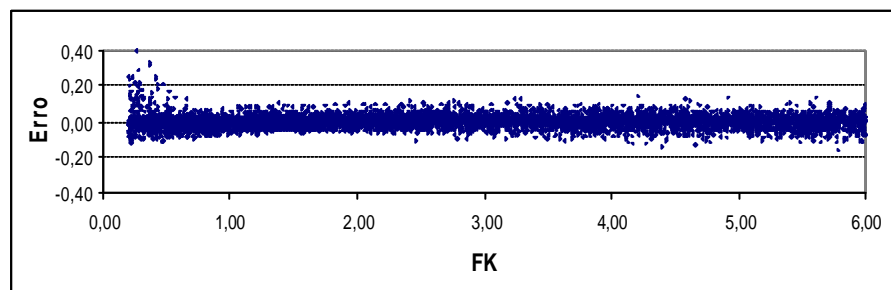


Figura 57 – Erros observados versus FK para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

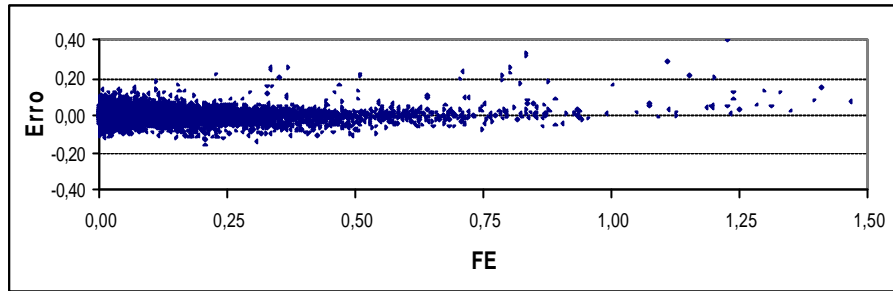


Figura 58 – Erros observados *versus* FE para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

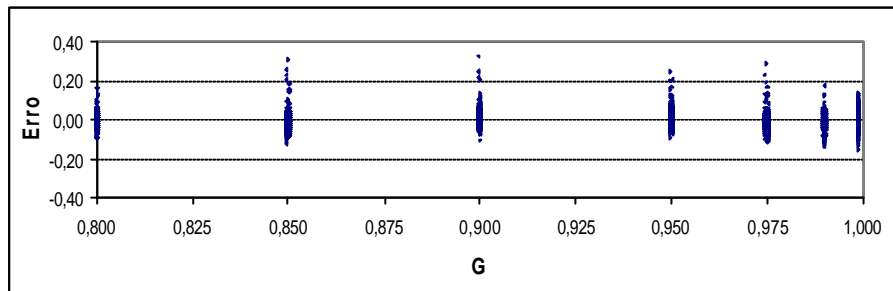


Figura 59 – Erros observados *versus* G para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

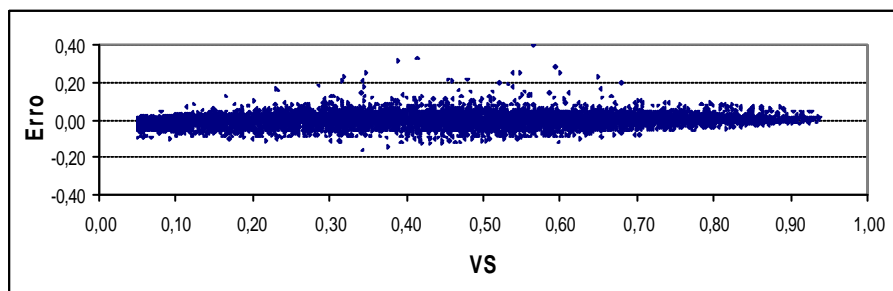


Figura 60 – Erros observados *versus* VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

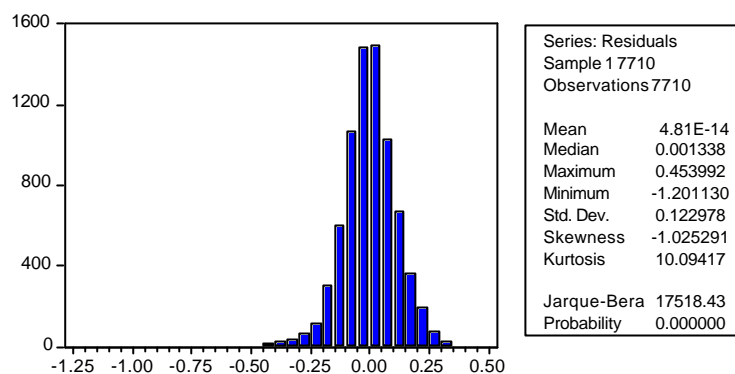


Figura 61 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VS , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa bem VS . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0261 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,0565.
- Devido à complexidade do modelo, não é possível analisar isoladamente os sinais dos coeficientes da regressão. No entanto, analisando os gráficos do Apêndice B, verifica-se que a influência das variáveis independentes em VS está de acordo com a teoria.
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera, o que traz alguma incerteza na aplicação de testes de hipóteses.
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependente e independentes são homocedásticas e não tendenciosas, à exceção, em certa medida, dos resultados apresentados nas Figuras 56 e 57, indicando que o modelo não representa tão bem reservatórios sujeitos a pequenos valores de CV e FK , concomitantemente. Este fato explica o crescimento acentuado do final da curva da Figura 55 e a existência de alguns pontos excessivamente destoantes nas demais figuras, em especial na Figura 54.

4.2.3 Volume Regularizado Adimensional

Determinou-se a regressão:

$$VR = \frac{1}{e^X}, \text{ onde:}$$

$$X = e^{C(1)} \times CV^{(C(2)+C(6) \times \ln(CV))} \times FK^{(C(3)+C(7) \times \ln(FK))} \times FE^{(C(4)+C(8) \times \ln(FE))} \times G^{(C(5)+C(9) \times \ln(G))} \times e^u$$

Que linearizada retorna:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{VR}\right)\right) = C(1) + C(2) \times \ln(CV) + C(3) \times \ln(FK) + C(4) \times \ln(FE) + C(5) \times \ln(G) + C(6) \times \ln(CV)^2 + C(7) \times \ln(FK)^2 + C(8) \times \ln(FE)^2 + C(9) \times \ln(G)^2 + u$$

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da regressão.

Na Figura 62 são apresentados os valores de VR determinados por regressão *versus* os valores de VR determinados por simulação.

Na Figura 63 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, *versus* a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela regressão.

Nas Figuras 64 a 68 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela regressão, *versus* as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 69 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, u , da regressão.

Tabela 10 – Resultado da regressão para VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Dependent Variable: $\ln(\ln(1/VR))$

Method: Least Squares

Sample: 1 7710

$$\ln(\ln(1/VR)) = C(1) + C(2) \cdot \ln(CV) + C(3) \cdot \ln(FK) + C(4) \cdot \ln(FE) + C(5) \cdot \ln(G) + C(6) \cdot \ln(CV)^2 + C(7) \cdot \ln(FK)^2 + C(8) \cdot \ln(FE)^2 + C(9) \cdot \ln(G)^2$$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	1,538915	0,011285	136,3679	0,0000
C(2)	1,194721	0,004799	248,9641	0,0000
C(3)	-0,480633	0,004658	-103,1818	0,0000
C(4)	0,778590	0,007143	108,9983	0,0000
C(5)	8,261235	0,127460	64,81415	0,0000
C(6)	0,138224	0,004980	27,75695	0,0000
C(7)	0,048705	0,003586	13,58082	0,0000
C(8)	0,081067	0,001155	70,18086	0,0000
C(9)	20,86778	0,566815	36,81584	0,0000
R-squared	0,911379	Mean dependent var	-0,083581	
Adjusted R-squared	0,911287	S,D, dependent var	0,758919	
S.E. of regression	0,226042	Akaike info criterion	-0,135022	
Sum squared resid	393,4839	Schwarz criterion	-0,126909	
Log likelihood	529,5088			

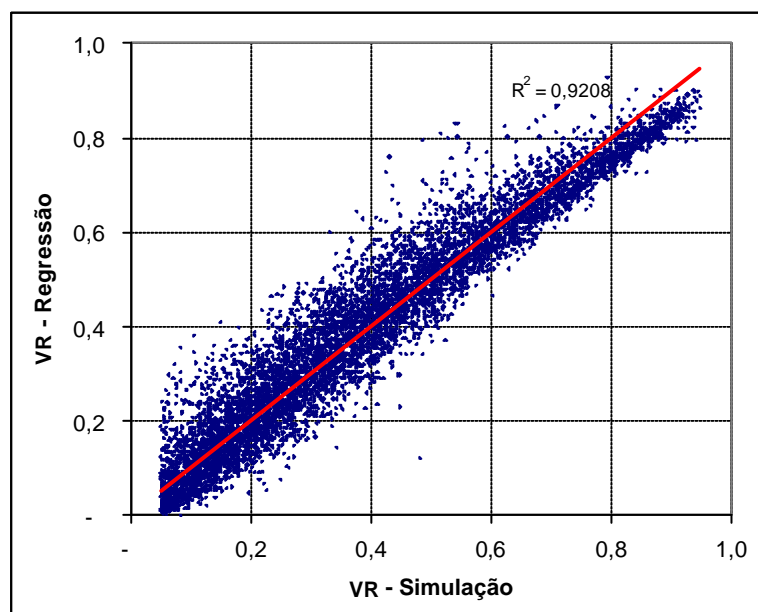


Figura 62 – Valores de VR determinados por regressão *versus* os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

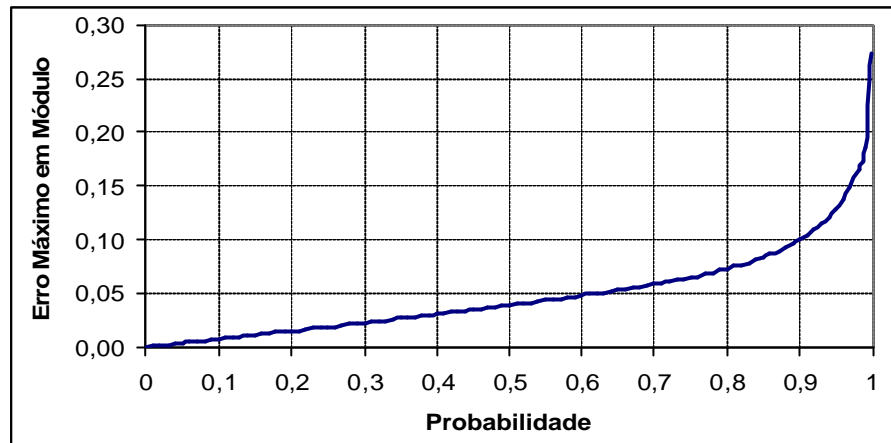


Figura 63 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de *VR* versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

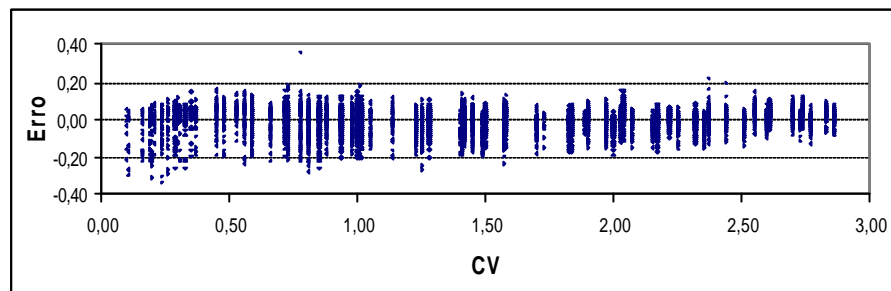


Figura 64 – Erros observados versus *CV* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

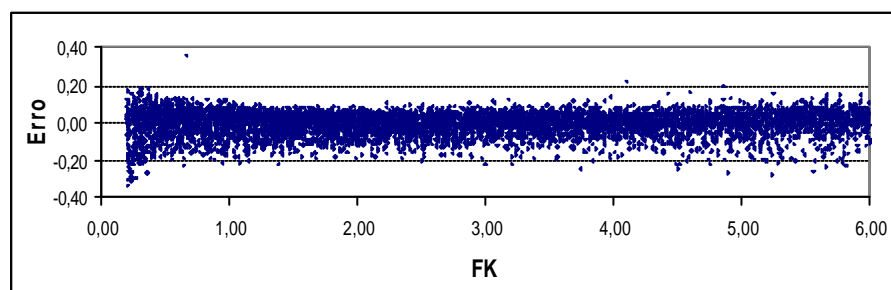


Figura 65 – Erros observados versus *FK* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

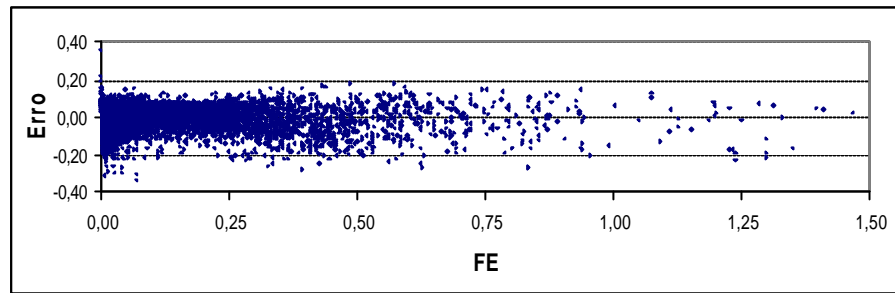


Figura 66 – Erros observados *versus* *FE* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

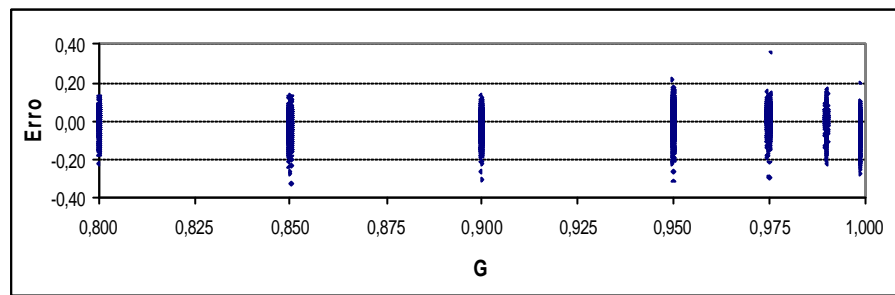


Figura 67 – Erros observados *versus* *G* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

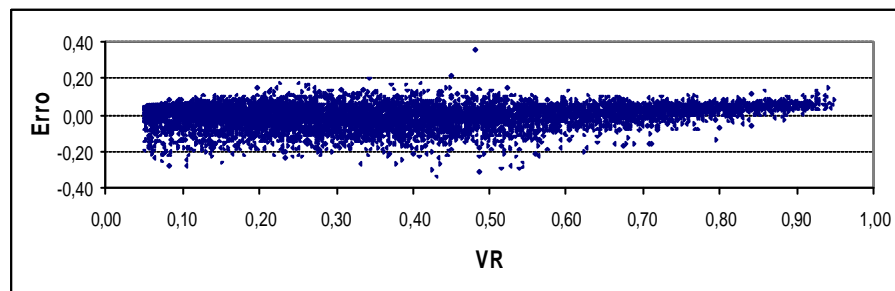


Figura 68 – Erros observados *versus* *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

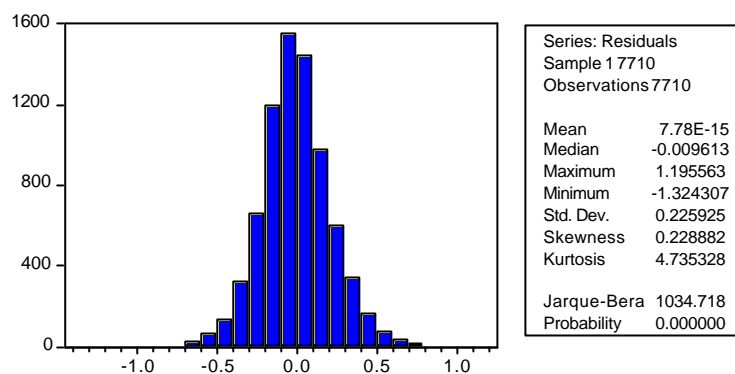


Figura 69 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VR , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa VR com um nível de imprecisão maior do que o observado nos modelos de VE e VS . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0480 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,1000.
- Devido à complexidade do modelo, não é possível analisar isoladamente os sinais dos coeficientes da regressão. No entanto, analisando os gráficos do Apêndice B, verifica-se que a influência das variáveis independentes em VR está de acordo com a teoria.
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera, o que traz alguma incerteza na aplicação de testes de hipóteses.
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependentes e independentes podem ser consideradas, em certa medida, homocedástica e não tendenciosa. Nas Figuras 62 e 68 observa-se a tendência de subestimar sistematicamente VR quando este assume valores altos. Na Figura 65 observa-se uma tendência de erros maiores para valores excessivamente pequenos de FK .

4.2.4 Considerações

O modelo de regressão de VE apresentou os melhores indicadores, seguido do modelo de VS e por fim pelo modelo de VR .

Apesar de os reservatórios terem sido simulados com séries de volume afluente de mil anos de duração, que *a priori* se esperava ser suficiente, há a possibilidade de parte dos resíduos ser explicado pela extensão destas séries, visto que, eventos extremos, como os vertimentos, são fortemente dependentes dos valores destas séries.

Considerando que o modelo de VR não apresentou bons indicadores e que a determinação deste VR é objeto central deste trabalho, será apresentado na seção 4.4 metodologia alternativa para a sua determinação a partir de VE e VS .

4.3 Regressões Considerando os Dados dos Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Anual

Nesta seção adota-se o mesmo procedimento descrito na seção 4.2.

Os 7.267 reservatórios gerados e simulados com garantia anual, cujas estatísticas foram apresentadas na seção 4.1.2, são utilizados para a determinação das regressões das variáveis dependentes: VR , VS e VE .

Para cada variável dependente foram testados os cinco modelos apresentados na seção 3.2, “modelos de regressão”, a saber: i) linear – linear; ii) linear – logarítmico; iii) logarítmico – linear; iv) logarítmico – logarítmico; e v) duplo logarítmico – logarítmico. Os modelos apresentados na seção 3.2 poderão ser simplificados através da eliminação de alguns dos seus coeficientes quando estes não agregam suficientemente valor ao modelo. Este fato é observado nas subseções 4.3.1 a 4.3.3.

Após uma análise comparativa dos valores de \bar{R}^2 , dos critérios de Akaike e de Schwarz, das dispersões dos resíduos e das estatísticas dos coeficientes, foram selecionados os modelos que melhor representaram os dados para cada uma das variáveis dependentes.

Na subseção 4.3.1 são apresentados os resultados da regressão do volume adimensional evaporado, VE , com a adoção do modelo “logarítmico – logarítmico”.

Na subseção 4.3.2 são apresentados os resultados da regressão do volume adimensional vertido, VS , com a adoção do modelo “duplo logarítmico – logarítmico”.

Na subseção 4.3.3 são apresentados os resultados da regressão do volume adimensional regularizado, VR , com a adoção do modelo “duplo logarítmico – logarítmico”.

Na subseção 4.3.4 são apresentadas considerações sobre os modelos de VE , VS e VR .

4.3.1 Volume Evaporado Adimensional

Determinou-se a regressão:

$$VE = e^{c(1)} \times CV^{c(2)} \times FK^{c(3)} \times FE^{c(4)} \times G^{(c(5)+c(6)\ln(G))} \times e^u$$

Que linearizada retorna:

$$\ln(VE) = c(1) + c(2) \times \ln(CV) + c(3) \times \ln(FK) + c(4) \times \ln(FE) + c(5) \times \ln(G) + c(6) \times \ln(G)^2 + u$$

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da regressão.

Na Figura 70 são apresentados os valores de VE determinados por regressão *versus* os valores de VE determinados por simulação.

Na Figura 71 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, *versus* a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela regressão.

Nas Figuras 72 a 76 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela regressão, *versus* as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 77 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, u , da regressão.

Tabela 11 – Resultado da regressão para VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Dependent Variable: $\ln(VE)$

Method: Least Squares

Sample: 1 7267

$$\ln(VE) = C(1) + C(2) \cdot \ln(CV) + C(3) \cdot \ln(FK) + C(4) \cdot \ln(FE) + C(5) \cdot \ln(G) + C(6) \cdot \ln(G)^2$$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-0,162880	0,002331	-69,87938	0,0000
C(2)	0,032971	0,001173	28,09724	0,0000
C(3)	0,601773	0,001046	575,2777	0,0000
C(4)	0,999125	0,000609	1640,252	0,0000
C(5)	2,128447	0,035954	59,19968	0,0000
C(6)	4,213753	0,160324	26,28269	0,0000
R-squared	0,997616	Mean dependent var	-2,368104	
Adjusted R-squared	0,997614	S,D, dependent var	1,267392	
S.E. of regression	0,061902	Akaike info criterion	-2,725702	
Sum squared resid	27,82315	Schwarz criterion	-2,720012	
Log likelihood	9909,838			

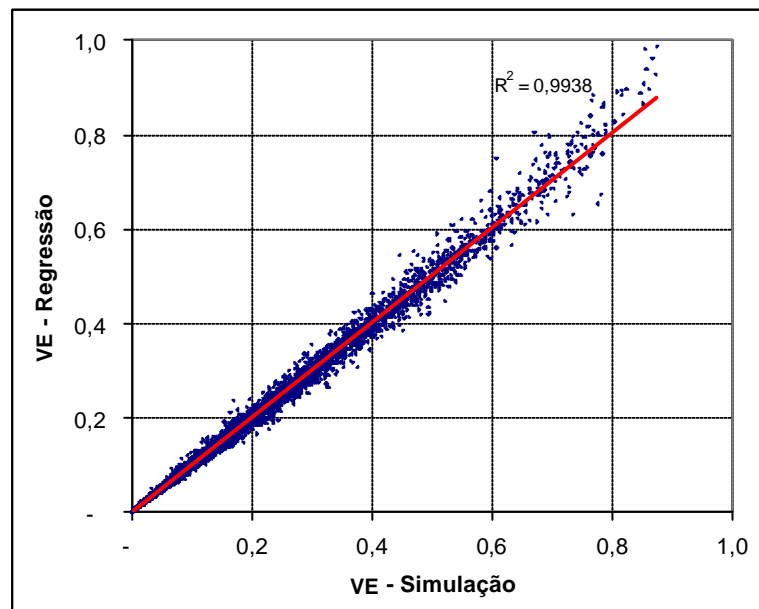


Figura 70 – Valores de VE determinados por regressão *versus* os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

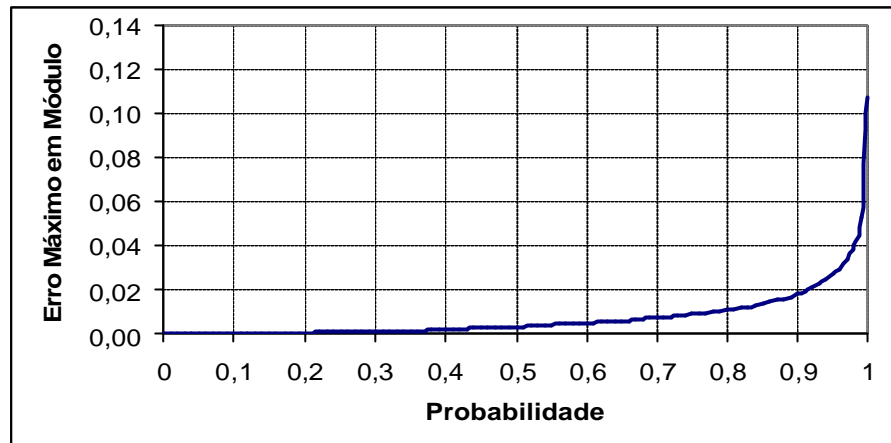


Figura 71 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VE versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

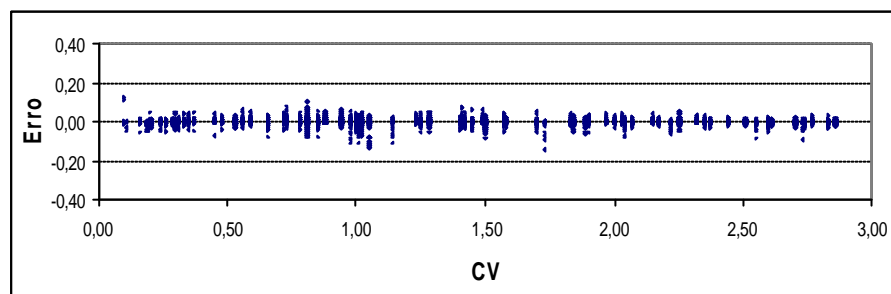


Figura 72 – Erros observados versus CV para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

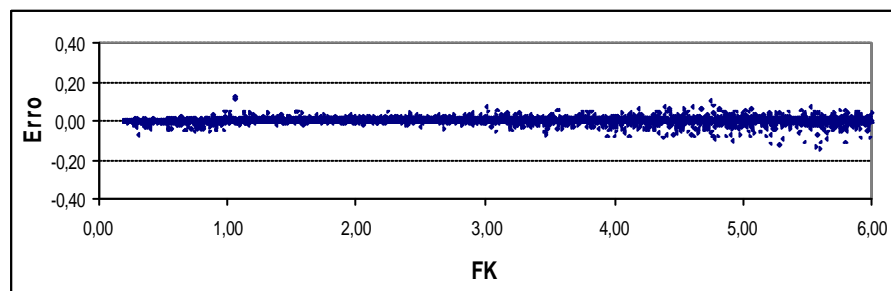


Figura 73 – Erros observados versus FK para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

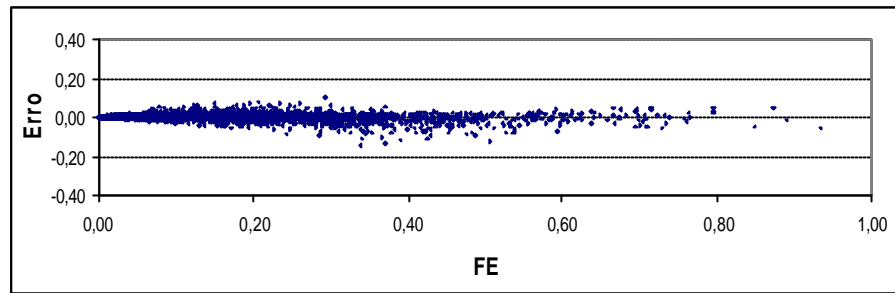


Figura 74 – Erros observados *versus* FE para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia a anual.

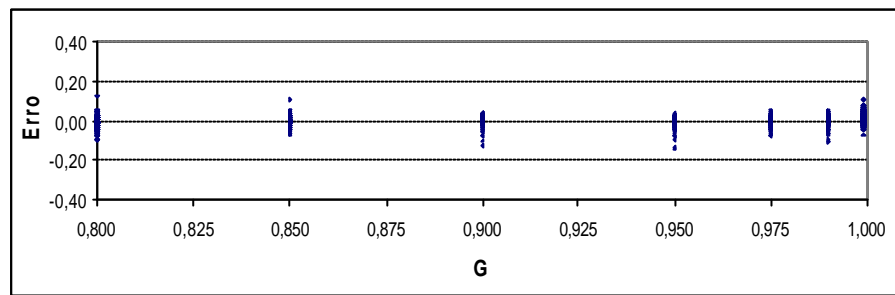


Figura 75 – Erros observados *versus* G para a regressão de VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

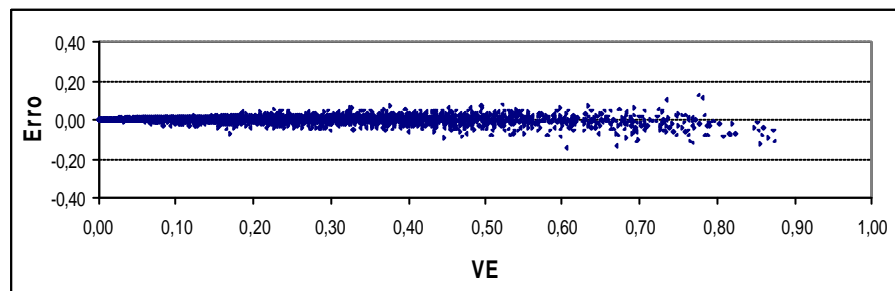


Figura 76 – Erros observados *versus* VE considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

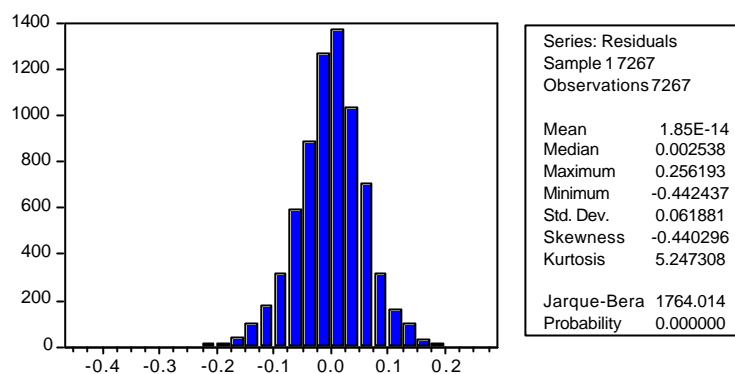


Figura 77 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa bem VE . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0073 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,0180.
- Os sinais dos coeficientes da regressão estão coerentes com o esperado *a priori*, ou seja, valores positivos para os coeficientes de CV , FK , FE e G . No Apêndice B são apresentados gráficos indicativos da influência de cada variável independente em VE .
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera, o que traz alguma incerteza na aplicação de testes de hipóteses. Apesar desta limitação, testou-se a hipótese nula $H_0 : c(4) = 1$, como observado na Tabela 12, sendo verificado que a mesma não pode ser rejeitada, ou seja, $c(4)$ pode ser considerado igual a unidade, indicando que VE é diretamente proporcional à FE .
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependente e independentes são homocedásticas e não tendenciosas, à exceção, em certa medida, dos resultados apresentados nas Figuras 70 e 76, onde se observa a tendência de superestimar sistematicamente VE quando este assume valores altos. Isto decorre devido ao fato de que grande parte dos reservatórios utilizados para a determinação desta

regressão apresentarem pequenos valores de VE , como pode ser observado nas Figuras 28 e 33. Desta forma, a regressão procurará maximizar o ajuste para os reservatórios que possuam pequenos valores de VE , penalizando os reservatórios com valores altos de VE . Possivelmente um ajuste no coeficiente $C(1)$ deverá reduzir substancialmente os erros quando considerado reservatórios com altos valores de VE . Considerações adicionais sobre esta questão serão fornecidas na seção 4.5.

Tabela 12 – Teste de hipótese $H_0 : C(4) = 1$ para a regressão de VE , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Wald Test:
Null Hypothesis: $C(4)=1$

F-statistic	2,064039	Probability	0,150853
Chi-square	2,064039	Probability	0,150810

Na Tabela 13 é apresentada a regressão considerando $c(4)=1$. Como esperado, os valores dos coeficientes não se alteram consideravelmente, assim como as demais estatísticas.

Tabela 13 – Resultado da regressão para VE , considerando $C(4) = 1$ e os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Dependent Variable: $\ln(VE)$
Method: Least Squares
Sample: 1 7267
 $\ln(VE) = C(1) + C(2) \cdot \ln(CV) + C(3) \cdot \ln(FK) + \ln(FE) + C(5) \cdot \ln(G) + C(6) \cdot \ln(G)^2$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-0,160460	0,001611	-99,61051	0,0000
C(2)	0,033229	0,001160	28,65318	0,0000
C(3)	0,601764	0,001046	575,2376	0,0000
C(5)	2,131796	0,035881	59,41350	0,0000
C(6)	4,221583	0,160243	26,34483	0,0000
R-squared	0,997615	Mean dependent var	-2,368104	
Adjusted R-squared	0,997614	S,D, dependent var	1,267392	
S.E. of regression	0,061907	Akaike info criterion	-2,725693	
Sum squared resid	27,83106	Schwarz criterion	-2,720952	
Log likelihood	9908,805			

4.3.2 Volume Vertido Adimensional

Determinou-se a regressão:

$$VS = \frac{1}{e^X}, \text{ onde:}$$

$$X = e^{c(1)} \times CV^{(c(2)+c(6)\times\ln(CV))} \times FK^{(c(3)+c(7)\times\ln(FK))} \times FE^{(c(4)+c(8)\times\ln(FE))} \times G^{(c(5)+c(9)\times\ln(G)+c(10)\times\ln(G)^2)} \times e^u$$

Que linearizada retorna:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{VS}\right)\right) = c(1) + c(2)\times\ln(CV) + c(3)\times\ln(FK) + c(4)\times\ln(FE) + c(5)\times\ln(G) + c(6)\times\ln(CV)^2 + c(7)\times\ln(FK)^2 + c(8)\times\ln(FE)^2 + c(9)\times\ln(G)^2 + c(10)\times\ln(G)^3 + u$$

Na Tabela 14 são apresentados os resultados da regressão.

Na Figura 78 são apresentados os valores de *VS* determinados por regressão *versus* os valores de *VS* determinados por simulação.

Na Figura 79 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, *versus* a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela regressão.

Nas Figuras 80 a 84 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela regressão, *versus* as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 85 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, *u*, da regressão.

Tabela 14 – Resultado da regressão para VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Dependent Variable: $\ln(\ln(1/VS))$
 Method: Least Squares
 Sample: 1 7267

$$\ln(\ln(1/VS)) = C(1) + C(2) \cdot \ln(CV) + C(3) \cdot \ln(FK) + C(4) \cdot \ln(FE) + C(5) \cdot \ln(G) + C(6) \cdot \ln(CV)^2 + C(7) \cdot \ln(FK)^2 + C(8) \cdot \ln(FE)^2 + C(9) \cdot \ln(G)^2 + C(10) \cdot \ln(G)^3$$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-0,738561	0,006079	-121,4945	0,0000
C(2)	-1,033767	0,001962	-526,9926	0,0000
C(3)	0,828370	0,002611	317,2131	0,0000
C(4)	0,175113	0,003587	48,82086	0,0000
C(5)	-10,30075	0,135857	-75,82050	0,0000
C(6)	-0,150786	0,002241	-67,29669	0,0000
C(7)	-0,016194	0,001913	-8,467305	0,0000
C(8)	0,017433	0,000553	31,49986	0,0000
C(9)	-68,93770	1,525373	-45,19398	0,0000
C(10)	-158,8954	4,475922	-35,50005	0,0000
R-squared	0,984306	Mean dependent var	-0,295028	
Adjusted R-squared	0,984286	S,D, dependent var	0,788218	
S.E. of regression	0,098807	Akaike info criterion	-1,789919	
Sum squared resid	70,84897	Schwarz criterion	-1,780436	
Log likelihood	6513,671			

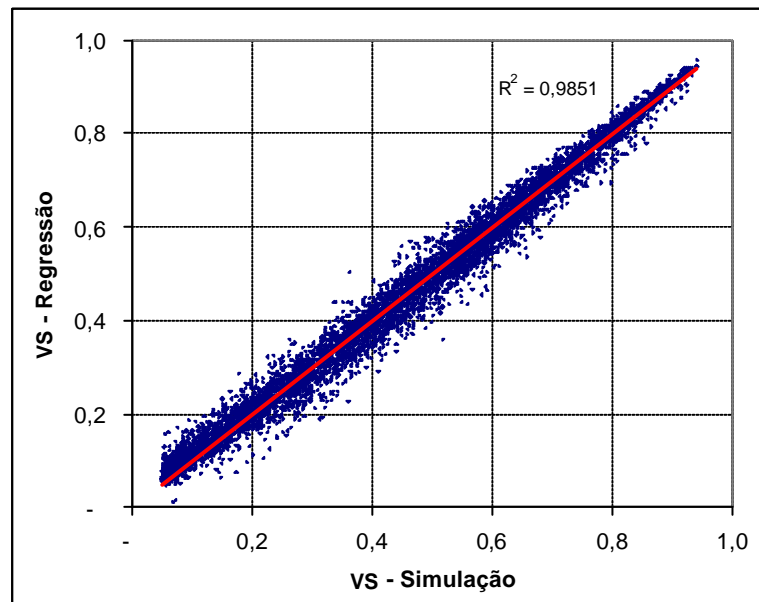


Figura 78 – Valores de VS determinados por regressão versus os valores de VS determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

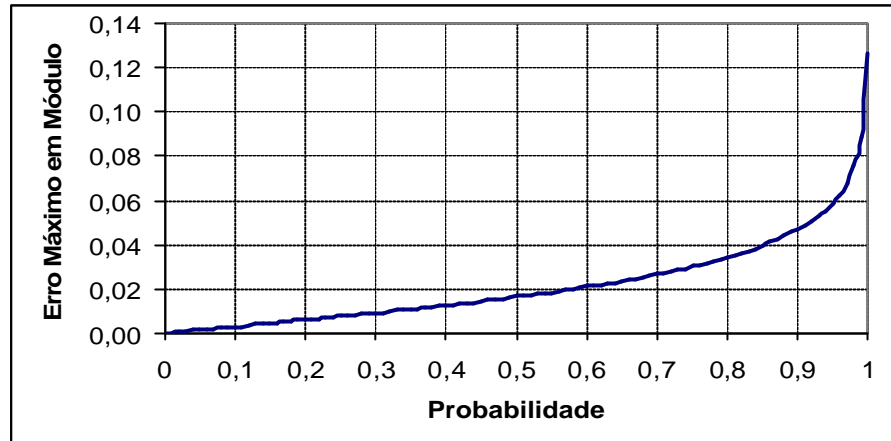


Figura 79 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de VS versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

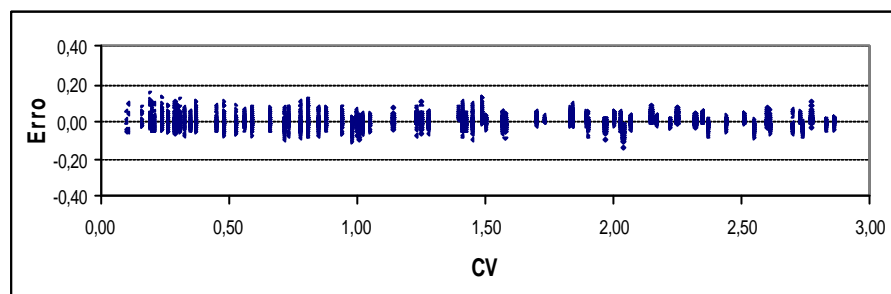


Figura 80 – Erros observados versus CV para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

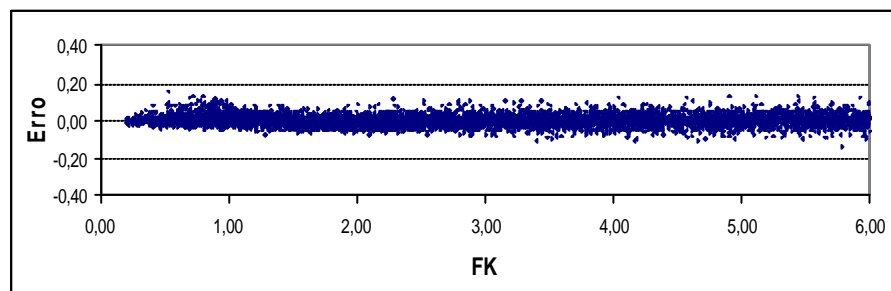


Figura 81 – Erros observados versus FK para a regressão de VS considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

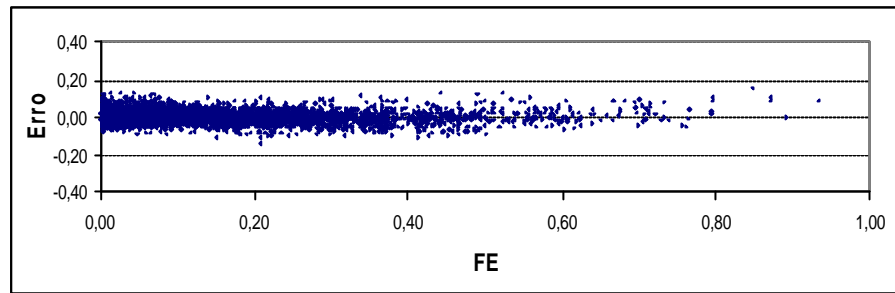


Figura 82 – Erros observados *versus* *FE* para a regressão de *VS* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

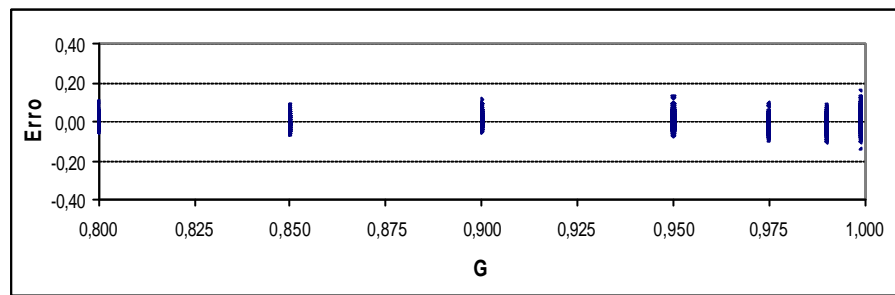


Figura 83 – Erros observados *versus* *G* para a regressão de *VS* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

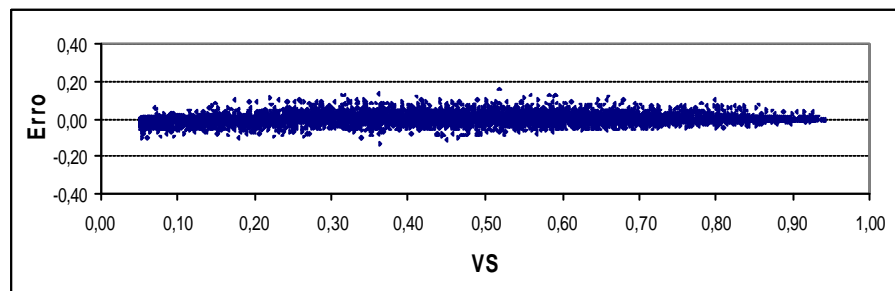


Figura 84 – Erros observados *versus* *VS* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

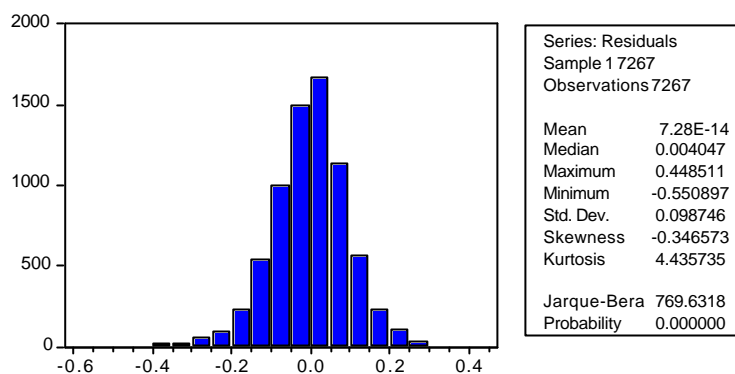


Figura 85 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VS , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa bem VS . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0214 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,0473.
- Devido à complexidade do modelo, não é possível analisar isoladamente os sinais dos coeficientes da regressão. No entanto, analisando os gráficos do Apêndice B, verifica-se que a influência das variáveis independentes em VS está de acordo com a teoria.
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera, o que traz alguma incerteza na aplicação de testes de hipóteses.
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependente e independentes são homocedásticas e não tendenciosas, à exceção, em certa medida, dos resultados apresentados nas Figuras 78 e 84, indicando a tendência de superestimar sistematicamente VS quando este assume valores pequenos, apesar deste efeito ser marginal.

4.3.3 Volume Regularizado Adimensional

Determinou-se a regressão:

$$VR = \frac{1}{e^X}, \text{ onde:}$$

$$X = e^{C(1)} \times CV^{(C(2)+C(6) \times \ln(CV))} \times FK^{(C(3)+C(7) \times \ln(FK))} \times \\ FE^{(C(4)+C(8) \times \ln(FE))} \times G^{(C(5)+C(9) \times \ln(G))} \times e^u$$

Que linearizada retorna:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{VR}\right)\right) = C(1) + C(2) \times \ln(CV) + C(3) \times \ln(FK) + C(4) \times \ln(FE) + C(5) \times \ln(G) + \\ C(6) \times \ln(CV)^2 + C(7) \times \ln(FK)^2 + C(8) \times \ln(FE)^2 + C(9) \times \ln(G)^2 + u$$

Na Tabela 15 são apresentados os resultados da regressão.

Na Figura 86 são apresentados os valores de VR determinados por regressão *versus* os valores de VR determinados por simulação.

Na Figura 87 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, *versus* a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela regressão.

Nas Figuras 88 a 92 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela regressão, *versus* as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 93 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, u , da regressão.

Tabela 15 – Resultado da regressão para VR considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Dependent Variable: $\ln(\ln(1/VR))$

Method: Least Squares

Sample: 1 7267

$$\ln(\ln(1/VR)) = C(1) + C(2) \cdot \ln(CV) + C(3) \cdot \ln(FK) + C(4) \cdot \ln(FE) + C(5) \cdot \ln(G) + C(6) \cdot \ln(CV)^2 + C(7) \cdot \ln(FK)^2 + C(8) \cdot \ln(FE)^2 + C(9) \cdot \ln(G)^2$$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	1,950550	0,012089	161,3505	0,0000
C(2)	1,040664	0,004027	258,3921	0,0000
C(3)	-0,511502	0,005365	-95,34834	0,0000
C(4)	0,846280	0,007369	114,8387	0,0000
C(5)	6,775760	0,118115	57,36594	0,0000
C(6)	0,082159	0,004604	17,84664	0,0000
C(7)	0,008824	0,003930	2,245395	0,0248
C(8)	0,088848	0,001137	78,13392	0,0000
C(9)	17,15878	0,526157	32,61151	0,0000
R-squared	0,926876	Mean dependent var	-0,046324	
Adjusted R-squared	0,926795	S,D, dependent var	0,750376	
S.E. of regression	0,203025	Akaike info criterion	-0,349741	
Sum squared resid	299,1675	Schwarz criterion	-0,341207	
Log likelihood	1279,784			

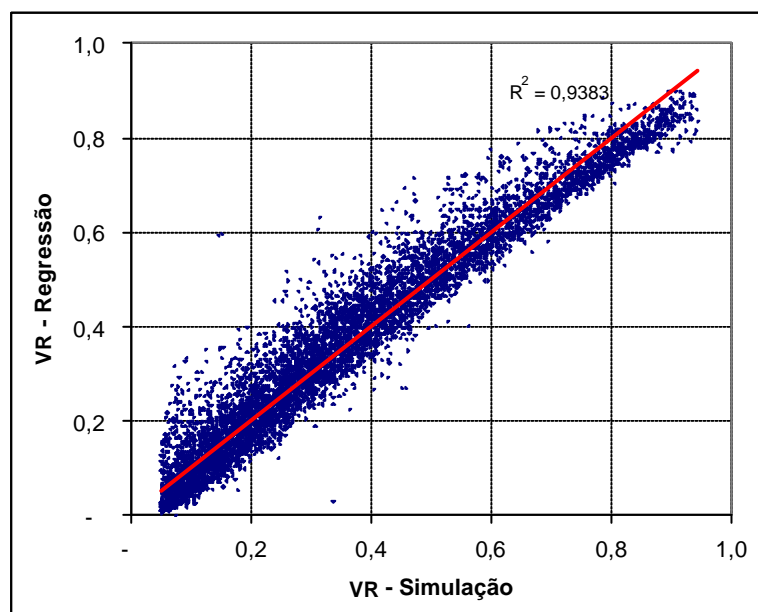


Figura 86 – Valores de VR determinados por regressão *versus* os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

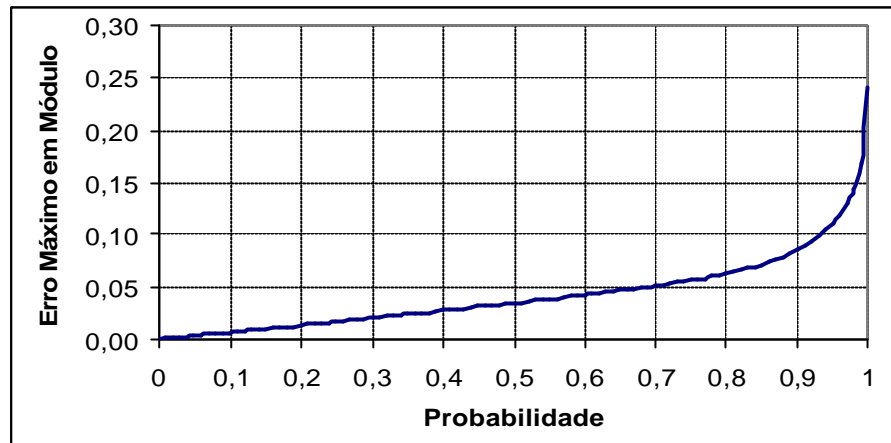


Figura 87 – Erros máximos, em módulo, para a regressão de *VR* versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

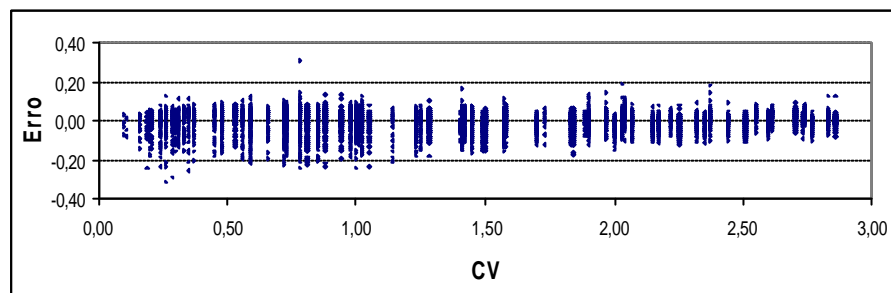


Figura 88 – Erros observados *versus* *CV* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

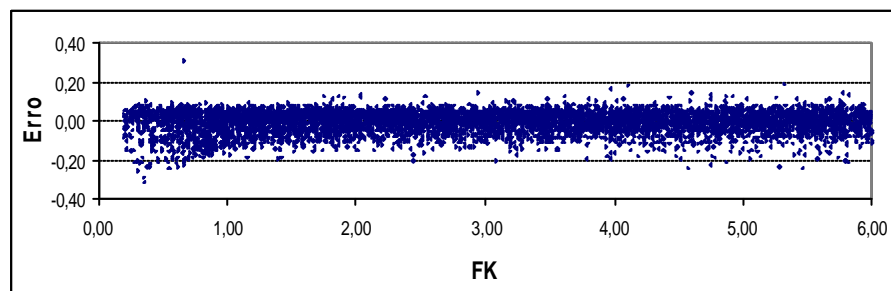


Figura 89 – Erros observados *versus* *FK* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

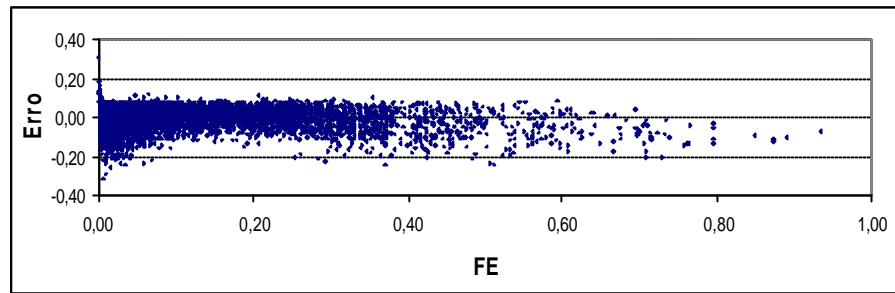


Figura 90 – Erros observados *versus* *FE* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

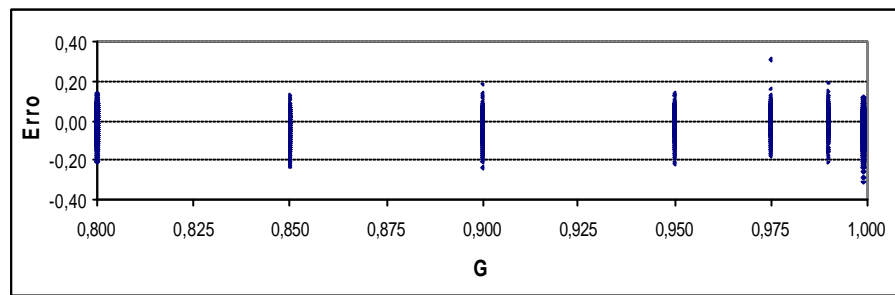


Figura 91 – Erros observados *versus* *G* para a regressão de *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

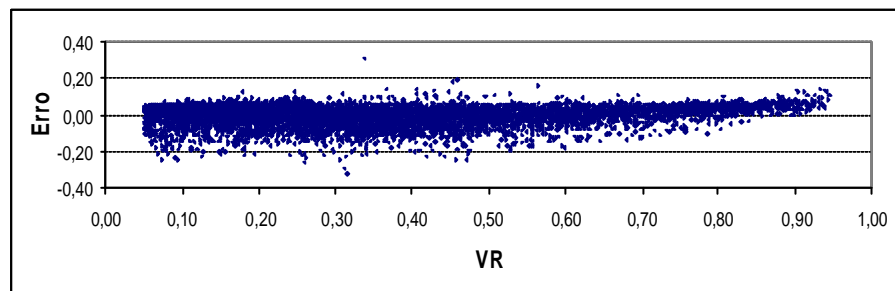


Figura 92 – Erros observados *versus* *VR* considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

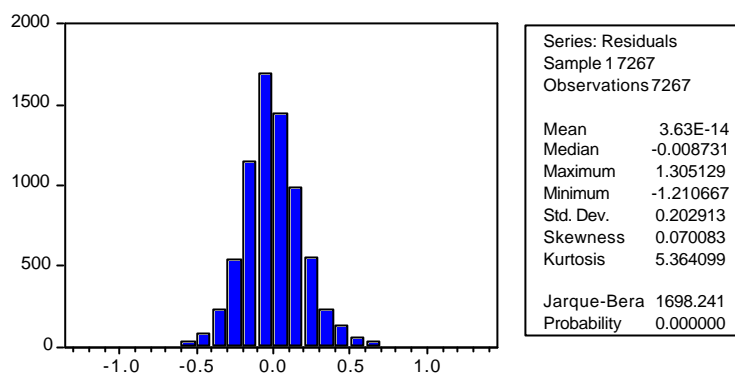


Figura 93 – Histograma e estatística dos resíduos da regressão de VR , considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa VR com um nível de imprecisão maior do que o observado nos modelos de VE e VS . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0421 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,0854.
- Devido à complexidade do modelo, não é possível analisar isoladamente os sinais dos coeficientes da regressão. No entanto, analisando os gráficos do Apêndice B, verifica-se que a influência das variáveis independentes em VR está de acordo com a teoria.
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera, o que traz alguma incerteza na aplicação de testes de hipóteses.
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependente e independentes podem ser consideradas, em certa medida, homocedástica e não tendenciosa. Nas Figuras 86 e 92 observa-se a tendência de subestimar sistematicamente VR quando este assume valores altos.

4.3.4 Considerações

As regressões obtidas para os reservatórios simulados com garantia anual apresentaram melhor desempenho quando comparadas às regressões obtidas para os reservatórios simulados com garantia mensal.

O modelo de regressão de VE apresentou os melhores indicadores, seguido do modelo de VS e por fim pelo modelo de VR .

Apesar dos reservatórios terem sido simulados com séries de volume afluente de mil anos de duração, que *a priori* se esperava ser suficiente, há a possibilidade de parte dos resíduos ser explicado pela extensão destas séries, visto que, eventos extremos, como os vertimentos, são fortemente dependentes dos valores destas séries.

Considerando que o modelo de VR não apresentou bons indicadores e que a determinação deste VR é objeto central deste trabalho, será apresentado na seção 4.4 metodologia alternativa para a sua determinação a partir de VE e VS .

4.4 Determinação Alternativa do Volume Adimensional Regularizado

Como observado nas seções 4.2 e 4.3, as regressões de determinação de VE e VS apresentam resultados bem superiores quando comparado às regressões de VR . De forma a obter valores mais precisos para VR , propõe-se utilizar o procedimento alternativo descrito nesta seção.

Como $VE+VS+VR=1$, ou seja, o somatório dos volumes adimensionais efluentes do reservatório é igual à unidade, determina-se o volume adimensional regularizado como:
 $VR=1-VE-VS$.

O procedimento de cálculo de VR consiste na determinação de VE e VS pelas regressões apresentadas nas seções 4.2 ou 4.3 para em seguida aplicar a equação $VR=1-VE-VS$. Por definição, os valores de VE , VS e VR não podem assumir valores negativos nem valores maiores que a unidade.

Observa-se que este procedimento foi desenvolvido considerando as seguintes limitações: $0,05 \leq VR \leq 0,95$, $0,05 \leq VS \leq 0,95$ e $0,00 \leq VE \leq 0,90$, visto que: $VR \geq 0,05$, $VS \geq 0,05$ e $VE+VS+VR=1$. No limite VE , VS e VR podem ser considerado desde que assumam valores entre zero e um.

Na Figura 94 é apresentado o fluxograma de cálculo de VE , VS e VR .

Nas seções 4.4.1 e 4.4.2 são apresentados os erros observados da aplicação da metodologia apresentada anteriormente para os reservatórios gerados e simulados com garantia mensal e anual, respectivamente. Observa-se que não foi eliminado nenhum reservatório, independentemente dos valores obtidos para VR .

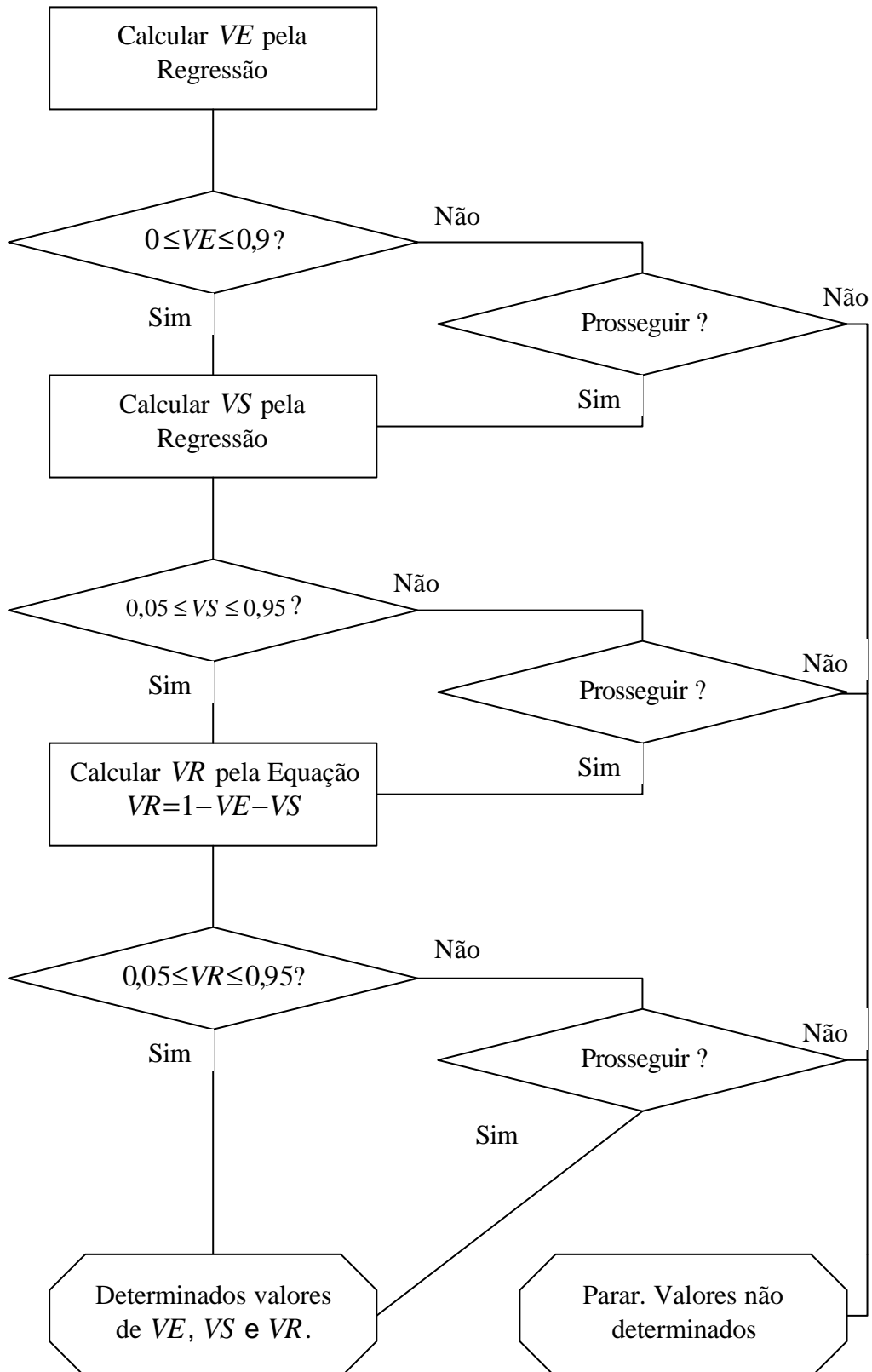


Figura 94 – Fluxograma de cálculo de VE , VS e VR .

4.4.1 Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Mensal

Na Figura 95 são apresentados os valores de $VR=1-VE-VS$ versus os valores de VR determinados por simulação.

Na Figura 96 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, versus a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela equação $VR=1-VE-VS$.

Nas Figura 97 a 101 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela equação $VR=1-VE-VS$, versus as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 102 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, u , da aplicação da equação $VR=1-VE-VS$.

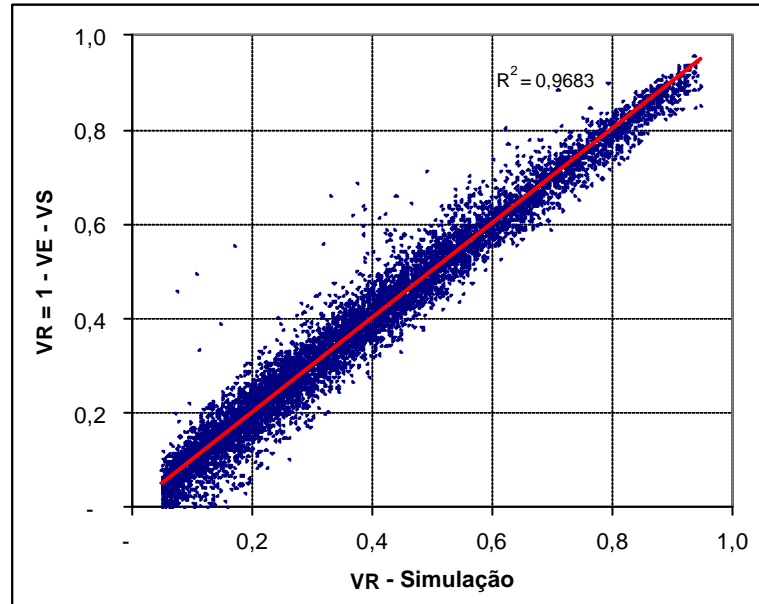


Figura 95 – Valores de VR determinados pela equação $VR=1-VE-VS$ versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

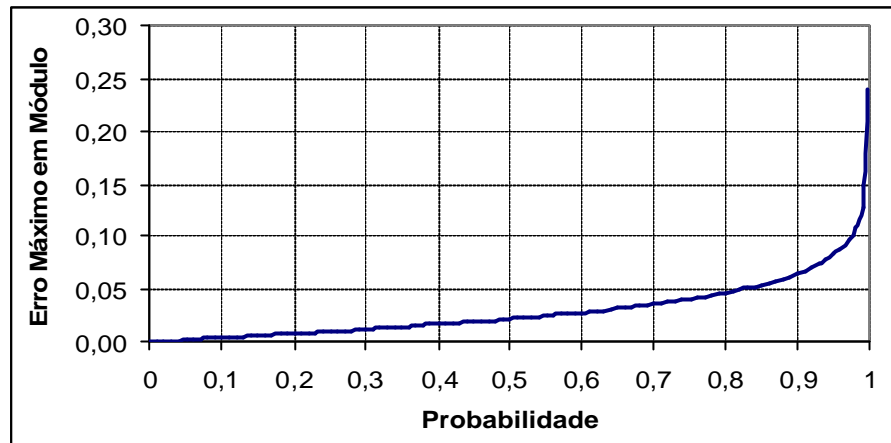


Figura 96 – Erros máximos, em módulo, da aplicação da equação $VR=1-VE-VS$ versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

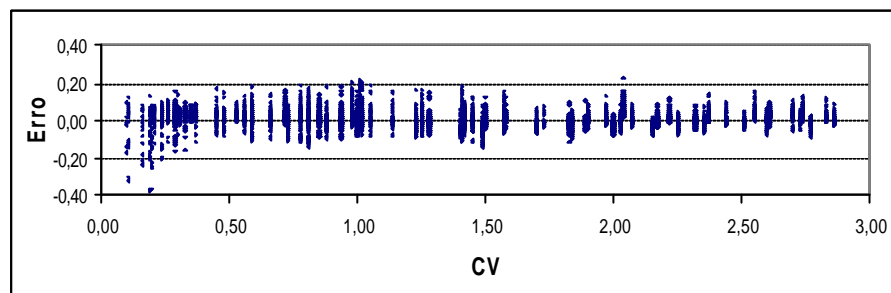


Figura 97 – Erros observados versus CV para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

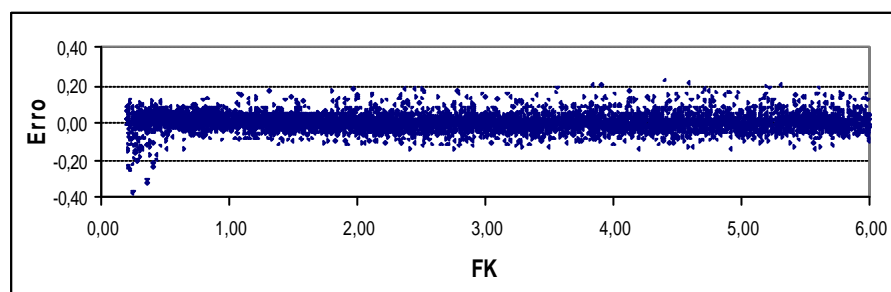


Figura 98 – Erros observados versus FK para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

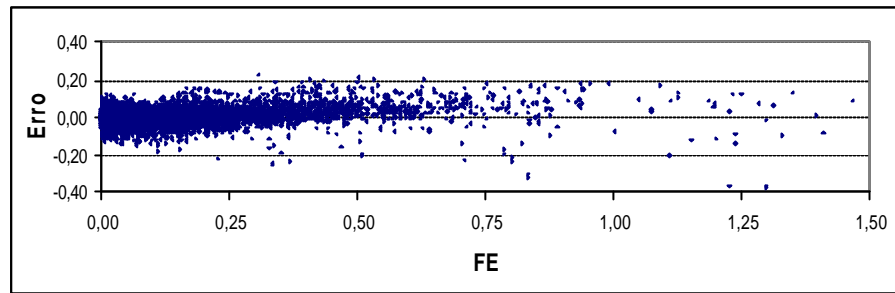


Figura 99 – Erros observados versus FE para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

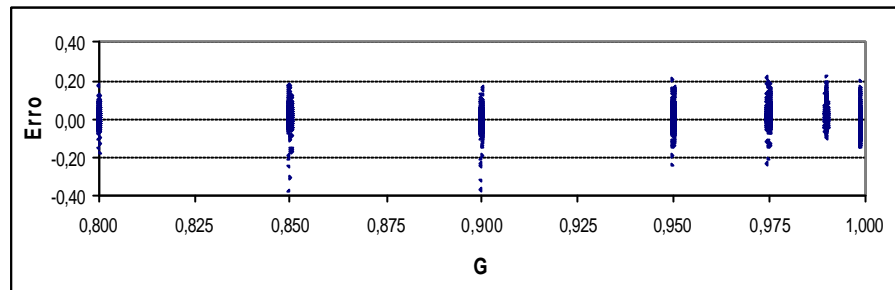


Figura 100 – Erros observados versus G para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

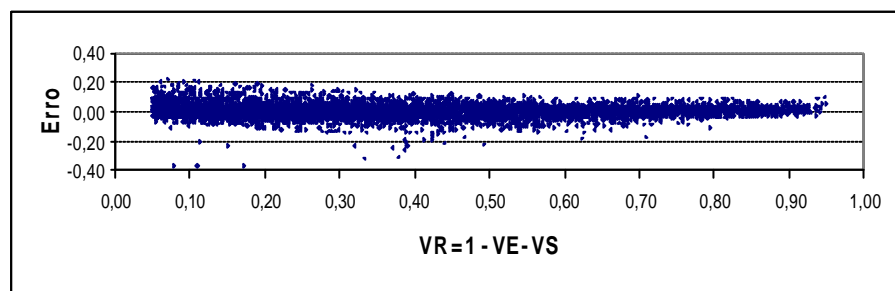


Figura 101 – Erros observados versus $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

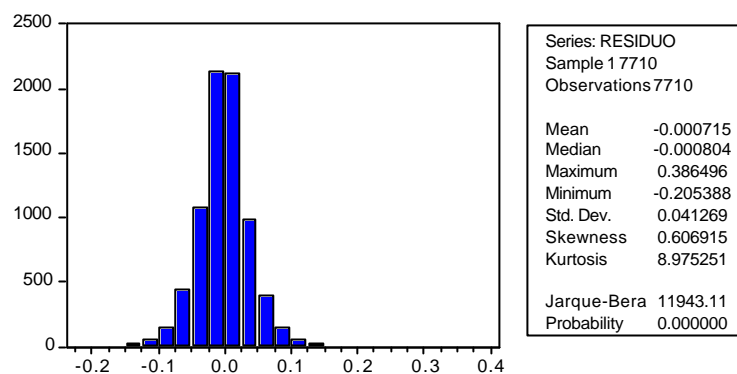


Figura 102 – Histograma e estatística dos resíduos de $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia mensal.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa bem VR . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0297 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,0650.
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera.
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependente e independentes são homocedásticas e não tendenciosas, à exceção, em certa medida, dos resultados apresentados nas Figuras 97 e 98, indicando que o modelo não representa tão bem reservatórios sujeitos a pequenos valores de CV e FK . Este fato explica o crescimento acentuado do final da curva da Figura 96 e a existência de alguns pontos excessivamente destoantes nas demais figuras, em especial na Figura 95. Este comportamento é decorrente dos valores de VS utilizados neste procedimento.

4.4.2 Reservatórios Gerados e Simulados com Garantia Anual

Na Figura 103 são apresentados os valores de $VR=1-VE-VS$ versus os valores de VR determinados por simulação.

Na Figura 104 são apresentados os erros máximos observados, em módulo, versus a probabilidade de ocorrência destes. Erro é definido como a diferença entre o valor simulado e o valor obtido pela equação $VR=1-VE-VS$.

Nas Figura 105 a 109 são apresentados os gráficos dos erros, diferença entre os valores simulados e os valores obtidos pela equação $VR=1-VE-VS$, versus as variáveis dependentes e independentes do modelo.

Na Figura 110 são apresentados o histograma e a estatística dos resíduos, u , da aplicação da equação $VR=1-VE-VS$.

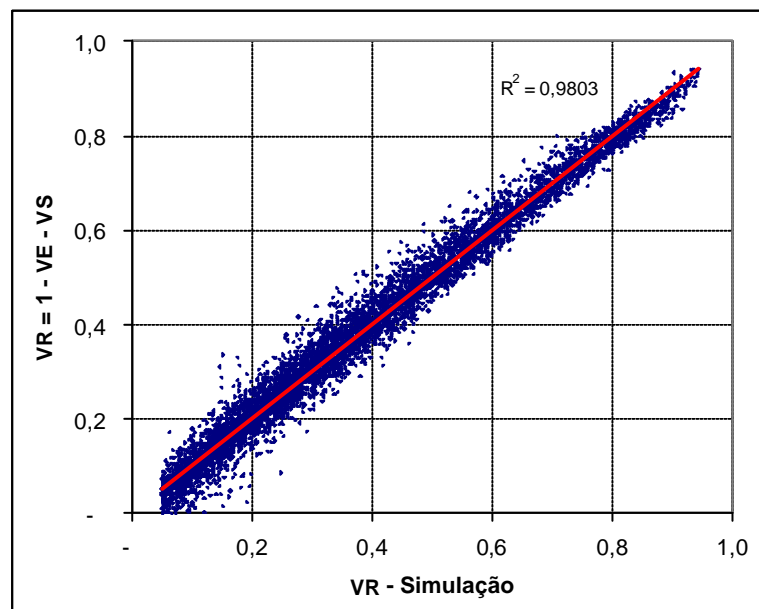


Figura 103 – Valores de VR determinados pela equação $VR=1-VE-VS$ versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

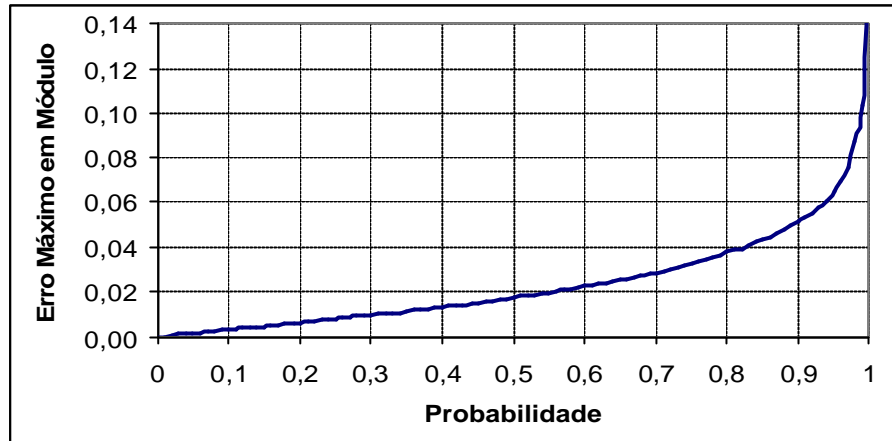


Figura 104– Erros máximos, em módulo, da aplicação da equação $VR=1-VE-VS$ versus as probabilidades de ocorrência, para os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

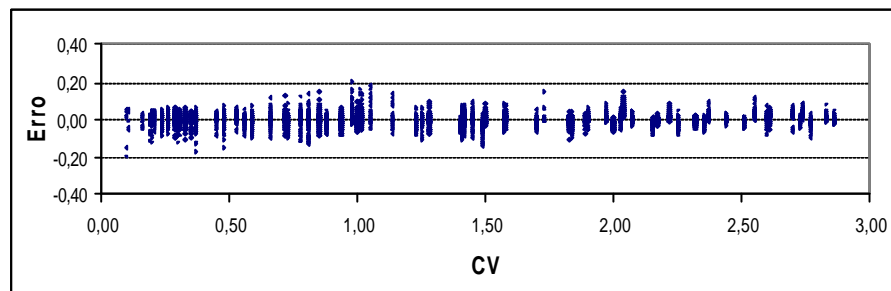


Figura 105 – Erros observados versus CV para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

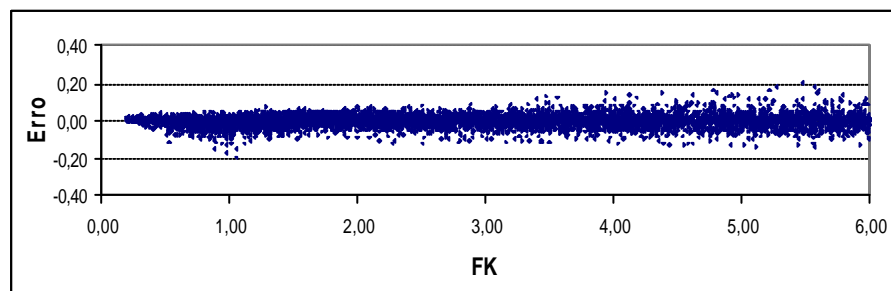


Figura 106 – Erros observados versus FK para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

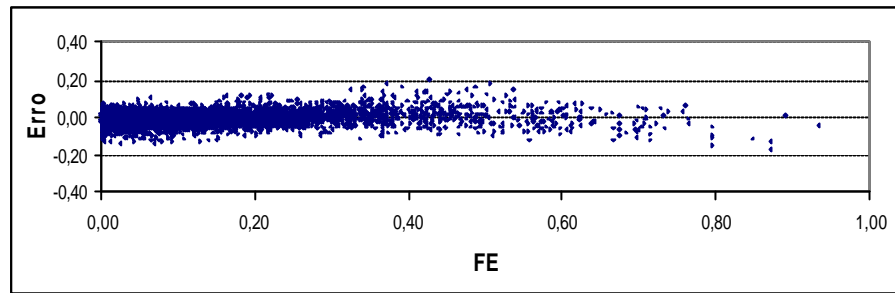


Figura 107 – Erros observados versus FE para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

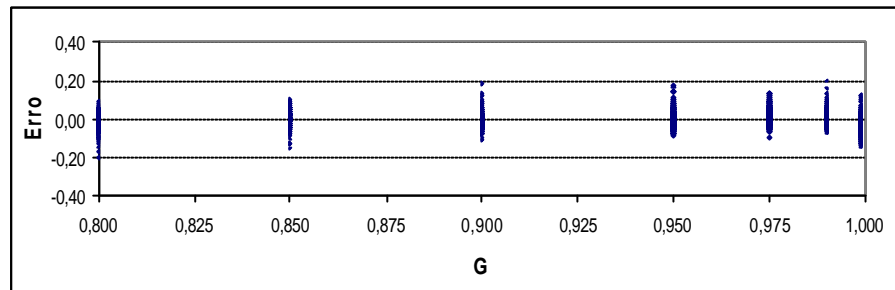


Figura 108 – Erros observados versus G para $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

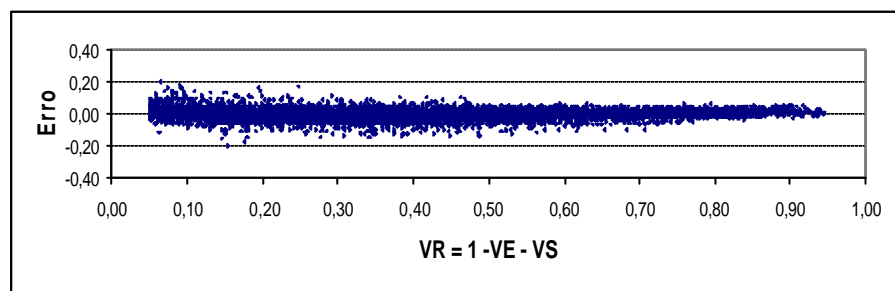


Figura 109 – Erros observados versus $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

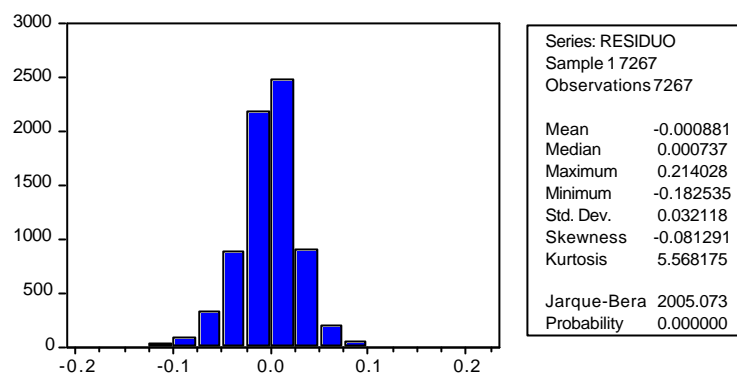


Figura 110 – Histograma e estatística dos resíduos de $VR=1-VE-VS$ considerando os dados dos reservatórios gerados e simulados com garantia anual.

Com relação aos resultados apresentados acima, observa-se:

- O modelo representa bem VR . O erro médio observado, em módulo, foi de 0,0235 e, em 90% dos casos, o erro máximo observado, em módulo, foi de 0,0510.
- Os resíduos não podem ser considerados normalmente distribuídos, pelo teste de Jarque-bera.
- As distribuições dos resíduos em função das variáveis dependente e independentes são homocedásticas e não tendenciosas.

4.5 Validação das Regressões

Nesta seção, as regressões desenvolvidas nas seções 4.2 e 4.3 assim como o procedimento alternativo de cálculo de VR desenvolvido na seção 4.4 serão aplicados a reservatórios reais para validação dos modelos.

De um total de 130 reservatórios descritos no *“Estudos hidrológicos e estruturação de um sistema preliminar de monitoramento e gestão dos reservatórios relacionados com o abastecimento humano no estado da Paraíba”* (SEMARH 2002), foram selecionados e simulados, após análise crítica dos dados, um total de 75 reservatórios para validação dos modelos desenvolvidos neste trabalho.

Na subseção 4.5.1 são apresentadas as estatísticas e as correlações dos dados primários dos 75 reservatórios selecionados.

Nas subseções 4.5.2 e 4.5.3 são apresentadas as análises de validação dos modelos desenvolvidos neste trabalho, considerando garantia mensal e anual, respectivamente.

Na subseção 4.5.4 são apresentadas as considerações sobre a validação do modelo.

4.5.1 Dados Primários e Correlações dos Reservatórios da Paraíba

Nesta seção são apresentadas as seguintes estatísticas: i) histograma e estatística descritiva das variáveis dependentes e independentes; ii) correlações lineares entre as variáveis dependentes e independentes; e iii) gráficos de dispersão.

Os 75 reservatórios da Paraíba selecionados foram simulados com garantias mensais de 80%, 90%, 95%, 99% e 99,9%, considerando uma série de afluência com mil anos de duração, gerada estocasticamente com distribuição do tipo Gama de dois parâmetros, sendo eliminados os reservatórios incapazes de regularizar e/ou verter volumes adimensionais mínimos de 0,05.

Na Tabela 16 é apresentada a distribuição dos reservatórios selecionados por bacia hidrográfica, enquanto que na Tabela 17 os mesmos são identificados.

Na Tabela 18 são apresentados os dados básicos de cada um dos 75 reservatórios selecionados. Na Tabela 19 são apresentados os resultados da aplicação das regressões considerando garantia mensal de 90%.

Nas Figuras 111 a 120 são apresentados os histogramas e as estatísticas descritivas das 441 simulações dos reservatórios selecionados da Paraíba, considerando as diversas garantias mensais.

Tabela 16 – Bacias hidrográficas e reservatórios da Paraíba.

Bacias Hidrográficas	Número de reservatórios	
	Originais SEMARH(2002)	Selecionados
Curimataú	8	7
Espinhares	6	1
Mamanguape	12	6
Paraíba	43	26
Piancó	29	25
Piranhas	21	9
Seridó	11	1
TOTAL	130	75

Tabela 17 – Lista dos 75 reservatórios da Paraíba selecionados.

Acauã	Chupadouro	Jenipapeiro	Saco
Algodão	Cochos	Jeremias	Salitre
Arrojado	Cordeiro	Lagoa Arroz	Santa Inês
Bichinhos	Coremas	Lagoa do Meio	Santo Antônio
Bom Jesus	Curimatã	lagoa Matias	São Domingos
Boqueirão Cais	Curimataú	Livramento	São Gonçalo
Brejinho	Emas	Milhã	São Paulo
Bruscas	Eng. Arco Verde	Namorados	São Sebastião
Cach. Vaca	Eng. Avidos	Olivedos	Serra Vermelha
Cacho Alves	Eng. Velho	Ouro Velho	Soledade
Cacho Cegos	Epitácio Pessoa	Pilões	Sumé
Cacimba da Varzea	Frutuoso 2	Pimenta	Suspiro
Cafundó	Gamela	Piranhas	Tamandua 2
Caldeirão	Garra	Pocinhos	Taperoá 2
Camalaú	Gavião	Poço Redondo	Tavares
Capoeira	Glória	Poções	Vaca Brava
Carneiro	Gurjão	Poleiro	Vazantes
Catingueira	Jandaia	Queimadas	Vídeo
Catolé	Jatoba 2	R. Santo Antônio	

Tabela 18 – Dados básicos dos 75 reservatórios da Paraíba selecionados.

RESERVATÓRIO	a	β	I (hm ³ /ano)	ev (m)	CV	FK	FE
Acauã	9.415	2,76	87,72	0,79	0,97	2,85	0,08
Algodão	1.502	3,14	1,71	1,04	1,28	0,60	0,35
Arrojado	8.474	2,42	4,88	1,41	0,85	0,74	0,25
Bichinhos	4.802	2,86	1,37	0,99	1,21	3,33	0,39
Bom Jesus	8.648	2,37	12,49	2,23	0,86	1,17	0,25
Boqueirão Cais	164	3,48	12,47	0,58	1,09	0,99	0,08
Brejinho	1.664	2,18	2,08	0,43	0,57	0,38	0,04
Bruscas	27.142	2,17	19,08	2,04	1,20	2,00	0,21
Cach. Vaca	416	3,22	0,38	1,35	0,92	0,89	0,52
Cacho Alves	1.949	3,10	12,32	2,08	1,03	0,86	0,38
Cacho Cegos	1.028	3,58	42,74	1,98	0,96	1,87	0,36
Cacimba da Varzea	4.389	2,49	16,36	0,69	1,10	0,57	0,06
Cafundó	2.807	2,05	0,17	1,49	1,02	1,88	0,42
Caldeirão	1.768	2,53	0,37	2,11	0,90	1,39	0,65
Camalaú	467	3,72	17,42	1,70	1,55	2,66	0,37
Capoeira	12.538	2,48	9,26	2,55	1,36	5,78	0,44
Carneiro	977	3,74	30,21	2,12	0,92	1,04	0,50
Catingueira	433	3,09	1,40	2,27	0,95	0,64	0,51
Catolé	1.070	2,95	9,70	2,27	1,17	1,08	0,31
Chupadouro	140	3,04	0,98	0,43	0,70	0,64	0,07
Cochos	3.954	2,76	4,88	2,06	1,04	0,86	0,43
Cordeiro	2.554	3,36	53,19	1,80	1,35	1,32	0,31
Coremas	5.996	3,32	692,36	2,07	1,02	1,96	0,20
Curimatã	594	3,94	3,20	1,04	1,49	1,34	0,46
Curimataú	817	3,46	1,82	0,69	1,68	3,30	0,26
Emas	1.451	3,58	6,43	1,98	1,01	0,31	0,68
Eng. Arco Verde	8.331	2,85	11,56	2,15	0,91	2,65	0,48
Eng. Avidos	20.741	2,82	117,93	1,29	0,95	2,16	0,17
Eng. Velho	394	2,87	0,12	0,43	1,14	4,05	0,17
Epitácio Pessoa	7.065	3,11	140,95	0,93	1,46	3,80	0,12
Frutuoso 2	729	2,99	2,80	2,06	1,16	1,26	0,39
Gamela	656	2,65	1,08	1,45	0,98	0,46	0,23
Garra	5.862	2,64	15,36	2,73	1,11	1,91	0,37
Gavião	731	2,49	1,53	0,45	0,82	0,95	0,05
Glória	339	2,99	4,88	2,11	0,86	0,29	0,26
Gurjão	8.324	3,03	1,22	0,99	1,37	1,58	0,58
Jandaia	758	2,65	11,61	0,25	0,76	0,86	0,02
Jatoba 2	418	3,34	6,33	2,13	1,08	0,73	0,40
Jenipapeiro	1.987	3,05	42,77	2,27	0,89	1,64	0,26
Jeremias	400	3,50	3,10	1,03	1,50	1,50	0,28

Continua na página seguinte

Tabela 18 (continuação) – Dados básicos dos 75 reservatórios da Paraíba selecionados.

RESERVATÓRIO	a	β	I (hm ³ /ano)	ev (m)	CV	FK	FE
Lagoa Arroz	285	3,90	36,85	1,30	0,95	2,18	0,25
Lagoa do Meio	14.230	2,80	3,00	0,97	1,70	2,23	0,40
lagoa Matias	12.926	2,08	2,31	0,25	0,71	0,54	0,04
Livramento	854	3,32	1,40	0,89	1,16	1,71	0,32
Milhã	816	2,80	0,40	0,43	1,13	1,44	0,13
Namorados	1.072	2,95	0,36	1,05	1,41	5,84	0,43
Olivedos	9.962	2,95	3,92	0,97	1,35	1,51	0,38
Ouro Velho	3.209	3,01	1,51	1,59	1,10	1,13	0,62
Pilões	650	4,76	45,62	1,40	0,99	0,28	0,64
Pimenta	459	3,04	1,88	2,22	1,00	0,14	0,44
Piranhas	421	3,15	24,32	2,04	1,01	1,06	0,20
Pocinhos	5.269	2,79	4,63	1,85	1,11	1,47	0,45
Poço Redondo	7.136	2,60	25,17	2,04	1,13	2,50	0,23
Poções	3.439	3,48	30,35	1,85	1,16	0,99	0,47
Poleiro	473	3,15	5,44	1,03	1,58	1,47	0,17
Queimadas	2.117	2,98	11,55	2,22	1,14	1,35	0,37
R. Santo Antônio	2.538	2,99	2,79	1,03	1,46	2,44	0,30
Saco	576	3,13	37,17	2,04	0,98	2,62	0,18
Salitre	5.073	2,85	1,29	0,89	1,17	2,78	0,36
Santa Inês	3.863	2,68	9,16	2,14	1,02	2,85	0,31
Santo Antônio	5.819	3,16	10,53	0,84	1,25	2,32	0,25
São Domingos	2.512	2,55	1,77	1,95	1,90	4,12	0,38
São Gonçalo	2.319	3,19	41,62	1,30	0,86	1,07	0,19
São Paulo	15.100	2,98	15,14	1,59	1,17	0,56	0,47
São Sebastião	1.788	2,27	0,60	0,18	0,81	0,75	0,03
Serra Vermelha	1.697	2,86	3,07	2,14	1,32	3,84	0,44
Soledade	6.459	3,10	9,60	1,05	1,33	2,82	0,31
Sumé	10.784	3,02	62,61	1,78	1,09	0,59	0,30
Suspiro	164	2,75	0,17	0,02	1,04	1,62	0,00
Tamandua 2	2.588	2,84	1,06	1,03	1,43	1,25	0,35
Taperoá 2	4.257	3,58	19,15	0,97	1,43	0,79	0,33
Tavares	398	2,82	4,36	1,37	1,10	1,49	0,14
Vaca Brava	2.170	2,41	6,19	0,07	0,65	0,48	0,01
Vazantes	381	3,21	13,75	2,01	1,04	0,66	0,25
Video	330	3,40	2,87	2,07	0,97	2,11	0,49

Tabela 19 – Resultados da aplicação das regressões nos 75 reservatórios da Paraíba, considerando garantia mensal de 90%.

RESERVATÓRIO	VE	VS	VR	VR=1-VE-VS
Acauã	0,10	0,16	0,70	0,74
Algodão	0,17	0,62	0,13	0,21
Arrojado	0,13	0,42	0,39	0,45
Bichinhos	0,52	0,16	0,38	0,32
Bom Jesus	0,17	0,30	0,47	0,53
Boqueirão Cais	0,05	0,47	0,53	0,47
Brejinho	0,01	0,50	0,67	0,48
Bruscas	0,21	0,30	0,44	0,48
Cach. Vaca	0,31	0,37	0,23	0,32
Cacho Alves	0,23	0,44	0,25	0,33
Cacho Cegos	0,34	0,21	0,42	0,45
Cacimba da Varzea	0,03	0,62	0,45	0,35
Cafundó	0,39	0,23	0,36	0,38
Caldeirão	0,50	0,23	0,26	0,26
Camalaú	0,44	0,33	0,25	0,23
Capoeira	0,81	0,10	0,37	0,09
Carneiro	0,33	0,33	0,26	0,34
Catingueira	0,25	0,47	0,17	0,27
Catolé	0,21	0,44	0,28	0,35
Chupadouro	0,04	0,42	0,63	0,55
Cochos	0,25	0,44	0,22	0,30
Cordeiro	0,24	0,45	0,24	0,30
Coremas	0,20	0,24	0,51	0,56
Curimatã	0,36	0,48	0,13	0,16
Curimatau	0,35	0,32	0,32	0,33
Emas	0,22	0,67	0,03	0,12
Eng. Arco Verde	0,55	0,11	0,43	0,34
Eng. Avidos	0,18	0,19	0,59	0,63
Eng. Velho	0,25	0,13	0,59	0,62
Epitácio Pessoa	0,18	0,25	0,54	0,58
Frutuoso 2	0,29	0,39	0,26	0,32
Gamela	0,10	0,60	0,25	0,31
Garra	0,35	0,26	0,36	0,39
Gavião	0,03	0,38	0,67	0,59
Glória	0,08	0,66	0,20	0,26
Gurjão	0,49	0,39	0,14	0,12
Jandaia	0,01	0,39	0,73	0,59
Jatoba 2	0,21	0,50	0,19	0,28
Jenipapeiro	0,23	0,22	0,50	0,55
Jeremias	0,24	0,47	0,24	0,29

GARANTIA MENSAL: 90%
 Continua na página seguinte

Tabela 19 (continuação) – Resultados da aplicação das regressões nos 75 reservatórios da Paraíba, considerando garantia mensal de 90%.

RESERVATÓRIO	VE	VS	VR	VR=1-VE-VS
Lagoa Arroz	0,26	0,18	0,52	0,56
Lagoa do Meio	0,43	0,42	0,17	0,16
lagoa Matias	0,02	0,49	0,64	0,49
Livramento	0,28	0,31	0,35	0,40
Milhã	0,11	0,38	0,50	0,51
Namorados	0,80	0,11	0,36	0,09
Olivedos	0,31	0,41	0,23	0,27
Ouro Velho	0,43	0,38	0,16	0,20
Pilões	0,19	0,68	0,03	0,13
Pimenta	0,09	0,82	0,01	0,10
Piranhas	0,13	0,40	0,43	0,47
Pocinhos	0,37	0,32	0,26	0,31
Poço Redondo	0,26	0,22	0,48	0,52
Poções	0,30	0,45	0,18	0,25
Poleiro	0,14	0,52	0,31	0,34
Queimadas	0,29	0,36	0,29	0,35
R. Santo Antônio	0,33	0,33	0,31	0,34
Saco	0,21	0,16	0,59	0,63
Salitre	0,43	0,19	0,39	0,37
Santa Inês	0,38	0,14	0,48	0,48
Santo Antônio	0,27	0,28	0,41	0,46
São Domingos	0,58	0,32	0,21	0,10
São Gonçalo	0,13	0,33	0,50	0,54
São Paulo	0,22	0,60	0,10	0,19
São Sebastião	0,02	0,45	0,67	0,53
Serra Vermelha	0,64	0,16	0,33	0,20
Soledade	0,37	0,25	0,37	0,38
Sumé	0,15	0,57	0,20	0,28
Suspiro	0,00	0,36	0,72	0,63
Tamandua 2	0,27	0,49	0,19	0,24
Taperoá 2	0,19	0,61	0,13	0,20
Tavares	0,12	0,35	0,50	0,53
Vaca Brava	0,00	0,50	0,71	0,50
Vazantes	0,13	0,53	0,29	0,34
Video	0,49	0,17	0,36	0,34

GARANTIA MENSAL: 90%

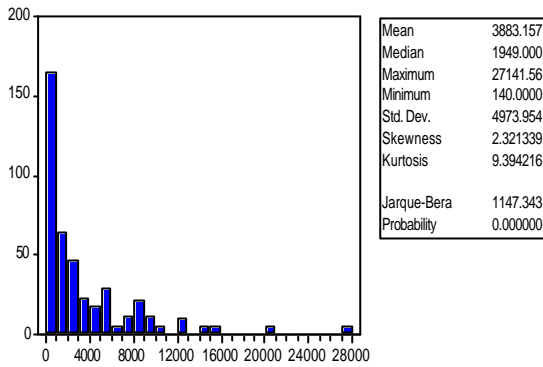


Figura 111 – Histograma do coeficiente *a* da equação cota-área-volume dos reservatórios da Paraíba.

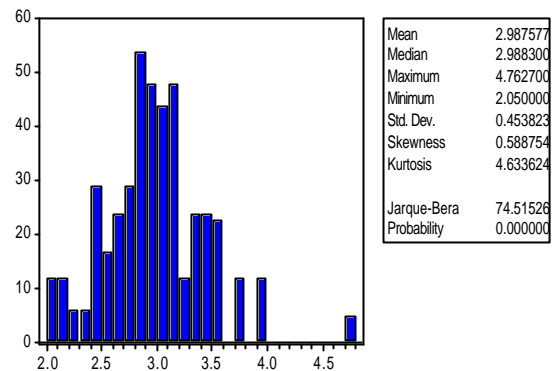


Figura 112 – Histograma do coeficiente *b* da equação cota-área-volume dos reservatórios da Paraíba.

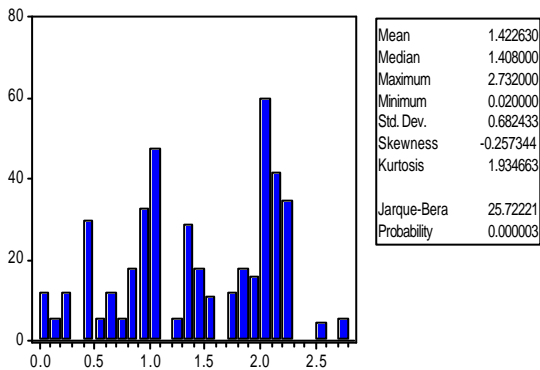


Figura 113 – Histograma da evaporação líquida, *ev*, do espelho d'água dos reservatórios da Paraíba, em metros.

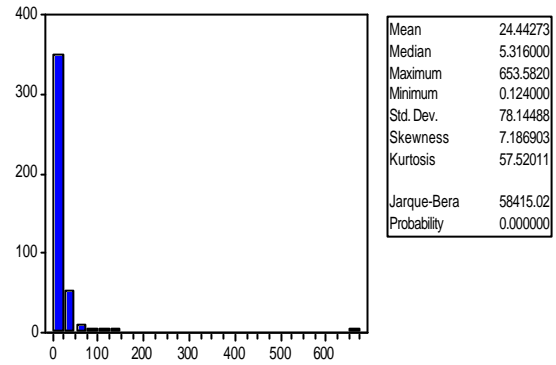


Figura 114 – Histograma do volume médio afluente anual aos reservatórios da Paraíba, *I*, em hm³.

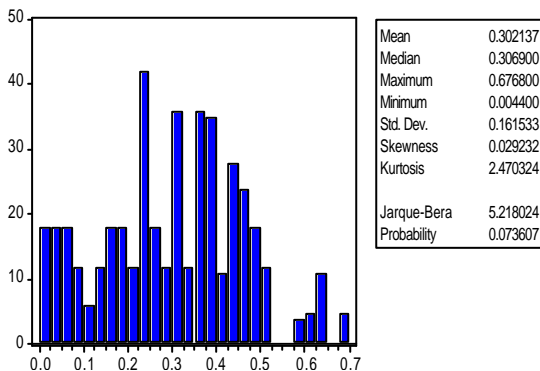


Figura 115 – Histograma do fator adimensional de evaporação, *FE*, dos reservatórios da Paraíba.

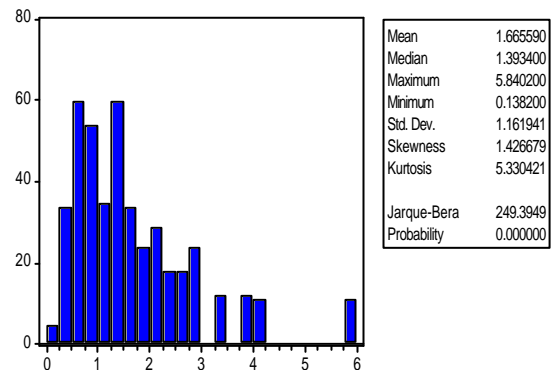


Figura 116 – Histograma do volume adimensional dos reservatórios da Paraíba, *FK*.

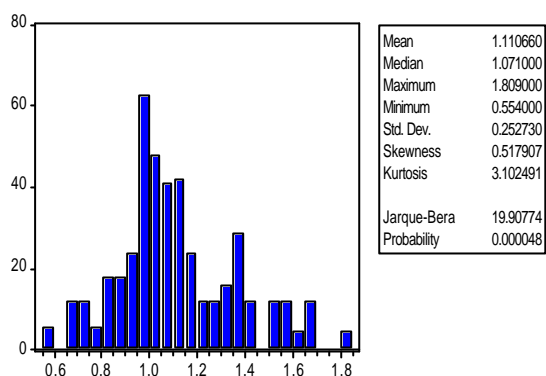


Figura 117 – Histograma do coeficiente de variação das aflúncias anuais aos reservatórios da Paraíba, CV .

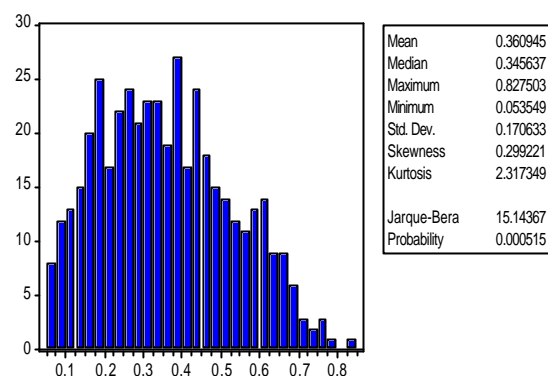


Figura 118 – Histograma do volume adimensional regularizado, VR , dos reservatórios da Paraíba.

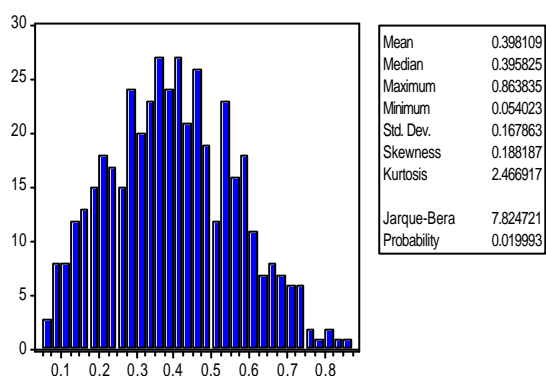


Figura 119 – Histograma do volume adimensional vertido, VS , dos reservatórios da Paraíba.

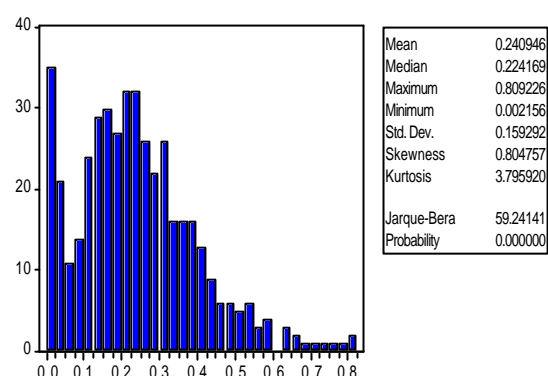


Figura 120 – Histograma do volume adimensional evaporado, VE , dos reservatórios da Paraíba.

Das estatísticas apresentadas acima, observa-se que:

- O coeficiente b , possui valor central igual a três, com grande parte dos valores variando entre dois e quatro, como esperado *a priori*.
- Grande parte dos valores de I é inferior a 100hm^3 .
- FE está limitado ao valor máximo de 0,7
- Grande parte dos valores de FK é inferior a 4.
- Os valores de CV estão variando entre 0,55 e 1,81.

Nas Tabelas 20 e 21 são apresentadas, para os dados dos reservatórios da Paraíba, as correlações lineares das variáveis dependentes e independentes.

Tabela 20 – Correlação das variáveis dependentes e independentes para os dados dos reservatórios da Paraíba

	<i>CV</i>	<i>FK</i>	<i>FE</i>	<i>G</i>	<i>VR</i>	<i>VS</i>	<i>VE</i>
<i>CV</i>	1						
<i>FK</i>	0,48445	1					
<i>FE</i>	0,29044	0,07126	1				
<i>G</i>	-0,01414	-0,00421	-0,03249	1			
<i>VR</i>	-0,44772	0,06480	-0,63932	-0,51287	1		
<i>VS</i>	-0,02505	-0,73436	0,04366	0,34127	-0,55720	1	
<i>VE</i>	0,50599	0,70446	0,63883	0,18976	-0,48401	-0,45694	1

Tabela 21 – Correlação entre o fator adimensional de evaporação e suas variáveis explicativas para os dados dos reservatórios da Paraíba

	<i>I</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>ev</i>	<i>FE</i>
<i>I</i>	1				
<i>a</i>	0,15669	1			
<i>b</i>	0,14330	-0,38149	1		
<i>ev</i>	0,12965	0,07150	0,13700	1	
<i>FE</i>	-0,12561	-0,03182	0,38552	0,58858	1

Observa-se que:

- Há uma correlação linear positiva entre *CV* e *FK*. A técnica de dimensionamento de reservatório indica a necessidade desta correlação positiva, como observado. No entanto, quando do projeto e construção da maioria destes reservatórios, esta relação não era bem compreendida.
- Não foi observada nenhuma correlação considerável entre *CV* e *FE*. A técnica indica que reservatórios localizados em áreas sujeitas a grandes valores *CV*, objetivando um bom desempenho hídrico, devem possuir reduzidos valores de *FE*, ou seja, através da construção de

reservatórios sujeitos a grandes valores de I reduz-se a perda por evaporação.

- Existe uma forte correlação negativa entre VR e as variáveis independentes G , FE e CV .
- Existe uma forte correlação negativa entre o VS e o FK .
- Existe uma forte correlação positiva entre VE e as variáveis independentes FK , FE e CV .
- Com relação às variáveis dependentes, destacam-se as fortes correlações negativas entre: i) VR e VS ; e ii) entre VS e VE .
- Com relação a FE , este possui uma forte correlação com ev . Observa-se que o coeficiente a apresenta correlação negativa com FE , quando se esperaria o oposto.
- Há uma correlação positiva, apesar de não muito forte, entre I e o coeficiente a da equação cota-área-volume do reservatório, como esperado.

Nas Figuras 121 a 132 são apresentados gráficos de dispersão das variáveis dependentes e independentes, onde se observa que:

- Na Figura 121 observa-se relação positiva entre FK e CV , como esperado.
- Na Figura 122 observa-se uma fraca relação positiva entre FE e CV . A técnica de dimensionamento de reservatórios indica a necessidade de uma correlação negativa entre estas variáveis. Os dados indicam a existência de um grande número de reservatórios de pequeno porte em regiões sujeitas à alta variabilidade das afluências.
- Na Figura 123 observa-se uma relação positiva entre a e I , apesar de fraca, como esperado.
- Nas Figuras 124 a 126 observam-se a influência dos valores de CV nos valores das variáveis dependentes, VR , VS e VE , respectivamente. Observa-se também que, com o aumento de CV há: i) decréscimo significativo de VR ; ii) invariabilidade de VS ; e iii) acréscimo de VE .

- Nas Figuras 127 a 129 observa-se a influência dos valores de FK nos valores das variáveis dependentes, VR , VS e VE , respectivamente,. Observa-se também que, com o aumento de FK há: i) relativa invariabilidade de VR ; ii) decréscimo acentuado de VS ; e iii) acréscimo acentuado de VE .
- Nas Figuras 130 a 132 observa-se a influência dos valores de FE nos valores das variáveis dependentes, VR , VS e VE , respectivamente, indicando os limites de validade dos modelos desenvolvidos. Observa-se também que, com o aumento de FE há: i) decréscimo acentuado de VR ; ii) relativa invariabilidade de VS ; e iii) acréscimo acentuado de VE .

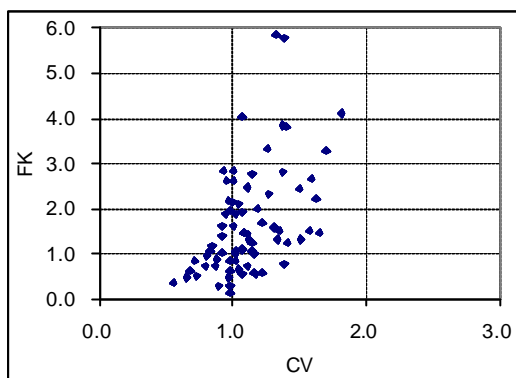


Figura 121 – Dispersão dos valores de FK versus CV , dos reservatórios da Paraíba.

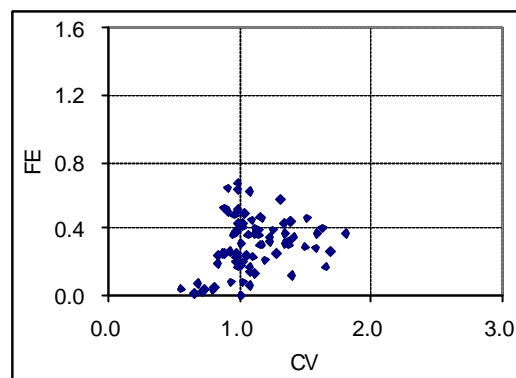


Figura 122 – Dispersão dos valores de FE versus CV , dos reservatórios da Paraíba.

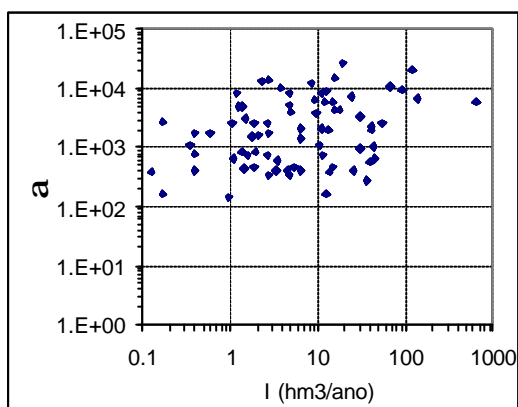


Figura 123 – Dispersão dos valores de a versus I , dos reservatórios da Paraíba.

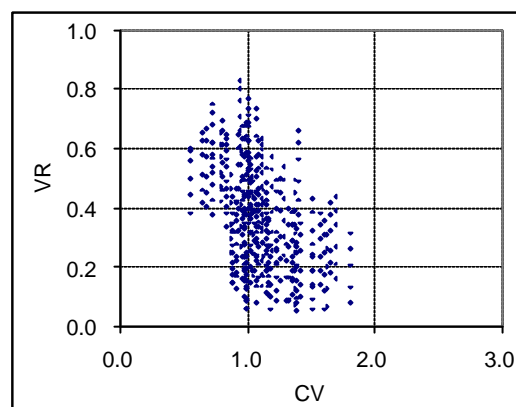


Figura 124 – Dispersão dos valores de VR versus CV , dos reservatórios da Paraíba.

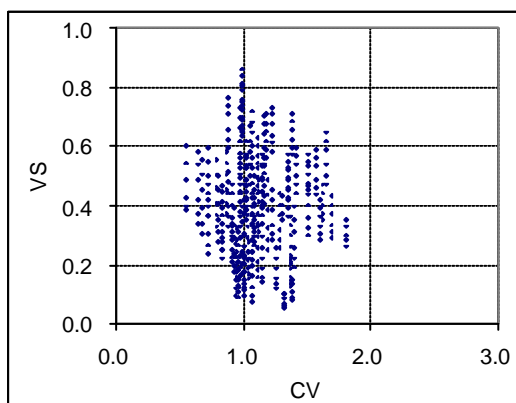


Figura 125 – Dispersão dos valores de VS versus CV , dos reservatórios da Paraíba.

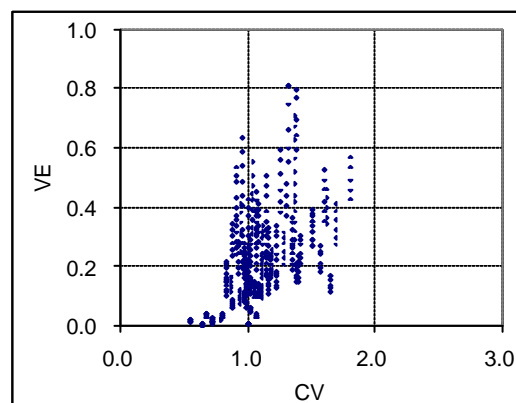


Figura 126 – Dispersão dos valores de VE versus CV , dos reservatórios da Paraíba.

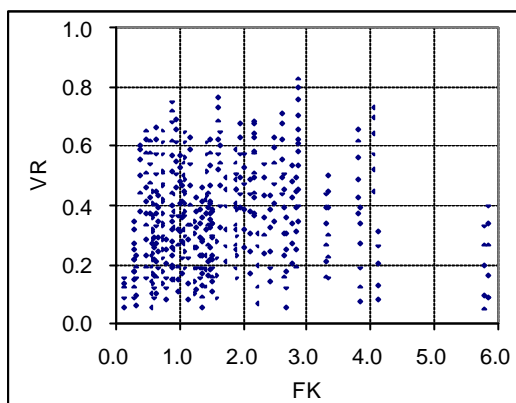


Figura 127 – Dispersão dos valores de *VR* versus *FK*, dos reservatórios da Paraíba.

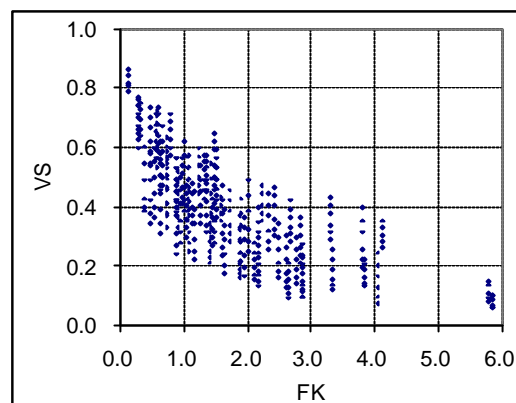


Figura 128 – Dispersão dos valores de *VS* versus *FK*, dos reservatórios da Paraíba.

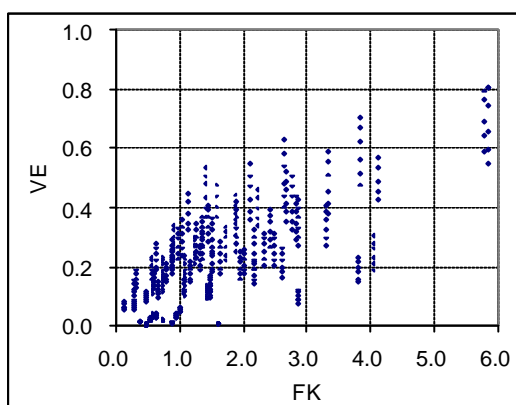


Figura 129 – Dispersão dos valores de *VE* versus *FK*, dos reservatórios da Paraíba.

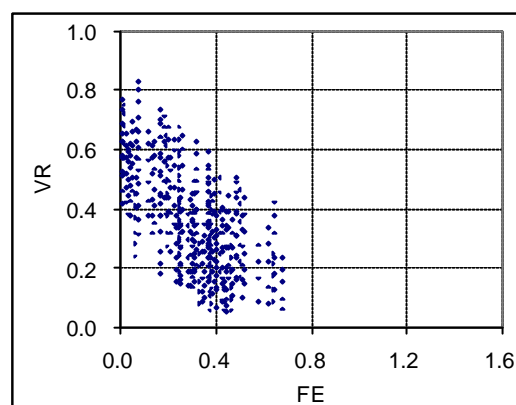


Figura 130 – Dispersão dos valores de *VR* versus *FE*, dos reservatórios da Paraíba.

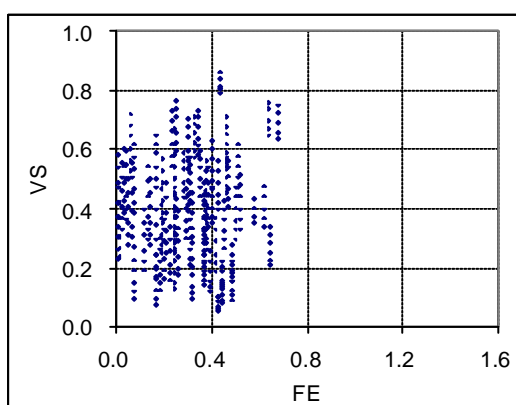


Figura 131 – Dispersão dos valores de *VS* versus *FE*, dos reservatórios da Paraíba.

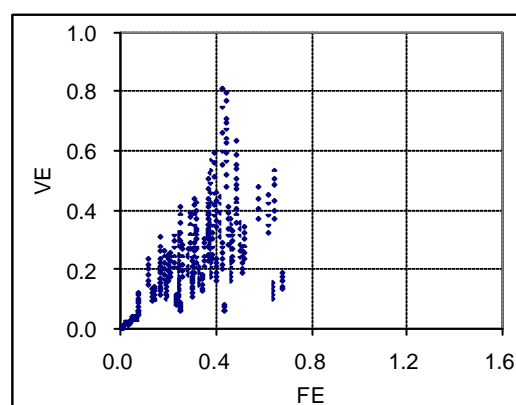


Figura 132 – Dispersão dos valores de *VE* versus *FE*, dos reservatórios da Paraíba.

4.5.2 Validação dos Modelos Considerando Garantia Mensal

Considerando os reservatórios da Paraíba, cujas estatísticas foram apresentadas na subseção 4.5.1, procedeu-se a validação do modelo desenvolvido neste trabalho como se segue.

Os 75 reservatórios selecionados da Paraíba foram simulados com garantias mensais de 80%, 90%, 95%, 99% e 99,9%, considerando uma série de afluência com mil anos de duração gerada estocasticamente com distribuição do tipo Gama de dois parâmetros, sendo determinados os valores dos volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado: VE , VS e VR .

Determinou-se os valores das variáveis independentes do modelo, sendo em seguida determinados através das regressões os valores de VE , VS e VR , assim como o valor de $VR = 1 - VE - VS$.

Nas Figuras 133 a 136 são apresentados os gráficos de dispersão dos valores obtidos por simulação versus os valores obtidos pelas regressões para VE , VS , VR e $VR = 1 - VE - VS$, respectivamente.

Na Tabela 22 são apresentados os erros médios e os erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para VE , VS , VR e $VR = 1 - VE - VS$.

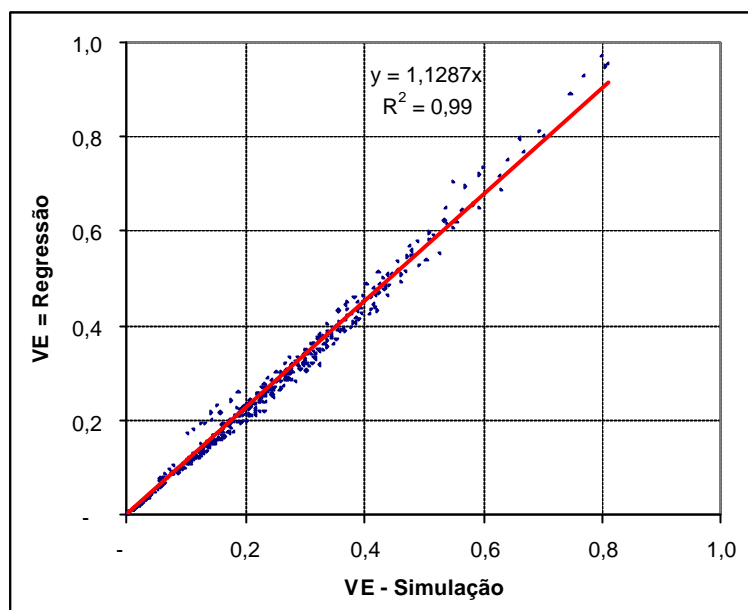


Figura 133 – Valores de *VE* determinados por regressão versus os valores de *VE* determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.

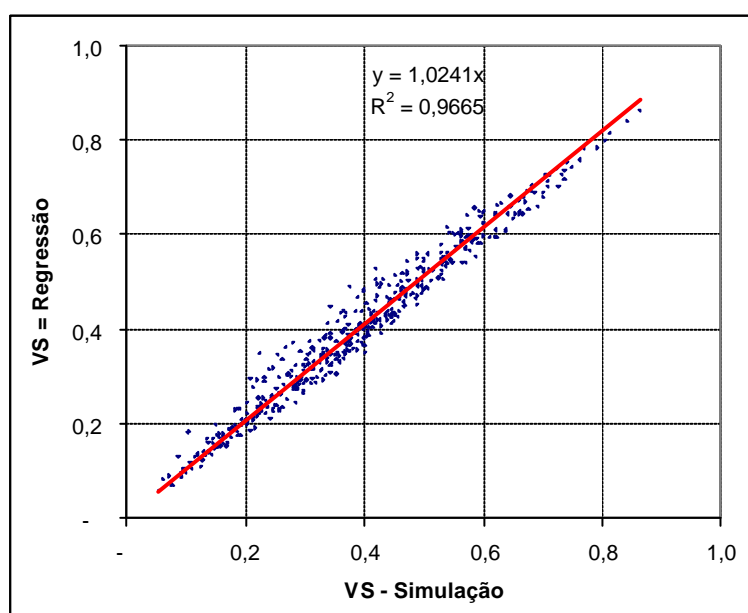


Figura 134 – Valores de *VS* determinados por regressão versus os valores de *VS* determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.

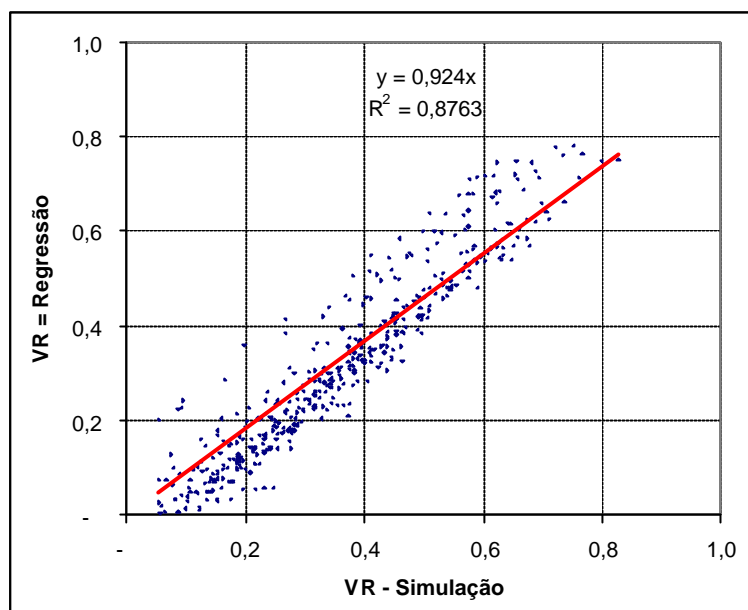


Figura 135 – Valores de VR determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.

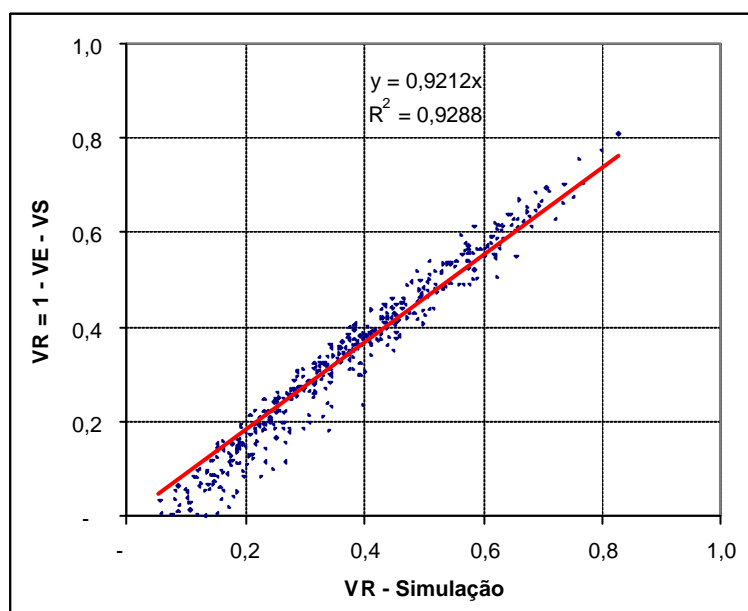


Figura 136 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.

Tabela 22 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.

Erro em módulo	VE	VS	VR	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0289	0,0238	0,0661	0,0436
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0690	0,0539	0,1098	0,0929

Observa-se na Figura 133 que a regressão sistematicamente superestima o valor de VE . Como observado nas considerações da seção 4.2.1: “*devido ao fato de que grande parte dos reservatórios utilizados para a determinação desta regressão apresentarem pequenos valores de FE , e conseqüentemente pequenos valores de VE , como pode ser observado nas Figuras 6 e 11. Desta forma, a regressão procurará maximizar o ajuste para os reservatórios que possuam pequenos valores de VE , penalizando os reservatórios com valores altos de VE . Possivelmente um ajuste no coeficiente $C(1)$, seguido ou não de ajuste no coeficiente $C(4)$, deverá reduzir substancialmente os erros quando considerado reservatórios com altos valores de VE .*”

Para solucionar esta questão é proposto o ajuste da equação pela divisão dos valores obtidos de VE pelo fator de ajuste **1,1287** obtido da Figura 133.

Nas Figuras 137 e 138 são apresentados os gráficos de dispersão dos valores obtidos por simulação versus os valores obtidos pelas regressões após ajustado pelo fator **1,1287** para VE , e $VR = 1 - VE - VS$, respectivamente.

Na Tabela 23 são apresentados os erros médios e os erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para VE e $VR = 1 - VE - VS$.

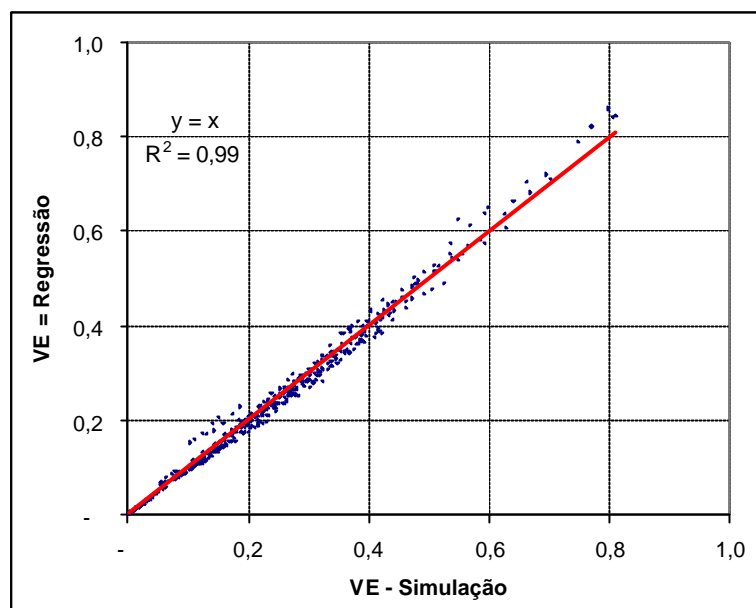


Figura 137 – Valores de VE determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.

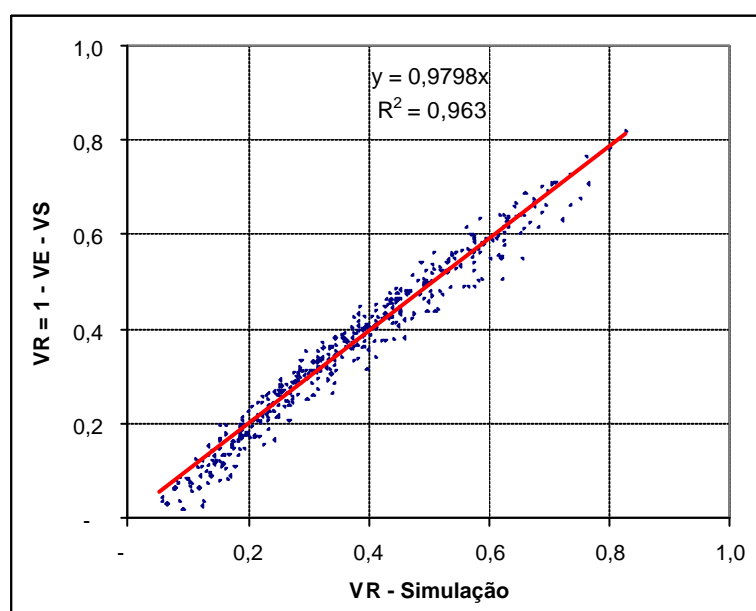


Figura 138 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal.

Tabela 23 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia mensal, considerando o fator de correção para VE .

Erro em módulo	VE	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0115	0,0259
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0264	0,0580

4.5.3 Validação dos Modelos Considerando Garantia Anual

Considerando os reservatórios da Paraíba, cujas estatísticas foram apresentadas na subseção 4.4.2, procedeu-se a validação do modelo desenvolvido neste trabalho como se segue.

Os 75 reservatórios selecionados da Paraíba foram simulados com garantias anuais de 80%, 90%, 95%, 99% e 99,9%, considerando uma série de afluência com mil anos de duração gerada estocasticamente com distribuição do tipo Gama de dois parâmetros, sendo determinados os valores dos volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado: VE , VS e VR .

Determinou-se os valores das variáveis independentes do modelo, sendo em seguida determinados através das regressões os valores de VE , VS e VR , assim como o valor de $VR = 1 - VE - VS$.

Nas Figuras 139 a 142 são apresentados os gráficos de dispersão dos valores obtidos por simulação versus os valores obtidos pelas regressões para VE , VS , VR e $VR = 1 - VE - VS$, respectivamente.

Na Tabela 24 são apresentados os erros médios e os erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para VE , VS , VR e $VR = 1 - VE - VS$.

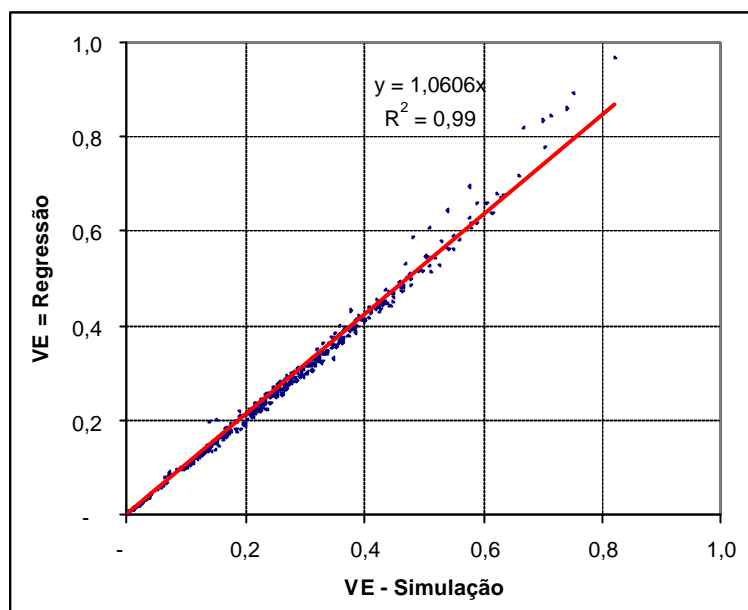


Figura 139 – Valores de *VE* determinados por regressão versus os valores de *VE* determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.

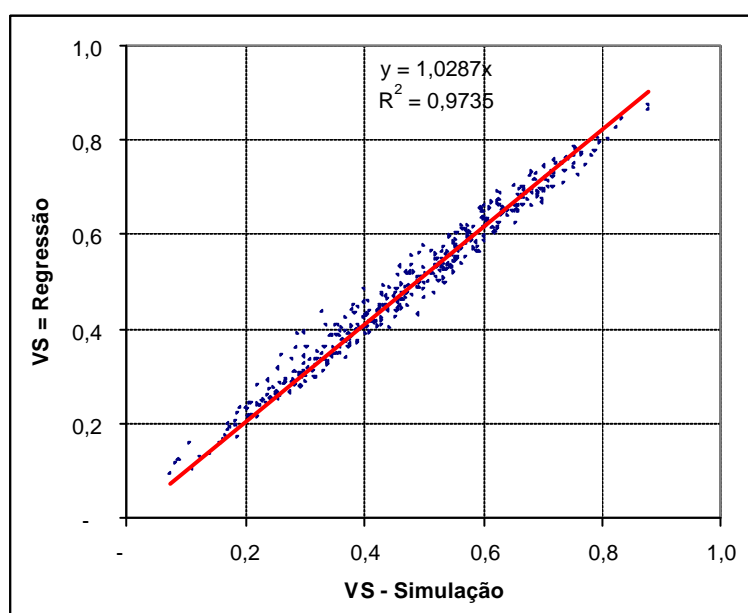


Figura 140 – Valores de *VS* determinados por regressão versus os valores de *VS* determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.

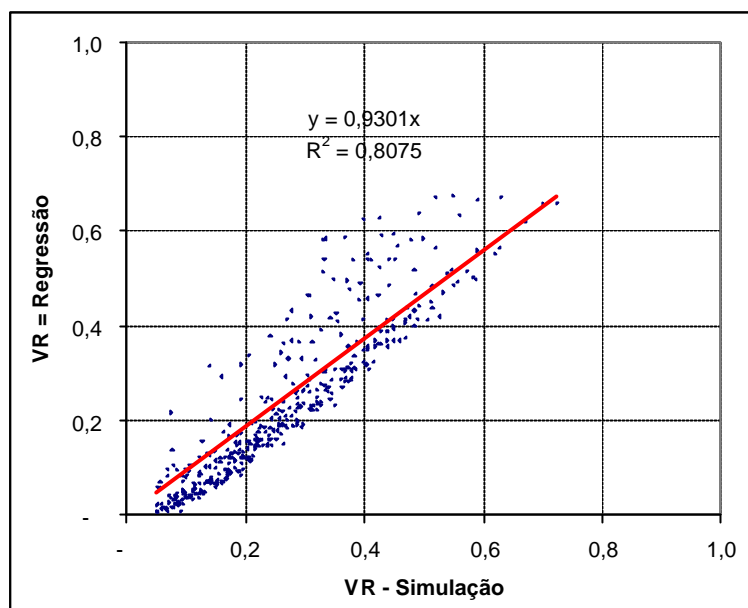


Figura 141 – Valores de VR determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.

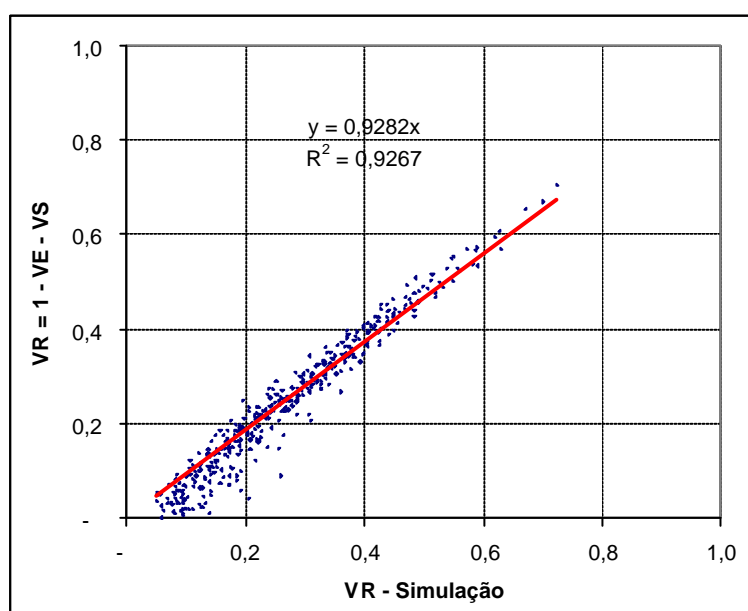


Figura 142 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.

Tabela 24 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.

Erro em módulo	VE	VS	VR	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0139	0,0231	0,0671	0,0339
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0294	0,0520	0,1003	0,0776

Observa-se na Figura 139 que a regressão sistematicamente superestima o valor de VE . Como observado nas considerações da seção 4.2.2: “devido ao fato de que grande parte dos reservatórios utilizados para a determinação desta regressão apresentarem pequenos valores de VE , como pode ser observado nas Figuras 28 e 33. Desta forma, a regressão procurará maximizar o ajuste para os reservatórios que possuam pequenos valores de VE , penalizando os reservatórios com valores altos de VE . Possivelmente um ajuste no coeficiente $C(1)$ deverá reduzir substancialmente os erros quando considerado reservatórios com altos valores de VE .”.

Para solucionar esta questão é proposto o ajuste da equação pela divisão dos valores obtidos de VE pelo fator de correção **1,0606** obtido da Figura 139.

Nas Figuras 143 e 144 são apresentados os gráficos de dispersão dos valores obtidos por simulação versus os valores obtidos pelas regressões após ajustado pelo fator **1,0606** para VE , e $VR = 1 - VE - VS$, respectivamente.

Na Tabela 25 são apresentados os erros médios e os erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo para VE e $VR = 1 - VE - VS$.

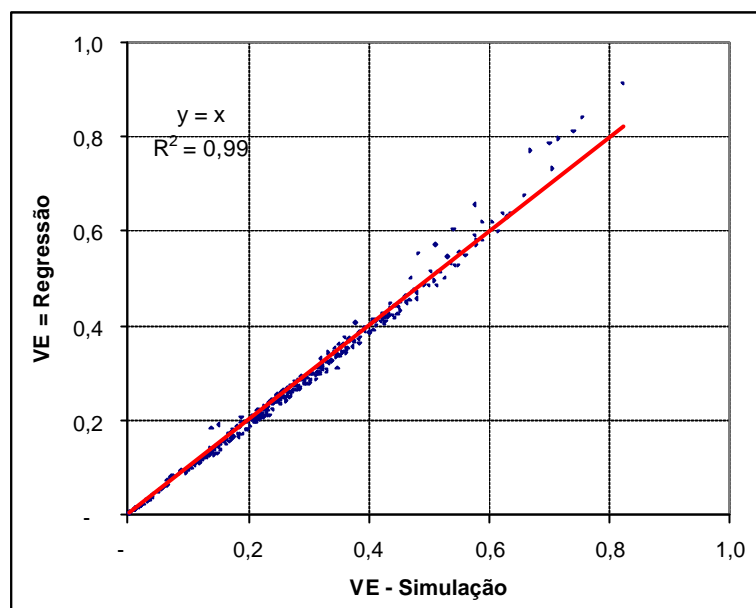


Figura 143 – Valores de VE determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VE determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.

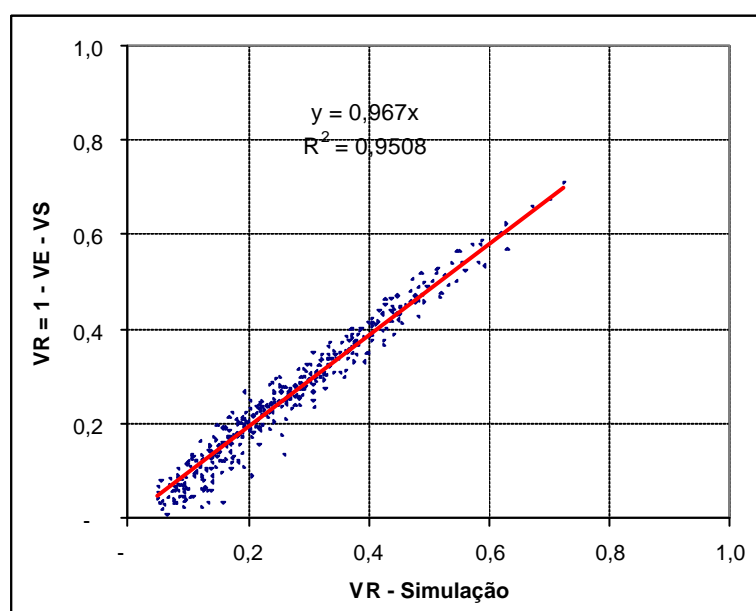


Figura 144 – Valores de $VR = 1 - VE - VS$ determinados por regressão e aplicado o fator de correção versus os valores de VR determinados por simulação, considerando os dados dos reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual.

Tabela 25 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da Paraíba simulados com garantia anual, considerando o fator de correção para VE .

Erro em módulo	VE	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0103	0,0253
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0195	0,0573

4.5.4 Considerações Sobre A Validação Das Regressões

Nas Tabelas 26 e 27 são apresentados os erros médios e máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, observado quando da determinação das regressões, seções 4.2 e 4.3, para as garantias mensal e anual, respectivamente.

Tabela 26 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios gerados e simulados com garantia mensal. Informações obtidas da seção 4.2, quando da determinação das regressões

Erro em módulo	VE	VS	VR	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0088	0,0261	0,0480	0,0297
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0230	0,0565	0,1000	0,0650

Tabela 27 – Erros médios e erros máximos com 90% de confiabilidade, em módulo, para os reservatórios da gerados e simulados com garantia anual. Informações obtidas da seção 4.3, quando da determinação das regressões

Erro em módulo	VE	VS	VR	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0073	0,0214	0,0421	0,0235
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0180	0,0473	0,0854	0,0510

Quando comparados os erros apresentados nas Tabelas 22 e 24 com os observados nas Tabelas 26 e 27, respectivamente, observa-se que os mesmos são similares.

A adoção do fator de correção para VE reduz sensivelmente a magnitude dos erros, como observado nas Tabelas 23 e 25, em comparação com as Tabelas 22 e 24, respectivamente.

Com relação à regressão de VE , se observa nas Figuras 133 e 139 uma tendência de superestimar sistematicamente os valores de VE , sendo esta tendência mais destacado para valores altos de VE e para as simulações com garantia mensal. A adoção do fator de correção de VE reduz sensivelmente a tendência de superestimação, sendo esta redução mais notada para valores grandes de VE .

Com relação à regressão de VS , se observa nas Figuras 134 e 140 que a mesma está representando adequadamente a realidade sem tendência de superestimar ou subestimar sistematicamente os valores. Os erros, como já observado, estão de acordo com o esperado *a priori*.

Com relação à regressão de VR , se observa nas Figuras 135 e 141 que a mesma apresenta dificuldade de representar adequadamente os valores simulados.

Com relação à determinação de $VR = 1 - VE - VS$, se observa nas Figuras 136 e 142 uma tendência de subestimar sistematicamente $VR = 1 - VE - VS$ quando analisado valores menores que 0,2. A adoção do fator de correção de VE reduz sensivelmente esta tendência, como pode ser observado nas Figuras 138 e 144.

Fica clara a necessidade da adoção deste fator de correção de VE para se obter bons resultados quando analisados reservatórios em que haja predomínio da evaporação.

4.6 Gráficos da Influência das Variáveis Independentes nos Volumes Adimensionais Evaporado, Vertido e Regularizado

As regressões desenvolvidas nas seções 4.2 e 4.3 são representadas graficamente no Apêndice B onde é possível verificar a influência individual de cada variável independente (CV , FK , FE , I e G) nas variáveis dependentes (VE , VS e VR). Os gráficos apresentam curvas de comportamento de reservatórios onde se varia apenas uma variável independente.

Observa-se que os gráficos devem ser utilizados quando se atendem, em conjunto, as seguintes limitações: $0,00 \leq VE \leq 0,90$, $0,05 \leq VS \leq 0,95$ e $0,05 \leq VR \leq 0,95$. No limite, considerando a possibilidade de erros superiores aos descritos neste trabalho, devem ser atendidas em conjunto as seguintes limitações: $0,0 \leq VE \leq 1,0$, $0,0 \leq VS \leq 1,0$ e $0,0 \leq VR \leq 1,0$.

Na Figura 145 apresentada a seguir demonstra um exemplo de utilização dos gráficos do Apêndice B.

Exemplo da Figura 145: Um determinado reservatório está projetado com $FK=1$ e regularizará 40% do volume médio afluente. Se alterássemos FK , qual seria o impacto sobre a vazão regularizada? Na Figura 145 é determinado o ponto $FK=1$ e $VR=0,4$, sendo traçada uma curva (em vermelho) com a mesma conformação das curvas pré-existentes, determinando assim os valores de VR para diferentes valores de FK , mantendo as demais variáveis do problema inalterado. Da Figura 145 obtêm-se os seguintes valores de FK : 1; 2; 3; 4 e 5, associados aos seguintes valores de VR : 0,4; 0,52; 0,58; 0,60 e 0,52. Da forma inversa, é possível determinar qual o FK que deverá ser adotado para se alcançar uma determinada vazão adimensional regularizada, VR .

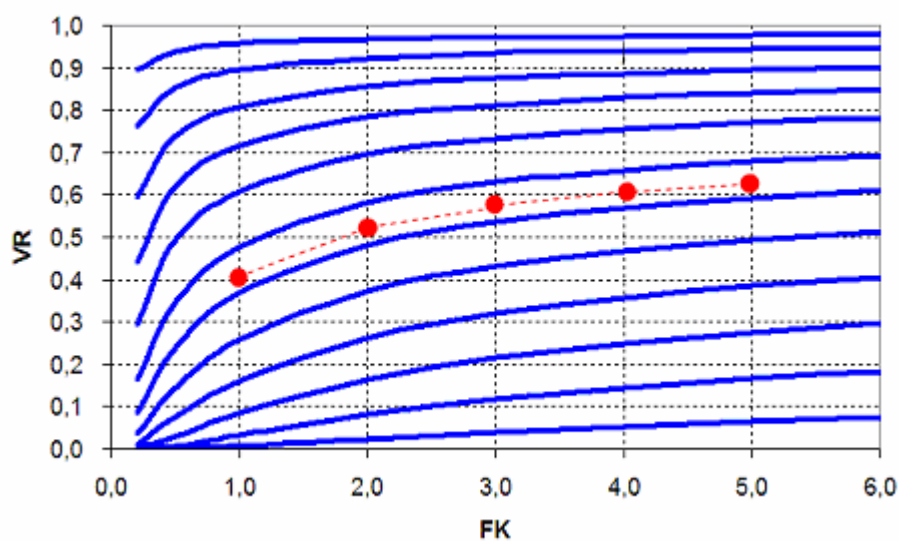


Figura 145 – Exemplo de utilização dos gráficos do Apêndice B

Com relação aos gráficos apresentados no Apêndice B, verifica-se que:

- Os gráficos das regressões dos reservatórios simulados com garantia anual e mensal apresentam comportamento similar, como esperado, variando apenas marginalmente.
- O comportamento das variáveis, observado nos gráficos, está de acordo com a teoria.
- Com relação ao volume adimensional evaporado, VE , este é fortemente influenciado por FE e FK , e, em certa medida, marginalmente influenciado por CV e G . Observa-se que para valores altos de VE , G passa a influenciar fortemente VE .
- Com relação ao volume adimensional vertido, VS , este é fortemente influenciado por CV e FK , e, em certa medida, marginalmente influenciado por FE e G . Observa-se que para valores altos de G , esta variável passa a influenciar fortemente VS .

- Com relação ao volume adimensional regularizado, VR , este é fortemente influenciado pelas quatro variáveis independentes: CV , FK , FE e G .
- Mantendo as demais variáveis constantes, o crescimento de CV implica em: i) reduzido acréscimo de VE ; ii) forte acréscimo de VS ; e iii) forte decréscimo de VR . O acréscimo de CV implica em forte transferência de VR para VS .
- Mantendo as demais variáveis constantes, o crescimento de FK implica em: i) forte acréscimo de VE e VR ; e ii) forte decréscimo de VS . O acréscimo de FK implica em forte transferência de VS para VE e VR .
- Mantendo as demais variáveis constantes, o decréscimo de FE implica em: i) forte decréscimo de VE ; ii) forte acréscimo de VR ; e iii) decréscimo marginal de VS . O decréscimo de FE implica em forte transferência de VE para VR .
- O volume afluente médio ao reservatório, I , influencia FE de forma inversa, ou seja, o crescimento de I implica no decréscimo de FE . Mantendo as demais variáveis constantes, o crescimento de I implica em: i) forte decréscimo de VE ; ii) forte acréscimo de VR ; e iii) decréscimo marginal de VS . O acréscimo de I implica em forte transferência de VE para VR .
- Mantendo as demais variáveis constantes, o acréscimo de G implica em: i) acréscimo de VE e VS ; e ii) forte decréscimo de VR , principalmente para grandes valores de G . O acréscimo de G implica em forte transferência de VR para VE e VS .

4.7 Resumo das Regressões

Neste trabalho foram desenvolvidas equações simplificadas para a determinação dos volumes adimensionais evaporado, vertido e regularizado de reservatórios, considerando garantias mensais ou anuais. Estes volumes adimensionais são definidos como:

- Volume adimensional evaporado, VE , é a razão entre o volume total evaporado e o volume total afluyente ao reservatório, no longo prazo.
- Volume adimensional vertido, VS , é a razão entre o volume total vertido e o volume total afluyente ao reservatório, no longo prazo.
- Volume adimensional regularizado, VR , é a razão entre o volume total regularizado e o volume total afluyente ao reservatório, no longo prazo.

Foram identificados quatro variáveis independentes, parâmetros das equações:

- Coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais ao reservatório, CV ;
- Volume adimensional do reservatório, FK , razão entre o volume médio afluyente anual ao reservatório e a capacidade máxima de armazenamento deste;

- Fator adimensional de evaporação, $FE = \left(\frac{\mathbf{b} \times \mathbf{a}^{\left(\frac{1}{b}\right)} \times ev}{I^{\left(\frac{1}{b}\right)}} \right)$, onde: i) \mathbf{a} e

\mathbf{b} são coeficientes da equação cota-área-volume determinados pela equação $Z(h) = \mathbf{a} \times h^{\mathbf{b}}$ com $Z(h)$ em metros cúbicos e h em metros; ii) ev , em metros, é a evaporação potencial líquida anual, ou seja, a diferença entre a altura da lâmina evaporada anual subtraída da precipitação anual; e iii) I é o volume médio afluyente anual ao reservatório em metros cúbicos.

- Garantia do atendimento da demanda, G .

As equações desenvolvidas para VE , VS e VR , são apresentadas a seguir:

Determinação de VE :

$$VE = e^{c(1)} \times CV^{c(2)} \times FK^{c(3)} \times FE^{c(4)} \times G^{(c(5)+c(6) \times \ln(G))}$$

Determinação de VS :

$$VS = \frac{1}{e^X}, \text{ onde:}$$

$$X = e^{c(1)} \times CV^{(c(2)+c(6) \times \ln(CV))} \times FK^{(c(3)+c(7) \times \ln(FK))} \times FE^{(c(4)+c(8) \times \ln(FE))} \times G^{(c(5)+c(9) \times \ln(G)+c(10) \times \ln(G)^2)}$$

Determinação de VR :

$$VR = 1 - VE - VS$$

Nas Tabelas 28 e 29 são apresentados os valores dos coeficientes destas equações para garantias mensais e anuais, respectivamente.

Nas Tabelas 30 e 31 são apresentados os erros médios esperados e os erros máximos esperados com confiabilidade de 90%, para garantias mensais e anuais, respectivamente, considerando os reservatórios gerados e simulados cujas estatísticas são apresentadas na seção 4.1.

Na Tabela 32 são apresentados os limites de validade das regressões desenvolvidas neste trabalho, informações estas resumidas da seção 4.1. Fora destes limites, as regressões podem ser utilizadas, entretanto, com cautela, visto que os erros podem crescer substancialmente.

As equações desenvolvidas VE tendem a superestimar sistematicamente os volumes adimensionais evaporado principalmente quando este assume valores maiores que 0,4. Desta forma faz-se necessário utilizar fatores de correção para VE . Os volumes adimensionais evaporados, VE , determinados pelas regressões apresentadas acima, devem ser divididos pelos fatores de correção **1.1287** e **1.0606**, considerando garantia mensal e anual, respectivamente.

O procedimento de cálculo de VE , VS e VR , consiste em:

- Determinar os valores das variáveis independentes, parâmetros das equações: CV , FK , FE e G .
- Determinar VE através da equação apresentada anteriormente, considerando os coeficientes das tabelas 28 ou 29 de acordo com o tipo de garantia desejada.
- Determinar o valor de VE corrigido através da divisão do valor obtido de VE (regressão) pelo fator de correção 1.1287 ou 1.0606, considerando garantia mensal ou anual, respectivamente.
- Determinar VS através da equação apresentada anteriormente, considerando os coeficientes das tabelas 28 ou 29 de acordo com o tipo de garantia desejada.
- Determinar VR pela equação: $VR = 1 - VE - VS$, onde VE é o valor corrigido do volume adimensional evaporado.

Tabela 28 – Valores dos coeficientes das regressões considerando garantia mensal

Coeficiente	VE	VS
C(1)	-0,207944	-0,535315
C(2)	0,054039	-1,171884
C(3)	0,589307	0,748562
C(4)	0,978417	0,129334
C(5)	3,004036	-12,16768
C(6)	6,028450	-0,192154
C(7)		-0,018183
C(8)		0,011752
C(9)		-81,90224
C(10)		-191,1170

Tabela 29 – Valores dos coeficientes das regressões considerando garantia anual

Coeficiente	<i>VE</i>	<i>VS</i>
C(1)	-0,162880	-0,738561
C(2)	0,032971	-1,033767
C(3)	0,601773	0,828370
C(4)	0,999125	0,175113
C(5)	2,128447	-10,30075
C(6)	4,213753	-0,150786
C(7)		-0,016194
C(8)		0,017433
C(9)		-68,93770
C(10)		-158,8954

Tabela 30 – Valores dos erros médios esperados e erros máximos esperados com confiabilidade de 90% considerando garantia mensal

Erro em módulo	<i>VE</i>	<i>VS</i>	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0088	0,0261	0,0297
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0230	0,0565	0,0650

Tabela 31 – Valores dos erros médios esperados e erros máximos esperados com confiabilidade de 90% considerando garantia anual

Erro em módulo	<i>VE</i>	<i>VS</i>	$VR = 1 - VE - VS$
Médio	0,0073	0,0214	0,0235
Máximo com 90% de confiabilidade	0,0180	0,0473	0,0510

Tabela 32 – Limites de validade das regressões de *VE*, *VS* e *VR*.

Variáveis	Limite	
	Inferior	Superior
<i>I</i>	0,23h ³ /ano	813hm ³ /ano
<i>a</i>	200	20.000
<i>b</i>	2	4
<i>ev</i>	0,05m	4,00m
<i>CV</i>	0,1	2,86
<i>FK</i>	0,2	6,0
<i>FE</i>	0,001	1,050
<i>G</i>	80%	99,9%
<i>VE</i>	0	0,90
<i>VS</i>	0,05	0,95
<i>VR</i>	0,05	0,95

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram desenvolvidas equações simplificadas para a determinação dos volumes adimensionais evaporado, VE , vertido, VS , e regularizado, VR , de reservatórios, considerando garantias mensais ou anuais a partir de quatro variáveis independentes: i) coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais ao reservatório, CV ; ii) volume adimensional do reservatório, FK ; iii) fator adimensional de evaporação, FE ; e iv) garantia do atendimento da demanda, G .

A seção 4.7 resume os procedimentos de cálculo de VE , VS e VR , a partir das regressões determinadas neste trabalho.

Com relação à qualidade das regressões:

- A regressão de VE representa bem o evento evaporação quando este é baixo $VE < 0,4$. Para valores altos de VE o modelo tende a superestimar sistematicamente os valores, sendo necessário a adoção de fatores de correção como apresentados nas subseções 4.5.2 e 4.5.3.
- A regressão de VS representa adequadamente o evento vertimento.
- A regressão VR apresenta dificuldade em representar o evento regularização, sendo necessário a determinação de novas regressões, ou a utilização da equação: $VR = 1 - VE - VS$.

As regressões desenvolvidas ao longo deste trabalho, considerando os limites de validade resumido na seção 4.7, podem ser empregadas na:

- Identificação do comportamento de pequenos reservatórios, onde a aplicação de metodologias mais refinadas é muito onerosa.
- Identificação do comportamento de reservatórios de médio e grande porte na fase de concepção.

- Comparação de eficiência de reservatórios localizados em regiões climáticas distintas.
- Identificação da influência de possíveis mudanças climáticas no comportamento médio de reservatórios. CYSNE (2007), analisa a vulnerabilidade de reservatórios em rios de alta variabilidade em um cenário de mudanças climáticas, em especial, analisando o acréscimo ou o decréscimo da evaporação líquida
- Quantificar a influência dos erros existentes nos dados básicos, principalmente com relação às variáveis climáticas, na determinação do comportamento do reservatório. Destaca-se o erro decorrente da duração da série histórica ou pseudo-histórica da afluência, utilizada para a definição dos parâmetros de afluência, principalmente quando associado a grandes valores de CV .
- Identificar o grau de salinização de um reservatório, visto que este é função de VE . Propõe-se utilizar o seguinte índice: $gs = \frac{1}{(1-VE)}$, onde gs é o grau de salinização do reservatório definido como a razão entre a salinidade média no reservatório e a salinidade média da vazão afluente.

Recomendações:

Com o intuito de melhorar a qualidade das regressões desenvolvidas neste trabalho, ou seja, a redução dos erros, é proposta a simulação de novos reservatórios com as seguintes adequações: i) utilização de séries mais longas de volumes afluentes anuais ao reservatório, possivelmente séries de cem mil anos; ii) simular garantia, G , como variável aleatória, variando de 80% a 99,99%; e iii) considerar um número maior de reservatórios simulado que possuam valores altos de VE , melhorando a qualidade do ajuste das regressões de VE , para valores altos.

Espera-se que os coeficientes das regressões de VS , determinados a partir destes novos reservatórios, não sejam significativamente diferentes dos apresentados neste trabalho. Já para as regressões de VE , espera-se que os novos coeficientes não se

alterem significativamente a exceção do coeficiente angular $C(1)$. Para VR é interessante a busca de um novo modelo que venha a representar melhor este evento.

De forma complementar, podem ser desenvolvidas regressões para a determinação do: i) comportamento do reservatório, VE , VS e VR , considerando o conceito de volume de alerta; e ii) duração média e máxima das falhas do atendimento da demanda, ou seja, um indicador da resiliência do reservatório.

Propõe-se também a determinação de regressões que permitam identificar os custos de implantação, operação e manutenção de reservatórios. Podem ser analisadas, dentre outras variáveis independentes: a , b , I , FK e disponibilidade de material de construção, possivelmente como variável binária. Através da associação desta regressão com as desenvolvidas neste trabalho será possível identificar os valores ótimos de FK e I que minimizam os custos totais por unidade de volume regularizado. MOTA (1995), analisando 40 reservatórios localizados no Ceará, e ARAUJO (2000), analisando diversos reservatórios da Paraíba, não obtiveram êxito na determinação destas equações devido a: i) possíveis problemas de especificação do modelo; e ii) principalmente devido à qualidade das informações, visto que estes reservatórios foram construídos em períodos distintos, sujeitos a diferentes fatores externos, que influenciaram fortemente no custo destas obras.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, G. N.. The use of the gamma distribution in estimating regulated outputs from storages. Civil Engineer Transactions, Institute of engineer, Australia, v.CE4(1), p.29-34, 1962.

ALVES, Joaquim. História das secas - Séculos XVII a XIX. Biblioteca Básica Cearense, Fundação Waldemar Alcântara, 2003.

ARAUJO, John kenedy. Método dos fragmentos aplicados a rios intermitentes: avaliação dos erros introduzidos no cálculo da disponibilidade de reservatórios. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1991.

ARAUJO, Wendell Carneiro, Avaliação dos custos de água bruta associados a diversas garantias na bacia do rio Paraíba. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

BNB, Banco do Nordeste do Brasil & FJN, Fundação Joaquim Nabuco. A seca de 1958 - Uma avaliação pelo ETENE. Série estudos sobre as secas no nordeste, v.1, BNB, Fortaleza, 2002a.

BNB, Banco do Nordeste do Brasil & FJN, Fundação Joaquim Nabuco. Caráter e efeitos da seca nordestina de 1970. Série estudos sobre as secas no nordeste, v. 2, BNB, Fortaleza, 2002b.

BNB, Banco do Nordeste do Brasil & FJN, Fundação Joaquim Nabuco. A seca de 1979-1980 - uma avaliação pela Fundação Joaquim Nabuco. Série estudos sobre as secas no nordeste, v.3, BNB, Fortaleza, 2002c.

BNB, Banco do Nordeste do Brasil & FJN, Fundação Joaquim Nabuco. A seca de 1993 - Crônica de um flagelo anunciado. Série estudos sobre as secas no nordeste, v.4, BNB, Fortaleza, 2002d.

BNB, Banco do Nordeste do Brasil & FJN, Fundação Joaquim Nabuco. Do desastre natural à calamidade pública - a seca de 1998-1999. Série estudos sobre as secas no nordeste, v.5, BNB, Fortaleza, 2002e.

BNB, Banco do Nordeste do Brasil & FJN, Fundação Joaquim Nabuco. O estado da arte das tecnologias para a convivência com as secas no nordeste. Série estudos sobre as secas no nordeste, v.6, BNB, Fortaleza, 2002f.

BNB, Banco do Nordeste do Brasil & FJN, Fundação Joaquim Nabuco. Bibliografia sobre as secas no nordeste. Série estudos sobre as secas no nordeste, v.7, BNB, Fortaleza, 2002g.

BUCHBERGER, S. G. e MAIDMENT, D. R.. Diffusion approximation for equilibrium distribution of reservoir storage. *Water Resources Research*, v.25(7), p.1643-1652, 1989.

CAMPOS, José Nilson B.. A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under high evaporation rate. Tese de Doutorado, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA, 1987.

CAMPOS, José Nilson B.. Regularização de vazões em rios intermitentes. Tese apresentada ao concurso de professor titular, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1990.

CAMPOS, José Nilson B.. Dimensionamento de reservatórios - O método do diagrama triangular de regularização. Edições UFC, Fortaleza, 1996.

CAMPOS, José Nilson B.. Dimensionamento de reservatórios: O método do diagrama triangular de regularização. Expressão gráfica, Fortaleza, 2005.

CAMPOS, José Nilson B., STUDART, Ticiania M de Carvalho, MARTINEZ, Duarte G e NASCIMENTO, Luiz Sérgio V.. Contribuições ao debate sobre as eficiências de pequenos e grandes reservatórios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n.2, abr/jun, p.31-38, 2003.

CAMPOS, José Nilson B. e IBIAPINA, Ney Gomes. Uma equação para estimar a vazão regularizada por um reservatório de tamanho infinito. In: CAMPOS, José Nilson B. e STUDART, Ticiania M. de Carvalho. Hidrologia de reservatórios - A construção de uma teoria. ASTEF/ Expressão Gráfica e Editora Ltda, Fortaleza, 2006.

CAVALCANTE, Ernani Cliton Filho. Regularização de vazões em reservatórios através dos modelos mensais e bi-sazonal: A duração da estação seca e a proposta da evaporação equivalente. Dissertação de mestrado, Universidade federal do Ceará, fortaleza, 2007.

CORREIA, F. N., SANTOS, M.A., RODRIGUES, R.R.. Reliability in regional drought studies. NATO ASI Series, v.G29, Water Resources Eng, Risk Assest, 1991.

CYSNE, Andrea pereira. Vulnerabilidade de reservatórios em rios de alta vulnerabilidade em um cenário de mudanças climáticas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

DUQUE, Guimarães. O nordeste e as lavouras xerófilas. Banco do Nordeste do Brasil, Fortaleza, 2004a.

DUQUE, Guimarães. Solo e água no polígono das secas. Banco do Nordeste do Brasil, Fortaleza, 2004b.

FARIAS, José Alexandre Moreira. Método de geração de vazões mensais e suas influencias sobre as curvas de garantias versus regularizada em reservatórios do estado do Ceará. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

FLETCHER, S.G. & PONNAMBALAM, K.. Estimation of reservoir yield and storage distribution using moments analysis. Journal of hydrology, N.182, p. 259-275, 1996.

GANI, J.. Some problems in the theory of provisioning and of dams. Biometrica, v.42, p.179-200, 1955.

GHOSAL, A.. Emptiness in the finite dams. Ann. Math statistics, v.31, p.803-808, 1960.

GOLDBERGER, Arthur S.. Topics in regression analysis. Macmillan, Nova York, 1968.

GOULD, B. W.. Statistical methods for estimating the design capacity of dams. Journal of the Institute of Engineering, Australia, v.33(12), p.405-416, 1961.

GOULD, B. W.. Discussion of Alexander G.N.. Effect of variability of streamflow on optimum storage capacity. In proceedings of Water Resources Use and Management of a Symp held in Canberra, Mellburne, Melburne University Press, p.161-164, 1964a.

GOULD, B. W.. Discussion of paper by Alexsander. Water Resources Use and Management, Melbourn, University Press, Melburn, 1964b.

GOULD, B. W.. Statistical methods for reservoir yield estimation. Water Research Foundation of Australia, report n.8, 1964c.

GUJARATI, Damodar N.. Econometria Básica. Tradução de Maria J. C. Monteiro. Elsevier Editora Ltda, 4a. Edição, Rio de janeiro, 2006.

HARDISON C. H.. Prediction error of regression estimates of streamflow characteristics at ungaged sites. US Geological Survey, Paper 750-C, US Government Printing Office, Washington DC, p.228-236, 1971.

HASHIMOTO, T., STEDINGER, J. R. e LOUCKS, D. P.. Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, v.18(1), p. 14-20, 1982.

HAZEN, A.. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal Water supply. Transactions ASCE, v.77, p.1539-1640, 1914.

HURST, H. E.. Long term storage capacity of reservoirs. Transactions ASCE, v116, p.770-799, 1951.

KLEMES, V.. Common Sense and other heresies: Selected papers on hydrology and water resources. Canadian Water Resources Association, Ontaro, Canada, 2000.

KMENTA, Jan. Elements of econometrics. 2^aed., New York, Macmillan, 1971.

LANGBEIN, W. B.. Queuing theory and water storage. Journal of Hydraulic Division, ASCE, v.84(HY5), p.1-24, 1958.

LLOYD, E. H.. A probability theory of storage with serially correlated inputs. Journal of hydrology, v.1, p.99-128, 1963.

LOUCKS, D. P.. Quantifying trends in system sustainability. Hydrology Science Journal, v.42(4), p.513-530, 1997.

MARWELL, Aline Machado. Avaliação da influência da pequena açudagem sobre a vazão regularizada do açude Petrônio Portela-PI - utilizando modelo de rede de fluxo. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MACMAHON, T. A.. Preliminary estimation of reservoir storage for Australian streams. Civil Engineering transactions, The Institution of Engineers, Australia, v.18(2), 1976.

MCMAHON, T. A. & MEIN, R. G.. River and reservoir yield. Water Resources Publications, USA, 1986.

MCMAHON, Thomas A., PEGRAM, Geoffrey G.S., VOGEL, Richard M., e PEEL, Murray C.. Review of Gould-Dincer reservoir storage-yield-reliability estimates. Advances in Water Resources, n.30, p.1873-1882, 2007a.

MCMAHON, Thomas A., PEGRAM, Geoffrey G.S., VOGEL, Richard M., e PEEL, Murray C.. Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database. Advances in Water resources, n.30, p.1858-1872, 2007b.

MENEZES, Francisco Almino Leite. Secas hidrológicas no semi-árido brasileiro: o papel da variabilidade dos deflúvios anuais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MORAN, P. A.. Probability theory of dams and storage system. Australian Journal of Applied Science, v.5, 1954.

MORAN, P. A.. Probability theory of dams and storage system. Australian Journal of Applied Science, v.6, 1955.

MORAN P.A. The theory of storage. London, Methuen, 1959

MOTA, Francisco Antonio. Análise dos custos do volume regularizado e da eficiência hídrica de reservatórios do Ceará. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1995.

PAIXÃO, Michel Portela. Aplicação de indicadores de desempenho na avaliação de sistemas hídricos - Um estudo de caso. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

PEGRAM, G. G. S.. Recurrence times of draft patterns from reservoirs. Journal of applied probability, v.12(3), p.647-652, 1975.

PHIEN, H. N.. Reservoir storage capacity with gamma inflows. Journal of Hydrology, v.146, p.383-389, 1993.

PRABHU, N. U.. Some exact results for the finite dam. Ann. Of Math Statistics, v.28, p.1234-1243, 1958.

RIPPL, W.. Capacity of storage reservoirs for water supply. Minutes of proceedings Institution of Civil Engineers, v.71, p.270-278, 1883.

SEMARH, Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais. Estudos hidrológicos e estruturação de um sistema preliminar de monitoramento e gestão dos reservatórios relacionados com o abastecimento humano no estado da Paraíba. Subprograma de desenvolvimento sustentável de recursos hídricos para o semi-árido brasileiro, João Pessoa, Paraíba. (2002).

SILANS, Alain Marie Bernard Passerat. Redução da evaporação de açudes - O estado da arte. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.8, n.2, Abr/Jun, p.101-109, 2003.

SIMONOVIC, S. P.. Sustainability Criteria for possible use in reservoir analysis. In Sustainable reservoir development and management, International Association of Hydrological Sciences Publishers, 1998.

SOARES, Ilton G & CASTELAR, Ivan. "Econometria aplicada com o uso do Eviews". UFC/CAEN, Fortaleza, 2003

STOCK, James H. & WATSON, Mark H.. Econometria. Tradução de Monica Rosemberg, São Paulo, Addison Wesley, 2004.

SUDLER, C. E.. Storage required for the regulation of streamflow. Transactions ASCE, v.61, p.622-660, 1927.

TRIOLA, Mario F.. Introdução à estatística. tradução de Vera Regina lima de farias e Flores, Rio de Janeiro, LTC, 2005.

VOGEL, R.M. & STEDINGER, J. R.. Generalized storage-reliability-yield relationships. Journal of Hydrology, v.89, p.303-327, 1987.

VOGEL, Richard M. & BOLOGNESE, Ralph A.. Storage-reliability-resilience-Yield relations for over-year water supply system. Water Resources research, v.31, n.3, março, p.645-654, 1995.

VOGEL, R. M. & WILSON I, The probability distribution of annual maximum, minimum and average streamflow in the United States. Journal of Hydrology Engineering, ASCE, v.1(2) p. 69-76, 1996.

WAITT, F. W. F.. Studies of drought in the Sydney catchments areas. Journal of The Institution of Engineers, Australia, v.17(4-5), p.90-97, 1945.

YEVJEVICH, V.. The Application of surplus, deficit and range in hydrology. Hydrology paper 10, Colorado State University, 1965.

APÊNDICES

APÊNDICE A - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE REGRESSÕES LINEARES

**APÊNDICE B - GRÁFICOS DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES
NOS VOLUMES ADIMENSIONAIS EVAPORADO, VERTIDO E
REGULARIZADO**

APÊNDICE A

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE REGRESSÕES LINEARES

Como bem observa GUJARATI (2006), a análise de regressão se ocupa do estudo da dependência de uma variável, a variável dependente, em relação a uma ou mais variáveis explanatórias ou independentes, com vistas a estimar e/ ou prever o valor médio (da população) da primeira em termos dos valores conhecidos ou fixados (em amostragens repetidas) das segundas.

O Modelo de Regressão Linear Clássico baseia-se nas seguintes premissas:

- Modelo de regressão linear nos parâmetros.
- Os valores das variáveis independentes são fixados em amostras repetitivas, ou seja, pressupõe-se que as variáveis independentes são não estocásticas.
- O valor médio dos resíduos u_i é zero, ou seja, dado o valor de uma variável independente, o valor médio, ou esperado, do resíduo sobre a variável dependente é zero. Resíduo é a diferença entre o real valor da variável dependente e o valor obtido para esta variável através da regressão.
- Homocedasticidade ou igual variância dos resíduos u_i , ou seja, a variação dos resíduos é constante para todos os valores observados das variáveis independentes.
- Não há autocorrelação entre os resíduos, ou seja, os resíduos não seguem padrões sistemáticos.
- Ausência de covariância entre u_i e as variáveis independentes, ou seja, os resíduos e as variáveis explanatórias não estão correlacionados.
- O número de observações deve ser maior que o número de parâmetros a serem estimados, sendo ideal que o modelo possua um número de observações muito superior ao número de parâmetros do modelo.
- Deve existir variabilidade nos valores das variáveis independentes.

- O modelo de regressão deve ser especificado de forma correta, a partir de teorias robustas. Deve-se evitar o uso da técnica de “garimpagem” de dados e/ ou modelos, pois o resultado observado pode não ser coerente com a realidade.
- Não há multicolinearidade perfeita, ou seja, uma variável independente não pode ser perfeitamente explicada através de relações lineares entre as demais variáveis independentes. É interessante que estas explicações não sejam robustas.
- Distribuição normal dos resíduos u_i , desta forma os resíduos são não tendenciosos, tem variância mínima, são consistentes e possibilita deduzir as distribuições de probabilidade ou amostral dos estimadores e da variância, simplificando a tarefa de estabelecer intervalos de confiança e testes de hipótese. O não atendimento desta premissa implicará na impossibilidade de se estabelecer intervalos de confiança e testes de hipóteses.

Método dos mínimos quadrados

Dada uma relação linear entre a variável dependente Y e as variáveis independentes $X_{(j)}$ do tipo $Y_i = \sum_{j=0}^m (C_{(j)} \times X_{(j)})_i + u_i$, determinam-se os valores dos coeficientes $C_{(j)}$ que minimizam o somatório dos quadrados dos resíduos $\sum_{i=1}^n (u_i^2)$. As variáveis, ao contrário dos coeficientes, podem assumir formas não lineares, tais como: $X_{(j)}^2$, $\ln(X_{(j)})$, $\frac{1}{X_{(j)}}$, dentre outras.

São exemplos de equações lineares nos coeficientes:

- polinomial: $Y_i = C_{(0)} + C_{(1)} \times X_{(1)} + C_{(2)} \times X_{(1)}^2 + u_i$;
- recíproco: $Y_i = C_{(0)} + C_{(1)} \times \left(\frac{1}{X_{(1)}} \right) + u_i$;

- recíproco Logaritmo: $\ln(Y_i) = C_{(0)} + C_{(1)} \times \left(\frac{1}{X_{(1)}} \right) + u_i$; e
- variáveis binárias: $Y_i = C_{(0)} + C_{(1)} \times X_{(1)} + C_{(2)} \times D + C_{(3)} \times D \times X_{(1)} + u_i$,
onde D é uma variável binária, ou seja, assume valor 0 ou 1.

Na Figura A.1 são representados graficamente os modelos polinomial, recíproco, recíproco logaritmo e binário.

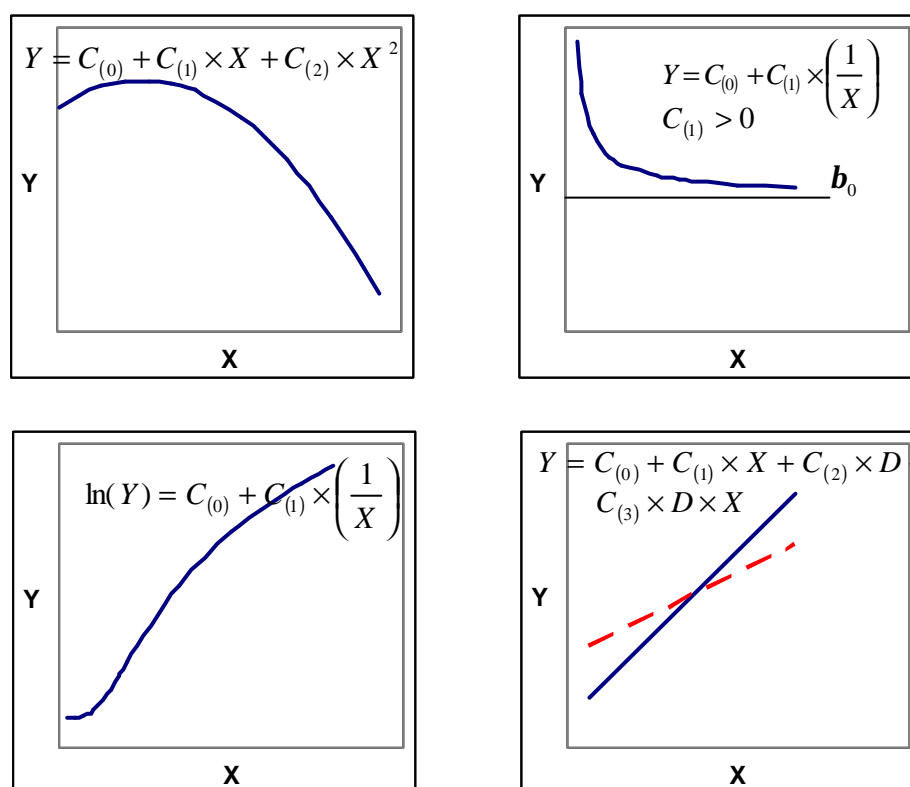


Figura A.1 – Representação gráfica dos modelos polinomial, recíproco, recíproco logaritmo e binário.

Determinadas equações não lineares nos coeficientes podem ser linearizadas. A equação não-linear $Y_i = C_{(0)} \times X_1^{C_{(1)}} \times X_2^{C_{(2)}} \times \dots \times X_n^{C_{(n)}} \times e^{u_i}$, após aplicado o logaritmo em ambos os termos da equação e aplicando as propriedades dos logaritmos, retornará a seguinte equação linear nos coeficientes: $\ln(Y_i) = a + C_{(1)} \times \ln(X_1) + C_{(2)} \times \ln(X_2) + \dots + C_{(n)} \times \ln(X_n) + u_i$, onde $a = \ln(C_{(0)})$.

Na Figura A.2 é possível verificar graficamente o sentido da transformação matemática apresentada no parágrafo anterior, considerando um modelo com apenas uma variável independente. À esquerda tem-se o modelo não linear e à direita o modelo linear nos coeficientes.

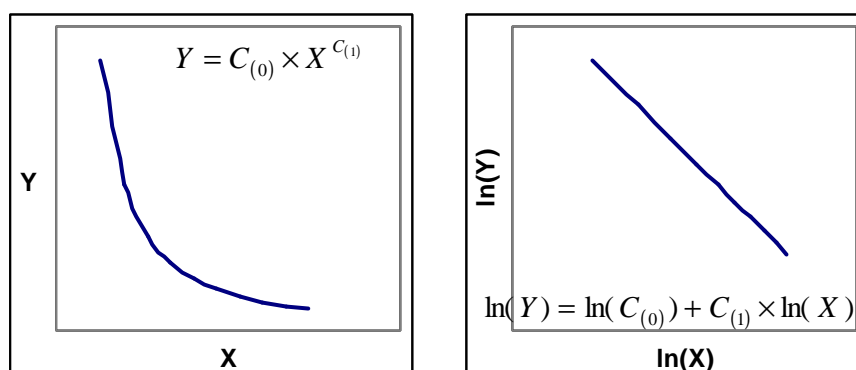


Figura A.2 – Representação gráfica do modelo não linear (à esquerda) e do modelo linearizado (à direita.).

Qualidade do ajustamento da regressão

Coeficiente de Determinação, R^2 , é uma medida de qualidade de ajustamento da regressão aos dados amostrais, indicando quanto da variação da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes. Observa-se que este coeficiente quase que invariavelmente aumenta e nunca diminui com o acréscimo do número de variáveis, impossibilitando a comparação de dois modelos que possuam quantidades de variáveis independentes distintos, o que não significa necessariamente que estas variáveis adicionais acrescentem explicação ao problema.

Coeficiente de Determinação Ajustado, \bar{R}^2 , diferentemente do coeficiente de determinação, considera o número de variáveis do modelo, k , e o número de observações, n . Neste caso o \bar{R}^2 pode crescer ou decrescer com o acréscimo do número de variáveis independentes. \bar{R}^2 se relaciona com R^2 por uma equação do tipo:

$$\bar{R}^2 = 1 - \left[(1 - R^2) \times \left(\frac{n-1}{n-k} \right) \right]$$

GUJARATI (2006) observa que ao comparar dois modelos com base no coeficiente de determinação ajustado, deve ser verificado se o número de observações e a variável dependente dos modelos são iguais.

Há críticas quanto ao “jogo” de maximização do \bar{R}^2 . Como bem observa GOLDBERGER (1968 apud GUJARATI 2006), “Nada no modelo clássico de regressão exige que \bar{R}^2 seja alto. Logo um \bar{R}^2 elevado não é uma evidência favorável ao modelo nem um \bar{R}^2 baixo constitui uma prova desfavorável.”. Tão importante quanto a obtenção de um \bar{R}^2 alto, é a análise dos coeficientes, ou seja, deve-se verificar se os coeficientes são estatisticamente significantes e que os mesmos estão de acordo com o esperado *a priori*, como será observado em “teste de hipótese”.

De forma alternativa ao critério de seleção \bar{R}^2 podem ser considerados: i) o critério de Akaike, o qual impõe uma pena mais dura ao acréscimo do número de variáveis do modelo do que o \bar{R}^2 ; e ii) o critério de Schwarz, o qual impõe uma pena mais dura ao acréscimo do número de variáveis do modelo do que o critério de Akaike. Para informações adicionais, consultar GUJARATI (2006).

Teste de hipótese

O teste estatístico de hipótese, segundo TRIOLA (2005), é “um procedimento padrão para testar uma afirmativa sobre uma propriedade da população”, ou seja, consiste na verificação da compatibilidade do valor de um coeficiente, obtido pela regressão, com alguma hipótese definida *a priori*.

A hipótese feita é denominada *hipótese nula* ou *sustentada*, simbolizada por H_0 , a qual é testada contra uma *hipótese alternativa*, simbolizada por H_1 .

Quando rejeitada a hipótese nula, diz-se que os resultados foram *estatisticamente significativos*, por outro lado, quando não rejeitada, diz-se que os resultados *não são estatisticamente significativos*.

Segundo GUJARATI (2006), se decidido “aceitar” a hipótese nula com base em um teste de significância, o que está sendo dito é que, com base na evidência amostral, não existe razão para rejeitá-la, o que não significa que a hipótese nula seja verdadeira, sem qualquer dúvida.

Segundo KMENTA (1971 apud GUJARATI 2006), “... tal como um tribunal emite um veredicto de “*não culpado*” e não de “*inocente*”, assim a conclusão de um teste estatístico é “*não rejeitamos*” em vez de “*aceitamos*” “.

Dentre as hipóteses que podem ser testadas, destaca-se o da significância de um determinado parâmetro, ou seja, se este parâmetro explica de alguma forma a variável dependente. Testa-se a hipótese nula de que o coeficiente deste parâmetro, $C_{(i)}$, assumo valor igual a zero, $H_0 : C_{(i)} = 0$. Caso esta hipótese não possa ser rejeitada, há a suspeita de que este parâmetro não explica a variável dependente, devendo ser eliminada do modelo.

Outros testes de hipóteses podem ser realizados a partir da teoria do problema analisado. Destacam-se, os seguintes testes: i) $H_0 : C_{(i)} = 1$, quando o valor de um dos coeficientes deve ser igual a unidade; ou ii) $H_0 : C_{(i)} = C_{(k)}$, quando o valor de dois coeficientes devem ser necessariamente iguais.

Como bem observa STOCK (2004), o *valor-p* é a probabilidade de obtenção de uma estatística do teste, por variação de amostragem aleatória, no mínimo tão oposta ao valor da hipótese nula como é a estatística de fato observada, supondo que a hipótese nula esteja correta. De modo equivalente, o *valor-p* é o menor nível de significância em que se pode rejeitar a hipótese nula.

Teste de Normalidade

Para a aplicação do teste de hipótese deve ser verificado a priori a normalidade dos resíduos. O teste de normalidade de Jarque-Bera, JB , dada pela equação

$$JB = n \times \left(\frac{Sk^2}{6} + \frac{(Kt-3)^2}{24} \right) \sim \chi^2_{2gl},$$

verifica se o Skewness, Sk , e a curtose, Kt , da série

difere significativamente das mesmas medidas no caso de distribuição normal. O valor deste teste, para a distribuição normal é zero.

Skewness, $Sk = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\hat{s}} \right)^3$, é uma medida de assimetria. Para distribuições

simétricas como a normal, o valor da assimetria é zero. Valores positivos indicam assimetria para a direita e valores negativos indicam assimetria para a esquerda.

$\hat{s} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ é o desvio padrão baseado no estimador viesado da variância.

Curtose, $Sk = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\hat{s}} \right)^4$ É uma medida de elevação ou achatamento da

distribuição da série. Seu valor para a distribuição normal é três. Se seu valor excede este valor a distribuição é dita leptocurtica (fina ou de cauda longa). Se seu valor é inferior a três a distribuição é chamada platicúrtica (gorda ou de cauda curta).

Segundo SOARES & CASTELAR (2003), a probabilidade do teste de Jarque-Bera indica o menor nível de significância para o qual se rejeita a hipótese nula (normalidade da distribuição). Um valor baixo desta probabilidade leva a rejeição da hipótese nula de normalidade. Assintoticamente, a estatística segue a distribuição qui-quadrado com 2 graus de liberdade.

APÊNDICE B

GRÁFICOS DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES NOS VOLUMES ADIMENSIONAIS EVAPORADO, VERTIDO E REGULARIZADO

Os gráficos apresentados neste apêndice representam o comportamento esperado das vazões adimensionais evaporada, vertida e regularizada (VE , VS e VR , respectivamente), obtidos através da aplicação das regressões desenvolvidas neste trabalho, quando se altera o valor de uma determinada variável independente (CV , FK , FE , I e G).

Observa-se que os gráficos devem ser utilizados quando se atendem, em conjunto, as seguintes limitações: $0,00 \leq VE \leq 0,90$, $0,05 \leq VS \leq 0,95$ e $0,05 \leq VR \leq 0,95$. No limite, considerando a possibilidade de erros superiores aos descritos neste trabalho, devem ser atendidas em conjunto as seguintes limitações: $0,0 \leq VE \leq 1,0$, $0,0 \leq VS \leq 1,0$ e $0,0 \leq VR \leq 1,0$.

As Figuras B.1 a B.5 da Seção B.1, apresentam o comportamento esperado de VE quando se altera o valor das variáveis independentes CV , FK , FE , I e G , respectivamente, quando considerada garantia mensal.

As Figuras B.6 a B.10 da Seção B.2, apresentam o comportamento esperado de VS quando se altera o valor das variáveis independentes CV , FK , FE , I e G , respectivamente, quando considerada garantia mensal.

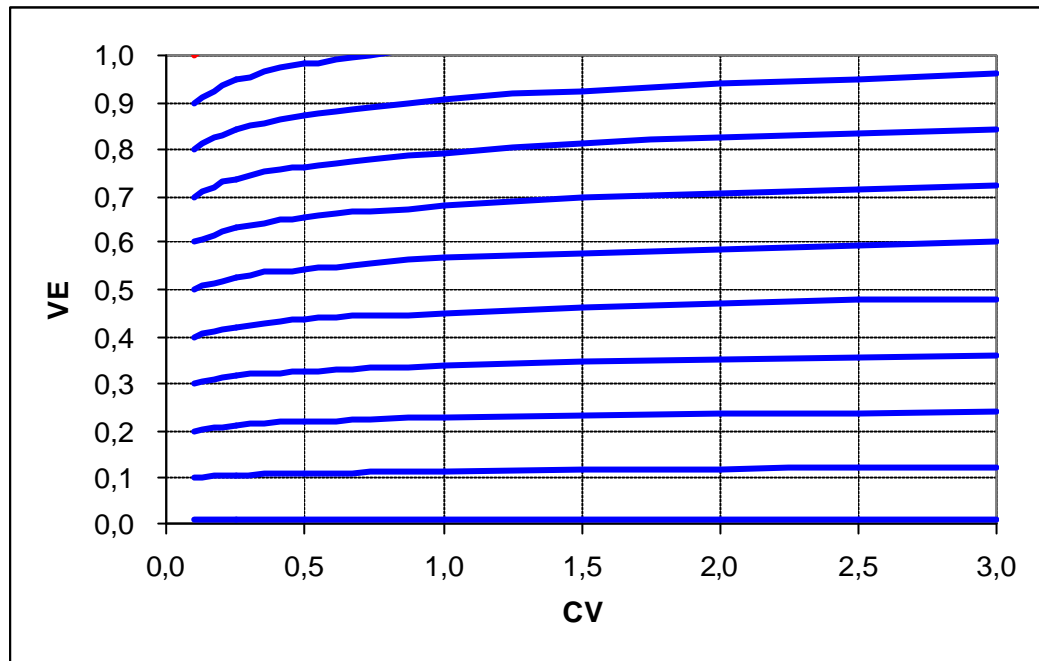
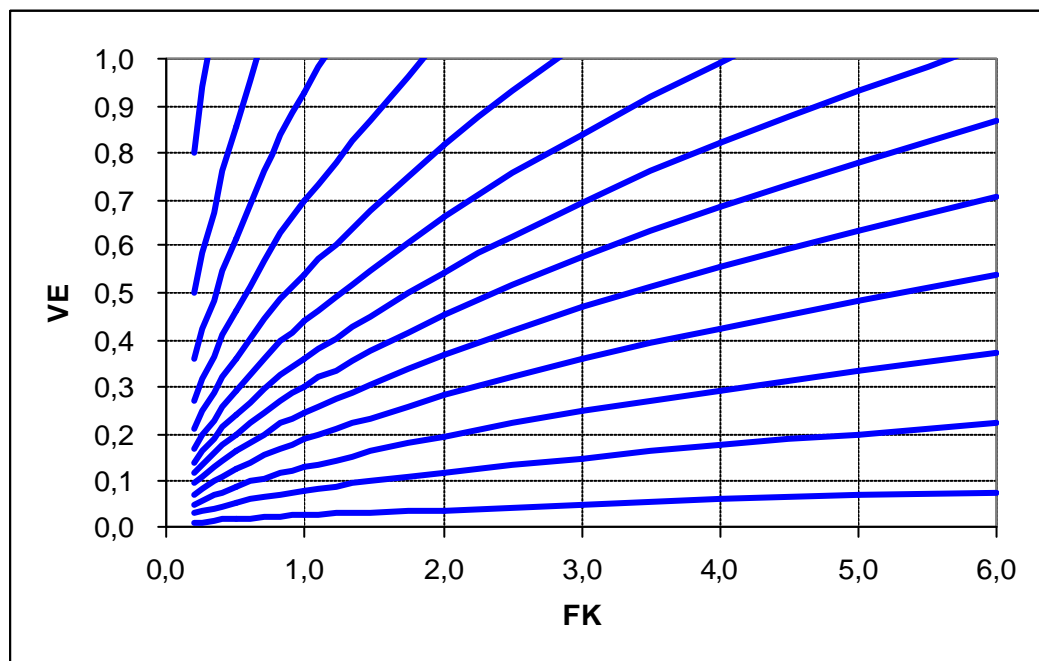
As Figuras B.11 a B.15 da Seção B.3, apresentam o comportamento esperado de VR quando se altera o valor das variáveis independentes CV , FK , FE , I e G , respectivamente, quando considerada garantia mensal.

As Figuras B.16 a B.20 da Seção B.4, apresentam o comportamento esperado de VE quando se altera o valor das variáveis independentes CV , FK , FE , I e G , respectivamente, quando considerada garantia anual.

As Figuras B.21 a B.25 da Seção B.5, apresentam o comportamento esperado de VS quando se altera o valor das variáveis independentes CV , FK , FE , I e G , respectivamente, quando considerada garantia anual.

As Figuras B.26 a B.30 da Seção B.6, apresentam o comportamento esperado de VR quando se altera o valor das variáveis independentes CV , FK , FE , I e G , respectivamente, quando considerada garantia anual.

As figuras que analisam a influência de I foram determinadas considerando $b=3$.

B.1 VOLUME ADIMENSIONAL EVAPORADO – GARANTIA MENSALFigura B.1 – Influência de CV em VE , considerando garantia mensal.Figura B.2 – Influência de FK em VE , considerando garantia mensal.

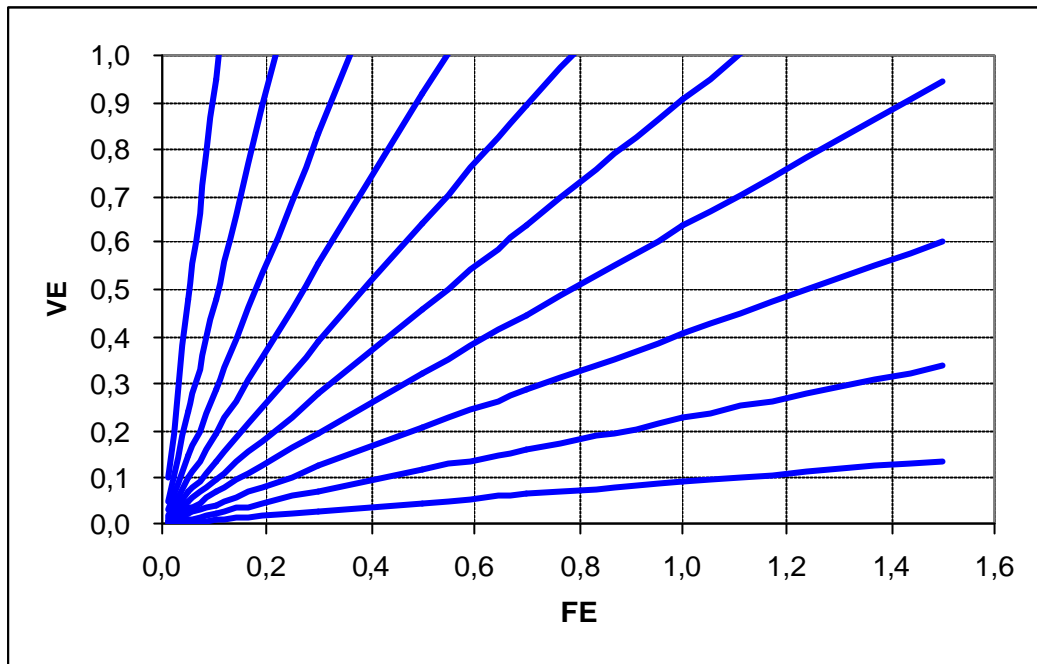


Figura B.3 – Influência de FE em VE , considerando garantia mensal.

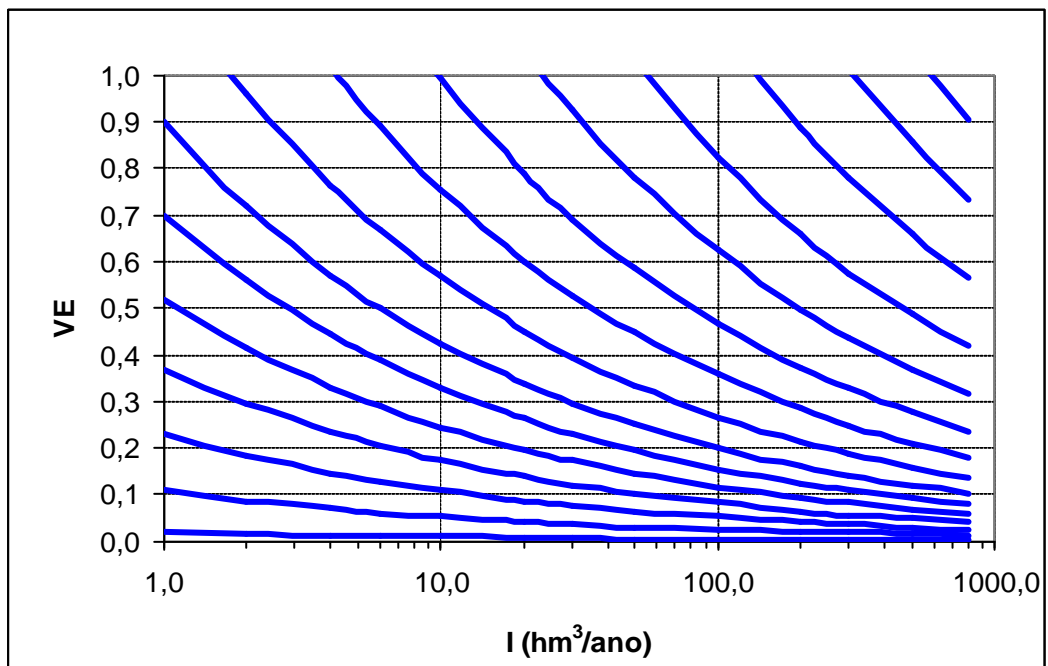


Figura B.4 – Influência de I (hm^3/ano) em VE , considerando garantia mensal, $b=3$.

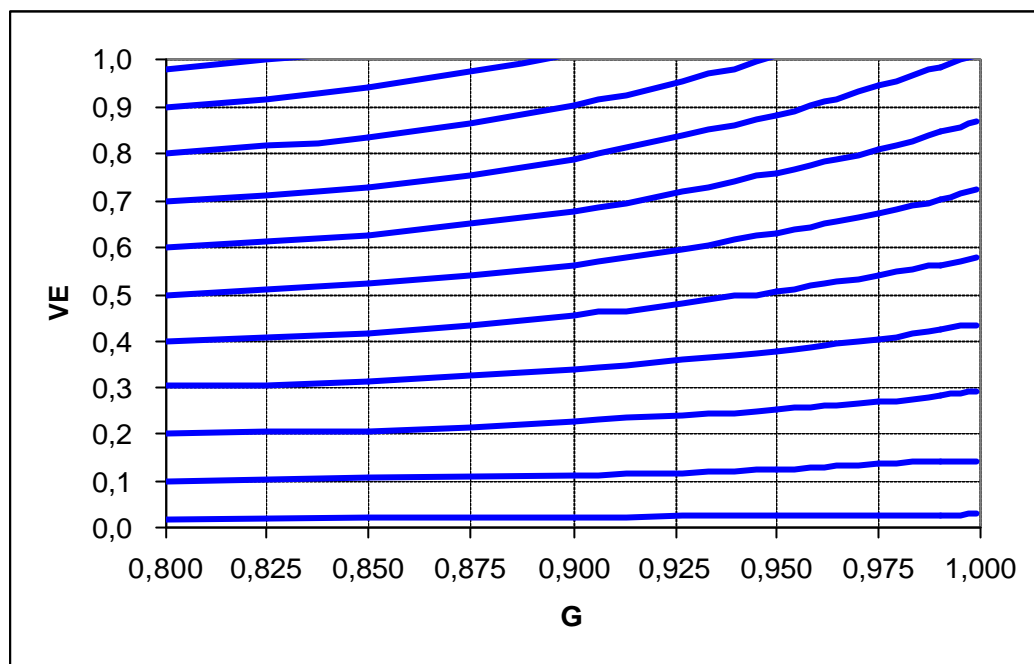
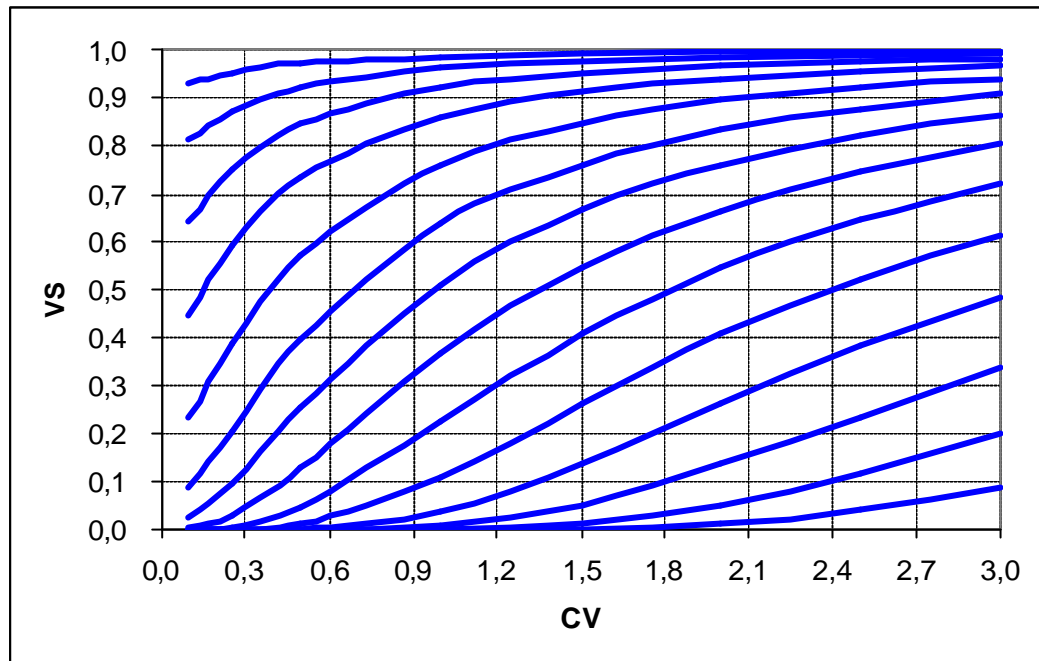
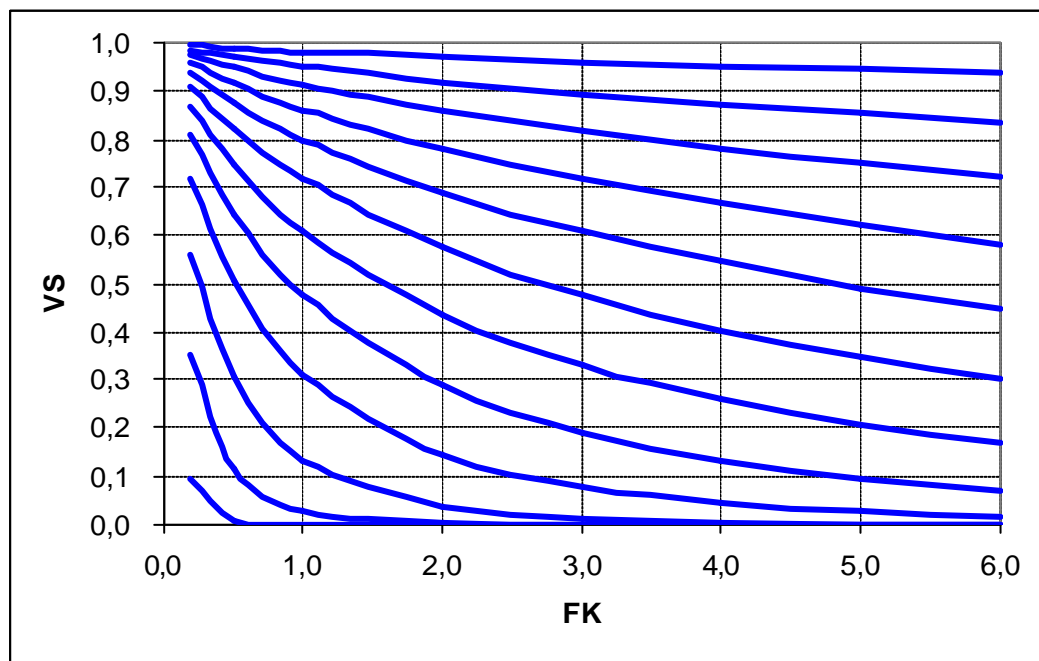


Figura B.5 – Influência de G em VE , considerando garantia mensal.

B.2 VOLUME ADIMENSIONAL VERTIDO – GARANTIA MENSALFigura B.6 – Influência de *CV* em *VS*, considerando garantia mensalFigura B.7 – Influência de *FK* em *VS*, considerando garantia mensal.

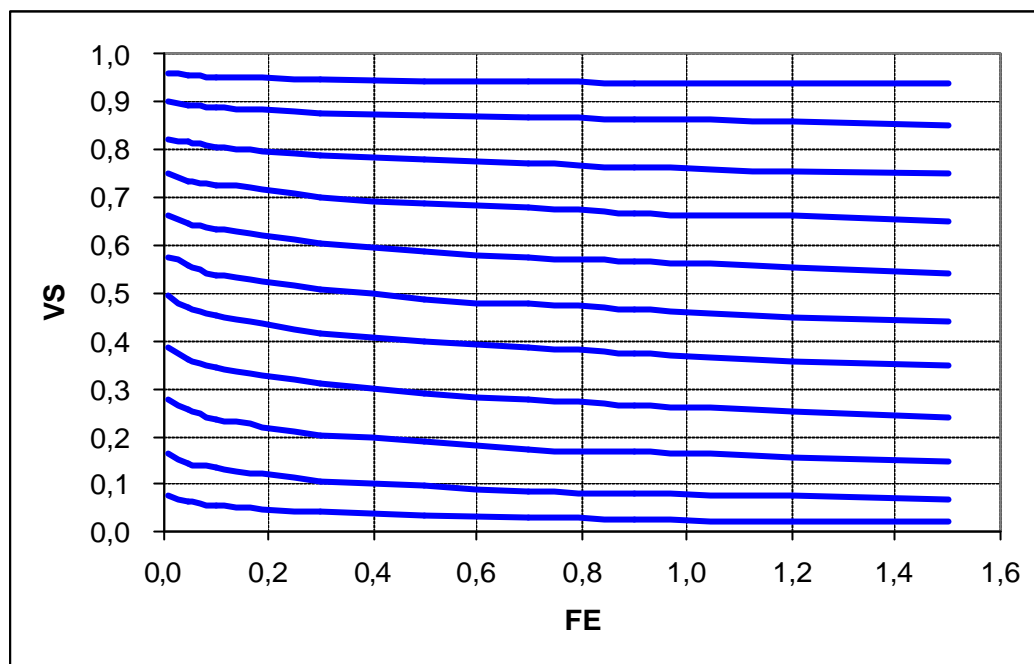


Figura B.8 – Influência de FE em VS , considerando garantia mensal.

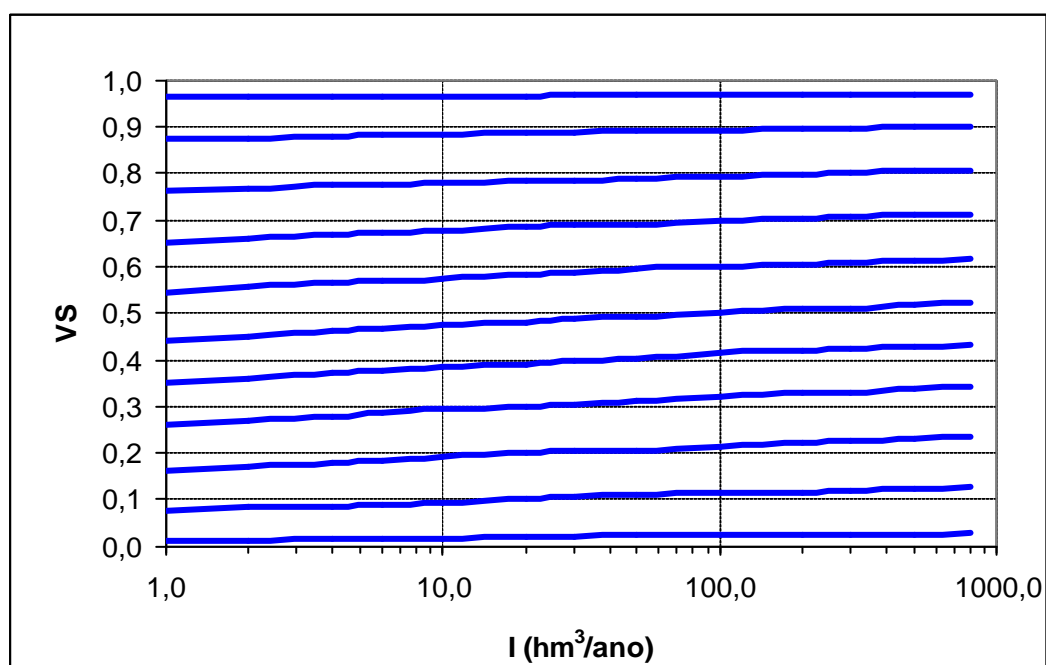


Figura B.9 – Influência de I (hm^3/ano) em VS , considerando garantia mensal, $b=3$.

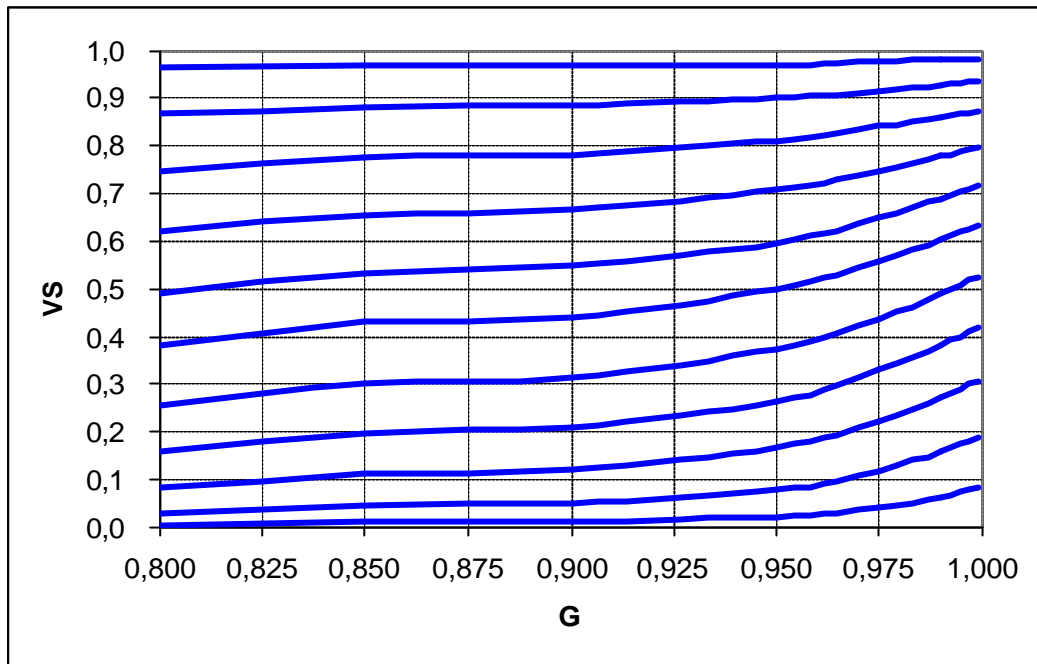
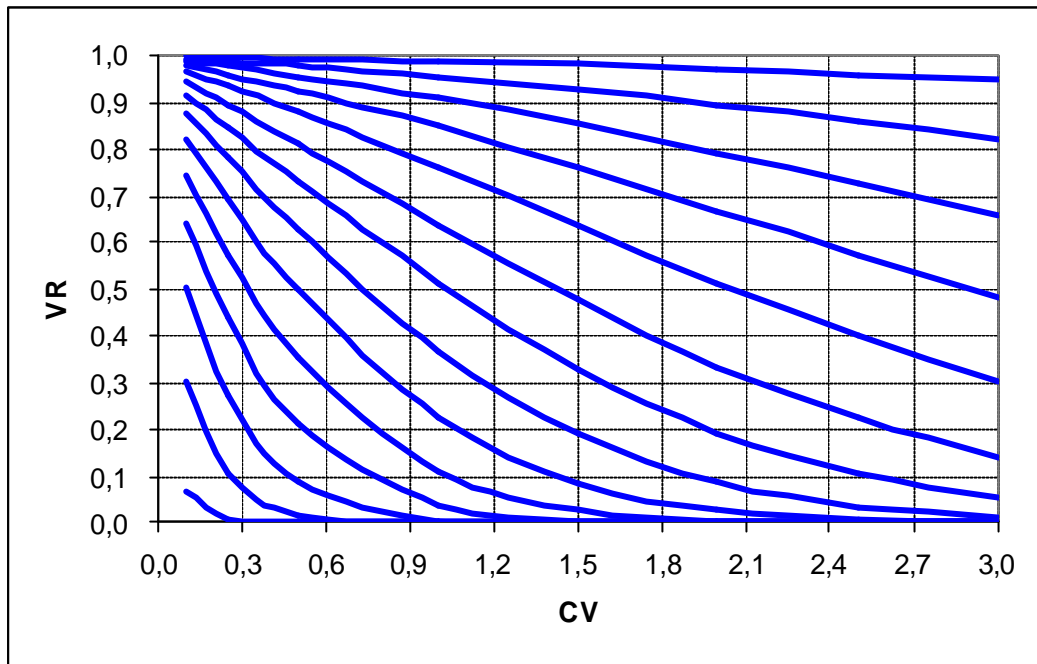
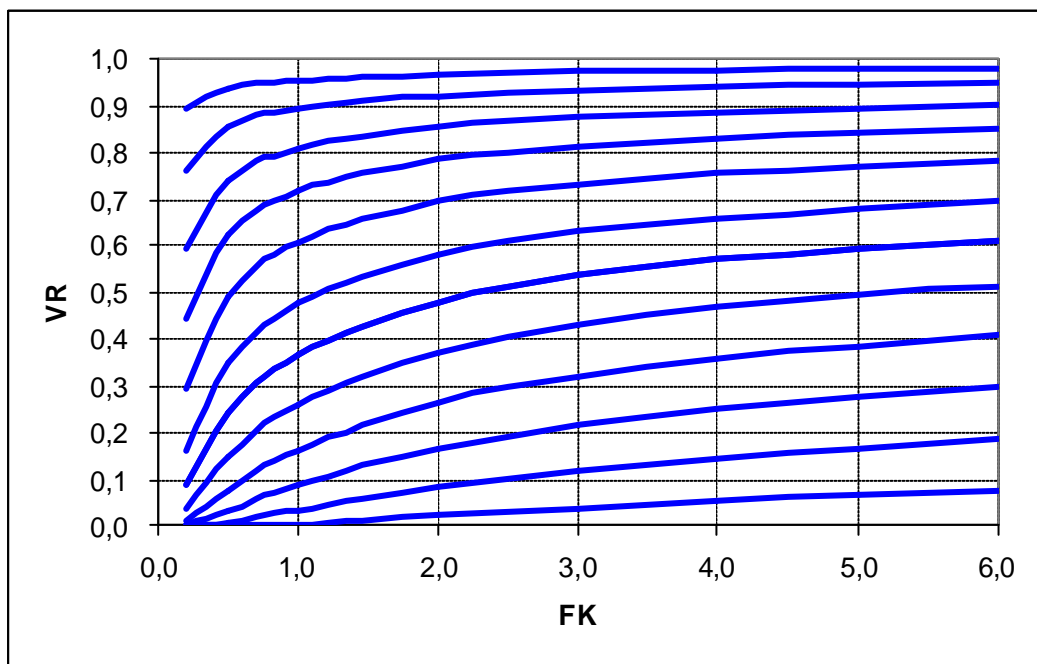


Figura B.10 – Influência de G em VS , considerando garantia mensal.

B.3 VOLUME ADIMENSIONAL REGULARIZADO – GARANTIA MENSALFigura B.11 – Influência de CV em VR , considerando garantia mensal.Figura B.12 – Influência de FK em VR , considerando garantia mensal.

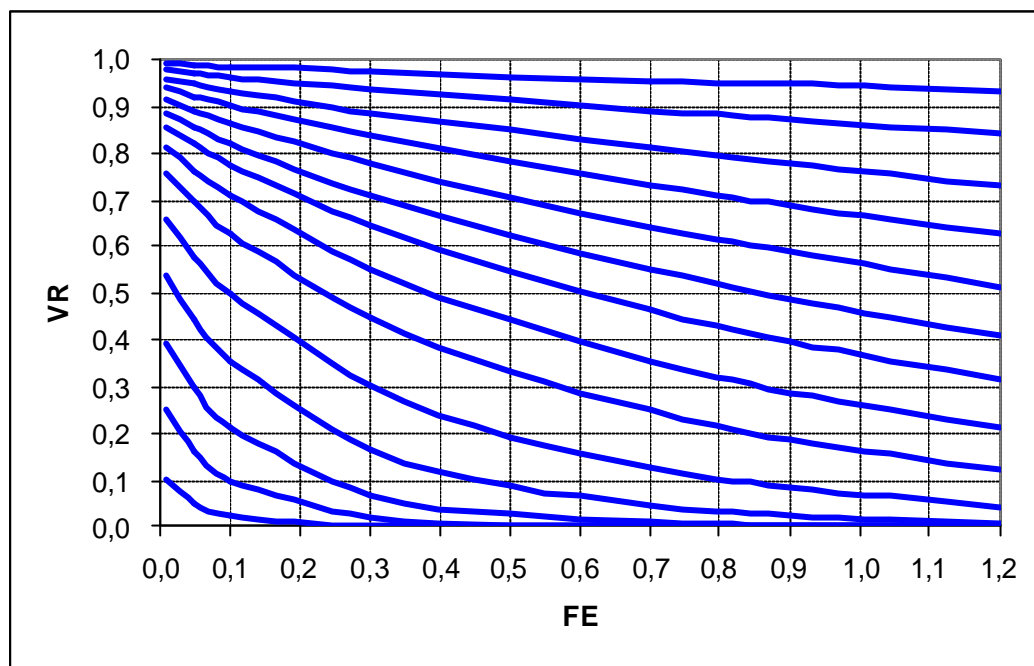


Figura B.13 – Influência de FE em VR , considerando garantia mensal.

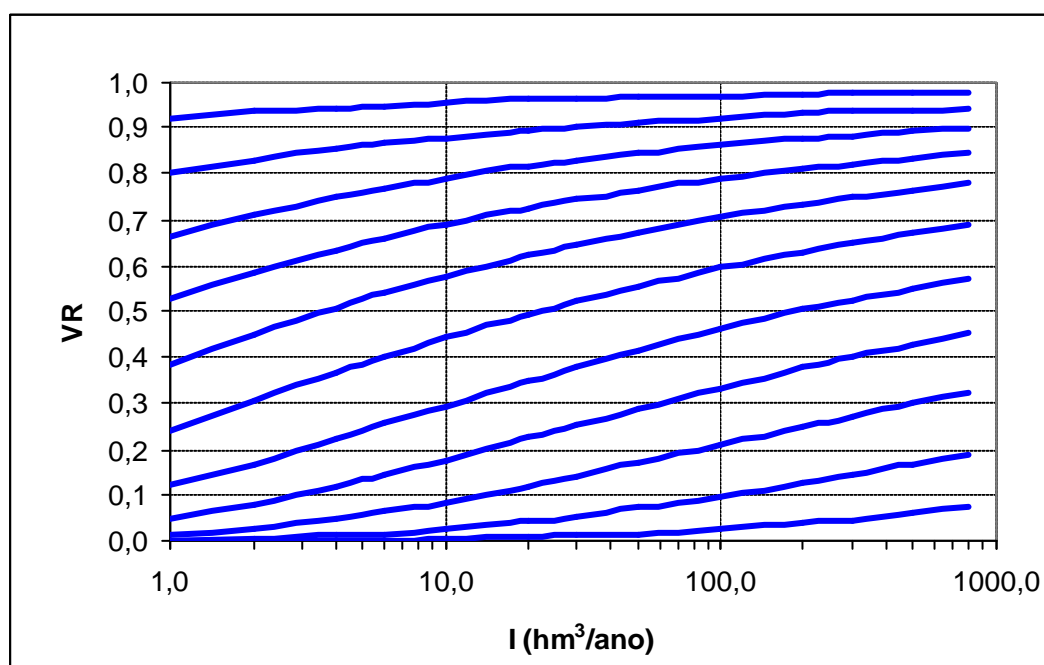


Figura B.14 – Influência de I (hm^3/ano) em VR , considerando garantia mensal, $b=3$.

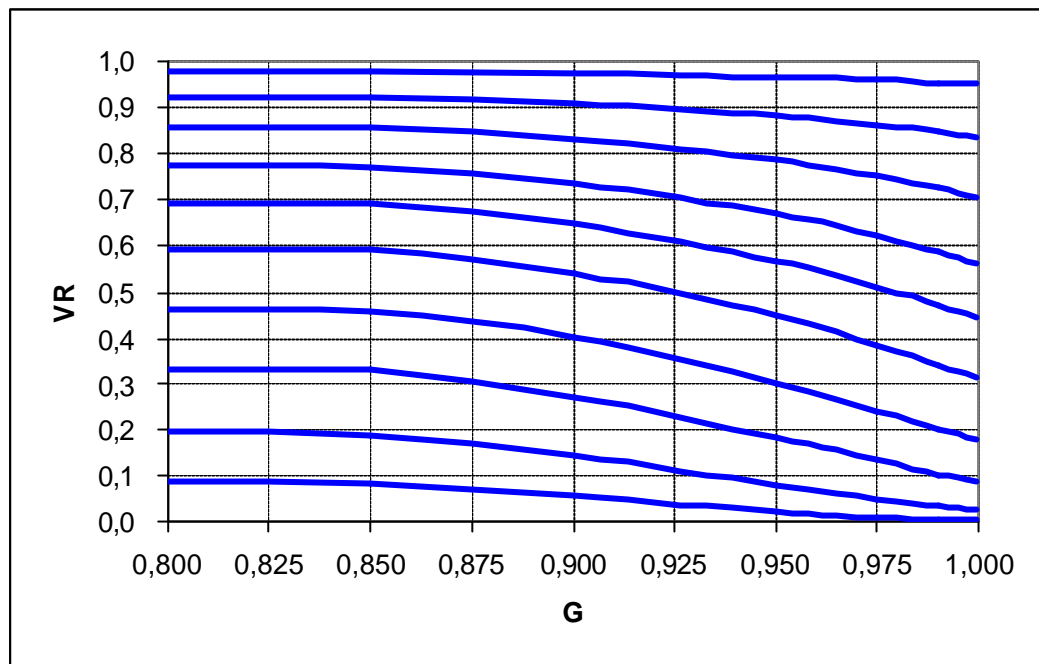


Figura B.15 – Influência de G em VR , considerando garantia mensal.

B.4 VOLUME ADIMENSIONAL EVAPORADO – GARANTIA ANUAL

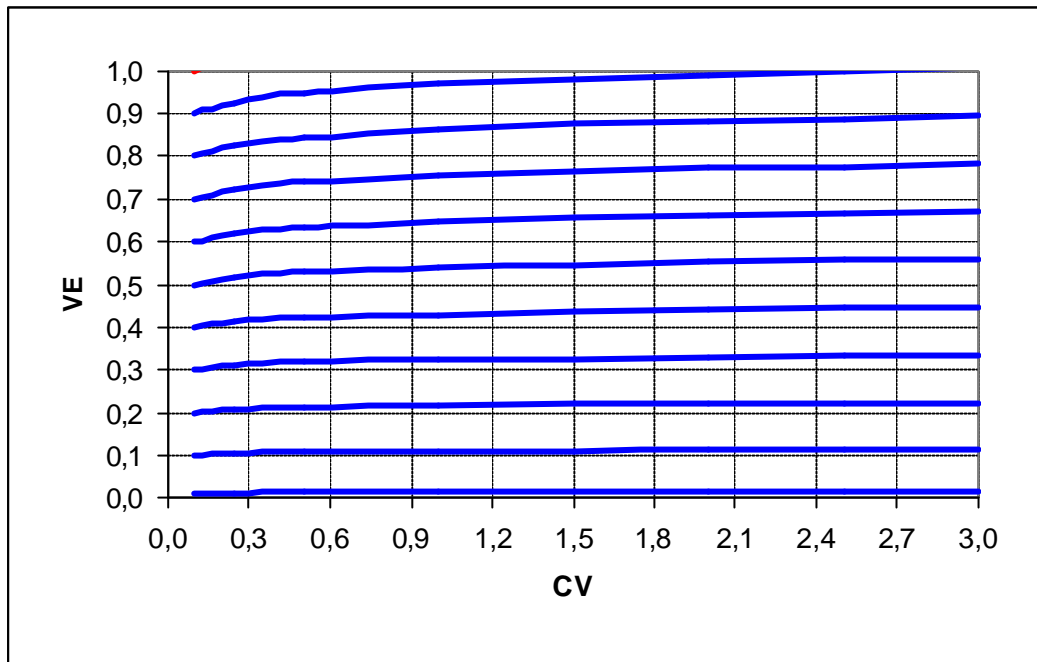


Figura B.16 – Influência de CV em VE , considerando garantia anual.

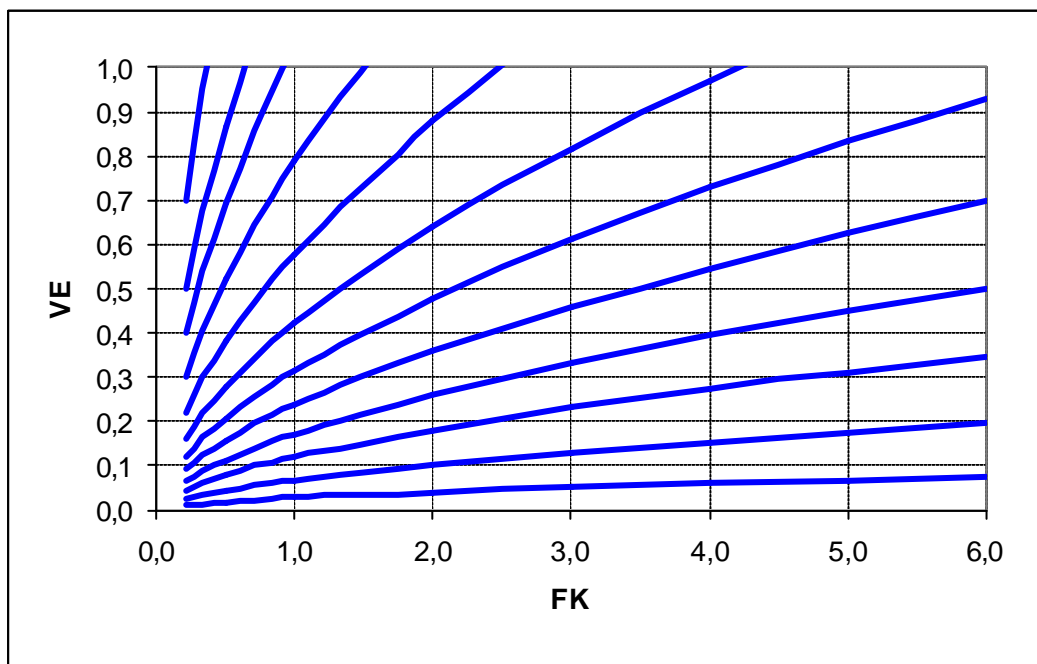


Figura B.17 – Influência de FK em VE , considerando garantia anual.

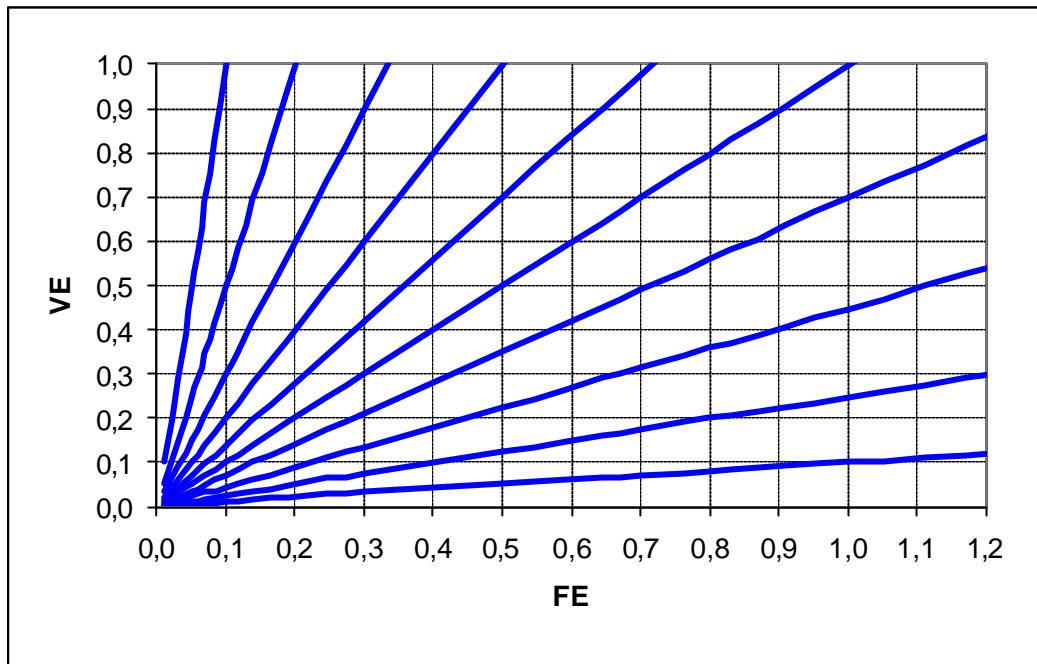


Figura B.18 – Influência de FE em VE , considerando garantia anual.

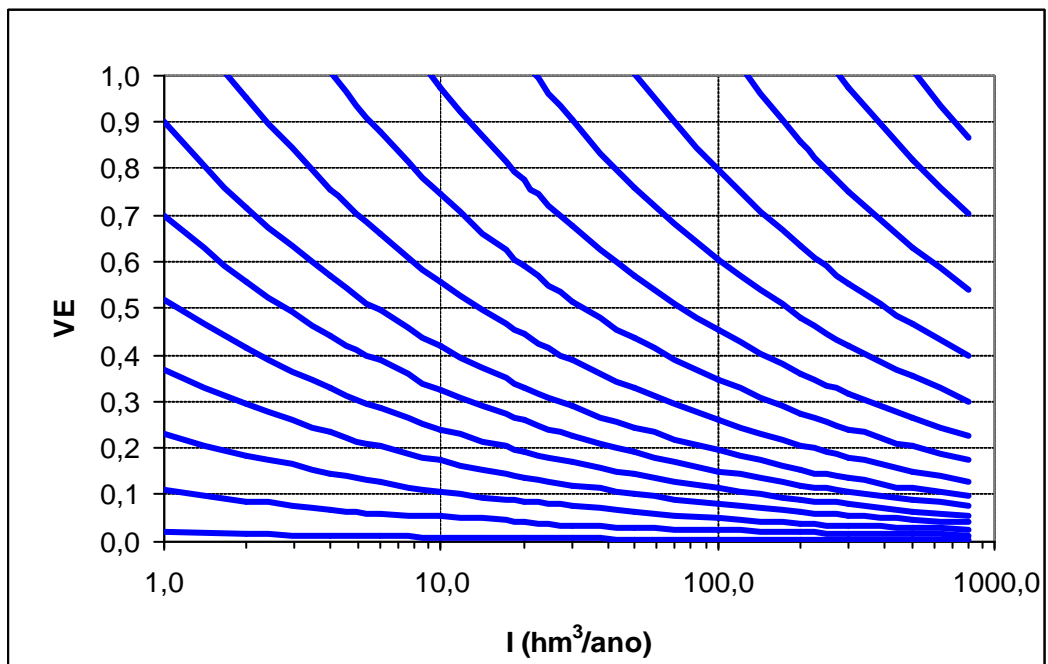


Figura B.19 – Influência de I (hm^3/ano) em VE , considerando garantia anual, $b=3$.

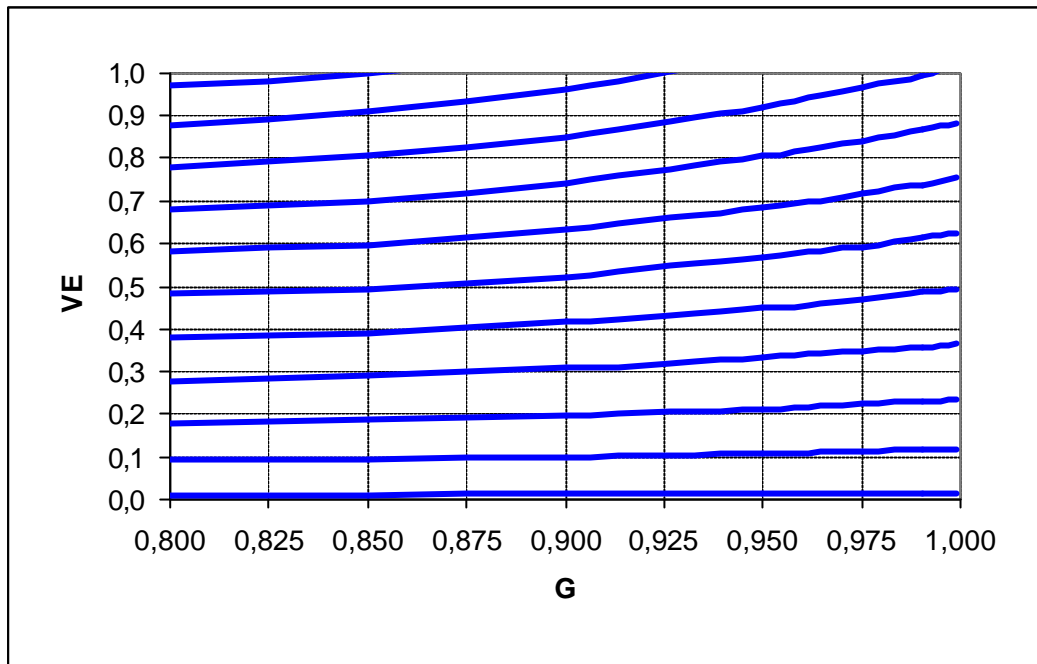
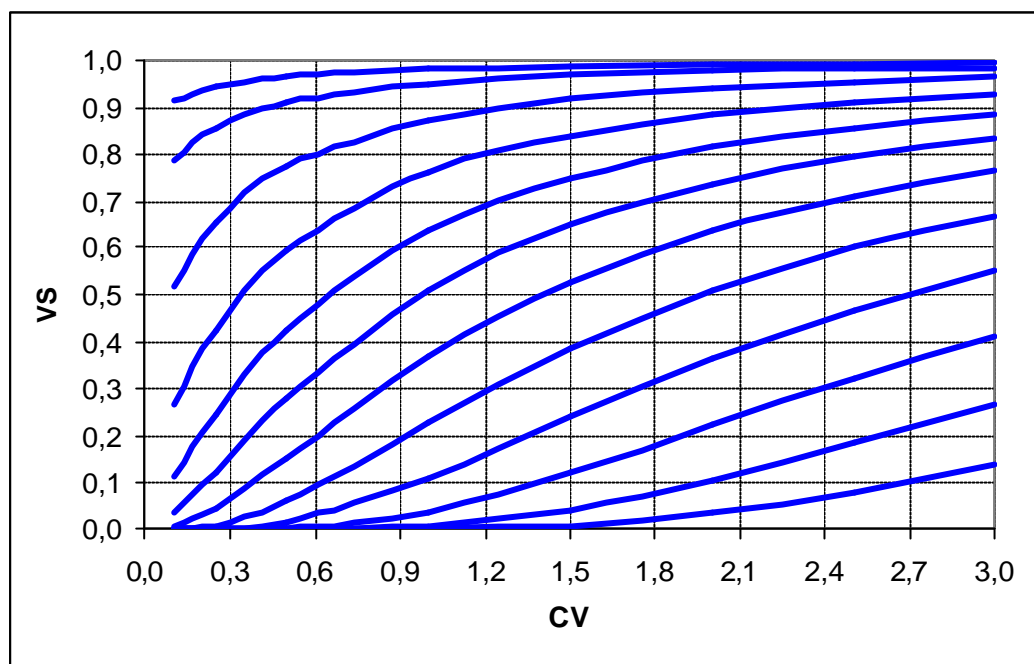
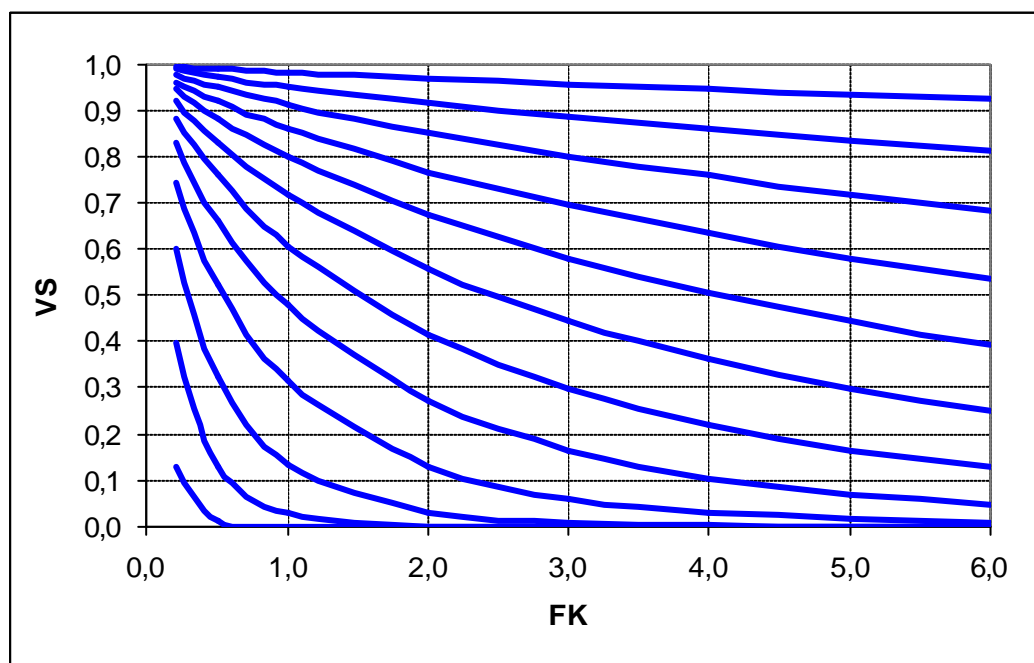


Figura B.20 – Influência de G em VE , considerando garantia anual.

B.5 VOLUME ADIMENSIONAL VERTIDO – GARANTIA ANUALFigura B.21 – Influência de CV em VS , considerando garantia anual.Figura B.22 – Influência de FK em VS , considerando garantia anual.

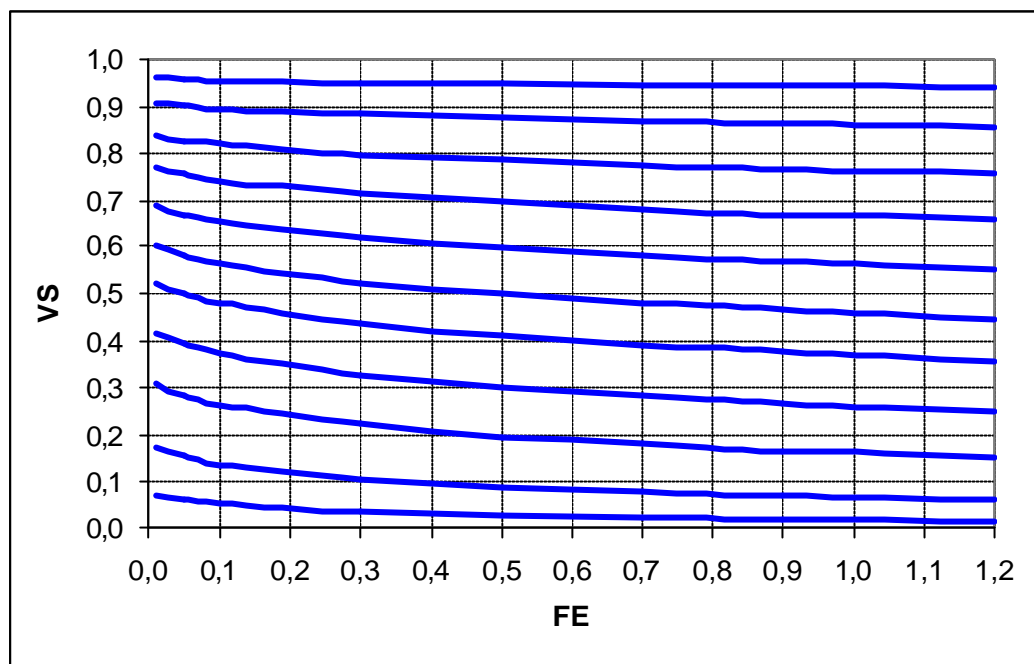


Figura B.23 – Influência de FE em VS , considerando garantia anual.

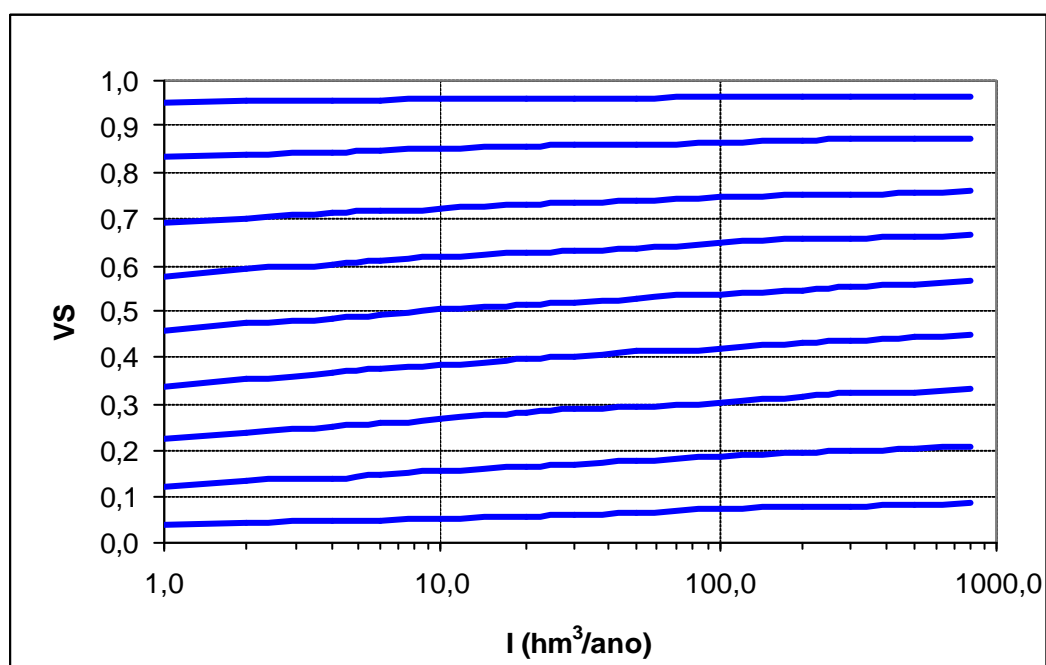


Figura B.24 – Influência de I (hm^3/ano) em VS , considerando garantia anual, $b=3$.

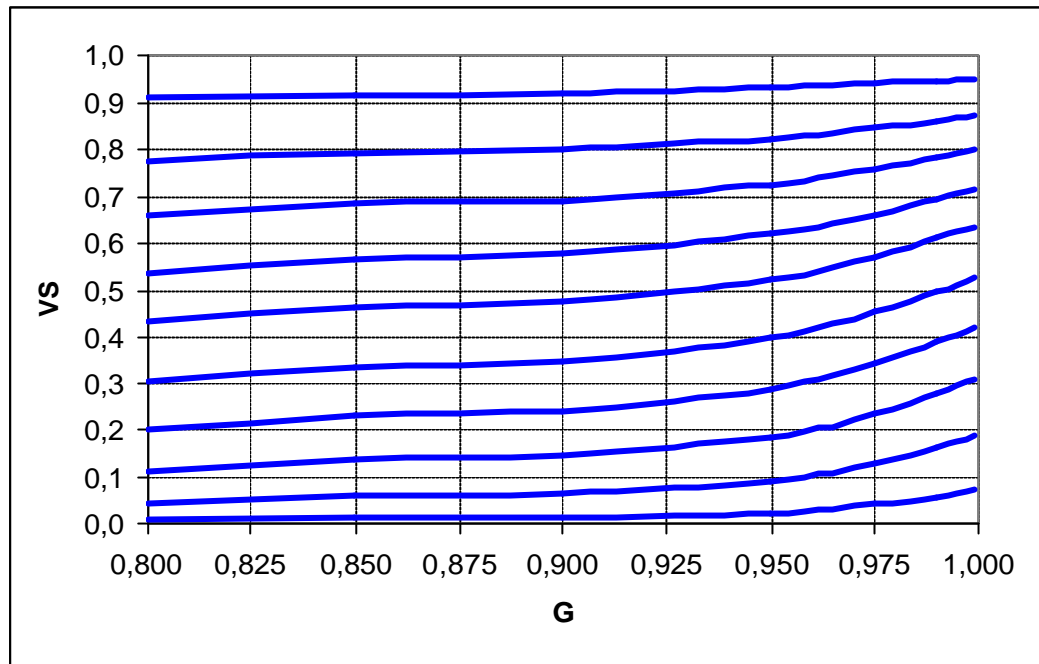
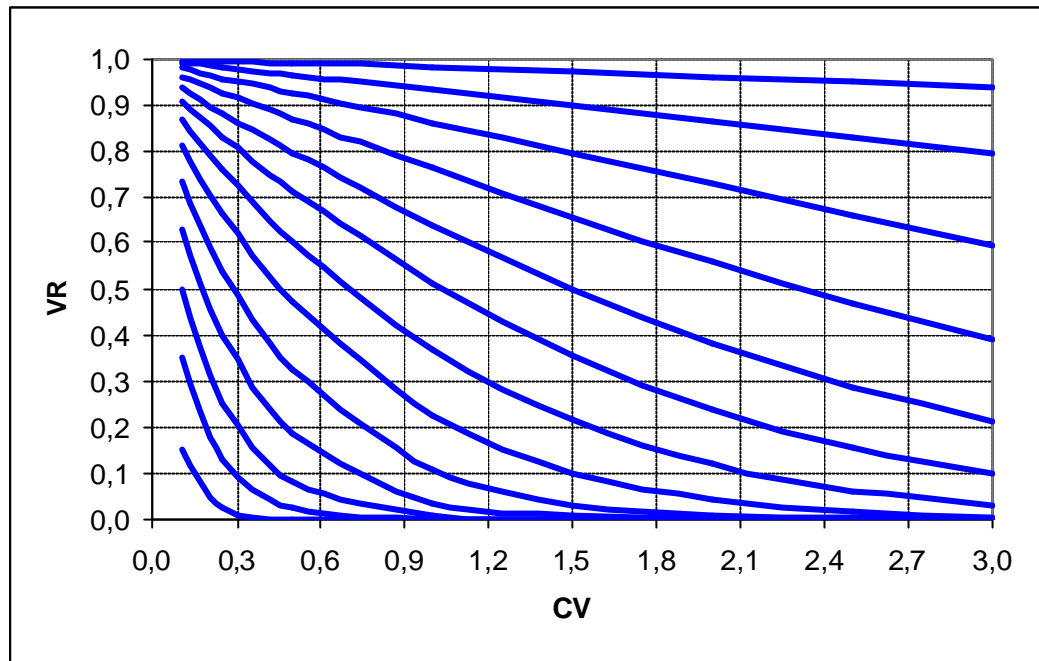
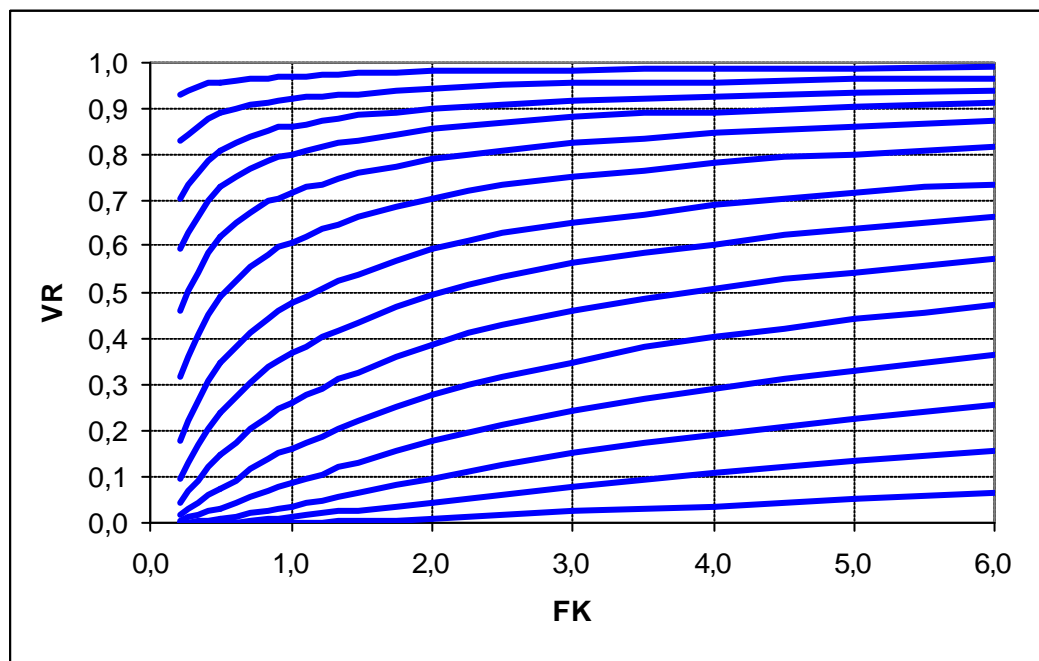


Figura B.25 – Influência de G em VS , considerando garantia anual.

B.6 VOLUME ADIMENSIONAL REGULARIZADO – GARANTIA ANUALFigura B.26 – Influência de CV em VR , considerando garantia anual.Figura B.27 – Influência de FK em VR , considerando garantia anual.

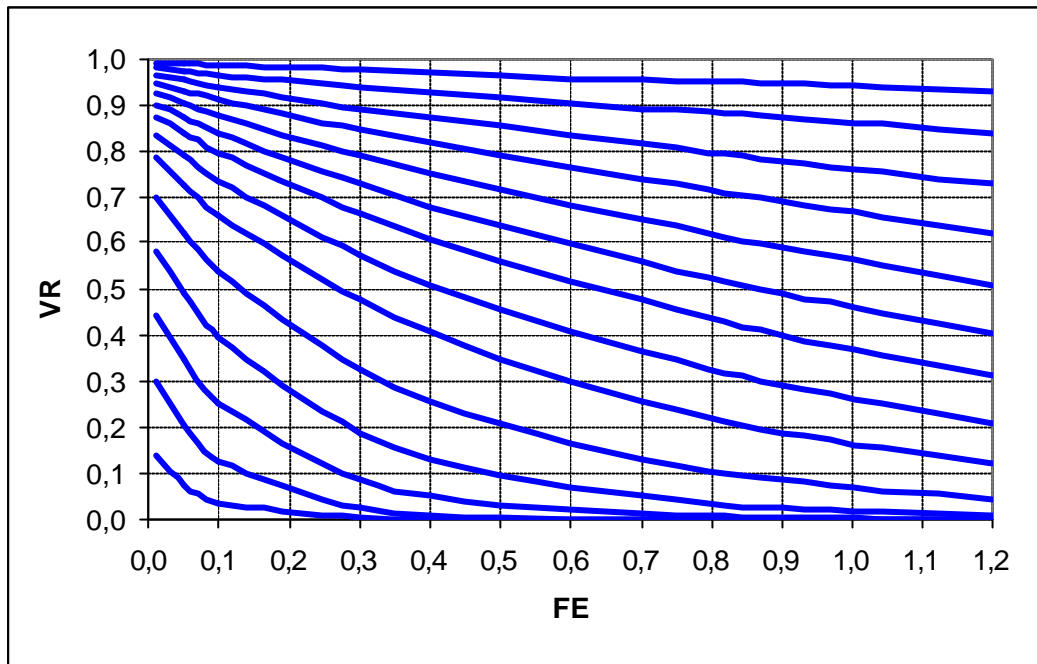


Figura B.28 – Influência de FE em VR , considerando garantia anual.

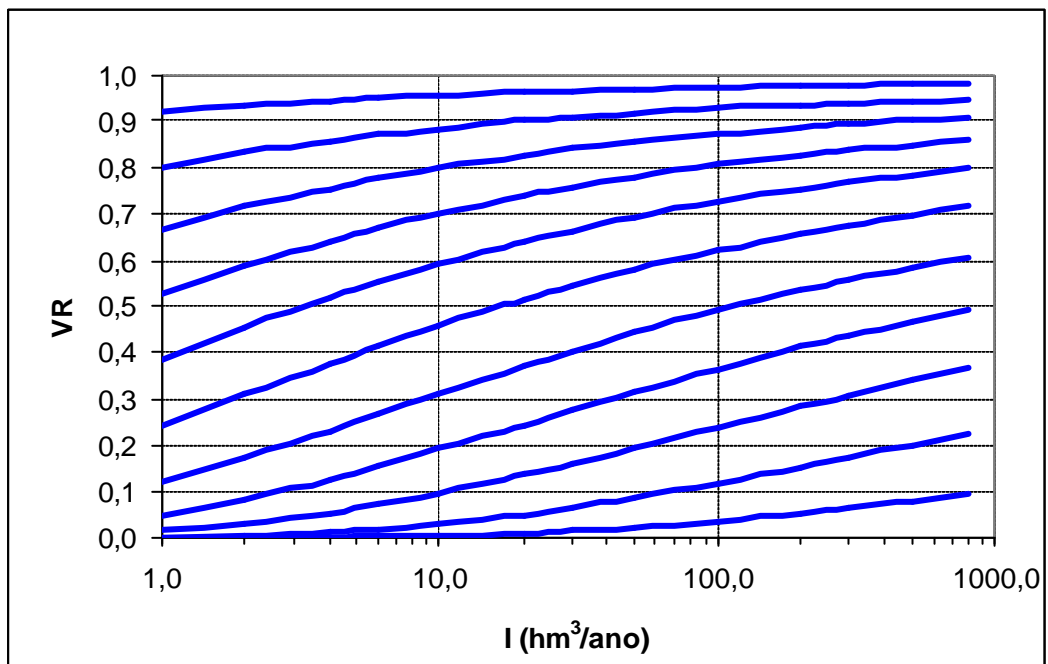


Figura B.29 – Influência de I (hm^3/ano) em VR , considerando garantia anual, $b=3$.

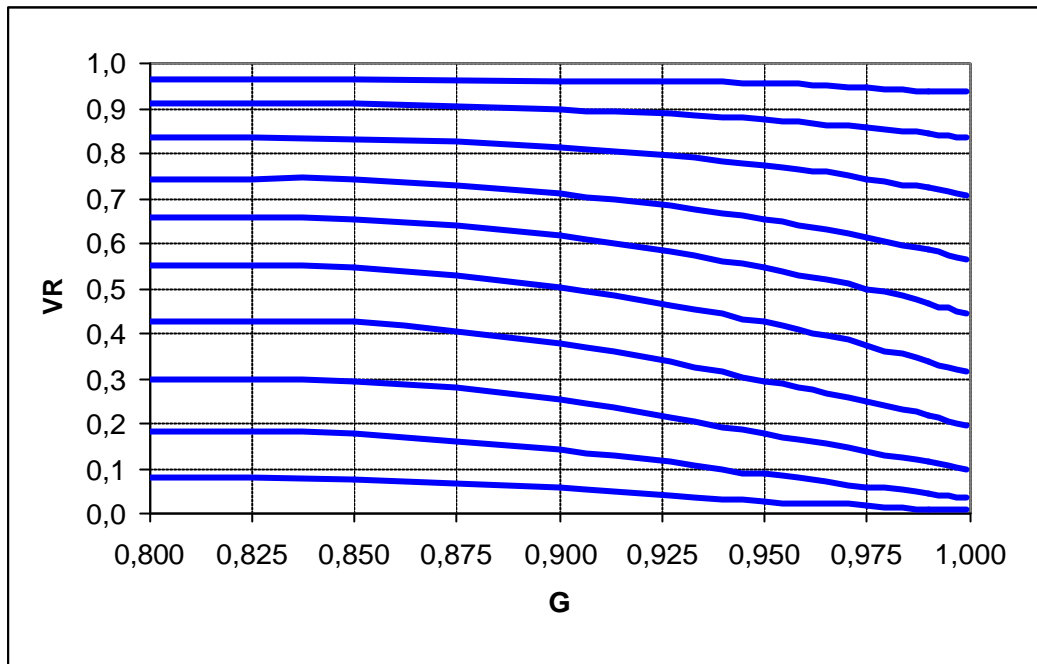


Figura B.30 – Influência de G em VR , considerando garantia anual.