



Campus de São Carlos

**ESTUDO DA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE UM SISTEMA
DE RESERVATÓRIOS CONSIDERANDO A EVAPORAÇÃO
ATRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO**

TIBERIO MAGALHÃES PINHEIRO

ORIENTADORA: Profa. Dra. LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação - EESC/USP



EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 07 / 11 / 03

Ass.: Leandro Corcioli

ESTUDO DA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE UM SISTEMA DE RESERVATÓRIOS CONSIDERANDO A EVAPORAÇÃO ATRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO

DEDALUS - Acervo - EESC



31100044235

Tibério Magalhães Pinheiro



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

ORIENTADORA: Prof. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis

São Carlos
2003

Class.	747E-EESC
Crit.	4425
Tombo	T325/03
Servo	1349776

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

P654e

Pinheiro, Tiberio Magalhães

Estudo da operação otimizada de um sistema de reservatórios considerando a evaporação através de algoritmo genético híbrido / Tiberio Magalhães Pinheiro. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Hidráulica e Saneamento.

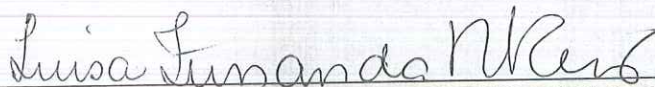
Orientador: Prof^a. Dr^a. Luisa Fernanda Ribeiro Reis.

1. Operação otimizada. 2. Sistema de reservatórios. 3. Evaporação. 4. Algoritmo genético. 5. Programação linear. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

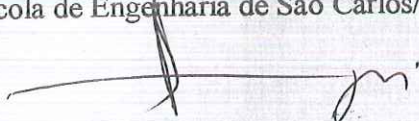
Candidato: Engenheiro **TIBÉRIO MAGALHÃES PINHEIRO**

Dissertação defendida e julgada em 22-08-2003 perante a Comissão Julgadora:



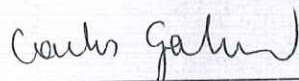
Profa. Assoc. **LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



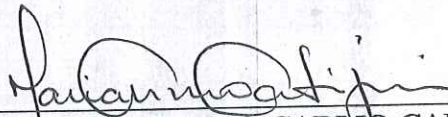
Prof. Tit. **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO**
(Universidade Federal da Paraíba/UFPb)

APROVADO



Profª. Associada **MARIA DO CARMO CALJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*À minha mãe,
por seu amor e incondicional apoio.*

*“Segue teu caminho,
rega as tuas plantas,
ama as tuas rosas.
O resto é a sombra
de árvores alheias.”*
(Fernando Pessoa)

AGRADECIMENTOS

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

Ao CNPq, pelo apoio financeiro ao Projeto Temático (CT-HIDRO 01/2001) “Instrumentos do Uso Racional e Otimizado da Água em Meio Urbano”, do qual este trabalho é parte integrante.

Às Secretárias do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Sá, Pavi e Rose, pelo carinho sempre demonstrado, atenção e presteza.

Aos professores e funcionários do SHS pelas diversas vezes em que, com muita dedicação, me acompanharam e auxiliaram nas mais diversas etapas deste mestrado, em especial ao Prof. Fazal, pela sempre bem humorada co-orientação do início ao fim desta jornada.

Ao colega Assis, pelas idéias e ajuda da obtenção de dados sobre o sistema.

A VBA Consultores, por disponibilizar os dados do Plano de Gerenciamento das Bacias Metropolitanas.

Aos amigos de São Carlos, em especial à turma da república Tijolinho e agregados, pelo companheirismo e amizade de todas as horas.

À Luciana Hespanholo, um belo presente nos momentos finais deste trabalho, pelo carinho e compreensão.

Aos meus irmãos, Jorge e Rafael, pela amizade, companheirismo e eterna cumplicidade.

Ao Caú, pela amizade e bom humor de sempre.

Ao meu pai, pelo exemplo e “vigilante” incentivo ao crescimento pessoal e profissional, não só durante esta fase da minha vida.

À minha orientadora Profa. Luísa Fernanda Ribeiro Reis, por ter sido, as vezes, a pessoa que valorizou este trabalho até mais do que eu, além da sua enorme paciência e incansável busca pelo “ótimo”.

Agradeço

SUMÁRIO

<i>Lista de Figuras</i>	<i>i</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>viii</i>
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO	22
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	24
4.1.1 <i>Caracterização Fisiográfica</i>	24
4.1.2 <i>Clima</i>	28
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS FATORES SÓCIO-ECONÔMICOS.....	33
4.2.1 <i>Demografia</i>	33
4.2.2 <i>Pluviometria</i>	42
4.3 CURVAS COTA – ÁREA – VOLUME DOS RESERVATÓRIOS EM ESTUDO	45
4.4 ESTUDO DE DEMANDA.....	45
5. MATERIAIS E MÉTODOS	52
5.1. MÉTODO PROPOSTO POR REIS ET AL. (2003)	53
5.1.1 <i>Método de Busca</i>	54
5.2. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO.....	56
5.2.1 <i>Rotina GERADORA</i>	57
5.2.2 <i>Rotina CLASSIFICADORA</i>	58
5.2.3 <i>Rotina CRUZMUTA</i>	58
5.2.4 <i>Rotina AVALIADORA</i>	59
5.3. MATERIAIS	69

6. ALGORITMOS GENÉTICOS	70
6.1 TERMINOLOGIA DOS AGs / ANALOGIA BIOLÓGICA	72
6.2 IMPLEMENTAÇÃO DE AGs.....	74
6.3 REPRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES	75
6.4 TIPOS DE AGs	75
6.5 SELEÇÃO DE PAIS	75
6.6 RECOMBINAÇÃO.....	77
6.7 MUTAÇÃO	79
6.8 ELITISMO.....	80
6.9 CONDIÇÃO DE FINALIZAÇÃO	81
6.10 CONFIGURAÇÃO DOS AGs E ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE CONTROLE.....	82
6.11 VANTAGENS E DIFICULDADES ASSOCIADAS AO EMPREGO DOS AGs	82
6.12 IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE AGs PARA O PROBLEMA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.....	83
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
7.1 TESTES DE CONVERGÊNCIA DO PROCEDIMENTO ITERATIVO PARA AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO	89
7.2 POPULAÇÕES ALEATÓRIAS INICIAIS DISTINTAS	92
7.3 VALOR DE G.....	93
7.4 NÚMERO DE GERAÇÕES	95
7.4.1 <i>Volume Inicial dos Reservatórios → volume mínimo;</i>	95
7.4.2 <i>Volume Inicial dos Reservatórios → metade do volume máximo;</i> ...	96
7.4.3 <i>Volume Inicial dos Reservatórios → volume máximo;</i>	97
7.5 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO COM OS 30 ANOS DE DADOS	99
7.5.1 <i>Pesos Compensatórios</i>	100
7.5.2 <i>Análise das Estratégias Operacionais Otimizantes Obtidas</i>	105
8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	155
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Bacias hidrográficas do Estado do Ceará	25
Figura 4.2 – Bacias Metropolitanas – Sistema Pacajus – Pacoti/Riachão – Gavião	26
Figura 4.3 – Curva Cota – Área – Volume (Pacajus).....	49
Figura 4.4 – Curva Cota – Área – Volume (Pacoti/Riachão)	50
Figura 4.5 – Curva Cota – Área – Volume (Gavião)	51
Figura 5.1 – Esquema de aplicação do algoritmo genético.....	57
Figura 5.2 – Sub-rotinas do programa principal	59
Figura 5.3 – Matriz de coeficientes representativos das restrições dos problemas de programação linear (PL)	65
Figura 5.4 – Esquema representativo do sistema Pacajus – Pacoti/Riachão – Gavião	66
Figura 5.5 – Limites inferior e superior das variáveis de decisão do problema de programação linear.....	68
Figura 5.6 – Fluxograma representativo do programa computacional implementado.....	70
Figura 5.7 – Algoritmo da Sub-rotina de Cálculo da Evaporação em um dado Estágio	71
Figura 6.1 – Métodos de seleção por Amostragem Estocástica com Substituição (Roleta) e Amostragem Estocástica Universal.....	79
Figura 6.2 – Exemplo de cruzamentos de 1 ponto, 2 pontos e uniforme.....	82
Figura 6.3 – Exemplo de Mutação (simples troca)	83

Figura 7.1 – Número de Iterações para as tolerâncias pré-estabelecidas.....	93
Figura 7.2 – Valores de evaporação do reservatório Pacajus para os volumes inicial e final a cada iteração no estágio 2	95
Figura 7.3 – Valores de Custo e F.O. para os diversos valores de G .	97
Figura 7.4 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (Vmin).....	99
Figura 7.5 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (1/2Vmax).....	100
Figura 7.6 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (Vmax)	101
Figura 7.6 – Evolução do custo com o número de gerações para as três possibilidades de volumes iniciais estudadas	102
Figura 7.7 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 12 meses do ano (Vmin).....	103
Figura 7.8 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 3 reservatórios do sistema (Vmin)	104
Figura 7.9 – Variação das afluências naturais e pesos compensatórios (Vmin)	104
Figura 7.10 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 12 meses do ano (1/2Vmax).....	105
Figura 7.11 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 3 reservatórios do sistema (1/2Vmax).....	105
Figura 7.12 – Variação das afluências naturais e pesos compensatórios (1/2Vmax)	106
Figura 7.13 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 12 meses do ano (Vmax)	107

Figura 7.14 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 3 reservatórios do sistema (Vmax).....	107
Figura 7.15 – Variação das afluências naturais e pesos compensatórios (Vmax).....	108
Figura 7.16 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacajus (situação 1)	110
Figura 7.17 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 1).111	
Figura 7.18 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Gavião (situação 1).....	111
Figura 7.19 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemOut) no nó do reservatório Gavião (situação 1)	112
Figura 7.20 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs + DemOut) para todo sistema (situação 1).....	112
Figura 7.21 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacajus (situação 2)	114
Figura 7.22 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 2).114	
Figura 7.23 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Gavião (situação 2).....	115
Figura 7.24 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemOut) no nó do reservatório Gavião (situação 2)	115
Figura 7.25 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs + DemOut) para todo sistema (situação 2).....	116
Figura 7.26 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacajus (situação 3)	117
Figura 7.27 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 3).118	

Figura 7.28 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Gavião (situação 3)	118
Figura 7.29 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemOut) no nó do reservatório Gavião (situação 3)	119
Figura 7.30 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs + DemOut) para todo sistema (situação 3)	119
Figura 7.31 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacajus (situação 4)	121
Figura 7.32 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 4).	121
Figura 7.33 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs) no nó do reservatório Gavião (situação 4)	122
Figura 7.34 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemOut) no nó do reservatório Gavião (situação 4)	122
Figura 7.35 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (DemAbs + DemOut) para todo sistema (situação 4)	123
Figura 7.36 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 1).....	124
Figura 7.37 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 1)	124
Figura 7.38 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 1).....	125
Figura 7.39 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 2).....	126
Figura 7.40 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 2)	126
Figura 7.41 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 2).....	127

Figura 7.42 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 3).....	127
Figura 7.43– Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 3)	128
Figura 7.44 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 3).....	128
Figura 7.45 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 4).....	129
Figura 7.46– Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 4)	129
Figura 7.47 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 4).....	130
Figura 7.48 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de janeiro para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	134
Figura 7.49 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de fevereiro para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	135
Figura 7.50 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de março para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	136
Figura 7.51 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de abril para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	137
Figura 7.52 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de maio para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	138

Figura 7.53 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de junho para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	139
Figura 7.54 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de julho para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	140
Figura 7.55 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de agosto para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	141
Figura 7.56 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de setembro para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	142
Figura 7.57 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de outubro para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	143
Figura 7.58 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de novembro para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	144
Figura 7.59 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de dezembro para os três reservatórios (♦Situação 1 - • Situação 3)	145
Figura 7.60 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de janeiro para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	146
Figura 7.61 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de fevereiro para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	147
Figura 7.62 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de março para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	148

Figura 7.63 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de abril para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	149
Figura 7.64 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de maio para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	150
Figura 7.65 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de junho para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	151
Figura 7.66 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de julho para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	152
Figura 7.67 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de agosto para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	153
Figura 7.68 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de setembro para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	154
Figura 7.69 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de outubro para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	155
Figura 7.70 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de novembro para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	156
Figura 7.71 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de dezembro para os três reservatórios (♦Situação 2 - • Situação 4)	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Evaporação Média Tanque Classe A.....	33
Tabela 4.2 – População residente, taxa de urbanização e densidade demográfica dos municípios integrantes das Bacias Metropolitanas	37
Tabela 4.3 – 73 postos pluviométricos	44
Tabela 4.4 – Resumo das precipitações médias aos postos.....	47
Tabela 4.5 – Resumo das precipitações médias aos açudes	48
Tabela 4.6 – Demandas consolidadas	52
Tabela 7.1 – Volumes iniciais e afluências aos reservatórios do sistema	92
Tabela 7.2 – Valores das demandas (DemAbs e DemOut) nos estágios	92
Tabela 7.3 – Número de iterações médio para as tolerâncias pré-estabelecidas e as lâminas correspondentes.....	93
Tabela 7.4 – Valores da evaporação nos reservatórios no início e final dos cinco estágios para tolerância de $0,01\text{hm}^3$	94
Tabela 7.5 – Custos obtidos a partir de populações iniciais (sementes aleatórias) distintas de soluções	96
Tabela 7.6 – Valores obtidos para o custo e função objetivo para valores G distintos.....	97
Tabela 7.7 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (V_{\min})	98
Tabela 7.8 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações ($1/2V_{\max}$)	99

Tabela 7.9 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (V_{max}).....	100
Tabela 7.10 – Estatística básica das 100 soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG (V_{min}).....	104
Tabela 7.11 – Estatística básica das 100 soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG ($1/2V_{max}$).....	106
Tabela 7.12 – Estatística básica das 100 soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG (V_{max})	107
Tabela 7.13 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 1)	113
Tabela 7.14 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 2)	116
Tabela 7.15 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 3)	120
Tabela 7.16 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 4)	123

RESUMO

PINHEIRO, T. M. (2003). *Estudo da operação otimizada de um sistema de reservatórios considerando a evaporação através de algoritmo genético híbrido*. São Carlos, 2003. 167p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os problemas de escassez hídrica enfrentados pela região Nordeste do Brasil ocorrem, principalmente, devido às condições climáticas, caracterizadas pela má distribuição das chuvas tanto temporalmente - a maior parte da precipitação anual se concentra em poucos meses - quanto espacialmente. A alta taxa de evaporação da região e a estrutura geológica do solo, predominantemente cristalino, são fatores que contribuem para agravar o problema. Fica evidenciada, portanto, a necessidade de a operação dos sistemas de recursos hídricos ser otimizada, propiciando assim, o seu melhor aproveitamento, com o menor custo para a sociedade. O presente trabalho estuda a operação otimizada dos reservatórios que abastecem a região metropolitana de Fortaleza, no Estado do Ceará, considerando a evaporação. O problema foi tratado através de um procedimento híbrido, proposto recentemente, de algoritmo genético e programação linear. O método permitiu que regras operacionais fossem extraídas sem a necessidade de fixá-las *a priori*, considerando diferentes condições de aporte hídrico e possibilidades hidrológicas para evidenciar a robustez do método.

Palavras-chave: operação otimizada; sistema de reservatórios; evaporação; algoritmo genético; programação linear.

ABSTRACT

PINHEIRO, T. M. (2003). *A study of optimized operation of a system of reservoirs considering the evaporation through a hybrid genetic algorithm*, 2003. 167p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The problems of water shortage in the Northeast area of Brazil, are mainly due to the weather conditions, characterized by scattered rainfall depending upon the time of the year – the highest annual precipitation is concentrated in a few months – as well as the location. Very high evaporation rates in the region and the geological structure of the soil, mainly of crystalline origin, are factors that worsen shortage of water. Thus, there need for optimal operation of water resources systems, so as to obtain highest benefit at low costs for the society. The present study performs optimized operation of the Fortaleza (Ceará) metropolitan area water supply reservoirs with special attention to water losses by evaporation. The problem has been handled through a recently proposed hybrid procedure, genetic algorithm and linear programming. The method permitted extraction of operational rules without having to hypothesize their structure “a priori”. Further, it was applied to Fortaleza water supply under different hydrologic conditions and those of inter-basin water transfers to verify the strength of the method employed

Key-words: optimized operation; system of reservoirs; evaporation; genetic algorithm; linear programming.

1. INTRODUÇÃO

A atual Política Nacional dos Recursos Hídricos tem como um de seus objetivos atender às crescentes demandas por água, sempre sob a visão do planejamento hídrico. Imprescindível à vida, a água sempre será objeto de demanda (PILAR & LANNA, 1999), de onde a necessidade de se buscar gerir, da melhor forma possível, o binômio demanda e disponibilidade, com vistas não só à quantidade, mas também à qualidade dos recursos hídricos.

As crescentes demandas têm ocasionado inúmeros conflitos entre os mais diversos setores da sociedade. Na região Nordeste, mais especificamente, as demandas com maior peso referem-se à irrigação e ao abastecimento urbano e industrial. Para equacionar esses conflitos de demanda têm sido feitos inúmeros estudos no que diz respeito ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. A região Nordeste é caracterizada por enorme déficit hídrico anual, com média de chuva de 750mm e evaporação de 2200mm, agravado por formação cristalina predominante e solos rasos com embasamento rochoso quase aflorante, que rapidamente esgotam e secam os rios da região, por isso, os açudes são as principais fontes para estabelecimento da oferta de água no semi-árido (MACEDO, 1996).

Dada à má distribuição temporal e espacial das precipitações no semi-árido nordestino, durante o período chuvoso é usual armazenar-se água para ser utilizada na estiagem, sendo a construção de açudes a técnica mais utilizada, logo a maioria das bacias do semi-árido nordestino tem nos açudes sua principal fonte de reserva hídrica. Assim, se a água é o centro da política contra as secas e o sistema fluvial é a unidade do planejamento hídrico, o açude é a base da política de oferta de água (MACEDO, 1996). A exigência de serem mantidas reservas grandes de água, em açudes, para servirem de reserva estratégica na região semi-árida, não é bem

compreendida pelo grande público, o qual interpreta a medida como desperdício, que daria a falsa impressão de a região dispor de muita água acumulada, e das mesmas serem pouco exploradas (VIANA & GONDIM FILHO, 1999).

Os açudes constituem dispositivos de transformação e de adaptação das potencialidades naturais às demandas. O número de reservatórios de uma região depende, portanto, da carência e da variabilidade dos recursos hídricos no tempo e no espaço. O Semi-Árido nordestino é a região com maior densidade de açudes do País, a maioria dos quais, não operados de acordo com algum tipo de regra, o que dificulta o processo de gestão dos recursos hídricos (VIANA & GONDIM FILHO, 1999).

A crescente preocupação com a escassez de água, do ponto de vista quantitativo e qualitativo, impõe a criação de sistemas de gerenciamento dos recursos hídricos que compatibilizem as demandas – para os mais diversos usos – com as disponibilidades. No tocante aos recursos hídricos, é preciso planejar a longo prazo pois, em virtude do também longo tempo de maturação e da vida útil das obras hidráulicas, as decisões tomadas podem atingir várias gerações, usualmente, com efeitos irreversíveis (BARTH, 1987). Evidencia-se, portanto, que a política de recursos hídricos não pode subordinar-se aos programas emergenciais de combate às secas, devendo ter caráter infra-estrutural.

O Estado do Ceará é o ambiente mais representativo do modelo nordestino de semi-árido (MACEDO, 1996), periodicamente castigado por secas que acarretam sérias dificuldades no atendimento das demandas. Esse fenômeno tem como causas naturais, a má distribuição temporal e espacial. As causas econômicas são os baixos investimentos na infra-estrutura hídrica do Estado e a ineficiência de seu

aproveitamento pela falta de planejamento capaz de gerir o sistema como um todo (OLIVEIRA & LANNA, 1997).

Nos últimos anos, têm sido aplicadas técnicas modernas de gestão dos recursos hídricos, orientadas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (CEARÁ, 1992), pioneiro em âmbito nacional. Este plano visa a eficiente alocação de recursos escassos voltados à promoção do desenvolvimento socio-econômico (OLIVEIRA & LANNA, 1997).

A otimização da operação de reservatórios com múltiplos usos tem, como fator de complicação, o contraponto entre os objetivos de qualidade e quantidade de água, problema esse que tem crescido nos últimos anos devido à maior consciência e preocupação da comunidade com o meio ambiente (FONTANE et al., 1997).

Ouve-se com freqüência que, entre a teoria acadêmica e a prática da engenharia, existe um grande vazio no que se refere à gestão dos recursos hídricos (SIMONOVIC, 1992). Para tentar estreitar essa separação, é proposta desde trabalho estudar a operação de um sistema hídrico por meio de modelos de otimização aplicados ao planejamento estratégico e operacional.

O sistema em estudo é o da região metropolitana de Fortaleza, responsável pelo abastecimento urbano da cidade de Fortaleza e pelo atendimento às demandas, para irrigação, e abastecimento urbano e industrial, dos municípios da região metropolitana.

2. OBJETIVOS

Face ao exposto, definiu-se como objetivo do presente trabalho de pesquisa revisitar a problemática de operação dos reservatórios das bacias hidrográficas componentes da região metropolitana de Fortaleza (RMF), por sua importância como fonte de abastecimento da cidade de Fortaleza, no Estado do Ceará.

Para tanto, serão utilizadas as técnicas de otimização mais promissoras no sentido de adequar as características do sistema em pauta, com o intuito de desenvolver regras operacionais para os reservatórios do sistema, compatibilizando as demandas, para seus diversos fins, e disponibilidades com o menor custo.

Com vistas ao gerenciamento de longo prazo do sistema de abastecimento de Fortaleza, pretende-se, mais especificamente, investigar a metodologia recentemente proposta por Reis et al. (2003), segundo a qual é possível extrair regras de operação, sem fixá-las *a priori*, e identificar parâmetros úteis à operação futura do sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia que trata da operação de reservatórios é muito vasta, sendo que a maioria dos trabalhos visa a geração de energia. O presente trabalho trata da otimização de um sistema de múltiplos reservatórios sujeito a usos de abastecimento urbano, industrial e irrigação. As metodologias propostas para operação de sistemas de múltiplos reservatórios, como já foi dito, visam, quase sempre, a geração hidroelétrica, o que não impede a sua utilização, realizadas as devidas adaptações, para sistemas com fins de abastecimento urbano, industrial e irrigação.

Um dos fatores de maior complexidade na formulação dos problemas de geração de energia é a não-linearidade da função objetivo. Outro ponto importante, detectado na presente revisão, é que a maioria dos trabalhos trata de sistemas hidroelétricos onde a evaporação não apresenta um peso significativo no balanço de massa, chegando até a ser considerada equivalente à precipitação direta sobre a superfície dos reservatórios, fatores que, para o caso deste trabalho, devem ser considerados, pois constituem características decisivas na operação de reservatórios no semi-árido nordestino, onde se encontra inserido o sistema em estudo.

A presente revisão bibliográfica tenta, inicialmente, caracterizar o sistema de múltiplos reservatórios, que é o objeto de estudo da pesquisa proposta, evidenciando toda a complexidade envolvida na operação de um sistema desse tipo.

A análise de um complexo sistema de recursos hídricos envolve diversas variáveis de decisão e constantes. Uma vez identificadas as variáveis, o conhecimento do problema ajudará no desenvolvimento de técnicas de solução, no campo da pesquisa operacional e ciências de gerenciamento. Para superar o problema da dimensionalidade, que geralmente envolve os sistemas de múltiplos reservatórios, vários esquemas de decomposição têm sido adotados e ao longo do tempo vem evoluindo. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, soluções podem ser prontamente obtidas para prover decisões alternativas ótimas em vários sentidos, e que podem ser usadas pelos gerenciadores dos recursos hídricos para lhes assistir no processo de tomada de decisão (YEH, 1985).

Segundo Yeh (1985), a escolha de um método depende das características do sistema considerado, da disponibilidade de dados, e dos objetivos e variáveis especificados.

A operação ótima de um sistema de reservatórios é um problema muito complexo, devido à ligação entre a decisão tomada em um dado estágio e as futuras conseqüências desta decisão. Como é impossível prever com perfeição as seqüências de vazões afluentes ao sistema, o problema de operação é essencialmente estocástico. O objetivo do problema de planejamento da operação de reservatórios é achar a estratégia operacional para cada estágio do período de planejamento, dado o estado do sistema no início de cada estágio (PEREIRA & PINTO, 1985).

A operação de sistemas de reservatórios freqüentemente consiste em problemas de múltiplos reservatórios com afluições que possuem uma componente estocástica muito forte e significativa correlação. Se a afluição aos reservatórios pode ser considerada como um processo de Markov de primeira ordem, as matrizes de transição de probabilidade das afluições podem ser construídas através das séries históricas (BRAGA et al., 1991).

Apesar dos modelos de simulação que tentam, através de um algoritmo, reproduzir o comportamento de um sistema, preencherem o vazio entre as ferramentas simplistas de determinação dos volumes de armazenamento e os métodos de otimização sofisticados, sendo uma boa maneira de checar várias alternativas e decidir a melhor delas, a bibliografia evidencia o crescimento das metodologias de programação matemática, que abrangem as técnicas de programação linear, programação dinâmica e programação não-linear. A razão é o tempo computacional requerido, geralmente elevado no caso das simulações.

A programação linear é uma ferramenta importante na otimização da operação de reservatórios, tanto em tempo real quanto para o planejamento a longo prazo. Embora as funções objetivo, assim como as constantes, sejam freqüentemente não-lineares, várias técnicas de linearização podem ser usadas, para possibilitar o uso da técnica de programação linear, cujas principais vantagens são: a capacidade de acomodar uma relativamente alta dimensionalidade, com comparativa facilidade, um ótimo universal é obtido, não é

preciso uma política inicial e diversos códigos para os computadores padrão estão disponíveis facilmente (YEH, 1985).

Técnicas de decomposição são necessárias para sistemas de reservatórios complexos, onde o número de variáveis de operação e constantes é grande. A combinação da programação linear com a programação dinâmica tem sido usada para superar a dificuldade da dimensionalidade (YEH, 1985).

Segundo Goulter & Tai (1985), a primeira preocupação na aplicação da formulação de programação dinâmica estocástica no sistema do rio Laurie, no Canadá, composto por um único reservatório, é o efeito da variação no número de estados, associados com as variáveis de estado de armazenamento. É também detalhada a experiência com as implicações e limitações práticas da aplicação da programação dinâmica estocástica a um reservatório existente, concluindo que o número de variáveis de estado de armazenamento usadas neste tipo de programação dinâmica estocástica tem efeito significativo na precisão das respostas produzidas.

A solução analítica do problema de operação ótima em um sistema hidroelétrico está além da nossa capacidade computacional. Por esse motivo, tornou-se necessário o desenvolvimento de métodos capazes de produzir soluções aproximadas a um custo computacional razoável.

A metodologia descrita por Pereira & Pinto (1985) determina as decisões de geração para cada usina de um sistema de reservatórios

interconectados, minimizando o custo de operação esperado. O algoritmo é baseado na programação estocástica e na decomposição de Benders. Em termos computacionais, o algoritmo proposto apresenta as seguintes vantagens:

- prover, a cada iteração, limites superior e inferior da solução ótima, permitindo uma eficiente combinação entre os esforços computacionais e a precisão dos resultados;
- acomodar qualquer tipo de modelo de escoamento, por que a probabilidade de transição nas bifurcações podem ser especificadas, o que é especialmente interessante para os sistemas brasileiros, para os quais, os modelos autoregressivos de lag 1 usuais não tem dado bons resultados;
- decompõe o problema de otimização em sucessivos problema de um estágio, os quais correspondem a modelos de operação já existentes;
- os subproblemas de um estágio, em cada nível, podem ser resolvidos independentemente, sendo possível a aplicação de técnicas de processamento paralelo.

Pereira & Pinto (1985), apresentaram uma aplicação para um sistema hidrotérmico composto de 37 reservatórios interligados, correspondentes ao sistema sul-sudeste brasileiro. Tal metodologia é aplicada pela Eletrobras e em diversos países atualmente.

Os trabalhos mais recentes têm tomado a direção das técnicas de programação dinâmica estocástica para sistemas de múltiplos reservatórios devido ao desenvolvimento das aproximações (TAI & GOULTER, 1987).

Tai & Goulter (1987) apresentaram uma aproximação da programação dinâmica estocástica para desenvolver a política de operação mensal de um sistema de multi-reservatórios. A aproximação utilizou a formulação da programação dinâmica estocástica básica para problemas com um único reservatório. A aproximação foi demonstrada pela aplicação para três reservatórios no rio Laurie em Manitoba, Canadá. Os benefícios gerados pelo modelo são comparados com os benefícios históricos observados dentro do sistema.

Devido a não-linearidade da produção hidroelétrica e a natureza seqüencial da tomada de decisão na operação de reservatórios, a programação dinâmica estocástica parece satisfatória como técnica de otimização, sendo que os requisitos computacionais constituem o maior obstáculo à sua implementação (BRAGA et al., 1991).

Braga et al. (1991) desenvolveram um modelo de programação dinâmica estocástica para otimização da produção hidroelétrica de um sistema de múltiplos reservatórios. A aplicação foi feita em um subsistema do sistema brasileiro de hidroelétricas. O estudo comparativo entre o desempenho do modelo e dados da operação atual da bacia do baixo rio Tietê obteve que o modelo teve desempenho superior aos dados operacionais históricos, indicando a viabilidade da

aplicação da metodologia desenvolvida, em um sistema de múltiplos reservatórios.

O uso inadequado dos recursos hídricos implica em prejuízos sócio-econômicos. No caso específico do abastecimento de água para irrigação, aspectos como disponibilidade, regularização, demanda, conflitos de uso e preservação ambiental são fundamentais para se obter bons desempenhos dos projetos. Um modelo de programação linear com restrições probabilísticas foi desenvolvido por Mello Jr et al. (1997) para estabelecer a política operacional ótima de reservatórios. O objetivo consistiu na minimização da diferença entre a descarga máxima e a média mensal, considerando os propósitos de proteção à enchente, abastecimento municipal, suprimento à irrigação e valores máximos e mínimos de armazenamento e descarga. Apesar de não penalizar violações nas restrições, o modelo fornece soluções viáveis para condições específicas de trabalho e se mostra eficaz por usar um algoritmo simplex. A operação do reservatório Poço da Ribeira, em Sergipe, foi estabelecida para abastecer uma cidade com 50 mil habitantes e um projeto de irrigação de 1.100 ha.

De acordo com os resultados obtidos por Mello Jr. et al. (1997), notou-se que a transformação das restrições probabilísticas em determinísticas e o agrupamento das variáveis aleatórias pelo método da convulação reduziram o esforço computacional da solução do problema.

Para problemas na área de planejamento, projeto e operação que consistem de processos de decisão seqüencial em estágios, como a operação de reservatórios, a programação dinâmica é considerada como um excelente método de abordagem (PORTO, 1997).

A eficiente operação de um sistema de recursos hídricos, visando a otimização das descargas a serem liberadas para atendimento de diversas demandas, é de grande interesse em regiões como o Nordeste brasileiro, onde a água é escassa e a evaporação muito elevada (OLIVEIRA & LANNA, 1997).

Oliveira & Lanna (1997) estudaram a otimização de um sistema de múltiplos reservatórios atendendo a múltiplos usos no Nordeste brasileiro, para o qual foram desenvolvidas regras de operação. O sistema estudado é composto por cinco reservatórios para abastecimento de demandas urbanas e de irrigação na bacia do rio Acaraú, no estado do Ceará, onde a função-objetivo é a maximização do Valor Presente dos Benefícios Líquidos da operação, sujeita a restrições de balanço hídrico nos reservatórios e de umidade do solo na área cultivada. A adoção da maximização do Valor Presente dos Benefícios Líquidos (VPBL) como função-objetivo dificulta a quantificação das variáveis intangíveis. Oliveira & Lanna (1997) consideraram duas formulações:

- 1) a área de rega é fixa e a lâmina de rega variável;
- 2) a área irrigada é variável e a lâmina de rega é fixa, ao longo do tempo.

Ficou demonstrado nas duas formulações que técnicas de otimização podem incrementar a eficiência econômica dos investimentos na infra-estrutura hídrica regional e fornecer importantes informações para o dimensionamento e operação ótimos de sistemas de recursos hídricos.

Curi et al. (1997) procuraram analisar a alocação ótima dos volumes mensais de água disponível em um reservatório para satisfazer a critérios de seu uso para irrigação, piscicultura e controle de cheias. Um modelo matemático de otimização foi aplicado ao reservatório Engenheiro Arcoverde, situado na região semi-árida do estado da Paraíba. Os resultados mostraram que a opção de melhor retorno financeiro para o produtor seria irrigar diferentes áreas para os períodos de safra e entresafra. Através de programação não-linear foram determinados os valores máximos dessas áreas para as quais o reservatório teria condições de alocar água.

Geralmente, o padrão de operação de reservatórios não leva em consideração o uso de todo seu potencial hídrico utilizável e, portanto, uma metodologia que possibilite um maior retorno financeiro pelo uso da água, minimizando assim o volume perdido por evaporação direta da superfície líquida do reservatório, que no semi-árido é muito elevado, é de fundamental importância para o gerenciamento dos reservatórios da região (CURI et al., 1997).

Segundo Pilar (1998), a programação não-linear é bastante mencionada na literatura, mas não se fez popular na análise de

sistemas de recursos hídricos, tendo como os principais motivos, o fato das técnicas de resolução serem iterativas, lentas e exigirem muita memória do computador, além do tratamento matemático envolvido nos modelos não-lineares ser mais complexo.

As técnicas de pesquisa operacional têm vasta aplicação na otimização dos sistemas de recursos hídricos associados à produção na agricultura irrigada. Essa aplicação vai desde a identificação de parâmetros ótimos para projetos até a determinação de políticas operacionais ideais para destinação de recursos, que são quase sempre escassos, maximizando-se benefícios ou minimizando-se custos (CURI et al., 1998).

Apesar de constituir-se de uma técnica bastante utilizada na otimização da política operacional de reservatórios, a programação dinâmica ainda padece do mal da dimensionalidade. Um modelo de programação dinâmica estocástica foi proposto por Mello Jr & Matos (1999) para otimizar o uso da água de um reservatório para fins de regularização, considerando o afluxo e a demanda de irrigação como variáveis aleatórias, arrançadas em um processo Markoviano de primeira ordem. O modelo foi aplicado ao reservatório Poção da Ribeira, em Sergipe, e forneceu uma solução ótima para a descarga mensal. Não ocorreram problemas de alocação de memória e de velocidade de processamento quando se utilizaram cinco níveis da variável de estado (volume armazenado), cinco níveis da variável de decisão (descarga) e cinco classes de probabilidades condicionais, em

um computador de média capacidade de processamento. Níveis mais elevados dessas variáveis contribuem para a obtenção de soluções mais confiáveis, mas podem comprometer a resolução do modelo. Os valores de descarga obtidos por este modelo de programação dinâmica coincidem com os obtidos por um modelo de programação linear em oito meses do ano. O primeiro produziu uma menor variação dos valores de descarga nos cinco primeiros meses e os dois modelos indicam a possibilidade de se operar com descargas próximas à máxima, em dez meses do ano.

Os estudos na área de otimização de reservatórios tem crescido bastante, alavancados, principalmente, pelos próprios estudos de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. A satisfação das necessidades domésticas, urbanas, de irrigação e de geração de energia tem sido o objeto do planejamento hídrico (PILAR & LANNA, 1999).

Pilar & Lanna (1999) apresentaram um trabalho de planejamento por otimização de um sistema de recursos hídricos, utilizando a metodologia proposta por Lanna (1986), ficando evidenciado que a função-objetivo é de fundamental importância em um problema de otimização. Foi adotada a maximização do Valor Presente dos Benefícios Líquidos (VPBL) como função-objetivo, pois consideraram que o mesmo reflete razoavelmente os objetivos de um plano de recursos hídricos. Com a adoção da maximização do Valor Presente dos Benefícios Líquidos (VPBL) como função-objetivo, fica difícil de se quantificar as variáveis intangíveis. Pilar & Lanna (1999)

concluíram que os resultados obtidos são um importante subsídio para o processo decisório, e até eficientes, pois foram obtidos com custos (computacionais) muito baixos. A programação linear foi utilizada sem necessidades de simplificações (linearizações) grosseiras, mostrando-se como uma importante ferramenta no processo de otimização de sistema de recursos hídricos quando bem utilizada.

Gobbetti et al. (1999) apresentaram uma metodologia para determinação da política ótima de operação do reservatório Guarapiranga, mostrando uma fusão de técnicas de simulação e otimização, onde a programação dinâmica estocástica é utilizada para gerar uma matriz de políticas ótimas que serve de guia para a simulação no MODSIM, que é um modelo de simulação em rede de fluxo, através de um processo iterativo. O uso conjunto das duas técnicas provou ser eficaz ao permitir uma melhor distribuição das vazões fornecidas no decorrer do tempo.

Gobetti et al. (1999) comprovaram que o efeito da utilização das políticas ótimas geradas pela programação dinâmica estocástica é o de aumentar as vazões médias fornecidas. Isto é, as políticas ótimas da programação dinâmica estocástica permitem uma melhor distribuição das vazões oferecidas ao longo do tempo. Observaram, também, que ao utilizar políticas com maiores probabilidades de excedência e deficiência consegue-se valores maiores para as vazões médias e menores para as vazões mínimas.

Mesmo com a vasta gama de trabalhos na área de operação de reservatórios, fica evidenciada, a não existência de uma técnica de otimização geral para um sistema de reservatórios, ficando a escolha do método, como já foi citado anteriormente, condicionada às características do sistema, à disponibilidade de dados e aos objetivos e restrições especificados.

Dos trabalhos citados na presente revisão bibliográfica, destacam-se dois. A metodologia proposta por Pereira & Pinto (1985), mesmo levando em conta o fato da mesma visar a geração de energia. É bastante interessante por abordar o problema de múltiplos reservatórios, tendo o seu algoritmo baseado na extensão estocástica da decomposição de Benders. Oliveira & Lanna (1997) abordaram o problema de múltiplos reservatórios sujeitos aos usos de abastecimento urbano e irrigação, isto é, os objetivos são basicamente os mesmos do problema proposto para o presente trabalho.

Técnicas mais recentes, como os algoritmos genéticos, também têm sido utilizadas na resolução de problemas de operação de reservatórios. Segundo Reis e Akutsu (2002), os AGs são técnicas de busca estocásticas que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural, compreendendo as sistemáticas de seleção e genética das populações, em analogia como o processo biológico de sobrevivência e adaptação dos indivíduos mais capazes. São atualmente enfocados na tentativa de propor estratégias operacionais otimizantes para os sistemas de reservatórios em substituição aos

modelos clássicos de otimização e simulação. Os AGs diferem desses métodos clássicos, pois partem de um conjunto de soluções alternativas aleatórias denominada população, onde cada indivíduo (cromossomo) representa uma solução para o problema, que reúne em conjunto de atributos na forma de códigos. Tais atributos permitem que os indivíduos sejam avaliados e ordenados de acordo com a critério da Função Objetivo (F.O) ou de aptidão, de acordo com a qual são reproduzidos ou não. A partir daí se cria uma nova população, cromossomos chamados descendentes são formados pela união de dois cromossomos pais da geração atual, através do operador recombinação (crossover), e, em seguida modificados através do operador mutação (mutation).

Reis et al. (2003) propuseram recentemente um procedimento alternativo para incorporar a variabilidade de aflúências naturais na forma proposta por Pereira e Pinto (1985) usando AGs. Tal análise mostrou-se promissora em extrair parâmetros para a operação futura dos dois sistemas estudados, mas precisa ser avaliada para sistemas reais de graus de complexidade diversos, propósito este perseguido no presente trabalho.

4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

O sistema escolhido como objeto deste estudo, conta com três reservatórios em série e é responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza.

O primeiro reservatório é o Pacajus com capacidade de armazenamento de $240,00\text{hm}^3$, o segundo denominado de Pacoti/Riachão tem capacidade de $420,60\text{hm}^3$ e, por último, o açude Gavião com capacidade de acumulação de $29,50\text{hm}^3$. Os três reservatórios estão inseridos em bacias hidrográficas distintas, sendo a ligação entre os mesmos feita através de túneis e canais.

O açude Pacajus está situado no município de mesmo nome e os açudes Pacoti/Riachão e Gavião encontram-se localizados no município de Pacatuba, estando os três inseridos nas bacias dos rios Pacoti, Choró e Cocó, respectivamente.

A área em questão, onde estão localizadas as três barragens, encontra-se posicionada na região Nordeste do Estado do Ceará, sendo composta por um conjunto de 3 bacias independentes, inseridas dentro do conjunto das denominadas Bacias Metropolitanas, das quais apenas as bacias dos rios Pirangi, Choró, Pacoti, São Gonçalo e os sistemas Ceará/Maranguape e Cocó/Coaçu são hidrologicamente mais representativas, estando as demais bacias restritas à zona costeira, em um total de 14 bacias independentes.

As Bacias Metropolitanas abrangem uma área de 15.085 km^2 , com larga influência da faixa litorânea e das zonas altas das Serras de

Guaramiranga e Baturité, englobando total ou parcialmente o território de 41 municípios, com destaque para a Região Metropolitana de Fortaleza, que abriga cerca de 40% da população estadual.

A Figura 4.1 o sistema apresenta as bacias hidrográficas do estado do Ceará.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FIOGRÁFICA

4.1.1.1 Bacia do Rio Pacoti

Sendo o principal manancial da RMF, o Rio Pacoti nasce na Serra de Baturité e percorre 112,5 km, em geral no sentido sudoeste/nordeste, dos quais o primeiro terço com declividade acentuada da ordem de 2,0%. Na parcela de jusante, como reflexo do relevo muito suave que atravessa, sua declividade gira em torno de 0,1%.

Apresentando uma configuração longilínea e rede de drenagem predominantemente dendrítica, o rio Pacoti drena uma área de 1.257 km², desenvolvendo-se no sentido sudoeste/nordeste ao longo de 112,5 km. Conta com elevado índice de compacidade (1,97) e fator de forma reduzido (0,10).

Sem nenhuma afluência significativa pela margem direita, o Pacoti possui dois contribuintes de maior porte pela margem esquerda, os riachos Baú e Água Verde. Ocorrem, ainda, em seu baixo curso a presença de lagoas perenes e intermitentes. Todos os cursos d'água da bacia apresentam fluviometria intermitente, na região de baixo curso, sofrendo a influência das marés, apresentando um estuário composto por 160 ha de manguezais.

4.1.1.2 Bacia do Rio Choró

Uma das alternativas para o reforço do sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza, a Bacia do Rio Choró é a maior daquelas que compõem as Metropolitanas.

A configuração espacial da Bacia do Choró é bem regular, de forma retangular definida, onde o comprimento do rio, de 200 km, é praticamente igual ao da bacia, e a largura que chega, em alguns pontos, a ultrapassar 45 km, tem um valor médio de 23 km. Esta geometria se reflete em um índice de compacidade muito elevado (1,94) e reduzido fator de forma de 0,12.

Apresenta relevo movimentado no seu terço inicial, atingindo declividades muito altas na origem do rio, na zona montanhosa das serras do Estevão, da Palha e da Conceição. A partir da metade do talvegue observa-se o desenvolvimento de um relevo suave de cotas baixas, resultando numa declividade média inferior a 0,1%. A região

centro-norte da bacia abrange uma grande parte da formação montanhosa da serra de Baturité.

O próprio formato da bacia é indicador da pouca representatividade dos seus afluentes, que são pouco significativos pela margem direita, destacando-se pela margem esquerda apenas os riachos Cangati, Castro e Aracoiaba, este último, de caráter semi-perene. Os demais cursos d'água da bacia apresentam caráter intermitente, com o rio Choró, próximo ao litoral, sofrendo influência das marés, apresentando um pequeno estuário composto por 25 ha de manguezais.

4.1.1.3 Sistema Cocó/Coaçu

O rio Cocó drena uma área de 304,6 km², se desenvolvendo no sentido sul/norte por longo trecho de seu percurso, formando em direção à foz uma acentuada curva de sudoeste para leste. Sua confluência com o rio Coaçu, seu principal afluente, se dá bastante próximo do litoral, fazendo que estes praticamente apresentem comportamento de bacias independentes.

Com o comprimento do talvegue de 42,5 km, o rio Cocó apresenta uma configuração longilínea, que se traduz no elevado índice de compacidade de 1,60 e fator de forma reduzido (0,17). Por sua vez, o rio Coaçu se desenvolve ao longo de 32,5 km, drenando uma área de 194,8 km², apresentando índices de compacidade de 1,35 e fator de forma de 0,18.

Todos os cursos d'água da bacia apresentam caráter intermitente, permanecendo secos durante a maior parte do ano, exceto próximo ao litoral onde os rios Cocó e Coaçu se tornam semi-perenes. Ocorrem, ainda, em seu baixo e médio curso a presença de lagoas perenes e intermitentes, com destaque no eixo do rio Coaçu para as lagoas da Precabura, Sapiranga, Messejana, dos Pássaros e Parnamirim, estas três últimas situadas na malha urbana das cidades de Fortaleza e Eusébio. Ao longo do rio Cocó merecem destaque as lagoas da Maraponga, da Itaoca, do Opaia e do Papicu, e outras de menor porte todas situadas no núcleo urbano de Fortaleza. O Cocó sofre influencia das marés, que adentram no seu leito por aproximadamente 13 km, formando um estuário alongado e estreito, composto por 210 ha de manguezais.

4.1.2 CLIMA

De modo geral, o clima das Bacias Metropolitanas se apresenta bastante homogêneo; as variações climáticas registradas são diretamente associadas ao regime pluviométrico e decorrem, fundamentalmente, das seguintes condições:

- proximidade do litoral, quando os índices pluviométricos são mais elevados e as temperaturas mais estáveis;
- relevo acidentado, onde ocorrem precipitações orográficas que se somam a temperaturas mais baixas em decorrência da altitude.

Com exceção dos microclimas bem definidos das áreas altas da Serra de Guaramiranga e Baturité, o clima predominante é quente e estável, de elevadas temperaturas e reduzidas amplitudes, com acentuada taxa de insolação, forte poder evaporante e, acima de tudo, com um regime pluviométrico marcadamente irregular.

Esta última particularidade, que também se observa nas zonas de microclima, constitui-se, realmente, na característica climática básica.

O regime pluviométrico da região é caracterizado pela heterogeneidade temporal, verificando-se uma concentração da precipitação no primeiro semestre do ano, e uma forte variação interanual. Geralmente, a estação chuvosa tem início no mês de janeiro e se prolonga até junho. O trimestre mais chuvoso é o de fevereiro/abril ou o de março/maio, respondendo por 65,0 a 70,0% da precipitação anual. No semestre janeiro/junho este índice supera 90,0%.

A análise da distribuição interanual da precipitação revela a ocorrência de anos muito secos, quando o índice de precipitação se reduz a menos de 1/4 ou 1/5 da média anual, com uma frequência estimada de 10,0 a 20,0% sobre períodos longos. Por outro lado, os anos com pluviometria elevada não são muito raros, ocasionando enchentes, e gerando problemas, principalmente em áreas urbanizadas das bacias dos sistemas Ceará/Maranguape e Cocó/Coaçu.

No que se refere à temperatura, na região vizinha ao litoral a média oscila de 26°C a 27°C, alcançando o patamar de 28°C para as

zonas interiores mais centrais; somente nas regiões altas com microclimas, a temperatura média torna-se mais amena e decai para 25°C, atingindo valores inferiores a 22°C no ápice da Serra de Baturité. Por sua vez, as médias das temperaturas máximas e mínimas refletem a estabilidade do regime térmico: em geral, nas regiões mais quentes elas ficam em torno de 33°C a 34°C para as primeiras, e de 22°C a 23°C para as segundas; nas zonas litorâneas a redução se observa mais na temperatura máxima, que se situa com maior frequência entre 31°C e 32°C.

Em termos absolutos, as temperaturas podem atingir patamares superiores a 38°C e, somente naquelas áreas de maiores altitudes, as mínimas absolutas diminuem abaixo de 17°C, situando-se na faixa dos 20°C com maior predominância.

A umidade relativa do ar, bem como praticamente todos os parâmetros climáticos, está intimamente ligada com a pluviosidade. No período de chuvas ela supera, freqüentemente, a 80%, sendo que, nas regiões litorâneas, alcança valores próximos de 90%; o trimestre março/maio é o período mais úmido. Na estiagem, a umidade reduz-se principalmente nas regiões mediterrâneas, mais áridas, e atinge a faixa de 50%; no litoral, tal diminuição é menor, situando-se, geralmente, entre 60% e 65%; o período crítico abrange os meses de setembro a novembro. Na média, a umidade relativa do ar nas regiões mais secas é de 60% a 65%, e nas úmidas ultrapassa 70%. Quando da ocorrência de

anos secos, os valores da umidade variam muito menos e se mantêm em níveis mais reduzidos.

Uma das principais características do clima regional diz respeito à favorável insolação; especialmente o número médio de horas de insolação altera-se pouco na área, sendo de cerca de 2.650 horas/ano a quase 4.000 horas/ano. Além do mais, no decorrer do ano, a duração de incidência de luz solar apresenta variações moderadas, atingindo os menores valores nos meses de maior pluviosidade - em torno de 6,0 horas/dia - e, no auge da estiagem, atinge cerca de 9,0 horas/dia.

O mesmo comportamento se observa com relação à nebulosidade, mais do que qualquer outro parâmetro diretamente dependente da pluviosidade. Em geral, no período chuvoso o índice observado é, freqüentemente, superior a 6,0 décimos, atingindo valores superiores aos 7,5 décimos; na estiagem, a nebulosidade diminui bastante permanecendo entre 2 décimos e 4 décimos, em especial no trimestre agosto/outubro.

Os ventos só têm maior representatividade nas regiões litorâneas ou nos trechos finais dos vales. Apresentam velocidades maiores no segundo semestre, quando a velocidade média predominante é de 3,0 m/s a 4,0 m/s; no primeiro semestre, em especial antes do início da época das chuvas mais abundantes, reduzem-se bastante.

No conjunto, as condições climáticas favorecem sobretudo o fenômeno da evaporação, provocando, em consequência, perdas

hídricas consideráveis, mormente no que concerne aos volumes acumulados em superfícies livres.

Como tais condições são mais rigorosas durante a estiagem, os índices de evaporação estão implicitamente relacionados com os de pluviometria: a ausência de chuvas contribui para o acréscimo das perdas por evaporação.

Não há grande variação das taxas de evaporação na área, a não ser nas regiões elevadas de microclima que apresentam taxas mais reduzidas.

Em geral, as alturas médias anuais de evaporação medidas em tanques evaporimétricos “Classe A” das estações meteorológicas nas Bacias Metropolitanas variam de 562 mm, na Serra de Guaramiranga, até 1.649 mm em Fortaleza. Apresentam-se na Tabela 4.1 além dos valores médios de evaporação mensal e anual para as estações de Fortaleza e Guaramiranga, os valores para outras estações do estado do Ceará.

Tabela 4.1 – Evaporação Média Tanque Classe A (mm)

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
Fortaleza	149	109	85	74	85	95	123	173	193	197	185	181	1649
Crateús	250	147	112	97	134	188	275	327	358	395	372	334	2989
Sobral	158	105	75	71	78	108	154	199	215	247	220	210	1840
Acaraú	202	184	116	91	111	154	192	262	282	291	284	258	2427
Guaramiranga	51	35	25	25	26	29	40	58	67	70	70	66	562
Média	162	116	83	72	87	115	157	204	223	240	226	210	1893

Fonte: Plano Estadual dos Recursos Hídricos – CE (1992)

O trimestre úmido março/maio é freqüentemente o de menor índice, correspondendo, em média, a 15% da evaporação anual; por

outro lado, o de setembro/novembro concentra quase 1/3 do mesmo total. A taxa média diária de evaporação em Tanque Classe A, é da ordem de 3,5 mm/dia a 4,5 mm/dia nos meses mais úmidos; alcançando a faixa de 12 mm/dia nos meses quentes nas zonas mais áridas.

Quando da ocorrência de anos secos, as alturas totais de evaporação aumentam consideravelmente, podendo superar os 4.300 mm/ano; nestes casos, a diferença entre as taxas do 1º e 2º semestres reduz-se acentuadamente.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS FATORES SÓCIO-ECONÔMICOS

4.2.1 DEMOGRAFIA

De acordo com o IBGE, em 1996, a região das Bacias Metropolitanas contava com uma população total de 3.008.162 habitantes, o correspondente a 44,2% da população do Estado. Desse total, 1.965.513 habitantes, ou seja, 65,3% refere-se à população residente em Fortaleza que apresenta sua área territorial dividida em três bacias hidrográficas: Bacia do Sistema Ceará/ Maranguape, concentrando 48,4% da população do município; Bacia do Sistema Cocó/ Coaçu, com 32,0% da população; e Bacia FLED (Faixa Litorânea de Escoamento Difuso), com 19,6%.

A densidade demográfica atingiu nesse ano o patamar de 229,19 hab/km² para a região como um todo, apresentando maior concentração nas bacias que possuem área no município de Fortaleza como, Sistema

Ceará/Maranguape (1.715,1 hab/km²), Sistema Cocó/Coaçu (1.506,00 hab/km²) e FLED (882,92 hab/km²). O município de Fortaleza, capital do Estado, apresentou uma densidade demográfica de 6.540,86 hab/km². As demais bacias integrantes apresentaram uma densidade demográfica muito mais rarefeita, oscilando entre 12,10 hab/km², na bacia do Cauhipe, até 501,00 hab/km², na bacia do Caponga Funda.

Nas últimas décadas, a ocupação dos espaços urbanos tem se acentuado, com a população se concentrando em torno dos grandes e médios centros urbanos (Fortaleza, Caucaia, Maracanaú), caracterizando um processo de inchamento das cidades, tendo como consequência o aumento do número de grupos populacionais marginalizados.

Analisando o comportamento da urbanização nas áreas das Bacias Metropolitanas (Tabela 4.2), observa-se que, com exceção das bacias do Pirangi, Caponga Funda, Caponga Roseira e Cauhipe, as demais apresentam taxas de urbanização superiores a 50,0%, com as bacias do Cocó/Coaçu, Ceará/Maranguape e FLED atingindo taxas de 99,1%, 98,9% e 96,5%, respectivamente. Apesar de constituir a área mais urbanizada, a bacia do Cocó/Coaçu apresentou no período 1991/96 uma pequena variação nos valores das taxas de urbanização (2,35%), seguida da bacia do Ceará/Maranguape (2,30%), enquanto que as maiores variações foram constatadas nas bacias do Malcozinhado (3,65%), São Gonçalo (3,41%) e Choró (3,37%).

A Tabela 4.2, a seguir, apresenta a população residente, taxa de urbanização e densidade demográfica dos municípios integrantes das Bacias Metropolitanas. Naqueles municípios cujas áreas territoriais estão inclusas em mais de uma bacia hidrográfica, as informações disponíveis foram desmembradas, de modo a possibilitar uma análise por bacia.

Vale ressaltar que na Tabela 4.2, retirada do Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas, a população dos municípios foi obtida do censo de 1996, o mais recente na época. O IBGE disponibiliza, hoje, os dados do censo de 2000, mas como no presente trabalho utilizou-se o estudo de demanda feito no Plano das Bacias Metropolitanas, e por se tratar de um estudo bastante complexo, fugindo dos objetivos da pesquisa, optou-se por manter os dados de população de 1996.

A população da cidade de Fortaleza em 1996 era de 1.965.513 de habitantes passando para 2.141.402 no censo de 2000, o que representa 28,82% da população total do estado do Ceará que em 2000 era de 7.430.661 habitantes.

Tabela 4.2 - Evolução da População e Distribuição Geográfica

Bacia Hidrográfica/ Municípios/Distritos	População Residente (hab) - 1996			Taxa de Urbanização (%)	Densidade Demográfica (hab/km ²)	Taxa Geométrica de Crescimento Anual - 1991/1996 (%)		
	Total	Situação do Domicílio				Total	Urbana	Rural
		Urbano	Rural					
RIO PIRANGI	52.542	12.407	40.135	23,6	14,19	-1,01	1,48	-1,71
Ibaretama	10.857	2.564	8.293	23,6	14,85	-0,71	5,05	-2,16
Oiticica	4.213	418	3.795	9,9	-	-0,08	2,98	-0,39
Pirangi	2.501	636	1.865	25,4	-	-0,73	2,00	-1,56
Nova Vida	1.494	193	1.301	12,9	-	-5,01	1,63	-5,80
Ibaretama	2.649	1.317	1.332	49,7	-	1,19	8,18	-3,70
Morada Nova	12.256	4.431	7.825	36,2	18,94	-1,47	1,94	-3,13
Aruaru	8.203	4.026	4.177	49,1	-	-1,75	1,46	-4,35
Boa Água	4.053	405	3.648	10,0	-	-0,88	7,51	-1,60
Aracati	1.129	335	794	29,7	9,22	-2,94	-2,13	-3,28
Jirau	1.129	335	794	29,7	-	-2,94	-2,13	-3,28
Fortim	1.584	918	666	59,0	8,31	-	-	-
Guajiru	709	526	183	74,2	-	-	-	-
Campestre	875	392	483	44,8	-	-	-	-
Beberibe	12.271	1.990	10.281	16,2	11,18	-1,16	-7,52	0,43
Serra do Félix	5.639	995	4.644	17,6	-	-0,38	-4,26	0,58
Itapeim	1.955	300	1.655	15,3	-	-4,24	-0,84	-4,79
Paripueira	4.677	695	3.982	14,9	-	-0,64	-12,97	2,98
Cascavel	2.589	512	2.077	19,8	9,45	-9,59	-0,04	-11,26
Pitombeiras	2.589	512	2.077	19,8	-	-9,59	-0,04	-11,26
Ocara	11.856	1.657	10.199	14,0	18,54	-0,62	-0,18	-0,69
Curupira	8.024	440	7.584	5,5	-	-0,28	0,65	-0,33
Serragem	2.563	562	2.001	21,9	-	-1,53	-0,90	-1,70
Novo Horizonte	1.269	655	614	51,6	-	-0,90	-0,09	-1,73
RIO CHORÓ	206.469	104.945	101.524	50,8	43,27	-0,39	3,37	-3,55
Aracolaba	23.820	10.972	12.848	46,1	45,81	1,14	0,93	1,32
Aracolaba	11.043	6.377	4.666	57,7	-	1,36	-0,16	3,68
Ideal	4.431	927	3.504	20,9	-	-1,31	-1,86	-1,16
Jaguarão	1.013	544	469	53,7	-	0,75	1,46	-0,04
Jenipapeiro	626	250	376	39,9	-	2,81	8,15	0,00
Lagoa de São João	880	403	477	45,8	-	1,85	2,28	1,49
Milton Belo	2.321	541	1.780	23,3	-	5,44	7,26	4,92
Pedra Branca	600	333	267	55,5	-	-1,59	-1,44	-1,77
Plácido Martins	896	294	602	32,8	-	7,79	6,36	-0,07
Vazantes	2.010	1.303	707	64,8	-	1,35	4,55	-3,32
Aratuba	11.524	1.836	9.688	15,9	85,81	1,73	3,99	1,33
Aratuba	11.524	1.836	9.688	15,9	-	1,73	3,99	1,33
Baturité	29.467	19.130	10.337	64,9	84,85	1,65	3,38	-1,14
Baturité	26.231	18.187	8.044	69,3	-	1,82	3,42	-1,32
Boa Vista	1.419	308	1.111	21,7	-	-1,71	-0,64	-2,00
São Sebastião	1.817	635	1.182	34,9	-	2,23	4,65	1,07
Barreira	7.846	4.357	3.489	55,5	34,70	-11,87	5,45	-21,11
Barreira	7.846	4.357	3.489	55,5	-	-11,87	5,45	-21,11
Beberibe	12.297	4.686	7.611	38,1	173,93	2,33	4,15	1,30
Beberibe	12.297	4.686	7.611	38,1	-	2,33	4,15	1,30
Canindé	4.268	187	4.081	4,4	6,42	-4,76	1,45	-5,00
Esperança	982	57	925	5,8	-	-14,75	3,93	-15,40
Targinos	3.286	130	3.156	4,0	-	0,12	0,47	0,10
Capistrano	15.504	4.890	10.614	31,5	82,95	-0,07	1,86	-0,89
Capistrano	15.504	4.890	10.614	31,5	-	-0,07	1,86	-0,89
Choró	11.445	2.319	9.126	20,3	14,44	1,19	11,10	-0,63
Barbada	1.836	33	1.803	1,8	-	-	-	-
Caçarinha	2.123	56	2.067	2,6	-	-4,99	-1,70	-5,07
Choró	4.060	1.803	2.257	44,4	-	-12,78	6,61	-19,64
Maravilha	1.830	237	1.593	13,0	-	-	-	-
Monte Castelo	1.596	190	1.406	11,9	-	-	-	-
Chorozinho	7.228	5.481	1.747	75,8	33,31	-14,14	4,98	-31,03
Chorozinho	7.228	5.481	1.747	75,8	-	-14,14	4,98	-31,03
Cascavel	3.974	3.974	0	100,0	20,32	1,02	1,02	-
Jacarecoara	3.974	3.974	0	100,0	-	1,02	1,02	-
Guaramiranga	2.800	859	1.941	30,7	59,70	2,88	0,71	3,94
Guaramiranga	2.800	859	1.941	30,7	-	2,88	0,71	3,94
Horizonte	20.726	13.938	6.788	67,2	343,09	8,12	7,21	10,13

Tabela 4.2 - Evolução da População e Distribuição Geográfica

Bacia Hidrográfica/ Municípios/Distritos	População Residente (hab) - 1996			Taxa de Urbanização (%)	Densidade Demográfica (hab/km ²)	Taxa Geométrica de Crescimento Anual - 1991/1996 (%)		
	Total	Situação do Domicílio				Total	Urbana	Rural
		Urbano	Rural					
Horizonte	18.629	13.465	5.164	72,3	-	7,70	7,60	7,93
Queimados	2.097	473	1.624	22,6	-	12,26	-1,26	19,38
Itapiúna	14.140	6.191	7.949	43,8	23,85	1,93	4,51	0,15
Caio Prado	3.431	1.449	1.982	42,2	-	0,54	4,23	-1,72
Itans	1.618	531	1.087	32,8	-	3,95	8,88	1,97
Itapiúna	6.712	3.073	3.639	45,8	-	4,15	4,95	3,49
Palmatória	2.379	1.138	1.241	47,8	-	-2,52	2,05	-5,82
Mulungu	8.197	3.618	4.579	44,1	196,57	0,89	3,66	-1,02
Mulungu	8.197	3.618	4.579	44,1	-	0,89	3,66	-1,02
Ocara	8.472	4.128	4.344	48,7	62,43	2,21	3,30	1,23
Arisco dos Marianos	1.143	230	913	20,1	-	2,18	3,25	1,92
Ocara	4.262	2.766	1.476	65,4	-	3,11	3,46	2,46
Sereno de Cima	3.067	1.112	1.955	36,3	-	1,04	2,90	0,06
Pacajus	34.684	27.702	7.182	79,4	173,90	1,87	4,11	-4,73
Pacajus	32.883	26.955	5.928	82,0	-	3,25	4,21	-0,53
Itaipaba	2.001	747	1.254	37,3	-	-11,95	0,77	-16,36
Redenção	10.603	4.615	5.988	43,5	93,01	-0,73	0,55	-1,65
Antônio Diogo	7.188	4.154	3.034	57,8	-	-24,44	0,33	-0,89
Guassi	3.415	461	2.954	13,5	-	-1,79	2,67	-2,39
RIO MALCOZINHADO	38.839	30.037	8.802	77,3	179,95	3,61	3,65	3,48
Cascavel	34.183	28.924	5.259	84,6	148,43	1,58	2,18	-1,39
Guanacés	6.797	2.151	4.646	31,6	-	0,40	4,34	-1,16
Cascavel	27.386	26.773	613	97,8	-	1,88	2,01	-3,03
Horizonte	4.656	1.113	3.543	23,9	115,59	1,83	3,30	1,39
Aningas	1.567	68	1.499	4,3	-	1,27	7,21	1,05
Dourados	3.089	1.045	2.044	33,8	-	2,12	3,08	1,64
RIACHO CAPONGA ROSEIRA	2.733	1.002	1.731	36,7	142,34	1,69	2,08	1,47
Aquiraz	2.733	1.002	1.731	36,7	142,34	1,69	2,08	1,47
Caponga da Bernarda	2.733	1.002	1.731	36,7	-	1,69	2,03	1,47
RIACHO CAPONGA FUNDA	13.577	4.912	8.665	36,2	501,00	1,76	3,26	0,97
Pindoretama	13.577	4.912	8.665	36,2	501,00	1,76	3,26	0,97
Pindoretama	13.577	4.912	8.665	36,2	-	1,76	3,26	0,97
RIO PACOTI	114.828	70.583	44.245	61,5	98,26	1,51	2,54	-0,01
Acarape	10.962	6.321	4.641	57,7	90,00	1,47	3,26	-0,70
Acarape	10.962	6.321	4.641	57,7	-	1,47	3,26	-0,70
Aquiraz	19.439	19.439	-	100,0	145,28	4,10	4,10	-
Aquiraz	19.439	19.439	-	100,0	-	4,10	4,10	-
Guaiúba	17.060	11.420	5.640	66,9	63,54	-0,58	2,59	-5,58
Água Verde	4.158	2.856	1.302	68,7	-	-0,66	3,35	-7,03
Guaiúba	10.703	7.697	3.006	71,9	-	1,58	2,66	-0,90
Itacima	2.199	867	1.332	39,4	-	-8,18	-0,21	-11,79
Guaramiranga	2.695	795	1.900	29,5	144,89	-1,21	1,36	-2,18
Pernabuquinho	2.695	795	1.900	29,5	-	-1,21	1,36	-2,18
Itaitinga	14.372	13.203	1.169	91,9	162,95	2,88	2,54	7,19
Itaitinga	14.372	13.203	1.169	91,9	-	2,88	2,54	7,19
Maranguape	18.086	6.032	12.054	33,4	86,41	3,20	2,20	3,72
Cachoeira	1.360	446	914	32,8	-	6,77	3,20	8,82
Jubaia	1.985	1.483	502	74,7	-	0,61	2,26	-3,50
Ladeira Grande	2.184	320	1.864	14,7	-	2,78	3,30	2,69
Lages	1.853	1.066	787	57,5	-	1,99	2,03	1,94
Papara	3.284	607	2.657	18,6	-	2,17	0,43	2,59
Penedo	3.414	916	2.498	26,8	-	6,34	4,67	6,99
Tanques	2.785	577	2.208	20,7	-	2,69	0,03	3,46
Umarizeiras	1.241	617	624	49,7	-	2,78	1,38	3,91
Pacoti	10.972	2.859	8.113	26,1	125,39	1,67	-2,10	3,23
Colina	2.737	82	2.655	3,0	-	0,79	-4,64	0,99
Fátima	2.705	167	2.538	6,2	-	21,40	9,94	22,45
Pacoti	4.101	2.430	1.671	59,3	-	-3,06	-2,79	-3,44

Tabela 4.2 - Evolução da População e Distribuição Geográfica

Bacia Hidrográfica/ Municípios/Distritos	População Residente (hab) - 1996			Taxa de Urbanização (%)	Densidade Demográfica (hab/km ²)	Taxa Geométrica de Crescimento		
	Total	Situação do Domicílio				Anual - 1991/1996 (%)		
		Urbano	Rural			Total	Urbana	Rural
Santa Ana	1.429	180	1.249	12,6	-	-2,85	1,03	-3,34
Palmácia	9.873	3.824	6.049	38,7	86,45	-0,72	0,53	-1,46
Gado	1.309	164	1.145	12,5	-	1,67	-0,95	2,08
Gado dos Rodrigues	681	208	473	30,5	-	9,33	5,13	11,54
Palmácia	7.883	3.452	4431	43,8	-	-1,71	0,36	-3,16
Redenção	11.369	6.690	4.679	58,8	89,73	-0,67	1,44	-3,29
Redenção	9.540	6.660	2.880	69,8	-	0,12	1,47	-2,63
São Geraldo	1.829	30	1.799	1,6	-	-4,29	-3,58	-4,30
RIO COCÓ/COAÇU	746.525	739.700	6.825	99,1	1.506,00	2,34	2,35	1,28
Aquiraz	8.723	7.318	1.405	83,9	433,98	1,52	-0,17	14,63
Camará	8.723	7.318	1.405	83,9	-	1,52	-0,17	14,63
Eusébio	27.206	27.206	-	100,0	417,27	5,92	5,92	-
Eusébio	27.206	27.206	-	100,0	-	5,92	5,92	-
Itaitinga	11.514	9.544	1.970	82,9	171,59	2,24	3,26	-1,98
Gereraú	11.514	9.544	1.970	82,9	-	2,24	3,26	-1,98
Maracanaú	28.524	28.524	-	100,0	486,68	2,81	2,81	-
Pajuçara	28.524	28.524	-	100,0	-	2,81	2,81	-
Pacatuba	43.594	40.144	3.450	92,1	359,69	3,13	3,47	-0,40
Monguba	1.943	1.943	-	100,0	-	5,06	5,06	-
Pacatuba	9.650	7.980	1.690	82,5	-	0,46	1,75	-4,54
Pavuna	5.832	4.072	1.760	69,8	-	5,60	5,92	4,88
Sen. Carlos Jereissati	26.169	26.169	-	100,0	-	3,55	3,55	-
Fortaleza	628.964	628.964	-	100,0	3.752,10	2,15	2,15	-
Fortaleza	628.964	628.964	-	100,0	3.752,10	2,15	2,15	-
RIO CATU	12.951	9.969	2.982	77,0	99,24	0,77	1,15	-1,49
Aquiraz	12.951	9.969	2.982	77,0	99,24	0,77	1,15	-1,49
Justiniano de Serpa	7.484	4.502	2.982	60,2	-	0,78	2,47	-1,49
Tapera	5.467	5.467	-	100,0	-	0,76	0,76	-
SIST. CEARÁ/MARANGUAPE	1.326.488	1.311.903	14.585	98,9	1.717,10	2,29	2,30	1,99
Caucaia	194.258	183.158	11.100	94,3	406,14	4,81	4,97	2,37
Bom Princípio	2.281	892	1.389	39,1	-	-0,02	0,90	-0,58
Caucaia	91.806	84.215	7.591	91,7	-	4,75	4,84	3,82
Jurema	96.414	96.414	-	100,0	-	5,03	5,03	-
Mirambé	3.757	1.637	2.120	43,6	-	3,91	11,47	-0,28
Maracanaú	133.541	132.969	572	99,6	2.628,76	-0,08	-0,05	-5,05
Maracanaú	133.541	132.969	572	99,6	-	-0,08	-0,05	-5,05
Maranguape	47.381	44.468	2.913	93,9	292,47	3,23	3,29	2,30
Maranguape	41.682	39.505	2.177	94,8	-	3,43	3,30	5,95
Sapupara	5.699	4.963	736	87,1	-	1,83	3,22	-5,35
Fortaleza	951.308	951.308	-	100,0	11.559,03	2,13	2,13	-
Fortaleza	951.308	951.308	-	100,0	11.559,03	2,13	2,13	-
RIO CAUHIPE	3.330	1.358	1.972	40,8	12,10	8,85	16,57	4,96
Caucaia	3.330	1.358	1.972	40,8	12,10	8,85	16,57	4,96
Guaranu	3.330	1.358	1.972	40,8	12,10	8,85	16,57	4,96
RIO SÃO GONÇALO	42.915	26.239	16.676	61,1	34,81	1,17	3,41	-1,81
Caucaia	11.562	4.223	7.339	36,5	46,55	4,43	5,49	3,85
Catuana	5.537	1.354	4.183	24,5	-	5,01	4,53	5,16
Sítios Novos	3.697	2.774	1.123	71,2	-	4,59	5,83	1,88
Tucunduba	2.128	95	2.033	4,5	-	2,73	10,37	2,44
Maranguape	14.444	9.466	4.978	65,5	66,72	0,46	4,12	-4,84
Amanari	4.853	2.827	2.026	58,2	-	0,25	4,83	-4,57
Antônio Marques	1.129	262	867	23,2	-	-1,97	1,77	-2,95
Itapebussu	4.184	3.544	640	84,7	-	1,62	3,53	-6,21
Vertentes do Lajedo	344	62	282	18,0	-	-3,87	3,58	-5,13
Manoel Guedes	1.983	942	1.041	47,5	-	0,93	7,84	-3,55
S. João do Amanari	1.951	1.829	122	93,7	-	0,49	2,89	-17,44

Tabela 4.2 - Evolução da População e Distribuição Geográfica

Bacia Hidrográfica/ Municípios/Distritos	População Residente (hab) - 1996			Taxa de Urbanização (%)	Densidade Demográfica (hab/km ²)	Taxa Geométrica de Crescimento Anual - 1991/1996 (%)		
	Total	Situação do Domicílio				Total	Urbana	Rural
		Urbano	Rural					
Pentecoste	1.024	10	1.014	1,0	2,77	-11,97	-15,34	-11,93
Porfírio Sampaio	1.024	10	1.014	1,0	-	-11,97	-15,34	-11,93
S. Gonçalo do Amarante	15.885	12.540	3.345	78,90	39,94	1,03	2,29	-3,00
Croatá	5.834	4.473	1.361	76,70	-	2,93	3,00	2,72
S. Gonçalo do Amarante	6.857	5.529	1.328	80,60	-	1,00	3,26	-6,07
Siupé	2.284	1.801	483	78,90	-	-1,09	0,76	-6,58
Umarituba	910	737	173	81,00	-	-3,86	-3,85	-3,89
FLED	426.239	411.422	14.817	96,50	882,92	2,20	2,17	3,04
Aquiraz	8.436	8.436	-	100,00	72,16	2,83	2,83	-
Jacaúna	5.300	5.300	-	100,00	-	1,86	1,86	-
Patacas	3.136	3.136	-	100,00	-	4,60	4,60	-
Beberibe	13.571	3.674	9.897	27,10	103,26	1,12	-0,43	1,73
Parajuru	4.735	2.991	1.744	63,20	-	-2,67	-1,57	-4,41
Sucatinga	8.836	683	8.153	7,70	-	3,57	5,73	3,40
Cascavel	8.780	8.780	-	100,00	442,09	5,15	5,15	-
Caponga	8.780	8.780	-	100,00	-	5,15	5,15	-
S. Gonçalo do Amarante	10.211	5.291	4.920	51,80	250,88	4,23	2,72	6,01
Pecém	6.995	2.937	4.058	42,00	-	5,46	4,41	6,26
Taíba	3.216	2.354	862	73,20	-	1,82	0,82	4,89
Fortaleza	385.241	385.241	-	100,00	7.029,94	2,12	2,12	-
Fortaleza	385.241	385.241	-	100,00	7.029,94	2,12	2,12	-
TOTAL	3.008.162	2.738.415	269.747	91,00	229,19	2,01	2,37	-1,31
FORTALEZA	1.965.513	1.965.513	-	100,00	6.450,86	2,13	2,13	-
CEARÁ	6.809.794	4.713.311	2.096.483	69,21	46,53	1,35	2,52	-1,00

FONTE: IBGE, Contagem da População - 1996; Censo Demográfico Ceará - 1991.

Nos casos em que não existem distritos no trecho de algum município dividido, procedeu-se a estimativa do número de domicílio rurais através de contagem pelas cartas da SUDENE (escala 1:100.000), isto para estimativa da população e da densidade demográfica.

A taxa anual de crescimento da população total verificada para o período de 1991/96 foi de 2,01% ao ano, valor superior ao registrado pelo Estado (1,35% ao ano). O crescimento populacional na região das Bacias Metropolitanas acusou taxas decrescentes em 33,6% das localidades e sinais de estagnação em 3,9%, apresentando valores positivos na maior parte (62,5%) dos núcleos urbanos, com taxas oscilando entre 0,49% e 21,4%. Destacam-se neste grupo as sedes municipais de Horizonte (7,70%), Eusébio (5,92%), Caucaia (4,75%), e os distritos de Fátima em Pacoti (21,40%), Queimados em Horizonte (12,26%), Gado dos Rodrigues em Palmácia (9,33%) e Guararu em Caucaia (8,85%).

No período em análise, o crescimento urbano atingiu uma taxa média anual de 2,37% ao ano com 49,2% das localidades apresentando um nível médio de incremento urbano entre 1,0% e 5,0%. Cerca de 6,0% das localidades apresentaram taxas elevadas de crescimento urbano chegando a atingir valores superiores a 8,0% ao ano, como é o caso da sede municipal de Ibaretama, e dos distritos de Guararu,

Mirambé e Tucunduba em Caucaia, Fátima em Pacoti, Itans em Itapiúna e Jenipapeiro em Aracoiaba.

Em relação à população rural, esta apresentou taxas anuais de crescimento negativas em 40,6% das localidades, estagnação em 2,3% e valores positivos em 57,1% com destaque para Aracoiaba, Itapiúna, Horizonte, Itaitinga, e os distritos de Penedo, Tanques e Umarizeiras em Maranguape, inclusive a sede, cujas taxas de crescimento oscilaram entre 3,0% e 8,0% ao ano.

Dentre as bacias estudadas, 54,5% registraram crescimento negativo da população rural, tendo-se verificado maior evasão da população rural no período analisado, na bacia do Choró (-3,55% ao ano). A média das Bacias Metropolitanas indicou, também, uma taxa negativa de -1,31% ao ano. Em termos de crescimento, as bacias do Cauhipe e Malcozinhado foram aquelas que apresentaram maiores taxas de crescimento da população rural, 4,96% e 3,48%, respectivamente.

Em suma, no período de 1991/96, ocorreu não apenas uma diminuição relativa da população rural que passou de 10,6% para 9,0% do total, mas também uma diminuição absoluta de 288.076 habitantes em 1991, para 269.747 habitantes em 1996. Tal fato evidencia não só a incapacidade das áreas rurais da região em manter o agricultor nas atividades do campo, como também, em decorrência do primeiro fato, ressalta o problema de inchaço dos centros urbanos. Estes, em sua

maioria, não contam com infra-estrutura suficiente para suportar o grande fluxo de pessoas que demandam suas áreas, na ilusão de encontrar melhores condições de vida, constituindo esse fenômeno um agravante aos problemas sócio-econômicos já enfrentados pelas grandes cidades.

4.2.2 PLUVIOMETRIA

4.2.2.1 Disponibilidade e Consistência

A rede pluviométrica aqui considerada é composta pelos postos pluviométricos mantidos pela SUDENE e pelos postos pluviométricos de responsabilidade da FUNCEME, abrangendo tanto o território das Bacias Metropolitanas como as áreas limítrofes nas bacias dos rios Jaguaribe, Banabuiu e Curu.

Foram incluídos, no estudo, todos os postos pluviométricos com dados disponíveis, objetivando viabilizar uma caracterização do regime de chuvas, anual e mensal, atendendo não só a necessidade do estabelecimento de uma série média diária sobre a bacia, mas também à metodologia de análise de consistência a ser posteriormente apresentada.

A Tabela 4.3 lista os 73 postos integrantes da rede de monitoramento com dados disponíveis, e para cada um deles, suas coordenadas geográficas e altitude, além dos seus respectivos códigos de referência (7 caracteres para os postos da SUDENE e 2 ou 3 caracteres para os postos da FUNCEME).

Tabela 4.3 - Postos Pluviométricos das Bacias Metropolitanas - Ceará com Séries da FUNCEME E SUDENE Reunidas

N.	Nome do Posto	Lat	Long	XUTM	YUTM	Altitude	Entidade		
0111023	Beberibe	4	13	38	7	593,036325	9533,862526	25	FUNCEME
0111038	Caucaia	3	45	38	41	535,163694	9585,495502	32	FUNCEME
0111054	Guaramiranga	4	17	39	0	500	9526,648938	700	FUNCEME
0111082	Maracanaú	3	52	38	40	537,009452	9572,598712	100	FUNCEME
0111103	Pacajus	4	11	38	28	559,192771	9537,582573	68	FUNCEME
0111125	Redenção	4	12	38	49	520,346826	9535,757999	400	FUNCEME
0111157	Fortim	4	27	37	47	634,994546	9508,014766	10	FUNCEME
0111176	Pindoretama	4	3	38	20	574,003875	9552,310527	47	FUNCEME
0111354	Barreira	4	19	38	39	538,838266	9522,855425	80	FUNCEME
0111361	Ocara	4	29	38	36	544,376806	9504,429277	105	FUNCEME
0111362	Casteão	3	43	38	33	549,971604	9589,173669	18	FUNCEME
0111394	Açude Amanary	4	1	38	53	512,950924	9556,024571	116	FUNCEME
0111411	Fazenda Tio Cosme	3	41	38	54	511,105107	9592,870297	40	FUNCEME
0111413	Fazenda Columinjuba	3	58	38	43	531,454251	9561,546947	160	FUNCEME
0111544	Ibaretama	4	45	38	48	522,179987	9474,961255	110	FUNCEME
0111552	Eusébio	3	54	38	30	555,512391	9568,904952	30	FUNCEME
2861786	Paracuru	3	23	39	5	490,742773	9626,031168	10	SUDENE
2872207	São Gonçalo do Amarante	3	36	38	58	503,702041	9602,082164	84	SUDENE
2872305	Umarituba	3	40	38	59	501,850885	9594,713166	85	SUDENE
2872409	Sítios Novos	3	44	38	58	503,701493	9587,344054	60	SUDENE
2872435	Guararu	3	43	38	50	518,507837	9589,184645	50	SUDENE
2872496	Fortaleza Central	3	44	38	32	551,821469	9587,330383	26	SUDENE
2872594	Fortaleza (Escola Regional)	3	45	38	32	551,82049	9585,488055	26	SUDENE
2872602	Sítios Novos de Cima	3	49	39	0	500	9578,132784	60	SUDENE
2872684	Mondubim	3	48	38	35	546,265545	9579,963905	30	SUDENE
2872766	Maranguape	3	53	38	41	535,158272	9570,757112	67	SUDENE
2872925	Bom Princípio	3	58	38	53	512,951707	9561,551415	210	SUDENE
2872945	Otávio Lobo (Trapia)	3	58	38	47	524,053211	9561,549181	220	SUDENE
2872978	Pacatuba	3	58	38	37	542,555896	9561,542479	54	SUDENE
2873824	Aquiraz	3	54	38	23	568,465734	9568,896366	30	SUDENE
2881895	Aratuba	4	25	39	2	496,30163	9511,8105	600	SUDENE
2882018	Itapebussu	4	1	38	55	509,250657	9556,025023	230	SUDENE
2882035	Columinjuba	4	1	38	50	518,501333	9556,02361	350	SUDENE
2882076	Guaiuba	4	2	38	38	540,702324	9554,174055	59	SUDENE
2882146	Tanques	4	5	38	47	524,049787	9548,653136	100	SUDENE
2882161	Jubaia	4	3	38	42	533,301146	9552,334778	100	SUDENE
2882188	Açude Riachão	4	4	38	34	548,100908	9550,485756	60	SUDENE
2882268	Bau	4	7	38	40	536,998261	9544,964083	59	SUDENE
2882321	Gado	4	9	38	54	511,098958	9541,28654	390	SUDENE
2882331	Palmácia	4	9	38	51	516,648447	9541,285664	380	SUDENE
2882339	Acarape do Melo - Açude	4	11	38	49	520,347257	9537,600295	250	SUDENE
2882415	Pacoti	4	13	38	56	507,398678	9533,917779	800	SUDENE
2882458	Acarape	4	13	38	43	531,444501	9533,912379	76	SUDENE
2882601	Mulungu-Fazenda	4	18	39	0	500	9524,706646	1050	SUDENE
2882626	Baturité	4	22	38	50	518,493107	9517,335424	123	SUDENE
2882648	Antonio Diogo	4	19	38	46	525,892088	9522,860386	171	SUDENE
2882735	Aracolaba	4	22	38	34	548,082466	9517,323628	101	SUDENE
2882862	Vazantes	4	25	38	42	533,285481	9511,803872	50	SUDENE
2883256	Cascavel	4	8	38	14	585,096278	9543,088488	30	SUDENE
2883435	Angicos	4	13	38	20	573,988423	9533,886445	35	SUDENE
2883605	Chorozinho	4	19	38	29	557,333097	9522,844897	42	SUDENE
2883679	Itapem	4	20	38	7	598,021501	9520,964965	20	SUDENE
2883836	Pitombeiras (Pitombeira)	4	26	38	20	573,967405	9509,93502	45	SUDENE
2884912	Uburanas	4	28	37	57	616,497294	9506,200546	15	SUDENE
2891168	Fazenda Feijão	4	34	39	10	481,511902	9495,22773	250	SUDENE
2891677	Açude Pompeu Sobrinho	4	48	39	7	487,062628	9469,43641	190	SUDENE
2891766	Queimadas	4	53	39	11	479,672312	9460,223144	190	SUDENE
2891876	Dom Maurício	4	56	39	8	485,217339	9454,697463	190	SUDENE
2892012	Riachão	4	31	38	57	505,546804	9500,756592	130	SUDENE
2892089	Curupira	4	32	38	34	548,071655	9498,900111	120	SUDENE
2892111	Itapiuna	4	33	38	57	505,54655	9497,071883	130	SUDENE
2892307	Caio Prado	4	39	38	58	503,697184	9486,018246	111	SUDENE
2892527	Várzea Nova	4	45	38	52	514,786641	9474,963036	60	SUDENE
2892531	Olho D'água	4	45	38	51	516,634975	9474,962657	150	SUDENE
2892605	Daniel de Queiroz (Muxiopo)	4	49	38	59	501,84815	9467,595171	150	SUDENE
2892679	Boa Água	4	50	38	37	542,506722	9465,740894	120	SUDENE
2892972	Ibicuitinga	4	58	38	39	538,802747	9451,00403	120	SUDENE
2893031	Cristais	4	30	38	21	572,111628	9502,566991	50	SUDENE
2893165	Boqueirão do Cesário	4	34	38	11	590,594604	9495,178462	150	SUDENE
2893336	Patos	4	41	38	20	573,941848	9482,298588	150	SUDENE
2894148	Aracali	4	34	37	46	636,822239	9495,11261	20	SUDENE

Os postos pluviométricos operados pela FUNCEME possuem, em geral, séries que iniciam nas décadas dos anos 70 e 80, sendo, geralmente, de curta duração. Entretanto estes postos correspondem as observações mais recentes de pluviometria diária e, na maioria dos casos, dispunham de dados até o ano de 1996.

As informações mais atuais dos postos operados pela SUDENE datam em geral do ano de 1989, porém tendo sido os postos da FUNCEME, via de regra, instalados próximos daqueles de responsabilidade da SUDENE, realizou-se, para tais casos, a junção das séries relativas aos postos mais antigos (SUDENE) com aqueles com informações mais recentes, perfazendo assim séries que se estendem até o ano de 1996. Nos casos de não dispor de postos mais antigos para a realizar as junções consideraram-se apenas os dados dos postos da FUNCEME. Para os postos para os quais foi possível a junção preservou-se o código do posto mais antigo e com maior quantidade de dados, ou seja o código do posto da SUDENE.

Com isto foi possível promover um adensamento de informações tal que num período de 85 anos (1912-1996) tem-se um número de postos que viabiliza a análise regional da precipitação e o estabelecimento de uma série média de igual extensão. Convém ressaltar o avanço que isto representa em relação ao último estudo desta natureza (PERH - Plano Estadual dos Recursos Hídricos - 1992), quando, na ocasião do seu desenvolvimento, procedeu-se a análise e

estabelecimento de série média para o período de 1912 à 1988, totalizando assim 77 anos.

A Tabela 4.4 apresenta o resumo das precipitações médias nas bacias hidrográficas dos postos fluviométricos, ao passo que a Tabela 4.5 traz a mesma abordagem sintética agora para as bacias hidrográficas dos açudes.

4.3 CURVAS COTA – ÁREA – VOLUME DOS RESERVATÓRIOS EM ESTUDO

As Figuras 4.3 a 4.5, a seguir, apresentam as curvas CAV dos reservatórios Pacajus, Pacoti-Riachão e Gavião, objeto deste estudo, bem como aponta os postos de precipitação e evaporação utilizados em cada um dos reservatórios.

4.4 ESTUDO DE DEMANDA

A consolidação das demandas a serem atendidas na Região Metropolitana de Fortaleza e no Complexo Portuário do Pecém, apresentada na Tabela 4.6, a seguir, para os horizontes 2000, 2010 e 2020, foi obtida no Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas (1998).

Tabela 4.4 - Parâmetros Estatísticos das Séries de Precipitações Médias (mm) dos Postos Fluviométricos

Código	Nome	Extensão da Série	Estatísticas Mensais												Estatísticas Anuais					
			Parâmetros	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média	D.P.	C.V.	Min	Máx
35650000	Sítios Novos	1922-1996	Média	76,5	140,4	240,3	237,9	134,8	56,3	23,8	5,3	5,2	4,4	5,6	26,4	956,9	378,7	0,396	179,5	2006,5
			D.P.	67,7	96,7	110,2	124,9	89,3	45,8	26,6	6,1	5,4	4,7	8,7	31,7					
			C.V.	0,9	0,7	0,5	0,5	0,7	0,8	1,1	1,2	1,0	1,0	1,6	1,2					
			Mínimo	0,0	3,7	8,9	32,5	14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
			Máximo	393,9	483,1	664,5	537,6	454,9	202,1	108,4	31,6	21,0	20,4	58,8	154,6					
35760000	Baú	1913-1996	Média	92,3	165,9	266,8	254,9	161,5	76,4	35,4	10,9	10,9	8,8	12,7	35,5	1132,0	455,2	0,402	179,5	2353,8
			D.P.	83,7	113,4	125,0	121,8	99,1	65,3	40,5	13,1	12,0	9,5	18,2	37,8					
			C.V.	0,9	0,7	0,5	0,5	0,6	0,9	1,1	1,2	1,1	1,1	1,4	1,1					
			Mínimo	0,0	3,7	8,9	34,3	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
			Máximo	414,5	483,1	664,5	597,8	454,9	316,4	183,6	69,6	63,9	45,6	115,5	180,3					
35830000	Caio Prado	1912-1996	Média	62,7	107,0	180,2	173,2	113,4	57,4	23,3	5,8	1,4	2,5	6,1	21,4	754,4	299,1	0,396	196,3	1783,4
			D.P.	53,9	73,8	87,1	84,4	72,6	49,8	31,3	12,4	2,9	5,3	14,5	25,7					
			C.V.	0,9	0,7	0,5	0,5	0,6	0,9	1,3	2,1	2,1	2,1	2,4	1,2					
			Mínimo	0,0	7,9	26,4	8,5	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
			Máximo	281,7	334,0	398,1	390,5	357,0	210,9	152,0	79,1	14,9	27,6	115,2	97,5					
35875000	Aracoiaba	1912-1996	Média	92,1	154,4	248,0	239,6	186,7	108,3	58,9	20,4	14,4	19,1	18,5	38,9	1199,2	392,5	0,327	366,4	2149,2
			D.P.	72,8	98,7	96,5	98,3	97,5	79,2	51,1	19,8	14,5	21,0	18,6	35,0					
			C.V.	0,8	0,6	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0	1,1	1,0	0,9					
			Mínimo	6,4	32,4	32,9	46,6	22,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
			Máximo	422,1	391,1	444,0	474,7	368,8	332,0	227,4	86,1	77,9	134,2	98,2	151,0					
35880000	Chorozinho	1912-1996	Média	67,1	116,7	196,9	183,0	117,1	58,2	24,8	7,1	3,2	4,3	8,7	25,9	812,9	305,0	0,375	181,4	1713
			D.P.	55,0	77,3	87,9	87,3	70,4	50,0	30,5	13,0	5,2	6,7	18,2	27,6					
			C.V.	0,8	0,7	0,4	0,5	0,6	0,9	1,2	1,8	1,6	1,5	2,1	1,1					
			Mínimo	0,9	8,5	25,0	10,3	6,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
			Máximo	309,9	317,9	376,9	420,5	292,0	193,6	136,8	82,1	28,5	35,0	151,8	118,3					
35950000	Cristais	1919-1996	Média	72,1	130,2	205,4	184,6	97,5	42,3	16,7	4,1	3,0	5,2	11,6	30,2	803,0	291,5	0,363	249,5	1674,6
			D.P.	57,8	85,7	88,2	92,6	67,5	40,3	22,2	7,3	8,8	9,8	37,4	35,0					
			C.V.	0,8	0,7	0,4	0,5	0,7	1,0	1,3	1,8	2,9	1,9	3,2	1,2					
			Mínimo	4,7	22,7	41,7	8,0	2,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
			Máximo	370,1	352,4	400,1	432,2	273,8	186,5	102,3	50,0	70,8	43,4	320,5	199,9					

Tabela 4.5 - Parâmetros Estatísticos das Séries de Precipitações Médias dos Açudes Existentes e Projetados

Nome	Extensão da Série	Estatísticas Mensais												Estatísticas Anuais					
		Parâmetros	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média	D.P.	C.V.	Min	Máx
Pacajus	1912-1996	Média	72,5	130,3	214,1	206,6	144,9	76,2	36,1	10,4	6,9	9,0	10,7	28,2	945,9	324,1	0,3	291,3	1810,5
		D.P.	55,9	84,1	87,3	89,9	80,5	57,9	35,3	12,1	7,9	11,6	14,8	26,5					
		C.V.	0,8	0,6	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,1	1,3	1,4	0,9					
		Mínimo	3,5	22,8	35,7	26,7	14,7	7,8	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,9					
		Máximo	312,3	327,5	396,0	418,8	343,6	285,7	158,7	58,0	46,6	72,8	111,0	132,7					
Pacoti-Riachão	1912-1996	Média	88,4	164,3	266,8	255,7	161,5	76,8	33,6	11,9	9,7	9,8	11,7	38,0	1128,2	418,4	0,4	289,1	2189,6
		D.P.	73,8	106,4	108,1	106,2	90,9	62,0	37,1	19,4	10,7	11,7	15,1	45,9					
		C.V.	0,8	0,6	0,4	0,4	0,6	0,8	1,1	1,6	1,1	1,2	1,3	1,2					
		Mínimo	1,7	22,9	51,9	43,7	33,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1					
		Máximo	393,9	432,5	510,1	500,6	429,3	288,4	178,8	155,4	51,1	65,1	90,2	309,1					
Gavião	1912-1996	Média	99,3	189,8	300,8	291,5	181,9	92,7	39,6	15,6	12,9	12,1	15,4	46,2	1297,7	502,3	0,4	321,1	2892,5
		D.P.	84,4	125,8	138,9	139,2	104,7	74,2	47,3	33,9	17,8	16,6	20,3	68,8					
		C.V.	0,9	0,7	0,5	0,5	0,6	0,8	1,2	2,2	1,4	1,4	1,3	1,5					
		Mínimo	0,0	6,7	47,4	41,5	19,7	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
		Máximo	469,5	529,7	710,1	767,7	511,0	371,4	219,9	287,8	87,4	99,0	118,5	515,3					

Barragem Pacajus

Rio Barrado: Choró

Postos pluviométricos representativos: Angicos (2683345)

Evaporação representativa: Fortaleza

Capacidade máxima (hm³): 240,000

Cota	Área (ha)	Vol (Hm ³)
22	0,0	0,0
23	4,0	0,0
24	32,6	0,2
25	116,1	0,8
26	310,3	2,9
27	540,3	7,1
28	767,0	13,7
29	1043,5	22,6
30	1376,1	34,7
31	1698,3	50,1
32	2072,6	68,9
33	2424,6	91,4
34	2712,7	117,2
35	2908,2	145,4
36	3088,3	175,4
37	3271,1	207,2
38	3556,9	240,0

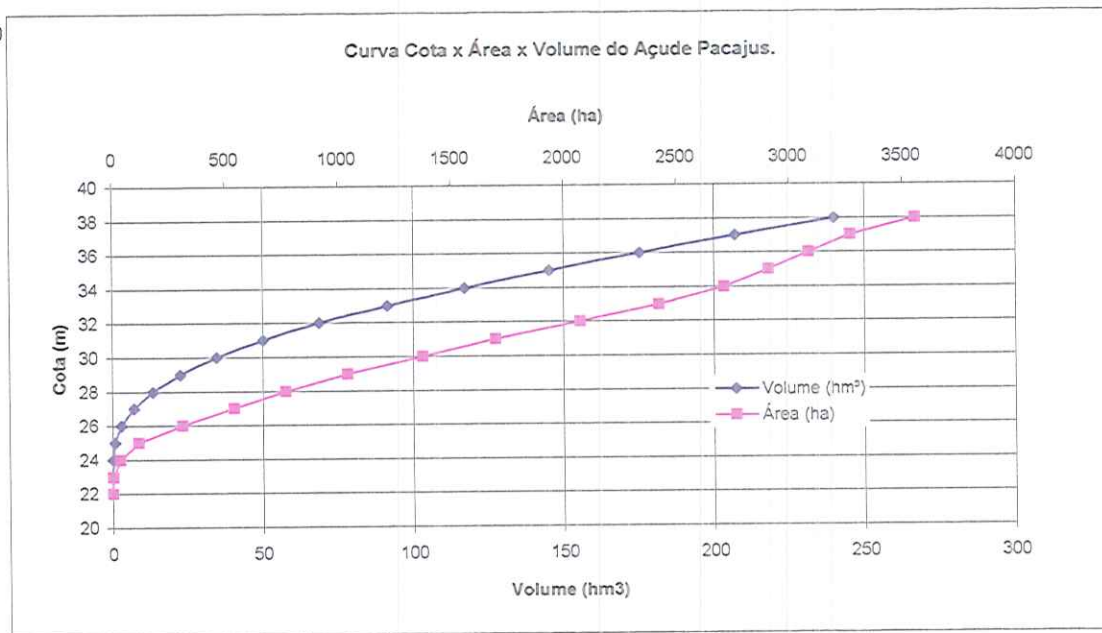


Figura 4.3 - Dados da Curva Cota-Área-Volume do Açude Pacajus

Barragem Pacoti/Riachão

Rio Barrado: Rio Pacoti

Postos pluviométricos representativos: Açude Riachão (2882188)

Evaporação representativa: Fortaleza

Capacidade máxima (hm³):

Cota	Área (ha)	Vol (Hm ³)
20,0	0,0	0,0
22,0	2,9	0,0
24,0	21,8	0,2
26,0	118,2	1,4
28,0	374,8	6,1
30,0	711,6	16,9
32,0	1103,8	35,0
34,0	1573,3	61,8
36,0	2110,0	98,6
38,0	2748,6	147,2
40,0	3312,5	207,1
42,0	3936,0	283,1
44,0	4588,9	371,6
45,0	4918,2	420,6

420,600

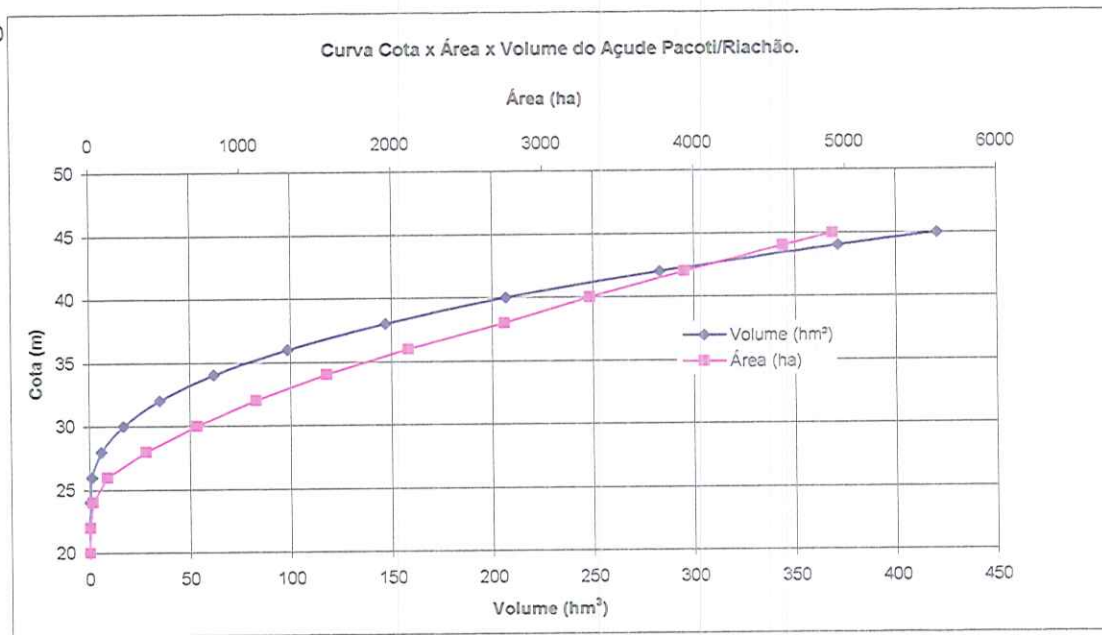


Figura 4.4 - Dados da Curva Cota-Área-Volume do Açude Pacoti-Riachão

Barragem Gavião

Rio Barrado: Riacho Gavião

Postos pluviométricos representativos: Açude Riachão (2882188)

Evaporação representativa: Fortaleza

Capacidade máxima (hm³):

Cota	Área (ha)	Vol (Hm ³)
24,0	0,0	0,0
25,0	24,6	0,1
26,0	53,9	0,5
27,0	98,3	1,3
28,0	139,5	2,4
29,0	190,6	4,1
30,0	243,3	6,2
31,0	301,3	9,0
32,0	372,5	12,3
33,0	448,7	16,4
34,0	516,7	21,2
35,0	563,5	26,7
35,5	585,8	29,5

29,500

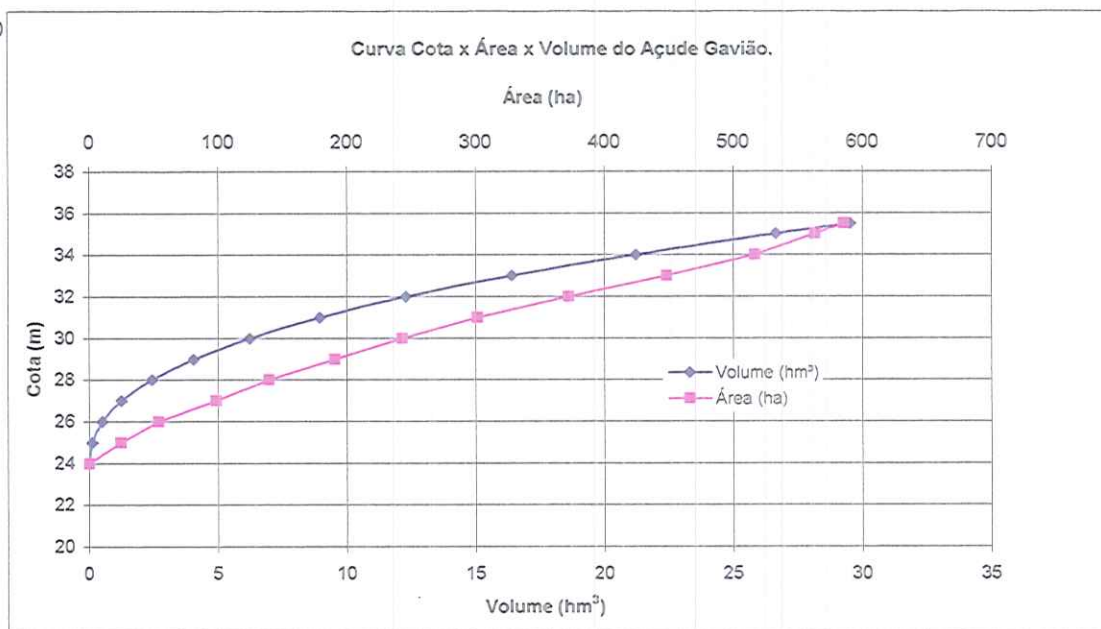


Figura 4.5 - Dados da Curva Cota-Área-Volume do Açude Gavião

Tabela 4.6 - Séries de Demandas Consolidadas dos Municípios da RMF e do Complexo Portuário do Pecém

Ano	Fortaleza, Maracanaú, Eusébio e Caucaia sem praias				Caucaia (praias)			Complexo Portuário, São Gonçalo e Pecém			Chorozinho			Horizonte			Itatinga			Maranguape			Pacajus			Pacatuba			Cascavel			TOTAL (m³/s)
	Humana	Industrial	Turismo	Total	Humana	Turismo	Total	Humana	Industrial	Total	Humana	Industrial	Total	Humana	Industrial	Total	Humana	Industrial	Total	Humana	Industrial	Total	Humana	Industrial	Total	Humana	Industrial	Total	Humana	Industrial	Total	
2000	5,953	2,904	0,000	8,857	0,093	0,000	0,093	0,040	0,524	0,564	0,015	0,004	0,019	0,032	0,069	0,099	0,043	0,008	0,052	0,116	0,148	0,264	0,064	0,305	0,398	0,111	0,087	0,208	0,100	0,342	0,442	10,997
2001	5,929	3,010	0,003	8,942	0,095	0,081	0,176	0,044	0,560	0,604	0,016	0,004	0,020	0,033	0,070	0,103	0,044	0,009	0,053	0,118	0,150	0,269	0,065	0,344	0,409	0,114	0,100	0,214	0,102	0,361	0,453	11,242
2002	5,916	3,113	0,007	9,036	0,096	0,162	0,258	0,047	0,587	0,634	0,016	0,004	0,020	0,034	0,073	0,107	0,044	0,009	0,053	0,121	0,154	0,274	0,067	0,363	0,420	0,117	0,102	0,220	0,105	0,360	0,465	11,488
2003	5,913	3,215	0,010	9,138	0,098	0,243	0,341	0,051	0,982	1,033	0,017	0,004	0,021	0,036	0,076	0,112	0,045	0,009	0,054	0,123	0,167	0,280	0,069	0,382	0,432	0,120	0,105	0,226	0,108	0,370	0,478	12,112
2004	5,918	3,288	0,013	9,220	0,104	0,324	0,428	0,056	0,998	1,053	0,017	0,004	0,021	0,040	0,079	0,119	0,045	0,012	0,057	0,126	0,160	0,285	0,071	0,372	0,443	0,124	0,109	0,232	0,111	0,379	0,490	12,350
2005	6,114	3,390	0,017	9,499	0,135	0,406	0,541	0,060	1,014	1,074	0,016	0,004	0,021	0,039	0,082	0,121	0,046	0,016	0,062	0,128	0,163	0,291	0,068	0,382	0,458	0,119	0,111	0,229	0,106	0,399	0,495	12,774
2006	6,302	3,456	0,020	9,778	0,207	0,487	0,694	0,066	1,030	1,096	0,017	0,005	0,021	0,041	0,085	0,126	0,046	0,020	0,066	0,131	0,166	0,297	0,070	0,393	0,462	0,121	0,114	0,235	0,108	0,400	0,508	13,284
2007	6,502	3,550	0,023	10,075	0,225	0,568	0,792	0,071	1,047	1,118	0,017	0,005	0,022	0,042	0,089	0,131	0,047	0,023	0,070	0,133	0,170	0,303	0,071	0,403	0,475	0,125	0,117	0,242	0,111	0,410	0,521	13,749
2008	6,706	3,643	0,026	10,376	0,242	0,649	0,891	0,077	1,063	1,140	0,017	0,005	0,022	0,044	0,092	0,136	0,047	0,027	0,074	0,136	0,173	0,309	0,073	0,414	0,487	0,128	0,120	0,248	0,114	0,421	0,535	14,220
2009	6,923	3,726	0,030	10,680	0,246	0,730	0,976	0,083	1,164	1,247	0,018	0,005	0,023	0,046	0,096	0,142	0,048	0,031	0,079	0,139	0,177	0,315	0,075	0,425	0,501	0,132	0,124	0,255	0,117	0,432	0,549	14,797
2010	7,151	3,808	0,033	10,992	0,305	0,811	1,116	0,090	1,205	1,356	0,017	0,005	0,022	0,044	0,100	0,144	0,048	0,035	0,084	0,142	0,180	0,322	0,072	0,437	0,509	0,126	0,127	0,253	0,112	0,443	0,555	15,351
2011	7,398	3,890	0,036	11,311	0,314	0,896	1,210	0,094	1,364	1,457	0,017	0,005	0,022	0,045	0,102	0,147	0,049	0,039	0,088	0,143	0,182	0,326	0,073	0,443	0,516	0,129	0,130	0,258	0,114	0,453	0,567	15,902
2012	7,629	3,967	0,040	11,636	0,323	0,980	1,304	0,097	1,463	1,560	0,019	0,005	0,023	0,046	0,103	0,149	0,049	0,043	0,092	0,145	0,185	0,330	0,074	0,449	0,523	0,131	0,132	0,264	0,117	0,462	0,579	16,459
2013	7,899	4,045	0,043	11,977	0,333	1,065	1,398	0,101	1,582	1,683	0,018	0,005	0,023	0,047	0,105	0,152	0,049	0,047	0,096	0,147	0,187	0,334	0,075	0,455	0,530	0,134	0,135	0,269	0,119	0,472	0,591	17,030
2014	8,159	4,121	0,046	12,325	0,342	1,149	1,491	0,104	1,579	1,684	0,018	0,005	0,024	0,048	0,107	0,155	0,049	0,051	0,100	0,149	0,190	0,339	0,076	0,462	0,538	0,137	0,138	0,275	0,122	0,481	0,603	17,533
2015	8,474	4,195	0,050	12,718	0,351	1,234	1,585	0,108	1,597	1,705	0,019	0,005	0,024	0,049	0,109	0,157	0,049	0,055	0,104	0,151	0,192	0,343	0,077	0,468	0,545	0,140	0,141	0,281	0,124	0,491	0,615	18,078
2016	8,644	4,277	0,053	12,973	0,360	1,319	1,678	0,112	1,614	1,726	0,019	0,006	0,025	0,049	0,111	0,160	0,050	0,059	0,109	0,153	0,194	0,347	0,078	0,474	0,553	0,143	0,144	0,287	0,127	0,501	0,628	18,486
2017	8,803	4,360	0,056	13,219	0,369	1,403	1,772	0,116	1,631	1,747	0,019	0,006	0,025	0,050	0,113	0,163	0,050	0,063	0,113	0,155	0,197	0,352	0,079	0,481	0,560	0,146	0,147	0,293	0,129	0,512	0,641	18,895
2018	8,951	4,444	0,059	13,455	0,377	1,489	1,865	0,120	1,649	1,799	0,020	0,006	0,026	0,051	0,115	0,166	0,050	0,069	0,117	0,157	0,199	0,356	0,080	0,488	0,568	0,149	0,150	0,299	0,132	0,522	0,654	19,275
2019	9,088	4,531	0,063	13,681	0,377	1,572	1,950	0,124	1,651	1,775	0,020	0,006	0,026	0,052	0,117	0,169	0,050	0,069	0,118	0,159	0,202	0,361	0,082	0,494	0,576	0,152	0,153	0,306	0,135	0,533	0,668	19,629
2020	9,214	4,620	0,066	13,899	0,377	1,657	2,034	0,129	1,653	1,782	0,020	0,006	0,027	0,053	0,119	0,171	0,050	0,069	0,118	0,161	0,205	0,366	0,083	0,501	0,584	0,155	0,157	0,312	0,138	0,544	0,682	19,975
2021	9,329	4,711	0,068	14,106	0,377	1,657	2,034	0,133	1,655	1,788	0,021	0,006	0,027	0,054	0,121	0,174	0,051	0,069	0,118	0,163	0,207	0,370	0,084	0,508	0,592	0,159	0,160	0,319	0,140	0,556	0,696	20,225
2022	9,435	4,803	0,069	14,304	0,377	1,657	2,034	0,138	1,657	1,795	0,021	0,006	0,027	0,055	0,123	0,178	0,051	0,069	0,118	0,165	0,210	0,375	0,085	0,515	0,600	0,162	0,163	0,325	0,143	0,567	0,710	20,468
2023	9,531	4,898	0,069	14,495	0,377	1,657	2,034	0,143	1,660	1,803	0,022	0,006	0,028	0,056	0,125	0,181	0,051	0,069	0,118	0,167	0,213	0,380	0,086	0,522	0,609	0,166	0,167	0,332	0,146	0,579	0,725	20,705
2024	9,618	4,995	0,069	14,679	0,377	1,657	2,034	0,148	1,662	1,810	0,022	0,006	0,028	0,057	0,127	0,184	0,051	0,069	0,119	0,169	0,215	0,385	0,087	0,530	0,617	0,169	0,170	0,339	0,149	0,591	0,740	20,935
2025	9,696	5,094	0,069	14,856	0,377	1,657	2,034	0,154	1,664	1,818	0,022	0,007	0,029	0,057	0,130	0,187	0,051	0,069	0,119	0,172	0,218	0,390	0,089	0,537	0,626	0,174	0,174	0,346	0,152	0,603	0,755	21,159
2026	9,765	5,196	0,069	15,027	0,377	1,657	2,034	0,159	1,667	1,826	0,023	0,007	0,029	0,058	0,132	0,190	0,052	0,069	0,119	0,175	0,221	0,400	0,090	0,545	0,634	0,178	0,178	0,354	0,156	0,615	0,771	21,390
2027	9,827	5,299	0,069	15,193	0,377	1,657	2,034	0,165	1,670	1,834	0,023	0,007	0,030	0,059	0,134	0,194	0,052	0,069	0,119	0,178	0,224	0,400	0,091	0,552	0,643	0,181	0,181	0,362	0,159	0,628	0,787	21,617
2028	9,882	5,405	0,069	15,353	0,377	1,657	2,034	0,171	1,672	1,843	0,023	0,007	0,030	0,061	0,136	0,197	0,052	0,069	0,119	0,181	0,227	0,406	0,092	0,560	0,652	0,185	0,185	0,370	0,162	0,641	0,803	21,839
2029	9,929	5,514	0,069	15,508	0,377	1,657	2,034	0,237	1,675	1,852	0,024	0,007	0,031	0,062	0,139	0,200	0,052	0,068	0,120	0,184	0,230	0,412	0,094	0,569	0,661	0,189	0,189	0,379	0,165	0,654	0,820	22,060
2030	9,969	5,624	0,069	15,660	0,377	1,657	2,034	0,246	1,679	1,864	0,024	0,007	0,031	0,063	0,141	0,204	0,052	0,068	0,120	0,186	0,232	0,418	0,095	0,575	0,670	0,193	0,193	0,388	0,168	0,668	0,837	22,289

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. MÉTODO PROPOSTO POR REIS ET AL. (2003)

Reis et al. (2003) propuseram um método de planejamento de operação de múltiplos reservatórios usando Algoritmo Genético e Programação Linear, como uma aproximação estocástica alternativa ao método de decomposição de Benders proposto por Pereira & Pinto (1985).

A proposta sugere a resolução do problema de otimização do sistema de reservatórios assumindo a otimização de sub-problemas seqüenciais independentes relativos a cada estágio de operação, conectados entre si por supor que os volumes dos reservatórios no final de cada estágio correspondam ao estado do sistema no início do estágio subsequente. Para estimular a utilização mais eficiente dos volumes armazenados, para suprir a demanda hídrica dos estágios futuros, são aplicados FRC (fatores de redução de custo) sobre os volumes armazenados no final de cada estágio. Métodos de busca são usados para determinar os FRCs, denominadas variáveis indiretas do problema. Uma vez conhecidos os valores FRCs, a decisão do problema consiste na determinação das variáveis de decisão operacionais (vazões turbinadas, vertidas, volumes dos reservatórios no final dos estágios), através da resolução de sucessivos problemas de PL, ao longo de estruturas que podem representar a variabilidade de possibilidades em termos das afluências naturais futuras.

Os resultados obtidos através do novo método foram comparados com aqueles obtidos através de outras técnicas de otimização, revelando performance comparável, com a possibilidade de enquadramento da operação futura do sistema com o suporte dos parâmetros indiretos determinados. Tais parâmetros possibilitam a obtenção de regras operacionais, sem a proposição das mesmas *a priori*.

Para que o método seja implementado são necessários um método de busca (AG), para determinar os valores dos FRCs, uma rotina iterativa de avaliação da evaporação a ser considerada no balanço hídrico do sistema, tendo em vista a relevância desse fator para o mesmo, e um método de otimização (PL) para determinar os parâmetros operacionais propriamente ditos (vazões a serem liberadas).

5.1.1. MÉTODO DE BUSCA

Algoritmos Genéticos são técnicas de busca estocásticas que visam a reprodução matemática dos mecanismos de seleção natural e genético das populações, através do processo de seleção natural, ou seja, a sobrevivência e adaptação dos mais aptos (GOLDBERG, 1989).

Os AGs diferem dos métodos de busca clássicos, pois partem de um conjunto de soluções alternativas aleatórias denominado população, onde cada indivíduo (cromossomo) representa uma solução para o problema em mãos, que reúne um conjunto de atributos na forma de códigos. Tais atributos permitem que os indivíduos sejam avaliados e ordenados de acordo com o critério explicitado pela função objetivo (F.O.) ou de aptidão, de acordo com a qual são reproduzidos ou não. Para criar uma nova população, cromossomos chamados descendentes são formados pela união de dois cromossomos pais da geração atual, através do operador recombinação (*crossover*), e, em seguida modificados, através do operador mutação (*mutation*). Assim, novas populações são formadas sucessivamente, mantendo as soluções (cromossomos) mais aptas e descartando as menos qualificadas, para que seja mantido o mesmo tamanho da população inicial, até a convergência para uma solução “ótima”. As múltiplas soluções mais aptas produzidas pelos AGs são

consideradas “próximas da ótima”. Maior confiança com respeito à otimalidade da solução obtida pode ser estabelecida pela aplicação repetida dos AGs ao problema, partindo-se de conjuntos de soluções iniciais aleatórias distintas e verificando-se a repetitividade das soluções (REIS & AKUTSU, 2002).

Ainda segundo Reis & Akutsu (2003), para a implementação de AGs para resolver um problema devem ser feitas as seguintes considerações:

- a) a escolha da sistemática de representação dos grupos de variáveis de decisão que representam completamente soluções potenciais para o problema em mãos, cujos valores se pretende determinar;
- b) a geração de uma população inicial de soluções alternativas geralmente aleatórias para o problema;
- c) a definição do módulo de avaliação da performance das soluções, denominada função objetivo (F.O.) ou de aptidão;
- d) a especificação dos operadores genéticos para a realização dos mecanismos de seleção, recombinação e mutação; e
- e) a escolha dos parâmetros dos AGs tais como tipos e probabilidades de recombinação e mutação, tamanho da população, etc.

Logo, com a implementação correta dos AGs, a população vai evoluir durante as sucessivas gerações, de tal maneira que o desempenho do melhor indivíduo e a média de desempenho da população cresce em direção ao valor do ótimo global. O esquema de execução de um AG é representado na Figura 5.1

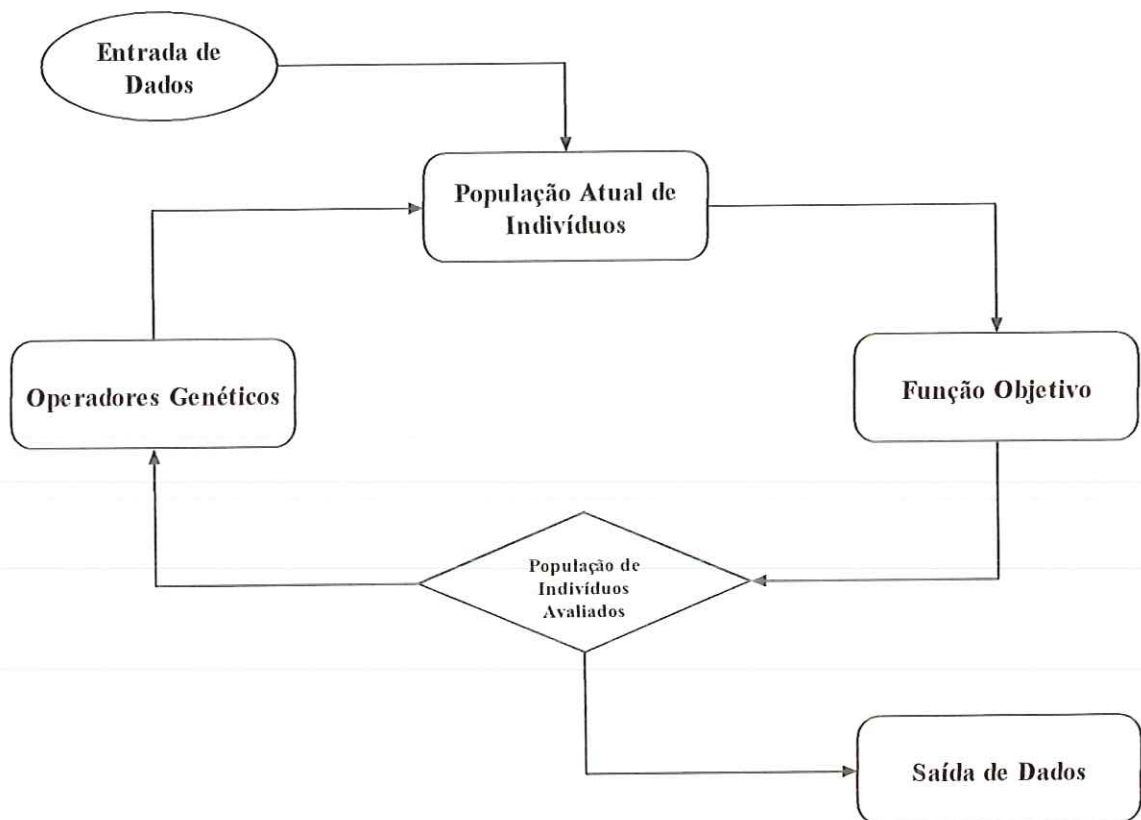


Figura 5.1 – Esquema de aplicação do algoritmo genético

5.2. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO

Com o objetivo de implementar o método proposto por Reis et al (2003), um programa computacional foi desenvolvido, que é composto basicamente de quatro rotinas computacionais, conforme indicações da Figura 5.2, cujas bases são estabelecidas a seguir.

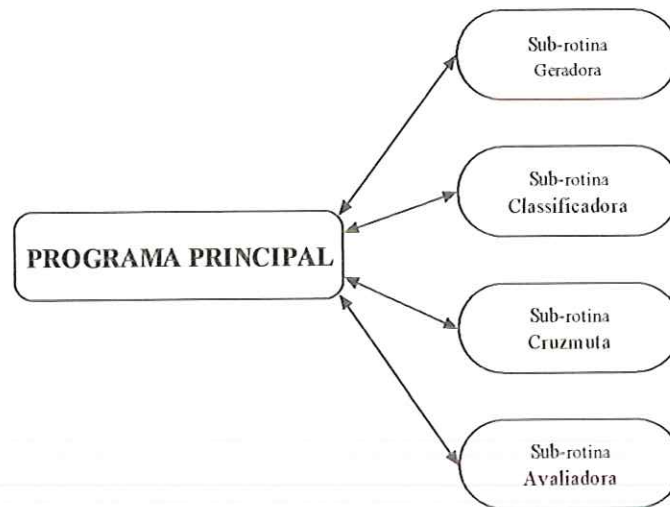


Figura 5.2 – Sub-rotinas do programa principal

5.2.1. ROTINA GERADORA

A sub-rotina Geradora produz, aleatoriamente, valores reais para o vetor W de variáveis de decisão, dentro da faixa pré-estabelecida para elas, ou seja, o intervalo de 0 a 1. O vetor W de pesos compensatórios determinados pelos AGs é composto dos elementos w_j , com $j=1,2,\dots,12$, relativos aos meses do ano e w_{i+12} , com $i=1,\dots,3$, relativos aos reservatórios do sistema, cujos produtos, ampliados de G , dão origem aos fatores de redução de custo:

$$FRC_j^i = -G \cdot w_j \cdot w_{i+12} \quad (1)$$

sendo FRC_j^i o fator de redução de custo aplicado ao reservatório i no mês j . Tais fatores, multiplicados pelos volumes remanescentes nos reservatórios no final de cada estágio, atuam como incentivo à manutenção do armazenamento no sistema, garantindo que a operação considere o futuro. Observa-se que não há diferenciação dos fatores considerados para estágios do período de planejamento correspondentes

ao mesmo mês, independentemente de se tratar o mesmo mês para o primeiro ou último ano, visando a extração de uma sistemática única para as estações (meses) do ano. Tal idéia vai ao encontro da necessidade de se estabelecer regras de operação para o sistema.

5.2.2. ROTINA CLASSIFICADORA

Como o próprio nome sugere, a rotina Classificadora ordena as soluções de acordo com respectivos valores de aptidão, os quais são, em seguida, modificados de acordo com uma escala linear. Essa escala transforma os valores de aptidão de forma que o menor e o maior valor assumam, respectivamente, $1/a$ e a vezes a aptidão média da população, para o estabelecimento da probabilidade de cada solução ser selecionada para a realização de recombinação e mutação. No caso, foi utilizado o valor $a=1,5$, conforme sugestão de Meier & Barkdoll (2000).

5.2.3. ROTINA CRUZMUTA

A rotina CRUZMUTA seleciona duas soluções, submetendo-as aos operadores de recombinação e mutação. Para tanto, foram empregados os operadores de recombinação aritmética de um ponto com probabilidade de 100% e a mutação aleatória “característica por característica” com probabilidade $(100/L)\%$, sendo L o número de variáveis de decisão ou comprimento da cadeia representativa das soluções do problema.

5.2.4. ROTINA AVALIADORA

A avaliação da função de aptidão é realizada através da resolução dos problemas seriados de PL, representativos de cada estágio do período de planejamento (meses), admitindo-se que os volumes dos reservatórios no final de cada estágio (mês) corresponda aos volumes dos mesmos no início do próximo período. Detalhes sobre essa avaliação são apresentados a seguir.

Definiu-se a função objetivo de cada problema de otimização seriado a ser resolvido por PL (programação linear) como a minimização do importe de água para suprir as falhas no atendimento à demanda do sistema. O sistema conta com três reservatórios em série, sendo que cada um deles representa um ponto de demanda, como já foi visto no Capítulo 4 - Descrição do Sistema em Estudo.

5.2.4.1 Demandas

O Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas (1998) estudou as demandas dos municípios da região metropolitana de Fortaleza e as dividiu em cinco blocos:

- Demandas Humanas Urbanas;
- Demandas Humanas Rurais;
- Demandas Industriais;
- Demanda Animal;
- Demanda de Irrigação.

No presente trabalho, as demandas foram divididas em dois blocos a fim de atribuir diferentes graus de importância ao não atendimento das mesmas. O primeiro bloco, denominado de *DemAbs*, concentra todas as demandas mencionadas acima excetuando-se aquelas destinadas à indústria do turismo das praias do município de

Caucaia e das indústrias dos complexo portuário do Pecém, que formam o bloco denominado de *DemOut*.

Os três reservatórios do sistema possuem pontos de demanda, sendo que nos dois a montante, Pacajus e Pacoti/Riachão, somente *DemAbs*. No Reservatório Gavião existem pontos de demanda tanto para *DemAbs* quanto para *DemOut*.

As variáveis de decisão de importe foram divididas em três faixas, sendo que cada uma tinha um peso na função objetivo, desta forma, os três segmentos da demanda teriam custos unitários variando de acordo com a magnitude do déficit.

Foram atribuídos os seguintes pesos:

- 1ª faixa: peso 1;
- 2ª faixa: peso 2;
- 3ª faixa: peso 3.

Também foram atribuídos pesos, na função objetivo, para o tipo de demanda a ser atendida com o importe, isto é, custos unitários diferenciados foram atribuídos aos importes para atender déficits no bloco das demandas *DemAbs* e *DemOut*. Para o bloco *DemAbs*, de maior importância, atribuiu-se peso 2 e para o *DemOut* peso 1.

5.2.4.2 Restrições do problema

Foram considerados três conjuntos de restrições para o problema de otimização, conforme apresentadas a seguir:

1. Restrições do Balanço Hídrico

$$V_{t-1}(i) + A_t(i) - E_t(i) = V_t(i) + Q_{abs_t}(i) + Q_{out_t}(i) + D_t(i) - \sum_{j \in M_i} D_t(j) \quad (2)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

onde,

$V_t(i)$	Volume do reservatório i no fim do estágio t ;
$A_t(i)$	Volume afluente ao reservatório i ;
$E_t(i)$	Volume evaporado do reservatório i ;
$Qabs_t(i)$	Volume liberado para atendimento da demanda $DemAbs$ do reservatório i ;
$Qout_t(i)$	Volume liberado para atendimento da demanda $DemOut$ do reservatório i ;
$D_t(i)$	Volume derivado do reservatório i além de $Qabs$ e $Qout$;
$D_t(j)$	Volume derivado do reservatório j que é afluente ao reservatório i ;
M_i	Número de reservatórios imediatamente a montante do reservatório i ;
NSTG	Número de estágios do problema (meses).

2. Restrições de Atendimento da Demanda

$$DEMabs_t(i) = Qabs_t(i) + \sum_{j \in NFD} IMPabs_t(i, j) + Iabs_t(i) \quad (3)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

onde,

$DEM_t(i)$ Demanda $DemAbs$ no reservatório i ;

NFD Número de faixas em que às variáveis de decisão de importe foram divididas;

$IMPabs_t(i, j)$ Importe para suprir déficit no atendimento da demanda $DemAbs$ do reservatório i na faixa j ;

$Iabs_t(i)$ Importe para suprir déficit no atendimento da demanda $DemAbs$ do reservatório i , que supera o limite físico da soma das NFD faixas do importe (importe “extra”).

$$DEMout_t = Qout_t(i) + \sum_{j \in NFD} IMPout_t(i, j) + Iout_t(i) \quad (4)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

onde,

- DEMout_t(i) Demanda *DemOut* no reservatório *i*;
 IMPout_t(i,j) Importe para suprir déficit no atendimento da demanda *DemOut* do reservatório *i* na faixa *j*;
 Iout_t(i) Importe para suprir déficit no atendimento da demanda *DemOut* do reservatório *i*, que supera o limite físico da soma das NFD faixas do importe (importe “extra”).

3. Restrições de Limite sobre o Importe

$$\sum_{j \in NFD} (IMPabs_t(i, j) + IMPout_t(i, j)) \leq Lim_{import} \quad (5)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

onde,

Lim_{import} Limite físico de importação.

A importação para os reservatórios do sistema em estudo, atualmente, é feita através do Canal do Trabalhador. Construído em 1993 para transferir água da bacia do Jaguaribe para abastecer a região metropolitana de Fortaleza, basicamente dos açudes Orós e Banabuiú, com capacidade de armazenamento de 1.940hm³ e 1.700hm³ respectivamente, o Canal do Trabalhador tem, atualmente, capacidade de escoamento garantida para vazões de no máximo 4,5 m³/s.

Encontra-se em fase de construção o Eixo de Integração Castanhão – Região Metropolitana de Fortaleza, constituindo-se em um complexo de estações de bombeamento, adutoras, canais e túneis, cujo objetivo é permitir a transposição de água desde o açude Castanhão, que se encontra, atualmente, em adiantada fase de construção e tem volume útil de 4.450 hm³, até a região metropolitana de Fortaleza,

bem como garantir o atendimento a projetos de irrigação a serem implantados ao longo de seu traçado, sendo a vazão máxima de dimensionamento igual a 22,0 m³/s.

Durante os estudos foram utilizados dois limites de importação (Lim_{import}), um considerando o canal do trabalhador como única via de importação e, em um segundo caso, incorporando ao sistema de transposição o Eixo de Integração Castanhão - RMF.

Como já foi dito anteriormente, as variáveis do tipo IMP tinham custos unitários diferenciados na função objetivo tanto para as faixas de atendimento, no caso três, quanto para o tipo de demanda atendida ($DemAbs$ e $DemOut$). Quando as mesmas não conseguiam atender todo o déficit do estágio, pois o mesmo era maior do que a capacidade física de importação, o restante da demanda era atendida por um importe “extra”, representado pelas variáveis de decisão $Iabs$ e $Iout$, para atendimento das demandas $DemAbs$ e $DemOut$, respectivamente, que na verdade correspondem a uma falha no atendimento, que o sistema não tem condições de suprir.

As variáveis de importe “extra” foram penalizadas através do custo unitário 1000 na função objetivo.

A matriz de coeficientes representativos das restrições dos problemas de programação linear é apresentada na Figura 5.3. Na figura também é feito a descrição sucinta de cada variável do problema (39).

A Figura 5.4 apresenta o esquema representativo do sistema em estudo.

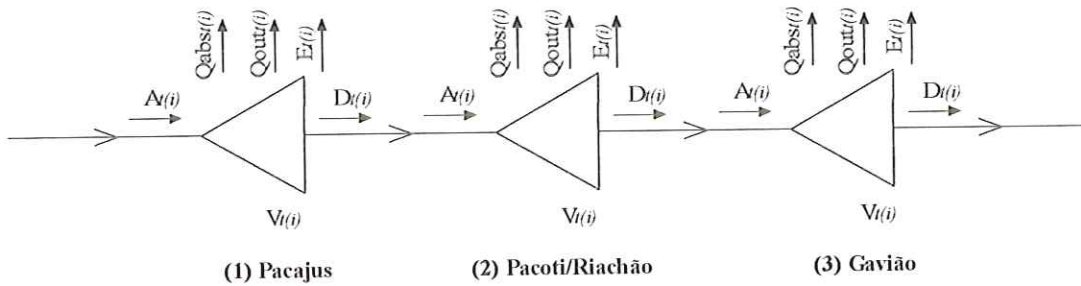


Figura 5.4 – Esquema representativo do sistema Pacajus –
Pacoti/Riachão - Gavião

5.2.4.3 Limites das variáveis de decisão

Os importes para suprir eventuais déficits no atendimento das demandas têm como limite a capacidade máxima de importação do sistema. Como o importe para cada reservatório foi dividido em NFD faixas, o limite superior para cada variável é o seguinte:

$$IMP_{abs_t}(i, j) = IMP_{out_t}(i, j) = \frac{Lim_{import}}{NFD} \quad (6)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, \dots, NFD$$

Como dito anteriormente, foram assumidos dois limites de importação (Lim_{import}):

- a) $Lim_{import} = 4,5m^3/s$ (Canal do Trabalhador);
- b) $Lim_{import} = 26,5m^3/s$ (Canal do Trabalhador + Eixo de Integração).

As variáveis que representam os volumes armazenados nos reservatórios, em cada estágio, têm como limite superior a capacidade máxima de armazenamento dos reservatórios e, como limite inferior, o volume morto dos mesmos. A Tabela 5.1 mostra estes limites para os reservatórios estudados.

Tabela 5.1 – Limites de Armazenamento dos Reservatórios do Sistema

Reservatório	Volume Mínimo (hm ³)	Volume Máximo (hm ³)
Pacajus	51,90	240,00
Pacoti/Riachão	70,40	420,60
Gavião	6,28	29,53

As demais variáveis de decisão do problema de otimização tiveram seus limites superiores relaxados e zero como limite inferior.

A Figura 5.5 apresenta os limites inferior e superior das variáveis de decisão do problema de programação linear.

5.2.4.4 Importe “fictício”

Quando algum dos reservatórios inicia um estágio com o volume armazenado mínimo e não existe neste estágio nenhuma ou insuficiente afluência ao mesmo, quer seja através de vazões naturais ou de derivações do reservatório de montante, ao final do estágio, como resultado da evaporação continuada sobre o espelho de água da represa, o volume armazenado no reservatório será menor que o limite mínimo.

Para solucionar este problema, foi introduzida mais uma variável de decisão ao problema, a qual foi chamada de importe fictício (if). Logo, as novas restrições do balanço hídrico ficaram da seguinte forma:

$$V_{t-1}(i) + A_t(i) - E_t(i) = V_t(i) + Q_{abs_t}(i) + Q_{out_t}(i) + D_t(i) - \sum_{j \in M_t} D_t(j) - if_t(i) \quad (7)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

onde,

$if_t(i)$ Importe fictício para compensar a evaporação do reservatório i no estágio t ;

Para garantir que este artifício só seja utilizado quando a situação descrita anteriormente ocorrer, ou seja, de algum reservatório iniciar a operação com volume mínimo e não houver qualquer tipo de afluência, atribuiu-se um custo unitário de 100.000 à variável de decisão em questão. Logo, quando a rotina de programação linear (PL) for chamada e chegar a alguma valor diferente de zero para a variável $if(i)$ em um determinado estágio, do volume armazenado final $V(i)$ obtido deve ser subtraído o valor de $if(i)$, para corrigir o volume inicial do próximo estágio.

5.2.4.5 Fluxograma do código computacional implementado

A Figura 5.6 mostra o fluxograma representativo do programa computacional implementado.

5.2.4.6 Rotina iterativa que permite considerar a evaporação no balanço hídrico do sistema

A rotina de programação Linear (PL) utilizada na resolução dos problemas de PL seriados foi a *DLPRS* da biblioteca do *Fortran (IMSL Math Library)*, considerando a função objetivo de minimização do importe de água aos reservatórios para atender as demandas, separadas em dois blocos, como já foi explicado anteriormente.

Cada problema de PL a ser resolvido tem 39 variáveis de decisão e 12 restrições. São nove as restrições de balanço hídrico e de atendimento das demandas e mais três as restrições de limite sobre o importe. O principal problema a ser contornado na montagem da rotina de avaliação foi o de inserir, dentro da mesma, uma sub-rotina iterativa que permitisse considerar a evaporação no balanço hídrico.

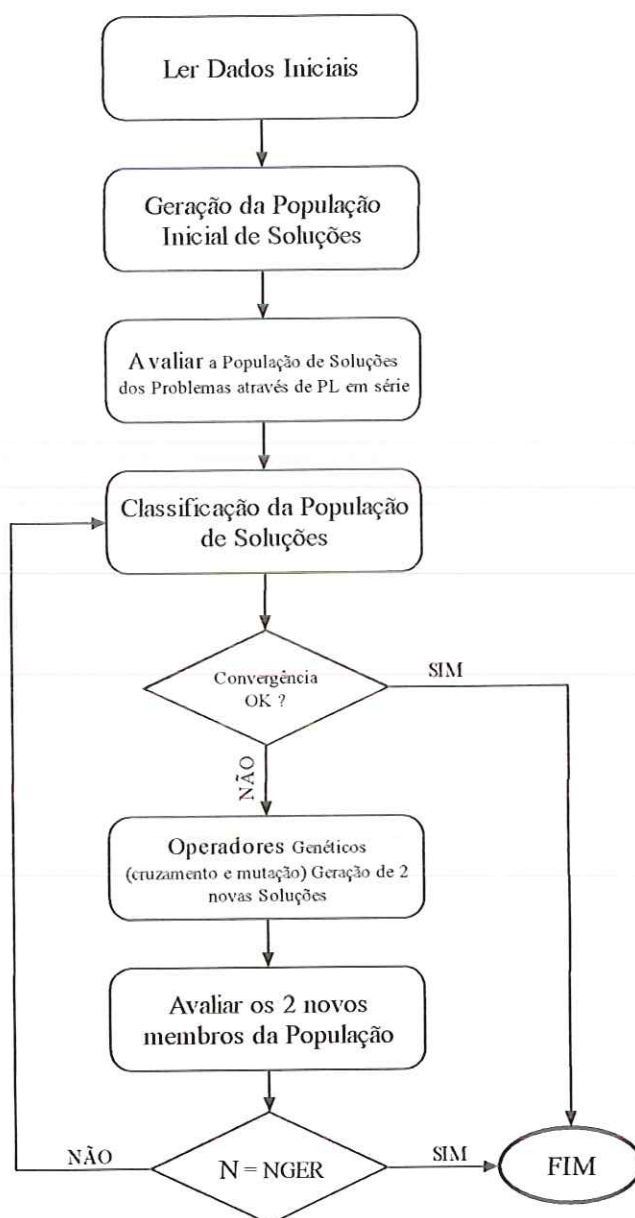


Figura 5.6 – Fluxograma representativo do programa computacional implementado

O procedimento desenvolvido permite, através de algumas iterações, obter o valor da evaporação média para o período. De posse do volume armazenado no início de cada estágio, estima-se a evaporação sobre o espelho d'água relativo a esse volume. Através da rotina de PL do *Fortran* calculam-se as variáveis de decisão. É feita a comparação do valor da evaporação que havia sido calculado no início do

estágio com o valor calculado a partir do volume armazenado no fim do estágio. Se a diferença entre eles não for maior do que a tolerância assumida, o programa passa para o próximo estágio. Caso contrário, a evaporação do período é estimada sobre a média dos volumes inicial e final do estágio, em seguida a rotina executa a otimização novamente, até que a diferença entre a evaporação estimada inicialmente e a nova média não exceda a tolerância arbitrada. Ressalta-se que enquanto isto não ocorrer a rotina continuará interagindo dentro do mesmo estágio.

Para um melhor entendimento do processo, em seguida é apresentado um fluxograma representativo da sub-rotina iterativa de cálculo da evaporação.

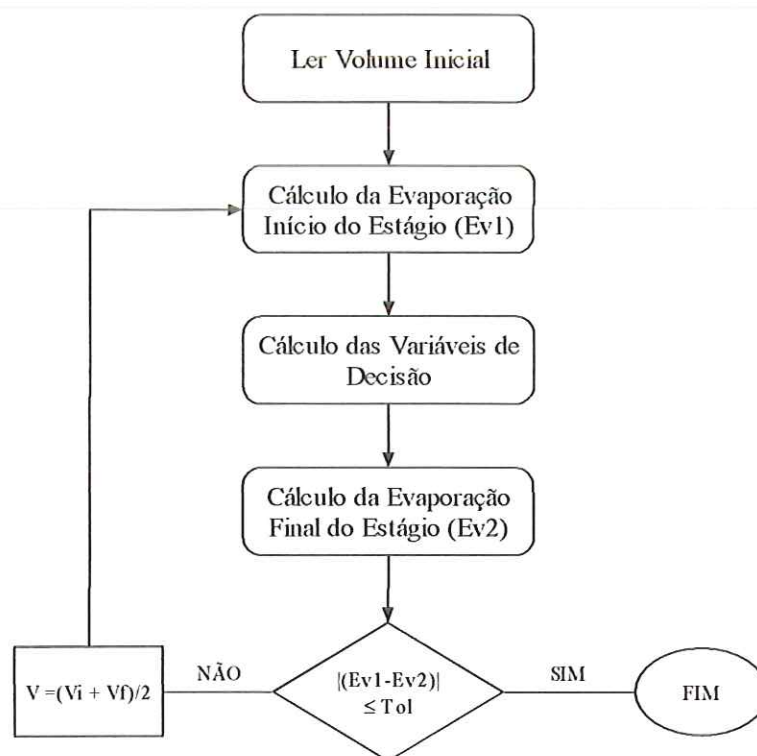


Figura 5.7 – Algoritmo da Sub-rotina de Cálculo da Evaporação em um dado Estágio

5.3. MATERIAIS

O trabalho foi realizado com o suporte de um microcomputador Athlon 1,8GHz e 256MB de memória, além do *software Fortran PowerStation 4.0*.

6. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos foram introduzidos por Holland (1975), cujo objetivo principal era projetar sistemas artificiais baseados nos processos de adaptação dos sistemas naturais, que agregassem qualidades como eficiência e eficácia, inerentes aos processos naturais. Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarado por Charles Darwin em seu livro *a Origem das espécies*, de 1859, que diz o seguinte: “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”. Goldberg (1989) definiu os AGs como uma técnica de busca estocástica baseada no mecanismo de seleção e genética natural, que tenta imitar os processos biológicos e genéticos, podendo ser aplicados em problemas de otimização, sendo capaz de superar limitações de algoritmos tradicionais, como vêm comprovando diversos autores.

Segundo Reis & Akutsu (2002), os Algoritmos Genéticos são os mais populares da família dos Algoritmos Evolucionários (AEs), e atualmente, enfocados na tentativa de propor estratégias operacionais otimizantes para sistemas de reservatórios em substituição aos modelos clássicos de otimização e simulação revisados por autores como Yakowitz (1982), Yeh (1985) e Wurbs (1993)

Segundo Celeste et al. (2002) e Wadlaw & Sharif (1999), embora existam muitas aplicações de AGs em recursos hídricos, o seu uso na operação de sistemas hídricos não tem sido muito explorado.

Os AGs diferem dos métodos de busca clássicos, pois partem de um conjunto de soluções alternativas aleatórias denominado população, onde cada indivíduo (cromossomo) representa uma solução para o problema em mãos, que reúne um conjunto de atributos na forma de códigos. Tais atributos permitem que os indivíduos

sejam avaliados e ordenados de acordo com critério explicitado pela função objetivo (F.O.) ou de aptidão, de acordo com a qual são reproduzidos ou não. Para criar uma nova população, soluções chamadas descendentes são formados pela união de duas soluções pais da geração atual, através do operador recombinação (*crossover*), e, em seguida, modificados através do operador mutação (*mutation*). Assim, novas populações são formadas sucessivamente, mantendo as soluções mais aptas e descartando as menos qualificadas, para que seja mantido o mesmo tamanho da população inicial, até a convergência para uma solução “ótima”.

A tecnologia dos AGs apresenta vantagens sobre os métodos de busca tradicionais por utilizar regras de probabilidade na transição de um conjunto de soluções de uma iteração para outra, além de possuir flexibilidade quanto aos tipos de função objetivo, sem exigências quanto a propriedades como continuidade e existência das derivadas. As múltiplas soluções mais aptas produzidas pelos AGs são consideradas “próximas da ótima”. Maior confiança com respeito à otimalidade da solução obtida pode ser estabelecida pela aplicação repetida dos AGs ao problema, partindo-se de conjuntos de solução iniciais aleatórias distintas e verificando-se a repetitividade das soluções.

6.1 TERMINOLOGIA DOS AGs / ANALOGIA BIOLÓGICA

A terminologia dos AGs refere-se aos indivíduos ou cromossomos de uma população para representar as soluções alternativas. Os cromossomos reúnem unidades chamadas genes, que representam as variáveis de decisão do problema em estudo, dispostos em fila de maneira que cada gene controla a herança de uma ou mais características do indivíduo a que pertence. A posição de um gene é chamada loco e seu valor alelo. O código genético de um gene é denominado genótipo e o

conjunto decodificado de variáveis de decisão é o fenótipo do cromossomo. Cada cromossomo representa completamente uma solução potencial para o problema de otimização e as populações criadas sucessivamente são chamadas gerações. Tais gerações são criadas mediante a seleção de indivíduos de uma população para serem pais, cujos filhos darão origem à próxima geração. A seguir é feita uma descrição, mais detalhada, da nomenclatura dos AGs.

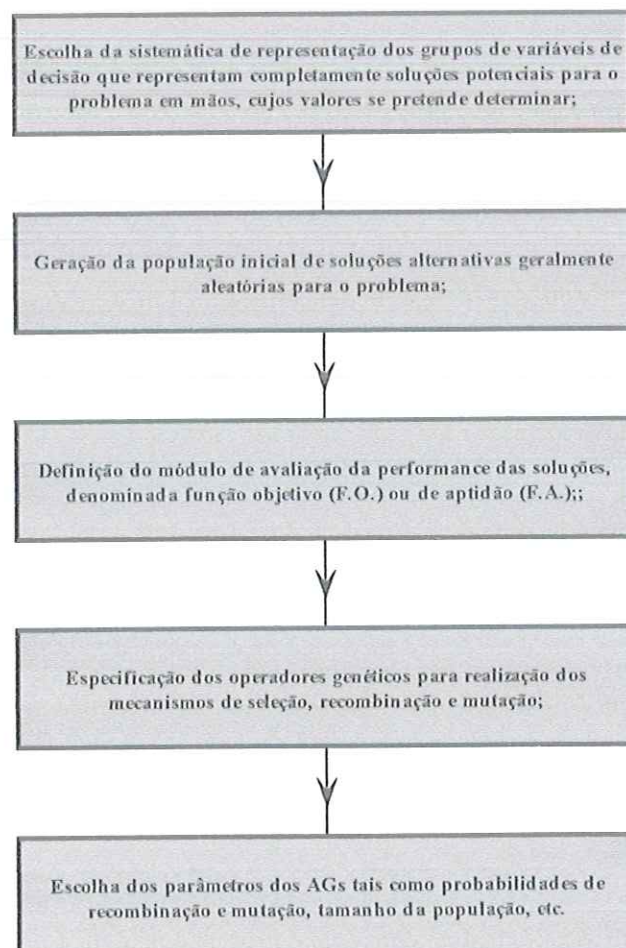
- Cromossomo: cada solução candidata é representada por um indivíduo, ou seja, uma string. Cada string representa uma cadeia de códigos representativos do conjunto de parâmetros do problema. Cada posição da string representa um gene;
- Gene: é a menor fração do cromossomo onde estão armazenadas as informações de hereditariedade. Representa uma informação do cromossomo ou um elemento vetorizado;
- Indivíduo: é um elemento da população. De acordo com a terminologia dos AGs ele representa uma possível solução;
- Fitness ou Genótipo: representa a composição genética contida nos cromossomos de um indivíduo, ou seja, a função de aptidão. Quanto maior o valor de sua aptidão, melhor é a solução representada por esse indivíduo. Assim, a aptidão na terminologia de AGs corresponde ao valor da função objetivo na terminologia de Pesquisa Operacional (referente a problemas de maximização). A aptidão de um indivíduo pode ser vista como o desempenho que esse indivíduo apresenta na resolução do problema. O sucesso dos AGs depende da escolha adequada da medida de aptidão, ou seja, da função objetivo e da adequação dos operadores

genéticos ao problema que se tem em mãos. Essa tarefa nem sempre é simples e fácil

Se os AGs forem implementados corretamente, a população vai evoluir durante as sucessivas gerações, de tal maneira que o desempenho do melhor indivíduo e a média de desempenho da população cresce em direção ao valor do ótimo global.

6.2 IMPLEMENTAÇÃO DE AGs

A implementação de AGs para resolver um problema particular requer:



6.3 REPRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Os cromossomos, que são representações das soluções, podem ser codificados de diversas maneiras (binários, inteiros, reais, etc), dependendo da conveniência. No presente trabalho as soluções foram representadas por números reais.

6.4 TIPOS DE AGS

Uma geração é representada pelo conjunto completo de cromossomos em qualquer estágio da otimização, sendo que a população inicial de indivíduos ou soluções alternativas é gerada aleatoriamente no início do processo de otimização. Existem duas principais maneiras de acordo com as quais o processo iterativo evolui, produzindo populações subseqüentes (MICHALEWICS, 1994):

- Criando-se indivíduos filhos (novas soluções candidatas) em número suficiente para substituir a população presente, cujo procedimento é chamado substituição **geracional**; ou
- Criando-se um número reduzido de indivíduos filhos em substituição aos piores p indivíduos da presente iteração ($p \geq 1$), de acordo com um procedimento chamado *steady-state*. Assim, poucos membros da população são modificados em cada iteração.

6.5 SELEÇÃO DE PAIS

Os indivíduos pais de uma geração são escolhidos de maneira a maximizar a probabilidade de produção de filhos mais aptos ou adaptados, ou seja, que representem melhores soluções para o problema em estudo. Assim, o operador seleção identifica os indivíduos a sofrerem recombinação e mutação, proporcionalmente ao seu valor de aptidão. O método mais comumente utilizado é o

da roleta, também conhecido como amostragem estocástica com substituição. O processo é simples e consiste em girar uma roleta, onde cada indivíduo tem uma fatia proporcional à sua aptidão, assim, quanto mais apto o indivíduo maior a probabilidade do mesmo ser selecionado. Vale ressaltar, no entanto, que desta maneira, indivíduos representantes de aptidões pobres podem ser selecionados.

Baker (1987) propôs o método de seleção da amostragem estocástica universal que consiste, assim como o da roleta, em dividir os cromossomos em um gráfico de fatias, onde cada fatia é proporcional à aptidão do cromossomo em questão, em seguida um número de ponteiros iguais ao tamanho da população é colocado ao redor do gráfico e após um único giro, o cromossomo apontado por cada ponteiro é escolhido. Esse método, segundo Gen & Cheng (1997), é melhor do que o da roleta por manter a diversidade e prevenir que super cromossomos dominem a população. A Figura 6.1, a seguir, exemplifica os métodos de seleção por amostragem estocástica com substituição e amostragem estocástica universal.

Cromossomo	Posição	Função Objetivo	Probabilidade de Seleção
A	1	198,5625	0,34
B	2	134,2356	0,23
C	3	122,3478	0,21
D	4	89,4509	0,15
E	5	45,5621	0,08

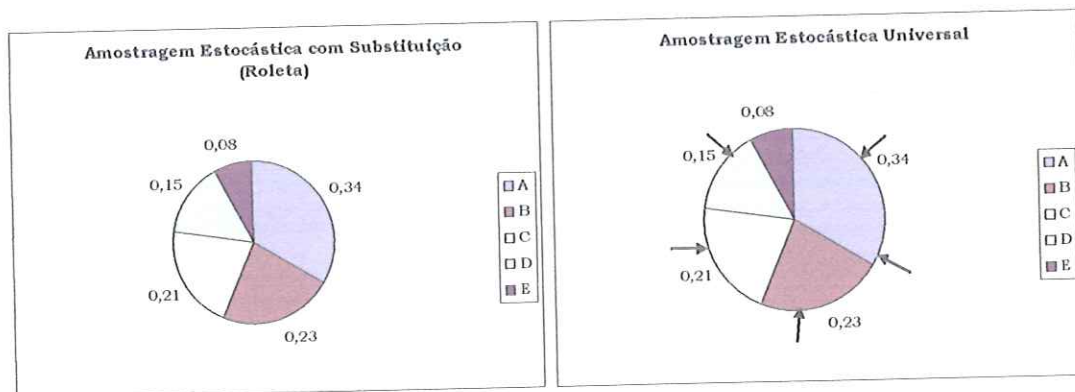


Figura 6.1 – Métodos de seleção por Amostragem Estocástica com Substituição (Roleta) e Amostragem Estocástica Universal

Técnicas de seleção alternativas existem como aleatória uniforme e por torneio (GOLDBERG & DEB, 1990). A seleção tipo torneio faz os indivíduos competirem diretamente, com base nos respectivos valores da função de aptidão (*fitness*). Uma maneira simples de implementá-lo é escolher aleatoriamente dois indivíduos e preservar o melhor deles para a próxima geração, repetidamente até que a nova geração seja formada.

A seleção baseada na ordenação (*rank*) das soluções dentro da população, ao invés dos valores da função de aptidão, é também utilizada, uma vez que a ordenação introduz uma escala uniforme automática.

Diversas são as propostas para a escala dos valores da função de aptidão na população. Dentre elas destaca-se a escala linear, fazendo com que o melhor valor da função de aptidão seja α vezes superior à média e o menor valor $1/\alpha$ vezes menor que a média da população, sendo α uma constante de valor geralmente compreendido entre 1,5 e 2,5. Esta sistemática evita a reprodução excessiva e a conseqüente rápida convergência para um eventual grande valor da função de aptidão das iterações iniciais, quando tais valores podem ser muito distintos. Ao mesmo tempo, possibilita que as pequenas diferenças nos valores de F.O. sejam acentuadas próximo da convergência para um ótimo local, quando tais diferenças tornam-se muito pequenas (MEIER & BARKDOLL, 2000).

6.6 RECOMBINAÇÃO

A recombinação ou cruzamento é o mecanismo pelo qual são criados novos indivíduos (novas soluções) filhos através de recombinação de indivíduos pais (soluções atuais). É o operador que torna os AGs diferentes dos outros algoritmos evolucionários. Geralmente é realizada através da simples permuta ou da operação

sobre características correspondentes entre soluções pais, sendo que o primeiro esquema mostra-se adequado ao caso de soluções representadas através de código binário, enquanto que o segundo é mais utilizado quando o alfabeto de representação de soluções é real.

Segundo Wardlaw & Sharif (1999), a recombinação pode ser realizada de diversas maneiras, sendo as mais usuais os cruzamentos de um ponto, dois pontos e uniforme. O cruzamento de um ponto prevê a criação de cromossomos a partir da combinação de genes de determinada posição escolhida aleatoriamente até o comprimento total da string (cadeia de códigos representativos de determinada solução). O cruzamento de dois pontos define novos indivíduos a partir da combinação de informações genéticas entre dois pontos aleatoriamente escolhidos dos cromossomos pais. Já o cruzamento uniforme (simples troca) prevê que genes individuais sejam considerados na troca de informações para criação de novos indivíduos, ao invés de blocos de genes ou material genético, onde para cada par de pais é gerada uma string de bits aleatórios de comprimento igual ao dos pais. Se o primeiro bit da string aleatória tem valor 1, o primeiro gene do filho recebe o valor do primeiro gene do pai 1, caso o valor do bit da string aleatória seja 0, o gene do filho, irá receber o valor do gene do pai 2. A Figura 6.2, a seguir, exemplifica os cruzamentos de 1 ponto, 2 pontos e o cruzamento uniforme (simples troca).

				String Aleatória	1 1 0 1 0 1 1
PAI ₁	10101110110011101	PAI ₁	10101110110011101	PAI ₁	1 0 1 1 0 1 1
PAI ₂	10111011010110110	PAI ₂	10111011010110110		↓ ↓ ↓ ↓ ↓
FILHO ₁	10101111010110110	FILHO ₁	10101011010111101	FILHO ₁	1 0 0 1 1 1 1
FILHO ₂	10111010110011101	FILHO ₂	10101011010111101		↑ ↑
				PAI ₂	1 1 0 1 1 0 1
	Cruzamento de 1 ponto		Cruzamento de 2 pontos		Cruzamento Uniforme

Figura 6.2 – Exemplo de cruzamentos de 1 ponto, 2 pontos e uniforme

Os operadores convencionais (cruzamentos de 1 ponto, 2 pontos e uniforme) funcionam bem na representação binária, mas na representação real eles basicamente trocam valores dos genes e, portanto, não criam informações novas, logo melhor é usar operadores aritméticos (GALVÃO & VALENÇA, 1999).

Os operadores aritméticos realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais. No presente trabalho, foi utilizado o cruzamento aritmético (MICHALEWICZ, 1994), onde dois cromossomos filhos c_1 e c_2 são produzidos a partir de dois cromossomos pais p_1 e p_2 da seguinte forma:

$$c_1 = \alpha p_1 + (1 - \alpha) p_2 \quad (8)$$

$$c_2 = (1 - \alpha) p_1 + \alpha p_2 \quad (9)$$

onde $\alpha \in U(0,1)$

6.7 MUTAÇÃO

A mutação é a sistemática que possibilita a introdução de características novas às soluções existentes, através da eventual substituição de genes dos indivíduos, pois a seleção e o cruzamento podem não ser capazes de criar novos valores de genes. Goldberg (1989) apontava para a importante função da mutação, pois se em toda uma população de soluções ocorrer que uma determinada posição

não possui determinado valor, e se o mesmo for essencial para a obtenção de uma boa solução, a mutação é capaz de introduzi-lo.

Geralmente, a mutação é realizada bit por bit (no caso do código binário) ou gene por gene (código real), possibilitando que cada bit ou gene seja alterado com uma pequena probabilidade ou taxa de p_m entre 0,001 e 0,1, geralmente constante, ou variável de acordo com técnicas avançadas de ajuste dinâmico.

Diversas são as possibilidades de mutação. A mutação uniforme é realizada de forma que cada elemento ou gene de um cromossomo possui exatamente a mesma chance de sofrer mutação. A mutação não uniforme é um dos operadores de refinamento das soluções, através de incrementos controlados nos valores das variáveis de decisão de acordo com a iteração.

A mutação uniforme modificada, segundo Wardlaw & Sharif (1999), permite a modificação de um gene de uma quantia positiva ou negativa especificada. A Figura 6.3, a seguir, exemplifica o operador mutação.

Antes da	FILHO ₁	10101110110011101
Mutação	FILHO ₂	10111011010110110
Após a	FILHO ₁	10100110110011101
Mutação	FILHO ₂	10111011010111110
Mutação		

Figura 6.3 – Exemplo de Mutação (simples troca)

6.8 ELITISMO

No processo de seleção os indivíduos de uma população são classificados de acordo com suas aptidões. O operador de cruzamento tende a assegurar que o melhor

material genético e os componentes dos cromossomos mais adaptados sejam levados para frente, para as próximas gerações. Ressalta-se, porém, que dada à natureza probabilística destes operadores, nem sempre esse é o caso.

O elitismo, ou reprodução preferencial, consiste em manter o melhor indivíduo para a próxima geração, não permitindo assim, que o mesmo passe por nenhum processo de cruzamento ou mutação, a fim de assegurar suas características. Segundo Galvão & Valença (1999), uma convergência mais rápida para a solução do problema é alcançada utilizando-se o AG com elitismo. A reprodução preferencial é empregada somente no caso da substituição do tipo geracional, uma vez que a substituição do tipo *steady-state* substitui somente os piores p filhos (tamanho da população $> p \geq 1$), e então o cromossomo mais apto é preservado em cada iteração. O Elitismo foi proposto por DeJong (1975) em um dos primeiros trabalhos sobre os AGs.

6.9 CONDIÇÃO DE FINALIZAÇÃO

Após a aplicação dos operadores de recombinação e mutação, a nova população está pronta para a próxima avaliação, e o ciclo se repete até que a condição de finalização seja considerada satisfeita. O critério mais simples é realizar um determinado número de iterações (gerações). Entretanto não se conhece a priori o número de gerações mais apropriado a determinado tipo de problema. Podem ser utilizados critérios alternativos de convergência baseados no fato de que a maioria dos cromossomos é idêntica. Galvão & Valença (1999) consideram que se 90% da população tem o mesmo valor para um determinado gene, pode-se dizer que o mesmo convergiu, e se entre 90% e 95% dos genes convergiram, então o AG

convergiu. Outro critério alternativo é parar quando nenhuma melhora significativa no valor da função de aptidão ocorreu em determinado número de gerações.

6.10 CONFIGURAÇÃO DOS AGs E ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE CONTROLE

A Literatura oferece diversas possibilidades de implementação dos AGs e seus operadores, bem como a definição de seus parâmetros de controle, tais como tamanho da população, probabilidades de recombinação e mutação, condições de finalização e tipo de substituição dos indivíduos pais filhos produzidos.

6.11 VANTAGENS E DIFICULDADES ASSOCIADAS AO EMPREGO DOS AGs

Uma das dificuldades no uso dos AGs, além do fato de não se ter uma garantia de um ótimo global, é a falta de padronização na sua utilização. Cada usuário explora os conceitos envolvidos de maneira diferente e a melhor implementação para uma aplicação particular não é tão óbvia, requerendo investigações ou certa experiência por parte do usuário. É prudente que diferentes alternativas e valores para os parâmetros sejam investigados para assegurar que um bom desempenho seja atingido.

Além disso, por tratarem-se de técnicas de otimização por busca direta e, portanto, hábeis à resolução de problemas irrestritos, os AGs requerem que as restrições sejam incluídas na função objetivo na forma de penalidades.

De maneira resumida, pode-se dizer que diversas são as vantagens associadas ao emprego dos AGs, dentre as quais destacam-se a simplicidade dos conceitos envolvidos e facilidade de implementação. Os AGs geralmente apontam diversas

boas soluções para os problemas, por realizarem busca abrangente através dos espaço de soluções.

6.12 IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE AGS PARA O PROBLEMA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Como já foi dito anteriormente, apesar do uso difundido dos AGs por pesquisadores da área de recursos hídricos, poucos são os trabalhos enfocando a operação de sistemas de reservatórios.

Os trabalhos de Wardlaw & Sharif (1999) e Sharif & Wardlaw (2000) são exemplos específicos de aplicações de AGs a sistemas de reservatórios. Entretanto, nenhum deles enfoca os aspectos estocásticos do problema.

Wardlaw & Sharif (1999) estudaram diversas possibilidades de implementação de AGs aplicadas a um sistema simples e clássico da literatura. Tratava-se de um sistema de quatro reservatórios, operados durante um horizonte de planejamento de 12 períodos, para os quais as afluências naturais são supostamente conhecidas. Em conformidade com os autores, a análise de sensibilidade de diversos parâmetros permitiu que a representação real, incorporando a seleção por torneio, reprodução preferencial, recombinação uniforme e mutação uniforme modificada operassem mais eficientemente, produzindo melhores resultados. Eles apontaram ainda a probabilidade de recombinação de 0,70 e a mutação de um gene por cromossomo como sendo mais apropriadas, ao mesmo tempo em que tamanhos da população de 100 ou 200 indivíduos agiram retardando ou acelerando a obtenção das melhores soluções, respectivamente, em termos de número de gerações (iterações) necessárias.

Os autores mencionam ainda que a maneira como os genes são agrupados no cromossomo é importante. De acordo com eles, é preferível agrupar as liberações de vazões por estágio de tal forma que o cromossomo contenha 12 grupos de 4 genes, representando a liberação de cada reservatório em um determinado estágio, para que o material genético (informações relevantes da atual iteração) mais diretamente relacionado seja mantido próximo.

Os parâmetros mais promissores foram também utilizados por Wardlaw & Sharif (1999) para otimização de um sistema de 10 reservatórios, visando demonstrar as potencialidades dos AGs.

Sharif & Wardlaw (2000) estudaram a operação de um sistema hídrico real simples, visando avaliara o impacto provocado pela introdução de novas unidades de reservação, através de cenários distintos que consideraram como objetivos a geração hidrelétrica e irrigação. O registro histórico de um ano crítico em termos das afluências naturais foi utilizado na análise dos problemas operacionais de otimização correspondentes, cuja a formulação admite a irrigação como demanda prioritária, com exceção feita ao primeiro cenário, dentre os quatro estudados. Considerou-se a dinâmica do sistema completamente definida pela equação (10).

$$V_{t+1}(i) + Q_t(i) + S_t(i) - \sum_{j \in M_i} (Q_t(j) + S_t(j)) = V_t(i) + A_t(i) \quad (10)$$

onde

$V_t(i)$	Volume do reservatório i no fim do estágio t ;
$A_t(i)$	Volume afluyente ao reservatório i ;
$Q_t(i)$	Volume turbinado do reservatório i ;
$S_t(i)$	Volume vertido do reservatório i ;
M_i	Número de reservatórios imediatamente a jusante do reservatório i ;

Os AGs foram implementados de maneira que as soluções em termos das variáveis de decisão eram representadas por valores reais, no caso, as liberações hídricas de cada reservatório ao longo dos 36 intervalos sucessivos de 10 ao longo do horizonte de planejamento de um ano. Assim, o número das variáveis de decisão do problema (comprimento da cadeia representativa das soluções) corresponde ao produto do número de pelo número de períodos em que o horizonte de planejamento foi dividido.

A sistemática de AGs implementada por Sharif & Wardlaw (2000) compreendeu a seleção por torneio, o elitismo, o cruzamento uniforme e a mutação uniforme modificada. Um comprimento de população de 100 indivíduos foi adotado, com probabilidade de cruzamento de 0,70 e mutação de 0,028 (1/comprimento da cadeia representativa das soluções).

Os resultados foram comparados com aqueles obtidos via programação dinâmica diferencial (PDDD), conforme proposta de Heidari et al. (1971), permitindo que se concluísse pela proximidade das respostas em ambos os casos.

Os autores apontaram vantagens específicas dos métodos de AGs aplicados à otimização da operação de reservatórios tais como:

- não requerer a discretização das variáveis de estado e decisão;
- não necessitar de trajetória de estado tentativas iniciais;
- não precisar que sistema complexos sejam decompostos;
- trabalhar com valores numéricos (funções objetivo altamente complexas não introduzem dificuldades, e até mesmo funções descontínuas são aceitáveis;

- possibilitar o uso de modelos de simulação para avaliar a função de aptidão das soluções.

Os autores reconhecem, entretanto, a limitação de que cromossomos extensos reduzem a possibilidade de identificação do ótimo, bem como do atendimento das restrições do problema.

Oliveria & Loucks (1997) usaram AGs para produzir políticas operacionais para reservatórios múltiplos em termos dos volumes de armazenamento ou liberações diretamente, em função da época do ano e da disponibilidade hídrica. Eles assumiram as liberações e volumes alvos como funções lineares por partes. Dessa forma, as coordenadas dos pontos de inflexão constituíam o conjunto das variáveis de decisão do problema, para definição das políticas operacionais que maximizassem o desempenho do sistema. Os autores estabeleceram que a regra operacional fosse determinada por 4 segmentos de reta, para os quais 3 pontos de inflexão deveriam ser determinados via AGs. Eles utilizaram vetores reais para representar as variáveis de decisão. Reprodução preferencial, cruzamento aritmético, mutação e substituição “em bloco” foram adotados para gerar conjuntos sucessivos de políticas operacionais possíveis, avaliadas pelo índice de performance proposto pelos autores.

Sistema de três reservatórios, cada uma função critério diferente, foram usados para aplicação do método e os parâmetros que conduziram a melhores resultados foram: tamanho da população (>40), probabilidade de cruzamento 1 e taxa de mutação na faixa (0,05 a 0,20). Exemplos de aplicação simples de apenas 2 reservatórios em série e paralelo foram analisados, assumindo-se duas estações (inverno e verão), para o atendimento de propósito único (abastecimento ou geração hidrelétrica).

A proposta de Oliveira & Loucks (1997) é promissora por propor uma função de avaliação de desempenho para os AGs, através do denominado índice de perda normalizada. Embora evite as dificuldades típicas da representação das soluções através de cromossomos muito longos, impõe que as regras de operação sigam determinada lei, no caso linear.

Assim, a análise de desempenho dos modelos já propostos para a operação de reservatórios a longo prazo, dentre os quais incluem-se aqueles que se utilizam de AGs, leva a crer que, apesar dos avanços já alavancados, o problema persiste sem o devido enquadramento por requerer que:

- sistemas de grande porte sejam tratados, respeitadas as não-linearidades que lhe são características, bem como os propósitos múltiplos a que são destinados;
- o futuro incerto em termos das afluências naturais seja considerado;
- regras de operação sejam produzidas para o gerenciamento futuro do sistema, sem que haja necessidade de hipóteses simplificadoras tais como a suposta linearidade proposta por diversos autores.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O código computacional implementado possibilitou a extração dos resultados apresentados neste capítulo. Alguns testes precederam, porém, a fase da otimização propriamente dita. São eles: testes de convergência do procedimento iterativo de avaliação da evaporação, testes de adequação do parâmetro G e teste de seleção do número de iterações de AGs a ser utilizado, cujos resultados são apresentados em seguida.

7.1 TESTES DE CONVERGÊNCIA DO PROCEDIMENTO ITERATIVO PARA AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO

Testes do procedimento iterativo de avaliação da evaporação foram realizados considerando a operação do sistema ao longo de cinco estágios, sendo que no estágio inicial os reservatórios estavam com seu armazenamento máximo. As afluências nos cinco estágios também são apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Volumes iniciais e afluências aos reservatórios do sistema

Reservatório	Volume Inicial (hm ³)	Afluências em cada Estágio (hm ³)				
		1	2	3	4	5
Pacajus	240,00	0,00	148,45	98,39	92,03	112,83
Pacoti/Riachão	420,60	0,00	4,28	119,68	72,18	143,45
Gavião	29,53	0,00	14,20	45,22	3,45	20,68

As demandas (*DemAbs* e *DemOut*) para cada reservatório, durante os cinco estágios, constam da Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Valores das demandas (*DemAbs* e *DemOut*) nos estágios

Reservatório	<i>DemAbs</i> no Estágio (hm ³)					<i>DemOut</i> no Estágio (hm ³)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Pacajus	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pacoti/Riachão	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gavião	24,32	24,32	24,32	24,32	24,32	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70

A Tabela 7.3 apresenta o número médio de iterações computacionais necessárias para atingir os diversos níveis de tolerância pré-estabelecidos. Para cada

tolerância está associada uma lâmina sobre o espelho d'água de cada reservatório, para os volumes mínimo e máximo correspondentes. A Figura 7.1 mostra o comportamento gráfico do decréscimo do número de iterações médio com a tolerância. Ressalta-se que o eixo das abscissas foi construído em escala logarítmica.

Tabela 7.3 – Número de iterações médio para as tolerâncias pré-estabelecidas e as lâminas correspondentes

Tolerância Pré-Estabelecida (hm ³)	Lâmina Sobre o Espelho d'Água Correspondente (mm)						Número de Iterações Médio
	Pacajus		Pacoti/Riachão		Gavião		
	Vol Min	Vol Max	Vol Min	Vol Max	Vol Min	Vol Max	
0,1	6,33232	2,81144	5,91003	2,03326	41,07788	17,07067	4,40
0,01	0,63323	0,28114	0,59100	0,20333	4,10779	1,70707	7,80
0,001	0,06332	0,02811	0,05910	0,02033	0,41078	0,17071	11,00
0,0001	0,00633	0,00281	0,00591	0,00203	0,04108	0,01707	14,40
0,00001	0,00063	0,00028	0,00059	0,00020	0,00411	0,00171	17,80
0,000001	0,00006	0,00003	0,00006	0,00002	0,00041	0,00017	21,00

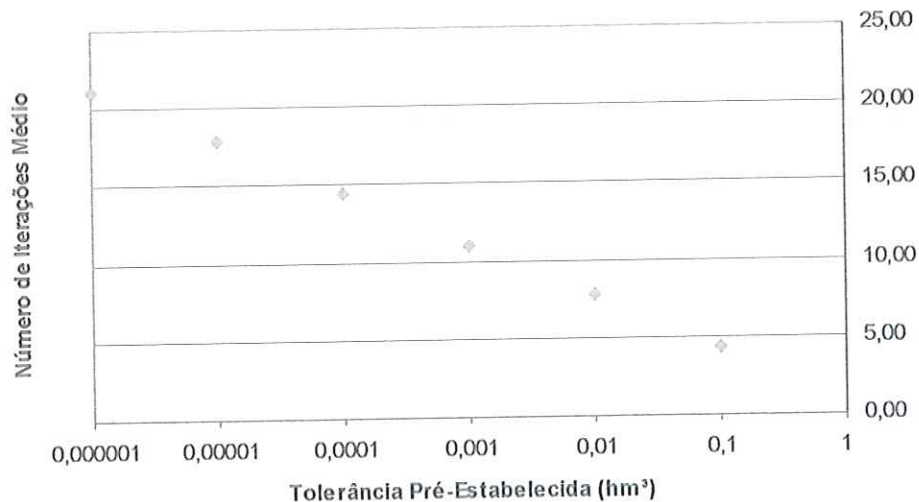


Figura 7.1 – Número de Iterações para as tolerâncias pré-estabelecidas

A Tabela 7.4 apresenta os valores da evaporação no início de cada estágio, isto é, o valor calculado a partir do volume armazenado no início do estágio, e o valor da evaporação no final do processo iterativo. Ressalta-se que, os resultado apresentados na Tabela 7.4 foram obtidos assumindo-se uma tolerância de 0,01hm³ como critério.

Tabela 7.4 – Valores da evaporação nos reservatórios no início e final dos cinco estágios para tolerância de $0,01\text{hm}^3$

Reservatório	Evaporação Inicial em cada Estágio (hm^3)				
	1	2	3	4	5
Pacajus	3,5203	2,7327	1,1366	1,3764	1,3553
Pacoti/Riachão	4,6855	3,6349	0,9837	1,3272	1,1533
Gavião	0,5715	0,1900	0,1450	0,2577	0,1700
Iterações (Tolerância = $0,01\text{hm}^3$)	↓ 8	↓ 10	↓ 7	↓ 7	↓ 7
Reservatório	Evaporação Final em cada Estágio (hm^3)				
	1	2	3	4	5
Pacajus	3,4518	1,4893	1,4783	1,0762	1,8274
Pacoti/Riachão	4,5914	1,2890	1,4255	0,9159	1,7764
Gavião	0,2399	0,1900	0,2768	0,1350	0,1700

Os valores apresentados na Tabela 7.4 evidenciam a importância da rotina iterativa de cálculo da evaporação, pois, em alguns estágios, a variação entre o valor calculado com o volume inicial e o valor obtido das iterações é bastante significativo. No segundo estágio o valor da evaporação no reservatório Pacoti/Riachão para o volume inicial é de $3,63\text{hm}^3$, ao fim das iterações este valor cai para quase um terço do valor inicial, chegando a $1,29\text{hm}^3$. No estágio 3, a evaporação do reservatório Gavião é de $0,15\text{hm}^3$ para o volume inicial. Após as iterações o valor da evaporação praticamente dobra, indo para $0,28\text{hm}^3$.

A Figura 7.2 ilustra o processo iterativo para o reservatório Pacajus no estágio 2, mostrando a convergência dos valores dos volumes iniciais e finais a cada iteração.

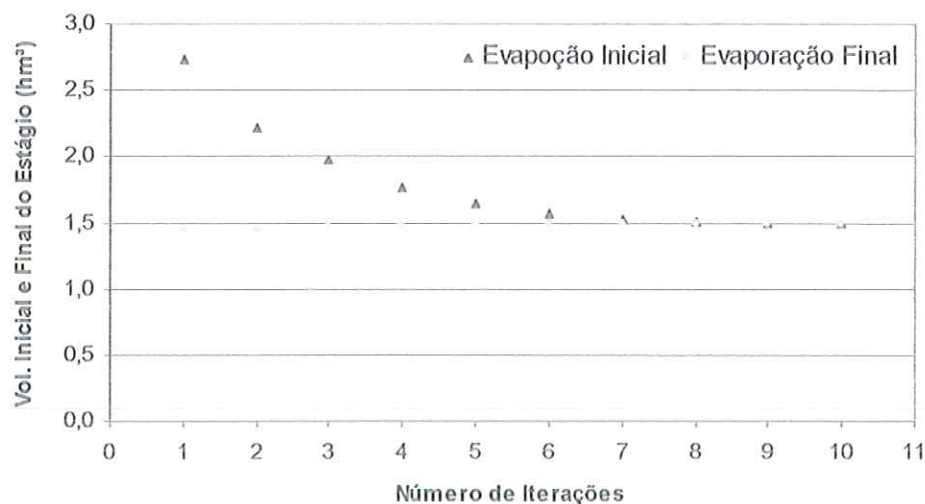


Figura 7.2 – Valores de evaporação do reservatório Pacajus para os volumes inicial e final a cada iteração no estágio 2

Antes do início da utilização do programa no estudo da simulação da operação do sistema para 30 anos, foram realizadas algumas simulações utilizando apenas 10 anos de dados, para investigar a variabilidade dos resultados obtidos a partir de distintas populações iniciais aleatórias de soluções (semente aleatórias), bem como o valor de G (multiplicador) e o número de iterações de AGs necessários a convergência.

7.2 POPULAÇÕES ALEATÓRIAS INICIAIS DISTINTAS

Foram fixados os seguintes valores para efeito das investigações realizadas inicialmente:

- Volume inicial dos reservatórios → metade do volume máximo;
- Número de iterações de AGs → 1000;
- Valor de G → 100;
- Período de operação utilizado → 120 (10 anos).

Foram feitas 14 simulações a partir de populações aleatórias distintas de soluções, conforme apresentado na Tabela 7.5 que indica os respectivos custos mínimos obtidos. O menor valor encontrado foi de 2.494.560 u.c. (unidades de custo).

Tabela 7.5 – Custos obtidos a partir de populações iniciais (sementes aleatórias) distintas de soluções

Semente Aleatória	Custo (u.c.*)	Semente Aleatória	Custo (u.c.)
10	2.534.703	6000	2.497.452
100	2.500.472	7000	2.498.483
1000	2.494.560	8000	2.496.233
2000	2.494.803	9000	2.495.412
3000	2.498.100	10000	2.494.596
4000	2.498.653	15000	2.499.210
5000	2.498.701	20000	2.501.148

* unidades de custo

7.3 VALOR DE G

Para a seleção do valor de G a ser utilizado foram fixados os seguintes valores para outras variáveis envolvidas:

- Volume inicial dos reservatórios → metade do volume máximo;
- Número de Gerações → 1000;
- Período de operação utilizado → 120 (10 anos).

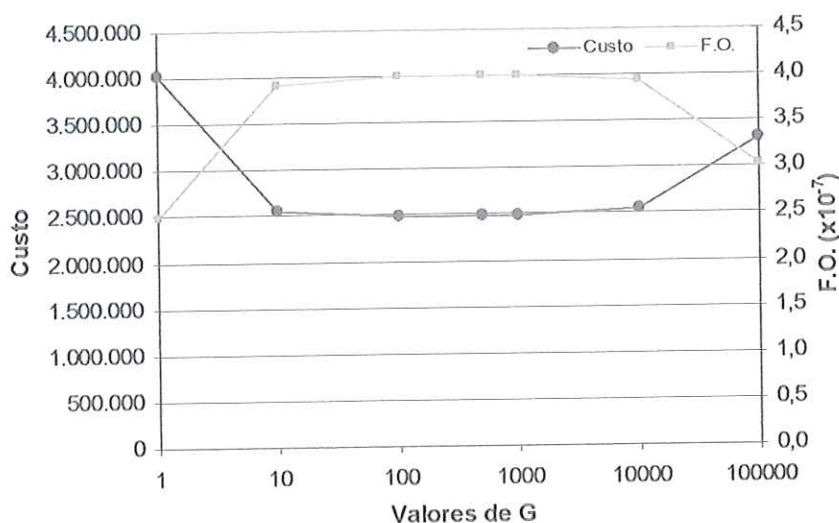
Foram testados sete valores para G (1, 10, 100, 500, 1000, 10000 e 100000) nas avaliações realizadas a partir de populações iniciais distintas. A Tabela 7.6 (semente aleatória 1000) exemplifica o comportamento do custo e dos valores da F.O. para diferentes valores de G.

Tabela 7.6 – Valores obtidos para o custo e função objetivo para valores G distintos

G	Custo (u.c.)	F.O.
100000	3.309.459	3,022E-07
10000	2.545.351	3,929E-07
1000	2.495.185	4,008E-07
500	2.494.732	4,008E-07
100	2.494.560	4,009E-07
10	2.555.087	3,914E-07
1	4.023.288	2,486E-07

Tais análises sugeriram o valor $G=100$ como sendo o mais adequado à obtenção do custo mínimo, confirmando o resultado já obtido por Reis et al. (2003). Dessa forma, esse foi o valor adotado para as simulações realizadas neste trabalho.

Como se pode observar na Figura 7.3, cujo eixo das abscissas foi construído em escala logarítmica, à medida que os valores de G crescem há uma tendência de queda nos valores da função objetivo e elevação do custo. Segundo Reis & Akutsu (2002), valores elevados de G não garantem melhores valores para a função de aptidão, pelo fato da busca evitar com maior rigor a região do espaço de soluções que viola as restrições do problema.

Figura 7.3 – Valores de Custo e F.O. para os diversos valores de G

7.4 NÚMERO DE GERAÇÕES

Para a seleção do valor do número de gerações a ser utilizado foram fixados os seguintes valores para outras variáveis envolvidas:

- Valor de $G \rightarrow 100$;
- Período de operação utilizado $\rightarrow 120$ (10 anos).

Ensaio computacionais foram conduzidos para três possibilidades de armazenamentos iniciais: volume mínimo, metade do volume máximo e volume máximo, cujos resultados são resumidos aqui.

7.4.1 VOLUME INICIAL DOS RESERVATÓRIOS \rightarrow VOLUME MÍNIMO;

A Tabela 7.7 e a Figura 7.4 mostram os valores do número de gerações associados aos respectivos custos e déficits médios, admitindo-se que os reservatórios estejam com seus volumes mínimos no início do período de operação.

Tabela 7.7 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (V_{\min})

Número de Gerações	Custo	Déficit	Número de Gerações	Custo	Déficit
1	2.494.560	5.935,67	5000	2.493.853	5.934,88
10	2.494.560	5.935,67	10000	2.493.853	5.934,88
100	2.494.560	5.935,67	20000	2.493.853	5.934,88
1000	2.494.374	5.935,60	30000	2.493.853	5.934,88

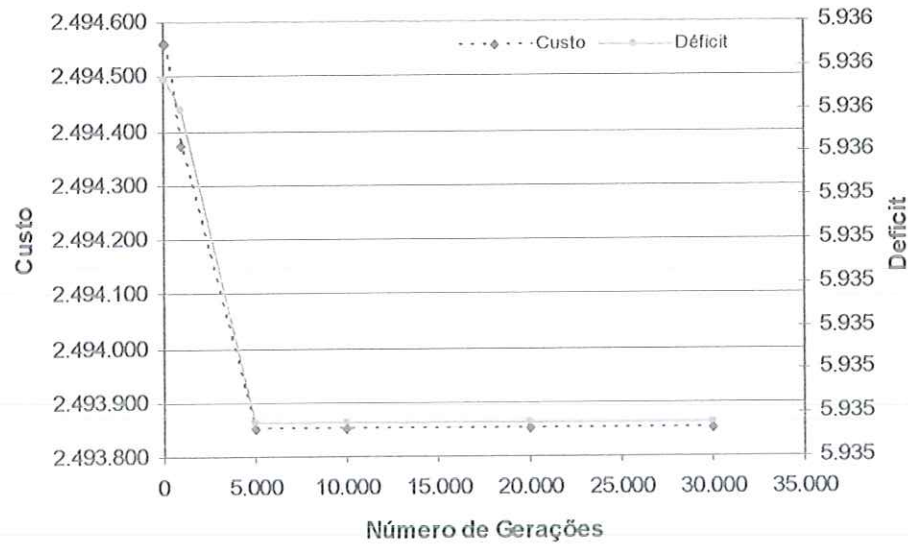


Figura 7.4 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (V_{min})

7.4.2 VOLUME INICIAL DOS RESERVATÓRIOS → METADE DO VOLUME MÁXIMO;

A Tabela 7.8 e a Figura 7.5, a seguir, mostram os valores do número de gerações associados aos respectivos custos e déficits médios, assumindo que os reservatórios estejam com a metade de seus volumes máximos no início do período de operação.

Tabela 7.8 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações ($1/2V_{max}$)

Número de Gerações	Custo	Déficit	Número de Gerações	Custo	Déficit
1	2.494.560	5.935,67	5000	2.494.000	5.935,05
10	2.494.560	5.935,67	10000	2.493.916	5.934,98
100	2.494.560	5.935,67	20000	2.493.916	5.934,98
1000	2.494.560	5.935,67	30000	2.493.916	5.934,98

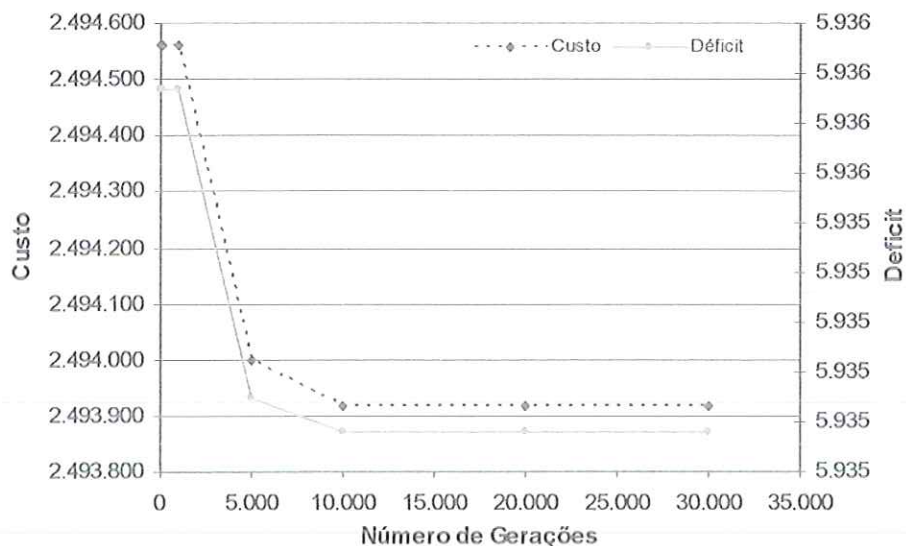


Figura 7.5 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações ($1/2V_{max}$)

7.4.3 VOLUME INICIAL DOS RESERVATÓRIOS → VOLUME MÁXIMO;

A Tabela 7.9 e a Figura 7.6, a seguir, mostram os valores do número de gerações associados aos seus respectivos custos e déficits médios obtidos, admitindo que os reservatórios estejam inicialmente com seus volumes máximos. Ressalta-se que tal condição de armazenamento inicial foi considerada apenas para estudo do número de gerações a ser utilizado, visto que, como o período de planejamento estudado inicia-se em janeiro, final do período seco na região, é, portanto, improvável que os reservatórios estejam com seu armazenamento máximo.

Tabela 7.9 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (V_{max})

Número de Gerações	Custo	Déficit	Número de Gerações	Custo	Déficit
1	2.494.557	5.934,33	5000	2.494.479	5.934,07
10	2.494.557	5.934,33	10000	2.494.278	5.933,03
100	2.494.557	5.934,33	20000	2.494.076	5.933,80
1000	2.494.557	5.934,33	30000	2.494.076	5.933,80

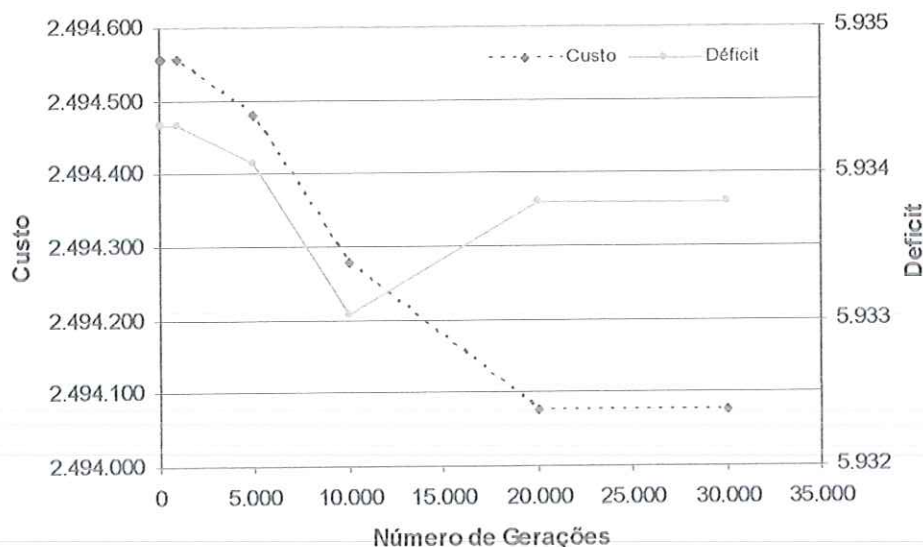


Figura 7.6 – Custos e déficits médios obtidos para os diversos números de gerações (V_{max})

Apesar dos valores de custo estarem bem próximos, nota-se que, quanto mais cheios os reservatórios encontram-se, no início do período estudado (10 anos), maiores são os custos ao fim das trinta mil gerações. Tal comportamento é explicado pelo fato de que maiores perdas hídricas ocorrem como consequência da ocorrência simultânea de volumes grandes armazenados nos reservatórios e afluições de período úmido, além de maiores perdas por evaporação com os reservatórios iniciando a operação com suas capacidades máximas.

A Figura 7.7 apresenta a evolução dos valores de custo com o número de gerações, para as três possibilidades de volumes iniciais estudadas, na determinação do valor do número de gerações a ser utilizado no estudo da operação do sistema em questão (volume mínimo, metade do volume máximo e volume máximo).

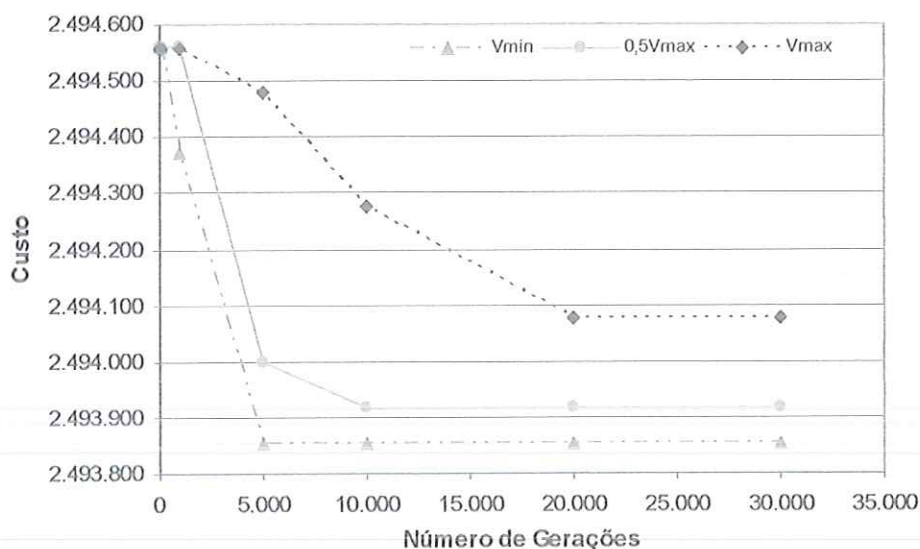


Figura 7.6 – Evolução do custo com o número de gerações para as três possibilidades de volumes iniciais estudadas

Quando os reservatórios iniciaram a operação com volume mínimo ou com a metade do volume máximo, a partir de 10.000 gerações, o valor do custo manteve-se sem alterações. Já quando a simulação da operação foi iniciada com os reservatórios contando com seu volume máximo, o valor do custo só se manteve constante a partir de 20.000 gerações. Dessa forma, para as simulações da operação realizadas neste trabalho, adotou-se 30.000 como o número máximo de iterações de AGs.

7.5 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO COM OS 30 ANOS DE DADOS

As respostas obtidas através da aplicação do método proposto por Reis et al. (2003) foram analisadas em termos dos pesos compensatórios e das estratégias operacionais produzidas nos sub-itens seguintes.

7.5.1 PESOS COMPENSATÓRIOS

Os resultados da operação otimizada para o período de planejamento de 30 anos são analisados em termos dos pesos compensatórios obtidos, para investigações realizadas a partir de três condições de armazenamento iniciais distintas, fixando-se:

- Limite máximo de importação viável → 4,5 m³/s (Canal do Trabalhador);
- Número de iterações de AGs → 30.000;
- Valor de G → 100;
- Período de operação utilizado → 360 (30 anos).

Novamente, foram conduzidos ensaios computacionais para três possibilidades de armazenamentos iniciais: volume mínimo, metade do volume máximo e volume máximo, cujos resultados são resumidos aqui.

7.5.1.1 Volume Inicial dos Reservatórios → volume mínimo;

As Figuras 7.7 e 7.8 mostram os valores de W para as 100 soluções obtidas a partir de uma população inicial aleatória, ao fim de 30.000 iterações de AGs. A Tabela 7.10 traz a estatística básica destes resultados.

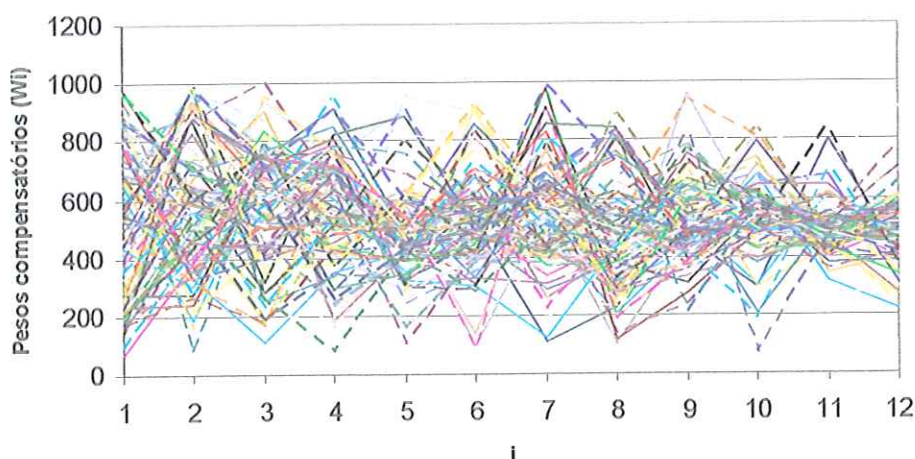


Figura 7.7 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 12 meses do ano (V_{\min})

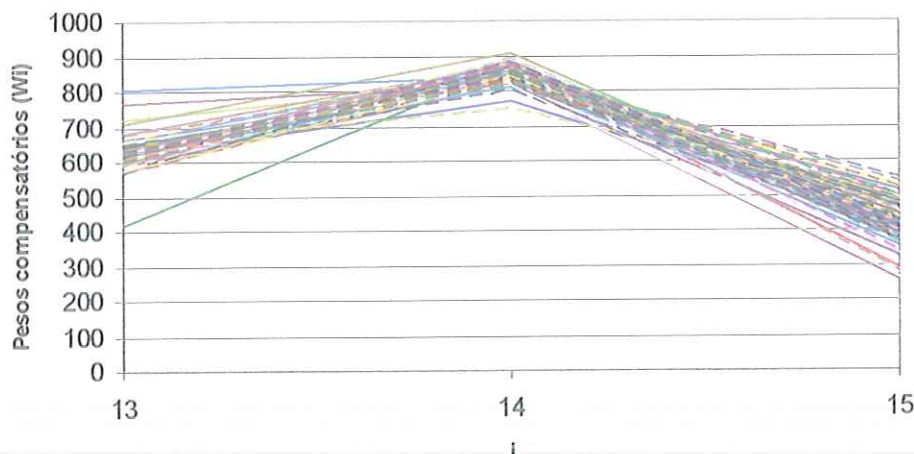


Figura 7.8 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 3 reservatórios do sistema (V_{min})

Tabela 7.10 – Estatística básica das 100 soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG (V_{min})

	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}
Média	509,0	586,5	561,1	557,8	484,2	519,2	541,9	463,1	524,9	540,3	493,3	496,3	620,1	844,4	415,4
Desvio Padrão	261,9	225,3	203,4	187,7	171,1	178,7	175,5	176,1	134,4	131,2	85,3	105,2	40,3	23,9	55,9
CV	0,514	0,384	0,362	0,336	0,353	0,344	0,324	0,380	0,256	0,243	0,173	0,212	0,065	0,028	0,135
Mínimo	71	77	103	78	103	81	111	100	205	72	263	220	415	751	256
Máximo	974	986	998	948	990	916	990	893	961	931	844	914	806	906	547

A Figura 7.9 mostra a variação das aflúências naturais médias aos reservatórios do sistema, ao longo dos meses, a média dos pesos compensatórios das 100 soluções e os pesos compensatórios da melhor solução entre as 100.

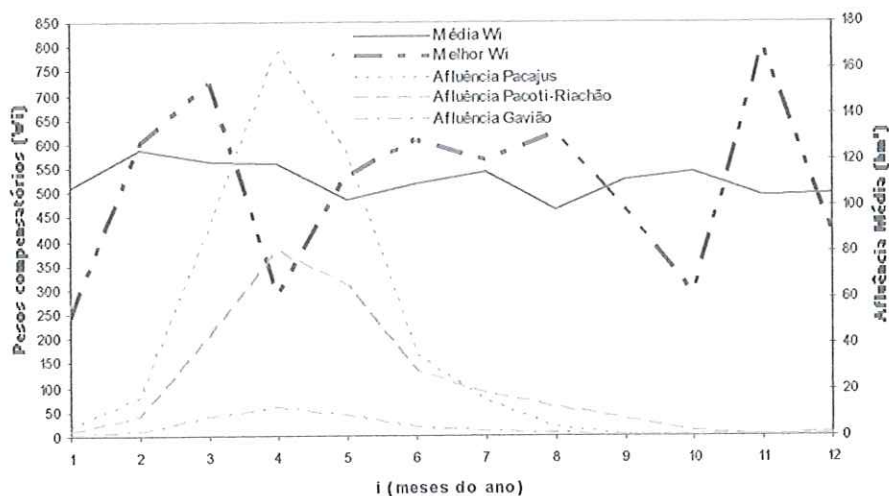


Figura 7.9 – Variação das aflúências naturais e pesos compensatórios (V_{min})

7.5.1.2 Volume Inicial dos Reservatórios → metade do volume máximo;

As Figuras 7.10 e 7.11 mostram os valores de W para as 100 soluções obtidas a partir de uma população inicial aleatória, ao fim de 30.000 iterações de AGs. A Tabela 7.11 traz a estatística básica destes resultados.

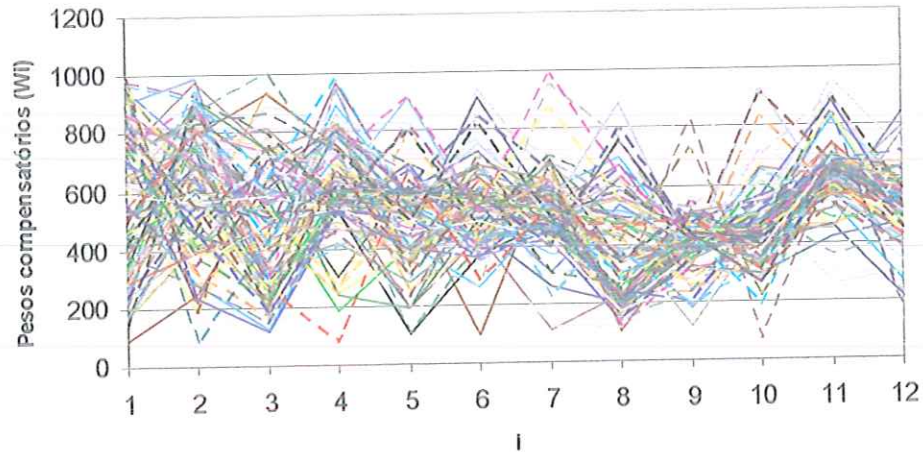


Figura 7.10 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 12 meses do ano ($1/2V_{max}$)

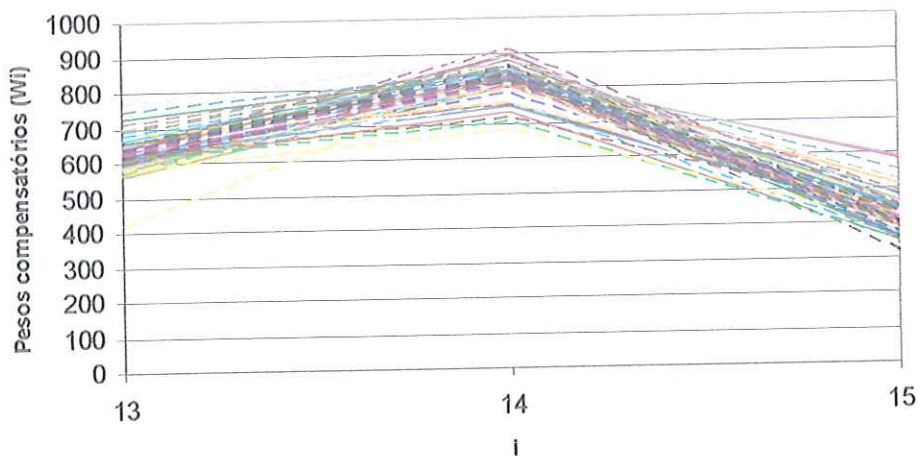


Figura 7.11 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 3 reservatórios do sistema ($1/2V_{max}$)

Tabela 7.11 – Estatística básica das 100 soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG ($1/2V_{max}$)

	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}
Média	590,3	605,1	494,3	607,0	494,4	529,2	516,3	375,2	402,9	460,6	636,4	519,5	624,6	827,8	417,9
Desvio Padrão	248,9	216,2	213,5	174,1	159,0	140,4	137,5	185,4	112,6	135,4	116,2	113,6	41,2	39,0	46,1
CV	0,422	0,357	0,432	0,287	0,322	0,265	0,266	0,494	0,280	0,294	0,183	0,219	0,066	0,047	0,110
Mínimo	86	77	116	78	101	97	111	100	115	72	263	156	415	680	315
Máximo	992	938	998	978	914	941	930	887	961	931	958	841	763	906	588

A Figura 7.12 mostra a variação das aflúncias naturais médias aos reservatórios do sistema, ao longo dos meses, a média dos pesos compensatórios das 100 soluções e os pesos compensatórios da melhor solução entre as 100.

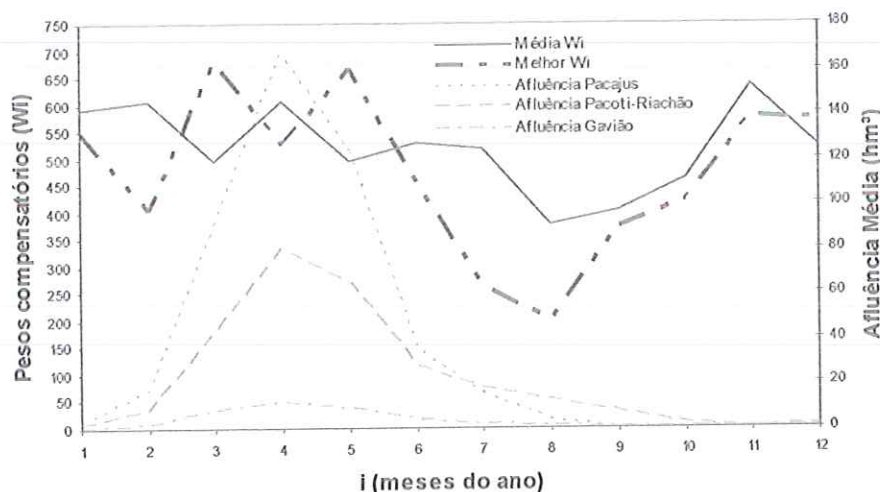


Figura 7.12 – Variação das aflúncias naturais e pesos compensatórios ($1/2V_{max}$)

7.5.1.3 Volume Inicial dos Reservatórios → volume máximo;

As Figuras 7.13 e 7.14 mostram os valores de W para as 100 soluções obtidas a partir de uma população inicial aleatória, ao fim de 30.000 iterações de AGs. A Tabela 7.12 traz a estatística básica desses resultados.

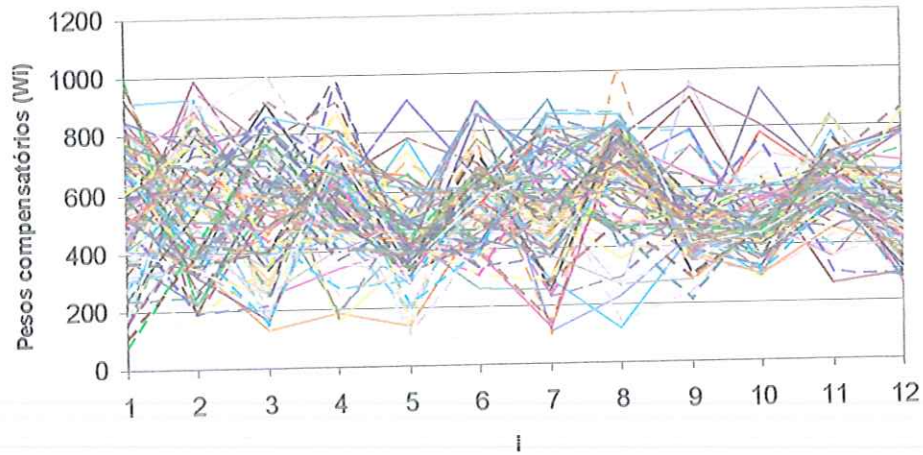


Figura 7.13 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 12 meses do ano (V_{max})

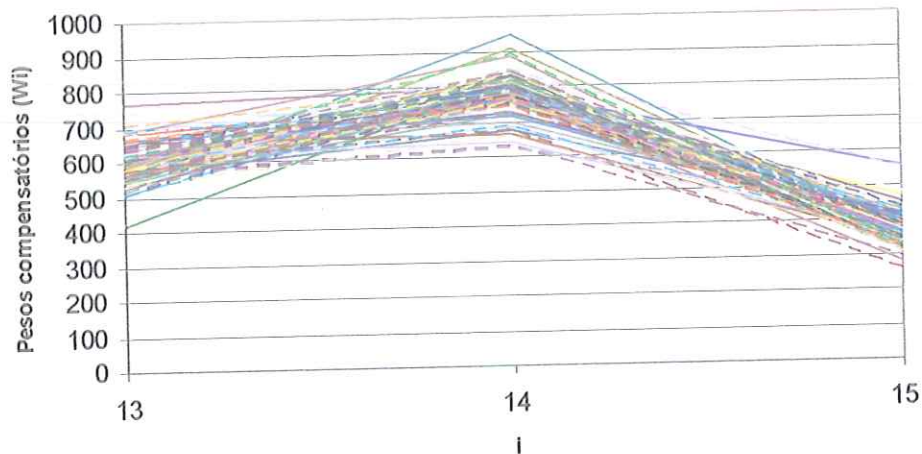


Figura 7.14 – 100 Soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG para os 3 reservatórios do sistema (V_{max})

Tabela 7.12 – Estatística básica das 100 soluções de pesos compensatórios obtidas pelo AG (V_{max})

	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}
Média	538,3	562,3	535,0	567,3	417,7	592,1	546,8	614,1	479,1	479,7	597,8	504,5	602,7	780,1	365,4
Desvio Padrão	232,0	214,7	226,2	172,6	150,4	173,7	183,6	197,1	130,4	113,4	102,9	126,1	53,4	54,6	49,5
CV	0,431	0,382	0,423	0,304	0,360	0,293	0,336	0,321	0,272	0,236	0,172	0,250	0,089	0,070	0,136
Mínimo	71	77	125	158	91	97	99	100	205	281	263	260	415	621	257
Máximo	992	985	998	989	914	916	903	994	961	931	844	855	763	950	556

A Figura 7.15 mostra a variação das afluências naturais médias aos reservatórios do sistema, ao longo dos meses, a média dos pesos compensatórios das 100 soluções e os pesos compensatórios da melhor solução entre as 100.

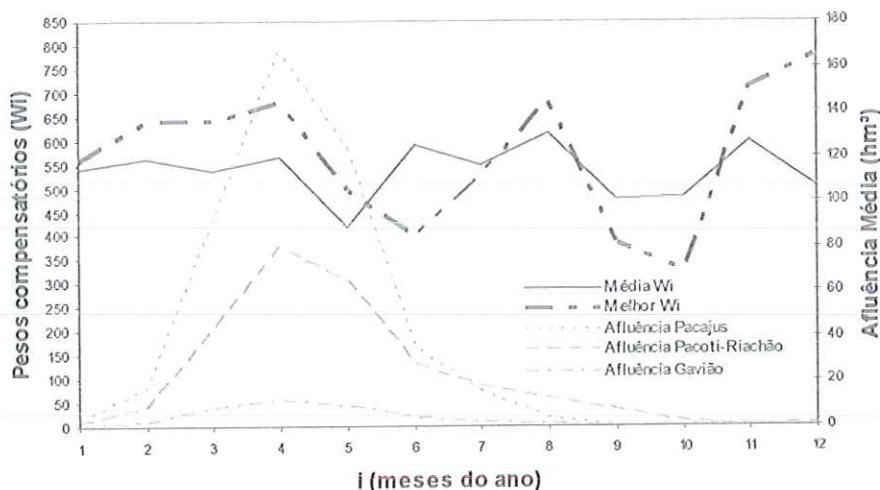


Figura 7.15 – Variação das afluências naturais e pesos compensatórios (V_{max})

Para os três armazenamentos iniciais, diferentemente dos resultados obtidos por Reis et al (2003), os pesos compensatórios para os meses do ano não seguiram nenhuma tendência clara de agrupamento em períodos. Já os pesos compensatórios relativos aos reservatórios do sistema apresentaram uma tendência nítida de comportamento, segundo a qual os valores dos pesos compensatórios são menores para o reservatório Gavião e maiores para o reservatório Pacoti/Riachão. Os valores dos pesos para o açude Pacajus ficaram entre estes dois extremos.

7.5.2 ANÁLISE DAS ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS OTIMIZANTES OBTIDAS

Após a determinação dos pesos compensatórios através do AG, eles foram introduzidos na função objetivo dos problemas seriados de programação linear,

sujeitos às restrições descritas no Capítulo 5 – Materiais e Métodos. Assim foram determinadas as variáveis de decisão do problema em termos do importe, armazenamento e liberações hídricas.

Para efeito de interpretação das respostas obtidas via otimização, foram realizadas análises do atendimento da demanda, das condições de armazenamento e das liberações hídricas ao longo do período de planejamento estudado. Tais estudos foram realizados para quatro situações distintas, descritas a seguir, fixando-se:

- Volume inicial dos reservatórios → volume mínimo;
- Número de iterações de AGs → 30.000;
- Valor de G → 100;

Foram definidas quatro situações diferentes no que diz respeito ao limite máximo de importação e ao período de operação. Na primeira e segunda situações, o período de operação estudado foi o de 1912 a 1941, início da série. No primeiro caso, o limite máximo de importação era de 4,5m³/s, correspondente ao Canal do Trabalhador, e na segunda situação o limite máximo era de 26,5m³/s (Canal do Trabalhador + Eixo de Integração).

Para os dois limites de importação mencionados, foi estudada a operação do sistema para os trinta piores anos da série, que vão de 1927 a 1956. Para o terceiro caso o limite máximo de importação é de 4,5m³/s e para o último o limite é de 26,5m³/s.

7.5.2.1 Evolução do Atendimento da Demanda

Situação 1

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1912 a 1941;

- Limite máximo de importação → 4,5m³/s (Canal do Trabalhador).

A evolução do deficit acumulado e do percentual de atendimento das demandas (*DemAbs* e *DemOut*) nos nós dos três reservatórios e para todo o sistema, é apresentada nas Figuras 7.16 a 7.20.

Essa primeira situação configura a condição de déficit hídrico. Nessas condições, a estratégia operacional otimizante sugere o atendimento preferencial das demandas no Reservatório Gavião, que abastece a Região Metropolitana de Fortaleza.

A Figura 7.20, relativa ao sistema, exhibe um comportamento muito semelhante àquele da Figura 7.18, mostrando que as demandas impostas ao Reservatório de Gavião é que determinam a operação do sistema. Tal fato se deve às magnitudes das demandas de Gavião serem muito superiores às dos demais reservatórios do sistema.

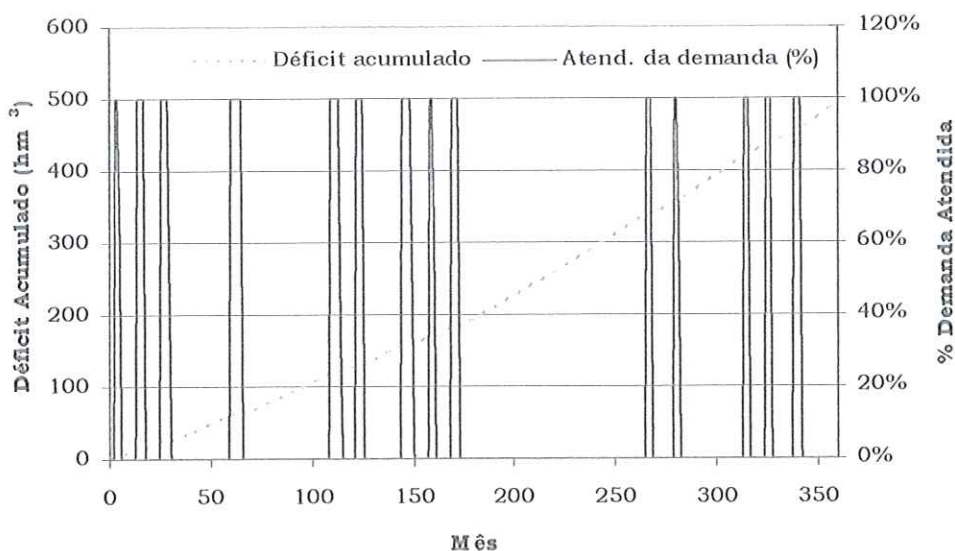


Figura 7.16 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacajus (situação 1)

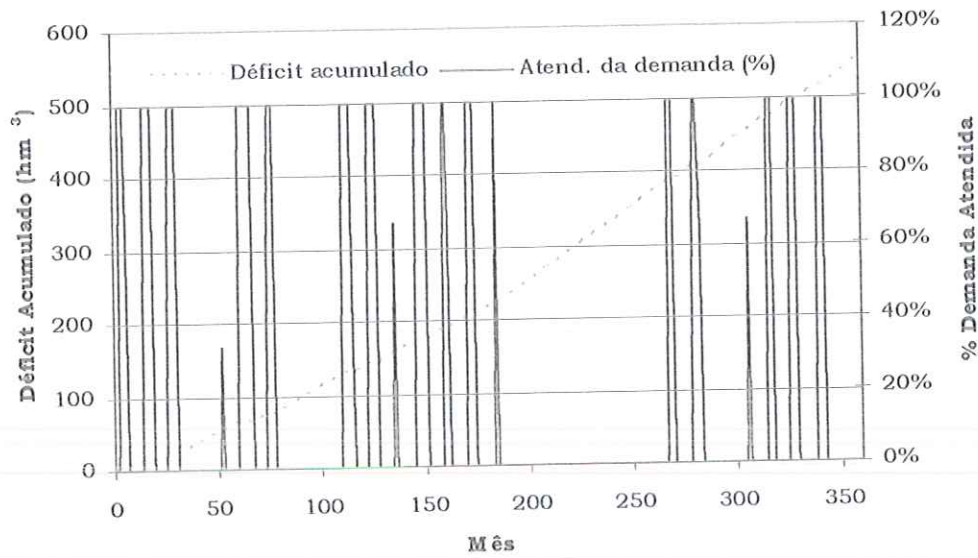


Figura 7.17 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 1)

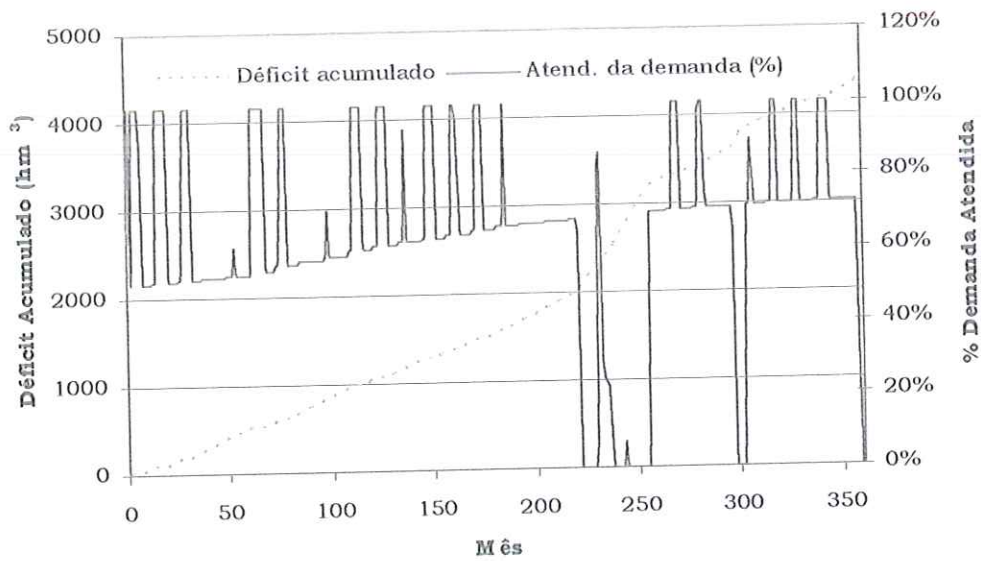


Figura 7.18 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Gavião (situação 1)

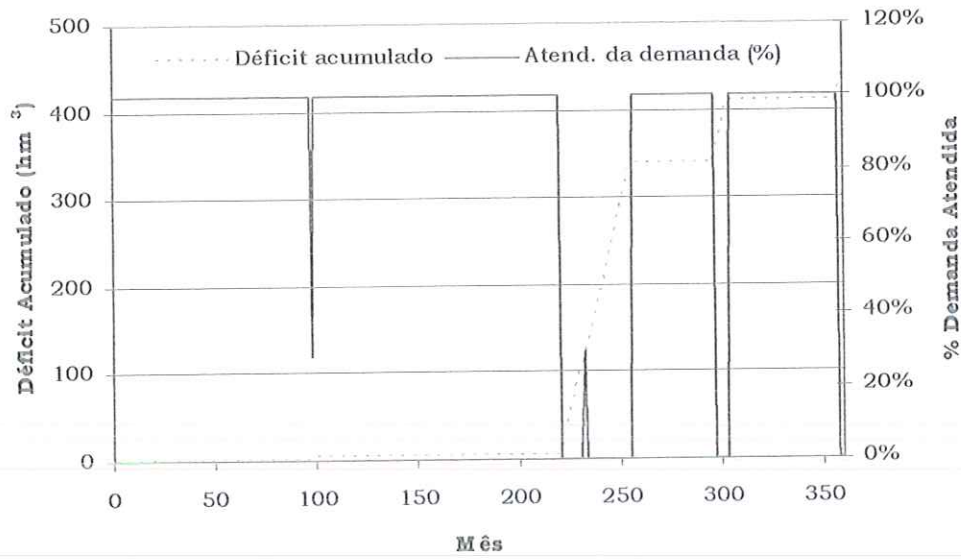


Figura 7.19 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemOut*) no nó do reservatório Gavião (situação 1)

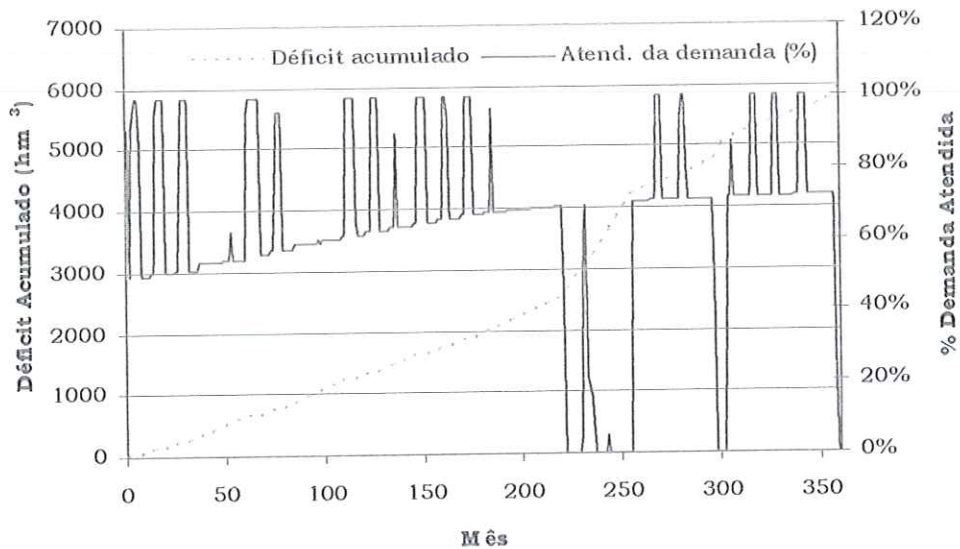


Figura 7.20 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs* + *DemOut*) para todo sistema (situação 1)

A Tabela 7.13 mostra os déficits acumulados para os três reservatórios no atendimento das demandas (*DemAbs* e *DemOut*), além dos percentuais de atendimento médio e do percentual de meses em que houve 100% de falha no atendimento da demanda. Ela confirma as

conclusões já obtidas anteriormente, mostrando que o comportamento do sistema é reflexo direto do comportamento do Reservatório Gavião.

Tabela 7.13 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 1)

Reservatório	Déficit Acumulado (hm ³)		Atendimento Médio (%)		Meses com Falha Total (%)	
	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut
Gavião	4455,47	441,04	63,73%	87,38%	8,61%	12,22%
Pacoti/Riachão	554,32	-	17,78%	-	81,11%	-
Pacajus	493,81	-	14,81%	-	84,72%	-
TOTAL	5503,61	441,04	59,30%	87,38%	8,61%	12,22%
	5944,51		63,56%		8,61%	

Situação 2

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1912 a 1941;
- Limite máximo de importação → 26,5m³/s (Canal do Trabalhador + Eixo de Integração).

A evolução do déficit acumulado e do percentual de atendimento das demandas (*DemAbs* e *DemOut*) nos nós dos três reservatórios e para todo o sistema, é apresentada nas Figuras 7.21 a 7.25.

A segunda situação, por admitir a vazão de reforço através do Eixo de Integração Castanhão – Região Metropolitana de Fortaleza, representa uma condição mais favorável do atendimento das demandas, conforme pode ser visualizado nos gráficos das Figuras 7.21 a 7.25.

As Figuras 7.21, 7.22 e 7.23 mostram mais claramente que a estrutura de pesos adotada privilegia o atendimento das demandas de abastecimento da primeira faixa, seguida da segunda e da terceira.

É evidente ainda que a estratégia operacional otimizante sugere o atendimento preferencial da demanda do Reservatório Gavião, embora tenha havido um acréscimo substancial do atendimento das demandas dos dois reservatórios de

montante em virtude da vazão adicional de reforço, fato esse que pode ser confirmado pelos números da Tabela 7.14.

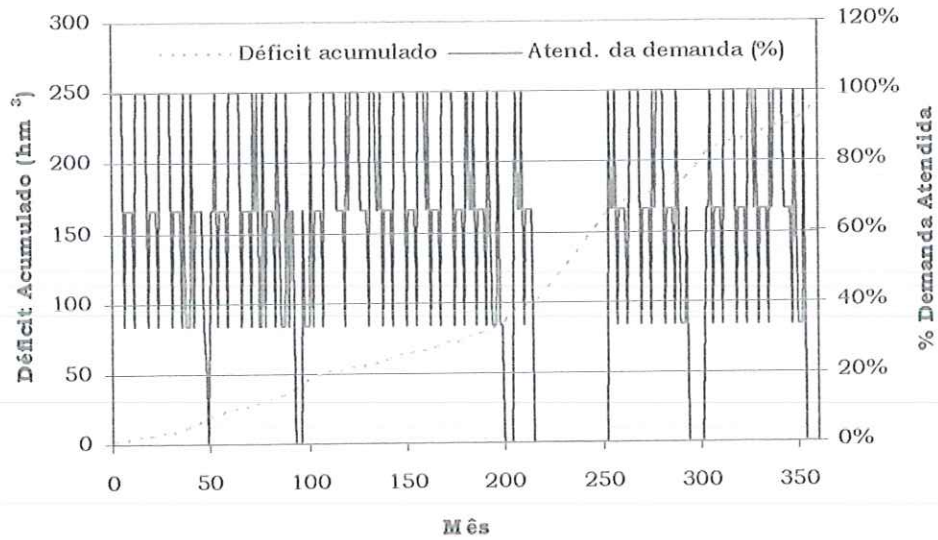


Figura 7.21 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacajus (situação 2)

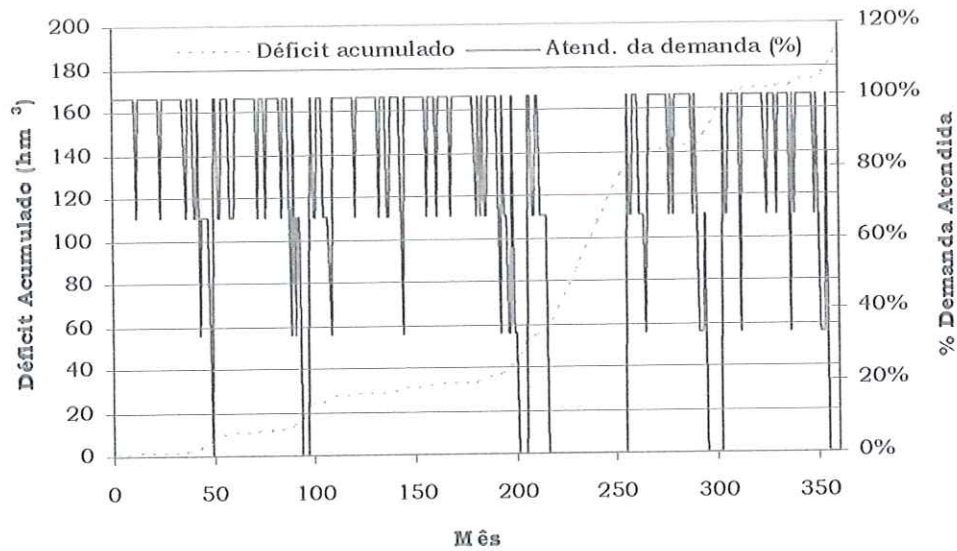


Figura 7.22 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 2)

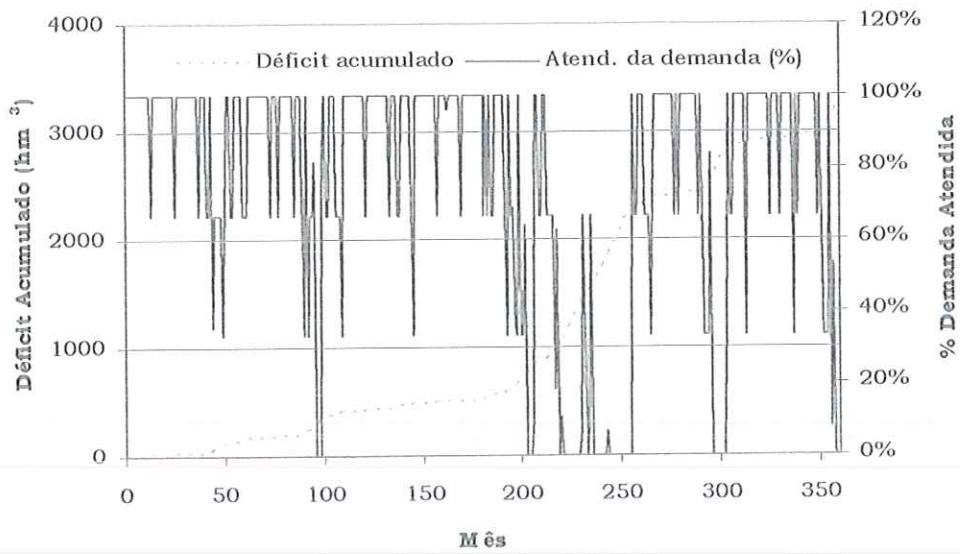


Figura 7.23 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Gavião (situação 2)

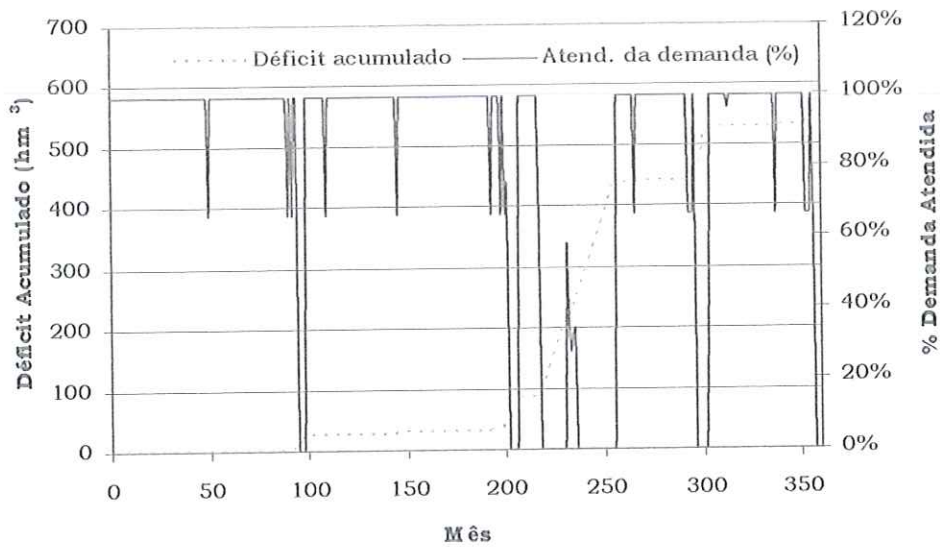


Figura 7.24 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemOut*) no nó do reservatório Gavião (situação 2)

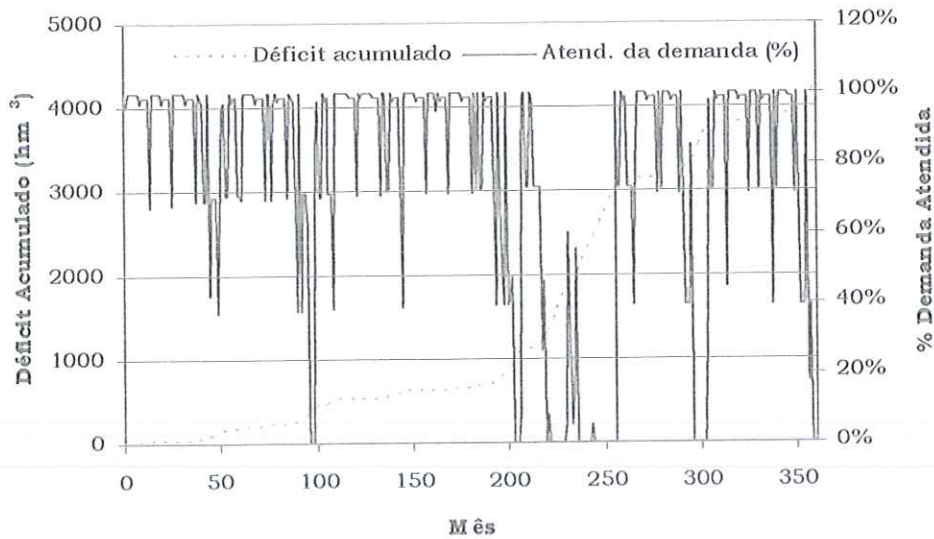


Figura 7.25 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda ($DemAbs + DemOut$) para todo sistema (situação 2)

A Tabela 7.14 mostra os déficits acumulados para os três reservatórios no atendimento das demandas ($DemAbs$ e $DemOut$), além dos percentuais de atendimento médio e do percentual de meses em que houve 100% de falha no atendimento da demanda.

Tabela 7.14 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 2)

Reservatório	Déficit Acumulado (hm^3)		Atendimento Médio (%)		Meses com Falha Total (%)	
	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut
Gavião	3272,92	586,09	74,93%	82,48%	12,50%	14,72%
Pacoli/Riachão	190,40	-	73,05%	-	17,22%	-
Pacajus	245,13	-	58,58%	-	17,50%	-
TOTAL	3708,44	586,09	74,13%	82,48%	12,50%	14,72%
	4294,40		75,46%		12,22%	

Situação 3

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1927 a 1956;
- Limite máximo de importação → $4,5m^3/s$ (Canal do Trabalhador).

A evolução do déficit acumulado e do percentual de atendimento das demandas (*DemAbs* e *DemOut*) nos nós dos três reservatórios e para todo o sistema, é apresentada nas Figuras 7.26 a 7.30.

A situação 3 admite uma seqüência natural de afluências que caracteriza secas mais severas. Assim sendo, a estratégia otimizante implicou em maiores déficits que aqueles obtidos na situação 1, conforme sugerem os gráficos das Figuras 7.26 a 7.30 e os números da Tabela 7.15.

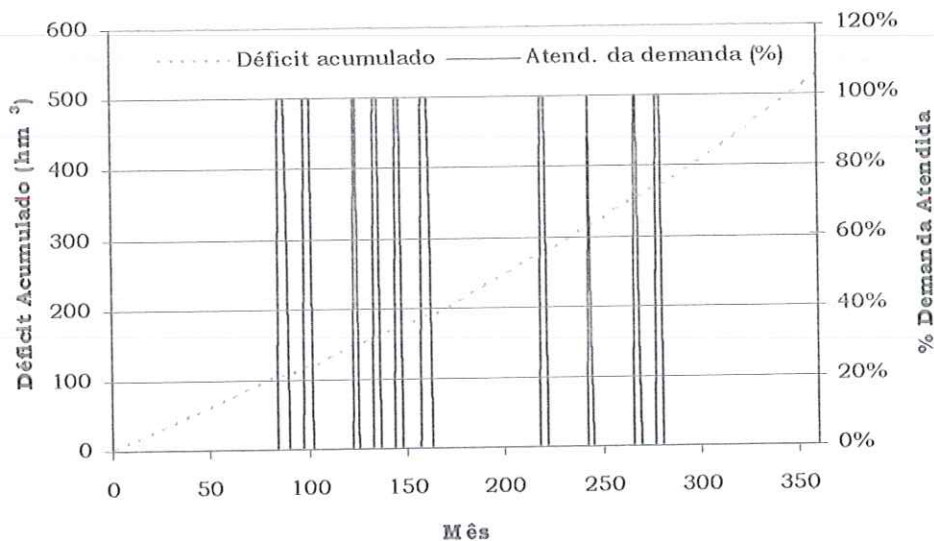


Figura 7.26 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacajus (situação 3)

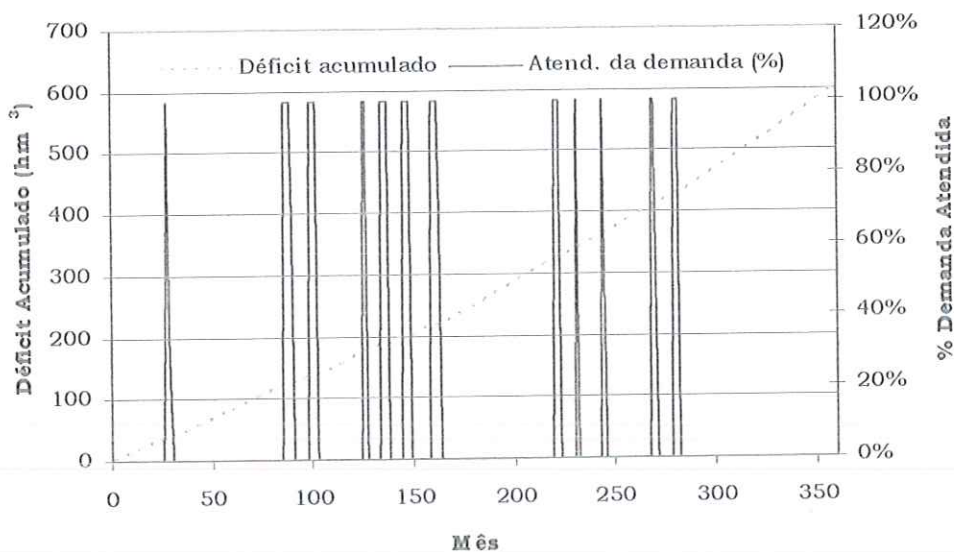


Figura 7.27 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 3)

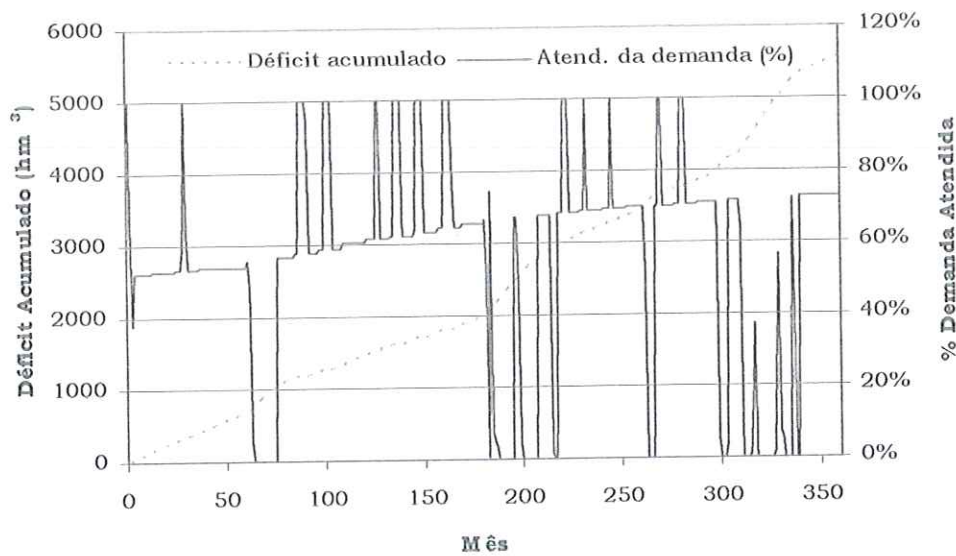


Figura 7.28 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Gavião (situação 3)

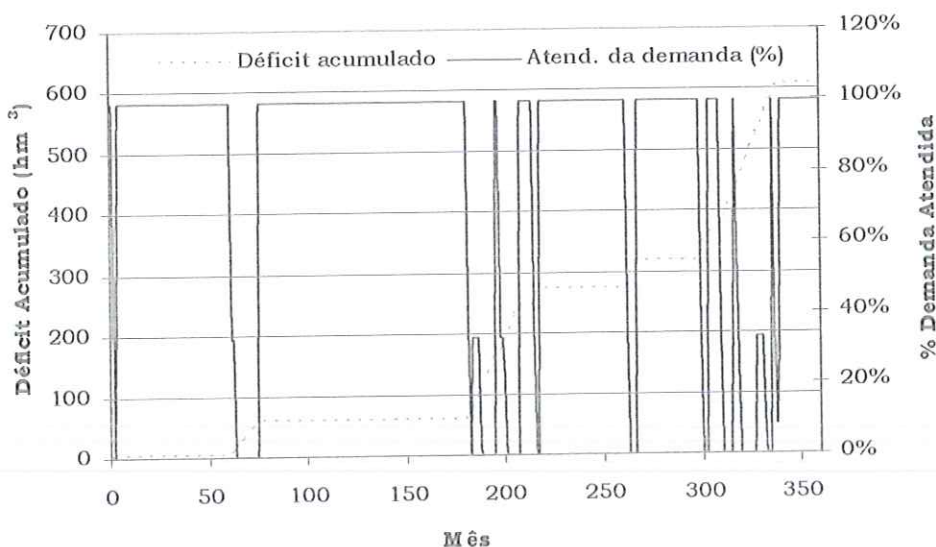


Figura 7.29 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemOut*) no nó do reservatório Gavião (situação 3)

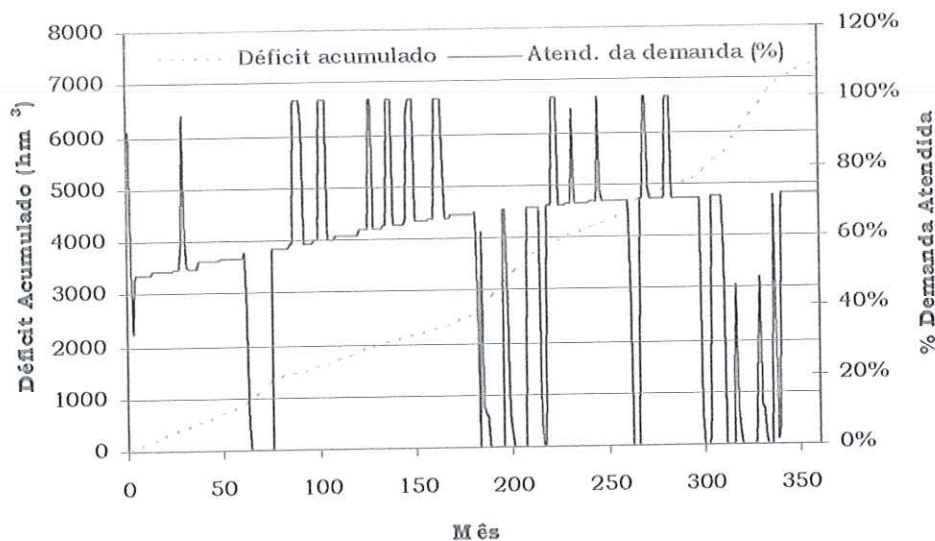


Figura 7.30 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs* + *DemOut*) para todo sistema (situação 3)

A Tabela 7.15 mostra os défits acumulados para os três reservatórios no atendimento das demandas (*DemAbs* e *DemOut*), além

dos percentuais de atendimento médio e do percentual de meses em que houve 100% de falha no atendimento da demanda.

Tabela 7.15 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 3)

Reservatório	Déficit Acumulado (hm ³)		Atendimento Médio (%)		Meses com Falha Total (%)	
	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut
Gavião	5566,41	608,70	54,36%	79,78%	15,28%	15,00%
Pacoti/Riachão	602,09	-	10,01%	-	88,89%	-
Pacajus	528,08	-	8,61%	-	90,83%	-
TOTAL	6696,57	608,70	50,16%	79,78%	15,28%	15,00%
	7305,13		54,60%		13,33%	

Situação 4

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1927 a 1956;
- Limite máximo de importação → 26,5m³/s (Canal do Trabalhador + Eixo de Integração).

A evolução do déficit acumulado e do percentual de atendimento das demandas (*DemAbs* e *DemOut*) nos nós dos três reservatórios e para todo o sistema, é apresentada nas Figuras 7.31 a 7.35.

Em analogia às comparações tecidas entre as situações 1 e 3, a situação 2 pode ser comparada à 4. Da situação 2 para a 4 é observado um salto negativo no atendimento das demandas como consequência da seqüência de afluições naturais mais desfavoráveis.

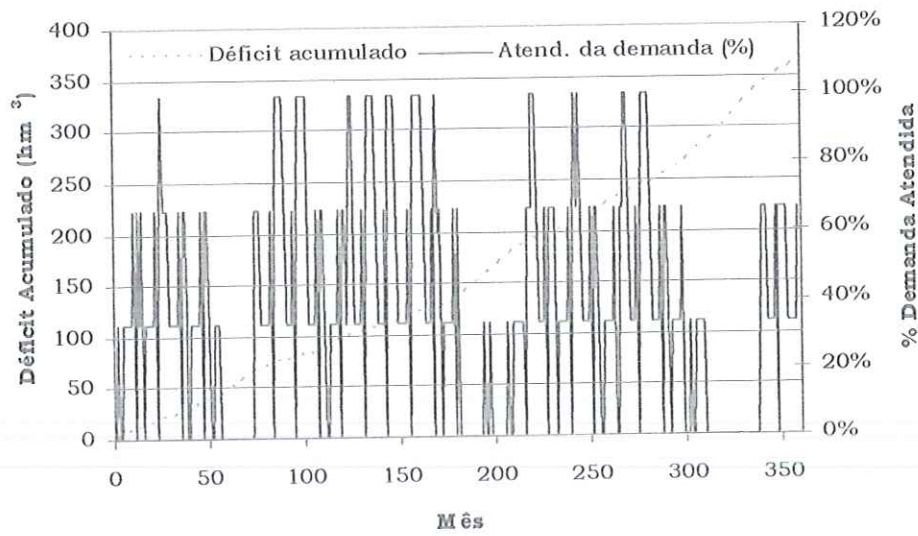


Figura 7.31 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacajus (situação 4)

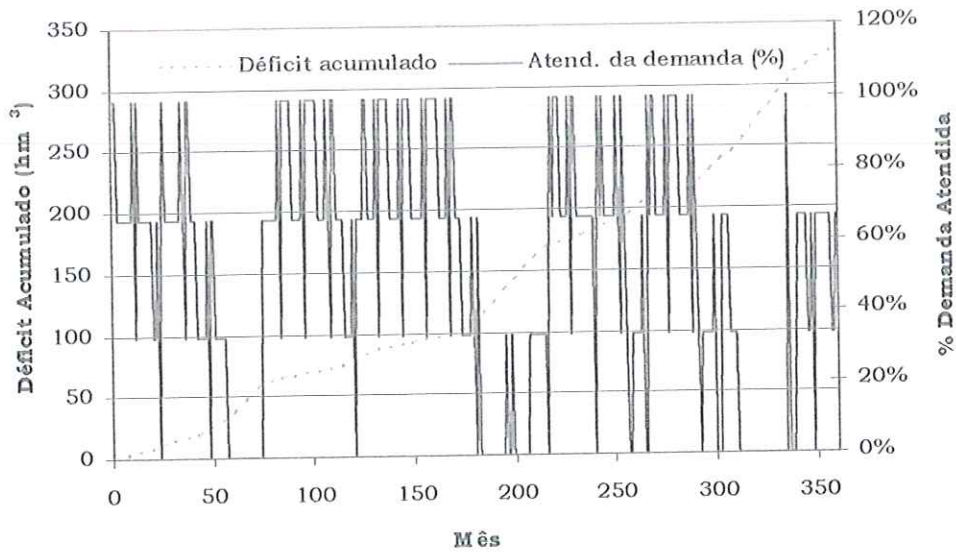


Figura 7.32 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Pacoti/Riachão (situação 4)

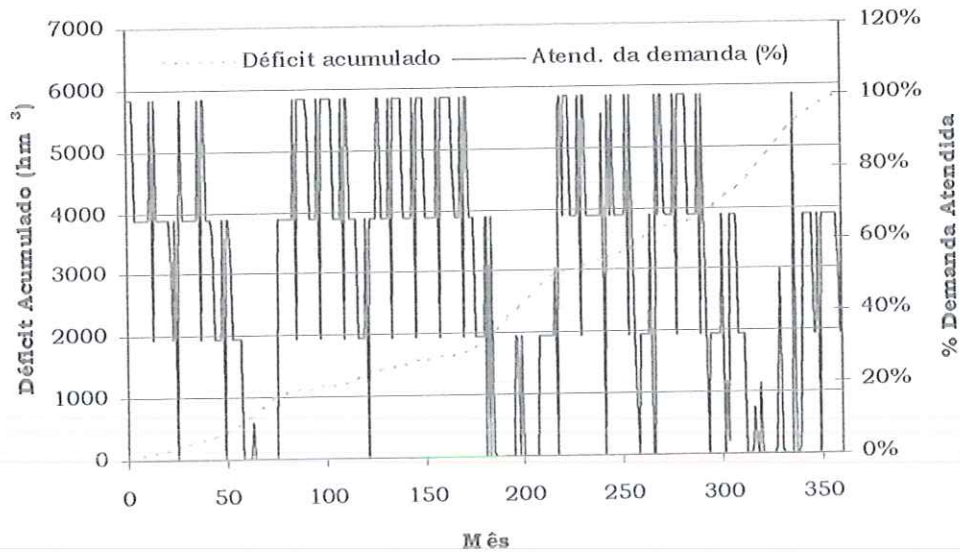


Figura 7.33 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemAbs*) no nó do reservatório Gavião (situação 4)

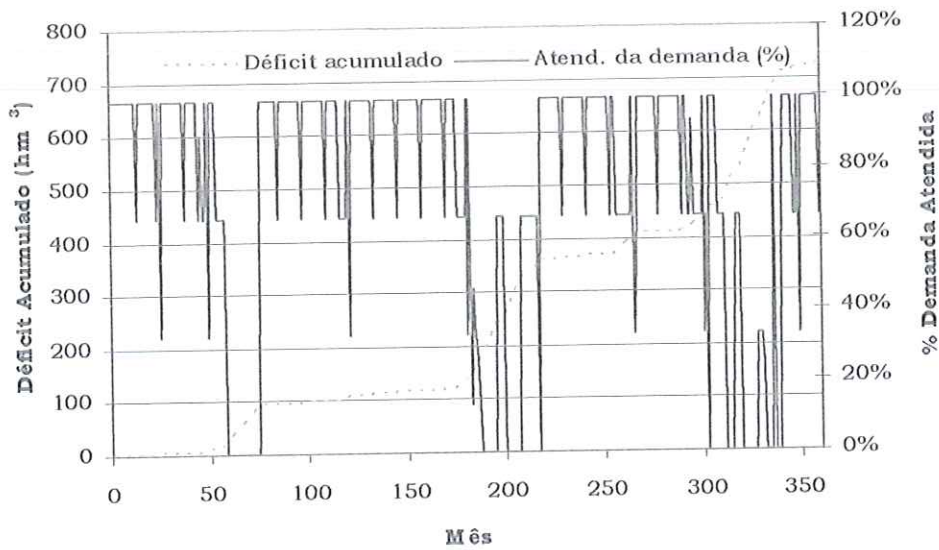


Figura 7.34 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda (*DemOut*) no nó do reservatório Gavião (situação 4)

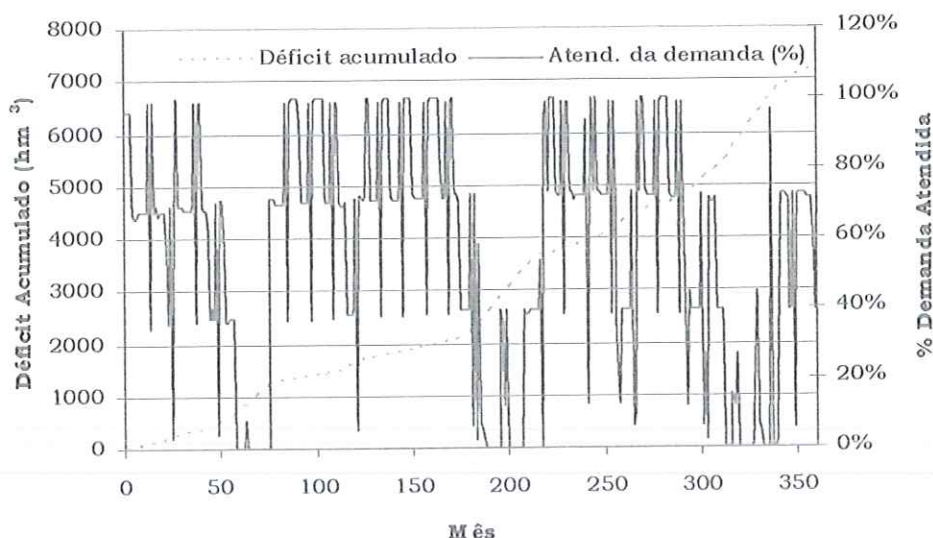


Figura 7.35 – Déficit acumulado e % de atendimento da demanda ($DemAbs + DemOut$) para todo sistema (situação 4)

A Tabela 7.16 mostra os déficits acumulados para os três reservatórios no atendimento das demandas ($DemAbs$ e $DemOut$), além dos percentuais de atendimento médio e do percentual de meses em que houve 100% de falha no atendimento da demanda.

Tabela 7.16 – Déficit acumulado, % de atendimento das demandas e % de meses com 100% de falha (situação 4)

Reservatório	Déficit Acumulado (hm^3)		Atendimento Médio (%)		Meses com Falha Total (%)	
	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut	DemAbs	DemOut
Gavião	5847,88	726,15	52,92%	74,61%	18,61%	15,00%
Pacoti/Riachão	330,21	-	51,57%	-	23,06%	-
Pacajus	365,10	-	37,11%	-	31,94%	-
TOTAL	6543,20	726,15	52,17%	74,61%	18,61%	15,00%
		7269,21		55,70%		13,61%

7.5.2.2. Evolução do Volumes Armazenados

Situação 1

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1912 a 1941;
- Limite máximo de importação → $4,5m^3/s$ (Canal do Trabalhador).

A evolução do armazenamento dos reservatórios do sistema no período de operação estudado é apresentada nas Figuras 7.36 a 7.38.

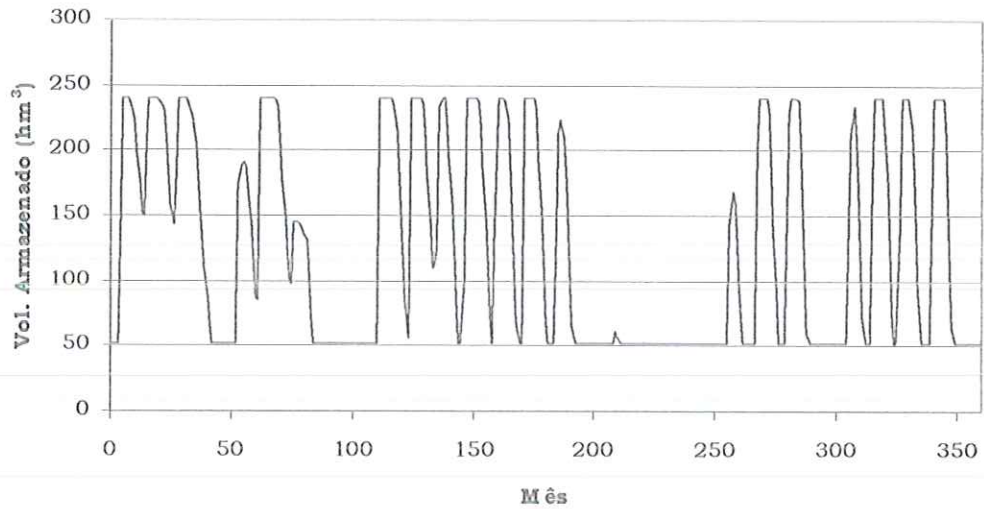


Figura 7.36 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 1)

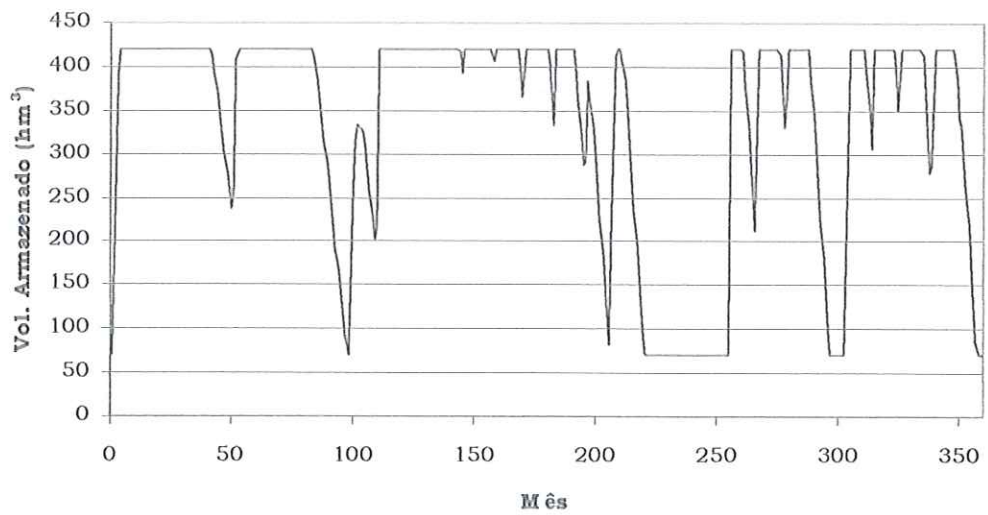


Figura 7.37 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 1)

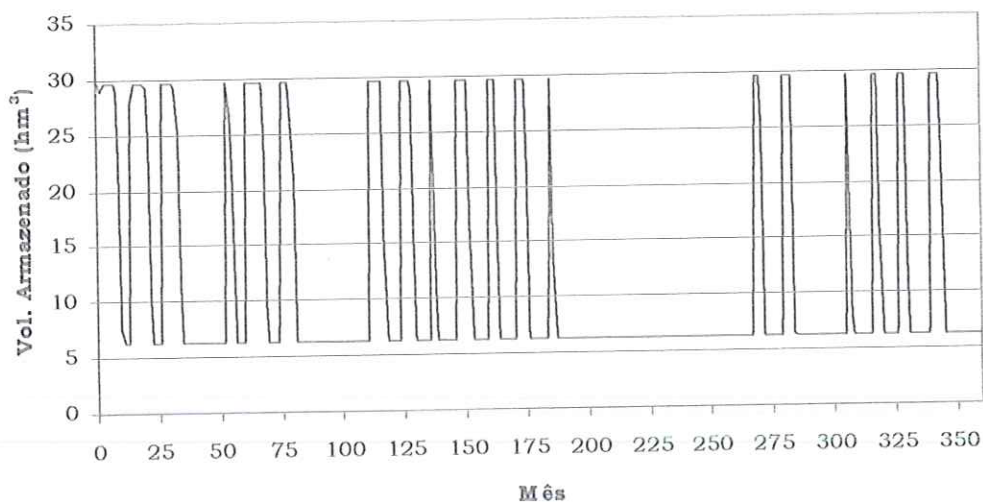


Figura 7.38 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 1)

Situação 2

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1912 a 1941;
- Limite máximo de importação → 26,5m³/s (Canal do Trabalhador + Eixo de Integração).

A evolução do armazenamento dos reservatórios do sistema no período de operação estudado é apresentada nas Figuras 7.39 a 7.41.

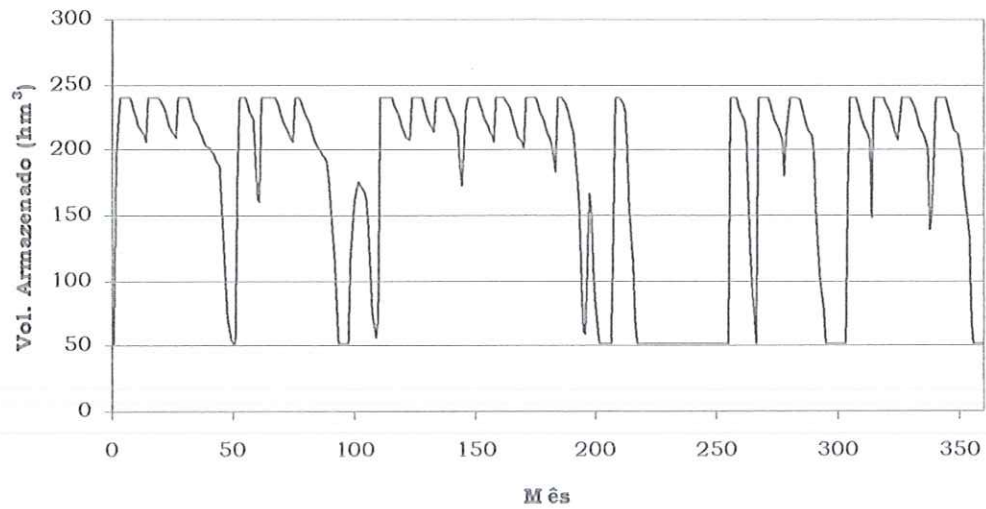


Figura 7.39 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 2)

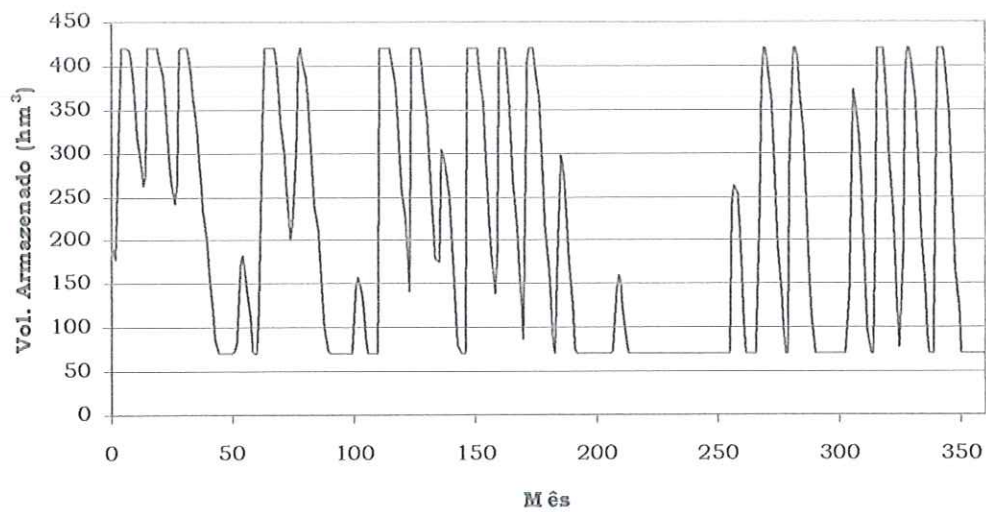


Figura 7.40 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 2)

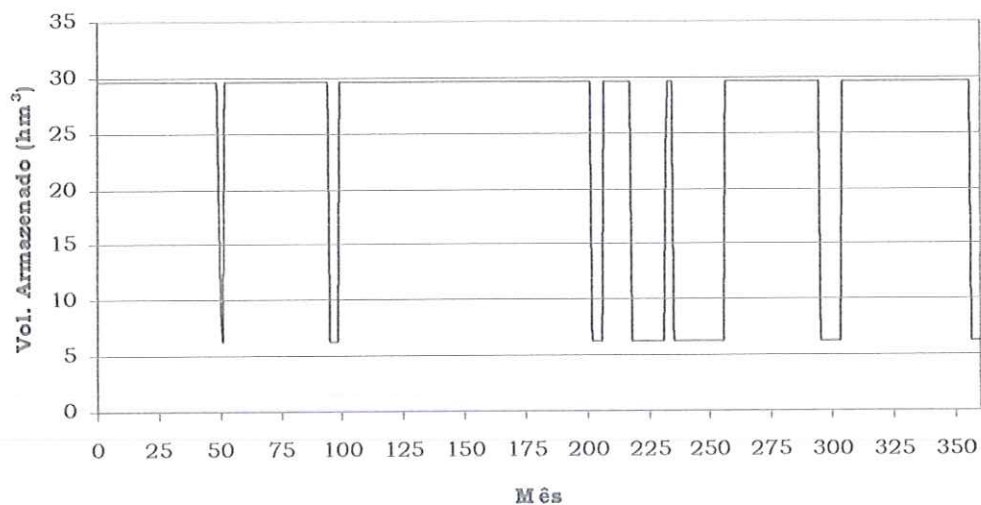


Figura 7.41 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 2)

Situação 3

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1927 a 1956;
- Limite máximo de importação → 4,5m³/s (Canal do Trabalhador).

A evolução do armazenamento dos reservatórios do sistema no período de operação estudado é apresentada nas Figuras 7.42 a 7.44.

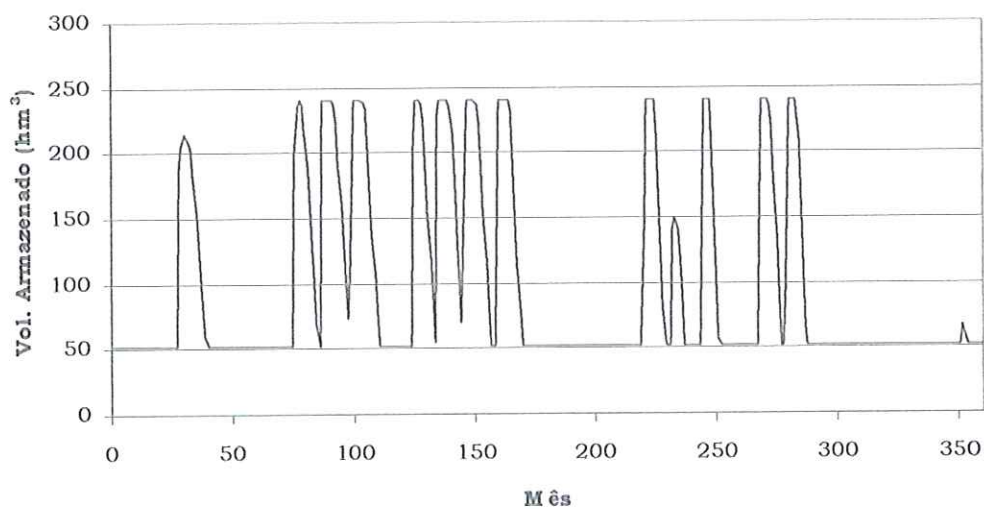


Figura 7.42 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 3)

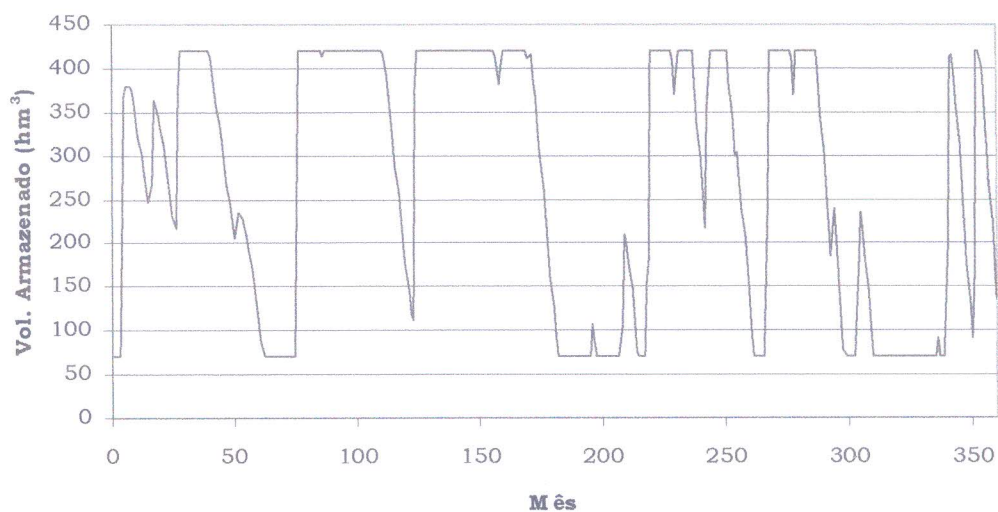


Figura 7.43– Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 3)

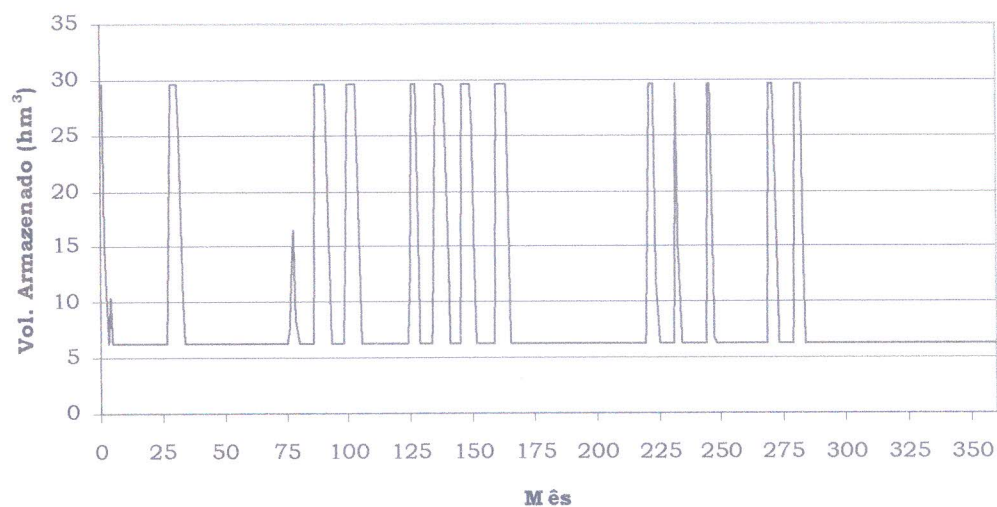


Figura 7.44 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 3)

Situação 4

- Período de operação estudado → 360 (30 anos) – 1927 a 1956;
- Limite máximo de importação → 26,5m³/s (Canal do Trabalhador + Eixo de Integração).

A evolução do armazenamento dos reservatórios do sistema no período de operação estudado é apresentada nas Figuras 7.45 a 7.47.

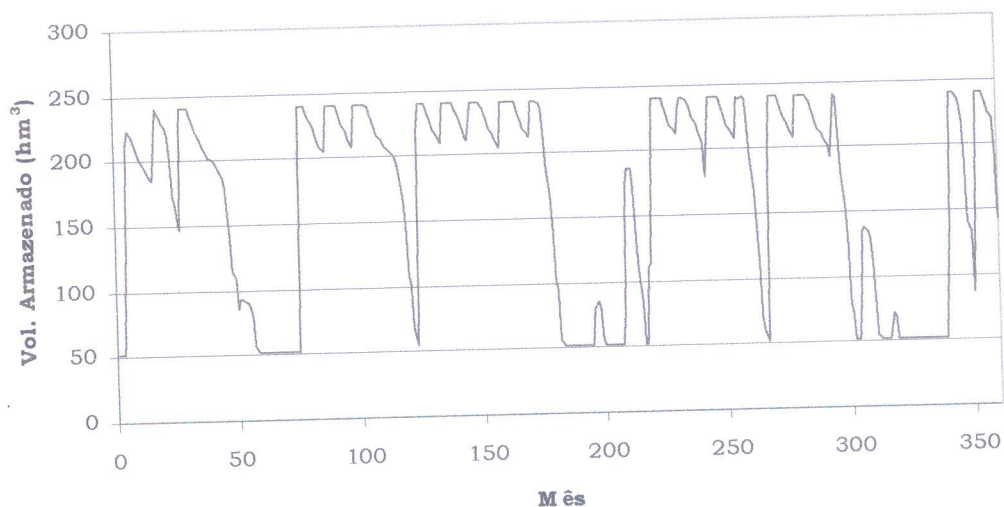


Figura 7.45 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacajus (situação 4)

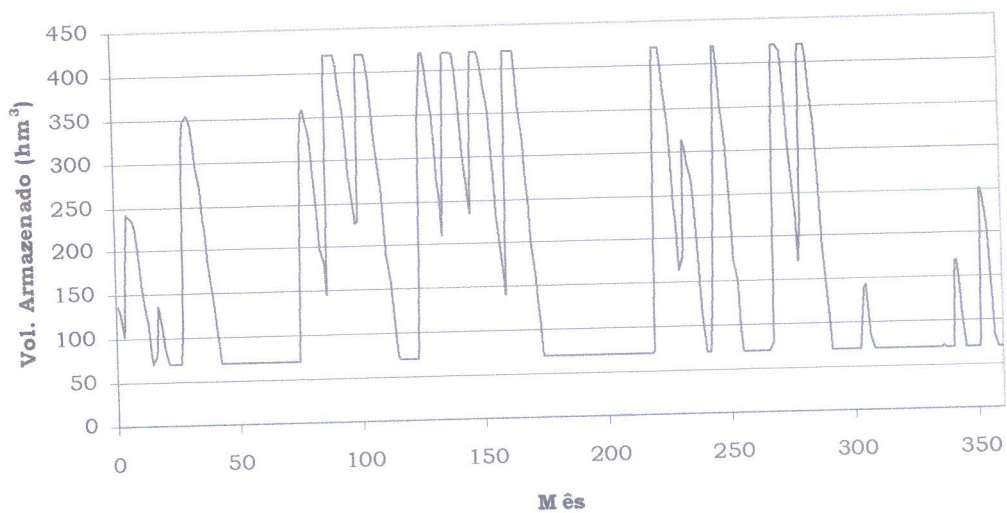


Figura 7.46 – Evolução do volume armazenado no reservatório Pacoti/Riachão (situação 4)

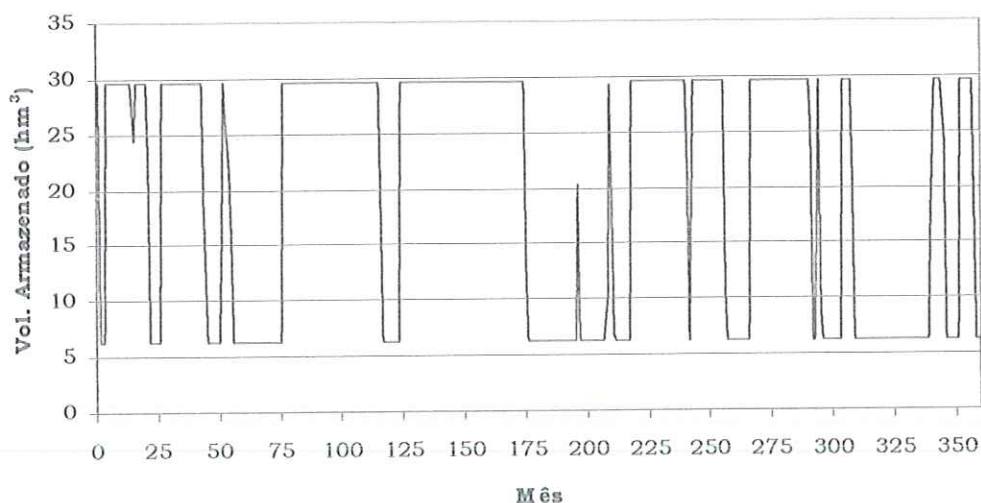


Figura 7.47 – Evolução do volume armazenado no reservatório Gavião (situação 4)

As situações 1 e 2, quando comparadas, evidenciam que no caso de reforço no importe (situação 2) o Reservatório Gavião tende a manter-se cheio na maioria dos meses, ao contrário do que ocorre na situação 1 em que o importe hídrico factível é limitado a capacidade do Canal do Trabalhador.

Nas situações 3 e 4 ocorre a mesma tendência observada nas situações 1 e 2, embora com menor clareza pois o período analisado é caracterizado por secas mais severas. Na situação 4 quando reforço no importe é introduzido, observa-se que o Reservatório Gavião tende a operar com volume máximo em grande parte dos meses, diferentemente do que ocorre na situação 3, quando o Reservatório Gavião passa a maioria do tempo com a volume mínimo de acumulação.

7.5.2.3 Volume Liberado em Função do Volume Disponível

Em termos práticos geralmente é interessante estabelecer as relações entre a disponibilidade hídrica e as liberações de maneira a otimizar a operação do sistema.

Assim, as Figuras 7.48 a 7.71 indicam os volumes liberados para os propósitos de atendimento de *DemAbs* e *DemOut* e para os reservatórios de jusante obtidos como resposta da otimização. Tais figuras foram construídas de maneira a possibilitar a divisão dos volumes liberados para atendimento das demandas e para os reservatórios de jusante, de três formas:

$$Vlib_t(i) = Qabs_t(i) + Qout_t(i) \quad (11)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

onde,

$Vlib_t(i)$ Volume liberado pelo reservatório i no estágio t .

$$Vlib_t(i) = D_t(i) \quad (12)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

$$Vlib_t(i) = Qabs_t(i) + Qout_t(i) + D_t(i) \quad (13)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

Já o volume disponível em um determinado estágio é o volume armazenado no reservatório no início do estágio, mais a afluência natural ao reservatório e mais o volume derivado liberado pelo reservatório a montante do mesmo.

$$Vdisp_t(i) = V_{t-1}(i) + A_t(i) + \sum_{j \in M_i} D_t(j) \quad (14)$$

$$t = 1, 2, \dots, NSTG \quad i = 1, 2, 3$$

onde,

$Vdisp_t(i)$ Volume disponível no reservatório i no estágio t .

Situações 1 e 3

As Figuras 7.48 a 7.59 reúnem os resultados da otimização realizados para as situações 1 e 3, lembrando que elas correspondem à condição atual de limite de importação hídrica máximo de 4,5m³/s (Canal do Trabalhador), diferindo por considerar períodos de afluências naturais distintos. No caso da situação 1, considerou-se o período de 30 anos compreendido pelos anos de 1912 a 1941, enquanto que na situação 3 o período analisado foi de 1927 a 1956, configurando um período hidrológico de secas mais severas.

Tais figuras permitem diversas conclusões.

Primeiramente, observa-se que as regras operacionais expressas pelas relações entre disponibilidade hídrica e liberação são praticamente coincidentes para as situações 1 e 3.

Comparando as liberações de cada reservatório, nota-se que o Reservatório Gavião apresenta uma regra operacional mais clara que os demais reservatórios para todos os meses do ano.

Observa-se que o volume total liberado pelos reservatórios de montante do Gavião correspondem praticamente às liberações para jusante durante o período seco, notadamente caracterizado pelos meses de janeiro e fevereiro, quando deixam de atender as demandas locais. A operação dos reservatórios de montante mostra-se complexa no referido período, de maneira a suprir o reservatório de jusante (Gavião).

No período mais úmido, que compreende os meses de março a junho, as liberações dos reservatórios de Pacajus e Pacoti/Riachão apresentam relações mais bem definidas das disponibilidades hídricas que no período anterior. Apesar desses reservatórios atenderem melhor às demandas locais, o comportamento de liberações para suprir o Reservatório de Gavião ainda permanece. Durante esse período, o

comportamento do Reservatório de Gavião parece refletir o comportamento dos reservatórios de montante, em termos da política de liberações hídricas.

Situações 2 e 4

As Figuras 7.60 a 7.71 reúnem os resultados da otimização realizados para as situações 2 e 4, lembrando que elas correspondem à condição de limite de importação hídrica máximo ampliado para 26,5 m³/s (Canal do Trabalhador + Eixo de Integração), diferindo por considerar períodos de afluições naturais distintos. No caso da situação 2, considerou-se o período de 30 anos compreendido pelos anos de 1912 a 1941, enquanto que na situação 4 o período analisado foi de 1927 a 1956, configurando um período hidrológico de secas mais severas.

Geralmente, comportamentos muito semelhantes podem ser observados para tais situações, quando comparados às situações 1 e 3. Entretanto, no caso das situações 2 e 4, tem-se maior atendimento das demandas locais nos dois primeiros reservatórios do sistema (Pacajus e Pacoti/Riachão) e uma visível duplicidade de regras para o Reservatório Gavião para diferentes faixas de valores de disponibilidade hídrica, durante o período seco, notadamente para a situação 4.

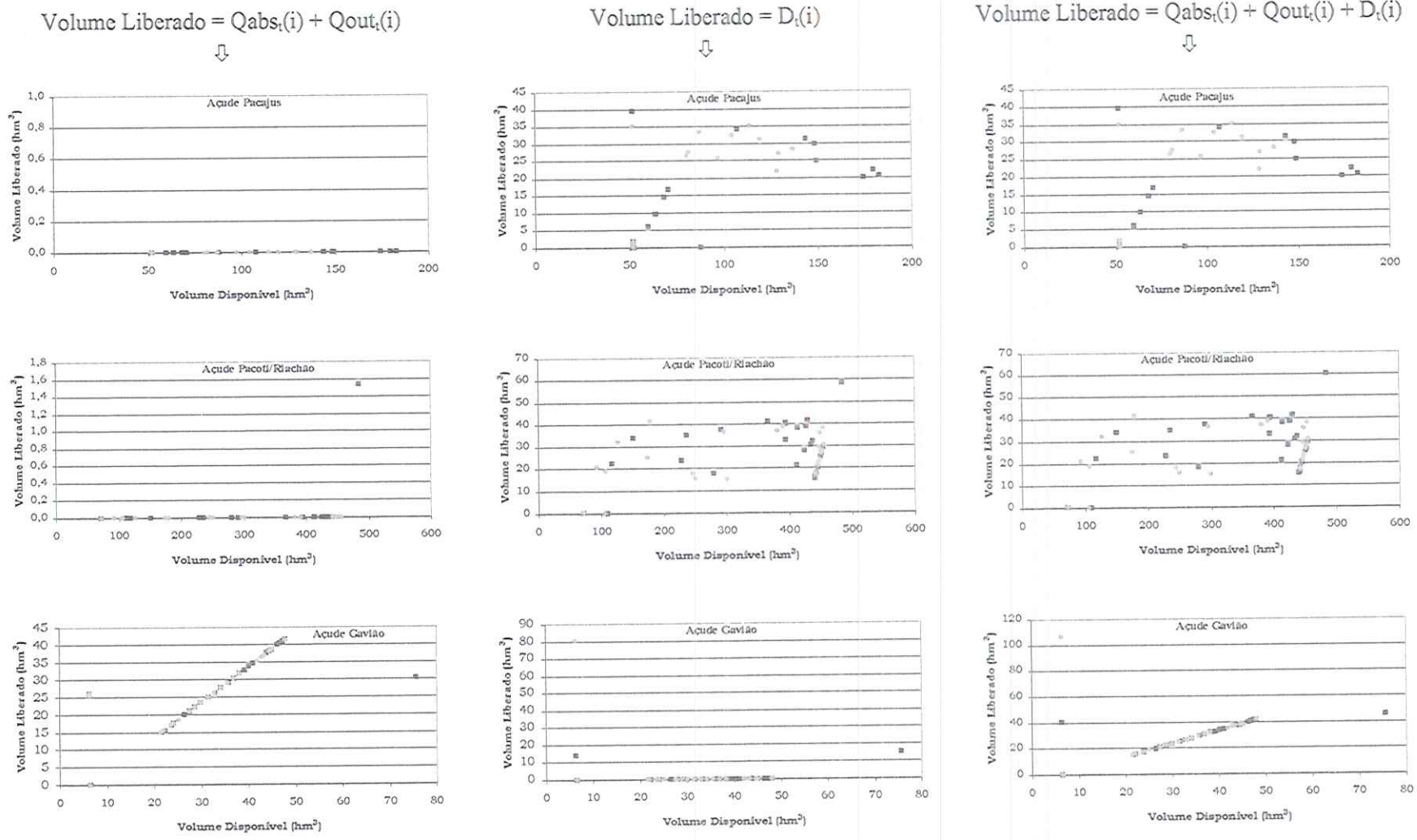


Figura 7.48 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de janeiro para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ● Situação 3)

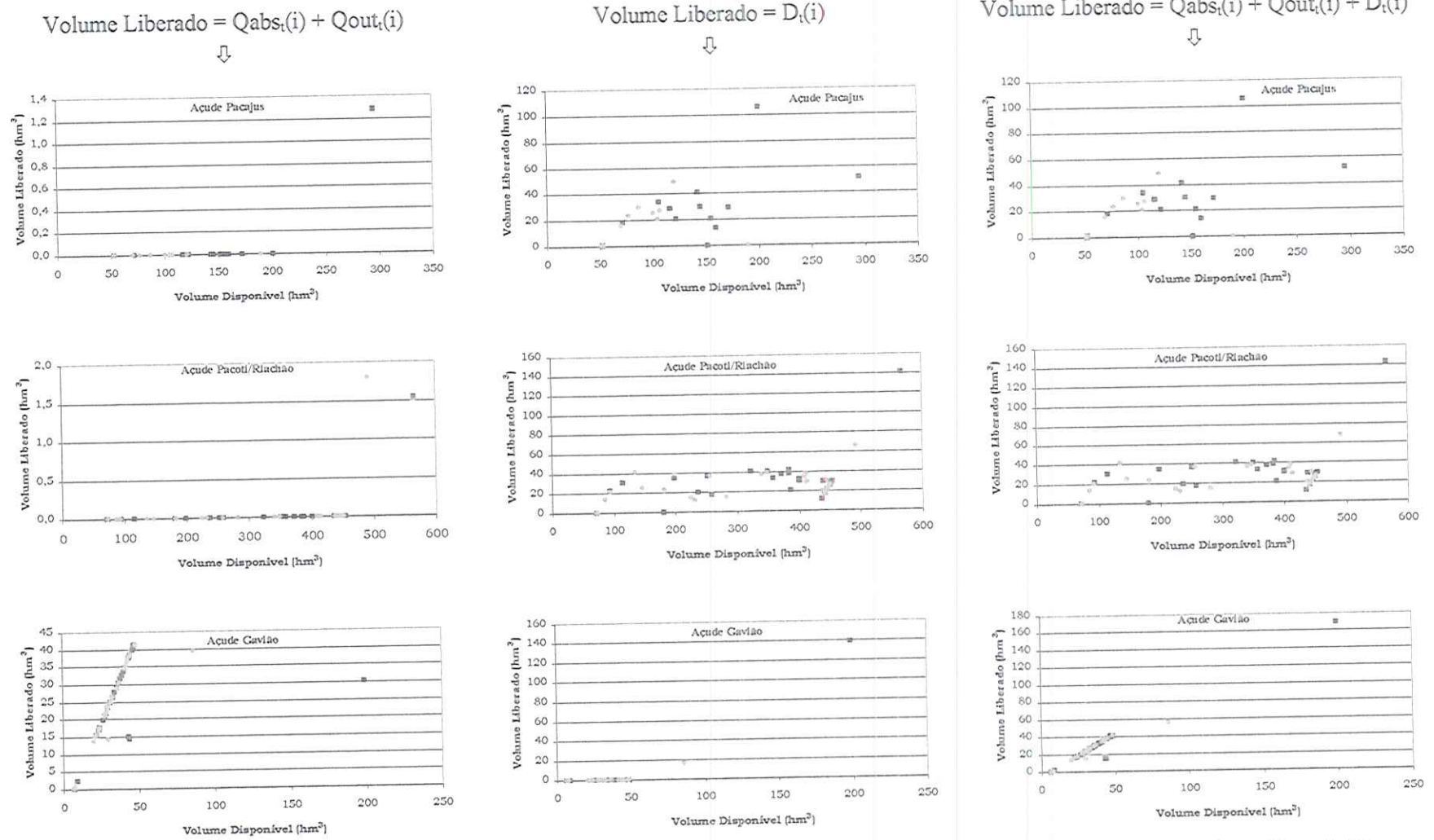


Figura 7.49 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de fevereiro para os três reservatórios (♦ Situação 1 - • Situação 3)

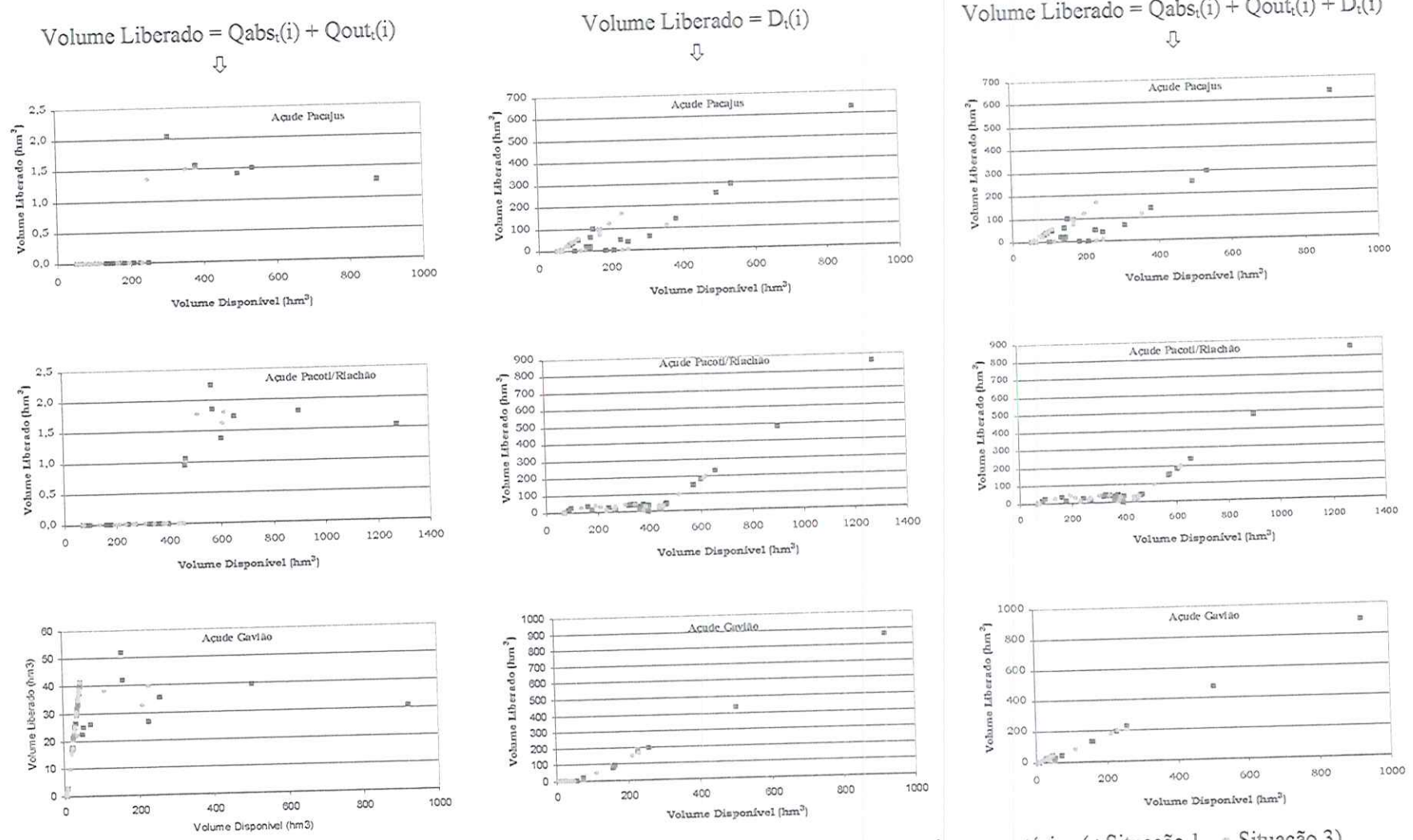


Figura 7.50 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de março para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ■ Situação 3)

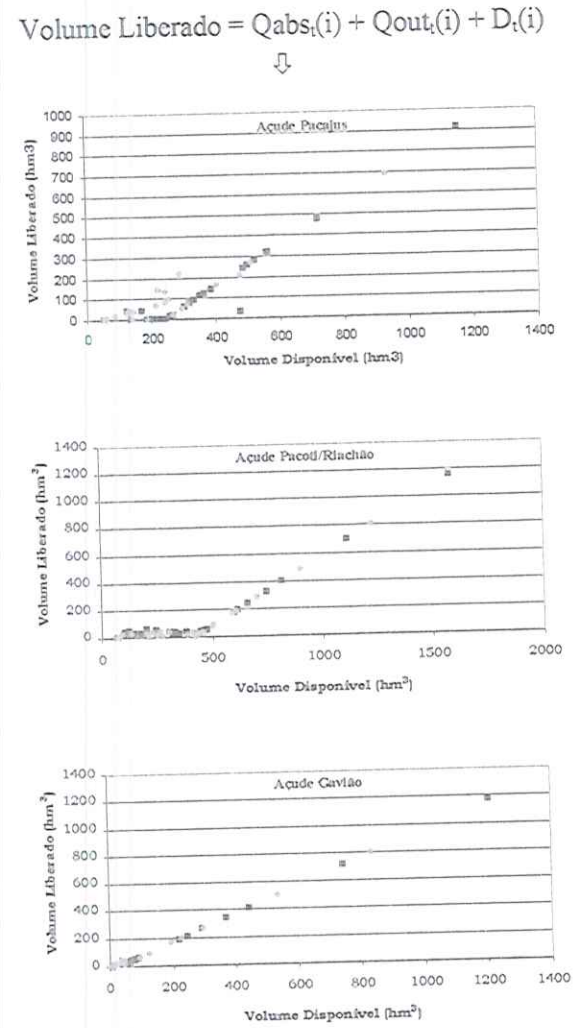
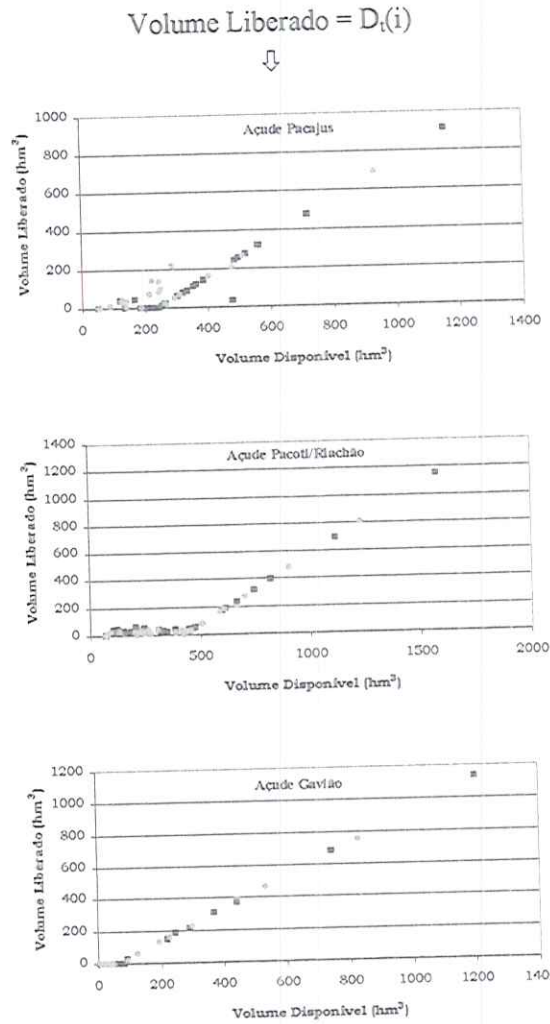
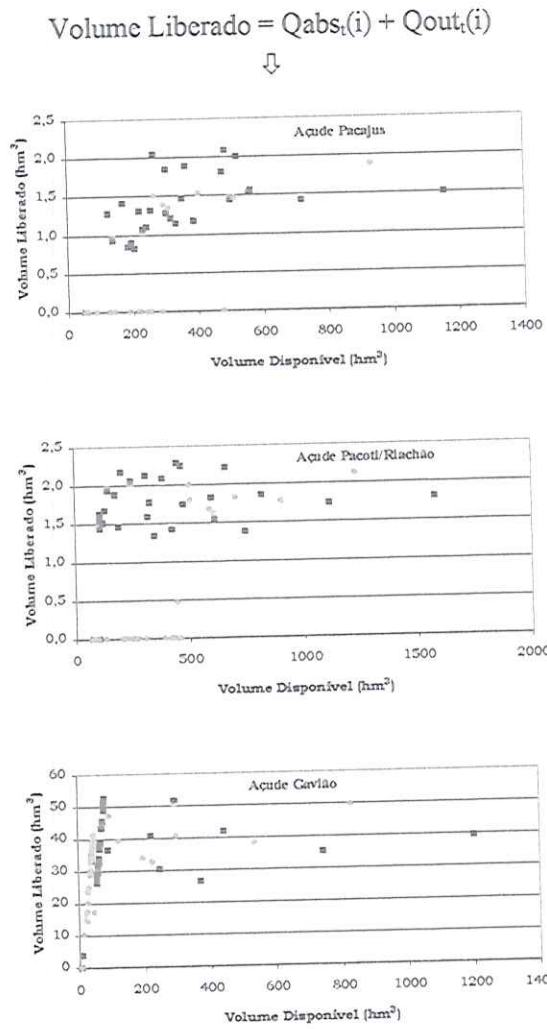


Figura 7.51 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de abril para os três reservatórios (♦ Situação 1 - • Situação 3)

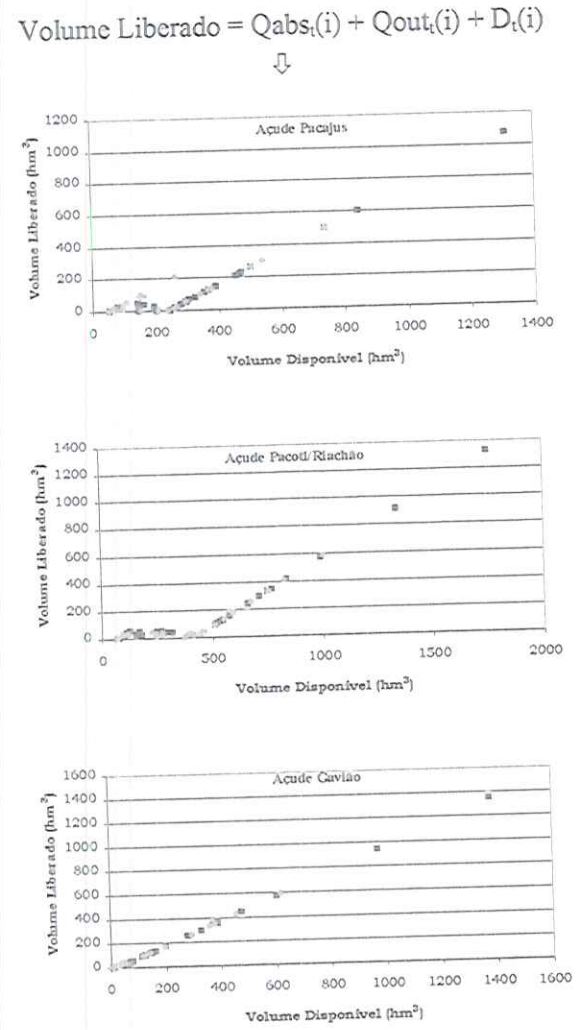
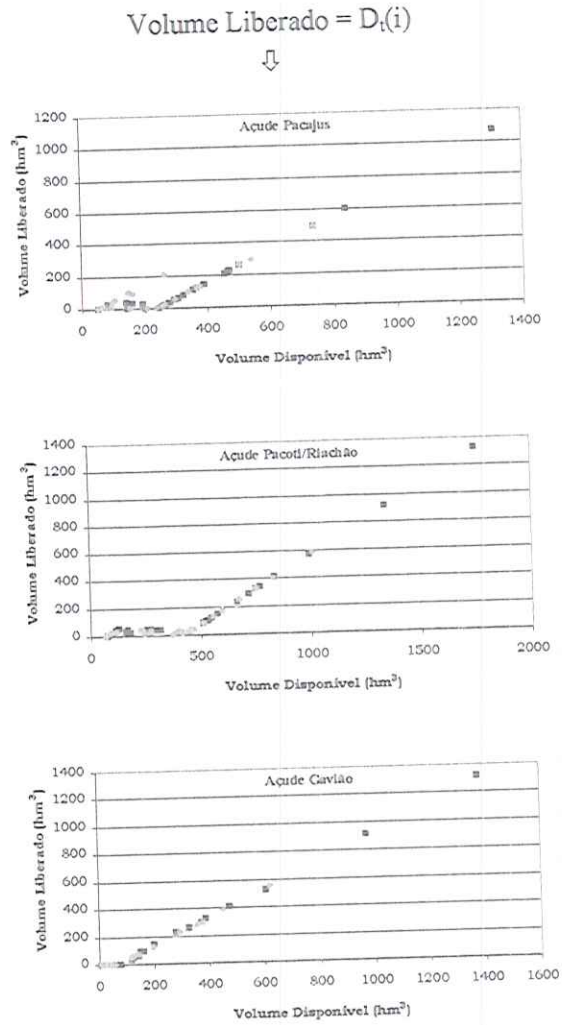
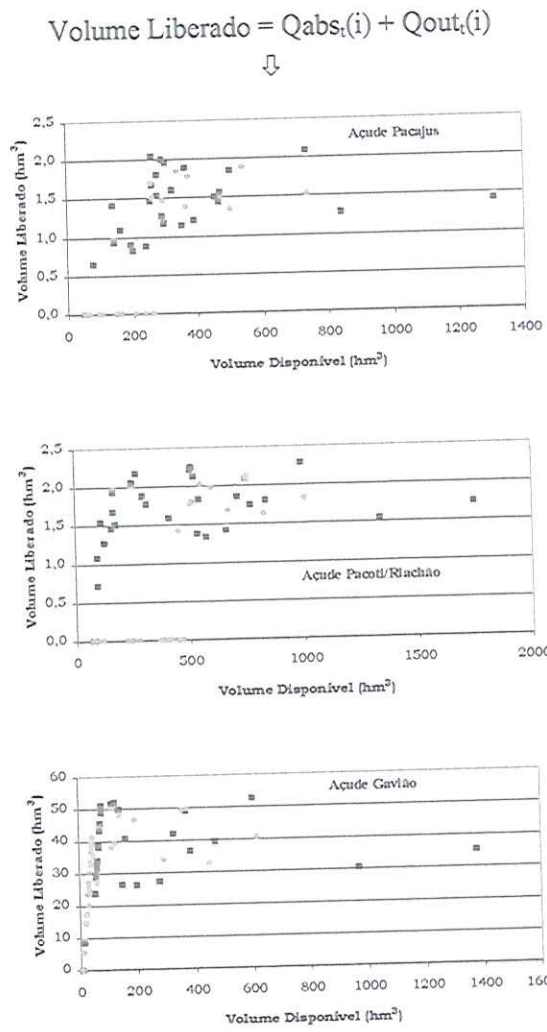
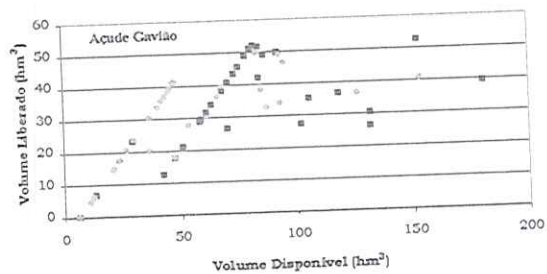
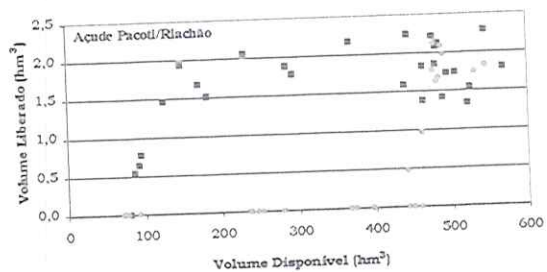
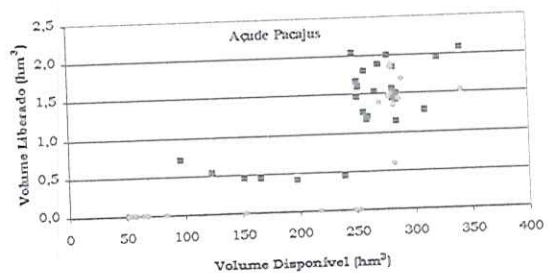
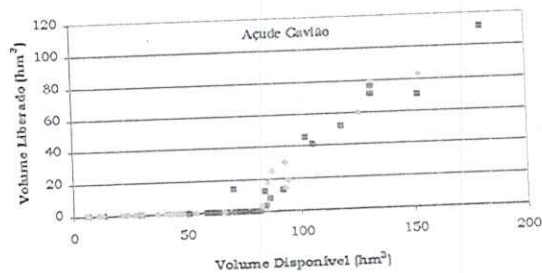
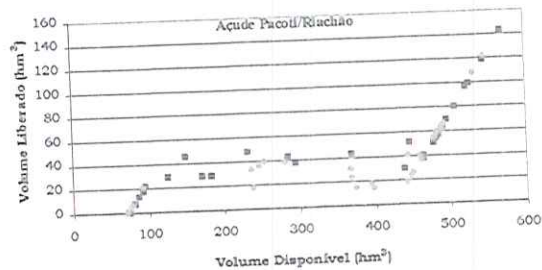
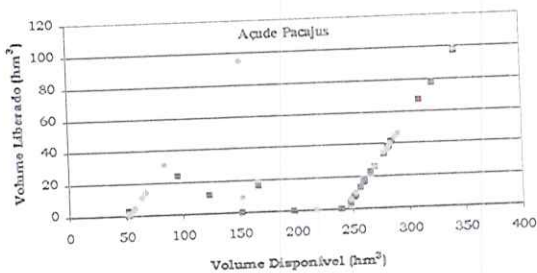


Figura 7.52 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de maio para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ● Situação 3)

$$\text{Volume Liberado} = Q_{\text{abs},(i)} + Q_{\text{out},(i)}$$



$$\text{Volume Liberado} = D_i(i)$$



$$\text{Volume Liberado} = Q_{\text{abs},(i)} + Q_{\text{out},(i)} + D_i(i)$$

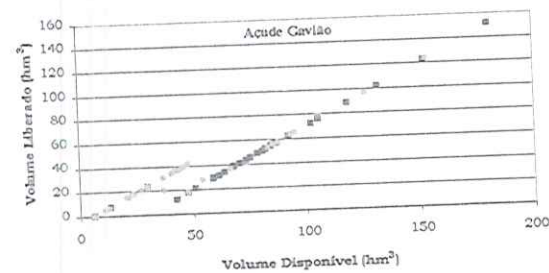
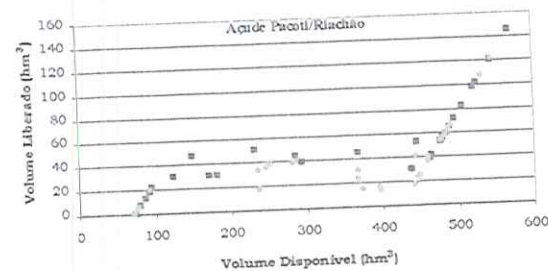
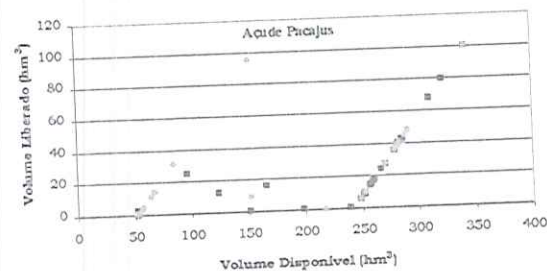


Figura 7.53 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de junho para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ● Situação 3)

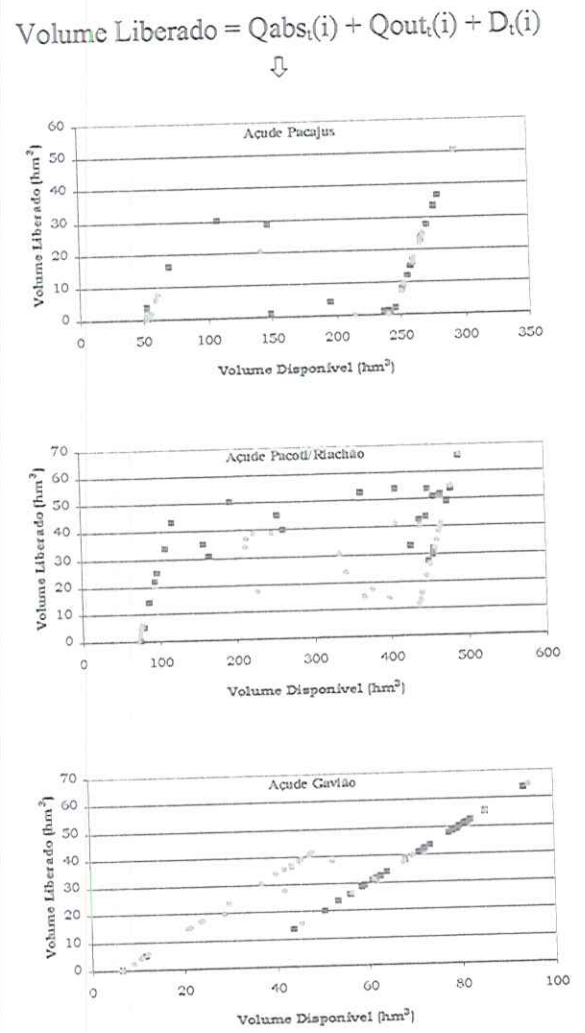
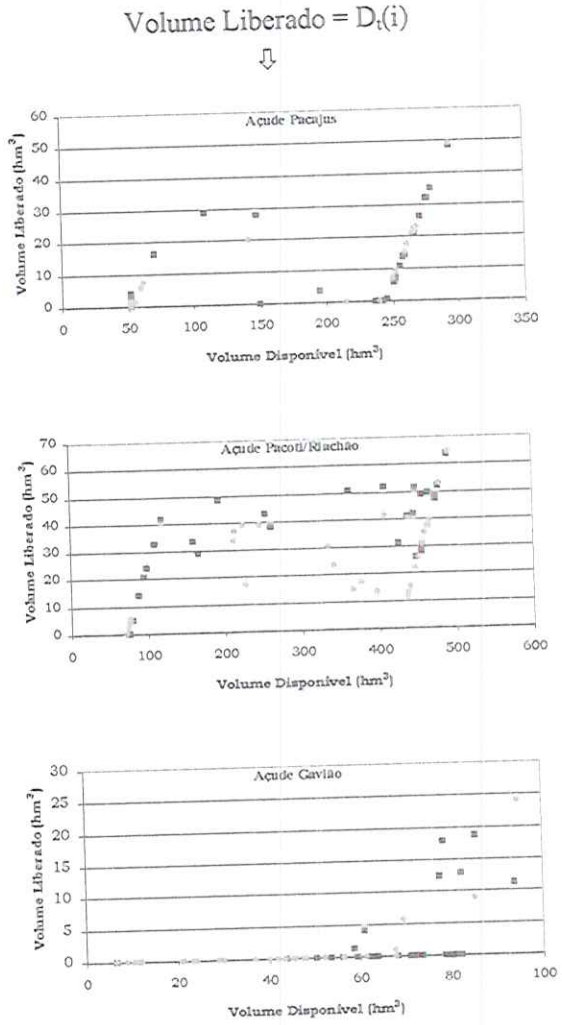
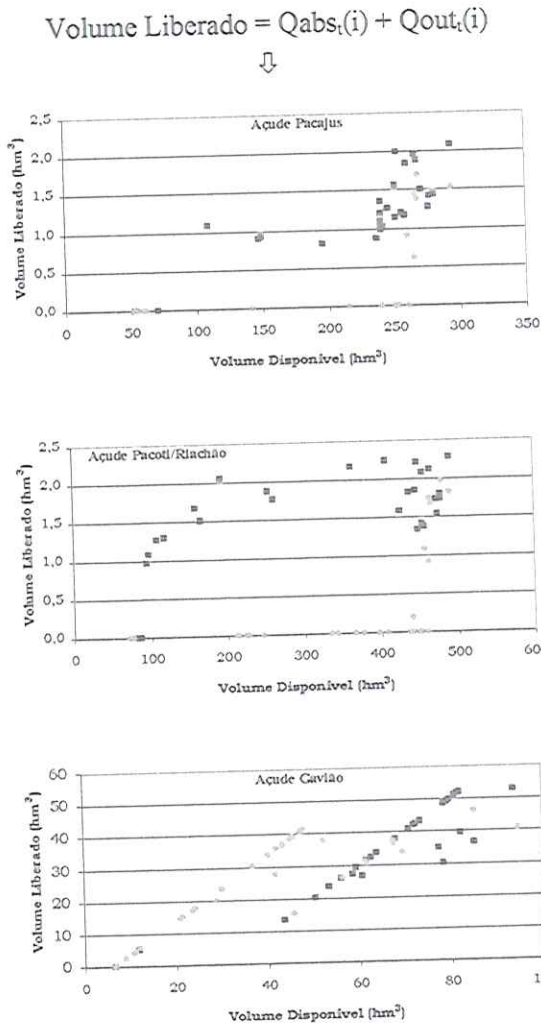
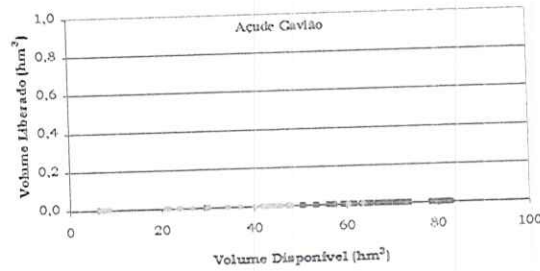
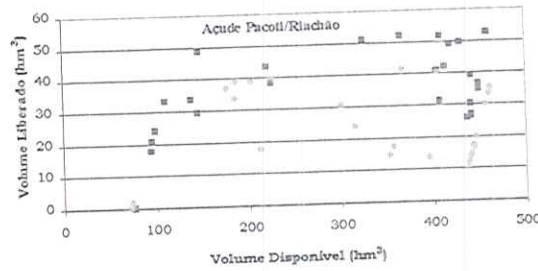
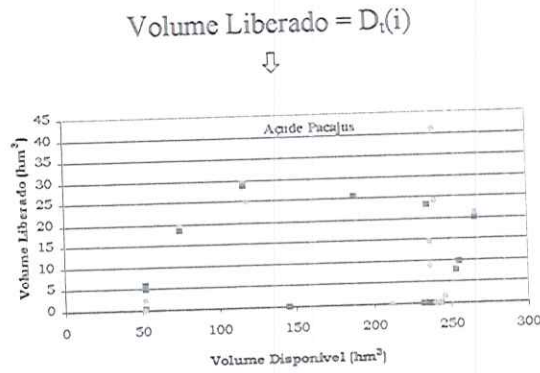
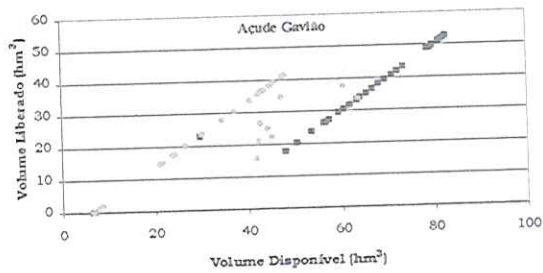
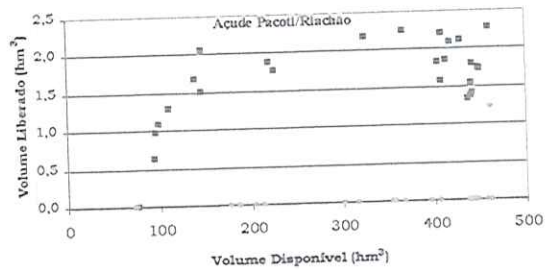
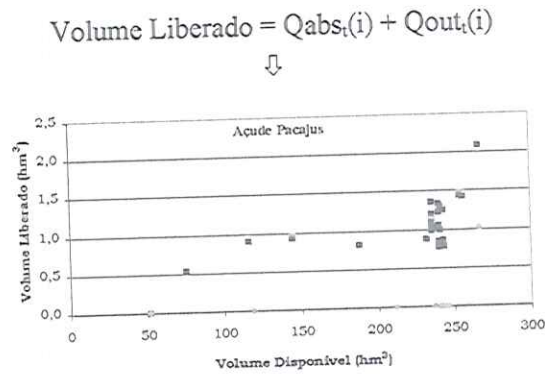


Figura 7.54 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de julho para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ● Situação 3)



Volume Liberado = $Q_{abs,i} + Q_{out,i} + D_i(i)$

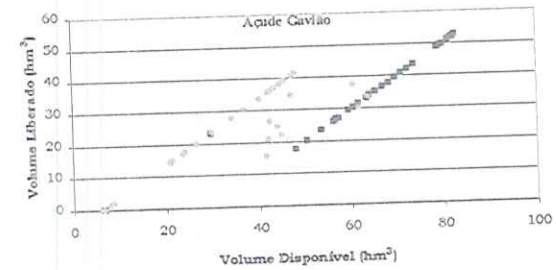
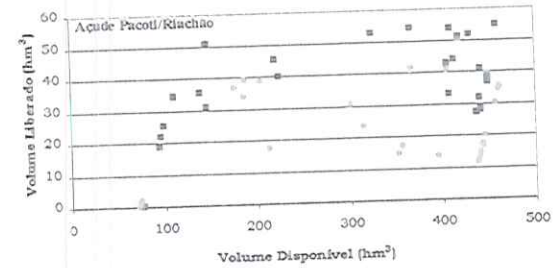
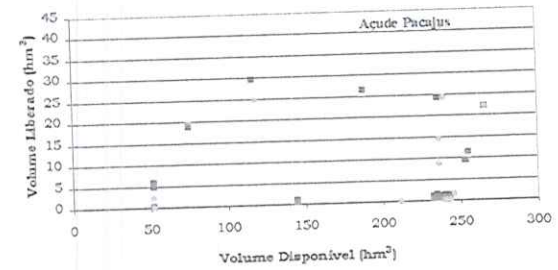


Figura 7.55 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de agosto para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ● Situação 3)

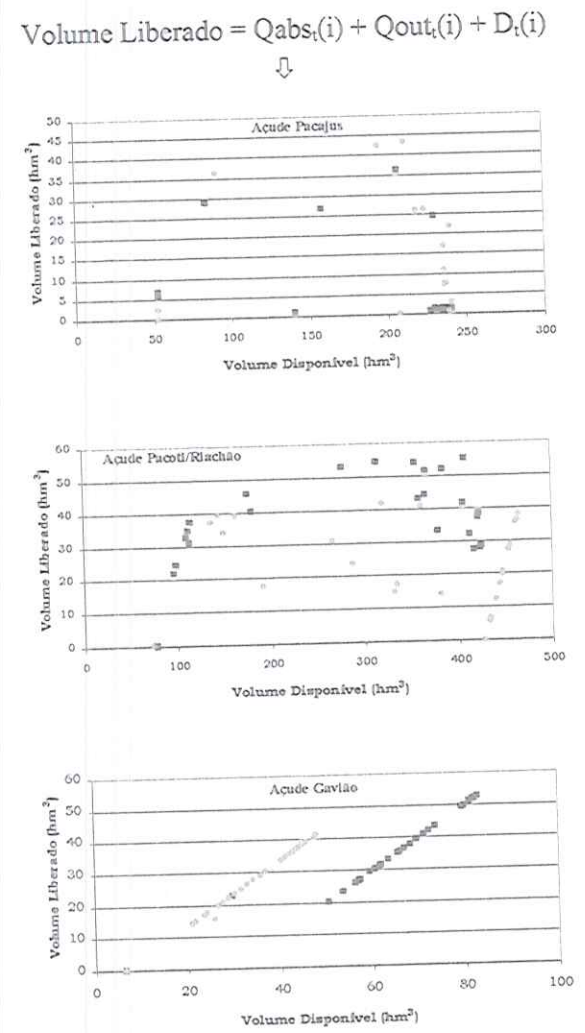
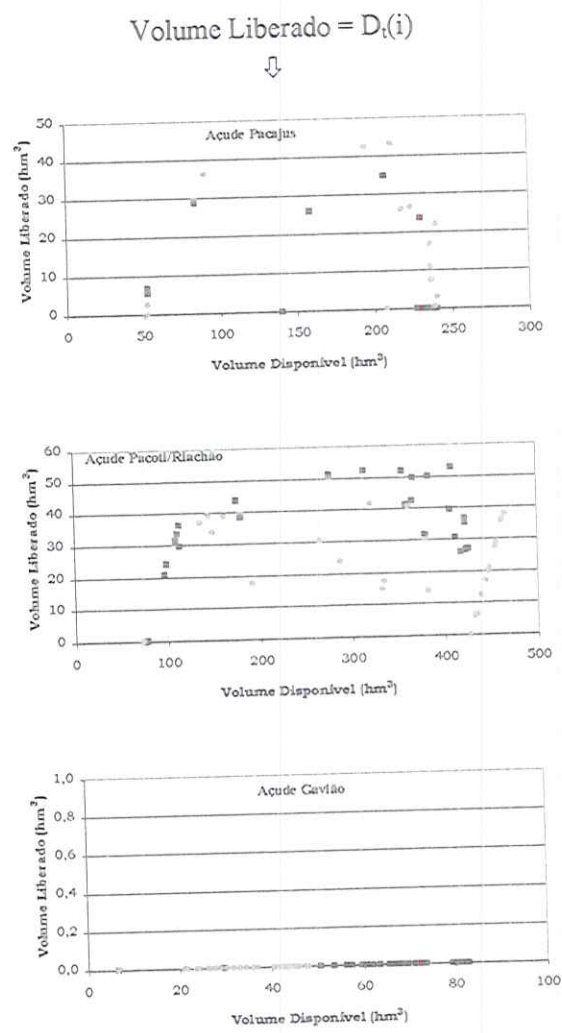
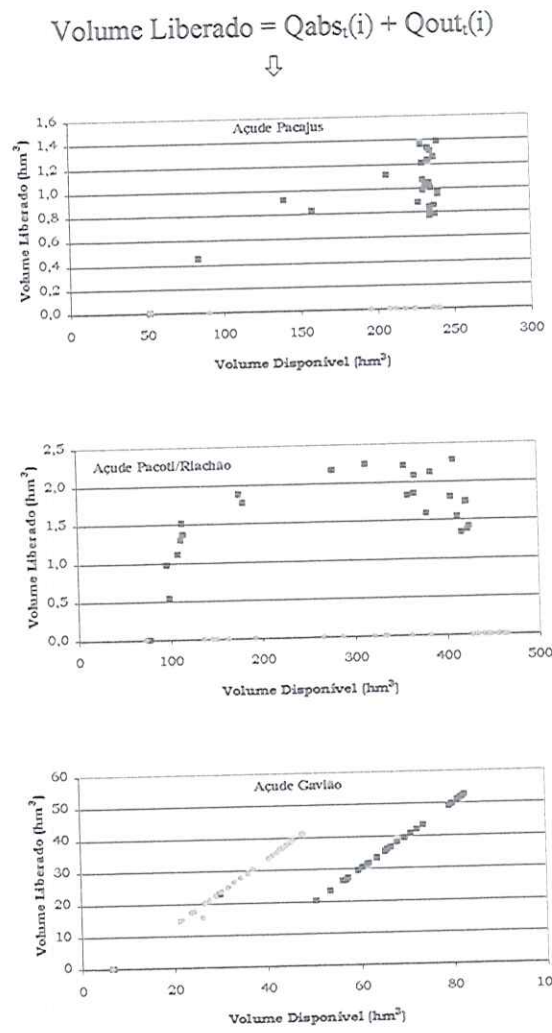


Figura 7.56 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de setembro para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ■ Situação 3)

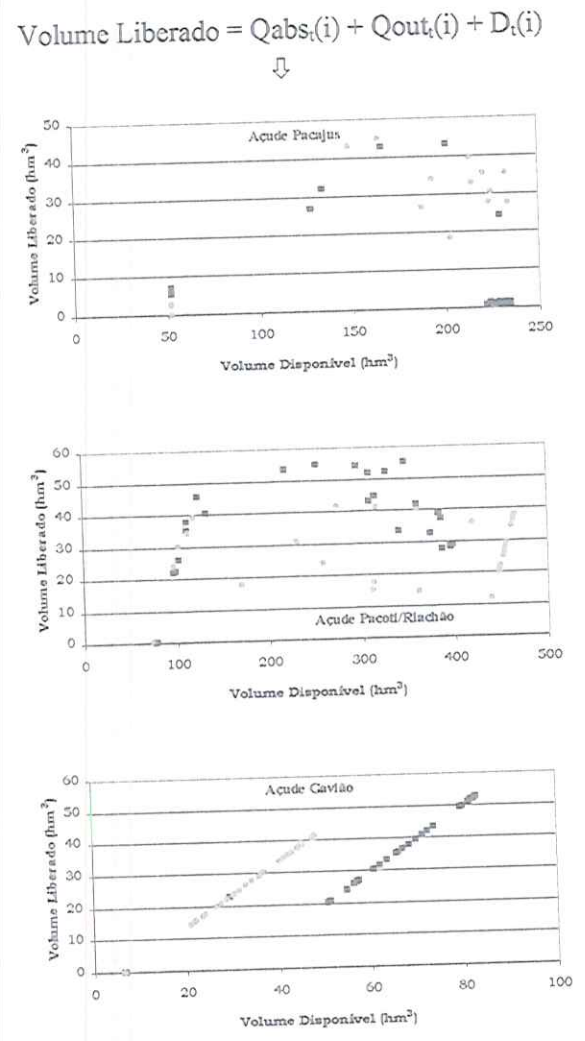
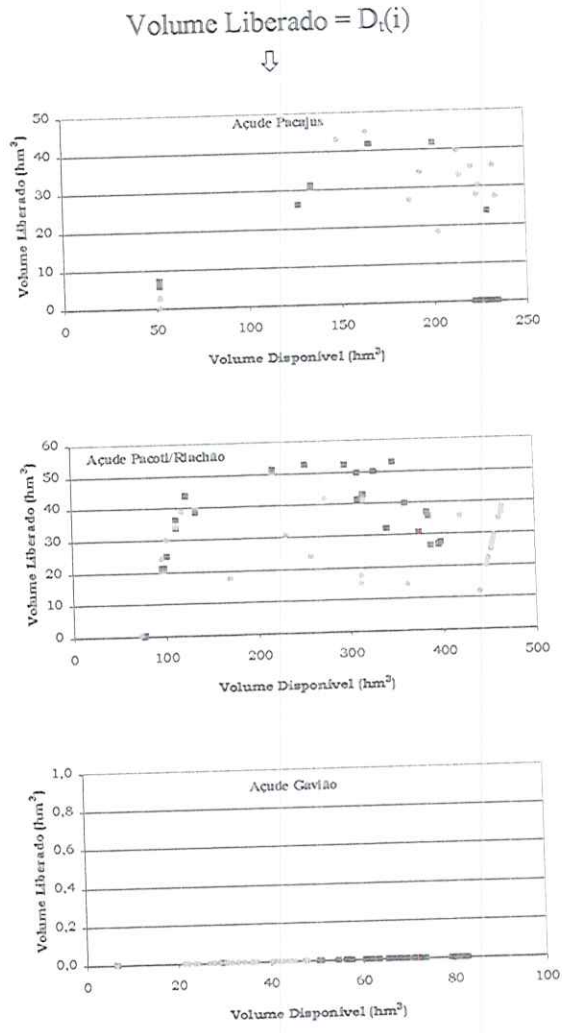
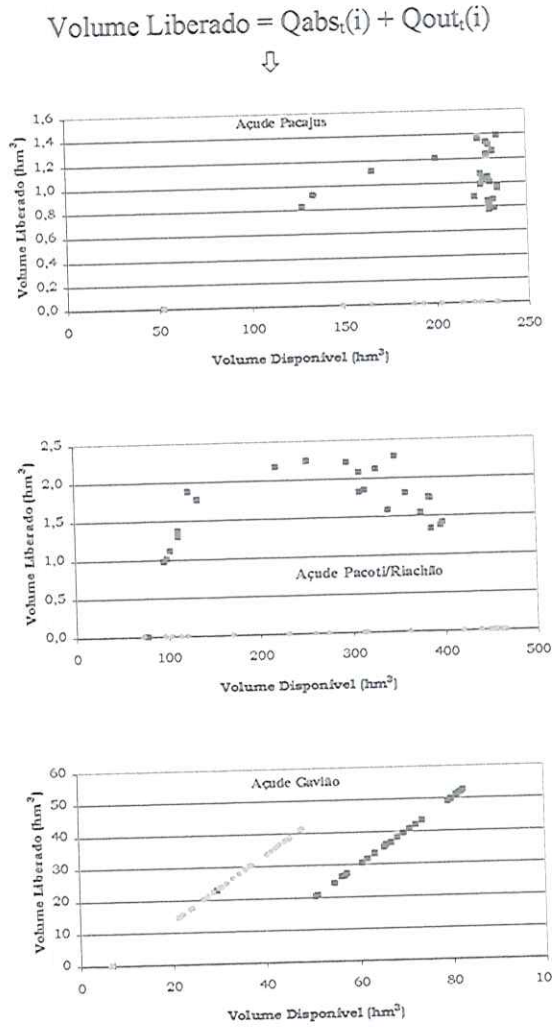


Figura 7.57 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de outubro para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ● Situação 3)

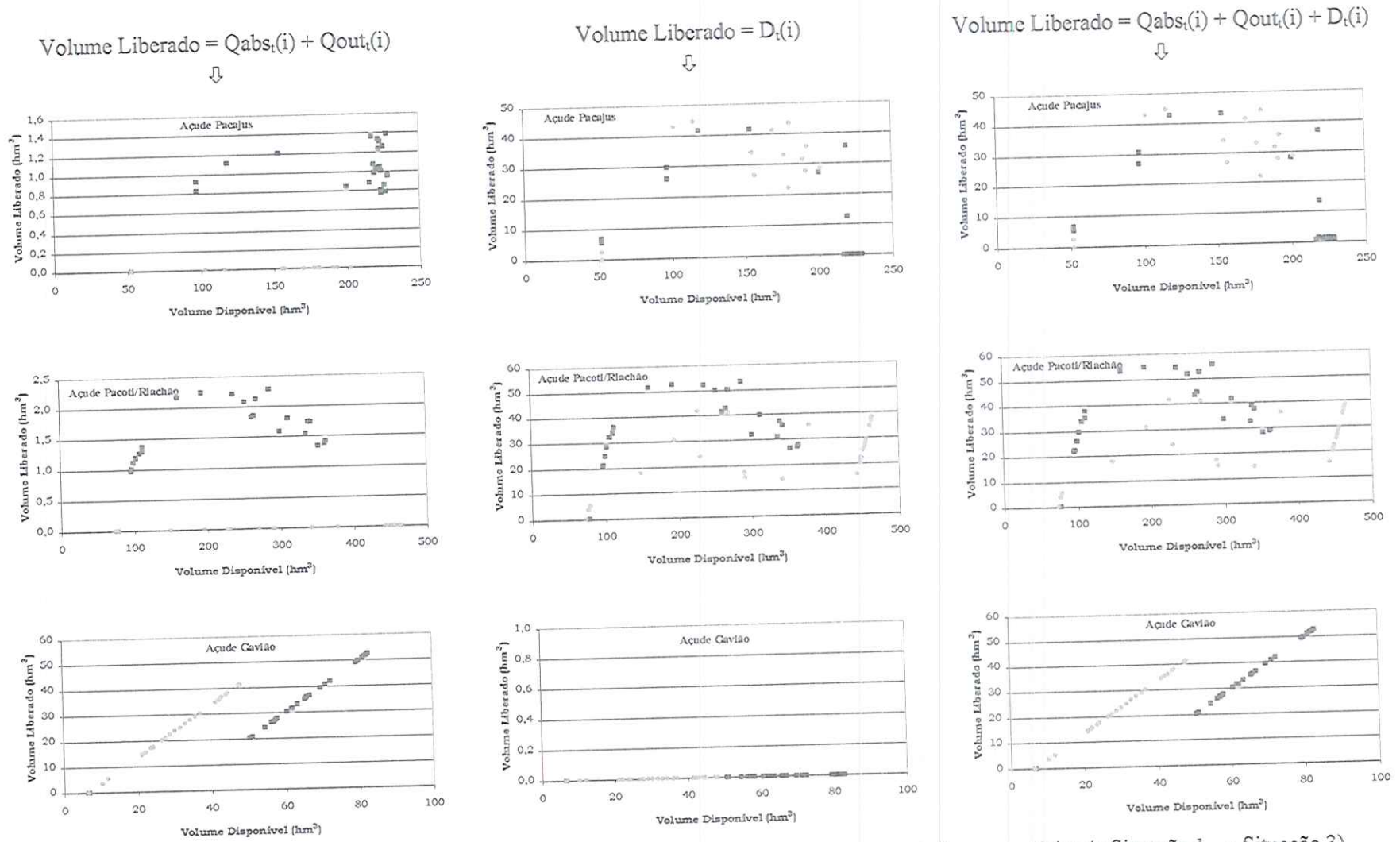


Figura 7.58 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de novembro para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ● Situação 3)

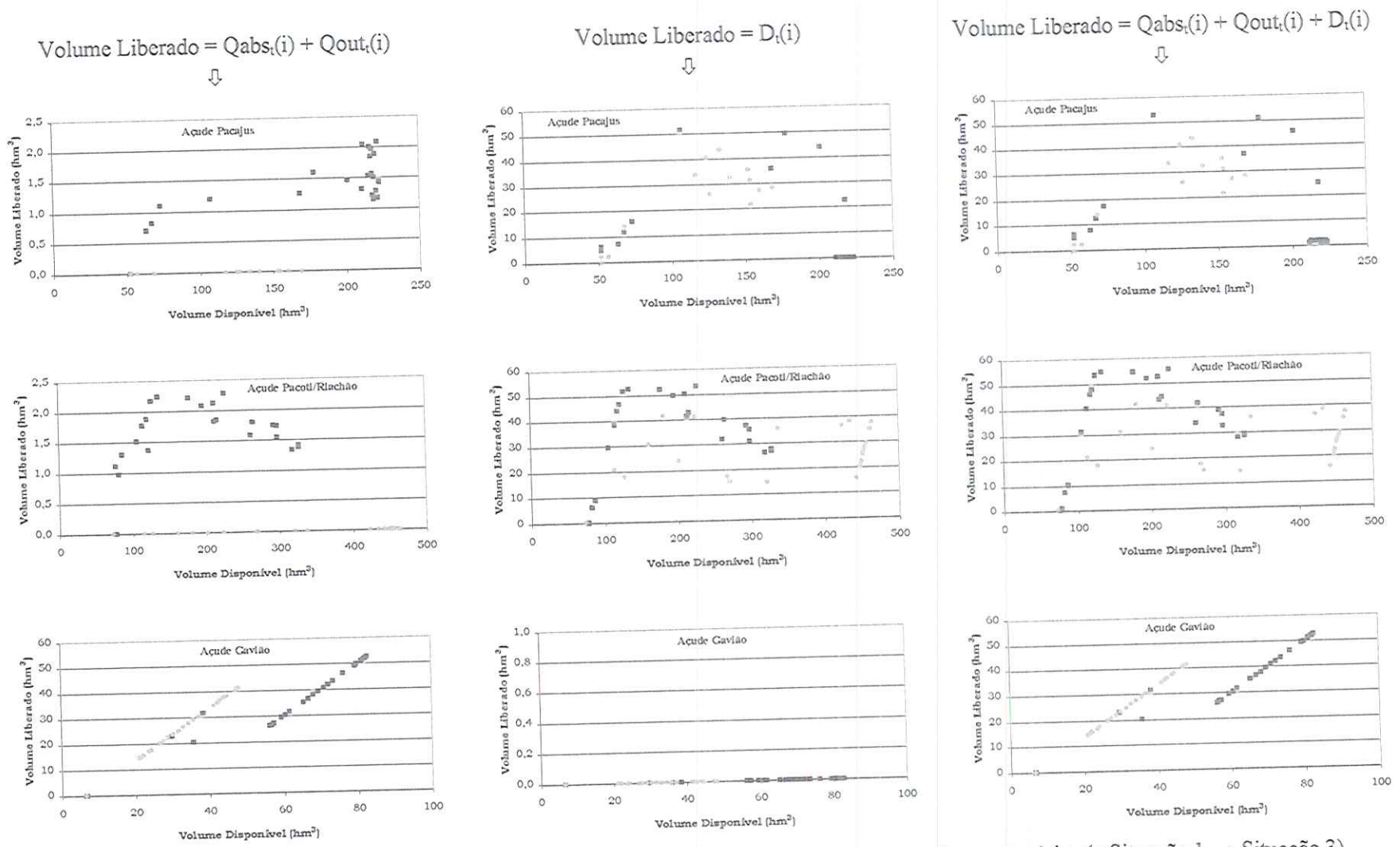


Figura 7.59 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de dezembro para os três reservatórios (◆ Situação 1 - ◻ Situação 3)

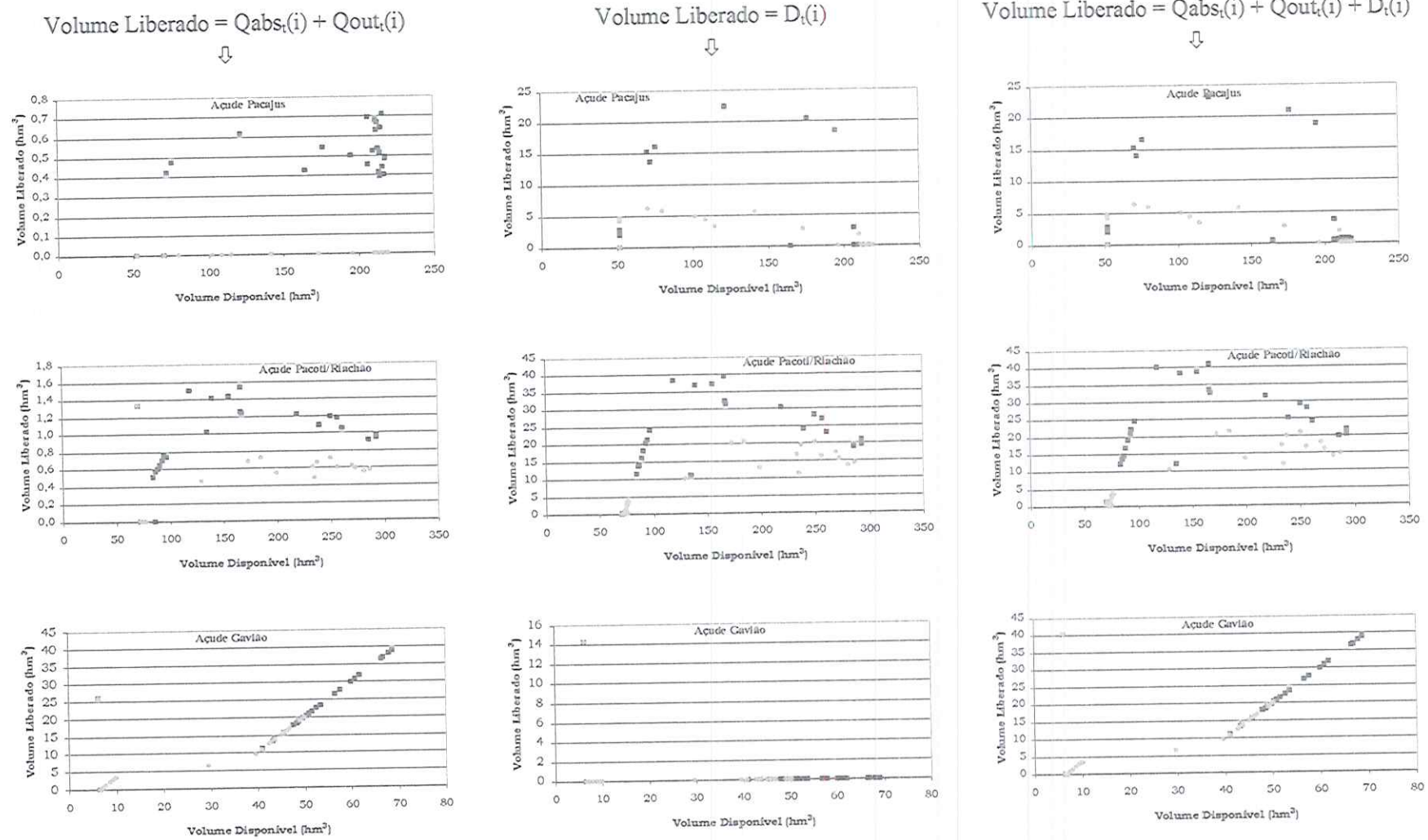


Figura 7.60 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de janeiro para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

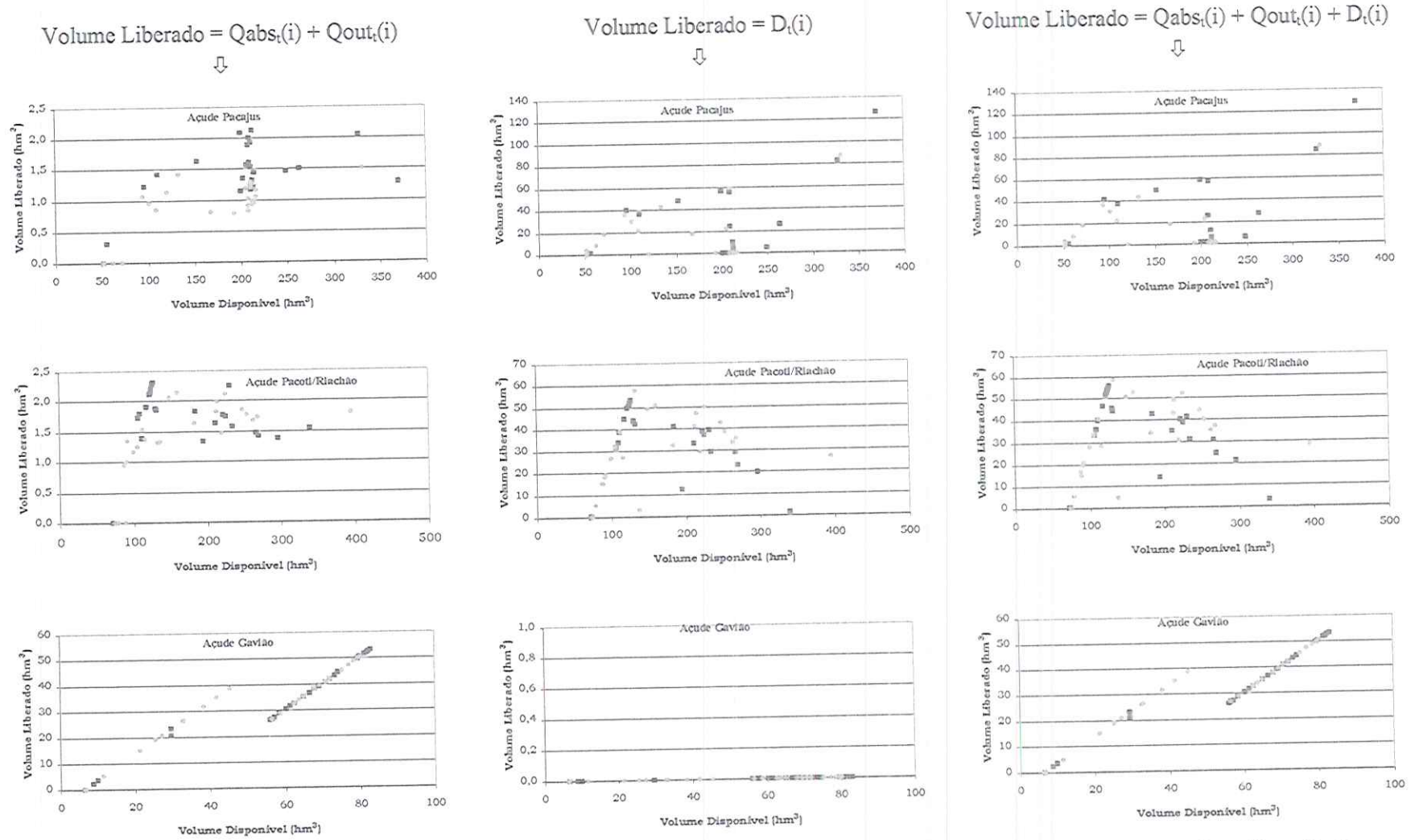


Figura 7.61 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de fevereiro para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

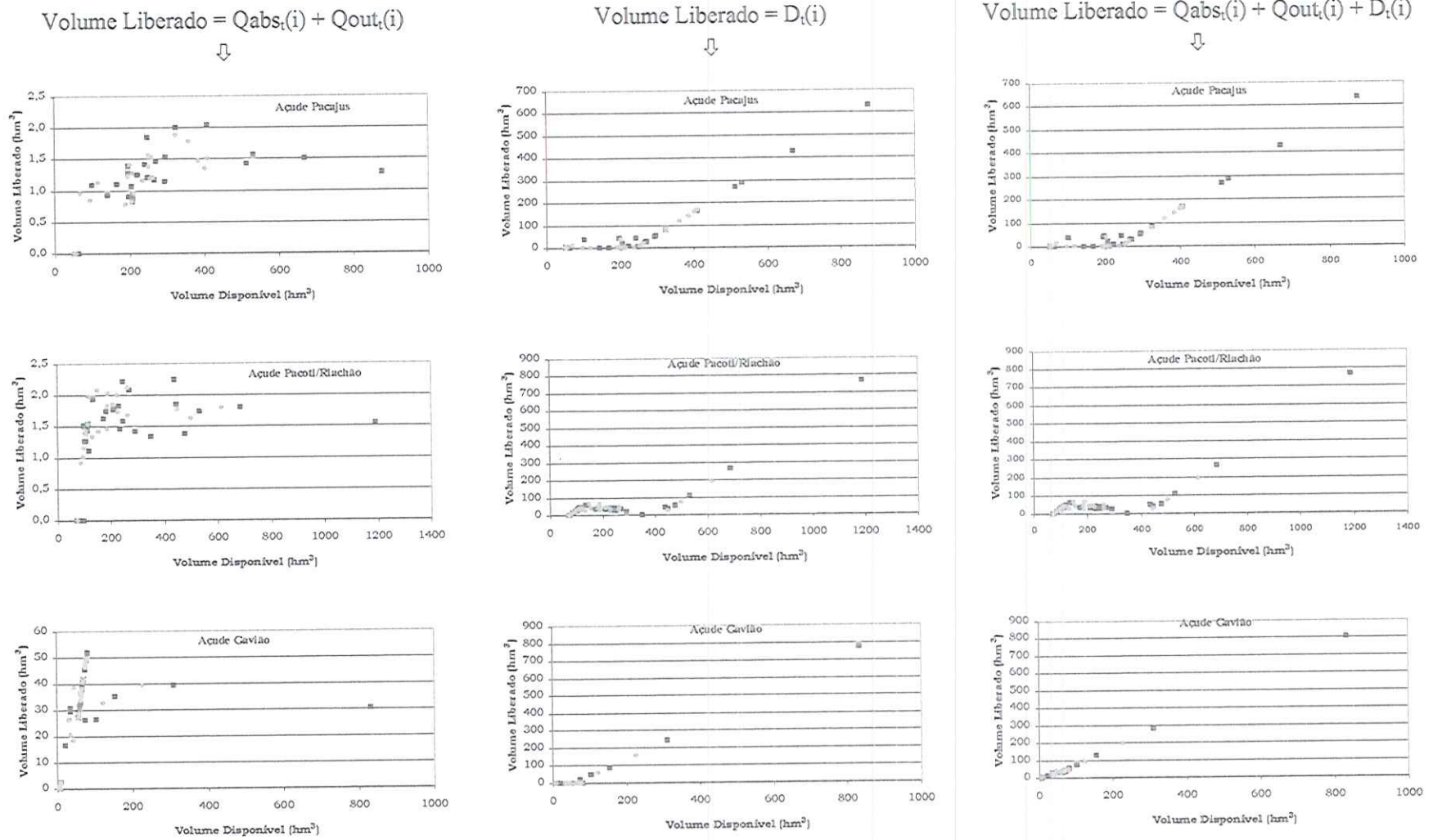


Figura 7.62 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de março para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

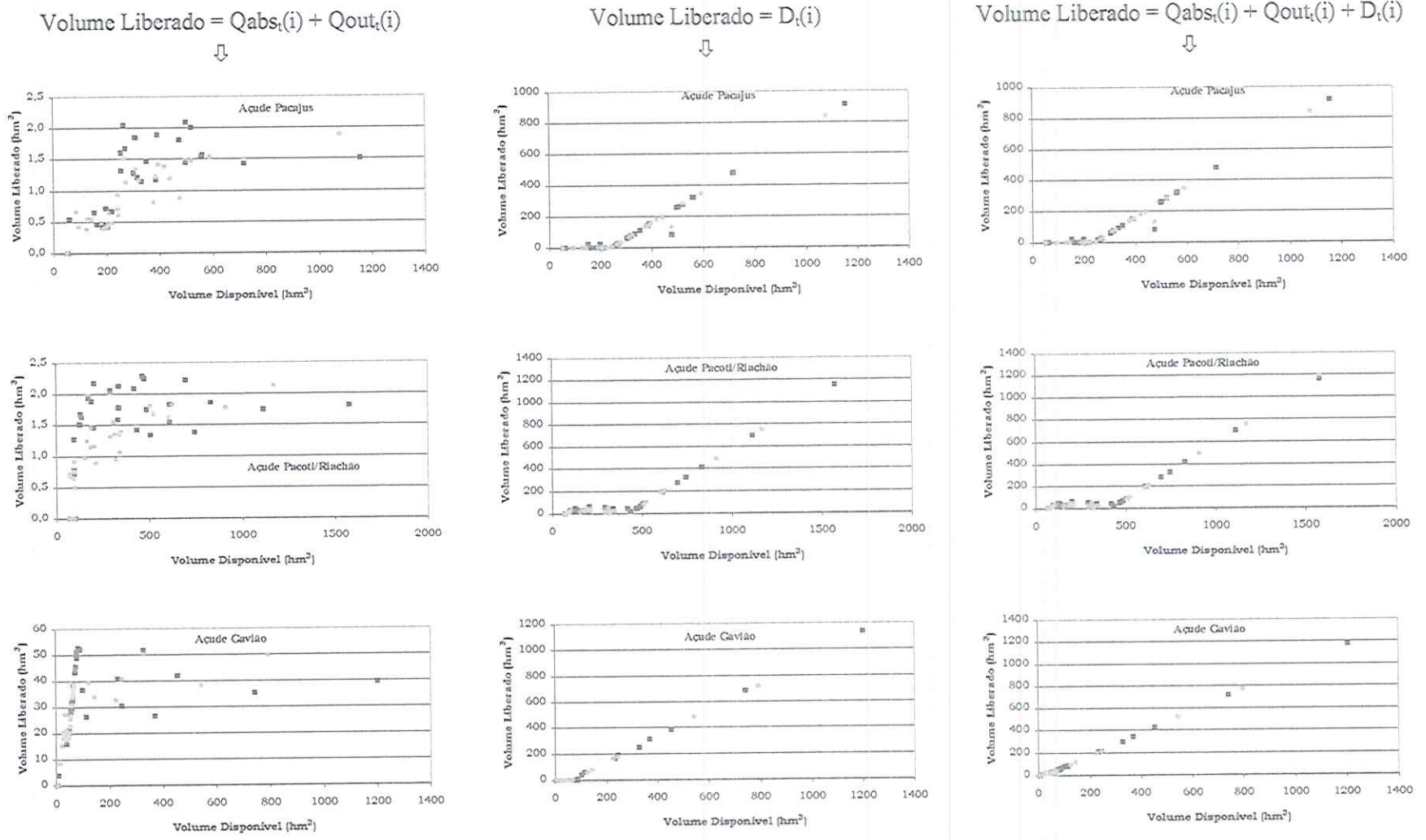


Figura 7.63 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de abril para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

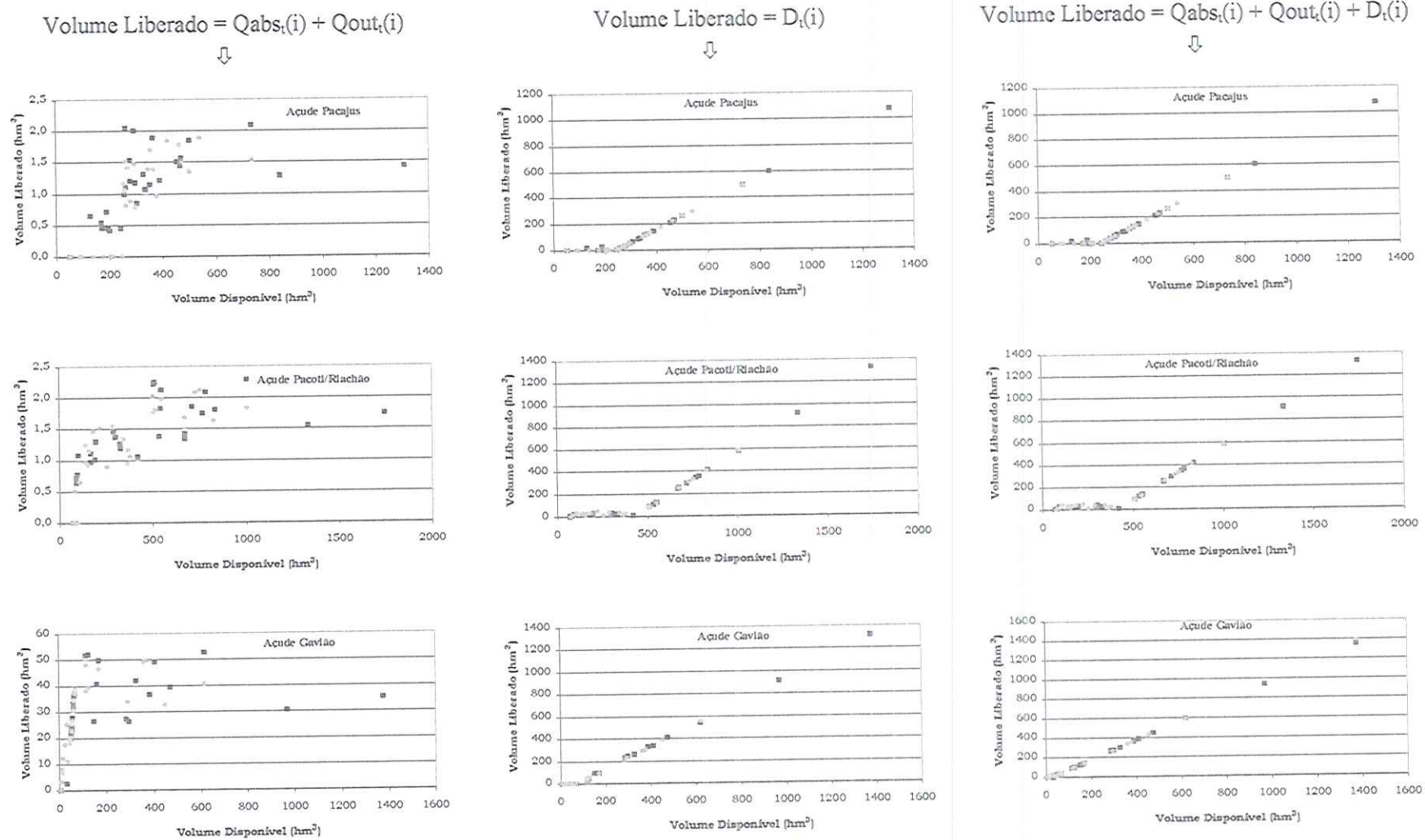


Figura 7.64 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de maio para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

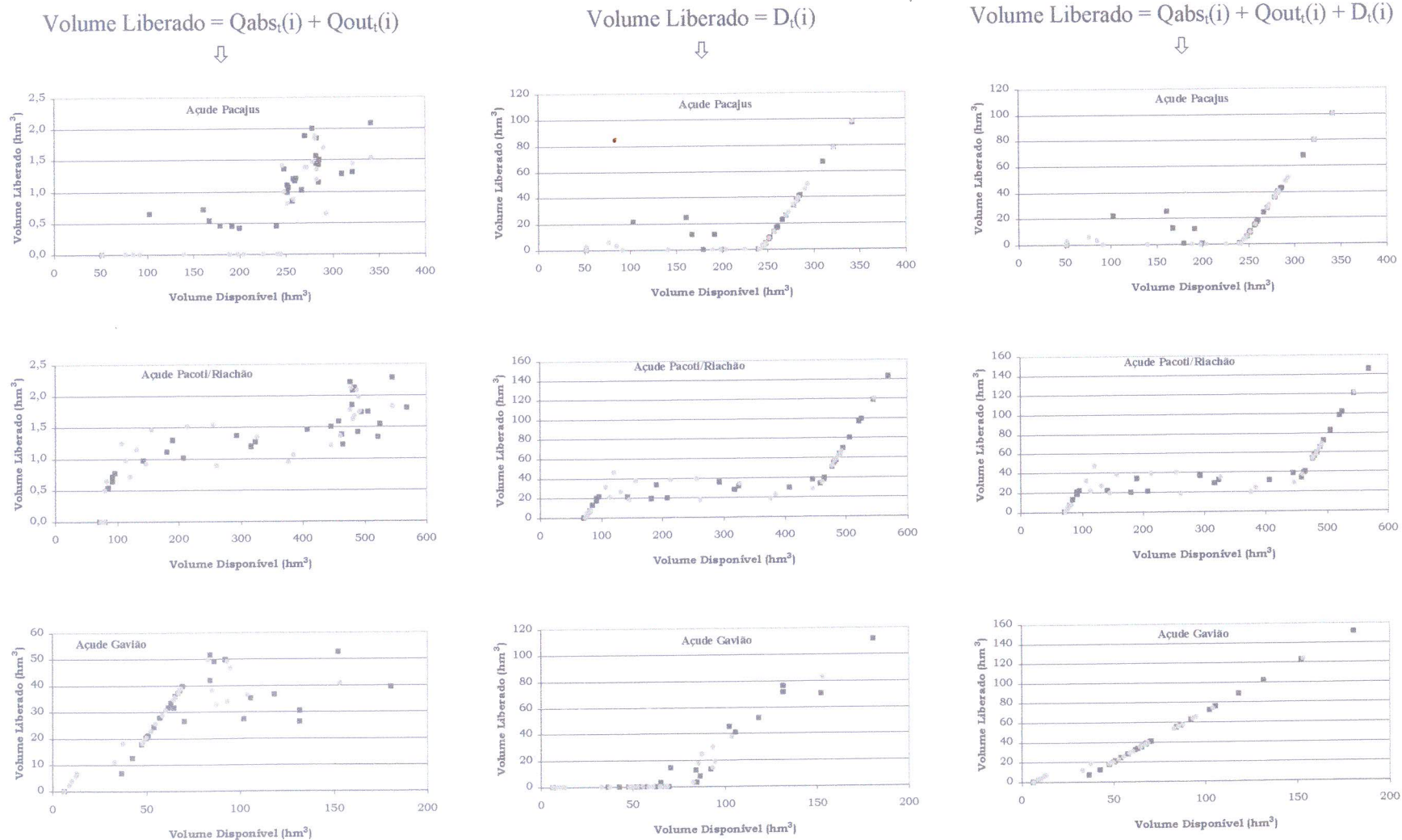


Figura 7.65 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de junho para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ○ Situação 4)

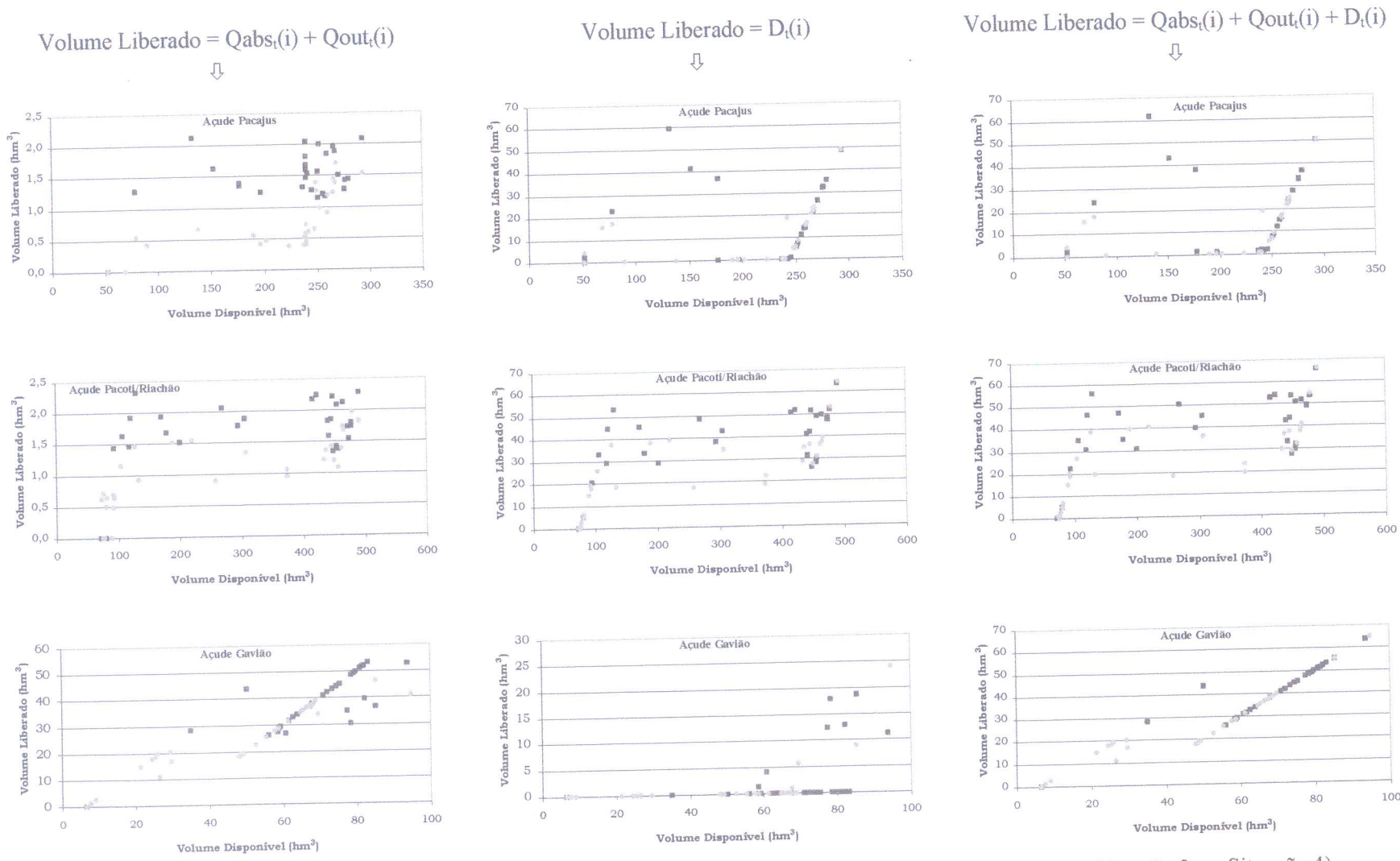


Figura 7.66 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de julho para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ○ Situação 4)

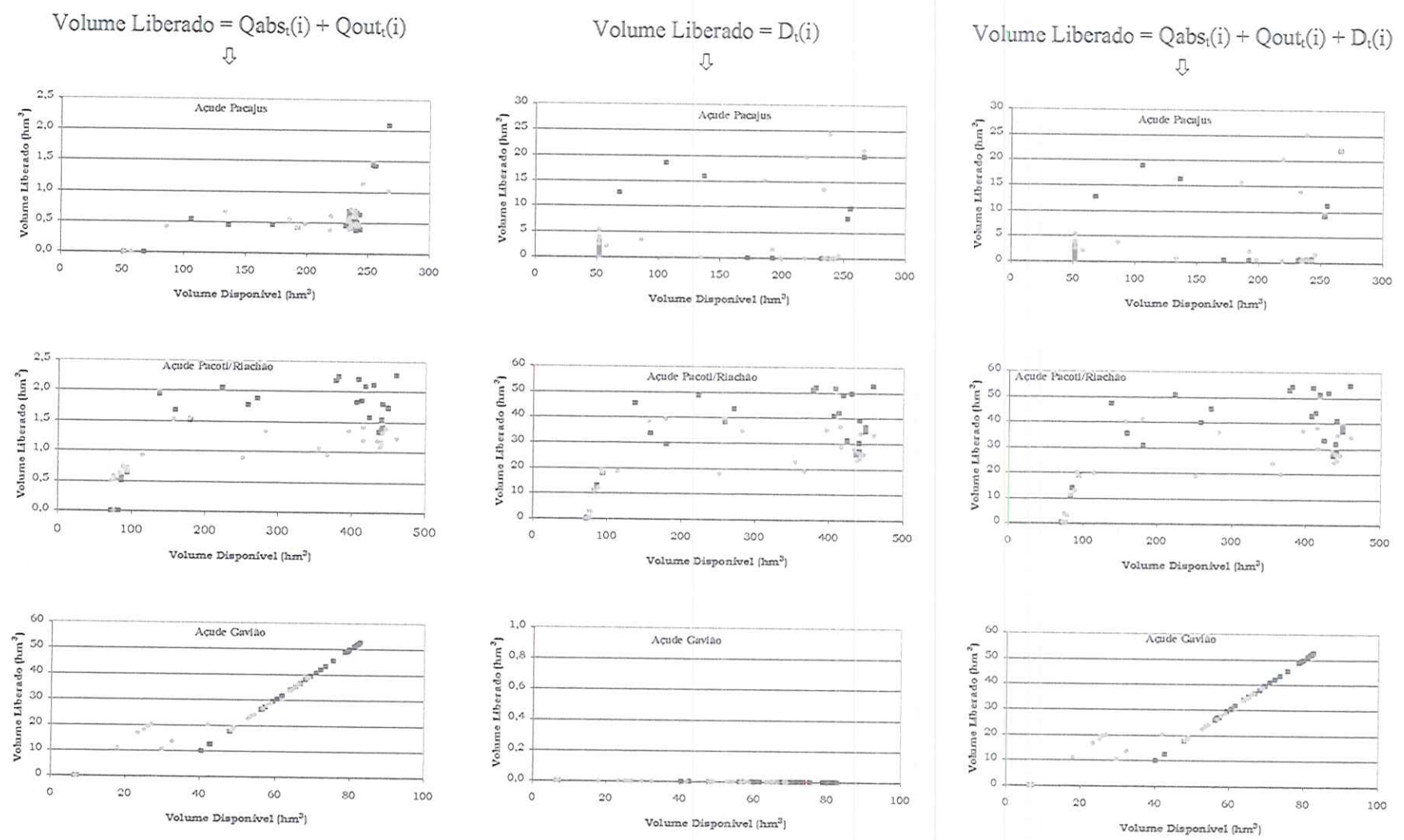


Figura 7.67 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de agosto para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

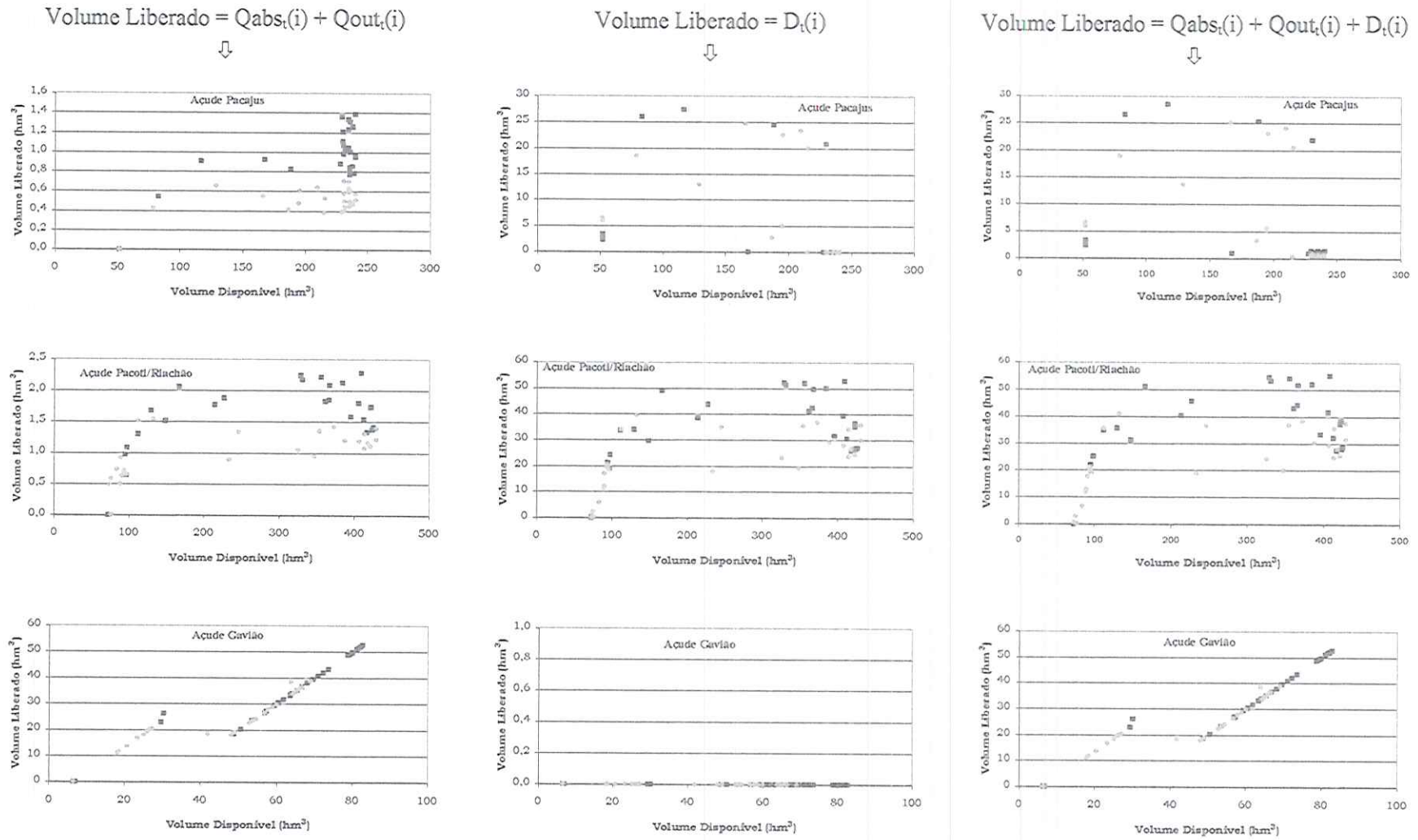


Figura 7.68 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de setembro para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

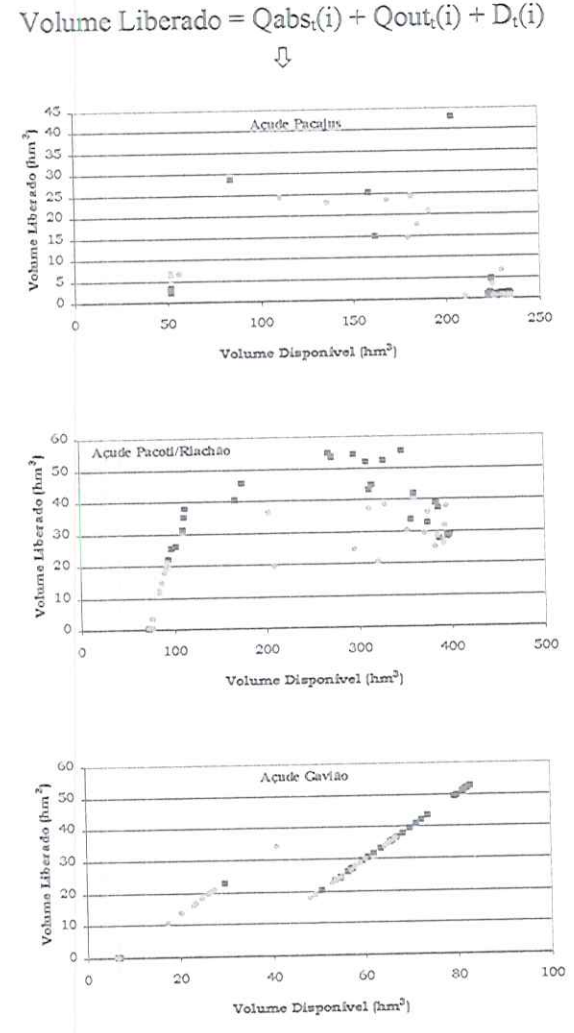
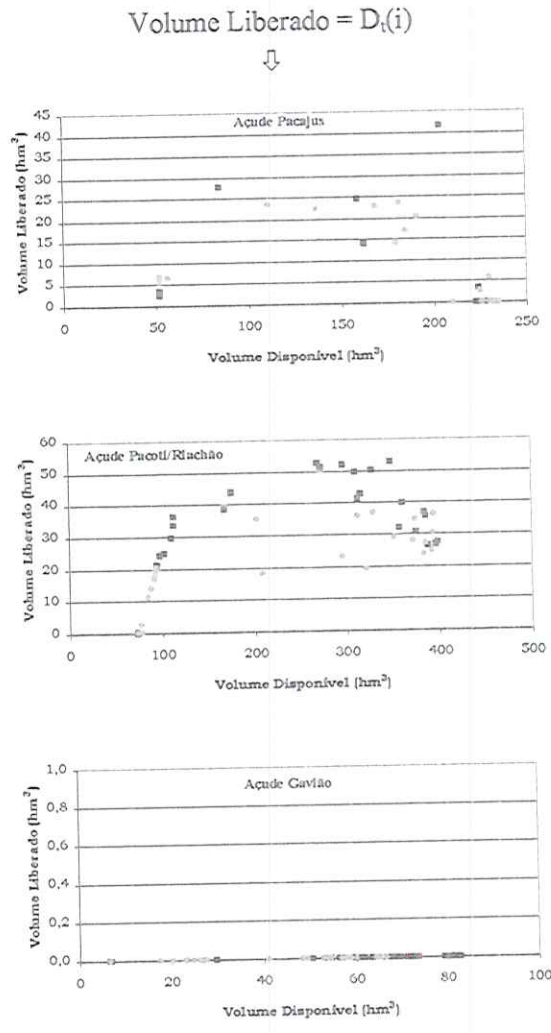
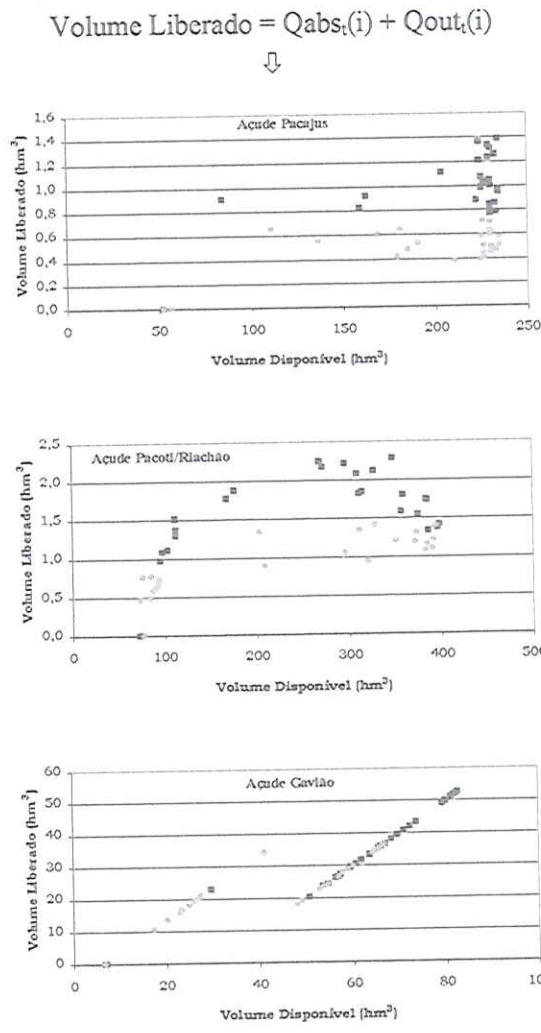


Figura 7.69 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de outubro para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

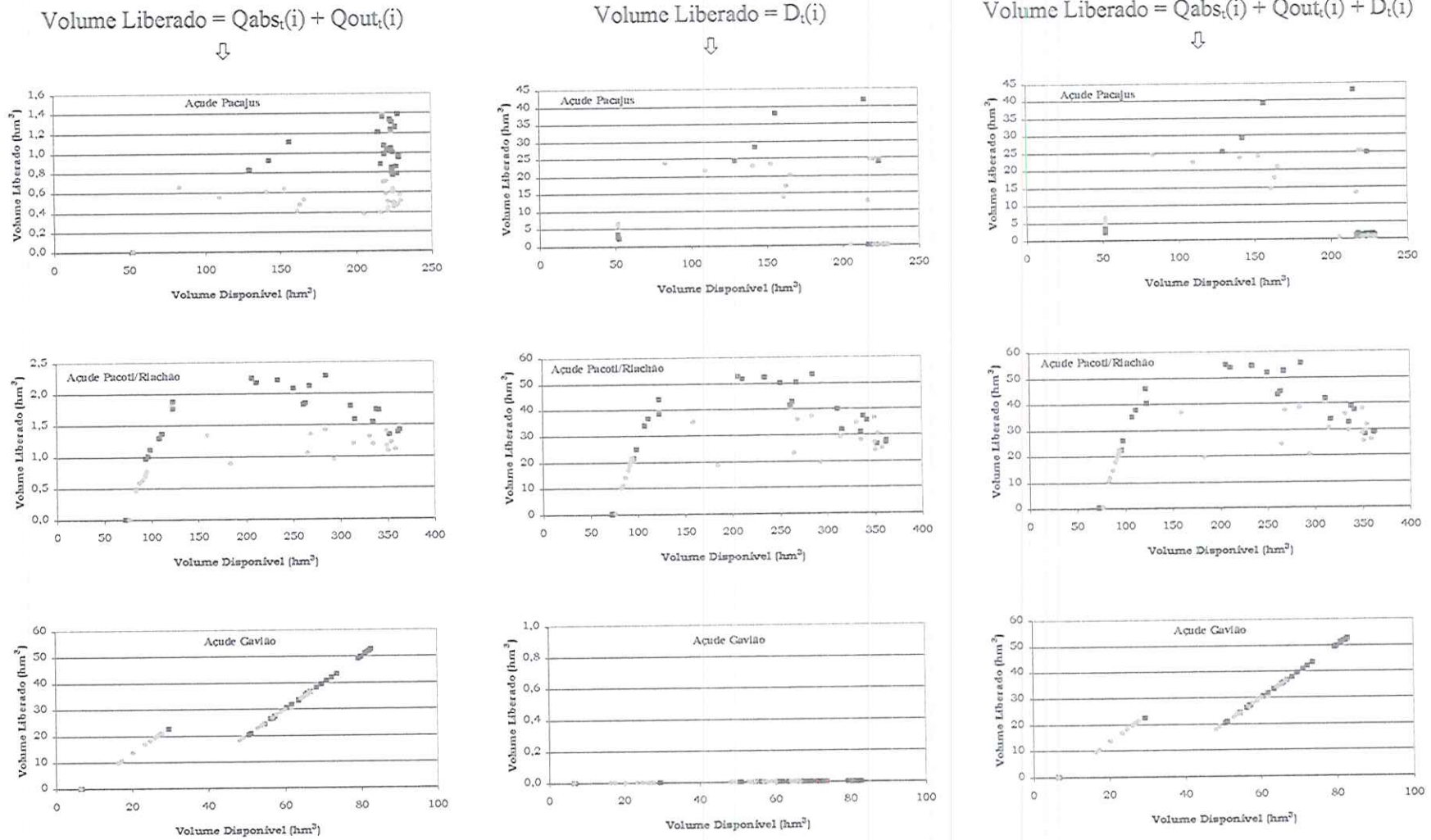


Figura 7.70 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de novembro para os três reservatórios (◆ Situação 2 - ● Situação 4)

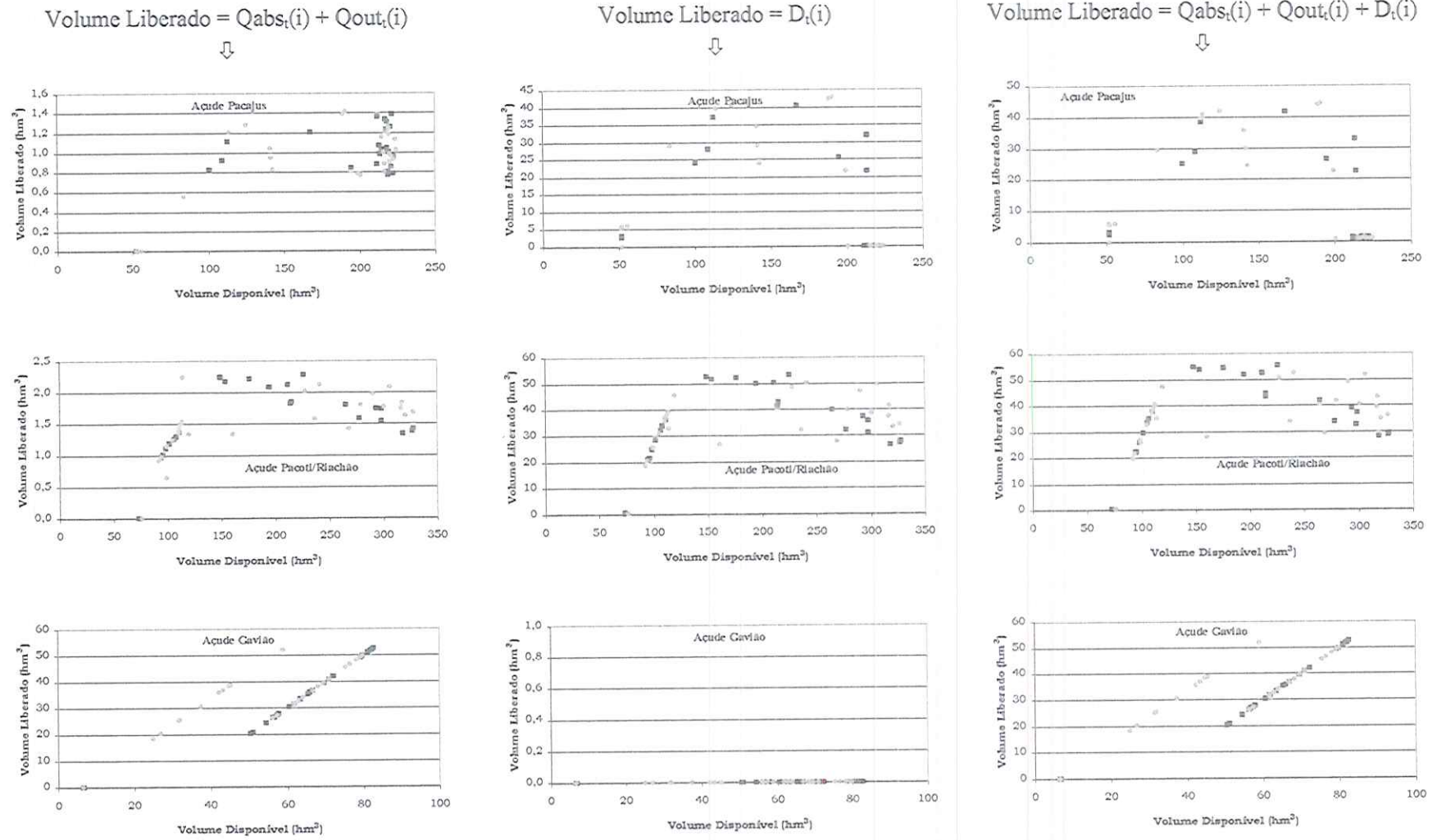


Figura 7.71 – Volume liberado em função do volume disponível no mês de dezembro para os três reservatórios (♦ Situação 2 - ■ Situação 4)

8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente trabalho utilizou o procedimento híbrido de Algoritmo Genético e Programação Linear, recentemente proposta por Reis et al. (2003), como uma aproximação estocástica alternativa ao método de decomposição de Benders de Pereira e Pinto (1985).

Visou principalmente considerar a evaporação, através do sistema composto de três reservatórios que abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza, localizado em uma região caracterizada, principalmente, por baixa precipitação e alta evaporação, para a qual é evidente a necessidade da operação otimizada do sistema. Para tanto, foram empregados dados de afluências naturais pseudo-históricas produzidas pelo modelo chuva-vazão MODHAC, demandas projetadas pelo Plano de Gerenciamento das Bacias Metropolitanas do Estado do Ceará e lâminas de evaporação médias da região, extraídas do Plano Estadual de Recursos Hídricos.

Os volumes evaporados, avaliados através de uma rotina iterativa de cálculo, foram considerados nas equações de balanço hídrico do sistema, possibilitando a realização de testes que contemplaram seqüências hidrológicas distintas de afluências naturais e condições de importe hídrico diferentes.

Analisando as respostas produzidas pelo método, foram possíveis diversas conclusões, apresentadas de forma sintética a seguir.

Primeiramente, pode-se dizer que o cálculo da evaporação de forma iterativa mostrou-se viável e rápido para o sistema de três reservatórios estudado.

Embora o modelo utilizado não fixasse regras operacionais *a priori*, ele possibilitou que regras relativamente bem definidas fossem extraídas com base nos resultados da otimização.

As estratégias operacionais produzidas como resposta revelaram a concordância das decisões para períodos hidrológicos caracterizados por duas seqüências de aflúências, uma de secas mais brandas e outra de estiagem mais pronunciada. O mesmo pode-se dizer em relação às diferentes capacidades de importe hídrico, para as quais as liberações hídricas em função das disponibilidades puderam ser representadas por curvas defasadas do adicional de importe que uma situação representa em relação à outra.

Verificou-se que o modelo apresentou uma tendência de transferência hídrica para os reservatórios de jusante, atendendo prioritariamente as demandas do reservatório de Gavião, que abastece a cidade de Fortaleza, deixando de abastecer as demandas locais dos reservatórios de montante (Pacajus e Pacoti/Riachão). Tal fato pode ser justificado, em parte, pelas magnitudes das demandas do Reservatório de Gavião e suas dimensões que propiciam menor evaporação. Entretanto, a estrutura de pesos arbitrados pode ter influência nesse tipo de decisão, uma vez que não existe diferenciação de déficits de atendimento locais ou não.

Vislumbram-se diversas investigações a serem realizadas, dentre as quais incluem-se a análise detalhada da estrutura de pesos arbitrados e a possibilidade do tratamento multiobjetivo do problema, em conformidade com o conceito de Pareto, como uma possibilidade de dar tratamento mais abrangente ao mesmo problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, J. (1987). *Reducing bias and inefficiency em the selection algorithm*. In: GREFENSTETTE, J. (ed). *Proc. of the second international conference on genetic algorithm and their applications*. New Jersey: Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, p.14-21.
- BARTH, F.T. et. al. (1987). Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. Coleção ABRH de recursos hídricos. São Paulo, Nobel/ABRH.
- BRAGA JR.,B. P. F.; YEH, W. W-G.; BECKER, L.; BARROS, M. T. L. (1991). *Stochastic Optimization of Multiple-Reservoir-System Operation*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.117, n.4, p.471-481, July/August.
- CEARÁ. *Plano Estadual dos Recursos Hídricos: Ceará*. Secretaria dos Recursos Hídricos. 1992. Fortaleza.
- CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. *Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas*. 1998. Fortaleza.
- CELESTE, A. B.; SUZUKI, K.; WATANABE, M.; KADOTA, A. (2002). *Optimal real-time reservoir operation using genetic algorithms*. *8th JSCE Congress of Civil Engineering – Shikoku Division*, p197-198, Tokushima, Japão, Maio.
- CURI, W. F.; CURI, R. C.; CELESTE, A. B. (1997). *Alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arcoverde para irrigação via programação não linear*. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, Artigo Científico.

- CURI, W. F.; CURI, R. C.; MARINHO, M. H. N. (1998). *Operação de um reservatório e área irrigada via programação linear para maximização dos lucros*. IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande, Artigo Científico.
- DEJONG, K. (1975). *The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems*. University of Michigan, PhD thesis.
- FONTANE, D. G.; GATES, T. K.; MONCADA, E. (1997). *Planning Reservoir Operations with Imprecise Objectives*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.123, n.3, p.154-162, May/June.
- GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. S., orgs. (1999). *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre; Ed Universidade/UFRGS/ABRH; (Coleção ABRH de recursos hídricos; 7.).
- GEN, M.; CHENG, R. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*. *Wiley Series in Design and Automation*, John Wiley & Sons.
- GOBBETTI, L. E. C.; CEBALLOS, J. C.; FERNANDES, R. J. A. R.; PORTO, R. L. L. (1999). *Obtenção de políticas ótimas para a operação do reservatório do Guarapiranga usando programação dinâmica estocástica*. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Artigo Científico.
- GOLDBERG, D.E. (1989). *“Genetic algorithms in search, optimization and machine learning.” Addison-Wesley Publishing Co. Reading Massachussets, 1989*

- GOLDBERG, D. E.; DEB, K. (1990). *A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. Water Resources Research*, v.7, n.2, p.273-283.
- GOULTER, I. C. ; TAI, F-K. (1985). *Practical implications in the use of stochastic dynamic programming for reservoir operation. Water Resources Bulletin*, v.21, n.1, p.65-74, February.
- HEIDARI, M.; CHOW, V. T.; KOKOTOVIC, P. V. (1971). *Discrete differential approach to water resources systems optimization. Water Resources Research*, v.7, n.2, p.273-283.
- HOLLAND, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press.
- LANNA, A. E. (1986). *Dimensionamento e/ou expansão da capacidade de uma sistema de suprimento hidrico com técnicas de programação linear*. In: Congresso Latino-Americano Sobre Métodos Computacionais Para Engenharia, 7, São Carlos. Anais. São Carlos: Escola de Engenharia. v.2, p. 795-807.
- MACEDO, H. P. (1996). *A chuva e o chão na terra do sol*. São Paulo: Maltese.
- MEIER, W.; BARKDOLL, B. D. (2000). *Sampling design for network model calibration using genetic algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.126, n.4, p.245-250.
- MELLO JR., A. V.; BRAGA JR., B. P. F., ROCHA, J. C. S. (1997). *Otimização estocástica linear aplicada à operação de reservatórios*. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, Artigo Científico.

- MELLO JR., A. V.; MATOS, L. N. (1999). Otimização da operação de reservatório pela programação dinâmica em um processo de decisão Markoviano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.4, n.3, p.5-16, Jul/Set.
- MICHALEWICS, Z. (1992). *Genetic algorithm + data structures = evaluation programs*. 2a. ed., Springer-Verlag. New York.
- OLIVEIRA, J. A. ; LANNA, A. E. L. (1997). Otimização de um Sistema de Múltiplos Reservatórios Atendendo a Múltiplos Usos no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.2, n.2, p.123-141, Jul/Dez.
- OLIVEIRA, R.; LOUCKS, D. P. (1997). *Operation rules for multireservoir systems*. *Water Resources Research*, v.33, n.4, p.839-852.
- PEREIRA, M. V. F. ; PINTO, L. M. V. G. (1985). Stochastic Optimization of Multireservoir Hydroelectric System: A Decomposition Approach. *Water Resources Research*, v.21, n.6, p.779-792, June.
- PILAR, J. V. (1998). Otimização de um Sistema de Recursos Hídricos sem Regularização – Caso Analisado: bacia do rio Paracatú. Porto Alegre: UFRGS – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Dissertação (Mestrado).
- PILAR, J. V. ; LANNA, A. E. (1999). Planejamento por Otimização Linear de um Sistema de Recursos Hídricos sem Regularização:

Bacia do Rio Paracatú. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.4, n.2, p.61-72, Abr/Jun.

PORTO, R. L. L., org. (1997). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos*. Porto Alegre; Editora da Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

REIS, L.F.R. e AKUTSU, J. (2002) *Estratégias operacionais para sistemas de reservatórios via algoritmo genético*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

REIS, L.F.R., BESSLER, F.T., WALTERS, G. A., SAVIC, D. and CHAUDHRY, F. H.(2003), *Multi-Reservoir Operation Planning using Hybrid Genetic Algorithm and Linear Programming (GA-LP): an Alternative Stochastic Approach*, submetido à Water Resources Reserch.

SHARIF, M.; WARDLAW, R. (2000). *Multireservoir systems optimization using genetic algorithm: case study*. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v.14, n.4, p.255-263.

SIMONOVIC, S. P. (1992). *Reservoir system analysis: closing gap between theory and practice*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.118, n.3, p.262-280, May/June.

SOUZA FILHO, F. A. (1998). *Estudo preliminar da operação conjunta do sistema Jaguaribe e sistema metropolitano*. Fortaleza. /Relatório técnico COGERH-SRH-CE/

- SOUZA FILHO, F. A.; ASFOR, C. U. L. (1999). *Operação conjunta do sistema Jaguaribe e sistema metropolitano (Relatório Final)*. Fortaleza. /Relatório técnico COGERH-SRH-CE/ Dezembro.
- TAI, F-K. ;GOULTER, I. C. (1987). *A stochastic dynamic programming based approach to the operation of a multi-reservoir system. Water Resources Bulletin*, v.23, n.3, p.371-377, June.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (1996). *Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. 2.ed. São Carlos.
- VIANA, F. L.; GONDIM FILHO, J. G. (1999). *Utilização de previsões climatológicas no gerenciamento dos recursos hídricos do Ceará. O caso do abastecimento de água da região metropolitana de Fortaleza*. Fortaleza. /Relatório técnico COGERH-SRH-CE/
- WARDLAW, R.; SHARIF M. (1999). *Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.125, n.1, p. 25-33.
- WURBS, R. A. (1993). *Reservoir-system simulation and optimization models. Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.119, n.4, p. 455-472.
- YAKOWITZ, S. (1982). *Dynamic programming applications in water resources. Water Resources Research*, v.18, n.4, p. 673-696.

- YEH, W. W-G. (1985). *Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review*. *Water Resources Research*, v.21, n.12, p. 1797-1818, December.