



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA  
ANÁLISE DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

**VALTERLIN DA SILVA SANTOS**

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2007

**VALTERLIN DA SILVA SANTOS**

**UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO PARA ANÁLISE DE  
SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, na área de Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA HIDRÁULICA**

ORIENTADORES: WILSON FADLO CURI  
ROSIREN CATÃO CURI

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S237m  
2007

Santos, Valterlin da Silva

Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos / Valterlin da Silva Santos. - Campina Grande, 2007.  
143f. il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.  
Orientadores: Rosires Catão Curi e Wilson Fadlo Curi.

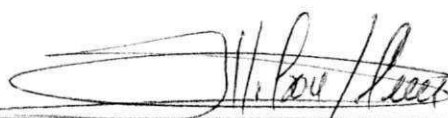
1- Recursos Hídricos 2- Otimização 3- Programação Linear 4 -  
Linearização I- Título

CDU 556.18

VALTERLIN DA SILVA SANTOS

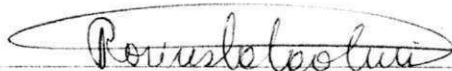
MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO PARA ANÁLISE DE SISTEMAS  
DE RECURSOS HÍDRICOS

Aprovada em 26/02/2007 COM DISTINÇÃO



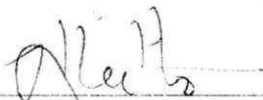
Dr. Wilson Fadlo Curi (UAF/UFCG)

Orientador



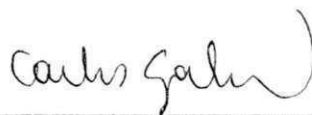
Dra. Rosires Catão Curi (UAEC/UFCG)

Orientadora



Dr. Antonio Marozzi Righetto (DEC/UFRN)

Examinador Externo



Dr. Carlos de Oliveira Galvão (UAEC/UFCG)

Examinador Interno

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2007

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Valter Felix dos Santos e Irani Freire da Silva Santos e meus irmãos, Vagner e Iranice, dedico-lhes esta conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao senhor Deus, por me dar a vida, saúde e oportunidades de aprimorar meus conhecimentos.

Aos meus pais, meu irmão e minha irmã, pelo amor, apoio e incentivo em mais uma etapa da minha vida.

Aos professores Rosires Catão Curi e Wilson Fadlo Curi, pela orientação e disposição em colaborar durante todo o trabalho.

A todos os professores do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela formação que recebi e pelos novos conhecimentos adquiridos.

Aos meus grandes amigos -2olan Sarmiento e Mosefran Firmino pela amizade, disposição em ajudar-me na elaboração do trabalho e pelos momentos agradáveis compartilhados.

A minha turma de mestrado, Marcos Junior, Gracielli, Julio (o gaúcho) e Gustavo por toda ajuda e companheirismo.

Ao CT-HIDRO/CNPq, pelo suporte financeiro durante a vigência do curso.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente, contribuíram e acrescentaram para a concretização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	v
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>RESUMO</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
CAPÍTULO I	
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
CAPÍTULO II	
<b>OBJETIVOS</b> .....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO III	
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
3.1 Planejamento e gerenciamento em sistemas de recursos hídricos.....	5
3.2 Modelos de simulação.....	9
3.3 Modelos de otimização.....	11
3.3.1 Programação linear.....	13
3.3.1.1 Artifícios de linearização.....	16
3.3.1.1.1 Linearização por segmentos.....	17
3.3.1.1.2 Programação separável por partes.....	19
3.3.1.1.3 Programação Linear Sequencial ou Sucessiva.....	20
3.3.2 Programação dinâmica.....	21
3.3.3 Programação não-linear.....	22
3.4 Otimização multiobjetivo.....	24
3.4.1 Método das ponderações.....	26
3.4.2 Método das restrições.....	26
CAPÍTULO IV	

<b>MODELO DESENVOLVIDO EM PROGRAMAÇÃO LINEAR.....</b>	<b>28</b>
4.1 Considerações gerais.....	28
4.2 Funções objetivo.....	29
4.2.1 Tomada d'água.....	29
4.2.2 Vazão efluente ao reservatório.....	32
4.2.3 Volume meta.....	32
4.2.4 Receita líquida da agricultura irrigada.....	34
4.2.5 Mão-de-obra da agricultura irrigada.....	39
4.2.6 Função multiobjetivo.....	39
4.3 Equações de restrições.....	39
4.3.1 Operação dos reservatórios.....	39
4.3.2 Critérios operacionais e agronômicos.....	46
4.3.3 Outros componentes do sistema.....	48
4.4 Processo iterativo de otimização e análise de convergência.....	48
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>54</b>
5.1 Descrição do sistema estudado.....	54
5.1.1 Climatologia.....	56
5.1.2 Geologia.....	57
5.1.3 Pedologia.....	57
5.2 Definição dos cenários.....	58
5.3 Dados do sistema estudado.....	60
5.3.1 Caracterização hídrica do sistema.....	60
5.3.2 Precipitação.....	61
5.3.3 Evaporação.....	62
5.3.4 Vazões afluentes.....	62
5.3.5 Dados dos reservatórios.....	63
5.3.5.1 Cota-área-volume.....	64
5.3.5.2 Volumes máximos e mínimos.....	64
5.3.5.3 Vertedouros.....	64
5.3.5.4 Descarga de fundo.....	65
5.3.5.5 Tomada d'água.....	65



5.3.6	Demandas hídricas.....	65
5.3.6.1	Abastecimento urbano .....	65
5.3.6.2	Irrigação.....	66
5.3.6.3	Vazão efluente mínima.....	68
5.4	Situações estudadas.....	70
5.5	Critérios operacionais.....	71

## CAPÍTULO VI

<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>73</b>	
6.1	Cenário normal.....	73
6.1.1	1º Situação.....	73
6.1.2	2º Situação.....	78
6.1.3	3º Situação.....	83
6.1.4	4º Situação.....	87
6.2	Cenário chuvoso.....	88
6.2.1	1º Situação.....	88
6.2.2	2º Situação.....	92
6.2.3	3º Situação.....	97
6.2.4	4º Situação.....	101
6.3	Cenário seco.....	102
6.3.1	1º Situação.....	102
6.3.2	2º Situação.....	106
6.3.3	3º Situação.....	111
6.3.4	4º Situação.....	115
6.4	Cenário plurianual.....	119

## CAPÍTULO VII

<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>128</b>	
7.1	Conclusões.....	128
7.1.1	Sobre o modelo.....	128
7.1.2	Sobre o sistema.....	129
7.1.2.1	Para os cenários normal, chuvoso e seco.....	129
7.1.2.2	Cenário plurianual.....	131

7.2	Recomendações.....	132
7.2.1	Sobre o modelo.....	132
7.1.2	Sobre o sistema.....	132
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>134</b>

**LISTAS DE TABELAS**

Tabela 4.1	Valores dos índices de Hashimoto et al. (1982) de cada função objetivo para diferentes níveis de demanda.....	31
Tabela 5.1	Dados climatológicos da região.....	57
Tabela 5.2	Valores das faixas pluviométricas para o ano hidrológico de cada categoria para a região 6.....	59
Tabela 5.3	Postos pluviométricos utilizados.....	61
Tabela 5.4	Dados da precipitação mensal do posto Manaíra.....	61
Tabela 5.5	Dados da precipitação mensal do posto Ibiara.....	61
Tabela 5.6	Dados de evaporação média mensal do Tanque Classe A.....	62
Tabela 5.7	Dados da vazão afluente ao reservatório Catolé II.....	63
Tabela 5.8	Dados da vazão afluente ao reservatório Poço Redondo.....	63
Tabela 5.9	Dados dos reservatórios estudados.....	64
Tabela 5.10	Dados dos vertedouros dos reservatórios estudados.....	64
Tabela 5.11	Dados da descarga de fundo dos reservatórios estudados.....	65
Tabela 5.12		

	para a 2º Situação no cenário normal.....	79
Tabela 6.7	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário normal	81
Tabela 6.8	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário normal.....	82
Tabela 6.9	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 3º Situação no cenário normal.....	84
Tabela 6.10	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 3º Situação no cenário normal.....	84
Tabela 6.11	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 3º Situação no cenário normal	86
Tabela 6.12	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 3º Situação no cenário normal.....	87
Tabela 6.13	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 1º Situação no cenário chuvoso.....	89
Tabela 6.14	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 1º Situação no cenário chuvoso.....	89
Tabela 6.15	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário chuvoso.....	91
Tabela 6.16	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário chuvoso.....	92
Tabela 6.17	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 2º Situação no cenário chuvoso.....	93
Tabela 6.18	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 2º Situação no cenário chuvoso.....	94
Tabela 6.19	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário chuvoso.....	96
Tabela 6.20	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário chuvoso.....	97
Tabela 6.21	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 3º Situação no cenário chuvoso.....	98

Tabela 6.22	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 3º Situação no cenário chuvoso.....	99
Tabela 6.23	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 3º Situação no cenário chuvoso.....	100
Tabela 6.24	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 3º Situação no cenário chuvoso.....	101
Tabela 6.25	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 1º Situação no cenário seco.....	103
Tabela 6.26	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 1º Situação no cenário seco.....	103
Tabela 6.27	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário seco.....	105
Tabela 6.28	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário seco.....	106
Tabela 6.29	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 2º Situação no cenário seco.....	107
Tabela 6.30	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 2º Situação no cenário seco.....	108
Tabela 6.31	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário seco.....	109
Tabela 6.32	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário seco.....	110
Tabela 6.33	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 3º Situação no cenário seco.....	112
Tabela 6.34	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 3º Situação no cenário seco.....	112
Tabela 6.35	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 3º Situação no cenário seco.....	114
Tabela 6.36	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 3º Situação no cenário seco.....	114
Tabela 6.37	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 4º Situação no cenário seco.....	116

Tabela 6.38	Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 4ª Situação no cenário seco.....	116
Tabela 6.39	Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 4ª Situação no cenário seco.....	118
Tabela 6.40	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 4ª Situação no cenário seco.....	119
Tabela 6.41	Resultados referentes à área alocada (ha) do perímetro irrigado para os 5 anos de estudo do cenário plurianual.....	122
Tabela 6.42	Resultados referentes à receita líquida auferida (R\$) do perímetro irrigado para os 5 anos de estudo do cenário plurianual	124
Tabela 6.43	Resultados referentes à mão-de-obra requerida (homem/dia) do perímetro irrigado para os 5 anos de estudo do cenário plurianual.....	125
Tabela 6.44	Resultados operacionais e hidrológicos médios anuais do perímetro irrigado para o cenário plurianual.....	126

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 3.1	Função objetivo quadrática e linearizada pelo artifício de linearização por segmentos.....	17
Figura 3.2	Ilustração do procedimento iterativo do uso da PL.....	21
Figura 4.1	Gráfico da função objetivo quadrática e linearizada por segmentos para a tomada d'água do reservatório ou do nó no mês $t$ .....	30
Figura 4.2	Gráfico da função objetivo quadrática e linearizada por segmentos para o volume meta do reservatório no mês $t$ .....	33
Figura 4.3	Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.....	40
Figura 4.4	Gráfico da curva área-volume do reservatório linearizada por segmentos.....	42
Figura 4.5	Gráfico da descarga de fundo máxima do reservatório representada por segmentos de reta para a cota de montante da geratriz inferior do tubo de descarregador de fundo abaixo da cota correspondente ao volume mínimo do reservatório.....	44
Figura 4.6	Gráfico da descarga de fundo máxima do reservatório representada por segmentos de reta para a cota de montante da geratriz inferior do tubo de descarregador de fundo acima da cota correspondente ao volume mínimo do reservatório.....	45
Figura 4.7	Gráfico da função objetivo linearizada para o volume meta do reservatório.	50
Figura 4.8	Valor do volume de água do reservatório entre a primeira e a segunda iteração e a representação restrição imposta aos trechos segmentados para a 2 <sup>o</sup> rodada da PL.....	51
Figura 4.9	Representação restrição imposta aos trechos segmentados para a 3 <sup>o</sup> rodada da PL.....	52
Figura 4.10	Fluxograma do modelo de otimização.....	53
Figura 5.1	Sub-bacia do riacho Santana.....	54
Figura 5.2	Perfil longitudinal do riacho Santana.....	55
Figura 5.3	Distribuição geográfica das regiões pluviometricamente homogêneas do Estado da Paraíba, com os respectivos limites municipais.....	59
Figura 5.4	Layout do sistema estudado.....	60

Figura 6.1	Vazões liberadas pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 1º Situação no cenário normal.....	73
Figura 6.2	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 1º Situação no cenário normal.....	75
Figura 6.3	Alocação da área de cada cultura para a 1º Situação no cenário normal.....	77
Figura 6.4	Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 2º Situação no cenário normal.....	78
Figura 6.5	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 2º Situação no cenário normal.....	80
Figura 6.6	Alocação da área de cada cultura para a 2º Situação no cenário normal.....	82
Figura 6.7	Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 3º Situação	



Figura 6.17	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 3º Situação no cenário chuvoso.....	99
Figura 6.18	Alocação da área de cada cultura para a 3º Situação no cenário chuvoso.....	101
Figura 6.19	Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 1º Situação no cenário seco.....	102
Figura 6.20	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 1º Situação no cenário seco.....	104
Figura 6.21	Alocação da área de cada cultura para a 1º Situação no cenário seco.....	105
Figura 6.22	Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 2º Situação no cenário seco.....	107
Figura 6.23	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 2º Situação no cenário seco.....	108
Figura 6.24	Alocação da área de cada cultura para a 2º Situação no cenário seco.....	110
Figura 6.25	Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 3º Situação no cenário seco.....	111
Figura 6.26	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 3º Situação no cenário seco.....	113
Figura 6.27	Alocação da área de cada cultura para a 3º Situação no cenário seco.....	113
Figura 6.28	Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 4º Situação no cenário seco.....	115
Figura 6.29	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 4º Situação no cenário seco.....	117
Figura 6.30	Alocação da área de cada cultura para a 4º Situação no cenário seco.....	118
Figura 6.31	Vazões liberadas pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para o cenário plurianual.....	120
Figura 6.32	Volume dos reservatórios e vertimento ocorrido para o cenário plurianual..	121
Figura 6.33	Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para o cenário plurianual.....	121

Figura 6.34	Alocação da área de cada cultura sazonal na safra para o cenário plurianual	123
Figura 6.35	Alocação da área de cada cultura sazonal na entressafra para o cenário plurianual.....	123
Figura 6.36	Alocação da área de cada cultura perene para o cenário plurianual.....	124
Figura 6.37	Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para o cenário plurianual.....	126

## RESUMO

Modelos de otimização para a análise de sistemas de recursos hídricos são comumente relatados na literatura, porém a grande maioria apresenta simplificações e aproximações que inviabilizam sua utilização na operação de sistemas complexos de reservatórios. Portanto, neste trabalho foi desenvolvido um modelo de otimização para o estudo da operação integrada de sistemas de reservatórios e perímetros irrigados, além de outros usos da água, objetivando a alocação ótima dos recursos hídricos entre os múltiplos usos e o estabelecimento de políticas operacionais via uma análise multiobjetivo. As não-linearidades intrínsecas aos processos de cada um de seus componentes foram implementadas através de um procedimento iterativo, fazendo uso da programação linear seqüencial.

O modelo foi aplicado a um sistema constituído de dois reservatórios, Catolé II e Poço Redondo, ligados em série na bacia do Rio Piancó. O comportamento do sistema foi analisado para cinco objetivos (estabelecidos para o atendimento do abastecimento humano, vazão ecológica, volume meta, receita líquida e mão-de-obra oriunda da atividade agrícola) e três cenários hidroclimáticos (seco, normal, chuvoso) para os períodos de um e cinco anos. Os resultados mostraram a eficiência do modelo em análise multiobjetivo e na seleção de regras operativas para a alocação da água atendendo as demandas, os objetivos estabelecidos e as restrições físicas estabelecidas.

## ABSTRACT

It is common to find descriptions of optimization models to analyze water resources systems at corresponding literature, but most of them present model approximations that limit their use, when analyzing complex systems of reservoirs. Therefore, this work is concerned with the development of an optimization model to couple with an integrated analysis of reservoirs and irrigated perimeters, among other water uses, system targeting the establishment of multi-objective optimal operational policies for water allocation to multiple users. The nonlinear behavior of hydraulic components were implemented and solved via an iterative process, through the use of sequential linear programming.

This model was applied at the study of two reservoirs system, Catolé II and Poço Redondo, which are connected in series at the Piancó river basin. The system's behavior was analyzed for five established objectives (to meet water requirements of human supply, ecological river flow, reservoir target storage volume, net profit and labor required for agricultural activities) and three hydro-climatic scenarios (dry, normal and rainy) for a time span of 1 and 5 years. The results have shown that the model is efficient at the selection of multi-objective optimal operation policies for water allocation, according to established objectives and constraints.

## CAPITULO I

### INTRODUÇÃO

Em regiões semi-áridas, como o Nordeste brasileiro, um dos grandes problemas está no atendimento da população com água de boa qualidade, alimento e emprego. Essas regiões apresentam características climáticas bem definidas, como: altas taxas de evaporação, chuvas bastante irregulares a nível espaço-temporal e baixos índices pluviométricos, quando comparado com o resto do Brasil, que condicionam as atividades humanas e o desenvolvimento socioeconômico da região (VIEIRA, 1996).

Curi et al. (2005) argumentam que para proporcionar melhorias no padrão econômico e social e, conseqüentemente, na qualidade de vida da população torna-se necessário a aplicação de tecnologias adequadas ao clima da região, promovendo dessa forma, o uso racional dos recursos hídricos naturais existentes, em especial a água e terras aptas ao plantio. Oliveira e Lanna (1997) afirmam que as causas do pouco desenvolvimento da região está relacionado aos baixos investimentos na infra-estrutura hídrica existente e à ineficiência no seu aproveitamento.

O planejamento do uso das águas dos mananciais existentes pode proporcionar um melhor aproveitamento, controle e conservação de suas águas, porém, o grande desafio deste planejamento está em ser capaz de atender as demandas, dos múltiplos usos, de forma integrada e otimizada para todo o sistema. A sustentabilidade do sistema depende deste planejamento integrado eficiente e racional da alocação das disponibilidades hídricas entre os seus múltiplos usos.

Para Barth (1987) a alocação de água entre usos múltiplos é um problema de grande complexidade cuja solução deve ser procurada com técnicas de análise de sistemas de recursos hídricos.

A análise de sistema de recursos hídricos é uma técnica de solução de problemas complexos de engenharia de recursos hídricos a partir da abordagem sistêmica e de usos de técnicas computacionais agregadas à modelagem matemática de sistema de recursos hídricos. A formulação matemática busca descrever a dinâmica do sistema pela utilização de vários tipos de equações matemáticas, geralmente se recorrendo a equação do balanço hídrico, cujo princípio está baseado no princípio de conservação da massa. Associados a essa dinâmica estão incorporadas às expressões limitantes do sistema, chamadas de restrições (físicas,

operacionais, condicionais, etc.), e as funções objetivo, que estabelecem forma de valorização dos resultados do processo decisório (LANNA, 1997).

Quando existe o interesse em desenvolver um planejamento onde se valora certos aspectos do processo decisório, deve-se aplicar técnicas de otimização. Dentre as técnicas de otimização, uma que merece destaque devido a inúmeras aplicações no gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos é a Programação Linear (PL). Ela foi estabelecida por G. B. Dantzig em 1947, para resolver problemas de logística da Força Área Americana. Aplicações na área de recursos hídricos remontam a década de 60, no âmbito dos trabalhos do “Harvard Water Resources Group”, onde se fez uma aplicação de PL a um problema de gerenciamento de água subterrânea. (BARBOSA, 2002). Desde então muitas aplicações nesta área tem sido registradas em PL.

Sob certas hipóteses, problemas não-lineares podem ser linearizados utilizando-se de aproximações matemáticas ou de procedimentos iterativos. Entretanto a maioria das aplicações apenas linearizam a função objetivo do modelo. Normalmente as não-linearidades intrínsecas aos processos de cada componente, representadas nas restrições do modelo, como a curva *cota-área-volume*, por exemplo, são desprezadas ou linearizadas com o uso de regressão linear simples. Além do mais, muitos trabalhos apresentam apenas uma única função objetivo para analisar o sistema, não contemplando como grupos de visões diferentes avaliam as decisões a serem tomadas sobre o uso dos recursos hídricos.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de otimização, em programação linear, para prover uma ferramenta que visa o estudo da alocação ótima das disponibilidades hídricas entre os múltiplos usos de um sistema de reservatórios, quando operados de forma integrada, via uma análise multiobjetivo. As não-linearidades das funções objetivo e dos processos representados em cada restrição foram implementadas através do uso combinado de técnicas matemáticas de linearizações de funções e de um procedimento iterativo, denominado Programação Linear Sequencial (ou Sucessiva).

Objetivou-se estabelecer uma metodologia capaz de ser aplicada a sistemas de reservatórios, com a possibilidade de uma representação mais detalhada do sistema, tendo em vistas à escolha de políticas operacionais que possam melhorar, de forma sustentável, o uso da água em regiões com escassez hídrica, minimizando problemas peculiares de déficit hídrico e os conflitos de uso da água.

## **CAPITULO II**

### **OBJETIVOS**

#### **2.1 – OBJETIVO GERAL**

O trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de otimização, baseado em programação linear, que possa prover a operação integrada de um sistema de reservatórios e atendimento de suas demandas sob a ótica da determinação da alocação ótima dos recursos hídricos entre os múltiplos usos, via uma análise multiobjetivo.

#### **2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Dentre os objetivos específicos, podem ser citados:

- Desenvolver um modelo de otimização, para planejamento integrado em sistemas de recursos hídricos, que:
  - seja baseado em programação linear;
  - possa integrar vários tipos de componentes (além dos usuais componentes

- Avaliar como o sistema se comporta, em termos de operação ótima, quando se utiliza funções multiobjetivo que priorizem, não só os benefícios econômicos, mas, também, índices de desempenho, prioridades de atendimento, etc.
- Avaliar as alterações na resposta do sistema quanto a mudanças de prioridades do atendimento às demandas e dos objetivos, analisando a susceptibilidade do mesmo a falhas de atendimento, em função de prioridades previamente estabelecidas.



## CAPITULO III

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 – PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

A análise de sistemas de recursos hídricos pode ser definida como o conjunto de princípios e métodos usados na análise do comportamento e estrutura de sistemas complexos. O termo sistema, nesse contexto, refere-se a um conjunto de elementos inter-relacionados, os quais podem ter natureza social ou natural, física, concreta ou abstrata, existente ou planejada, estática ou dinâmica, etc., e que, em geral, é de natureza interdisciplinar. A análise de sistemas é uma ciência que usa métodos para definir os vários sistemas, distingui-los do meio ambiente, representá-los e otimizar sua estrutura e comportamento.

Definições de alguns termos que são bastante utilizados na área de análise de sistema:

- Sistema é definido como sendo o conjunto de elementos ou componentes interconectados de uma maneira organizada que interagem entre si, de modo a poder reagir com o seu meio ambiente;
- Modelo é uma representação do comportamento do sistema;
- Fenômeno é o processo físico que produz alterações de estado no sistema;
- Variável é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno, podendo variar no espaço e no tempo; e
- Parâmetro é o valor que caracteriza algum aspecto do sistema.

Segundo Lima e Lanna (2005), uma das principais áreas de aplicação dos modelos de análise de sistemas de recursos hídricos é no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

O planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos buscam a eficiência econômica e a flexibilidade operacional, além de incluir, preferencialmente, aspectos sociais, ambientais e institucionais, de forma a adequar e conciliar as intervenções humanas aos sistemas de recursos hídricos. No processo de planejamento do uso dos recursos hídricos devem-se levar em consideração dois tipos de usos de água: os conflitantes, os quais concorrem pelo mesmo recurso, tais como uso agrícola e abastecimento urbano, e os

complementares, nos quais uns geram recursos para outros, como é o caso de geração hidrelétrica e regularização de vazões.

Uma das questões mais discutidas em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos é como escolher e formalizar critérios que orientarão a escolha de uma melhor alternativa.

Loucks (2000) faz alusão à importância da inclusão dos melhores procedimentos científicos disponíveis no processo decisório e a constante pesquisa por novos métodos que promovam o aperfeiçoamento do conhecimento para o planejamento e gerenciamento dos sistemas hídricos.

Na busca de respostas para os complexos problemas de planejamento e gestão dos recursos hídricos, lança-se mão da utilização de técnicas e ferramentas capazes de auxiliarem nos processos de análise, operação, planejamento e tomadas de decisão em sistema de recursos hídricos. Os estudos de alternativas operacionais, em sistemas de recursos hídricos, são comumente feitos por meio de aplicação de elaboradas metodologias matemáticas e computacionais, incluindo técnicas de otimização e simulação (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993 e LABADIE, 2004).

Com os contínuos avanços da computação, aliados ao aumento da complexidade nos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, têm-se estimulado a prática de se usar modelos matemáticos e computacionais integrados como ferramentas para auxiliar as tomadas de decisão. Estes, além de prover uma integração de modelos matemáticos, devem armazenar um grande número de dados e executar rotinas apropriadas de interpretação (processam os dados de entrada), simulação e otimização (descrevem o comportamento físico e operacional do sistema), além de apresentação dos resultados em formato fácil de ser interpretado. Tal conjunto pode ser chamado de Pesquisa Operacional, Análise de Sistemas de Recursos Hídricos e, mais recentemente, Sistemas de Suporte a Decisão (BRAGA et al., 1987). Entretanto, as principais limitações desse tipo de modelo estão na discretização de processos contínuos e na dificuldade de representação matemática de alguns fenômenos físicos que sejam computacionalmente eficientes (tempo de execução e precisão dos resultados). Um dos motivos está no fato que nenhum processo físico poderá ser completamente observado e os dados que geram seu modelo matemático certamente envolverão alguns elementos de incerteza e, portanto, nenhuma expressão matemática poderá representá-lo com precisão. Por outro lado, ao fazer uso de uma representação matemática mais complexa para descrever um fenômeno o risco de não representar bem o sistema é minimizado, mas aumenta-se a dificuldade para obter uma solução (aumento dos requerimentos computacionais como

memória, devido ao aumento do requerimento de dados, e a velocidade de processamento, devido ao aumento da quantidade de cálculos numéricos envolvidos em, por exemplo, processos de discretizações e convergência de processos iterativos). Tais fatores podem levar a exceder as disponibilidades de recursos humanos, financeiros e de tempo (OVERTON e MEADOWS, 1976).

Segundo Lanna (1997), para a análise de sistemas de recursos hídricos, são dois os principais propósitos: simular o comportamento da realidade e otimizar os processos decisórios. Simonovic (1992) afirma que simulação e otimização são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de uma base quantitativa de decisões em gerenciamento de reservatórios e a utilização dessas técnicas no planejamento e operação de projetos reais se encontra em bastante crescimento.

Atualmente, já não é mais tão aceitável a utilização de, apenas, um modelo clássico de simulação ou otimização com apenas um objetivo (por exemplo, a maximização da eficiência econômica). Seguindo as novas tendências no tratamento dos problemas de recursos hídricos, torna-se necessário uma subdivisão de objetivos mais genéricos em atributos que possam, de alguma forma, ser quantificados, permitindo a consideração de aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais e outros. Os modelos que contemplam este tipo de análise são denominados de modelos multi-critérios ou multi-objetivos em que os vários atributos são considerados, não procurando uma solução que otimize um único objetivo, mas sim, uma solução de compromisso entre os vários atributos para favorecer que a tomada de decisão sobre os recursos hídricos. Essas práticas, em recursos hídricos, estão associadas ao desenvolvimento sustentável, no qual esse processo deve compatibilizar, no espaço e no tempo, o crescimento econômico com a conservação do meio ambiente, a qualidade de vida e a equidade social (WURBS, 2005).

Segundo Loucks (2000), sistemas sustentáveis de recursos hídricos são aqueles planejados e gerenciados para satisfazerem as suas demandas, variáveis no tempo, e contribuir para os objetivos da sociedade, agora e no futuro, enquanto mantêm as suas integridades ambientais e hidrológicas.

Apesar de se reconhecer que simulação, otimização e métodos associados são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de bases quantitativas para a tomada de decisão, autores como Yeh (1985) e Wurbs (1993) notaram que existia uma lacuna entre a pesquisa e a aplicação dessas teorias na prática, que acreditamos continuar a existir. Isto se deve às características complexas, dinâmicas e multidisciplinares dos problemas de recursos hídricos e a necessidade de se representar o sistema real em um formato matemático

apropriado para as técnicas de otimização (SIMONOVIC, 1992). Labadie (2004) aponta algumas razões para o fato:

- Desconfiança dos operadores em relação a modelos que propõem trocar o seu julgamento por outras estratégias operacionais.
- Restrições computacionais (software e hardware) no passado impuseram simplificações e aproximações que os operadores se recusavam a aceitar.
- A enorme variedade de métodos cria confusão na hora de selecionar algum para uma aplicação específica.
- Alguns métodos necessitam programação para poderem ser utilizados.
- Muitos métodos de otimização não conseguem gerar regras de operação.

Teegavarapu e Simonovic (2001) ainda afirmam que os operadores estão interessados em:

- Modelos amplos, mas também fáceis de usar;
- Possibilidade da adoção, modificação e execução de uma variedade de situações em tempo real;
- Interface interativa do modelo com o usuário e ferramentas adicionais para obter cenários operacionais em tempo real;
- Recursos computacionais razoáveis e tempo dentro dos quais as decisões operacionais possam ser obtidas;
- Qualidade de soluções aceitáveis, contanto que o desempenho do sistema seja melhor do que o obtido com decisões operacionais existentes.

Os trabalhos de Yeh (1985), Simonovic (1992) e Wurbs (1993) apresentam revisões sobre a modelagem de operação de sistemas de reservatórios, com ênfase nas aplicações práticas de modelos de simulação e otimização. Mais recentemente, o estado da arte sobre modelos para operação de sistemas de reservatórios está tratado nos trabalhos de Lima e Lanna (2005), Bravo et al. (2005) e Wurbs (2005), com foco nos modelos baseados nas técnicas de simulação e otimização, e de modelos conjunto de simulação-otimização.

Labadie (2004) apresenta uma revisão sobre modelos para operação ótima de sistemas de reservatórios, assim como a inclusão dos mesmos em sistemas de suporte a decisão (SSD), discute as futuras direções da pesquisa e aplicações na área, descreve métodos de programação heurística (algoritmos genéticos, redes neurais e lógica fuzzy).

Lima e Lanna (2005) ressaltam que a escolha da metodologia dependerá das particularidades do sistema em análise. Tanto os modelos que utilizam programação matemática (linear, dinâmica ou não linear) como os modelos de simulação serão importantes em situações específicas.

### **3.2 – MODELOS DE SIMULAÇÃO**

A simulação tem como principal característica a flexibilidade, sendo esta considerada uma das principais vantagens, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática mais detalhada devido ao requerimento de se resolver um sistema de equações associado a um instante de tempo de cada vez. Por isso, a simulação é considerada míope, ou seja, as decisões são baseadas no estado das variáveis no presente, sem levar em consideração o que ocorre no futuro.

De modo geral, pode-se dizer que modelos de simulação são mais apropriados para análise do desempenho de alternativas operacionais, principalmente, de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança. Apesar de não serem capazes de gerar diretamente uma solução ótima, pode revelar uma solução pelo menos próxima da ótima, quando políticas alternativas são geradas por meio de numerosas rodadas do modelo.

Segundo Andrade (2000), aplicações pioneiras de simulação em recursos hídricos estão referidas à década de 1950, com as primeiras publicações sobre pesquisas no desenvolvimento de simulação de sistemas de reservatórios sendo produzidas pelo Havard Water Program.

Segundo Barth (1987), a grande aplicação dos modelos de simulação em recursos hídricos tem sido na área do dimensionamento e operação de reservatórios múltiplos. Notadamente quando se deseja levar em conta a aleatoriedade das seqüências de vazões afluentes e eventuais correlações cruzadas entre postos em uma bacia, o enfoque mais utilizado, na prática, tem sido a simulação.

Na literatura são citadas varias referências de modelos de simulação, tais como, o HEC-3 e o HEC-5, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center – USA (Yeh, 1985); o SIM-I e o SIM-II, do Texas Water Systems (Evanson e Mosely, 1970); o ARB-Arkansas River Basin Model, (Coomes, 1979); Modelo TVA (Shelton, 1979); o ACRES (Sigvaldason, 1976); entre outros.

Maia e Vilella (2001) aplicaram o modelo de simulação em tempo real OPERRES na Bacia do Paraguaçu, no estado da Bahia, onde se localiza o reservatório de Pedra do Cavalo, responsável pelo abastecimento de 57% da Região Metropolitana de Salvador. O modelo fornece informações sobre a disponibilidade hídrica do sistema de múltiplos reservatórios em função de restrições vinculadas aos volumes armazenados.

O modelo “The Water Rights Analysis Program” (TAMUWRAP) simula o gerenciamento da água superficial e a operação de um sistema de reservatórios e é baseado nas demandas de acordo com a prioridade especificada pelo usuário (Wurbs, 1993). O modelo IRIS (Interactive River System Simulation Program) foi especificamente desenvolvido para analisar os conflitos em bacias hidrográficas (LOUCKS et al., 2000),

O modelo de simulação IRAS (Interactive River-Aquifer Simulation) desenvolvido em 1994 pela INC (Resources Planning Associates) e pela University of Cornell, Ithaca, NY, foi utilizado por Brandão e Rodrigues (2000) para caracterizar usos futuros da água à jusante do rio Guadiana. Peixoto (2002) aplicou o modelo para a Bacia do Rio Sapucaí-Mirim/Grande no Estado de São Paulo, Brasil. O modelo é uma importante ferramenta na avaliação de projetos alternativos e políticas operacionais de sistemas de recursos hídricos, quantificando os parâmetros de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

O modelo MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo DHI (Danish Hydraulic Institute) da Dinamarca, é uma potente ferramenta capaz de executar análises hidrológicas extensas para sistemas independentes de abastecimento, de irrigação, produção de energia elétrica e, também, para sistemas de usos múltiplos. O modelo foi utilizado por Lima (2002), na bacia do rio Atibaia, no estado de São Paulo.

O MODSIM, desenvolvido no Colorado State University por Labadie et al. (1984), é essencialmente um modelo de simulação que permite fazer a otimização aplicada individualmente para cada mês, da alocação de água via modelo de rede de fluxo. Foi utilizado por Azevedo et al. (1998) na bacia do rio Piracicaba. Conforme os autores, a capacidade de combinar simulação e otimização é um dos pontos fortes do MODSIM em relação aos outros modelos. O MODSIM inclui a capacidade de otimizar, para cada mês, a operação de sistemas mediante a utilização de um algoritmo de rede de fluxo chamado “out of kilter”. Trata-se essencialmente de um algoritmo de programação linear desenvolvido para a solução de problemas de otimização de rede de fluxo (LIMA, 2004).

O MODSIM tem sido foco de pesquisa do Laboratório de Sistema de Suporte a Decisão da Escola Politécnica da USP, na área de desenvolvimento de técnicas de análise de sistemas de recursos hídricos. As adaptações realizadas no modelo e principalmente seu uso

nos mais variados sistemas de recursos hídricos e nas mais diversificadas regiões do país, indicam que o modelo constitui-se em uma ferramenta extremamente útil na análise de alocação da água em bacias complexas (Porto, 1997 e 1999; Souza Filho e Porto, 1997; Azevedo et al., 2002; Azevedo et al., 1998; Roberto e Porto, 1999 e 2001).

Embora modelos baseados em rede de fluxo sejam extremamente vantajosos, eles apresentam limitações (ROBERTO, 2002):

- Os algoritmos de rede de fluxo otimizam apenas sistemas lineares;
- A função objetivo é pré-definida e, portanto, não pode ser livremente especificada pelo usuário;
- Estes algoritmos admitem, também, apenas os dois tipos de restrições: a conservação da massa nos nós e a limitação do fluxo nos arcos.
- A otimização é executada em cada intervalo de tempo, ou seja, não se garante o ótimo global para um período de “n” intervalos de tempo.

### **3.3 – MODELOS DE OTIMIZAÇÃO**

Em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos, os problemas que exigem uma resposta à pergunta “como escolher a alternativa ótima” que maximize um índice de eficiência têm solução através de modelos de otimização (WURBS, 1993).

Deve-se ao “Harvard Water Program” a ação pioneira de introduzir esse tipo de abordagem em planejamento e gestão dos recursos hídricos. Yeh (1985) aponta que os mais importantes avanços no campo da engenharia de recursos hídricos foram o desenvolvimento e adoção de técnicas de otimização para o planejamento e gerenciamento de sistemas complexos de recursos hídricos.

As técnicas de otimização buscam identificar a solução que otimize uma determinada função objetivo, que representa matematicamente os objetivos de um sistema a serem melhorados, ordenando-os em relação a sua atratividade. Elas têm, entre suas restrições, a representação do modelo matemático que simula o comportamento do sistema. No entanto, este modelo deverá ser descrito, preferencialmente, por equações mais simples e menos complexas devido à solução do problema requerer que sejam resolvidos todos os sistemas de equações associados a cada intervalo de tempo simultaneamente, num processo iterativo, que aumenta, em muito, os requerimentos de memória e esforço computacional. Isso porque, no

processo decisório da busca da melhor solução, uma mudança na variável de decisão num instante  $t$  afetará todas as variáveis em tempos subsequentes. Apesar das hipóteses simplificadoras necessárias à representação do sistema parecer ser a principal desvantagem dos métodos de otimização por, aparentemente, causar um distanciamento entre o modelo o sistema real; eles levam vantagens sobre os métodos de simulação quando da busca de melhorias no desempenho do sistema, pois a busca de uma solução “otimizada” via métodos de simulação teria que ser feita na base da tentativa e erro.

A escolha da técnica a ser usada depende da forma e propriedades matemáticas da função objetivo e restrições (MATEUS e LUNA, 1986; DAHLQUIST e BJORCK, 1974).

Segundo Simonovic (1992), a função objetivo de um problema de otimização representa uma forma de valoração do nível de desempenho obtido por mudanças específicas num conjunto de variáveis de decisão, as quais definem como um sistema está para ser operado. Muitos aspectos podem ser inseridos em sua definição, como:

- custos e prejuízos;
- lucros, benefícios diretos ou indiretos;
- indicadores econômicos e de desenvolvimento;
- funções estritamente matemáticas, como erros e desvios, calibração de parâmetros de modelos;
- indicadores sociais; etc.

As restrições, representadas também por expressões matemáticas, têm a finalidade de forçar o modelo de otimização a obedecer a leis físicas, exigências operacionais, sócio-econômicas e políticas, entre outras. No caso de reservatórios, as restrições típicas, por exemplo, envolvem a equação de conservação da massa; descargas máximas e mínimas; limitações técnicas e operacionais de equipamentos hidro-mecânicos; obrigações contratuais, legais e institucionais. Em geral, o modelo de otimização é constituído por uma função objetivo, em que se deseja maximizar ou minimizar, e de funções de restrição que, determinam a região viável das variáveis de decisão.

A maioria dos modelos otimizantes é baseada em algum tipo de programação matemática, sendo que uma classificação básica das técnicas de otimização é dada por:

- Programação Linear (PL);
- Programação Dinâmica (PD);
- Programação Não-Linear (PNL) e



- Métodos Heurísticos (Algoritmos genéticos, redes neurais, lógica fuzzy, etc.).

Ros e Barros (2003) ressaltam que cada uma dessas técnicas pode ser resolvida de forma determinística ou estocástica, implícita ou explícita. A otimização determinística utiliza como variáveis de entrada, séries históricas, dados observados (as condições hidrológicas são perfeitamente conhecidas); a otimização estocástica implícita utiliza como variáveis de entrada séries geradas sinteticamente ou por métodos de previsão, ou seja, com base na série histórica; a otimização estocástica explícita utiliza na formulação da otimização procedimentos estocásticos aplicados à série histórica original como variável de entrada (a otimização é realizada sem a presunção do perfeito conhecimento de eventos futuros).

### **3.3.1 – PROGRAMAÇÃO LINEAR**

A PL é a técnica de otimização que mais se desenvolveu e uma das mais aplicadas em gerenciamento de recursos hídricos, além de ser considerada por alguns autores como um dos mais importantes avanços científicos da segunda metade do século XX (BARBOSA, 2002; SIMONOVIC, 1992).

O termo linear, como o próprio nome diz, refere-se à necessidade de haver relações lineares entre as variáveis, traduzidas pelas equações que caracterizam o problema. Mesmo quando as relações são não-lineares, a programação linear tem sido empregada com o auxílio de processos de linearização de funções ou através de um procedimento iterativo.

Yeh (1985) e Labadie (2004) apontam as seguintes vantagens da PL: (i) a habilidade para se ajustar e resolver problemas de grandes dimensões; (ii) atinge valores ótimos globais; (iii) a não necessidade de uma política inicial de operação dos reservatórios; (iv) teoria da dualidade bem desenvolvida para a análise de sensibilidade; (v) a existência de pacotes computacionais prontos para resolução de problemas.

O Método Simplex e suas variações (e.g.: Simplex Revisado e Simplex Dual) têm sido os mais utilizados na solução de PL aplicada a sistemas de recursos hídricos. Atualmente há algoritmos mais eficientes do que o método Simplex, como o Método do Ponto Interior, o Método Primal-dual, para a resolução de problemas de grande escala.

Barbosa (2002) afirma ainda que as razões da grande utilização da PL na área de recursos hídricos estão na flexibilidade de sua adaptação a uma grande variedade de problemas e maior facilidade de entendimento.

As aplicações pioneiras da PL na área de recursos hídricos remontam à década de 1960, no contexto dos trabalhos do Harvard Water Resources Group, especificamente num problema de gerenciamento de água subterrânea (Barbosa, 2002). A primeira aplicação da PL em problemas de operação determinística de reservatório foi feita em 1962, sendo usada para um problema simplificado de um reservatório sem armazenamento extra-anual (DORFMAN, apud SIMONOVIC, 1992).

Em obras como as de Braga (1987) e Barbosa (2002) são apresentadas aplicações de PL usando-se de pacotes computacionais específicos para este caso, como o SIMPLEX, o LINDO, o EXCEL, o MINUS e o GAMS.

Crawley e Dandy (1993) apresentaram e aplicaram um modelo determinístico de PL para planejamento e operação mensal do sistema de reservatórios que abastece a cidade de Adelaide, Austrália, visando à minimização dos custos de bombeamento sujeito à manutenção de níveis de armazenamento nas represas.

Yazicigil et al. (1983) utilizaram a programação linear para construir um modelo de otimização para operação da bacia do Green River em Kentucky, EUA. A programação linear foi utilizada por Simonovic e Burn (1989) para a mesma bacia. As funções objetivos não lineares foram linearizadas e os autores desenvolveram uma metodologia que determinava o horizonte de operação ótimo em tempo real.

Kuczera (1989) apresentou uma formulação baseada em programas lineares de rede para determinar a liberação de água em um sistema de múltiplos reservatórios. Uma metodologia que usava tanto programação linear quanto simulação foi desenvolvida por Martin (1995) para o controle de reservatório na geração de energia elétrica no Colorado River, Texas. Belaineh et al. (1999) também aplicaram simulação e programação linear num estudo que considerava a interação entre gerenciamento de reservatórios e aquíferos.

Mousavi e Ramamurthy (2000) apresentaram duas técnicas potenciais para se otimizar sistemas de abastecimento de água grandes e complexos. Este modelo utiliza aplicações da teoria do controle ótimo e da programação linear de sucessivas penalidades. Foi feita uma comparação com um modelo existente de programação dinâmica que foi aplicado em um sistema de múltiplos reservatórios.

Righetto e Guimarães Filho (2003) apresentaram um estudo preliminar da operação dos reservatórios Cruzeta e Armando Ribeiro Gonçalves, RN, via programação linear, no sentido de verificar a magnitude de oferta hídrica destes reservatórios quando se dispõe de vazão firme proveniente de fonte exógena.

Loáiciga (2002) desenvolveu um modelo de otimização, utilizando PL, com o objetivo de quantificar o impacto da evaporação e das chuvas na capacidade ótima do reservatório e no desempenho de sistema. O modelo foi idealizado para reservatórios que sofrem intensos impactos da evaporação, permitindo a utilização de uma boa variedade de funções objetivo. O modelo foi testado, com sucesso, na bacia do rio Santa Ynez, Califórnia-EUA.

Feiring et al. (1998) aplicaram um modelo de programação estocástica em um sistema de fornecimento de água para irrigação e geração de energia. O ponto ótimo do sistema foi encontrado através da PL e a solução obtida através de decisões em múltiplos estágios. Essa aproximação permite que variáveis aleatórias sejam incorporadas no problema programação linear.

Francato e Barbosa (1996) apresentaram um estudo dos diferentes fatores que influenciam diretamente nos resultados fornecidos pelos modelos de otimização, com horizonte de planejamento anual e intervalo de discretização mensal, obtidos através de um modelo capaz de considerar todo o horizonte no processo de otimização. O modelo foi aplicado em um sistema que compreende as usinas hidroelétricas de Embarcação e Itumbiara, na bacia do Rio Paranaíba, utilizando sucessivas iterações da programação linear, contemplando todo o horizonte de planejamento.

Mohan e Raipure (1992) desenvolveram um modelo de programação linear multiobjetivo para ser aplicado em um sistema de 5 reservatórios, denominado Sistema Chaliyar, localizado em Kerala, na Índia. Os objetivos do modelo são as maximizações do fornecimento de água para irrigação e da produção de energia hidrelétrica, sujeitos às limitações físicas, às restrições ambientais e à garantia da continuidade do armazenamento.

Carvalho et al. (2000) selecionaram culturas e os meses de plantio que proporcionassem a maximização da renda do agricultor e da utilização de recursos hídricos do perímetro irrigado do Gorutuba, utilizando-se um modelo de programação linear, cuja função-objetivo visou maximizar as receitas líquidas mensais em função da área cultivada com as culturas normalmente utilizadas na região.

Kuo et al. (2003) fizeram um estudo de comparação de três técnicas de otimização para o planejamento de um projeto de irrigação. Essas três técnicas são aplicadas para o planejamento de um projeto de irrigação de 394,6 ha na região de Delta, Utah, para otimização de benefícios econômicos, simulação da demanda de água, e estimativa da porcentagem da área irrigada.

Dantas Neto (1994) apresentou, em sua tese de doutorado, um trabalho sobre modelos de programação linear que teve como objetivo desenvolver e comparar dois sistemas de

equações matemáticas baseados na resposta das culturas a água. Para tal, empregou-se a formulação padrão da programação linear, utilizando dois modelos, onde um considera a lâmina de água fixa e o outro as lâminas de água alternativas. A função objetivo utilizada neste trabalho foi a maximização da receita líquida de projeto e as restrições utilizadas foram as limitações de área, água e produção das culturas.

Curi e Curi (2001) desenvolveram e apresentaram o modelo CISDERGO - “Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater (Optimal) Operation”, baseado em programação linear recursiva, destinado a maximizar múltiplos benefícios ou objetivos relativos ao uso da água de reservatório, poços e rios, em conjunção com o planejamento ou gerenciamento de perímetros irrigados. Aplicações do modelo são apresentadas no artigo de Almeida et al. (2001), Albuquerque et al. (2003a) e Cunha (1999).

Curi et al. (2004) aplicaram a técnica de programação linear para a maximização da receita líquida sob condições de variações hídricas e econômicas em um perímetro irrigado no sertão da Paraíba, considerando, inclusive, a interferência do custo da água bruta na viabilidade da produção das culturas.

A PL foi utilizada no desenvolvimento de trabalhos para otimizar sistemas de produção agrícola, considerando cultivo único ou múltiplos, submetidos ou não a programas de irrigação específicos (e.g.: Matanga e Mariño, 1979; Kumar e Khepar, 1980; Mannocchi e Mecarelli, 1994; Arce, 1990; Oliveira e Lanna, 1997).

Louks et al. (1981) apresentam algumas formulações da PL estocástica para sistemas de recursos hídricos. A metodologia é aplicada a um sistema de seis reservatórios no rio Missouri (EUA) e os resultados consideram os aspectos da aplicabilidade e das limitações na utilização da otimização determinística para sistemas de grande porte.

Uma aplicação comparando otimização determinística e estocástica é apresentada por Lund e Ferreira (1996). Yeh (1985), Lima e Lanna (2005), Wurbs (1996) e Labadie (2004) apontam outras importantes aplicações de PL determinísticas e estocásticas que demonstram a utilidade desta técnica.

### **3.3.1.1 – ARTIFÍCIOS DE LINEARIZAÇÃO**

Conforme mencionado, a principal restrição da aplicação da PL é a exigência de linearidade das funções, o que não se verifica em muitos problemas de recursos hídricos (BARBOSA, 2002).

### 3.3.1.1.1 – ARTIFÍCIO DE LINEARIZAÇÃO POR SEGMENTOS

Uma das formas de superar essa dificuldade é trabalhar com a linearização das funções objetivos não-lineares por partes, através do artifício denominado Artifício de Linearização por Segmentos. Este artifício é empregado para funções objetivo não-lineares convexas, para problemas de minimização, ou côncavas, para problemas de maximização.

O método consiste em dividir a função não-linear em vários segmentos de reta. A Figura 3.1 apresenta uma função objetivo quadrática e linearizada pelo artifício de linearização por segmentos, para uma demanda  $D$ , em um mês qualquer, dada por:

$$\min FO = \left(1 - \frac{x}{D}\right)^2 \quad (3.1)$$

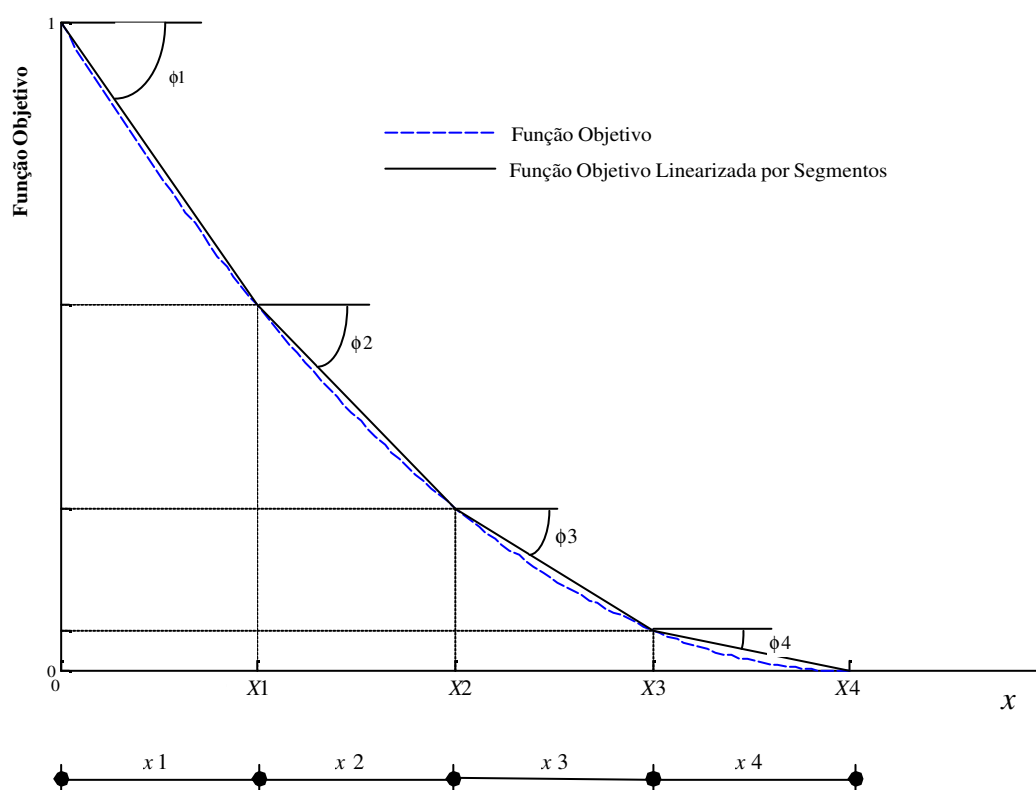


Figura 3.1 – Função objetivo quadrática e linearizada pelo artifício de linearização por segmentos.

A função objetivo linearizada  $FO^*$  e a variável de decisão  $x$  serão dado por:

$$FO^* = 1 + \phi_1 \cdot x_1 + \phi_2 \cdot x_2 + \phi_3 \cdot x_3 + \phi_4 \cdot x_4 \quad (3.2)$$

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad (3.3)$$

onde,

$\phi_1, \dots, \phi_4$  – declividade da reta em cada trecho segmentado;

$x_1, \dots, x_4$  – trecho segmentado da variável de decisão.

Os valores de cada trecho segmentado é limitado pelos pontos de quebra  $X_1, \dots, X_4$ .

Logo:

$$0 \leq x_1 \leq X_1 \quad (3.4)$$

$$0 \leq x_2 \leq X_2 - X_1 \quad (3.5)$$

Tj -26.2

Quanto menores os segmentos lineares melhor será a representação da função. Porém, a cada segmento linearizado corresponde uma nova variável, fazendo crescer a dimensão do problema à medida que se criam novos segmentos. Braga (1987) cita que o esforço computacional de um problema de programação linear cresce com o cubo do número de restrições e, conseqüentemente, um balanço deve ser procurado na definição do número de pontos de discretização da função.

### 3.3.1.1.2 – PROGRAMAÇÃO SEPARÁVEL POR PARTES

Outra forma de tratar problemas desse tipo é utilizar método da Programação Linear Separável por Partes (PLSP). Marins e Perin Filho (1996) apud Schardong (2006) apresentam várias aplicações desse método. Os autores observam que os modelos lineares equivalentes obtidos possuem um número muito maior de variáveis e restrições que o modelo linear original, pois estes métodos definem ao menos uma variável e/ou restrição adicional para cada termo linear de todas as parcelas que formam a função objetivo.

A estratégia de transformar o problema original em um problema equivalente de PLSP por meio da redefinição de variáveis e então aplicar um método de PL é prática comum. Entretanto, esta transformação, assim como no artifício de linearização por segmentos, aumenta o número de variáveis e reduz a velocidade de convergência.

Um problema é dito separável quando pode ser expresso como soma de funções de variáveis simples. Logo, a linearização da função pode ser feita introduzindo pontos de grade, dividindo-a em trechos lineares.

Existem alguns métodos de linearização conhecidos, dentre eles: o “método  $\lambda$ ”, o “método d”, “método  $\gamma$ ” e o “método  $\sigma$ ” e são descritos e detalhados em Ho (1985), Fourer (1992), Dantzig (1963, 1997) e Stefanov (2001) apud Schardong (2006).

O método  $\lambda$  tem por característica introduzir “pontos de quebra” nas variáveis de decisão, espaçados uniformemente. Essa característica torna o método facilmente aplicável à função objetivo não linear quadrática.

Fazendo a linearização da Equação (3.1), utilizando o “método  $\lambda$ ”, chegamos às seguintes expressões para a função objetivo linearizada  $FO^*$  e da variável de decisão  $x$ :

$$x = \lambda_1 \cdot X_1 + \lambda_2 \cdot X_2 + \lambda_3 \cdot X_3 + \lambda_4 \cdot X_4 \quad (3.8)$$

$$FO = \lambda_1 \cdot FO(X_1) + \lambda_2 \cdot FO(X_2) + \lambda_3 \cdot FO(X_3) + \lambda_4 \cdot FO(X_4) \quad (3.9)$$

Os valores  $\lambda$  devem atender as seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1 \quad (3.10)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (3.11)$$

No máximo dois  $\lambda$ 's adjacentes devem ser positivos e a soma deve ser igual a 1. Segundo Stefanov (2001) apud Schardong (2006), quando a função linearizada é convexa existe a garantia de que no máximo dois  $\lambda$ 's adjacentes são positivos, sem que sejam necessárias alterações nos algoritmos de resolução do problema linear.

### 3.3.1.1.3 – PROGRAMAÇÃO LINEAR SEQUENCIAL OU SUCESSIVA

O método da Programação Linear Sequencial (ou sucessiva) é um método que utiliza Programação Linear em sua busca do ótimo de forma iterativa, como o seu próprio nome sugere. Após a determinação de um ponto inicial, a função objetivo e suas restrições são linearizadas em torno deste ponto e o problema pode ser resolvido com a Programação Linear propriamente dita. A solução apresentada pela PL pode ser usada com um novo ponto em torno do qual a função objetivo e suas restrições serão novamente linearizadas e esse processo continua até que o critério de convergência seja atingido.

Barbosa (2002) apresenta um exemplo ilustrativo que ocorre nos problemas de operação de usinas hidrelétricas, onde a potência máxima  $P$  é em função do volume armazenado  $V$ , através de uma relação tipicamente não linear, como apresentado na Figura 3.2.

No início de um período, em que o reservatório tem um volume armazenado  $V_i$ , admite-se que a potência máxima seja  $P_i$ . Roda-se o modelo da PL, o qual determina uma vazão turbinada ótima que, ao atender a restrição do balanço hídrico, produz um armazenamento volumétrico ao final do período  $i$  igual a  $V_{i+1}$ . Durante o período  $i$  o volume variou de  $V_i$  para  $V_{i+1}$  e, portanto, é mais correto corrigir a potência máxima em função do volume médio  $\bar{V}$  entre  $V_i$  e  $V_{i+1}$ . Com este novo valor de potência máxima, pode-se rodar novamente o modelo de PL e, assim, sucessivamente, repete-se o processo até que os resultados de uma rodada sejam muito próximos dos resultados da rodada anterior, o que indica a convergência do processo iterativo.



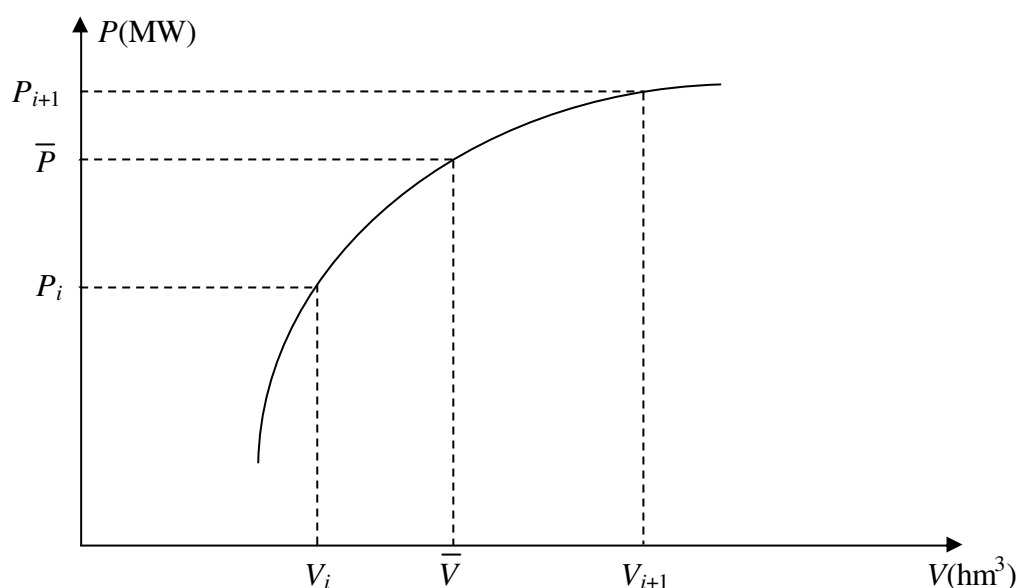


Figura 3.2 – Ilustração do procedimento iterativo do uso da PL.

Labadie (2004) apresenta algumas aplicações dessa técnica com destaque para os trabalhos de Martin (1983), Lund e Ferreira (1996) e Barros et al. (2003).

### 3.3.2 – PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

A PD é um procedimento para a otimização de processos de decisão em vários estágios, sendo usada extensivamente na otimização de sistemas de recursos hídricos (YEH 1985). Segundo Braga (1997), a PD é um método ideal para solucionar problemas que podem ser vistos como processos de decisão seqüencial em vários estágios, não significando que um “estágio” seja necessariamente um intervalo de tempo, mas pode representar atividades, localidades, etc., sendo mais bem entendido como um ponto do processo no qual uma decisão deve ser tomada.

Baseia-se, a PD, no princípio da otimalidade, que implica um processo de decisão seqüencial no qual um problema envolvendo diversas variáveis é repartido numa seqüência de etapas mais simples, cada uma dessas envolvendo uma variável singular (Simonovic, 1992). A otimalidade pressupõe que a política para os estágios remanescentes independe das políticas de decisão adotadas em estágios anteriores. A PD se aproveita dessa característica para decompor um problema amplo em vários sub-problemas menores de um estágio cada podendo manipular funções não-lineares, não-convexas e descontínuas.

A popularidade e o sucesso dessa técnica podem ser atribuídos à vantagem de que as características estocásticas e não lineares que caracterizam um grande número de sistemas de recursos hídricos, podem ser incorporadas numa formulação de PD. Porém tem uma deficiência se aplicada a sistema de múltiplos reservatórios, chamada “Maldição da dimensionalidade”, decorrente da qual o tempo computacional cresce exponencialmente com o número de variáveis de estado (YEH, 1985 e LABADIE, 2004).

Lima e Lanna (2005) e Labadie (2004) apresentam diversos algoritmos de PD e suas aplicações em sistemas de recursos hídricos, dando ênfase aos problemas de operação de reservatórios.

Aplicações de programação dinâmica na operação de reservatório são ilustradas nos trabalhos de Young (1967), Houck (1982), Karamouz et al. (1992), Mujumdar e Ramesh (1997), Perera e Codner (1996), Lima e Lanna (2001) entre outros.

### **3.3.3 – PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR**

A Programação Não-Linear (PNL) não goza da popularidade que a PL e a PD têm na análise de sistemas de recursos hídricos. O fato é explicado em razão de que o processo de otimização é usualmente lento, requerendo maior tempo de processamento, quando comparado com outros métodos, uma vez que a matemática envolvida nos modelos não lineares é muito mais complicada do que nos casos de programação linear (Yeh, 1985). O desenvolvimento crescente dos recursos computacionais, embora o artifício da linearização ainda seja bastante utilizado, vem facilitando a aplicação da PNL na prática de solução de problemas de sistemas de recursos hídricos, sendo já extensivamente tratada na literatura (SIMONOVIC, 1992).

Segundo Cirilo (2002), a PNL pode ser classificada quanto aos métodos utilizados na solução dos problemas em:

- técnicas analíticas - as soluções ótimas são obtidas pela resolução de sistemas de equações, com apoio de derivadas, podendo a otimização ser reduzida à procura das raízes desses sistemas;
- técnicas de busca numérica - esses métodos usam informações passadas em um processo iterativo, para gerar melhores soluções no processo de otimização. Esse tipo de técnica de otimização permite ainda o emprego de métodos numéricos para resolver problemas dos quais não se conhece a solução analítica.

Segundo Labadie (2004), os algoritmos de PNL, geralmente considerados como os mais poderosos e robustos, são: (i) a programação linear sucessiva (ou sequencial); (ii) a programação quadrática sucessiva (ou método Lagrangeano projetado); (iii) o método Lagrangeano aumentado (ou método dos multiplicadores), e (iv) o método do gradiente reduzido generalizado. Vários programas computacionais estão disponíveis, atualmente, para a resolução de problemas de PNL. Na obra de Cirilo (2002) estão citados alguns programas como o ADS, da Universidade da Califórnia; o GAMS, da GAMS Development Corporation; o LANCELOT, o SOLVER do EXCEL, e outros.

A grande vantagem da PNL é a sua abrangência, oferecendo uma formulação matemática mais geral, não necessitando de simplificações, o que, uma vez elaborado o modelo matemático que descreve o sistema a otimizar, aumenta a precisão nos resultados a serem alcançados (CIRILO, 1997; SIMONOVIC, 1992). Como desvantagem, destaca-se a incerteza de que, em muitos casos, a solução ótima obtida não é a melhor dentre todas as soluções ótimas no espaço viável, dado à natureza de não linearidade dos problemas.

Exemplos de programação não-linear aplicada na operação de reservatórios são os estudos de Chu e Yeh (1978), para operação horária de reservatórios em tempo real, e de Sinha et al. (1999), no qual um algoritmo baseado no método do gradiente foi utilizado. Essa técnica foi utilizada por Celeste et al. (1996) e Teegavarapu e Simonovic (2000). Curi et al. (1997), usaram PNL para estudar a alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arcoverde, localizado na Zona Sertão do estado da Paraíba, para fins de irrigação. Ros e Barros (2003) empregaram PNL com o objetivo de otimizar a operação de oito reservatórios, para fins hidroenergéticos, os quais formam o Sistema Paranapanema, localizado no sul do Estado de São Paulo, situado na Bacia do rio Paraná

O modelo de otimização ORNAP (*Optimal Reservoir Network Analysis Program*), desenvolvido por Curi e Curi (1999), é baseado em programação não-linear, que trabalha a nível mensal. O processo de otimização foi resolvido numericamente, através de programação não-linear, contemplando uma função objetivo para a maximização da receita líquida anual advinda da agricultura irrigada, avaliando-se, também, o retorno financeiro da piscicultura extensiva nos reservatórios. Todos os requerimentos de ordem legal, sócio-econômicos e de sustentabilidade hídrica, além das restrições físicas e condições climáticas, foram considerados no modelo. Foi utilizado, acoplado a modelos de otimização de áreas irrigadas e usos de água para piscicultura, o controle de cheias e o abastecimento urbano, com resultados bastante satisfatórios quando aplicado a esta classe de problemas.

Barbosa et al. (2001) utilizou o modelo para estudar o comportamento da operação de um sistema de 3 reservatórios em paralelo sujeitos a usos múltiplos, localizados na Bacia do Capibaribe, no estado Pernambuco. Andrade et al. (2001) também fez uso do modelo para determinar a operação ótima de um sistema hídrico formado por 2 reservatórios em série e 3 perímetros de irrigação, localizados na bacia do Capibaribe, em Pernambuco. Celeste et al. (2004) aplicaram o ORNAP para estudar o potencial hídrico de um sistema de sete reservatórios agregados na bacia hidrográfica do rio Piancó para fins de agricultura irrigada. Albuquerque et al. (2003b) realizaram um estudo sobre o planejamento ótimo e integrado de cinco reservatórios inseridos na parte alta da bacia hidrográfica do rio Capibaribe do Estado de Pernambuco, utilizando-se da programação linear e não-linear, ensejando a maximização da receita líquida advinda da agricultura irrigada e da piscicultura extensiva. Outras aplicações deste modelo podem ser vistas, entre outros, nos trabalhos de Andrade et al. (2002); Melo et al. (2004), Silva (2004), e Lima (2004).

Importantes contribuições sobre modelos de PNL e suas aplicações em sistemas de reservatórios estão apresentadas nos trabalhos de Yeh (1985), Simonovic (1992), Wurbs (1993), Labadie (2004) e Lima e Lanna (2005).

### **3.4 – OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

Hoje em dia o processo decisório na área de recursos hídricos envolve múltiplos objetivos e múltiplos decisores, estabelecendo conflitos de interesses entre grupos de visões distintas acerca de metas a serem adotadas no planejamento e gestão dos recursos hídricos. A análise multiobjetivo apresenta conceitos para o tratamento e quantificação dos processos de tomada de decisão com múltiplos objetivos (BRAGA e GOBETTI, 2002).

Na análise multiobjetivo não existe um ótimo global, como na busca do máximo ou mínimo de uma função, e sim um conjunto de ótimos que satisfazem, de formas diferentes, os diferentes objetivos envolvidos na análise.

Dependendo da forma em que são utilizadas as preferências do decisor e da natureza do problema, as técnicas de análise multiobjetivo podem ser divididas da seguinte maneira (COHON e MARKS, 1975):

1. Técnicas que geram o conjunto de soluções não dominadas;
2. Técnicas que utilizam uma articulação antecipada das preferências; e
3. Técnicas que utilizam uma articulação progressiva das preferências.

As técnicas que geram o conjunto de soluções não dominadas consideram um vetor de funções objetivos e, mediante tal vetor, geram o conjunto das soluções não dominadas. Uma solução não dominada ou não inferior é definida como uma solução multiobjetivo que não pode ser melhorada em um objetivo sem empiorar um ou outros. Não é considerada no processo as preferências do decisor, tratando-se somente com as restrições físicas do problema. As técnicas que utilizam uma articulação antecipada das preferências solicitam, anteriormente, a resolução do problema, a opinião do decisor a respeito das trocas possíveis entre os objetivos e dos valores relativos destes. As variáveis de decisão podem ser contínuas ou discretas, em função do tipo de problema. Algumas técnicas são aplicadas somente a problemas contínuos ou discretos, enquanto outras podem ser usadas em ambas as situações. As técnicas que utilizam articulação progressiva das preferências têm a característica de perguntar ao decisor, assim que uma solução é alcançada, se o nível atingido de atendimento dos objetivos é satisfatório e, no caso negativo, o problema é modificado e resolvido novamente. (BRAGA e GOBETTI, 2002).

As técnicas mais utilizadas que geram o conjunto de soluções não dominadas são (BRAVO et al. 2005):

- a) O método das ponderações;
- b) O método das restrições; e
- c) Os algoritmos genéticos multiobjetivo.

No que diz respeito à utilização destes métodos na otimização da operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos, o método das ponderações é o mais utilizado e mais simples na sua formulação, mas precisa de uma unidade comum entre os diferentes objetivos. Para lograr isso, são utilizados fatores implícitos cujos valores, muitas vezes, são difíceis de justificar. O método das restrições apresenta bons resultados e não precisa de uma unidade comum nos diferentes objetivos, mas só podem ser considerados três objetivos, já que um número superior torna muito ineficiente ao algoritmo de resolução. Por enquanto, os algoritmos genéticos multiobjetivo superam ambos os inconvenientes ao não precisar dessas transformações, já que trabalham com os valores das funções objetivo em suas verdadeiras unidades e não se vê prejudicado seu desempenho pelo incremento do número de funções objetivo (BRAVO et al., 2005), porém as desvantagens de se utilizar algoritmos genéticos esta na dificuldade de levar em conta explicitamente às restrições (principalmente as desigualdades), de manter soluções viáveis na população (LABADIE, 2004) e alto requerimento de tempo computacional para atingir uma solução.

### 3.4.1 – MÉTODO DAS PONDERAÇÕES

Este método produz o conjunto de soluções não dominadas completo tanto no espaço das decisões como no espaço dos objetivos.

Os objetivos dados por  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$  são ponderados através de pesos  $w_i$  para fornecer um novo problema dado por:

$$\max \text{ ou } \min \sum_{i=1}^n w_i \times f_i(x) \quad (3.12)$$

onde,

$w_i$  – fator de ponderação do objetivo  $i$  (maior que zero);

$f_i(x)$  – função objetivo  $i$ .

Os fatores de ponderação são variados de forma paramétrica até que se obtenha o conjunto de soluções não dominadas ( $x^*$ ). A melhor solução de compromisso terá um conjunto  $w_1, w_2, \dots, w_n$  que indicara a importância relativa de cada objetivo.

### 3.4.2 – MÉTODO DAS RESTRIÇÕES

O método das restrições é teoricamente equivalente ao método da ponderação, uma vez que, também, gera o conjunto de soluções não dominadas. Como o próprio nome diz, elege-se um objetivo  $j$  para ser otimizado deixando os demais ( $n - j$ ) objetivos como restrições através de:

$$\max \text{ ou } \min f_j(x) \quad (3.13)$$

sujeito a

$$f_i(x) = I_i \quad \text{para todo } i \neq j \quad (3.14)$$

onde,

$I_i$  – é um limite inferior do objetivo  $i$ .

Variando-se de forma paramétrica o limite inferior  $I_i$ , traça-se o conjunto de soluções não dominadas.

A carga computacional destas técnicas de geração de soluções não inferiores é elevada e sua aplicação se torna praticamente inviável quando o número de objetivos é maior a três (BRAVO et al., 2005).

Ko et al (1992) apud Bravo et al. (2005) avaliaram estas duas técnicas no sistema de reservatórios do rio Han, na Korea. Foram utilizados três critérios visando objetivos de geração de energia. Os autores concluíram que, para a aplicação a problemas de múltiplos reservatórios e múltiplos usos o método das restrições apresenta um desempenho melhor que o método das restrições. A uma conclusão similar chegou Brandão (2004) apud Bravo et al. (2005) ao analisar o sistema de reservatórios da bacia do rio São Francisco, no Brasil. Este autor declara que, apesar do método das restrições serem mais fácil de ser aplicado, só permite a análise de três usos. O método das ponderações permite avaliar um número maior

## CAPITULO IV

### MODELO DESENVOLVIDO EM PROGRAMAÇÃO LINEAR

#### 4.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A revisão bibliográfica realizada neste trabalho mostra que várias são as metodologias de otimização que podem ser aplicadas na análise de sistemas de reservatórios.

Fatores como a configuração do sistema a ser analisado (número de reservatórios e suas interligações), os tipos de uso dos recursos hídricos do sistema, o estágio de aplicação (diagnóstico e planejamento) e os cenários (padrão de afluência, operação do sistema, prioridades de atendimento das demandas, volumes meta dos reservatórios, etc) influenciam na escolha da metodologia a ser adotada. Ressaltando o fato de que, para o mesmo sistema, diferentes metodologias podem gerar resultados de qualidade idêntica, sendo, portanto, a escolha baseada na experiência e/ou nos objetivos do próprio autor da pesquisa (LIMA, 2004).

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver um modelo de otimização para prover um estudo da operação integrada de sistemas de reservatórios e atendimento as demandas sob a ótica da determinação da alocação ótima dos recursos hídricos, entre os múltiplos usos via uma análise multiobjetivo.

O modelo desenvolvido é baseado em programação linear, onde foi utilizado o *Toolbox Optimization* do software MATLAB 6.5 com o Método do Ponto Interior para a busca da solução ótima. Para tanto, linearizações apropriadas das não-linearidades intrínsecas aos processos de cada um de seus componentes tiveram que ser pesquisadas e implementadas através do uso combinado do Artífício de Linearização por Segmentos e da Programação Linear Seqüencial.

O modelo se destina a otimizar os múltiplos usos de um sistema de reservatórios, com a implantação ou melhoramento da operação de um ou mais perímetros irrigados. O mesmo trabalha com variáveis relacionadas aos elementos naturais, tais como: hidroclimáticos e hidroagrícolas, como também outras variáveis (demandas hídricas, características físicas dos componentes, etc) identificadas no estudo do sistema hídrico. Para estes elementos, são definidas as informações necessárias ao modelo para a entrada de dados, envolvendo: os reservatórios, as demandas, calhas dos rios e perímetros irrigados. A operação do reservatório



e dos nós é fundamentada na equação do balanço hídrico destes, mesmo quando se faz uso de demandas fixas e variáveis. A demanda hídrica de um perímetro irrigado é determinada com base na necessidade suplementar líquida de irrigação, estabelecidas através do balanço hídrico no solo para as culturas selecionadas, estando a área a ser plantada limitada pelos demais usos do reservatório. O modelo também leva em consideração os diferentes tipos de sistemas de irrigação e suas necessidades de altura manométrica, as áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura, os custos de água e de produção, os aspectos econômicos e a combinação ou variação nas fontes de bombeamento e a quantidade de água captada.

Como se trata de uma otimização multiobjetivo, utilizou-se o Método das Ponderações na qual cada função objetivo é normalizada sendo atribuídos pesos para definir as prioridades de atendimento.

## **4.2 – FUNÇÕES OBJETIVO**

Wurbs (1996) estabelece que o coração do modelo de otimização é sua função objetivo, a qual representa uma medida de desempenho do sistema. Ros e Barros (2003) concluíram que a escolha da função objetivo a ser otimizada interfere na política de operação e deve ser definida com cuidado.

A função objetivo especificada permite a aferição do desempenho do modelo e esta sujeita a inúmeras restrições, representadas por equações de natureza linear e não linear, que traduz as limitações físicas dos reservatórios, perímetros irrigados e equipamentos hidráulicos, limitações hidrológicas, legais, econômicas e sociais, inerentes aos sistemas de usos múltiplos. As equações matemáticas representativas dessas limitações serão abordadas na seqüência.

### **4.2.1 – DEMANDA NAS TOMADA D'ÁGUA**

As tomadas d'água permitem a captação de água nos reservatórios e nos nós do sistema para atender determinados requerimentos de consumo.

Para o estabelecimento da função objetivo destinada a minimização do déficit do atendimento das demandas nas tomadas d'água dos reservatórios e dos nós do sistema estudou-se dois tipos de funções:

$$DTDQ = \sum_t \left( \frac{Dtr(t) - Qtr(t)}{Dtr(t)} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$DTDL = \sum_t \left| \frac{Dtr(t) - Qtr(t)}{Dtr(t)} \right| \quad (4.2)$$

onde,

$Dtr(t)$  – demanda requerida na tomada d'água no mês  $t$ ;

$Qtr(t)$  – vazão destinada ao atendimento da demanda na tomada d'água no mês  $t$ .

Para que a Equação 4.1 possa ser utilizada em PL, optou-se por linearizá-la através do Artifício de Linearização por Segmentos, dividindo a vazão destinada ao atendimento da demanda na tomada d'água, no mês  $t$ , em 4 segmentos iguais como mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Gráfico da função objetivo quadrática e linearizada por segmentos da demanda na tomada d'água do reservatório ou do nó no mês  $t$ .

Logo a função objetiva

$$\left( \frac{Dtr(t) - Qtr(t)}{Dtr(t)} \right)^2 = 1 + \sum_{i=1}^4 \phi tr_i(t) \cdot Qtr_i(t) \quad (4.3)$$

onde,

$i$  – indica os segmentos de vazão destinada ao atendimento na demanda na tomada d'água no mês  $t$ ,  $i = 1, \dots, 4$ ;

$\phi tr_i(t)$  – declividade da reta do segmento de reta  $i$  da vazão destinada ao atendimento da demanda na tomada d'água no mês  $t$ ;

$Qtr_i(t)$  – incremento da vazão destinada ao atendimento da demanda na tomada d'água do trecho segmentado  $i$ , no mês  $t$ , limitado por:

$$0 \leq Qtr_i(t) \leq 0,25 * Dtr(t) \quad (4.4)$$

Contudo o valor da vazão destinada ao atendimento da demanda na tomada d'água em um dado mês  $t$  será dado por:

$$Qtr(t) = \sum_{i=1}^4 Qtr_i(t) \quad (4.5)$$

Para avaliar quais das duas funções objetivo apresentavam melhor desempenho na operação do reservatório, desenvolveu-se um estudo para o reservatório Catolé II na qual se estipulou três cenários de demanda mensal, sendo comparados através dos índices de desempenho definidos por Hashimoto et al. (1982) que são: *Confiabilidade* – mede a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas; *Resiliência* – é a probabilidade de o sistema retornar ao estado satisfatório, uma vez que a falha ocorre; *Vulnerabilidade* – mede a magnitude das falhas a que o sistema está sujeito.

O período de operação utilizado foi de 10 anos (1975-1984), totalizando 120 meses de estudo. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores dos índices de Hashimoto et al. (1982) de cada função objetivo para diferentes níveis de demanda.

Demanda (hm <sup>3</sup> )	Confiabilidade		Resiliência		Vulnerabilidade	
	DTDQ	DTDL	DTDQ	DTDL	DTDQ	DTDL
1,00	0,13	0,44	0,01	0,10	0,61	0,89
0,50	0,17	0,78	0,01	0,19	0,31	0,87
0,35	0,83	0,96	0,10	0,40	0,24	0,81

Observa-se que a função linear (*DTDL*) apresenta melhores valores de confiabilidade e resiliência, porém a função quadrática (*DTDQ*) apresenta melhores valores de vulnerabilidade. Como as demandas para tomadas d'água são, normalmente, abastecimento humano e agricultura irrigada, é preferível uma baixa confiabilidade mas com uma baixa vulnerabilidade do que uma alta confiabilidade com uma alta vulnerabilidade, ou seja, é preferível que o sistema tenha muitas falhas mas com a baixa magnitude do que um sistema que tenha poucas falhas mas com magnitude que possam fazer com que setores de demanda do sistema entrem em colapso.

Deste modo, a função objetivo escolhida para a demanda nas tomadas d'água dos reservatórios e nos nós é a Equação 4.1 linearizada através do Artífício de Linearização por Segmentos, dividida em 4 segmentos iguais.

#### 4.2.2 – VAZÃO EFLUENTE DO RESERVATÓRIO

A vazão efluente dos reservatórios permite a regularização da vazão nos cursos d'água a jusante dos mesmos. A Equação 4.6 representa outra função objetivo do modelo que se destina a minimizar do déficit entre a vazão efluente liberada pelo reservatório e a vazão regularizável, vazão efluente mínima ou demanda ecológica, previamente estabelecida:

$$VER = \left| \frac{De(t) - Qe(t)}{De(t)} \right| \quad (4.6)$$

onde,

$De(t)$  – vazão regularizável, vazão efluente mínima ou demanda ecológica estabelecida para o mês  $t$ ;

$Qe(t)$  – vazão efluente liberada pelo reservatório no mês  $t$ .

#### 4.2.3 – VOLUME META DO RESERVATÓRIO

O volume meta se destina a manter o volume de água do reservatório em certo nível para atender certas demandas, como controle de cheias, recreação, piscicultura, ou geração de energia elétrica.

O modelo tem, também, como objetivo minimizar o déficit entre o volume de água do reservatório no final do mês  $t$  e o volume meta estabelecido neste mês, representada na Equação 4.7:

$$VMR = \sum_t \left( \frac{VRmeta(t) - VR(t)}{VRmeta(t)} \right)^2 \quad (4.7)$$

onde,

$VRmeta(t)$  – volume meta do reservatório no mês  $t$ ;

$VR(t)$  – volume de água do reservatório no final do mês  $t$ .

A Equação 4.7 foi linearizada através do Artífício de Linearização por Segmentos. A Figura 4.2 mostra um exemplo possível de linearização

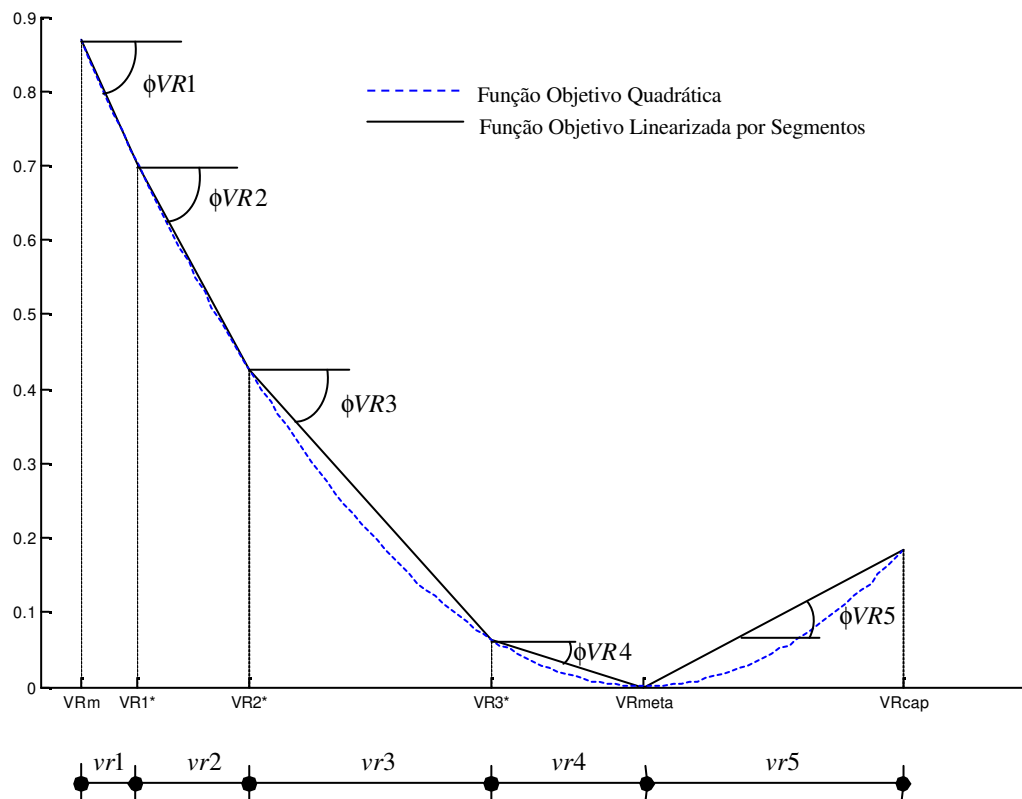


Figura 4.2 – Gráfico da função objetivo quadrática e linearizada por segmentos do volume meta do reservatório no mês  $t$ .

Logo a função objetiva quadrática ( $VMR$ ) será representada por:

$$\left( \frac{VRmeta(t) - VR(t)}{VRmeta(t)} \right)^2 = \left( \frac{VRmeta(t) - VRm}{VRmeta(t)} \right)^2 + \sum_{m=1}^{nm} \phi VR_m(t) \cdot vr_m(t) \quad (4.8)$$

onde,

$m$  – indica o segmento de cada trecho do volume de água do reservatório no mês  $t$ ,  $m = 1, \dots, nm$ , ( $nm$  = número de segmentos do volume de água do reservatório).

$\phi VR_m(t)$  – declividade do segmento de reta  $m$  do volume de água do reservatório no mês  $t$ ;

$vr_m(t)$  – incremento do volume de água do reservatório para o trecho segmentado  $m$ , no mês  $t$ .

Os volumes  $VR1^*$ ,  $VR2^*$ ,  $VR3^*$ , ..., assim como o volume mínimo,  $VRm$ , o volume meta,  $VRmeta$ , e a capacidade do reservatório,  $VRcap$ , são volumes de controle (pontos de quebra) que devem ser definidos anteriormente. Cada trecho segmentado  $m$  do volume de água do reservatório está limitado pelos volumes de controle.

Os volumes  $VR1^*$ ,  $VR2^*$ ,  $VR3^*$ , ..., podem ser volumes físicos pré-estabelecidos, como volume corresponde a cota de entrada do descarregador de fundo ou da cota de entrada da tomada d'água, bem como podem ser pontos da curva *cota-área-volume* de modo a se obter um bom ajuste linear da mesma.

Contudo, o valor do volume de água do reservatório, em um dado mês  $t$ , será dado por:

$$VR(t) = VRm(t) + \sum_{m=1}^{nm} vr_m(t) \quad (4.9)$$

#### 4.2.4 – RECEITA LÍQUIDA DA AGRICULTURA IRRIGADA

Uma das funções objetivo do modelo é a maximização da receita líquida sujeita às restrições de disponibilidade de água, área a ser irrigada, capacidade de bombeamento. A receita líquida ( $RL$ ) é entendida como o resultado da diferença entre a renda bruta total auferida com a venda da safra agrícola e os respectivos custos de produção envolvidos, gerada pela escolha apropriada das áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura prevista nos perímetros irrigados. Para tanto, leva-se em consideração: a renda bruta, obtida com a venda da produção agrícola, os custos de produção anual, o custo da água para irrigação e o custo de bombeamento da água.

Portanto, a receita líquida, em (R\$/ano) é dada pela expressão:

$$RL = \sum_{n=1}^{na} \left[ \sum_{j=1}^{nc} Rb_j(n) - Cp_j(n) - Ca_j(n) - Cb_j(n) \right] \quad (4.10)$$

onde,

$n$  – indica o ano,  $n = 1, 2, \dots, na$ , ( $na$  = número de anos);

$j$  – indica o tipo de cultura,  $j = 1, 2, \dots, nc$ , ( $nc$  = número de culturas);

$Rb_j(n)$  – renda bruta anual da cultura  $j$  no ano  $n$ ;

$Cp_j(n)$  – custo de produção anual da cultura  $j$  no ano  $n$ ;

$Ca_j(n)$  – custo da água anual usada na cultura  $j$  no ano  $n$ ;

$Cb_j(n)$  – custo anual de bombeamento de água para a cultura  $j$  no ano  $n$ ;

A renda bruta anual ( $Rb_j$ ), em R\$/ano/cultura, pode ser estimada pela equação:

$$Rb_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} Prod_{jk}(n) * Prc_j(n) * Ac_{jk}(n) \quad (4.11)$$

onde,

$k$  – indica a unidade de produção ou perímetro irrigado,  $k = 1, 2, \dots, ni$ , ( $ni$  = número de unidade de produção ou perímetro irrigado);

$Prod_{jk}(n)$  – produtividade da cultura  $j$  por unidade de área na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$  no ano  $n$ ;

$Prc_j(n)$  – preço atual de comercialização da cultura  $j$  no ano  $n$ ;

$Ac_{jk}(n)$  – área plantada com a cultura  $j$  na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$  no ano  $n$ .

O custo de produção anual ( $Cp_j$ ), em R\$/ano/cultura, relativos aos gastos com insumos, mão de obra e máquinas, entre outros, pode ser dado por:

$$Cp_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} Cprod_{jk}(n) * Ac_{jk}(n) \quad (4.12)$$

onde,

$Cprod_{jk}(n)$  – custo atual de produção por unidade de área da cultura  $j$  referentes aos gastos relativos ao ano  $n$ .

Para se determinar o custo da água utilizada para a irrigação e o seu bombeamento, é necessário se determinar à quantidade de água alocada para irrigação, i.e., a lâmina de rega.

Num primeiro passo, calcula-se a necessidade hídrica máxima mensal desta planta para desempenhar as suas atividades vegetativas ao longo do seu ciclo fenológico, ou seja, calcula-se a taxa de evapotranspiração potencial mensal ( $ETP_{jkt}$ ) da cultura  $j$  na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$  durante o mês  $t$ , que pode ser estimada, de forma aproximada, em função da taxa de evaporação de referência no mês  $t$  na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$  ( $ETO_{kt}$ ), obtida da seguinte expressão:

$$ETO_{kt} = Kt_{kt} * Ev_{kt} \quad (4.13)$$

onde,

$Kt_{kt}$  – coeficiente do tanque evaporimétrico da unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$  no mês  $t$ ;

$Ev_{kt}$  – taxa de evaporação mensal de um tanque evaporimétrico, normalmente do tipo classe A na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$ ;

Logo, a evapotranspiração potencial mensal ( $ETP_{jkt}$ ) é obtida por:

$$ETP_{jkt} = kc_{jt} * ETO_{kt} \quad (4.14)$$

onde,

$kc_{jt}$  – coeficiente de cultivo mensal da cultura  $j$  que reflete a sua necessidade hídrica no mês  $t$

Para se determinar a lâmina de rega é necessário calcular a taxa de precipitação que infiltra no solo, que fica efetivamente a disposição das plantas, ou seja, a precipitação efetiva no mês  $t$  na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$  ( $Pe_{kt}$ ) em mm/mês, na região a ser irrigada, que pode ser estimada pelas expressões, para terrenos com declividades entre 4% e 5%, segundo especificações da FAO (1988) apud Curi e Curi (2001):

$$Pe_{kt} = 0,8 * P_{kt} - 25, \text{ para } P_{kt} \geq 75\text{mm} \quad (4.15)$$

$$Pe_{kt} = 0,6 * P_{kt} - 10, \text{ para } P_{kt} < 75\text{mm} \quad (4.16)$$

onde,

$P_{kt}$  – taxa de precipitação no mês  $t$  na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$ . (em mm/mês)



A necessidade hídrica suplementar ( $Nl_{jkt}$ ) da cultura  $j$ , na unidade de produção ou perímetro  $k$  durante o mês  $t$ , ou a lâmina de rega suplementar que a planta necessita, para cada intervalo de tempo do seu ciclo vegetativo, pode ser estimada por:

$$Nl_{jkt} = ETP_{jkt} - Pe_{kt} - G_{jkt} - W_{kt} \quad (4.17)$$

onde,

$G_{jkt}$  – dotação de água à zona radicular da cultura  $j$  durante o mês  $t$  por capilaridade (em mm) que depende do tipo de solo e do nível do lençol freático na unidade de produção ou perímetro  $k$ ;

$W_{kt}$  – reserva de água no solo no início do mês  $t$  (em mm), que depende da capacidade de armazenamento de água no solo na unidade de produção ou perímetro  $k$ .

A quantidade de água a ser captada para cada tipo de cultura  $j$  dependerá, também, da eficiência do sistema de irrigação, ( $Eirr_{jk}$ ), obtida pelo produto entre a eficiência do sistema de distribuição de água para cada unidade de produção ou perímetro  $k$  ( $Esis_{jk}$ ) e da eficiência da aplicação da irrigação por cultura ( $Eap_j$ ):

$$Eirr_{jk} = Eap_j * Esis_{jk} \quad (4.18)$$

A necessidade de lixiviação dos sais ( $LR_{jkt}$ ) dissolvidos que se acumulam no solo cultivado, é obtida em função da fração de água mínima que deverá percolar para lavar os sais, que depende da quantidade de água de irrigação e da salinidade tolerada pela cultura  $j$ , no mês  $t$  na unidade de produção ou perímetro irrigado  $k$ . Rhoades e Merrill (1976) apud Gomes (1999), propuseram as seguintes equações para se determinar  $LR_{jkt}$ :

- Para irrigação por inundação ou aspersão de baixa frequência:

$$LR_{jkt} = \frac{CEa_{kt}}{5 * CE_j - CEa_{kt}} \quad (4.19)$$

- Para irrigações de alta frequência (gotejamento e microaspersão):

$$LR_{jkt} = \frac{CEa_{kt}}{5 * CE_j} \quad (4.20)$$

onde:

$CEa_{kt}$  – condutividade elétrica da água de irrigação aduzida para unidade de produção ou perímetro  $k$  durante o mês  $t$  (em mmhos/cm), medida a 25°C;

$CE_j$  – condutividade elétrica do extrato de solo saturado (em mmhos/cm) e que acarreta uma determinada redução no rendimento potencial da cultura  $j$ .

Conforme sugerido por Ayers e Westcot (1985) apud Gomes (1999), escolhe-se o valor de  $CE_j$  que acarreta uma redução 10% do rendimento potencial da cultura  $j$  para a aplicação da Equação 4.19 e de 100% para a aplicação da Equação 4.20.

Logo, a lâmina mensal de água para a irrigação da cultura  $j$  da na unidade de produção ou perímetro  $k$  durante o mês  $t$  ( $Qirr_{jkt}$ ), transformada em vazão por unidade de área fornecida pelo sistema, pode ser obtida por:

$$Qirr_{jkt} = \frac{NI_{jkt}}{(1 - LR_{jkt}) * Eirr_{jk}} \quad (4.21)$$

O custo da água anual,  $Ca_j$  (em R\$/ano/cultura), captada para a unidade de produção ou perímetro  $k$  pode ser obtido pela expressão:

$$Ca_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} \left[ \sum_{t=12(n-1)+1}^{12(n-1)+12} Pra_k * Qirr_{jkt} * Ac_{jk} \right] \quad (4.22)$$

onde,

$Pra_k$  – preço da água por unidade de volume para a unidade de produção ou perímetro  $k$ .

O custo anual de bombeamento de água,  $Cb_j$  (em R\$/ano/cultura) para as culturas irrigadas é obtido através da expressão:

$$Cb_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} \left[ \sum_{t=12(n-1)+1}^{12(n-1)+12} \left( \frac{0,02726 * Prb_k * \Delta H_{jkt} * Qirr_{jkt} * Ac_{jk}(n)}{\eta_k} \right) \right] \quad (4.23)$$

onde,

$Prb_k$  – preço da energia (em R\$/Kwh) para a unidade de produção ou perímetro  $k$ ;

$\Delta H_{jkt}$  – altura manométrica média (em metros de coluna de água), requerido pelo sistema de irrigação da cultura  $j$  e aduzido para a unidade de produção ou perímetro  $k$  no mês  $t$ ;

$\eta_k$  – eficiência do sistema de bombeamento da unidade de produção ou perímetro  $k$ .

#### 4.2.5 – MÃO-DE-OBRA DA AGRICULTURA IRRIGADA

A maximização da mão-de-obra oriunda da atividade agrícola nas unidades de produção ou nos perímetros irrigados é outra função objetivo sujeito as mesmas restrições agronômicas. A mão-de-obra total empregada  $MO$  (em Hd/ano) requerida nas unidades de produção ou perímetros é dada pela expressão:

$$MO = \sum_{n=1}^{na} \sum_{k=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nc} Hdc_{jk}(n) * Ac_{jk}(n) \quad (4.24)$$

onde,

$Hdc_{jk}$  – mão-de-obra, por unidade de área, requerida pela cultura  $j$  na unidade de produção ou perímetro  $k$ ;

#### 4.2.6 – FUNÇÃO MULTIOBJETIVO

Como dito anteriormente, o modelo permite efetuar uma análise multiobjetivo através do Método das Ponderações, sendo cada função objetivo, descrita anteriormente, normalizada. Logo a função objetivo do modelo é dada pela Equação 4.25.

$$\min fo = \omega_1 * DTDQ + \omega_2 * VER + \omega_3 * VMR - \omega_4 * RL - \omega_5 * MO \quad (4.25)$$

onde,

$\omega_i$  – coeficiente de ponderação que mede a relativa importância (ou prioridade de atendimento) dada a cada objetivo,  $i = 1, \dots, 5$ . Quando  $\omega_i = 0$  a função objetivo  $i$  não será considerada no processo de otimização.

### 4.3 – EQUAÇÕES DE RESTRIÇÕES

#### 4.3.1 – OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

Os reservatórios podem ser conectados a outros elementos do sistema, a montante, a um nó do sistema onde recebe vazões afluentes, e a jusante, o descarrgador de fundo,

vertedouros e tomadas de água, através de nós (Figura 4.3). A vazão em cada um destes elementos depende de seus parâmetros hidráulicos e do nível de água dos reservatórios.

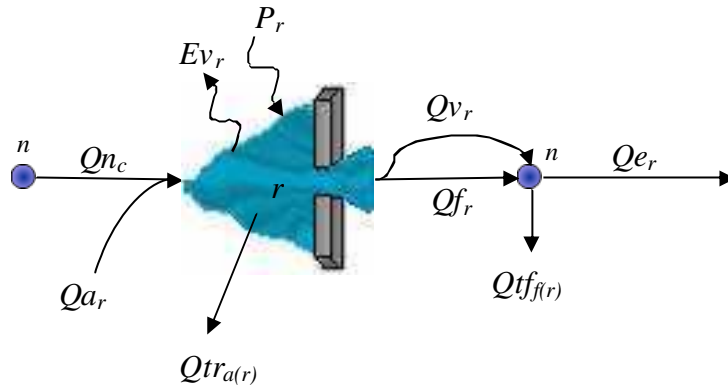


Figura 4.3 – Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.

O reservatório tem vários dados e equações associadas a ele. Dentre os dados podemos ressaltar os de precipitação, evaporação, volume morto, capacidade máxima, volumes operativos, etc. Existem, também, relações entre a cota da superfície do espelho líquido, a área desta superfície e o volume. Por outro lado, tem-se que efetuar, a cada mês  $t$ , o balanço hídrico do reservatório, que é baseado no princípio de conservação da massa e determina a variação mensal do volume armazenado do reservatório expressa pela seguinte equação:

$$VR_r(t) = VR_r(t-1) + Qa_r(t) - \sum_{\alpha(r)} Qtr_{\alpha(r)}(t) - Qf_r(t) - Qv_r(t) + P_r(t) - Ev_r(t) + Qn_c(t) \quad (4.26)$$

onde,

$r$  – índice que representa o  $r$ -ésimo reservatório do sistema;

$n$  – índice que representa o  $n$ -ésimo nó do sistema;

$VR_r(t)$  – volume do reservatório  $r$  no final do mês  $t$ ;

$VR_r(t-1)$  – volume do reservatório  $r$  no início do mês  $t$ ;

$Qa_r(t)$  – vazão afluente ao reservatório  $r$  durante o mês  $t$ ;

$a(r)$  – índice que representa a  $a$ -ésima tomada d'água do reservatório  $r$ ;

$f(r)$  – índice que representa a  $f$ -ésima tomada d'água de fundo do reservatório  $r$ ;

$Qtr_{a(r)}(t)$  –  $a$ -ésima vazão de tomada d'água do reservatório  $r$  no mês  $t$ ;

$Qtf_{f(r)}(t)$  –  $f$ -ésima vazão de tomada d'água de fundo do reservatório  $r$  no mês  $t$ ;

$Qf_r(t)$  – vazão de descarga de fundo do reservatório  $r$  durante o mês  $t$ ;

$Qv_r(t)$  – volume vertido do reservatório  $r$  durante o mês  $t$ ;

$P_r(t)$  – volume precipitado no reservatório  $r$  durante o mês  $t$ ;

$Ev_r(t)$  – volume evaporado no reservatório  $r$  durante o mês  $t$ ;

$Qn_c(t)$  – vazão de entrada no reservatório  $r$  oriundo de contribuições da  $c$ -ésima calha (trecho) do rio a montante do reservatório  $r$  no mês  $t$ .

O volume precipitado e evaporado no reservatório em cada mês  $t$  é dado pelas equações:

$$P_r(t) = p_r(t) * \left( \frac{AR_r(t) + AR_r(t-1)}{2} \right) \quad (4.27)$$

$$E_r(t) = e_r(t) * \left( \frac{AR_r(t) + AR_r(t-1)}{2} \right) \quad (4.28)$$

onde,

$p_r$  – taxa de precipitação para o reservatório  $r$  no mês  $t$ ;

$e_r$  – taxa de evaporação para o reservatório  $r$  no mês  $t$ ;

$AR_r(t)$  – área do espelho d'água do reservatório  $r$  no final do mês  $t$ ;

$AR_r(t-1)$  – área do espelho d'água do reservatório  $r$  no início do mês  $t$ ;

Dependendo das vazões afluentes, a alocação mensal de água do reservatório para os diversos usos, as áreas do espelho d'água, as cotas do nível de água e os volumes mensais de água do reservatório variam de mês a mês sendo, portanto, necessário atualizá-los mensalmente. Para tanto, faz-se o uso das relações *cota-área-volume* de cada um dos reservatórios.

A área do espelho de água do reservatório é relacionada com o volume do reservatório através de segmentos de reta na curva *área-volume* de modo a obter um bom ajuste linear da mesma, como exemplificado na Figura 4.4. Os volumes de controle (ou pontos de quebra) utilizados devem ser os mesmos considerados na linearização da Equação 4.7. Logo as linearizações da Equação 4.7 e da curva *área-volume* terão os mesmos trechos segmentados do volume de água do reservatório.

A área do espelho d'água do reservatório  $r$  ( $AR_r$ ) será dada pela expressão:

$$AR_r(t) = ARm_r(t) + \sum_{m=1}^{nm} \beta_{m,r} * v_{r,m,r}(t) \quad (4.29)$$

onde,

$ARm_r$  – área do espelho de água do reservatório  $r$  correspondente ao volume mínimo do mesmo.

$\beta_{m,r}$  – coeficiente angular de cada segmento de reta da curva área-volume do reservatório  $r$ .

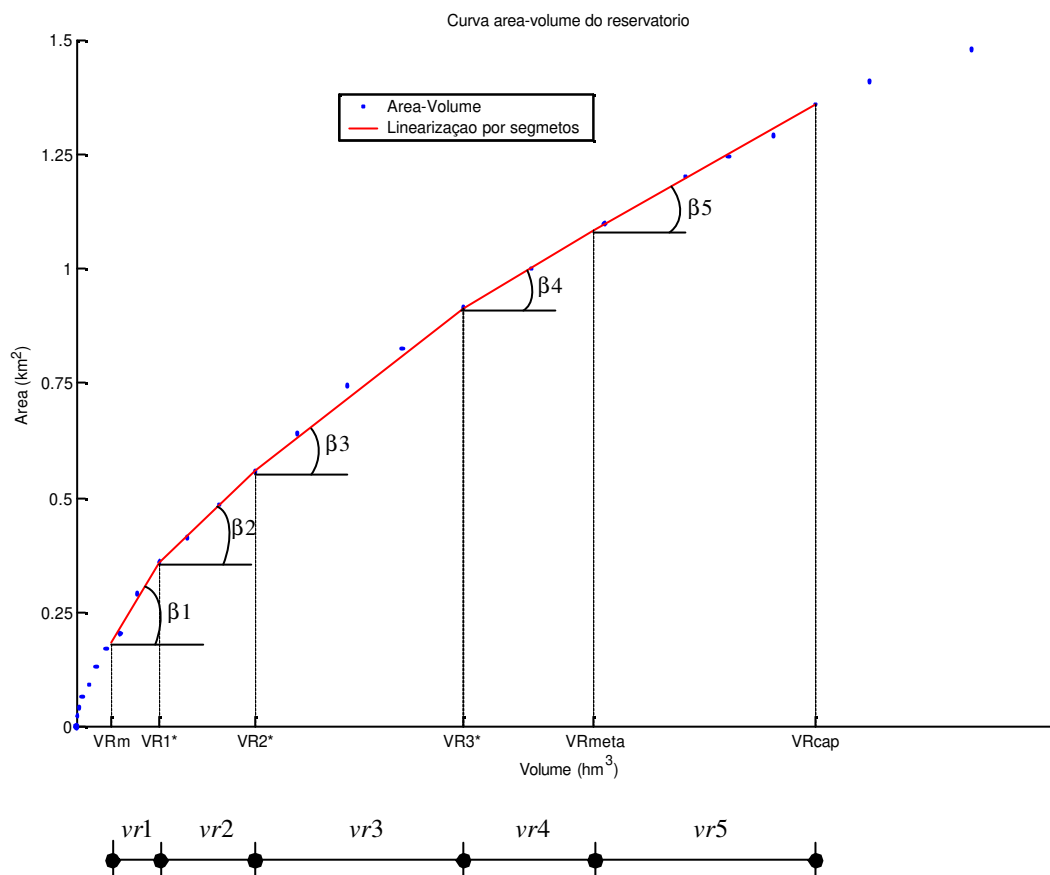


Figura 4.4 – Gráfico da curva área-volume do reservatório linearizada por segmentos.

A linearização representada na Equação 4.29 só funcionará se inicialmente os trechos segmentados do volume de água do reservatório forem “percorridos” pelos primeiros trechos, para então ser percorrida pelos próximos trechos, ou seja, o segmento do volume de água  $vr2$  só deverá ser percorrido quando  $vr1$  atingir o seu valor máximo. Da mesma forma que o segmento  $vr3$  só deverá ser percorrido quando o  $vr2$  atingir o seu valor máximo e assim sucessivamente. Sua garantia se deve a linearização da Equação 4.7 através do Artifício de Linearização por Segmentos, onde a minimização de uma função convexa garante que os primeiros trechos segmentados serão os inicialmente preenchidos.

As atualizações mensais das cotas, áreas e volumes também servem para que se estabeleçam limites para as tomadas d’água, descarregadores de fundo e extravasores.

A vazão a ser captada através das tomadas d’água está limitada a sua capacidade máxima e a cota da tomada d’água, escrito matematicamente pela expressão:

$$0 \leq Q_{tr_{a(r)}}(t) \leq Q_{tr_{max_{a(r)}}}(t) \quad (4.30)$$

$$Q_{tr_{a(r)}}(t) \geq 0, \text{ se } HR_r(t) \geq H_{tr_{a(r)}} \quad (4.31)$$

onde,

$Q_{tr_{max_{a(r)}}$  – vazão máxima de captação pela  $a$ -ézima tomada d'água do reservatório  $r$ ;

$HR_r(t)$  – representa a cota do nível d'água do reservatório  $r$  no mês  $t$ ;

$H_{tr_{a(r)}}$  – representa a cota da  $a$ -ézima tomada d'água no reservatório  $r$ .

As vazões extravasadas pelos vertedouros somente serão verificadas se, e somente se, as condições abaixo forem satisfeitas:

$$0 \leq Q_{v_r}(t) \leq Q_{v_{max_r}} \quad (4.32)$$

$$Q_{v_r}(t) \geq 0, \text{ se } HR_r(t) \geq H_{vert_r} \quad (4.33)$$

onde,

$Q_{v_{max_r}}$  – representa a vazão máxima vertida projetada para o reservatório  $r$ ;

$H_{vert_r}$  – representa a cota da soleira do vertedor do reservatório  $r$ .

A vazão liberada pelo descarregador de fundo ( $Q_{f_r}$ ) do reservatório  $r$  está limitada por uma vazão de descarga de fundo máxima ( $Q_{f_{max_r}}$ ) em cada mês  $t$ , sendo esta estimada pela equação abaixo, referida em DAEE (2005):

$$Q_{f_{max_r}}(t) = C_{f_r} \cdot A_{f_r} \cdot \sqrt{2g(HR_r(t) - H_{fs_r})} \quad (4.34)$$

onde,

$C_{f_r}$  – coeficiente de vazão de descarga de fundo do reservatório  $r$ ;

$A_{f_r}$  – área da seção transversal do tubo de descarga de fundo do reservatório  $r$ ;

$H_{fs_r}$  – cota de jusante da geratriz inferior do tubo de descarga de fundo do reservatório  $r$ .

A curva da vazão de descarga de fundo máxima em função do volume do reservatório é linearizada através de segmentos de reta, como exemplificado na Figura 4.5, na qual a cota de montante da geratriz inferior do tubo do descarregador de fundo do reservatório ( $H_{fe_r}$ ) está abaixo da cota correspondente ao volume mínimo do reservatório. Os volumes de controle (ou pontos de quebra) devem ser os mesmos que foram utilizados para a linearização da Equação 4.7.

A vazão de descarga de fundo máxima do reservatório  $r$  será dada pela expressão:

$$Q_{fmax_r}(t) = Q_{fmmax_r}(t) + \sum_{m=1}^{nm} \gamma_m * v_{r_m}(t) \quad (4.35)$$

onde,

$Q_{fmmax_r}$  – vazão da descarga de fundo máxima do reservatório  $r$  correspondente ao volume mínimo do mesmo.

$\gamma_{m,r}$  – coeficiente angular de cada segmento de reta da curva da descarga de fundo máxima versus o volume do reservatório.

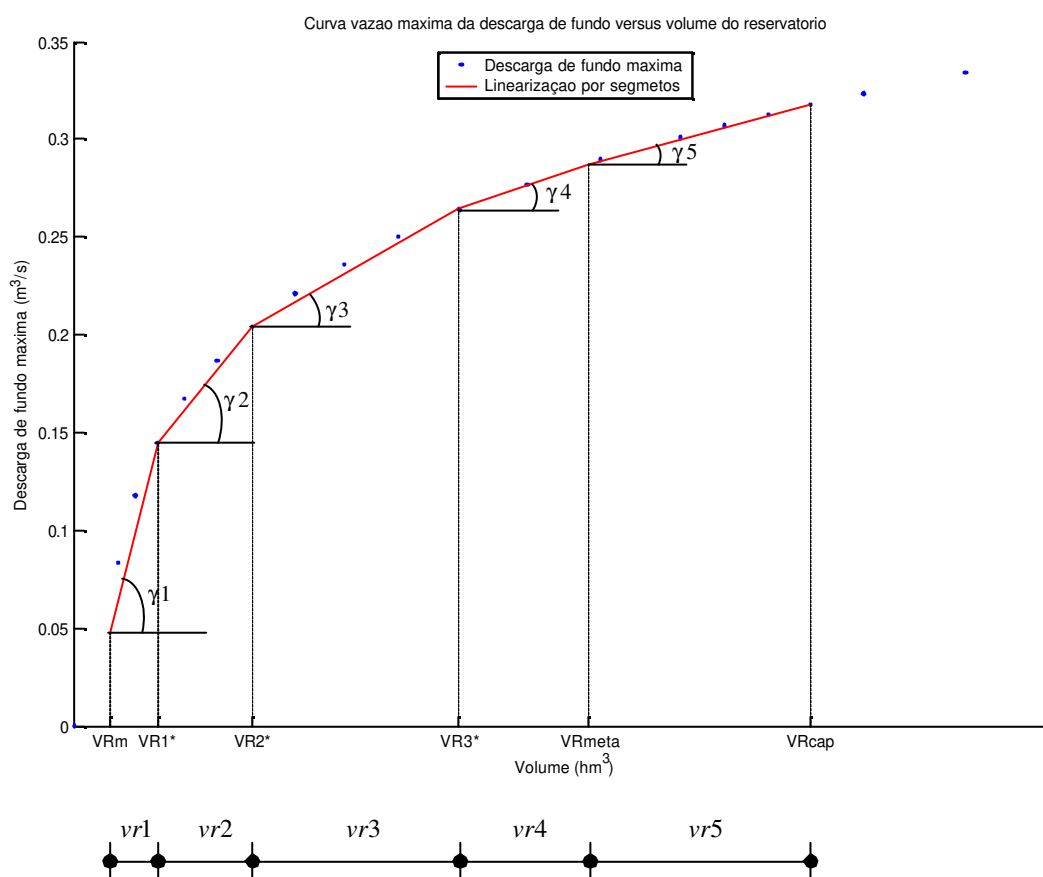


Figura 4.5 – Gráfico da vazão de descarga de fundo máxima do reservatório representada por segmentos de reta para a cota de montante da geratriz inferior do tubo do descarregador de fundo abaixo da cota correspondente ao volume mínimo do reservatório.

Como na linearização da Equação 4.29, a linearização representada na Equação 4.35 só funcionará se, inicialmente, os trechos segmentados do volume de água do reservatório forem “percorridos” pelos primeiros trechos, para então ser percorrida pelos próximos trechos. A garantia deste comportamento se deve a linearização da Equação 4.7 através do



Artifício de Linearização por Segmentos, onde a minimização de uma função convexa garante que os primeiros trechos segmentados serão os inicialmente preenchidos.

Caso a cota de montante da geratriz inferior do tubo do descarregador de fundo esteja acima da cota correspondente ao volume mínimo do reservatório, teremos um novo volume de controle, ( $VR1^*$  por exemplo). A Figura 4.6 exemplifica a nova curva da vazão de descarga de fundo máxima em função do volume do reservatório, representada na equação 4.36:

$$Qfmax_r(t) = \sum_{m=1}^{nm} \gamma_m * vr_m(t) \quad (4.36)$$

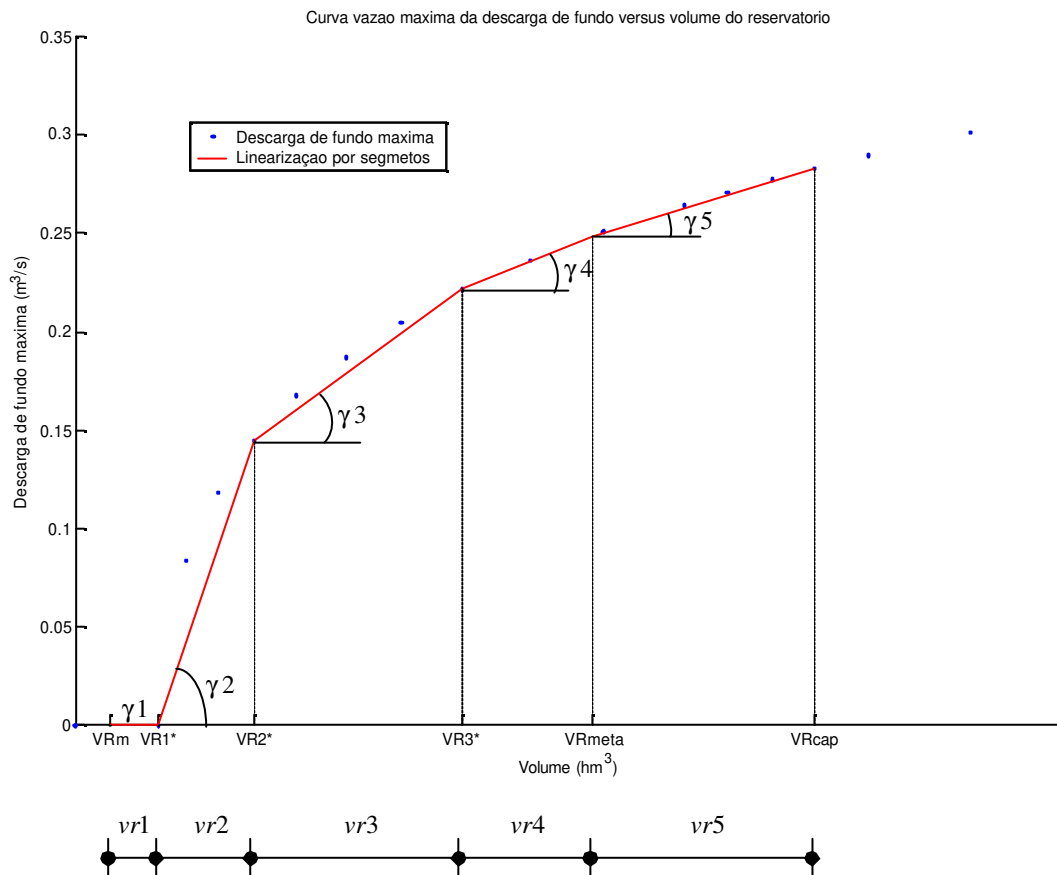


Figura 4.6 – Gráfico da vazão de descarga de fundo máxima do reservatório representada por segmentos de reta para a cota de montante da geratriz inferior do tubo de descarregador de fundo acima da cota correspondente ao volume mínimo do reservatório.

Tem-se que o valor de  $Qfmax_r$  e de  $y_m$  é zero para qualquer trecho segmentado  $m$  do volume de água do reservatório  $m$  na qual tenha o volume de controle superior igual ou menor do que o volume correspondente cota de montante da geratriz inferior do tubo do descarregador de fundo.

Na operação do reservatório, temos sempre um volume final  $VR(t)$  e inicial  $VR(t - 1)$  e consequentemente, uma cota final e inicial, resultando em duas vazões descarregadas máximas, uma no início do mês e outra no final do mês. Portanto para minimizar esse problema decidiu-se trabalhar com a média das duas vazões calculadas.

Outras restrições impostas aos reservatórios são:

i) de ordem operacional:

$$VRm_r(t) = VR_r(t) = VRcap_r \quad (4.37)$$

ii) de ordem física:

$$VR_r(t) = VRmorto_r \quad (4.38)$$

onde,

$VRmorto_r$  – representa o volume morto do reservatório  $r$ .

Para garantir a sustentabilidade hídrica do sistema, se faz necessário que o reservatório apresente o seu volume final igual ou maior que o seu volume inicial (Curi e Curi, 2001). Este tipo de restrição pode ser incorporado ao problema estabelecendo que o volume mínimo do último mês seja igual ou superior ao volume inicial.

#### 4.3.2 – CRITÉRIOS OPERACIONAIS E AGRONÔMICOS

Outros aspectos relacionados com a agricultura irrigada são suas restrições físicas e operacionais do sistema. Entre as restrições físicas pode-se destacar: a área a ser irrigada em cada unidade de produção ou perímetro, a vazão a ser captada para a unidade de produção ou perímetro e a não negatividade das variáveis. Com relação às restrições de ordem operacional estão relacionados: os critérios agronômicos e de mercado.

As limitações impostas pelas capacidades do canal ou do sistema adutor, pelo qual a água será transportada até as respectivas unidades de produção ou perímetro irrigado, podem ser representadas por:

$$\sum_{j=1}^{nc} Q_{irr_{jkt}} * Ac_{jk} \leq Qtmax_k \quad (4.39)$$

onde,

$Qtmax_k$  – é a capacidade mensal da vazão do sistema de captação para a unidade de produção ou perímetro  $k$ .

Para se estabelecer os limites superiores da capacidade de vazão para cada sistema adutor, calcula-se esta vazão máxima com os dados dos conjuntos locais de sistema moto-bomba, como é mostrado a seguir:

$$Qtmax_k = 3,6 * nh_k * nb_k * Vbcap_k \quad (4.40)$$

onde,

$nh_k$  – número de horas médio mensais de trabalho do sistema de captação de água para a unidade de produção ou perímetro  $k$ ;

$nb_k$  – número de moto-bomba do sistema adutor para a unidade de produção ou perímetro  $k$ , com iguais capacidades de elevação de altura manométrica e vazão;

$Vbcap_k$  – vazão média mensal aduzida de cada bomba do sistema adutor para a unidade de produção ou perímetro  $k$ .

As restrições quanto ao limite máximo mensal de área, que poderá ser plantada por unidade de produção ou perímetro em cada mês, pode ser obtida pela expressão:

$$\sum_{j=1}^{nc} \xi_{jkt} * Ac_{jk}(n) \leq Apmax_{kt} \quad (4.41)$$

onde,

$Apmax_{kt}$  – limite máximo da área total que poderá ser plantada na unidade de produção ou perímetro  $k$  no mês  $t$ . Sendo:

$\xi_{jkt} = 1$ , se a cultura  $j$  for plantada no mês  $t$  na unidade de produção ou perímetro  $k$ ;

$\xi_{jkt} = 0$ , se a cultura  $j$  não for plantada no mês  $t$  na unidade de produção ou

perímetro  $k$ ;

Com relação aos critérios agrônômicos e de mercado, o conjunto de restrições se refere aos limites mínimos e máximos das áreas a serem plantadas com cada tipo de cultura plantada por unidade de produção ou perímetro irrigado, expressa por:

$$Acmin_{jk}(n) \leq Ac_{jk}(n) \leq Acmax_{jk}(n) \quad (4.42)$$

onde,

$Acmin_{jk}$  – área mínima a ser plantada com a cultura  $j$  por unidade de produção ou perímetro  $k$  no ano  $n$ ;

$Acmax_{jk}$  – área máxima a ser plantada com a cultura  $j$  por unidade de produção ou perímetro  $k$  no ano  $n$ .

### 4.3.3 – OUTROS COMPONENTES DO SISTEMA

Dentre os componentes do sistema hídrico estão as calhas dos rios cujas vazões podem estar limitadas por valores inferiores, indicando requerimentos de regularizações e de vazões ecológicas para saneamento do rio, ou superiores, para o controle de cheias, que podem ser descritas matematicamente por:

$$Q_{nmin_c}(t) \leq Q_{n_c}(t) \leq Q_{nmax_c}(t) \quad (4.43)$$

onde,

$Q_{nmin_c}(t)$  – vazão mínima na  $c$ -ésima calha de rio no mês  $t$ ;

$Q_{nmax_c}(t)$  – vazão máxima na  $c$ -ésima calha de rio no mês  $t$ .

Além destas restrições, o modelo promove ainda o balanço hídrico em cada nó do sistema  $n$ , através da seguinte expressão:

$$\sum_i Q_{entra_{i,n}}(t) = \sum_j Q_{sai_{j,n}}(t) \quad (4.44)$$

onde,

$Q_{entra_{i,n}}(t)$  – representa a  $i$ -ésima vazão de entrada no nó  $n$ , no mês  $t$ ;

$Q_{sai_{j,n}}(t)$  – representa a  $j$ -ésima vazão de saída do nó  $n$ , no mês  $t$ .

As perdas por evaporação e a infiltração nas calhas dos rios são avaliadas através de um coeficiente de perda, que deve ser especificado para o sistema e representa a fração do fluxo que seria perdida durante o percurso na calha do rio.

## 4.4 – PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA

O Artificio de Linearização por Segmentos garante para a minimização de uma função convexa (caso da Equação 4.6) que os trechos segmentados da variável de decisão serão “percorridos” inicialmente pelos primeiros trechos, para então ser percorrida pelos próximos trechos. Porém, observou-se que, em certos casos, isso não ocorre, ou seja, para a modelagem proposta, pode haver combinações dos valores dos trechos segmentados do volume de água do reservatório em um mês  $t$  que resultem em um volume de água armazenado no reservatório

(volume este incorreto) de modo que alguma demanda ou restrição imposta possa ser atendida ou auxiliada por esse procedimento.

Isso ocorrer devido ao caráter multiobjetivo do modelo, onde o atendimento de determinada demanda do sistema tenha maior prioridade do que o volume meta do reservatório. Assim, por exemplo, quando o sistema estiver em um período crítico (como um ano seco ou no atendimento demanda muito alta, por exemplo), para se garantir o atendimento das demandas com prioridade maior do que o volume meta do reservatório  $r$ , o volume evaporado pode ser diminuído preenchendo os últimos trechos segmentados do volume de água do reservatório, para curva *área-volume* convexa, pois as declividades dos últimos trechos segmentados são menores do que os primeiros trechos, o que resultará em um menor valor da área do espelho d'água do reservatório e, conseqüentemente, no volume evaporado garantindo assim um maior quantidade de água para o suprimento das demandas.

Para contornar tal problema é utilizado um procedimento iterativo do uso da PL, denominado Programação Linear Seqüencial (ou Sucessiva) onde em cada iteração os trechos segmentados do volume do reservatório são ajustados de modo a resultarem em um volume de água armazenado de forma correta.

Para melhor explicar o procedimento, a Figura 4.7 apresenta um exemplo de uma função objetivo linearizada para o volume meta do reservatório em um mês  $t$  qualquer.

O volume de água do reservatório ( $VR$ ) será dado pela expressão:

$$VR = 0,5 + vr1 + vr2 + vr3 + vr4 + vr5 \quad (4.45)$$

com

$$0 \leq vr1 \leq 1,0 \quad (4.46)$$

$$0 \leq vr2 \leq 2,1 \quad (4.47)$$

$$0 \leq vr3 \leq 4,6 \quad (4.48)$$

$$0 \leq vr4 \leq 3,0 \quad (4.49)$$

$$0 \leq vr5 \leq 4,9 \quad (4.50)$$

A função objetiva linearizada será dada por:

$$VMR' = 0,91 - 0,21 * vr1 - 0,14 * vr2 - 0,08 * vr3 - 0,02 * vr4 + 0,04 * vr5 \quad (4.51)$$

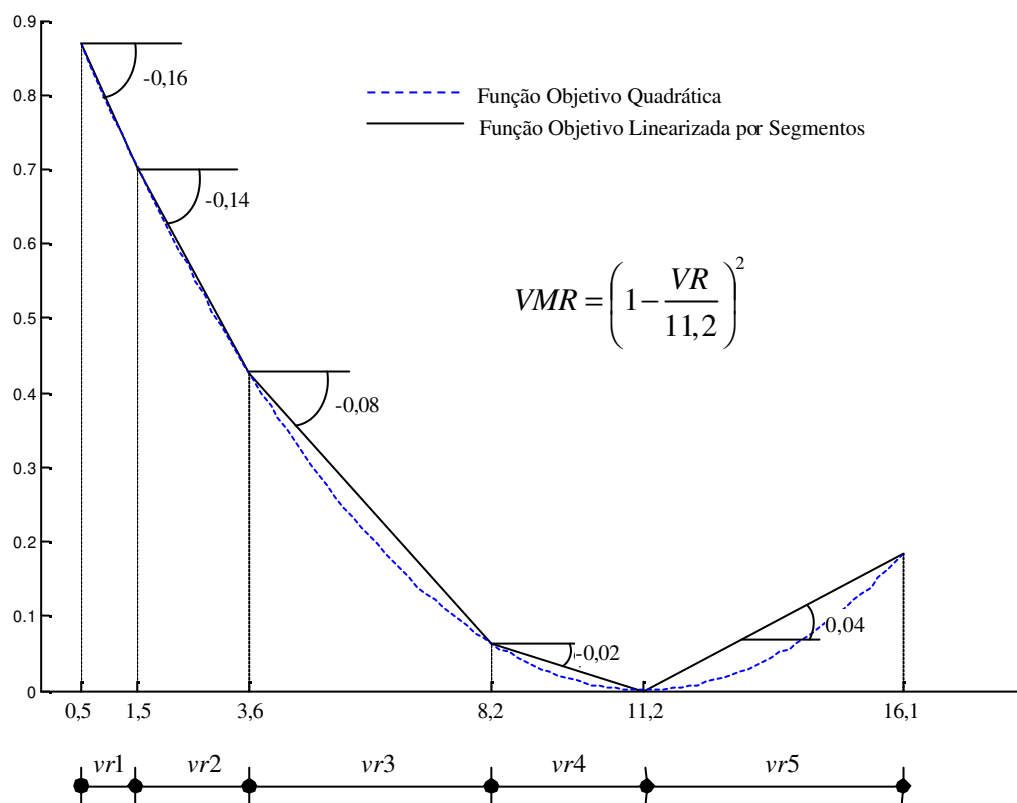


Figura 4.7 – Gráfico da função objetivo linearizada para o volume meta do reservatório.

Supondo que ao resolver o problema de otimização pela primeira vez (primeira rodada da PL,  $l = 1$ ) com todas as restrições impostas, o volume de água do reservatório  $VR$  seja igual a 7,0. Porém os valores dos trechos segmentados foram:  $vr1 = 0$ ;  $vr2 = 0$ ;  $vr3 = 0$ ;  $vr4 = 1,6$ ;  $vr5 = 4,9$ ; (os valores corretos seriam:  $vr1 = 1,0$ ;  $vr2 = 2,1$ ;  $vr3 = 3,4$ ;  $vr4 = 0$ ;  $vr5 = 0$ ).

Note que os valores incorretos dos trechos segmentados resultam, entre outras coisas, num valor da função objetivo muito discrepante ( $VMR = 0,14$  para a função objetivo quadrática original;  $VMR' = 0,13$  para a função objetivo quadrática linearizada com os valores corretos dos trechos segmentados; e  $VMR' = 1,07$  para a função objetivo quadrática linearizada com os valores incorretos dos trechos segmentados).

De maneira análoga, teremos valores incorretos da área do espelho de água do reservatório e da vazão de descarga de fundo máxima, pois ambas as curvas são linearizadas com os mesmos trechos segmentados utilizados na linearização da função objetivo do volume meta do reservatório.

O ajuste proposto para resolver tal incoerência consiste em impor restrições, inicialmente com certa relaxação, nos valores dos trechos segmentados para que, na próxima utilização da PL, o valor do volume de água do reservatório seja próximo ao que foi obtido na

utilização da PL anterior (tendo como hipótese que o valor ótimo esteja próximo desse valor), porém de forma correta. Para o exemplo proposto, inicialmente será estabelecido que:  $vr1 = 1,0$  (seu valor máximo) e  $vr5 = 0$ . Os trechos segmentados  $vr2$ ,  $vr3$  e  $vr4$ , continuam com suas restrições iniciais.

Rodando novamente a PL ( $l = 2$ ) podemos obter os seguintes valores:  $vr1 = 1,0$ ;  $vr2 = 0$ ;  $vr3 = 2,1$ ;  $vr4 = 3,0$ ;  $vr5 = 0$ ; resultando num volume de água do reservatório, ainda incorreto, de  $VR = 6,6$ . A Figura 4.8 mostrar os valores do volume de água do reservatório entre a primeira e a segunda iteração e a restrição imposta aos trechos segmentados para a 2ª rodada da PL.

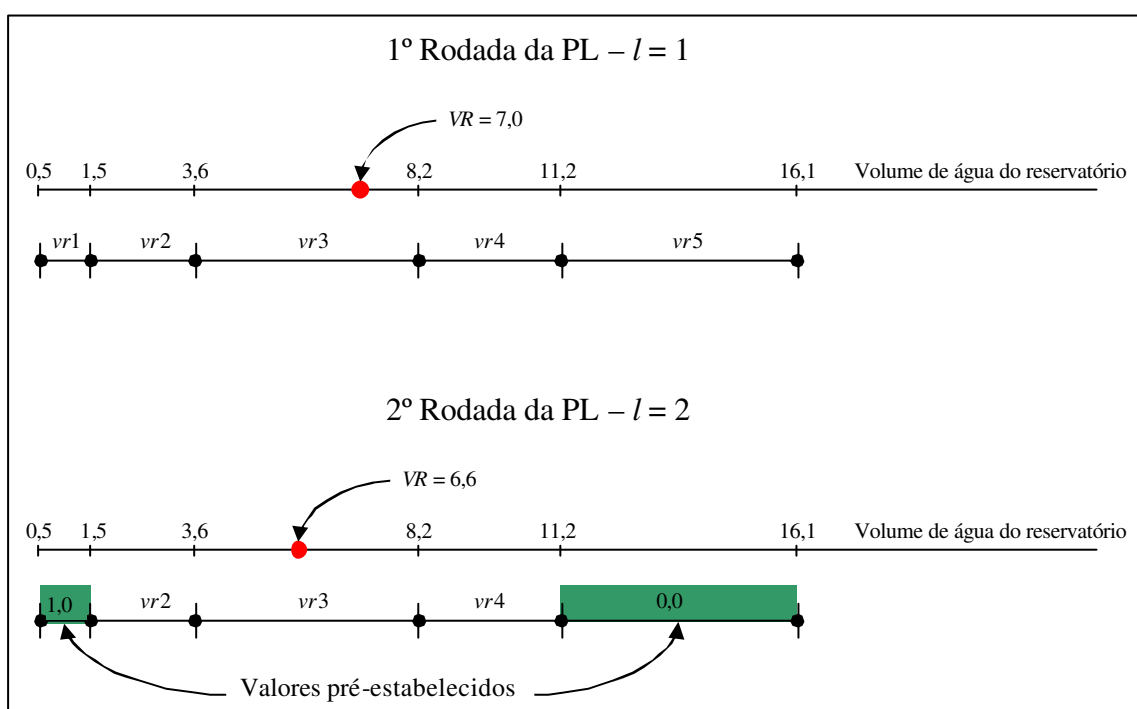


Figura 4.8 – Valor do volume de água do reservatório entre a primeira e a segunda iteração e a representação restrição imposta aos trechos segmentados para a 2ª rodada da PL.

Nota-se que, tanto na primeira como na segunda iteração, o valor do volume de água do reservatório permaneceu entre os valores de 3,6 e 8,2. Espera-se que o valor ótimo do volume de água do reservatório esteja entre esses valores. Assim, na próxima rodada da PL ( $l = 3$ ) será estabelecido que:  $vr1 = 1,0$ ;  $vr2 = 2,1$  (seus valores máximos) e  $vr4 = vr5 = 0$  como representado na Figura 4.9. O trecho segmentado  $vr3$  continuará com sua restrição inicial.

Veja na Figura 4.9 que, qualquer que seja o valor estabelecido para o trecho segmentado  $vr3$ , o valor do volume de água do reservatório  $VR$ , da função objetivo  $VMR'$ , da área do espelho de água do reservatório e da vazão de descarga de fundo máxima serão determinados de forma correta, ou seja, qualquer valor que seja estabelecido no trecho

segmentado  $vr3$ , os seus trechos anteriores ( $vr1$  e  $vr2$ ) estão com seus valores máximos e seus trechos posteriores ( $vr4$  e  $vr5$ ) são nulos.

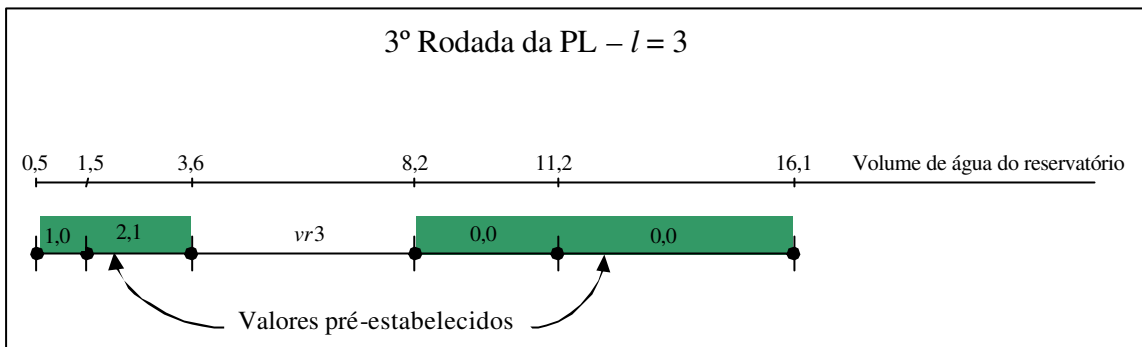


Figura 4.9 – Representação restrição imposta aos trechos segmentados para a 3ª rodada da PL.

Tem-se que logo na primeira rodada os valores de cada trecho segmentado podem estar corretos, indicando assim a solução ótima do problema. Porém, quando isso não ocorre, para uma boa aceitação dos resultados, além da verificação dos valores dos trechos segmentados, é analisando os valores calculados da função objetivo  $f_o$ , sendo avaliado através do erro relativo ( $erro_{f_o}$ ), dado por:

$$erro_{f_o} = \left| \frac{f_{o_l} - f_{o_{l-1}}}{f_{o_l}} \right| \leq tol \quad (4.52)$$

onde,

$l$  – indica o número de vezes que esta sendo aplicado o processo de otimização em PL ( $l = 2$ );  
 $f_{o_l}$  – valor da função objetivo para a  $l$ -ésima otimização.

O erro relativo ( $erro_{f_o}$ ) deve respeitar certo nível de tolerância ( $tol$ ) especificado para o sistema a ser otimizado. Para esse trabalho, foi utilizada uma tolerância da ordem de  $10^{-8}$ .

O fluxograma geral do modelo está apresentado na Figura 4.10. É importante ressaltar que as saídas do modelo, que possibilitam extensivas análises de desempenho do sistema hídrico em estudo, são os valores mensais para volumes, cotas e áreas de espelho d'água, vazões mensais de afluxos, de descargas e de sangria por reservatório; vazões mensais nas tomadas d'água e nas calhas do rio; vazões mensais para irrigação por perímetro, áreas irrigadas e mão de obra alocadas por cultura e por perímetro, receita líquida anual auferida por cultura em cada perímetro.



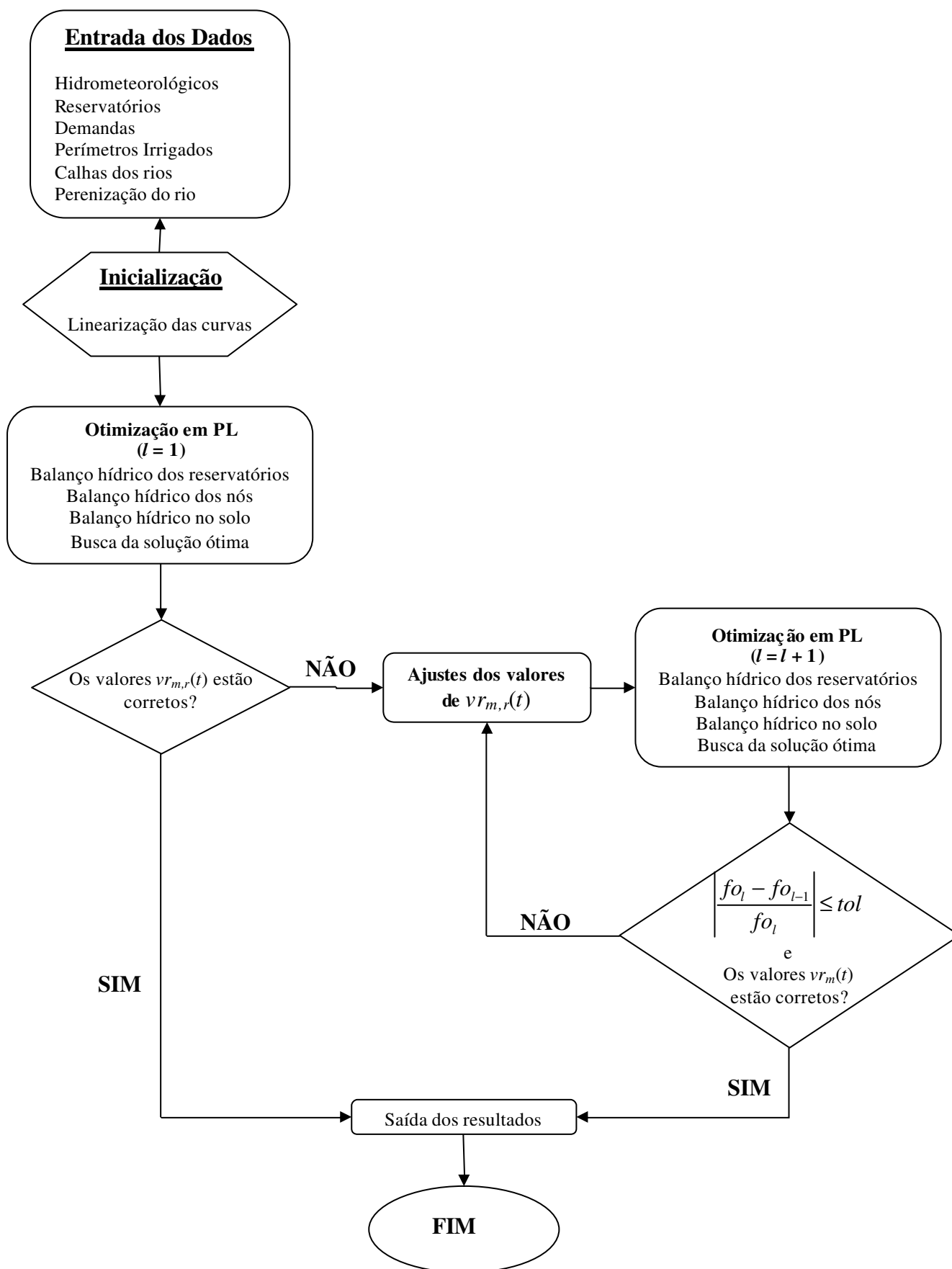


Figura 4.10 – Fluxograma do modelo de otimização.

## CAPITULO V

### METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO MODELO

#### 5.1 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

O modelo foi aplicado na sub-bacia do riacho Santana, afluente do rio Piancó, localizado no sudoeste do estado da Paraíba entre as latitudes 7°30' e 7°51' Sul e as longitudes 38°7' e 38° 22' Oeste (Figura 5.1). A sub-bacia apresenta dois reservatórios em série, denominados Catolé II e Poço Redondo. As principais aglomerações urbanas são as cidades de Manaíra e Santana de Mangueira.

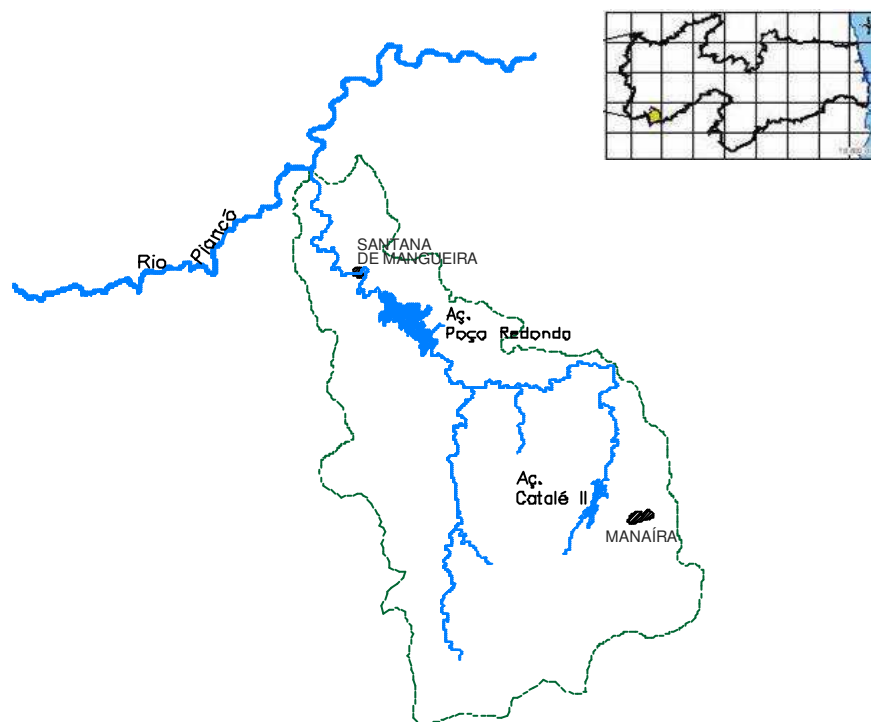


Figura 5.1 – Sub-bacia do riacho Santana (Fonte: PDRH/PB, SCIENTEC, 1997).

Os principais parâmetros que definem as características físico-morfológicas da sub-bacia hidrográfica são:

- Área de drenagem (Ad) ..... 587,7 km<sup>2</sup>
- Perímetro (P) ..... 136,8 km
- Fator de forma (Kf) ..... 0,09

- Coeficiente de compacidade (Kc) ..... 1,6
- Densidade de drenagem (Dd) ..... 1,63 km/ km<sup>2</sup>

O riacho Santana é classificado como de ordem seis e seu coeficiente de confluência (igual a 3,6) traduz uma forma regular, com relação a sua rede de drenagem.

Observando-se o perfil longitudinal do riacho Santana (Figura 5.2), nota-se, a montante do reservatório Catolé II, que o curso apresenta declividade bastante alta. Até o reservatório de Poço Redondo tem-se uma declividade mediana. Após este reservatório, a declividade do curso é muito baixa.

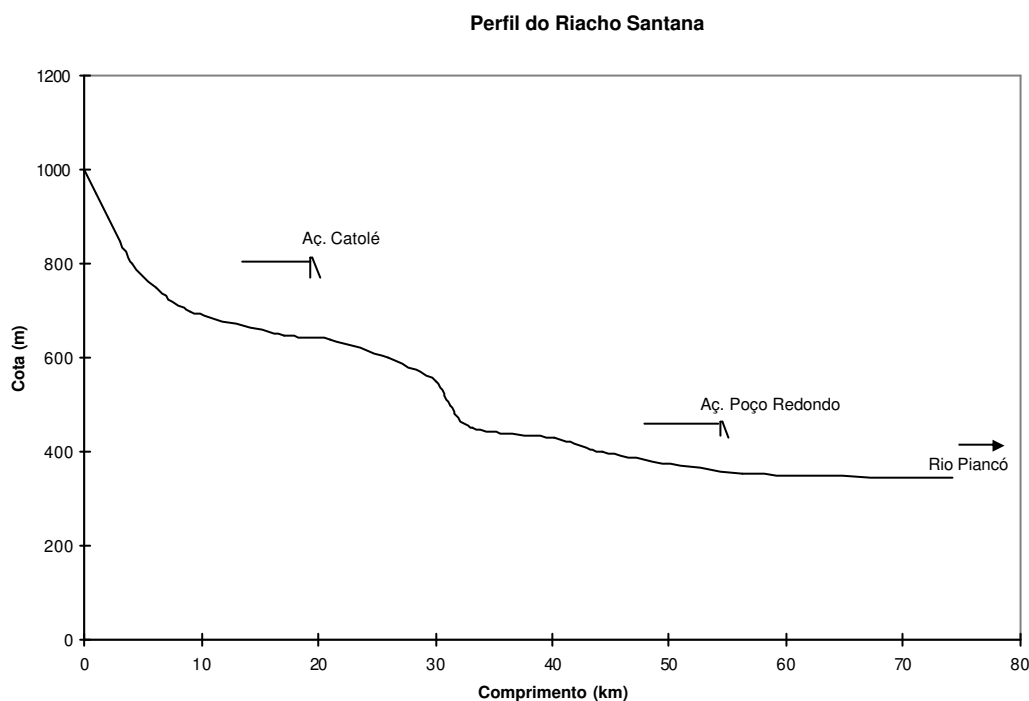


Figura 5.2 – Perfil longitudinal do riacho Santana (Fonte: PDRH/PB, SCIENTEC, 1997).

Com relação ao relevo, verifica-se que apenas 5% da área da bacia encontra-se em altitudes maiores que 815 m, o restante corresponde a altitudes que variam de 400 a 800 m. O desnível específico está em torno de 168 m, caracterizando, portanto, um relevo forte.

A vegetação natural é do tipo xerófito, pertencente ao bioma caatinga. O processo de degradação da vegetação na bacia está bastante acentuado. A área antropodizada já ocupa mais da metade das terras da bacia, causando um elevado grau de degradação, contribuindo para um processo de aridez mais acentuado na região.

O desmatamento e a exploração das florestas nativas, seguidas da expansão agrícola e urbana, são os principais responsáveis pelo impacto negativo na bacia. (SCIENTEC, 1997).

Esse fato é bastante preocupante, visto que a capacidade de interceptação das chuvas pela vegetação nativa reduz significativamente o processo de erosão, bem como melhora a capacidade de infiltração nos solos. Os solos com cobertura vegetal nativa, na região semi-árida, apresentam valores de escoamento superficial baixo, da ordem de 8 a 12%, quando comparado com solos desmatados, cujo valor do escoamento varia entre 16 e 22% (Lima, 2004).

### 5.1.1 – CLIMATOLOGIA

Os dados climáticos, a não ser os de precipitações, são muito escassos na região. As estações climatológicas mais próximas da área em estudo são: São Gonçalo (na bacia do Alto Piranhas), Coremas (situada no interior da bacia do Rio Piancó) e Triunfo (no Estado de Pernambuco, sendo a mais próxima da região de estudo). Estas duas últimas se encontram desativadas. A estação de Triunfo, segundo o PDRH/PB (SCIENTEC, 1997), esta localizada a 1.010 m de altitude, é caracterizada por um microclima local devido às influências orográficas sobre o regime de precipitação, vento e temperatura.

Na região das cabeceiras, próximo ao reservatório de Catolé II domina o clima do tipo BSw<sup>h</sup>, conforme classificação de Köeppen, enquanto as demais partes da bacia são classificadas como Awig. A temperatura média anual é superior a 26 °C e a amplitude térmica anual é da ordem de 5 °C. As temperaturas mais elevadas ocorrem nos meses mais secos, ou seja, outubro a janeiro, e as menos elevadas entre abril e julho.

A insolação diária alcança uma média de 7,3 horas observadas na estação de Triunfo e 8,7 horas na estação de São Gonçalo. A velocidade média do vento na bacia, em termos médios, alcança 2,8 m/s, observados na estação de São Gonçalo.

A umidade relativa do ar média anual é de 64% na estação de São Gonçalo, enquanto na estação de Triunfo chega a 72%. Observa-se que os meses mais úmidos são março, abril e maio, quando a umidade atinge 74% em São Gonçalo e 81% em Triunfo. Os meses mais secos são outubro e novembro, aonde chega a atingir 56% e 60% em São Gonçalo e Triunfo, respectivamente.

A Tabela 5.1 mostra os valores mensais da temperatura, horas diárias de insolação, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento.

A precipitação média anual é de cerca 850 mm na região próxima ao reservatório de Catolé II, chegando a 950 mm na confluência com o rio Piancó. Nos meses de fevereiro, março e abril a precipitação representa cerca de 60% desse valor, apresentando um coeficiente

de variação anual em torno de 40%. A evaporação anual é cerca de 3.000 mm para as estações de Coremas e São Gonçalo. Os meses que apresentam maiores taxas são os de setembro a dezembro com uma média em torno de 315,52 mm. Na estação de Triunfo a evaporação anual é cerca de 2200 mm.

Tabela 5.1 – Dados climatológicos da região.

Variáveis	Posto	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Temperatura média (°C)	S. Conçalo	27,3	26,5	26,1	25,9	23,4	25,1	26,2	26,3	25,6	28,8	27,8	27,9
	Coremas	28,6	27,0	27,2	26,8	26,6	25,4	25,5	26,3	27,6	28,3	28,8	28,7
Horas diárias de insolação	S. Conçalo	8,7	8,1	7,6	7,9	8,4	8,4	8,8	9,5	9,4	9,7	9,0	9,1
	Triunfo	7,3	7,4	6,2	6,4	6,3	5,6	6,6	8,6	8,4	8,5	8,4	7,4
Umidade relativa do ar (%)	S. Conçalo	62	69	74	74	72	68	62	59	57	56	57	58
	Triunfo	68	76	79	81	81	81	79	72	65	60	61	64
Velocidade do vento (m/s)	S. Conçalo	2,6	2,3	2,0	2,0	2,5	2,7	3,0	2,8	3,3	3,3	3,2	3,3

Fonte: PDRH/PB (SCIENTEC, 1997).

### 5.1.2 – GEOLOGIA

A constituição geológica da sub-bacia do riacho Santana é essencialmente de rochas do complexo cristalino Pré-cambriano, excetuando-se apenas as formações aluvionares recentes. O Grupo Cachoeirinha, associado às rochas plutônicas granulares, ocupam aproximadamente toda a área total da bacia. Na região das cabeceiras afloram as rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico (SCIENTEC, 1997).

### 5.1.3 – PEDOLOGIA

A avaliação e a distribuição dos solos predominantes na bacia do rio Piancó pautam-se nos vários estudos de solos existentes no Estado. Na avaliação de terras na sub-bacia do riacho Santana observa-se a ocorrência de três classes de solos em ordem de abrangência (SCIENTEC, 1997): Litossolos Eutróficos, Podzólicos Vermelho, Amarelo Eutróficos e Cambissolos Eutróficos Latossólico.

Na avaliação da capacidade de uso da bacia do rio Piancó, as classes de solos foram inseridas em três grupos (SCIENTEC, 1997):

- Grupo A - terras passíveis de utilização com culturas anuais, perenes, pastagens e/ou reflorestamento e vida silvestre;

- Grupo B - terras impróprias para cultivos intensivos, mas ainda adaptadas para pastagens e/ou reflorestamento e vida silvestre, porém cultiváveis em casos de algumas culturas especiais protetoras do solo;
- Grupo C - Terras não adequadas para cultivos anuais, perenes, pastagens ou reflorestamentos, porém apropriados para proteção da flora e fauna, recreação ou armazenamento de água.

Tem-se que grande parte dos solos da sub-bacia do riacho de Santana está inserida na Classe B, apenas nas cabeceiras e na região próxima ao município de Manaíra que se encontram solos do tipo Classe A.

## **5.2 – DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS**

Para permitir uma boa compreensão e avaliação do comportamento do modelo, quando submetido a um conjunto de condições variáveis no tempo, foram estabelecidos cenários que, a partir de determinadas situações climáticas, estão centrados em aspectos operacionais do sistema.

Celeste (2006) cita três razões para a utilização desses cenários:

- 1) Saber o potencial de utilização dos recursos hídricos dos reservatórios em anos de seca, principalmente no cultivo de culturas perenes;
- 2) A dificuldade de utilização de uma série temporal extensa em um modelo de otimização multiobjetivo, que leva em consideração muitas variáveis; e
- 3) A incerteza de como serão os regimes pluviométricos/fluviométricos em anos posteriores aos anos em estudo.

Para a definição dos cenários é utilizada a técnica dos quantis definida por Xavier et. al., (2002) apud Silva et. al., (2004), recomendada pelo Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba (LRMS), para a identificação e avaliação da qualidade da precipitação no estado da Paraíba. Para tanto, tomou-se como base as categorias aplicadas para o estado do Ceará, as quais são estatisticamente classificadas como Muito Seco, Seco, Normal, Chuvoso e Muito Chuvoso.

Na Paraíba a classificação por quantis foi aplicada a regiões pluviometricamente homogêneas levando-se em consideração o trabalho desenvolvido por Silva (1996) apud Silva

et. al., (2004) e como resultado obteve-se a divisão do estado da Paraíba em 6 (seis) regiões pluviometricamente homogêneas (Figura 5.3).

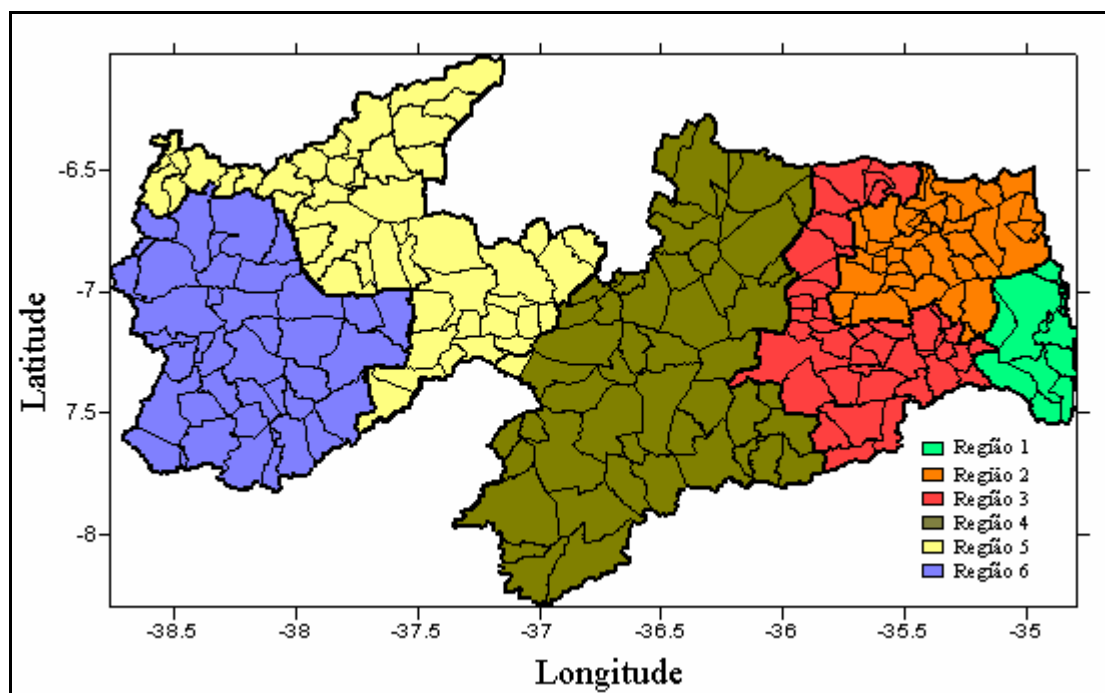


Figura 5.3 – Distribuição geográfica das regiões pluviometricamente homogêneas do Estado da Paraíba, com os respectivos limites municipais.

Observa-se na que a sub-bacia do rio Piancó esta inserida quase que totalmente na região 6 (denominada Alto Sertão), cuja os valores das faixas pluviométricas para o ano hidrológico de cada categoria estão observadas na Tabela 5.2. Um ano será considerado seco quando a precipitação total anual estiver entre os valores de 629,4 mm e 800,4 mm.

Tabela 5.2 – Valores das faixas pluviométricas para o ano hidrológico de cada categoria para a região 6.

#### CATEGORIAS

## 5.3 – DADOS DO SISTEMA ESTUDADO

### 5.3.1 – CARACTERIZAÇÃO HÍDRICA DO SISTEMA

Como dito anteriormente, na sub-bacia estudada estão inseridos dois reservatórios. O reservatório Catolé II, situado na longitude 30°10'51" Oeste e latitude 7°41'51" Sul, tem uma capacidade de 10,5 hm<sup>3</sup>, com a finalidade de abastecimento da Cidade de Manaíra, que no último censo (CENSO 2000) apresentava uma população urbana de 4.806 habitantes. O reservatório Poço Redondo, situado na longitude 38°18'18" Oeste e latitude 7°35'10" Sul, abastece a cidade de Santana de Mangueira, cuja população urbana é de 1.850 habitantes (CENSO 2000). Este reservatório tem uma capacidade de 62,7 hm<sup>3</sup> atendendo, também, as demandas hídricas de um perímetro irrigado de 500 ha do mesmo nome.

Segundo a COIPPI – Cooperativa Agropecuária dos Irrigantes do Projeto Piancó (Lima, 2004) as culturas previstas a serem cultivadas no perímetro irrigado são: manga, coco, graviola, mamão, melancia, melão, feijão, banana, tomate, algodão.

A Figura 5.4 abaixo apresenta o layout do sistema estudado.

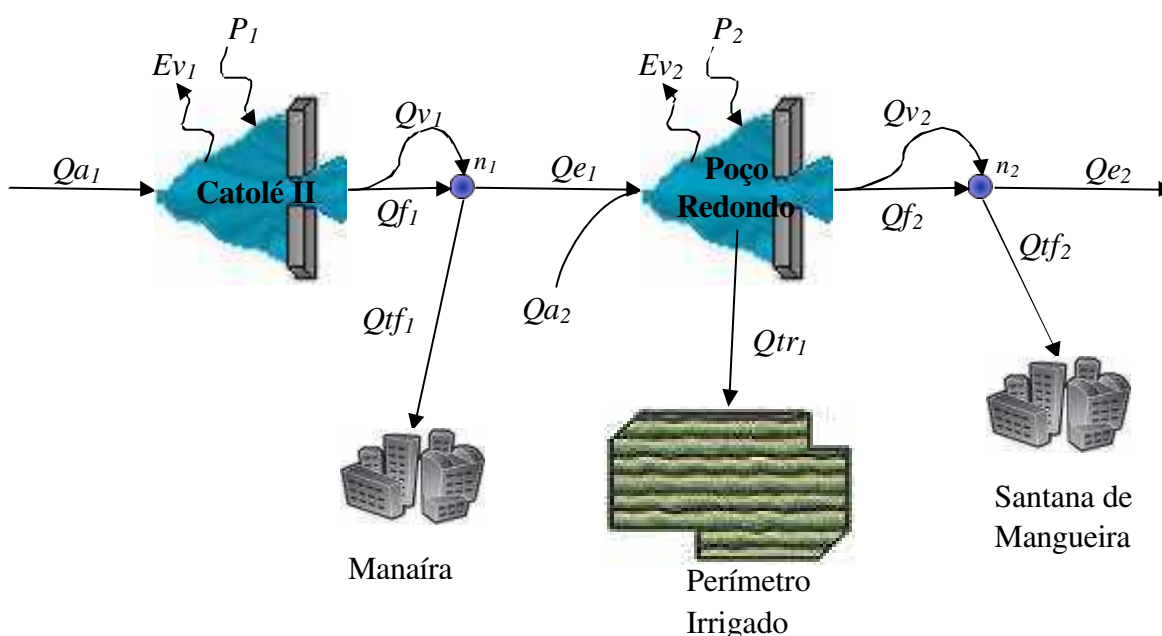


Figura 5.4 – Layout do sistema estudado.



### 5.3.2 – PRECIPITAÇÃO

Os dados de precipitação direta sobre os reservatórios e perímetro irrigada foram obtidos de SUDENE (1990). Foram considerados os postos pluviométricos mais próximos possíveis dos reservatórios e do perímetro irrigado.

A Tabela 5.3 mostra os postos utilizados para cada reservatório e para o perímetro irrigado.

Tabela 5.3 – Postos pluviométricos utilizados.

	Posto Utilizado					Período de observação
	Nome	Código	Longitude	Latitude	Altitude (m)	
Ac. Catolé II	Manaíra	3853467	38° 11'	7° 42'	605	1933 – 1985
Ac. Poço Redondo	Ibiara	3843919	38° 25'	7° 29'	330	1963 – 1985
Perímetro Irrigado						

Fonte: SUDENE (1990)

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os dados de pluviometria utilizados nos cenários hidroclimáticos escolhidos para cada posto utilizado.

Tabela 5.4 – Dados da precipitação mensal do posto Manaíra.

Cenário	Precipitação mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Seco	113,7	78,3	268,6	32,0	0,0	0,00	9,0	2,0	0,0	0,0	5,0	67,3
Normal	129,6	67,0	201,3	319,0	94,4	8,6	1,3	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Chuvoso	114,1	274,3	189,2	188,5	38,2	20,8	73,4	0,0	0,0	0,0	64,0	102,5
Pluri anual	114,1	274,3	189,2	188,5	38,2	20,8	73,4	0,0	0,0	0,0	64,0	102,5
	39,0	190,3	210,4	80,0	7,0	0,0	0,0	0,0	25,0	31,3	17,9	36,0
	59,4	80,5	227,7	206,8	79,6	45,1	25,5	0,0	0,0	5,0	0,0	89,2
	51,0	94,4	157,4	154,2	135,3	12,0	16,0	0,0	6,0	17,2	0,0	53,2
	129,6	67,0	201,3	319,0	94,4	8,6	1,3	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: SUDENE (1990)

Tabela 5.5 – Dados da precipitação mensal do posto Ibiara.

Cenário	Precipitação mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Seco	31,1	52,9	269,5	81,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,3
Normal	130,9	261,2	351,0	159,5	68,8	13,4	0,0	4,3	18,4	3,2	8,3	45,7
Chuvoso	73,3	207,5	402,7	195,4	134,9	59,3	75,0	5,5	18,3	0,0	0,0	22,4
Pluri anual	73,3	207,5	402,7	195,4	134,9	59,3	75,0	5,5	18,3	0,0	0,0	22,4
	8,4	182,6	82,6	108,8	7,1	0,0	31,2	0,0	66,2	91,6	12,8	44,7
	143,7	123,8	139,6	186,4	103,0	68,9	66,8	3,2	7,5	6,4	3,1	55,6
	113,7	159,6	139,5	149,2	101,3	35,6	86,2	7,1	13,5	3,4	48,4	31,3
	130,9	261,2	351,0	159,5	68,8	13,4	0,0	4,3	18,4	3,2	8,3	45,7

Fonte: SUDENE (1990)

### 5.3.3 – EVAPORAÇÃO

A estimativa dos volumes médios mensais evaporados em reservatórios é obtida pela multiplicação da área do espelho d'água pela correspondente lâmina de evaporação. Não se obtendo, em geral, medições locais de evaporação, pode-se lançar mão do uso de registro de dados existente em regiões próximas aos reservatórios, desde que seja resguardada a semelhança das condições fisiográficas. Para representar a evaporação em reservatórios é comum, na prática, o uso de dados do Tanque Classe A, onde se aplica um fator de correção  $kt$ . Os valores desse fator podem variar entre 0,7 e 1,0, sendo mais provável para esta região estar entre os valores de 0,80 e 0,85 (Laraque, 1989 apud Lima, 2004).

Oliveira et. al. (2005) estudando os valores do coeficiente  $kt$  para a região do sertão e cariri paraibano, verificaram que o uso do valor 0,7 ao invés de corrigir contribui para subestimar a evaporação obtida no tanque classe A durante os períodos frio e úmido. Os autores propõem, também, diferentes valores mensais do coeficiente  $kt$  para a região do sertão paraibano (mais precisamente na cidade de Patos), sendo tais valores utilizados neste trabalho.

Os dados de evaporação média mensal obtidos do posto Climatológico de Coremas e do coeficiente  $kt$  para os reservatórios e o perímetro irrigado estudados, podem ser observados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Dados de evaporação média mensal do Tanque Classe A.

Posto Climatológico	Evaporação média mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Coremas <sup>1</sup>	272,3	215,4	204,1	182,4	183,1	182,2	219,9	271,9	299,6	332,9	319,0	310,6
$kt^2$	0,77	0,79	0,78	0,92	0,93	0,91	0,80	0,81	0,77	0,78	0,76	0,76

Fonte: <sup>1</sup>PDRH/PB (SCIENTEC, 1997) e <sup>2</sup>Oliveira et. al. (2005)

### 5.3.4 – VAZÕES AFLUENTES

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios foram obtidos do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba - PDRH/PB (SCIENTEC, 1997). A série pseudo-histórica de vazões foi gerada pelo o modelo hidrológico chuva x vazão MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável) para uma série de precipitação média diária de 57 anos, optando-se por uma abordagem determinística conceitual através da utilização do referido modelo.

O MODHAC é uma versão aperfeiçoada do MOHTSAR – Modelo Hidrológico para o Trópico do semi-árido (Lanna e Marwell, 1986 apud Lima, 2004), que se aplica, não só às



### 5.3.5.1 – COTA-ÁREA-VOLUME

Os dados das curvas *cota-área-volume* dos reservatórios foram obtidos do Cadastro de Açude do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Piranhas e Piancó (SCIENTEC, 1997).

### 5.3.5.2 – VOLUMES MÁXIMOS E MÍNIMOS

Na Tabela 5.9 estão listados os reservatórios com os seus volumes máximos e mínimos, as suas respectivas áreas de contribuição e sua classificação segundo a Lei estadual nº 6.344/97 do Estado da Paraíba.

Tabela 5.9 – Dados dos reservatórios estudados.

Reservatório	Volumes (hm <sup>3</sup> )		Área controlada <sup>1</sup> (km <sup>2</sup> )	Classificação Lei 6.344/97
	Maximo <sup>1</sup>	Mínimo <sup>2</sup>		
Catolé II	10,50	0,50	132,51	Médio
Poço Redondo	62,75	3,33	469,53	Médio

Fonte: <sup>1</sup>PDRH/PB (SCIENTEC, 1997) e <sup>2</sup>Lima (2004)

### 5.3.5.3 – VERTEDOUROS

A vazão máxima vertida projetada para cada reservatório foi determinada pela Equação (5.1) abaixo, referida em DAEE (2005):

$$Q_{vmax,r} = 4,43 * C_{v_r} * B_{v_r} * L_{v_r}^{1,5} \quad (5.1)$$

onde,

$C_{v_r}$  – coeficiente de descarga do vertedor do reservatório  $r$ ;

$B_{v_r}$  – largura de base do vertedor do reservatório  $r$ ;

$L_{v_r}$  – lâmina máxima d'água projetada sobre a soleira do vertedor do reservatório  $r$ .

Na Tabela 5.10 estão os dados dos vertedouros de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 5.10 – Dados dos vertedouros dos reservatórios estudados.

Reservatório	$C_v^1$	$B_v^2$ (m)	$L_v^2$ (m)	$H_{vert}^2$ (m)
Catolé II	0,35	100	1,50	141,50
Poço Redondo	0,35	150	2,00	107,00

Fonte: <sup>1</sup>DAEE(2005) e <sup>2</sup>PDRH/PB (SCIENTEC, 1997)

### 5.3.5.4 – DESCARGA DE FUNDO

Na Tabela 5.11 apresenta os dados sobre o descarregador de fundo de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 5.11 – Dados do descarregador de fundo dos reservatórios estudados.

Reservatório	$Cf^1$	$Df^2$ (mm)	$Hfs$ (m)	$Hfe$ (m)
Catolé II	0,60	200	127,00	127,00
Poço Redondo	0,60	500	88,00	88,00

Fonte: <sup>1</sup>DAEE(2005) e <sup>2</sup>PDRH/PB (SCIENTEC, 1997)

### 5.3.3.5 – TOMADA D'ÁGUA

A única tomada d'água considerada neste estudo diz respeito ao perímetro irrigado de Poço Redondo, cujo os valores do sistema adutor considerado estão dispostos na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Dados do sistema adutor para o perímetro irrigado de Poço Redondo.

$Htr$ (m)	$nh$ (horas/dia)	$nb$	$Vbcap$ (l/s)
97,00	20	3	500

### 5.3.6 – DEMANDAS HÍDRICAS

Na bacia estudada foram consideradas as seguintes demandas hídricas: abastecimento urbano, irrigação, perenização do rio.

#### 5.3.6.1 – ABASTECIMENTO URBANO

A cidade de Manaíra é abastecida pelo reservatório de Catolé II através de uma estação elevatória, com duas bombas submersas com capacidades de 38 m<sup>3</sup>/h, para captação direta na saída da descarga de fundo do reservatório. A adutora é constituída de tubos de ferro fundido com diâmetro de 150 mm e extensão de 3.972 metros (SCIENTEC, 1997).

O reservatório de Poço Redondo abastece a cidade de Santana de Mangueira por via indireta, através de poço amazonas localizados no rio. A estação elevatória, constituída por duas bombas submersas, tem uma capacidade de 10,52 m<sup>3</sup>/h. A adutora é construída em tubos de ferro fundido com diâmetro de 75 mm e uma extensão de 850 metros (SCIENTEC, 1997).

Na Tabela 5.13 estão listados os reservatórios com as respectivas localidades abastecidas e as demandas hídricas médias para o abastecimento urbano referentes ao ano 2006 fornecido pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba – CAGEPA.

Tabela 5.13 – Demandas hídricas para abastecimento urbano por reservatório estudado.

Reservatório	Municípios Atendidos	Demanda (m <sup>3</sup> /h)
Catolé II	Manaíra	34,7
Poço Redondo	Santa de Mangueira	9,30

Fonte: CAGEPA

### 5.3.6.2 – IRRIGAÇÃO

Na avaliação das demandas hídricas de irrigação foi estabelecido, primeiramente, um plano de cultivo para perímetros considerados no estudo, com base nas suas aptidões agrícolas obtidos de estudos de viabilidade realizados anteriormente e, também, considerando os sistemas de irrigação já implantados. Neste trabalho foram selecionadas quatorze culturas, das quais cinco são perenes, duas são semi-perenes e sete culturas sazonais (temporárias), sendo as culturas sazonais cultivadas duas vezes ao ano, na safra (s) e entressafra (es).

Na Tabela 5.14 são apresentados dados característicos das culturas adotados neste estudo. Os valores da produtividade das culturas (*Prod*), custo de produção das culturas (*Cprod*) e mão-de-obra requerida das culturas (*Hdc*) foram retirados Manual de Orçamento Agropecuário do Banco do Nordeste S/A (2003). O preço médio de comercialização (*Prc*) das culturas foi obtido da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA) apud Silva (2004). Os dados referentes ao sistema de irrigação, sua eficiência de distribuição e seus requerimentos de pressão estão de acordo com Doorenbos e Kassam (2000) e Gomes (1999). As eficiências de aplicação estão de acordo com a Resolução nº 687 da Agencia Nacional de Águas (ANA, 2004).

O plano de cultivo do perímetro e seus respectivos coeficientes de cultivo (*kc*) são mostrados na Tabela 5.15. Os valores de *kc* para as culturas semi-perenes e perenes foram considerados na fase de produção.

Assumiu-se que o custo da água bruta para irrigação é de R\$ 20,00/1.000 m<sup>3</sup> de água e o custo de energia é de R\$0,29/Kwh. Estima-se que o sistema de bombeamento tenha uma eficiência de 75%. Para cada uma das culturas acima citadas foi designada uma área máxima de cultivo de 50 hectares. Não foram estabelecidas áreas mínimas para os cultivares, de forma



### 5.3.6.3 – VAZÃO EFLUENTE MÍNIMA OU VAZÃO ECOLÓGICA

A vazão ecológica ou vazão efluente mínima é a vazão que se deve garantir a jusante de uma estrutura de armazenagem (barragem) ou captação (tomada d'água), para que se mantenham as condições ecológicas naturais do rio (DICIONÁRIO AMBIENTAL, 2004 apud BARBOSA et al., 2005). Bernado (1996) apud Pelissari e Sarmiento (2001) define que a vazão ecológica é a demanda necessária de água a se manter num rio de forma a assegurar a manutenção e a conservação dos ecossistemas aquáticos naturais, dos aspectos da paisagem e outros de interesse científico ou cultural.

Diversas metodologias foram desenvolvidas para a determinação da vazão ecológica. Barbosa et al. (2005) e Benetti et al. (2003) apresentam o estado-da-arte sobre o assunto. As metodologias são classificadas em vários grupos segundo critério dos autores. No entanto, é quase um consenso classificá-las como: métodos hidrológicos, métodos hidráulicos, método de classificação de habitats e outros métodos que não se enquadram na classificação acima.

As vantagens dos métodos hidrológicos são os seguintes: a) eles são, relativamente, de uso simples; b) estabelecem uma baixa resolução na estimativa da quantidade de água exigida; c) relativamente poucas informações são necessárias, em muitos casos somente a série de vazões histórica é exigida; d) não requer custos elevados e e) índices hidrológicos que são derivados de tais métodos podem ser incorporados como sub-componentes de métodos holísticos. As desvantagens dos métodos hidrológicos são os seguintes: a) embora os métodos hidrológicos tenham um baixo nível de informação eles demandam uma larga porção de padrões e de parâmetros exigidos; b) esses métodos deveriam somente ser aplicados para estudos de alto nível de oportunidade. (FRAGOSO JUNIOR et al., 2004).

Collischonn et al (2005) lembram que os métodos hidráulicos relacionam características do escoamento com necessidades da biota aquática, mas para sua correta aplicação necessitam de relações específicas para a região em estudo.

Benetti et al. (2003) consideram os métodos de classificação de habitats como os mais completos em termos de consideração de aspectos ambientais. Contudo, é necessária a identificação das características físicas e ambientais do local em estudo, dependendo do conhecimento e da opinião de uma equipe multidisciplinar.

Garcia e Andrezza (2004) enfatizam que, independentemente do método utilizado, a vazão ecológica deve possibilitar ao ambiente hídrico a manutenção da integridade dos processos naturais que se dão entre o meio físico e a biota, valorizando especialmente as inter-relações vinculadas às variações do regime hidrológico natural.



No Brasil não há ainda uma legislação específica para a determinação da vazão ecológica. Alguns estados brasileiros definem indiretamente o conceito da vazão ecológica ao estabelecerem seus critérios de outorgas de direito de uso da água. Os métodos adotados são puramente hidrológicos. Barbosa et al. (2005) observam que os estados do Nordeste usam majoritariamente como vazão de referência a  $Q_{90}$  (podendo ser regularizada no caso de reservatórios) enquanto que os estados do Sul e Sudeste usam a  $Q_{7,10}$ . Devido a efemeridade e intermitência dos cursos de água no semi-árido nordestino torna sem sentido a aplicação da  $Q_{7,10}$ .

Garcia e Andrezza (2004) observam que os critérios usualmente adotados no País para o estabelecimento da vazão ecológica não consideram as especificidades dos ecossistemas aquáticos regionais/locais, focando-se apenas sobre uma vazão mínima, reduzindo essa questão, tão relevante para a manutenção das condições ecológicas dos cursos d'água que sofrem as intervenções, a uma decisão praticamente arbitrária e generalizada.

A qualidade ambiental de um rio e dos ecossistemas associados é fortemente dependente do regime hidrológico, incluindo a magnitude das vazões mínimas, a magnitude das vazões máximas, o tempo de duração das estiagens, o tempo de ocorrência das cheias, a frequência das cheias, a época de ocorrência de eventos de cheias e estiagens, entre outros. Por isto, não é suficiente a definição de uma vazão mínima a ser mantida a jusante de um importante uso da água. Em alguns casos, a vazão mantida a jusante é sempre superior à vazão definida como “ecológica” e, mesmo assim, ocorrem danos ambientais importantes. (COLLISCHONN et al. 2005).

Poff et al., (1997) apud Collischonn et al., (2005) afirmam que ao regime hidrológico natural de vazões estão associadas diversas outras variáveis ambientais, como a temperatura da água, a concentração de sedimentos, nutrientes e oxigênio dissolvido. Os eventos de cheia podem ser acompanhados por muitas mudanças físicas e químicas no ambiente aquático. O aumento do nível e da velocidade da água pode ser acompanhado por uma queda na temperatura e por uma elevação da turbidez. Onde estes efeitos ocorrem sazonalmente a vida aquática esta adaptada para tirar vantagem dessas condições.

O método proposto por Garcia e Andrezza (2004) mantém, quando possível, o comportamento sazonal do curso d'água. Permite que as vazões ecológicas sejam definidas na fase de projeto e licenciamento de forma racional e objetiva e atendam as premissas ambientais básicas. Na fase de operação, a determinação da vazão ecológica requererá a utilização de uma equação linear, que resultara em manobras das estruturas hidráulicas, como a abertura ou fechamento de comportas. Contudo, para a aplicação do método proposto é

necessário definir as vazões afluentes máximas e mínimas ( $Q_{amax}$  e  $Q_{amin}$ ) e os coeficientes de sustentabilidade hídrico-ambiental máximo e mínimo ( $k_{max}$  e  $k_{min}$ ).

Santos et. al. (2006) aplicou tal metodologia ao reservatório Catolé II recomendando que a relação  $Q_{amax}/Q_{amin}$  não ultrapasse o valor 40. Verificou-se que os maiores valores das vazões ecológicas são observado primeiramente para os maiores valores de  $k_{max}$  seguida dos maiores valores do  $k_{min}$ . Porém, maiores valores de  $k_{min}$  (independentemente do valor do  $k_{max}$ ) podem resultar nas maiores vazões ecológicas, dependendo da vazão afluente e dos valores de  $Q_{amax}$  e  $Q_{amin}$  utilizados. Os autores ainda recomendam que os valores de  $Q_{amax}$  e  $Q_{amin}$  devam ser determinados como a média dos valores da vazão afluente de cada mês acima e abaixo da média histórica respectivamente.

Neste trabalho para a determinação da vazão efluente mínima ou vazão ecológica liberada pelo reservatório para a perenização do rio utilizou-se o método proposto por Garcia e Andrezza (2004), devido a capacidade de manter, quando possível, o comportamento sazonal do curso d'água.

A Tabela 5.16 mostra os valores de  $Q_{amax}$  e  $Q_{amin}$  para cada mês e reservatório estudado. Os valores dos coeficientes de sustentabilidade máximo e mínimo utilizados foram 0,8 e 0,2 respectivamente.

Tabela 5.16 – Valores das vazões afluentes máximas e mínimas utilizadas.

Reservatórios	Meses do ano hidrológico											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>Vazões afluentes máximas <math>Q_{amax}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>												
Católé II	0.15	0.87	3.02	3.44	1.57	0.75	0.32	0.08	0.002	0.01	0.04	0.07
Poço Redondo	0.37	2.14	7.43	8.45	3.86	1.83	0.79	0.18	0.01	0.02	0.10	0.17
<b>Vazões afluentes mínimas <math>Q_{amin}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>												
Católé II	0.01	0.07	0.31	0.54	0.29	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Poço Redondo	0.02	0.17	0.76	1.33	0.72	0.24	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

## 5.4 – SITUAÇÕES ESTUDADAS

A fim de avaliar o caráter multiobjetivo do modelo foram propostas situações a cada cenário na qual se varia a prioridade de atendimento dos objetivos.

Neste estudo foram considerados os seguintes objetivos:

- Abastecimento urbano (através das tomadas d'água de fundo dos reservatórios);
- Volume meta dos reservatórios;
- Receita líquida oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado;
- Mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado;

- Perenização dos rios a jusante dos reservatórios (vazão efluente dos reservatórios).

A Tabela 5.17 apresenta as prioridades de cada objetivo em cada situação analisada, na qual o abastecimento urbano sempre será a 1ª prioridade do modelo e o volume meta do reservatório será sempre a última prioridade. Para o cenário plurianual considerou-se apenas a 1º Situação.

Tabela 5.17 – Prioridades dos objetivos do modelo em cada situação.

OBJETIVOS	PRIORIDADES			
	1º Situação	2º Situação	3º Situação	4º Situação
Abastecimento Urbano	1º	1º	1º	1º
Perenização do rio	2º	2º	2º	4º
Receita líquida	3º	3º	4º	2º
Mão-de-obra	3º	4º	3º	2º
Volume meta	4º	5º	5º	5º

O coeficiente de ponderação para cada objetivo dependerá da prioridade de atendimento dos mesmos. Para a 1º prioridade:  $\omega = 10^3$ ; 2º prioridade:  $\omega = 10^2$ ; 3º prioridade:  $\omega = 10^1$ ; 4º prioridade:  $\omega = 10^0$ ; 5º prioridade:  $\omega = 10^{-1}$ ;

## 5.5 – CRITÉRIOS OPERACIONAIS

O processo de otimização está definido para um período de doze (12) meses, para os cenários seco, normal e chuvoso, e 60 meses para o cenário plurianual, sendo baseado nas séries de valores mensais de pluviometria e de vazões mensais afluentes aos reservatórios.

Os critérios operacionais idealizados para os reservatórios observaram os seguintes pressupostos, para todos os cenários e situações estudadas:

- Considerou-se o volume inicial do reservatório como sendo 40% do volume máximo;
- O mês em que se iniciou o processo de otimização foi o mês de janeiro;
- O volume do reservatório, ao final do período de estudo de otimização, deve ser maior ou igual ao volume inicial, garantindo a sustentabilidade hídrica;
- O volume meta do reservatório em todos os meses será de 70% do volume máximo do mesmo;
- No balanço hídrico dos reservatórios não são consideradas perdas por infiltração.

Para a operação do perímetro irrigado foram observados os seguintes pressupostos:

- O calendário agrícola estabelecido para perímetro irrigado, conforme apresentado na Seção 5.3.5.2 do Capítulo 5, é mantido invariável em todas as situações e cenário estudados; as culturas permanentes estão consideradas como culturas em plena capacidade de produção;
- No cálculo das demandas de irrigação, adotando-se lâminas de rega fixas, considerou-se não existir dotação por capilaridade na zona radicular das plantas e nem reserva de água no solo no princípio de cada mês; não foram contempladas também dotações de água para lixiviação de sais no solo, embora seja um fator importante a ser considerado em projetos de irrigação, principalmente em regiões semi-áridas.

O coeficiente de perda, que representa as perdas por evaporação e a infiltração nas calhas dos rios, foi considerado em torno de 10%.

## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo serão apresentados e discutidos os resultados desta pesquisa para os cenários e situações idealizadas, conforme descrito no Capítulo VI.

#### 6.1 – CENÁRIO NORMAL

##### 6.1.1 – 1º SITUAÇÃO

Nesta situação a prioridade máxima é o abastecimento urbano das cidades, seguida da perenização dos rios (vazão efluente dos reservatórios), receita líquida e mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado, sendo o último objetivo o volume meta dos reservatórios.

A Figura 6.1 apresenta as vazões mensais liberadas pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira.

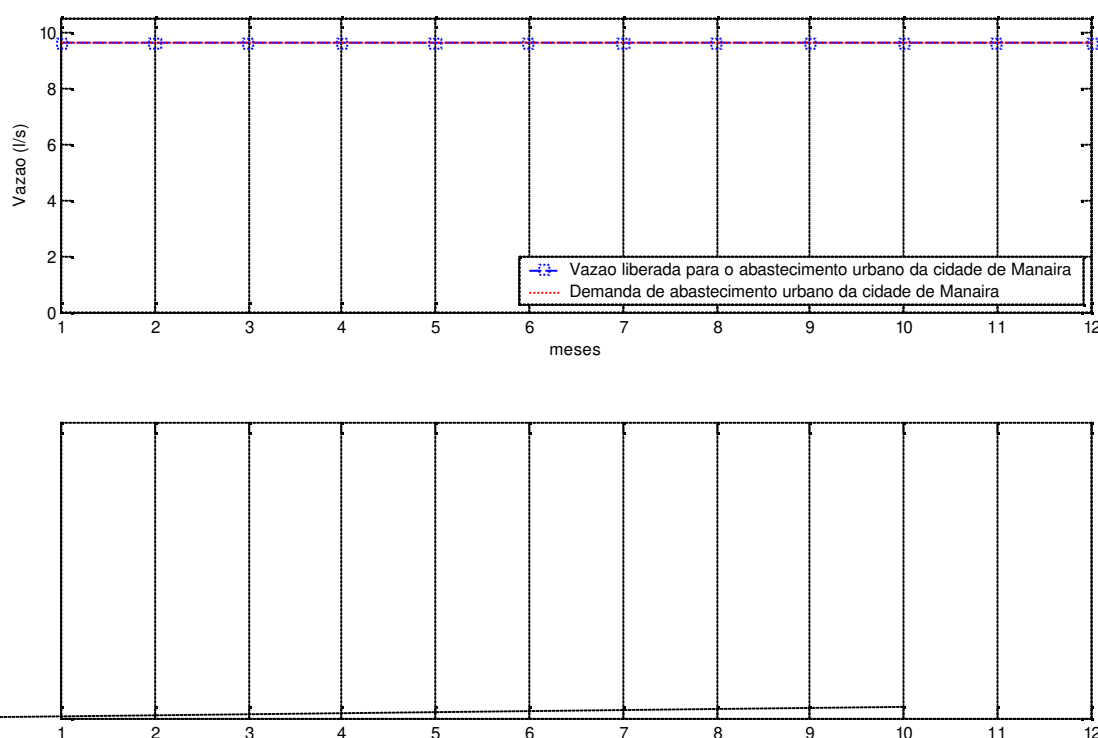


Figura 6.1 – Vazões liberadas pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 1º Situação no cenário normal.

Tem-se que demandas estabelecidas para o abastecimento urbano foram atendidas completamente.

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente.

Tabela 6.1 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 1º Situação no cenário normal.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1632	0,0770	0,0994	0,1609	0,0523	0,0000	0,0000
Fevereiro	4,0436	0,2328	0,0500	0,1269	0,2754	0,0000	0,0000
Março	4,5977	1,1441	0,1554	0,1229	0,6225	0,0000	0,0000
Abril	7,0578	3,0054	0,2971	0,1563	0,6862	0,0000	0,0000
Mai	9,9517	3,7566	0,1118	0,2018	0,7727	0,0000	0,0000
Junho	10,5000	1,5754	0,0115	0,2216	0,8170	0,0000	0,0000
Julho	10,3500	0,1566	0,0018	0,2382	0,0701	0,0000	0,0000
Agosto	10,0358	0,0000	0,0045	0,2937	0,0250	0,0000	0,0000
Setembro	9,7105	0,0013	0,0000	0,3012	0,0254	0,0000	0,0000
Outubro	9,3542	0,0000	0,0000	0,3313	0,0250	0,0000	0,0000
Novembro	9,0272	0,0000	0,0000	0,3020	0,0250	0,0000	0,0000
Dezembro	8,7153	0,0026	0,0000	0,2874	0,0271	0,0000	0,0000
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>0,8293</b>	<b>0,0610</b>	<b>0,2287</b>	<b>0,2853</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.2 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 1º Situação no cenário normal.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	24,5712	0,2138	0,3888	0,6228	0,0740	0,0000	0,4352
Fevereiro	25,2269	0,7980	0,7736	0,5040	0,3863	0,0000	0,0256
Março	27,4634	3,3504	1,0730	0,4867	1,7002	0,0000	0,0000
Abril	31,9864	7,9833	0,5232	0,5505	3,1091	0,0000	0,3239
Mai	38,7829	9,9080	0,2526	0,6252	1,9593	0,0000	0,7796
Junho	41,2601	4,5861	0,0536	0,6635	0,8599	0,0000	0,6391
Julho	40,3344	0,4253	0,0000	0,7137	0,1177	0,0000	0,5195
Agosto	38,7256	0,0000	0,0171	0,8736	0,0067	0,0000	0,7456
Setembro	36,8181	0,0035	0,0707	0,8862	0,0073	0,0000	1,0881
Outubro	34,4204	0,0000	0,0118	0,9578	0,0067	0,0000	1,4451
Novembro	32,1575	0,0000	0,0292	0,8540	0,0067	0,0000	1,4314
Dezembro	30,6160	0,0083	0,1549	0,8002	0,0119	0,0000	0,8926
<b>Vol. inicial</b>	<b>25,1005</b>						
<b>Média</b>	-	<b>2,2731</b>	<b>0,2790</b>	<b>0,7115</b>	<b>0,6872</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,6938</b>

Observa-se que os reservatórios apresentaram volumes no final do período de otimização maiores que o volume inicial estabelecidos, garantindo assim a sustentabilidade do sistema e evidenciando a plena utilização da água disponível para atender as demandas sem

atingir o volume mínimo estabelecido para o reservatório. A depleção do volume do reservatório ocorre entre os meses de agosto até dezembro, coincidindo com os meses de menores vazões afluentes. O maior volume dos reservatórios foi observado no mês de junho, coincidindo com o fim da estação chuvosa do sistema.

Os maiores volumes evaporados são observados nos meses de agosto a dezembro (estação seca), porém em alguns meses da estação chuvosa o volume precipitado ultrapassa o volume evaporado. O reservatório Catolé II perde, no ano, cerca 26% da sua capacidade por evaporação. A perda por evaporação do reservatório Poço Redondo é de cerca 14% da sua capacidade. Em nenhum dos reservatórios estudados houve vertimento.

A vazão de descarga de fundo é responsável pelo abastecimento urbano e pela perenização do rio a jusante do reservatório, sendo o seu valor máximo condicionado ao volume do reservatório. A Figura 6.2 apresenta o

liberação de água do que o necessário para a perenização do rio e o abastecimento urbano. Várias hipóteses podem ser levantadas para este fato, como a transferência de água entre os reservatórios (para abastecer perímetro irrigado e atender restrições de jusante), o volume meta do reservatório, onde há a minimização, de forma implícita, do volume vertido. Para o reservatório Poço Redondo a vazão efluente mínima estabelecida é atendida sem falhas.

Com relação à tomada d'água do reservatório Poço Redondo, tem-se que todas as restrições foram atendidas, não havendo impedimento a esse componente.

A Tabela 6.3 apresenta os valores das áreas alocadas para cada cultura (representa na Figura 6.3) e suas respectivas receitas líquidas auferidas e mãos-de-obra requeridas para o perímetro irrigado estudado.

Tabela 6.3 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 1ª Situação no cenário normal.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	50,00	18549,03	5950,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	0,00	0,00	0,00	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	56541,56	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	44891,27	6850,00	março a junho
	Melão	50,00	-26416,45	10550,00	março a maio
	Tomate	50,00	412983,67	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3433,24	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165402,34	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164202,01	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	17867,79	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	812808,37	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	492153,44	10650,00	Todo ano
	Manga	50,00	96198,96	7550,00	Todo ano
	Coco	50,00	494883,29	10000,00	Todo ano
	Maracujá	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Graviola	50,00	219011,98	9000,00	Todo ano
	Mamão	50,00	72105,05	8050,00	Todo ano
	Goiaba	0,00	0,00	0,00	Todo ano
<b>Total</b>	<b>750,00</b>	<b>3.044.615,55</b>	<b>128.650,00</b>	<b>-</b>	

Observa-se a alocação de área para uma grande variedade de culturas, por causa da restrição da área máxima (50 ha para cada cultura), porém tal restrição deve considerar critérios agrônômicos, financeiros e a aptidão do agricultor com a cultura.



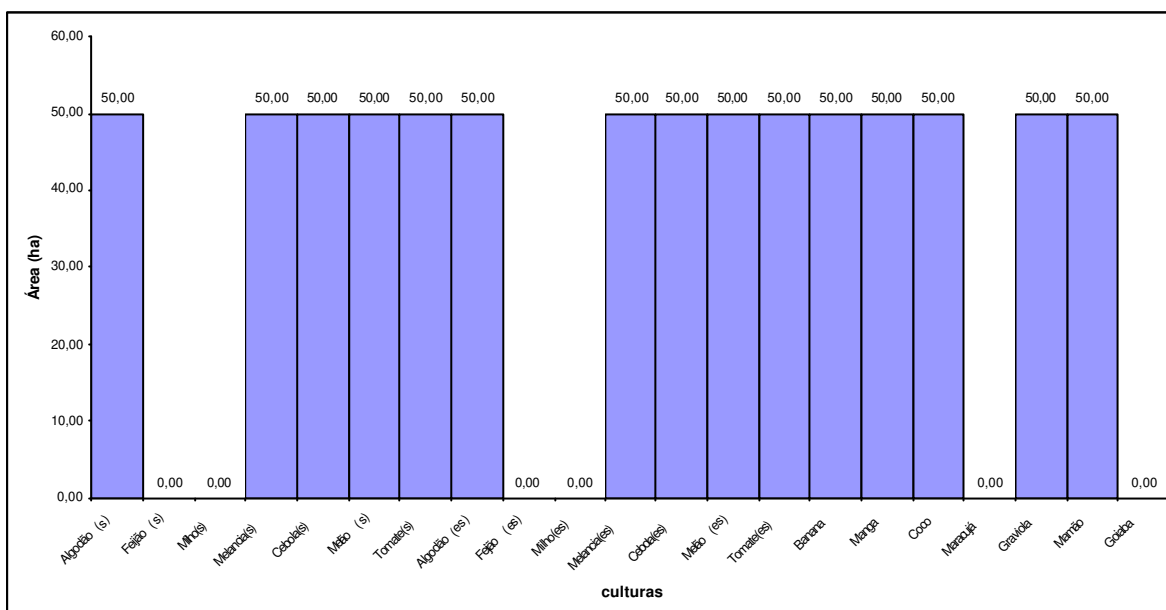


Figura 6.3 – Alocação da área de cada cultura para a 1ª Situação no cenário normal.

Na Tabela 6.3 nota-se que o melão na safra apresenta uma receita líquida negativa, sendo tal cultura alocada devido ao caráter multiobjetivo do problema, ou seja, apesar de resultar numa receita líquida negativa, o melão requer uma quantidade considerável de boa mão-de-obra e, como nessa situação esses objetivos (maximização da receita líquida e da mão-de-obra) têm a mesma prioridade, o melão foi selecionado.

A área total utilizada do perímetro durante o ano foi de 750 ha com uma receita líquida de R\$ 3.044.615,55 e requerendo 128.650 homem/dia de mão-de-obra.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado.

Tabela 6.4 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 1ª Situação no cenário normal.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,4352	0,1993	0,5714	250,00
Fevereiro	0,0256	0,5519	0,5233	300,00
Março	0,0000	1,2790	0,6368	<b>500,00</b>
Abril	0,3239	0,5130	0,7879	<b>500,00</b>
Mai	0,7796	0,1564	0,8131	<b>500,00</b>
Junho	0,6391	0,0000	0,5397	350,00
Julho	0,5195	0,0000	0,4442	250,00
Agosto	0,7456	0,0000	0,6332	300,00
Setembro	1,0881	0,0052	0,9228	<b>500,00</b>
Outubro	1,4451	0,0000	1,2191	<b>500,00</b>
Novembro	1,4314	0,0000	1,2061	<b>500,00</b>
Dezembro	0,8926	0,0610	0,8156	350,00
<b>Média</b>	<b>0,6938</b>	<b>0,2305</b>	<b>0,7594</b>	-

Na Tabela 6.4 nota-se que os meses com menores vazões para irrigação no perímetro são aqueles em que a precipitação efetiva é maior, o que já era esperado, devido ao fato de que, nestes meses, o modelo só tira a água necessária para complementar à necessidade hídrica das culturas sendo parte desta suprida pela precipitação efetiva na área irrigada. Observa-se, em alguns meses (março a abril e setembro a novembro), que toda a área do perímetro irrigado é utilizada, sendo esse o principal fator limitante do para a alocação das áreas das culturas e não a água disponível nos reservatórios.

### 6.1.2 – 2º SITUAÇÃO

Nesta situação a prioridade máxima continua sendo o abastecimento urbano das cidades, seguida da perenização dos rios (vazão efluente dos reservatórios), porém a receita líquida oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado tem uma prioridade maior do que a mão-de-obra, sendo, ainda, o último objetivo o volume meta dos reservatórios.

A Figura 6.4 apresenta vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. As demandas estabelecidas para o abastecimento urbano foram atendidas completamente.

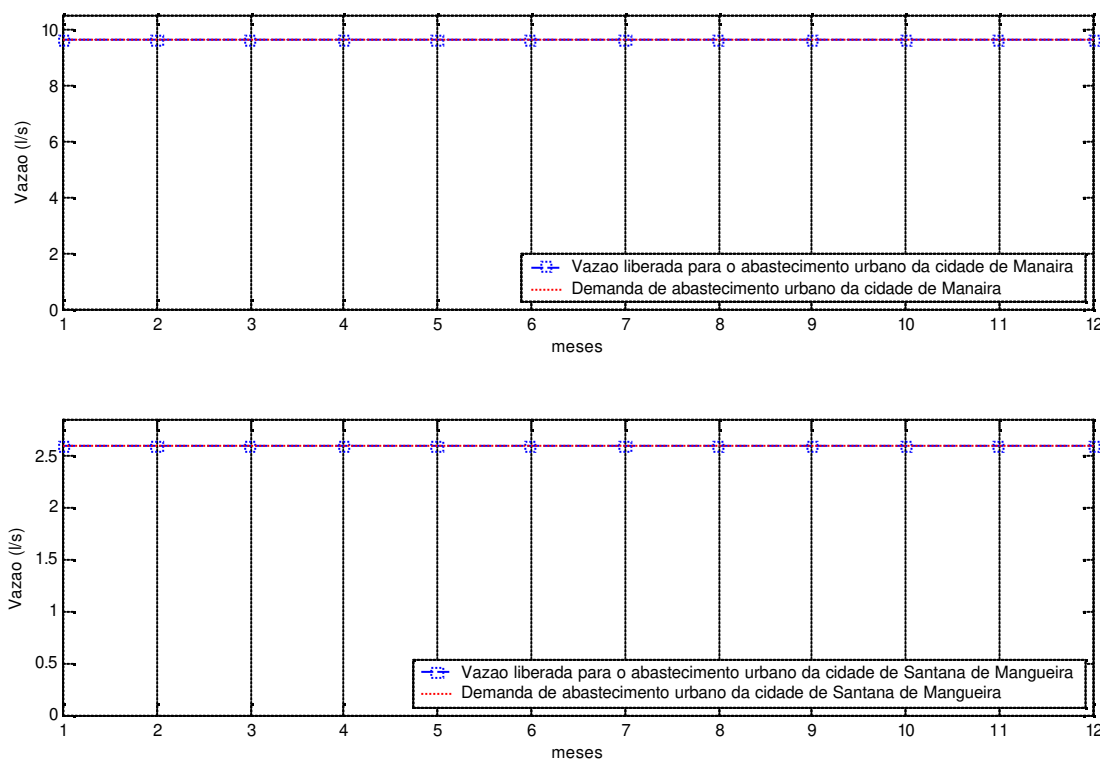


Figura 6.4 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 2º Situação no cenário normal.

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente.

Tabela 6.5 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 2º Situação no cenário normal.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1632	0,0770	0,0994	0,1609	0,0523	0,0000	0,0000
Fevereiro	4,1391	0,2328	0,0504	0,1279	0,1794	0,0000	0,0000
Março	4,6888	1,1441	0,1577	0,1247	0,6274	0,0000	0,0000
Abril	7,1465	3,0054	0,3001	0,1579	0,6900	0,0000	0,0000
Maiο	10,0373	3,7566	0,1126	0,2031	0,7752	0,0000	0,0000
Junho	10,5000	1,5754	0,0115	0,2222	0,8181	0,0839	0,0000
Julho	10,3500	0,1566	0,0018	0,2382	0,0701	0,0000	0,0000
Agosto	10,0358	0,0000	0,0045	0,2937	0,0250	0,0000	0,0000
Setembro	9,7105	0,0013	0,0000	0,3012	0,0254	0,0000	0,0000
Outubro	9,3542	0,0000	0,0000	0,3313	0,0250	0,0000	0,0000
Novembro	9,0272	0,0000	0,0000	0,3020	0,0250	0,0000	0,0000
Dezembro	8,7153	0,0026	0,0000	0,2874	0,0271	0,0000	0,0000
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>0,8293</b>	<b>0,0615</b>	<b>0,2292</b>	<b>0,2783</b>	<b>0,0070</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.6 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 2º Situação no cenário normal.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	24,5198	0,2138	0,3886	0,6225	0,0740	0,0000	0,4866

do volume do reservatório, e conseqüentemente a área do espelho d'água. Houve um vertimento do reservatório Catole II de  $0,08 \text{ hm}^3$  no mês de junho. O reservatório Poço Redondo apresentou fato contrário, ou seja, uma ligeira diminuição do volume precipitado e evaporado, em comparação a situação anterior, devido à ligeira diminuição do volume do reservatório, e, conseqüentemente, a área do espelho d'água, por causa do aumento da demanda hídrica do perímetro. As perdas por evaporação dos reservatórios Poço Redondo e Catolé II continuaram sendo cerca 14% e 26% de suas respectivas capacidades. Não houve vertimento no reservatório Poço Redondo.

A Figura 6.5 apresenta o atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos.

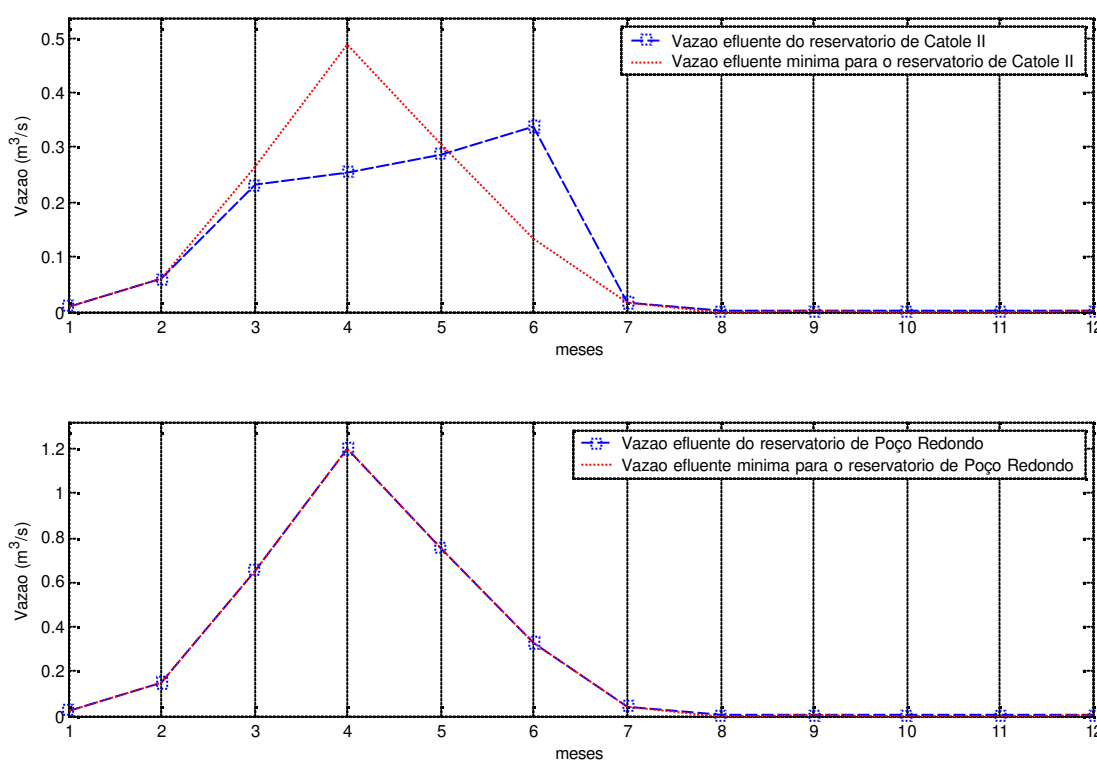


Figura 6.5 – Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 2ª Situação no cenário normal.

Observa-se que, novamente, a vazão efluente mínima do reservatório Catolé II estabelecida para os meses de março e abril não é plenamente atendida devido ao limite da vazão de descarga de fundo máxima nesses meses. Para o reservatório Poço Redondo a vazão efluente mínima estabelecida é atendida sem falhas.

Com relação à tomada d'água do reservatório Poço Redondo, tem-se, novamente, que todas as restrições foram atendidas.

A Tabela 6.7 apresenta os valores das áreas alocadas para cada cultura (representada na Figura 6.6) e suas respectivas receitas líquidas auferidas e mãos-de-obra requeridas para o perímetro irrigado estudado.

Tabela 6.7 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário normal.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo
SAFRA	Algodão	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	50,00	92003,84	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	56541,56	março a maio
	Cebola	50,00	44891,27	março a junho
	Melão	0,00	0,00	março a maio
	Tomate	50,00	412983,67	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	0,00	0,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165402,34	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164202,01	setembro a dezembro
	Melão	50,00	17867,79	setembro a novembro
	Tomate	50,00	812808,37	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	492153,44	Todo ano
	Manga	50,00	96198,96	Todo ano
	Coco	50,00	494883,29	Todo ano
	Maracujá	50,00	114070,32	Todo ano
	Graviola	50,00	219011,98	Todo ano
	Mamão	50,00	72105,05	Todo ano
	Goiaba	0,00	0,00	Todo ano
<b>Total</b>	<b>700,00</b>	<b>3.255.123,89</b>	<b>116.600,00</b>	<b>-</b>

Observa-se que foram alocadas áreas para outras culturas em comparação com a 1º Situação. Entretanto, a Tabela 7.7 mostra que tais culturas resultam em uma maior receita líquida e uma menor mão-de-obra, fato este esperado, pois nesta situação a receita líquida tem maior prioridade do que a mão-de-obra. Com isso, culturas como o algodão, na safra e entressafra, e melão, na safra, foram substituídas por milho, na safra, e maracujá, pois as mesmas apresentam um maior retorno financeiro. A área total utilizada do perímetro durante o ano foi de 700 ha (redução de 50 ha em relação à 1º Situação), porém houve um aumento na receita líquida de R\$ 210.508,34 e uma redução de 12.050,00 homem/dia na mão-de-obra requerida.

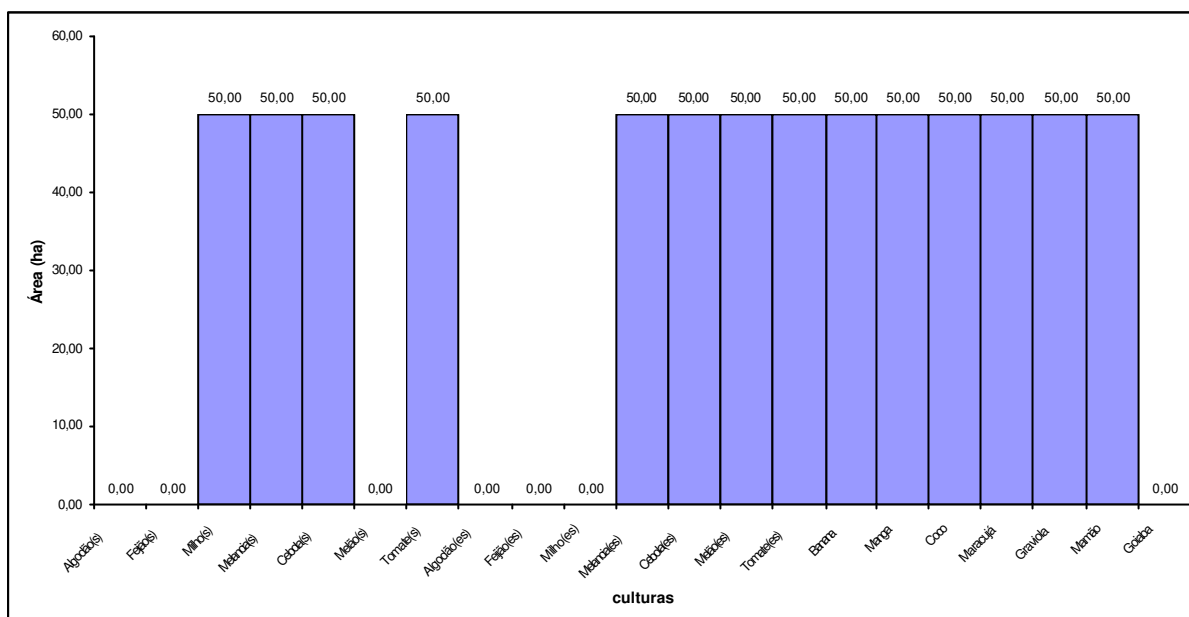


Figura 6.6 – Alocação da área de cada cultura para a 2ª Situação no cenário normal.

A Tabela 6.8 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado.

Tabela 6.8 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 2ª Situação no cenário normal.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,4866	0,2392	0,6552	300,00
Fevereiro	0,0275	0,6439	0,6254	350,00
Março	0,0000	1,2790	0,6917	<b>500,00</b>
Abril	0,3291	0,5130	0,7929	<b>500,00</b>
Mai	0,6925	0,1408	0,7297	450,00
Junho	0,6337	0,0000	0,5389	350,00
Julho	0,6018	0,0000	0,5146	300,00
Agosto	0,7534	0,0000	0,6442	300,00
Setembro	1,0721	0,0052	0,9147	<b>500,00</b>
Outubro	1,4159	0,0000	1,2009	<b>500,00</b>
Novembro	1,4236	0,0000	1,2049	<b>500,00</b>
Dezembro	0,9929	0,0697	0,9100	400,00
<b>Média</b>	<b>0,7024</b>	<b>0,2409</b>	<b>0,7853</b>	-

Comparando os dados da Tabela 6.8 com os dados da 1ª Situação deste cenário, nota-se que houve um ligeiro aumento da vazão para irrigação, da precipitação efetiva e da evapotranspiração do perímetro mesmo com uma menor área plantada e um número menor de culturas selecionadas. Isto se deve ao fato da escolha de mais culturas perenes, que plantada durante todos os meses do ano, requer uma maior demanda hídrica. Toda área do perímetro

foi utilizada nos meses de março, abril, setembro a novembro. Sendo esse, novamente, o principal fator limitante para a alocação das áreas das culturas.

### 6.1.3 – 3º SITUAÇÃO

Nesta situação a prioridade máxima continua sendo o abastecimento urbano das cidades, seguida da perenização dos rios (vazão efluente dos reservatórios), porém a mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado tem uma prioridade maior do que a receita líquida, sendo, ainda, o último objetivo o volume meta dos reservatórios.

A Figura 6.7 apresenta as vazões liberadas dos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. Tem-se que as demandas estabelecidas para o abastecimento urbano foram atendidas completamente do mesmo modo das situações anteriores.

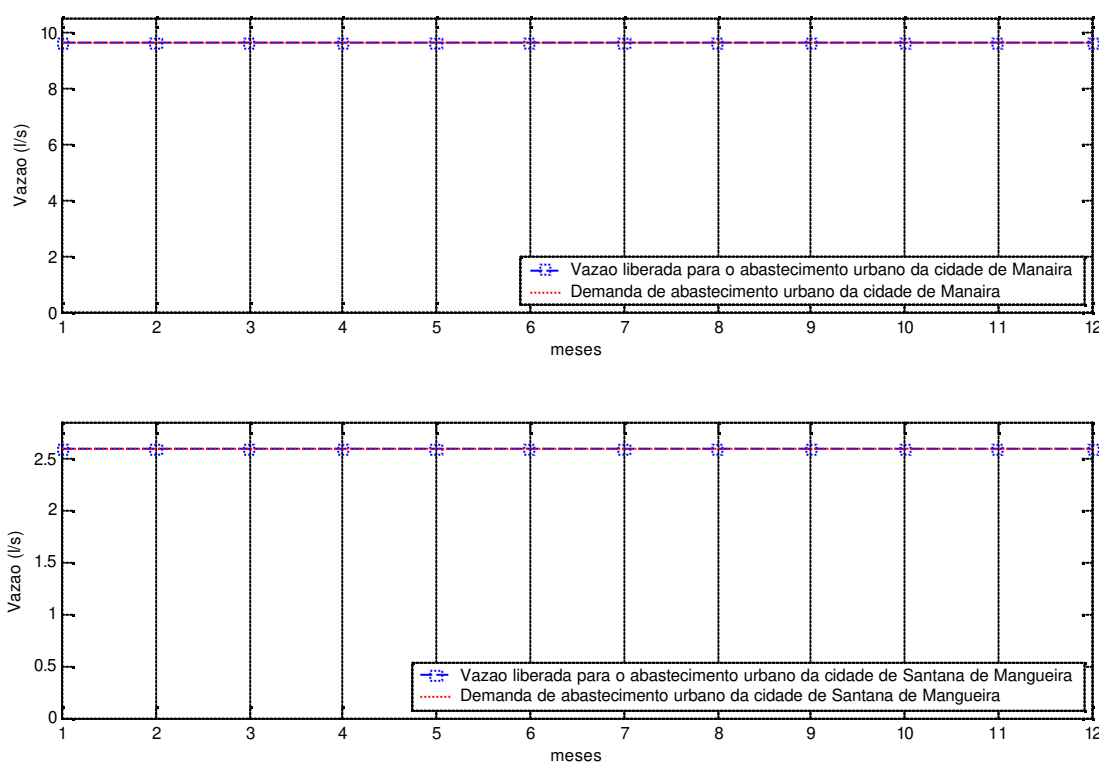


Figura 6.7 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 3º Situação no cenário normal.

As Tabelas 6.9 e 6.10 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente.

Tabela 6.9 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 3ª Situação no cenário normal.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1632	0,0770	0,0994	0,1609	0,0523	0,0000	0,0000
Fevereiro	4,1391	0,2328	0,0504	0,1279	0,1794	0,0000	0,0000
Março	4,6888	1,1441	0,1577	0,1247	0,6274	0,0000	0,0000
Abril	7,1465	3,0054	0,3001	0,1579	0,6900	0,0000	0,0000
Mai	10,0373	3,7566	0,1126	0,2031	0,7752	0,0000	0,0000
Junho	10,5000	1,5754	0,0115	0,2222	0,8181	0,0839	0,0000
Julho	10,3500	0,1566	0,0018	0,2382	0,0701	0,0000	0,0000
Agosto	10,0358	0,0000	0,0045	0,2937	0,0250	0,0000	0,0000
Setembro	9,7105	0,0013	0,0000	0,3012	0,0254	0,0000	0,0000
Outubro	9,3542	0,0000	0,0000	0,3313	0,0250	0,0000	0,0000
Novembro	9,0272	0,0000	0,0000	0,3020	0,0250	0,0000	0,0000
Dezembro	8,7153	0,0026	0,0000	0,2874	0,0271	0,0000	0,0000
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>0,8293</b>	<b>0,0615</b>	<b>0,2292</b>	<b>0,2783</b>	<b>0,0070</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.10 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 3ª Situação no cenário normal.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	24,6079	0,2138	0,3890	0,6231	0,0740	0,0000	0,3984
Fevereiro	25,1889	0,7115	0,7736	0,5040	0,3863	0,0000	0,0137
Março	27,4294	3,3548	1,0722	0,4863	1,7002	0,0000	0,0000
Abril	31,9461	7,9867	0,5228	0,5500	3,1091	0,0000	0,3337
Mai	38,7352	9,9103	0,2524	0,6247	1,9593	0,0000	0,7895
Junho	41,2793	4,6625	0,0536	0,6633	0,8599	0,0000	0,6488
Julho	40,3432	0,4253	0,0000	0,7139	0,1177	0,0000	0,5298
Agosto	38,7214	0,0000	0,0171	0,8737	0,0067	0,0000	0,7585
Setembro	36,8006	0,0035	0,0707	0,8861	0,0073	0,0000	1,1016
Outubro	34,3881	0,0000	0,0118	0,9573	0,0067	0,0000	1,4603
Novembro	32,1680	0,0000	0,0292	0,8538	0,0067	0,0000	1,3889
Dezembro	30,6675	0,0083	0,1550	0,8007	0,0119	0,0000	0,8512
<b>Vol. inicial</b>	<b>25,1005</b>						
<b>Média</b>	-	<b>2,2731</b>	<b>0,2790</b>	<b>0,7114</b>	<b>0,6872</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,6895</b>

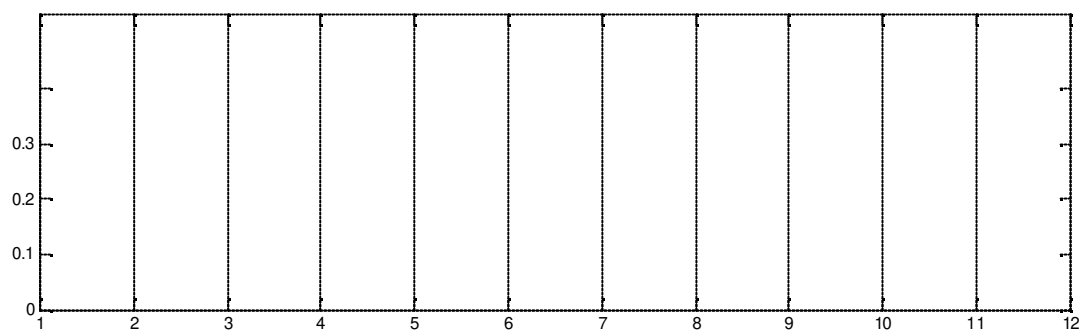
Os reservatórios apresentaram, assim como nas situações anteriores deste cenário, volumes no final do período de otimização maiores que os volumes iniciais estabelecidos. O maior volume dos reservatórios foi observado, novamente, no mês de junho.

Não houve mudanças da operação do reservatório Catolé II em relação à 2ª Situação deste cenário. Porém, no reservatório Poço Redondo houve um ligeiro aumento do volume precipitado e evaporado, em comparação com a situação anterior, devido à ligeira diminuição do volume do reservatório por causa da diminuição da demanda hídrica do perímetro. As



perdas por evaporação dos reservatórios Poço Redondo e Catolé II continuaram sendo cerca 14% e 26% de suas respectivas capacidade. Não houve volume vertido no reservatório Poço Redondo.

A Figura 6.8 apresenta o atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos.



Situação deste cenário a redução é de R\$ 44.542,16. A na mão-de-obra requerida teve um aumento de 12.500 homem/dia em relação à 2ª Situação e de 450 homem/dia em relação à 1ª situação.

Tabela 6.11 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 3ª Situação no cenário normal.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	50,00	18549,03	5950,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	0,00	0,00	0,00	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	56541,56	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	44891,27	6850,00	março a junho
	Melão	50,00	-26416,45	10550,00	março a maio
	Tomate	50,00	412983,67	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3433,24	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165402,34	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164202,01	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	17867,79	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	812808,37	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	492153,44	10650,00	Todo ano
	Manga	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Coco	50,00	494883,29	10000,00	Todo ano
	Maracujá	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Graviola	50,00	219011,98	9000,00	Todo ano
	Mamão	50,00	72105,05	8050,00	Todo ano
	Goiaba	50,00	51656,80	8000,00	Todo ano
<b>Total</b>	<b>750,00</b>	<b>3.000.073,39</b>	<b>129.100,00</b>	<b>-</b>	

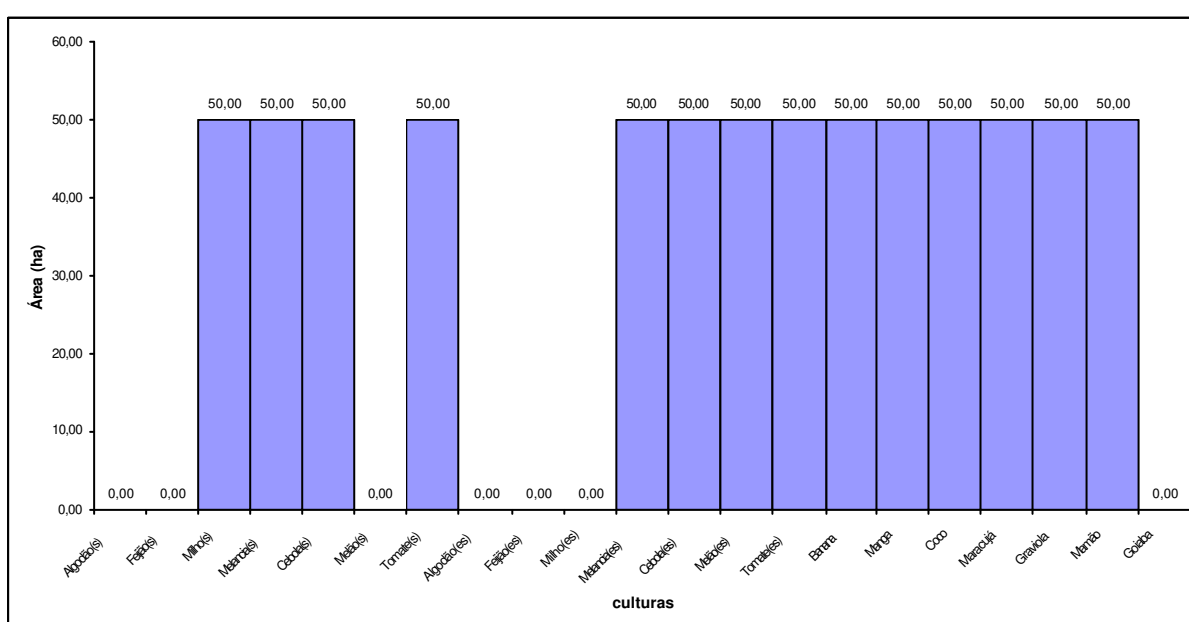


Figura 6.9 – Alocação da área de cada cultura para a 3ª Situação no cenário normal.

A Tabela 6.12 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado. Observam-se uma redução, em relação à 3º Situação, dos valores da vazão de irrigação, da precipitação efetiva e da evapotranspiração do perímetro, mesmo com o aumento da utilizada e mais culturas selecionadas. Isso se deve ao fato de o modelo selecionar mais culturas sazonais do que culturas perenes e semi-perenes que requerem uma menor demanda hídrica durante o ano.

Tabela 6.12 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 3º Situação no cenário normal.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,3984	0,1993	0,5399	250,00
Fevereiro	0,0137	0,5519	0,4977	300,00
Março	0,0000	1,2790	0,6448	<b>500,00</b>
Abril	0,3337	0,5130	0,7962	<b>500,00</b>
Maio	0,7895	0,1564	0,8216	<b>500,00</b>
Junho	0,6488	0,0000	0,5480	350,00
Julho	0,5298	0,0000	0,4530	250,00
Agosto	0,7585	0,0000	0,6442	300,00
Setembro	1,1016	0,0052	0,9343	<b>500,00</b>
Outubro	1,4603	0,0000	1,2321	<b>500,00</b>
Novembro	1,3889	0,0000	1,1698	<b>500,00</b>
Dezembro	0,8512	0,0610	0,7802	350,00
<b>Média</b>	<b>0,6895</b>	<b>0,2305</b>	<b>0,7552</b>	-

Assim como 1º Situação toda área do perímetro foi utilizada entre os meses de março a maio e setembro a novembro. Sendo esse, novamente, o principal fator limitante para a alocação das áreas das culturas.

#### 6.1.4– 4 SITUAÇÃO

Nesta situação a prioridade máxima é o abastecimento urbano das cidades, seguida receita líquida e mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado, perenização dos rios (vazão efluente dos reservatórios), sendo o ultimo objetivo o volume meta dos reservatórios.

Os resultados foram idênticos aos obtidos para a 1º situação evidenciando que, para este cenário, o sistema dispõe de água suficiente para o atendimento das demandas estabelecidas, sendo o principal fator limitante as restrições físicas dos componentes (área máxima do perímetro irrigado, vazão de descarga de fundo máxima).

## 6.2 – CENÁRIO CHUVOSO

### 6.2.1 – 1º SITUAÇÃO

A Figura 6.10 apresenta vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. Tem-se que a demanda estabelecida para o abastecimento urbano foi atendida completamente.

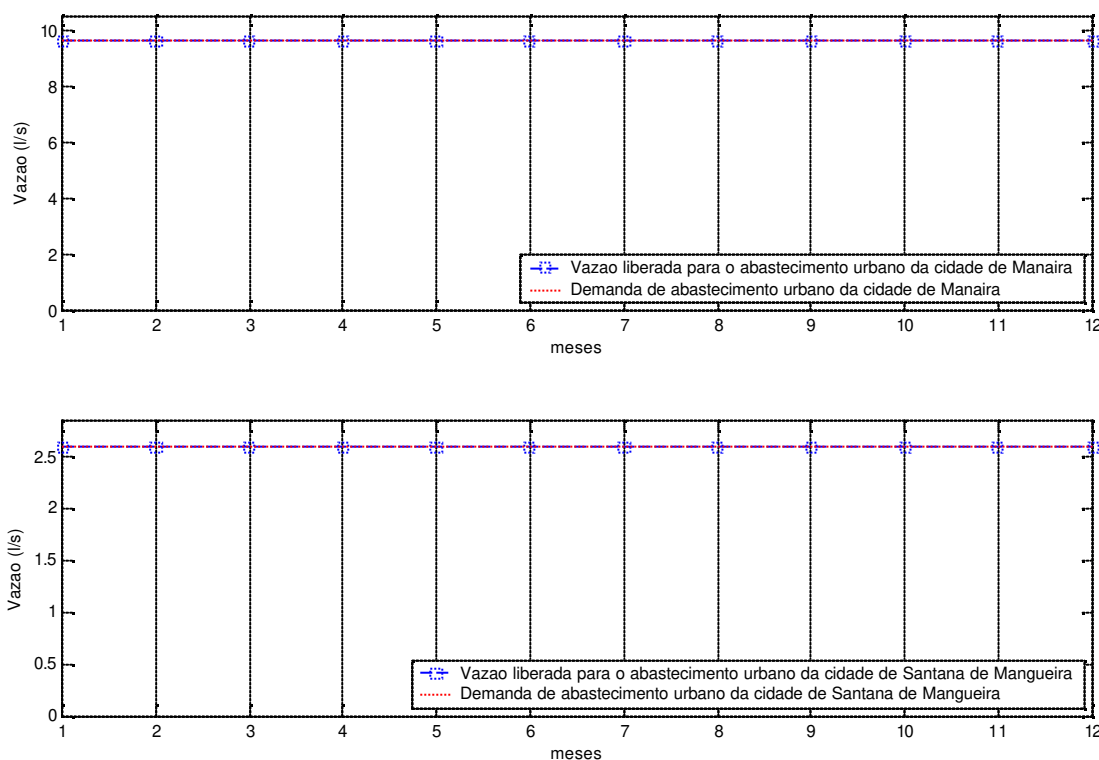


Figura 6.10 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 1ª Situação no cenário chuvoso.

As Tabelas 6.13 e 6.14 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente.

Os reservatórios apresentaram, assim como no cenário normal para esta situação, volumes no final do período de otimização maiores que o volume inicial estabelecido. No mês de julho o reservatório Poço Redondo atingiu sua capacidade máxima, fato este ocorrido no mês de abril para o reservatório Catolé II. A depleção do volume do reservatório ocorreu entre os meses de agosto até dezembro, coincidindo com os meses de menores vazões afluentes.

Tabela 6.13 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 1ª Situação no cenário chuvoso.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	3,6007	0,0778	0,0837	0,1538	0,6069	0,0000	0,0000
Fevereiro	3,2752	0,1814	0,1826	0,1133	0,5763	0,0000	0,0000
Março	8,8385	6,2104	0,1760	0,1481	0,6750	0,0000	0,0000
Abril	10,5000	3,6729	0,2427	0,2161	0,8031	1,2349	0,0000
Maió	10,5000	3,9398	0,0520	0,2317	0,8239	2,9362	0,0000
Junho	10,5000	2,0555	0,0283	0,2256	0,8239	1,0342	0,0000
Julho	10,5000	1,1172	0,0999	0,2394	0,8239	0,1537	0,0000
Agosto	10,3453	0,2074	0,0000	0,2982	0,0639	0,0000	0,0000
Setembro	10,0129	0,0000	0,0000	0,3074	0,0250	0,0000	0,0000
Outubro	9,6499	0,0000	0,0000	0,3381	0,0250	0,0000	0,0000

Não houve vertimento no reservatório Poço Redondo. Para o reservatório Catolé II houve vertimento de abril a julho, não sendo considerado perda, pois tal água foi utilizada pelo reservatório de jusante (Poço Redondo).

A Figura 6.11 apresenta o atendimento da efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos.

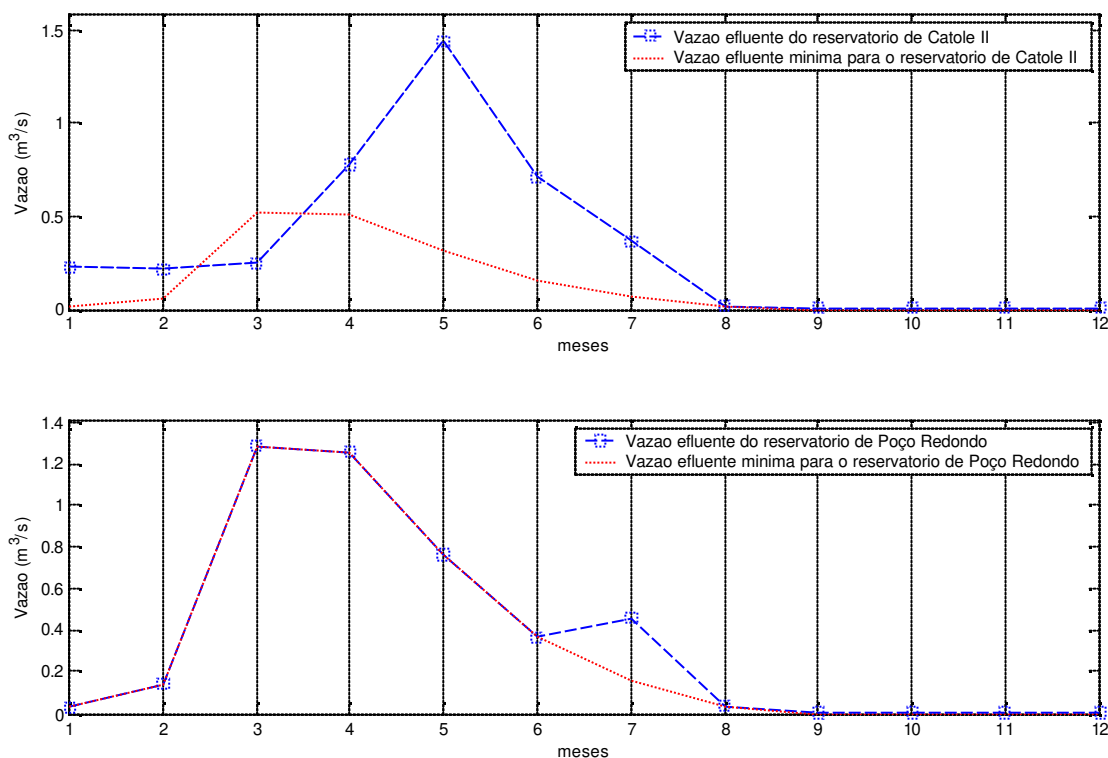


Figura 6.11 – Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 1ª Situação no cenário chuvoso.

Observa-se que a vazão efluente mínima estabelecida para o reservatório Catolé II no mês de março não é plenamente atendida devido ao limite da vazão de descarga de fundo máxima nesse mês. Tem-se que, nos meses de janeiro e fevereiro, houve uma maior liberação de água do que o necessário para a perenização do rio e o abastecimento urbano com o intuito de minimizar o volume vertido entre os meses de abril a julho. Para o reservatório Poço Redondo a vazão efluente mínima estabelecida é atendida sem falhas. No mês de julho houve uma maior liberação de água, fato também observado no mês de junho no reservatório Catolé II na 1ª Situação do cenário normal.

Com relação à tomada d'água do reservatório Poço Redondo, tem-se que todas as restrições foram atendidas, não havendo impedimento a esse componente.

A Tabela 6.15 apresenta os valores das áreas alocadas para cada cultura (representada na Figura 6.12) e suas respectivas receitas líquidas auferidas e mãos-de-obra requeridas para o perímetro irrigado estudado.

Tabela 6.15 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário chuvoso.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	50,00	29998,38	5950,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	0,00	0,00	0,00	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	62434,88	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	50784,59	6850,00	março a junho
	Melão	50,00	-15209,18	10550,00	março a maio
	Tomate	50,00	426581,81	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3424,69	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165397,94	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164197,61	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	15867,43	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	810808,01	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	494954,89	10650,00	Todo ano
	Manga	50,00	99000,41	7550,00	Todo ano
	Coco	50,00	498696,34	10000,00	Todo ano
	Maracujá	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Graviola	50,00	221813,44	9000,00	Todo ano
	Mamão	50,00	76542,07	8050,00	Todo ano
	Goiaba	0,00	0,00	0,00	Todo ano
<b>Total</b>	<b>750,00</b>	<b>3.105.293,31</b>	<b>128650,00</b>	<b>-</b>	

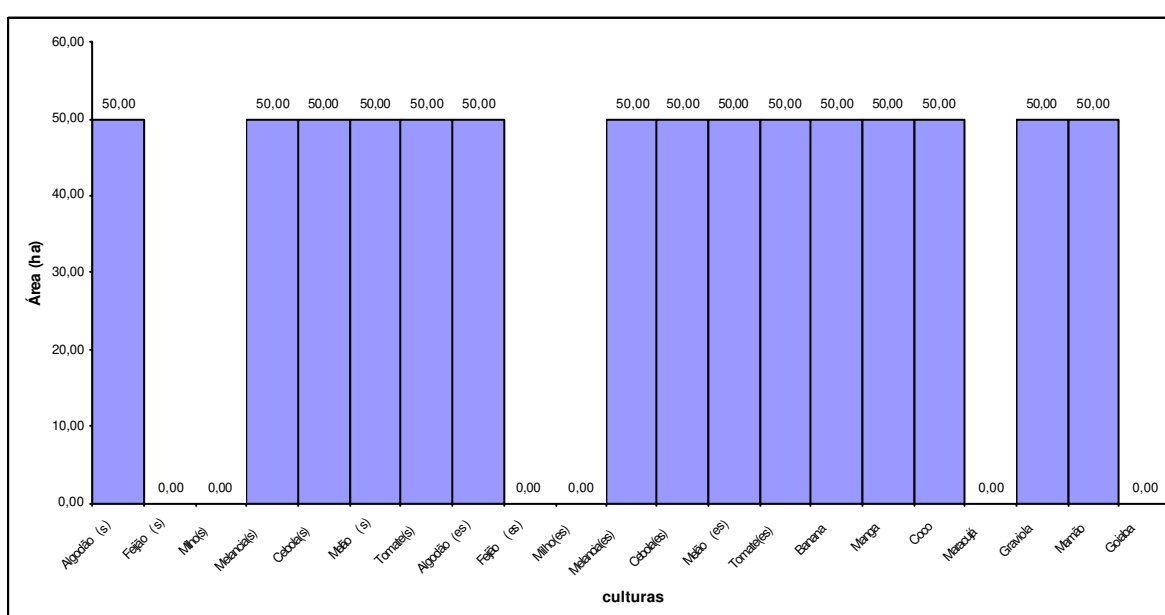


Figura 6.12 – Alocação da área de cada cultura para a 1º situação no cenário chuvoso.

Observa-se que foram selecionadas as mesmas culturas do cenário normal na mesma situação. Apesar de alocar as mesmas áreas para as mesmas culturas no cenário normal nesta situação, há um aumento na receita líquida de R\$ 60.677,76, por causa do aumento da precipitação e, conseqüentemente, da precipitação efetiva, havendo uma diminuição do requerimento hídrico das culturas do perímetro irrigado, reduzindo assim os custos com a água e com o bombeamento. A mão-de-obra requerida é a mesma do cenário normal para esta situação.

A Tabela 6.16 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado. Nota-se o aumento do valor da precipitação efetiva e a diminuição da vazão de irrigação em comparação com o cenário normal para esta situação, fato este já esperado, devido a um aumento da precipitação neste cenário. Do mesmo modo para o cenário normal nas 1º e 3º Situações, toda área do perímetro foi utilizada entre os meses de março a maio e setembro a novembro.

Tabela 6.16 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário chuvoso.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,5689	0,0849	0,5714	250,00
Fevereiro	0,1301	0,4230	0,5233	300,00
Março	0,0000	1,4858	0,6368	<b>500,00</b>
Abril	0,1765	0,6566	0,7879	<b>500,00</b>
Maió	0,4726	0,4146	0,8131	<b>500,00</b>
Junho	0,5327	0,0895	0,5397	350,00
Julho	0,4172	0,0875	0,4442	250,00
Agosto	0,7456	0,0000	0,6332	300,00
Setembro	1,0884	0,0049	0,9228	<b>500,00</b>
Outubro	1,4451	0,0000	1,2191	<b>500,00</b>
Novembro	1,4314	0,0000	1,2061	<b>500,00</b>
Dezembro	0,9508	0,0120	0,8156	350,00
<b>Média</b>	<b>0,6633</b>	<b>0,2716</b>	<b>0,7594</b>	-

### 6.2.2 – 2º SITUAÇÃO

A Figura 6.13 apresenta vazão liberada dos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. A demanda estabelecida para o abastecimento urbano foi atendida completamente.

As Tabelas 6.17 e 6.18 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente. Os reservatórios apresentaram volumes no final do período de otimização maiores que os volumes iniciais estabelecidos.



Atingindo novamente suas capacidades máximas nos meses de julho (Poço Redondo) e abril (Catolé II).

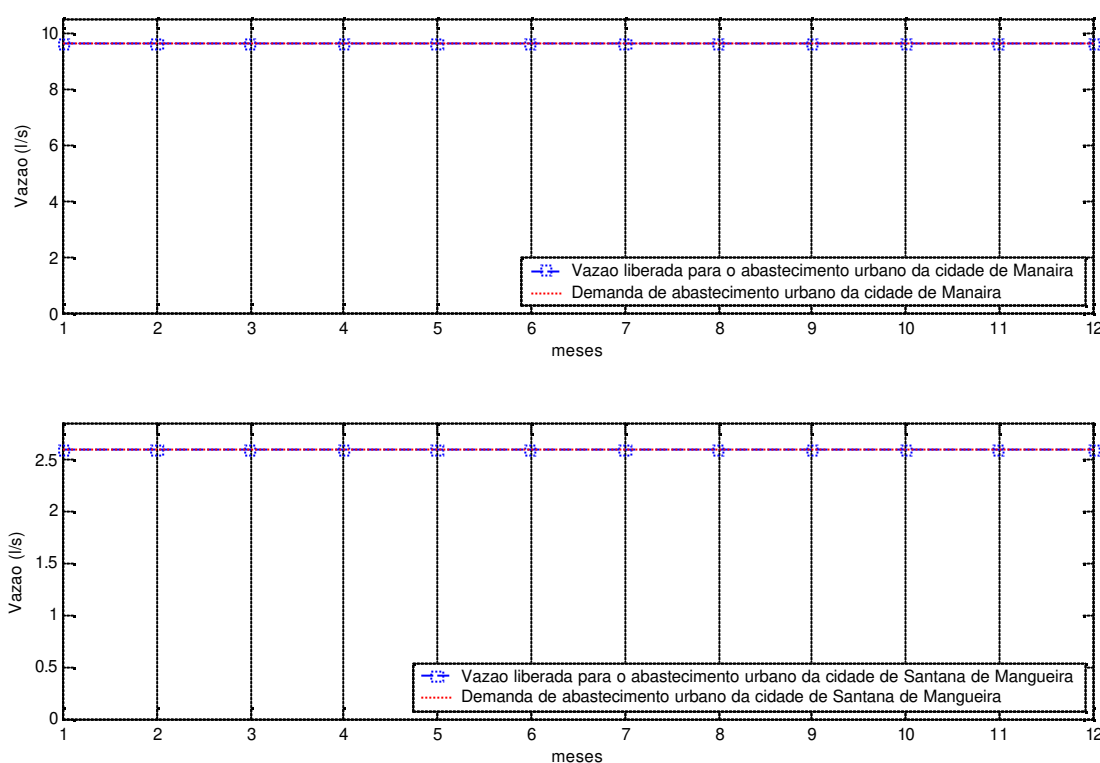


Figura 6.13 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 2ª Situação no cenário chuvoso.

Tabela 6.17 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 2ª Situação no cenário chuvoso.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1521	0,0778	0,0875	0,1607	0,0524	0,0000	0,0000
Fevereiro	4,2422	0,1814	0,2077	0,1288	0,1701	0,0000	0,0000
Março	9,7715	6,2104	0,1948	0,1639	0,7120	0,0000	0,0000
Abril	10,5000	3,6729	0,2505	0,2230	0,8148	2,1571	0,0000
Mai	10,5000	3,9398	0,0520	0,2317	0,8239	2,9362	0,0000
Junho	10,5000	2,0555	0,0283	0,2256	0,8239	1,0342	0,0000
Julho	10,5000	1,1172	0,0999	0,2394	0,8239	0,1537	0,0000
Agosto	10,3453	0,2074	0,0000	0,2982	0,0639	0,0000	0,0000
Setembro	10,0129	0,0000	0,0000	0,3074	0,0250	0,0000	0,0000
Outubro	9,6499	0,0000	0,0000	0,3381	0,0250	0,0000	0,0000
Novembro	9,3974	0,0000	0,0816	0,3091	0,0250	0,0000	0,0000
Dezembro	9,2047	0,0000	0,1287	0,2963	0,0250	0,0000	0,0000
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>1,4552</b>	<b>0,0943</b>	<b>0,2435</b>	<b>0,3654</b>	<b>0,5234</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.18 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 2º Situação no cenário chuvoso.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	24,1921	0,2165	0,2168	0,6202	0,0744	0,0000	0,6471
Fevereiro	24,3557	0,5765	0,6060	0,4970	0,3634	0,0000	0,1586
Março	37,7320	15,8878	1,3621	0,5385	3,3351	0,0000	0,0000
Abril	46,1090	11,6827	0,8060	0,6922	3,2537	0,0000	0,1658
Mai	56,5831	13,0479	0,6376	0,8049	1,9876	0,0000	0,4190
Junho	61,2467	6,7017	0,3073	0,8593	0,9579	0,0000	0,5282
Julho	62,7512	3,6049	0,4027	0,9445	1,0796	0,0000	0,4790
Agosto	61,2854	0,5430	0,0295	1,1827	0,1023	0,0000	0,7534
Setembro	59,0891	0,0000	0,0962	1,2133	0,0067	0,0000	1,0725
Outubro	56,3395	0,0000	0,0000	1,3270	0,0067	0,0000	1,4159
Novembro	53,7095	0,0000	0,0000	1,1997	0,0067	0,0000	1,4236
Dezembro	51,6168	0,0000	0,1077	1,1345	0,0067	0,0000	1,0592
<b>Vol. inicial</b>	<b>25,1005</b>						
<b>Média</b>	-	<b>4,3551</b>	<b>0,3810</b>	<b>0,9178</b>	<b>0,9317</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,6769</b>

Houve um ligeiro aumento do volume precipitado e evaporado no reservatório Catolé II (nos meses de janeiro a abril), em comparação com a 1º Situação do mesmo cenário, assim como em comparação com o cenário normal para a mesma situação. O reservatório Poço Redondo apresentou fato contrário, ou seja, uma ligeira diminuição do volume precipitado e evaporado, em comparação a 1º Situação do mesmo cenário, devido à ligeira diminuição do volume do reservatório, devido ao aumento da demanda hídrica do perímetro. As perdas por evaporação dos reservatórios Poço Redondo e Catolé II continuaram sendo cerca 18% e 28% de suas respectivas capacidade.

Não houve vertimento, assim como na 1º Situação deste cenário, no reservatório Poço Redondo. Para o reservatório Catolé II houve

A Figura 6.14 apresenta o atendimento das vazões efluentes mínimas estabelecidas para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos. Observa-se que a vazão efluente mínima estabelecida para o reservatório Catolé II no mês de março não é, novamente, plenamente atendida devido ao limite da vazão de descarga de fundo máxima nesse mês. Para o reservatório Poço Redondo a vazão efluente mínima estabelecida é atendida sem falhas. No mês de julho houve uma maior liberação de água, fato também observado no mês de junho na 1º Situação do cenário chuvoso.

Com relação à tomada d'água do reservatório Poço Redondo, tem-se que, novamente, todas as restrições foram atendidas.

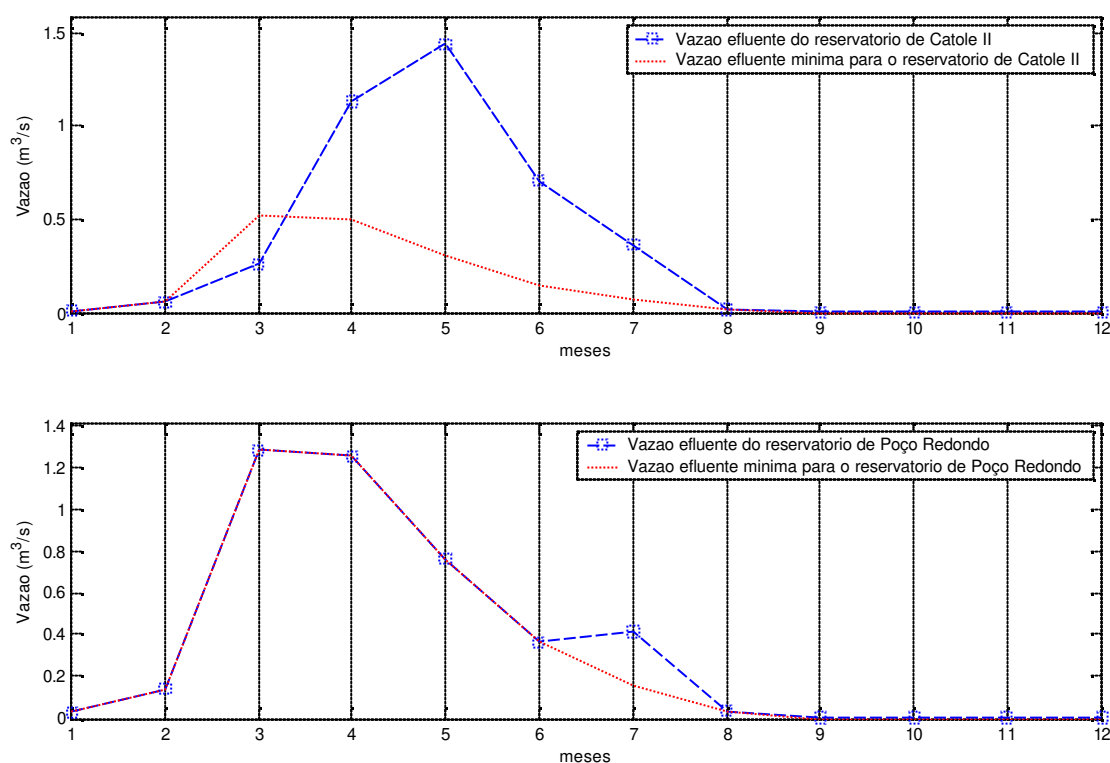


Figura 6.14 – Atendimento das vazões efluentes mínimas estabelecidas para cada reservatório para a 2ª Situação no cenário chuvoso.

A Tabela 6.19 apresenta os valores das áreas alocadas para cada cultura (representada na Figura 6.15) e suas respectivas receitas líquidas auferidas e mãos-de-obra requeridas para o perímetro irrigado estudado. Observa-se que foram alocadas áreas para as mesmas culturas do cenário normal para a mesma situação. Porém houve um aumento na receita líquida de R\$ 71.952,82, fato também ocorrido na 1ª Situação no mesmo cenário. Comparando os valores da receita líquida com a 1ª Situação do mesmo cenário obtém-se um aumento de R\$ 191.783,40. De maneira análoga a 1ª Situação deste cenário, o aumento da precipitação, e consequentemente da precipitação efetiva, resultam na diminuição do requerimento hídrico das culturas do perímetro irrigado reduzindo assim custo da água e de bombeamento. A mão-de-obra requerida é a mesma do cenário normal para a esta situação, porém há uma redução de 12.050,00 homem/dia em relação à 1ª Situação deste cenário.

Constata-se que o aumento na receita líquida da 1ª Situação para a 2ª Situação (situação esta onde temos uma maior prioridade da receita líquida) do cenário normal foi maior do que do cenário chuvoso. Ressaltando que modelo selecionou as mesmas culturas com as mesmas áreas tanto para o cenário chuvoso tanto para o cenário normal, para cada situação, fica evidenciado que os custos com a água e com o bombeamento são mais

expressivos no cenário normal, logo a seleção ou não de determinada cultura pode acarretar aumento maiores ou menores da receita líquida comparando com o cenário chuvoso.

Tabela 6.19 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 2º Situação no cenário chuvoso.

Cultura		Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo
SAFRA	Algodão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	50,00	89974,99	3300,00	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	62434,88	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	50784,59	6850,00	março a junho
	Melão	0,00	0,00	0,00	março a maio
	Tomate	50,00	426581,81	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165397,94	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164197,61	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	15867,43	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	810808,01	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	494954,89	10650,00	Todo ano
	Manga	50,00	99000,41	7550,00	Todo ano
	Coco	50,00	498696,34	10000,00	Todo ano
	Maracujá	50,00	120022,31	7100,00	Todo ano
	Graviola	50,00	221813,44	9000,00	Todo ano
	Mamão	50,00	76542,07	8050,00	Todo ano
	Goiaba	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	<b>Total</b>	<b>700,00</b>	<b>3.297.076,71</b>	<b>116600,00</b>	<b>-</b>

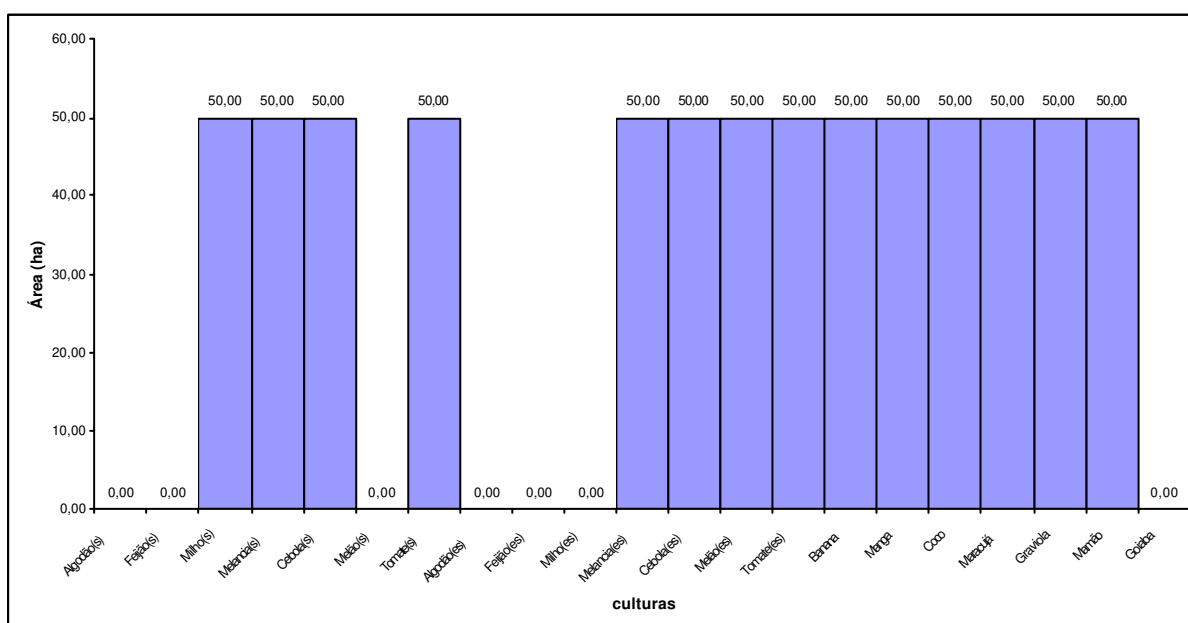


Figura 6.15 – Alocação da área de cada cultura para a 2º situação no cenário chuvoso

A Tabela 6.20 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado.

Tabela 6.20 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 2ª situação no cenário chuvoso.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,6471	0,1019	0,6552	300,00
Fevereiro	0,1586	0,4935	0,6254	350,00
Março	0,0000	1,4858	0,6917	<b>500,00</b>
Abril	0,1658	0,6566	0,7929	<b>500,00</b>
Maió	0,4190	0,3731	0,7297	450,00
Junho	0,5282	0,0895	0,5389	350,00
Julho	0,4790	0,1050	0,5146	300,00
Agosto	0,7534	0,0000	0,6442	300,00
Setembro	1,0725	0,0049	0,9147	<b>500,00</b>
Outubro	1,4159	0,0000	1,2009	<b>500,00</b>
Novembro	1,4236	0,0000	1,2049	<b>500,00</b>
Dezembro	1,0592	0,0138	0,9100	400,00
<b>Média</b>	<b>0,6769</b>	<b>0,2770</b>	<b>0,7853</b>	-

Observa-se, de maneira análoga ao cenário normal para esta situação, um ligeiro aumento da vazão de irrigação, da precipitação efetiva e da evapotranspiração do perímetro em comparação com os dados da 1ª Situação deste cenário. Toda área do perímetro foi utilizada nos meses de março, abril, setembro a novembro.

### 6.2.3 – 3ª SITUAÇÃO

A Figura 6.16 apresenta vazão liberada dos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. Tem-se que tal demanda é atendida completamente.

As Tabelas 6.21 e 6.22 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente. Os reservatórios apresentaram, assim como nas situações anteriores, volumes no final do período de otimização maiores que o volume inicial estabelecido. Os reservatórios atingiram novamente suas capacidade máxima nos meses de julho (Poço Redondo) e abril (Catolé II).

Não houve mudanças da operação do reservatório Catolé II em relação à 2ª Situação deste cenário. Porém, no reservatório Poço Redondo houve um ligeiro aumento nos volumes precipitados e evaporados, em comparação a 2ª Situação deste cenário, fato também observado no cenário normal. As perdas por evaporação dos reservatórios Poço Redondo e

Catolé II foram de cerca 18% e 28% de suas respectivas capacidade. Não é observado volume vertido nesta situação.

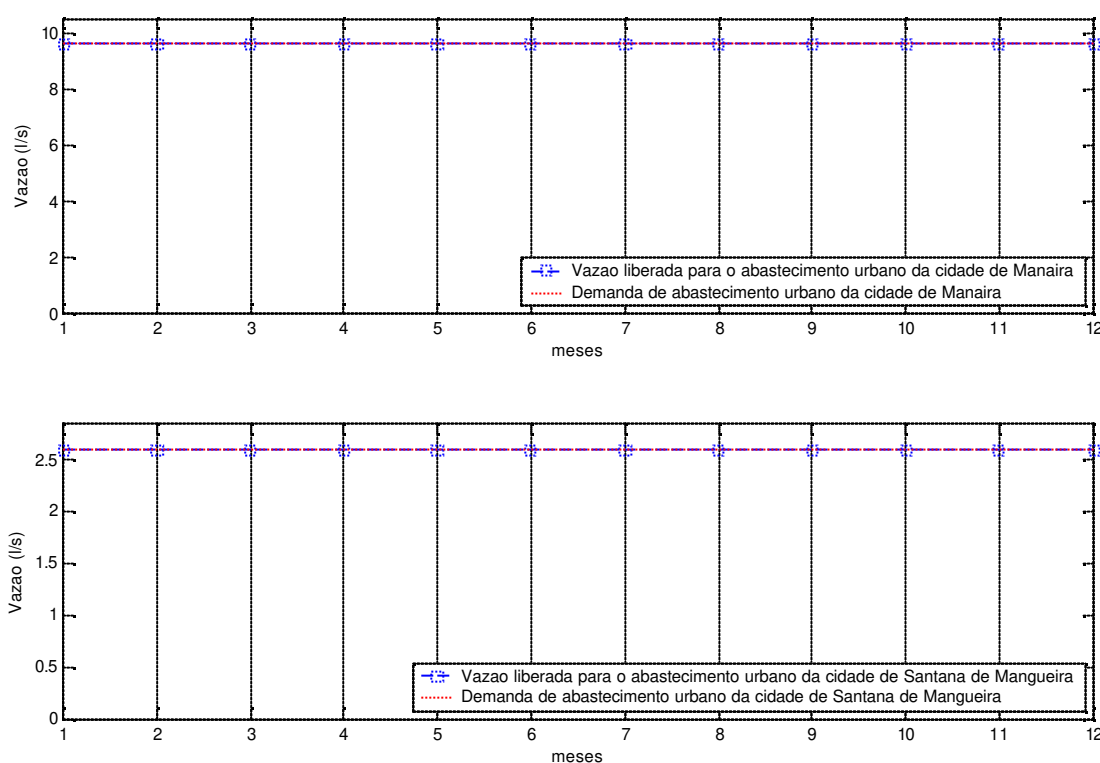


Figura 6.16 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manairá e Santana de Mangueira para a 3ª situação no cenário chuvoso.

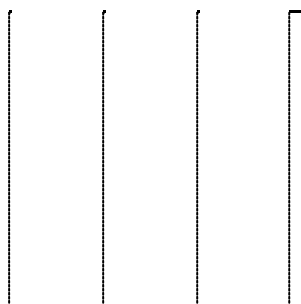
Tabela 6.21 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 3ª Situação no cenário chuvoso.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1521	0,0778	0,0875	0,1607	0,0524	0,0000	0,0000
Fevereiro	4,2422	0,1814	0,2077	0,1288	0,1701	0,0000	0,0000
Março	9,7715	6,2104	0,1948	0,1639	0,7120	0,0000	0,0000
Abril	10,5000	3,6729	0,2505	0,2230	0,8148	2,1571	0,0000
Maió	10,5000	3,9398	0,0520	0,2317	0,8239	2,9362	0,0000
Junho	10,5000	2,0555	0,0283	0,2256	0,8239	1,0342	0,0000
Julho	10,5000	1,1172	0,0999	0,2394	0,8239	0,1537	0,0000
Agosto	10,3453	0,2074	0,0000	0,2982	0,0639	0,0000	0,0000
Setembro	10,0129	0,0000	0,0000	0,3074	0,0250	0,0000	0,0000
Outubro	9,6499	0,0000	0,0000	0,3381	0,0250	0,0000	0,0000
Novembro	9,3974	0,0000	0,0816	0,3091	0,0250	0,0000	0,0000
Dezembro	9,2047	0,0000	0,1287	0,2963	0,0250	0,0000	0,0000
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>1,4552</b>	<b>0,0943</b>	<b>0,2435</b>	<b>0,3654</b>	<b>0,5234</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.22 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 3ª Situação no cenário chuvoso.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	24,3066	0,2165	0,2171	0,6210	0,0744	0,0000	0,5321
Fevereiro	24,5289	0,5765	0,6080	0,4986	0,3634	0,0000	0,1002
Março	37,9081	15,8878	1,3669	0,5404	3,3351	0,0000	0,0000
Abril	46,2649	11,6827	0,8082	0,6940	3,2537	0,0000	0,1863
Maiο	56,6752	13,0479	0,6386	0,8062	1,9876	0,0000	0,4825
Junho	61,3241	6,7017	0,3076	0,8602	0,9579	0,0000	0,5424
Julho	62,7512	3,6049	0,4028	0,9449	1,2083	0,0000	0,4275
Agosto	61,2804	0,5430	0,0295	1,1826	0,1023	0,0000	0,7585
Setembro	59,0550	0,0000	0,0962	1,2131	0,0067	0,0000	1,1019
Outubro	56,2618	0,0000	0,0000	1,3261	0,0067	0,0000	1,4603
Novembro	53,6675	0,0000	0,0000	1,1988	0,0067	0,0000	1,3889
Dezembro	51,7241	0,0000	0,1077	1,1350	0,0067	0,0000	0,9094
<b>Vol. inicial</b>	<b>25,1005</b>						
<b>Média</b>	-	<b>4,3551</b>	<b>0,3819</b>	<b>0,9184</b>	<b>0,9425</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,6575</b>

A Figura 6.17 apresenta o atendimento da efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos. Não se observou alterações no atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório em comparação com a 2ª Situação deste cenário.



A Tabela 6.23 apresenta os valores das áreas alocadas para cada cultura (representada na Figura 6.18) e suas respectivas receitas líquidas auferidas e mãos-de-obra requeridas para o perímetro irrigado estudado. Observa-se que foram alocadas as mesmas áreas e culturas do cenário normal para a esta situação, mostrando a total utilização dos recursos do perímetro irrigado. Há uma redução na receita líquida de R\$ 234.066,02 em relação à 2ª Situação no mesmo cenário e um aumento de R\$ 62.937,30 em relação a esta situação no cenário normal. A mão-de-obra requerida foi a mesma do cenário normal para a mesma situação.

Tabela 6.23 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 3ª Situação no cenário chuvoso.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	50,00	29998,38	5950,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	0,00	0,00	0,00	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	62434,88	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	50784,59	6850,00	março a junho
	Melão	50,00	-15209,18	10550,00	março a maio
	Tomate	50,00	426581,81	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3424,69	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165397,94	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164197,61	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	15867,43	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	810808,01	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	494954,89	10650,00	Todo ano
	Manga	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Coco	50,00	498696,34	10000,00	Todo ano
	Maracujá	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Graviola	50,00	221813,43	9000,00	Todo ano
	Mamão	50,00	76542,07	8050,00	Todo ano
	Goiaba	50,00	56717,80	8000,00	Todo ano
	<b>Total</b>	<b>750,00</b>	<b>3.063.010,69</b>	<b>129100,00</b>	<b>-</b>

A Tabela 6.24 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado. Tem-se uma redução, em relação à situação anterior, dos valores da vazão de irrigação, da precipitação efetiva e da evapotranspiração do perímetro, mesmo com o aumento da utilizada e mais culturas selecionadas, fato observado, também, no cenário normal para esta situação. Toda área do perímetro foi utilizada entre os meses de março a maio e setembro a novembro.



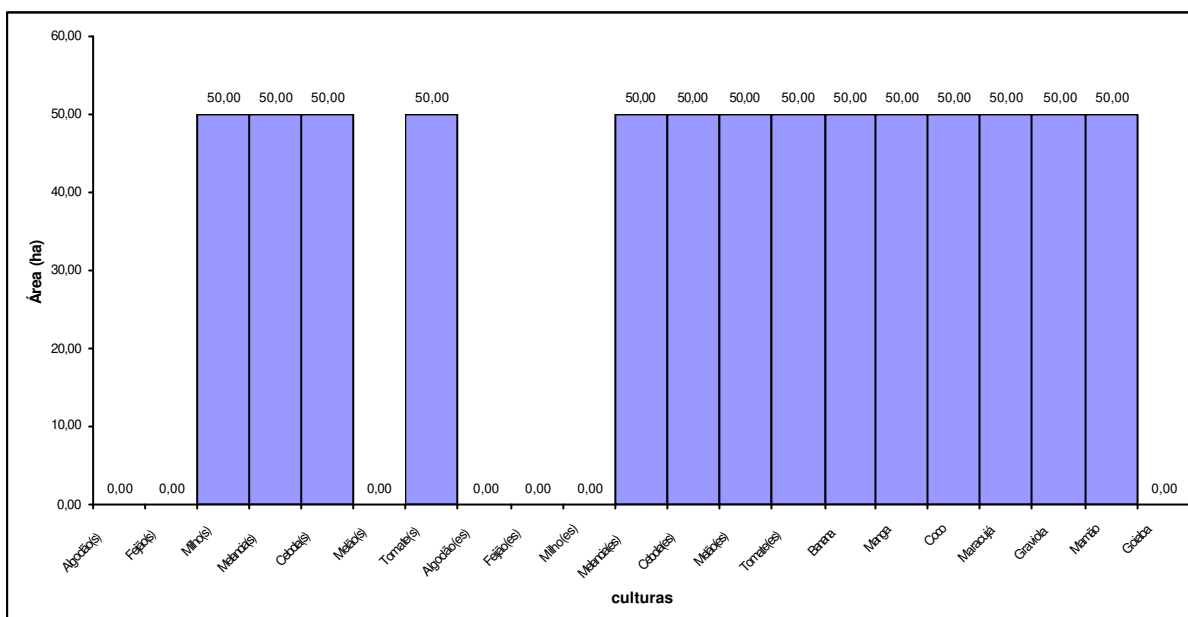


Figura 6.18 – Alocação da área de cada cultura para a 3ª Situação no cenário chuvoso.

Tabela 6.24 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 3ª Situação no cenário chuvoso.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,5321	0,0849	0,5399	250,00
Fevereiro	0,1002	0,4230	0,4977	300,00
Março	0,0000	1,4858	0,6448	<b>500,00</b>
Abril	0,1863	0,6566	0,7962	<b>500,00</b>
Mai	0,4825	0,4146	0,8216	<b>500,00</b>
Junho	0,5424	0,0895	0,5480	350,00
Julho	0,4275	0,0875	0,4530	250,00
Agosto	0,7585	0,0000	0,6442	300,00
Setembro	1,1019	0,0049	0,9343	<b>500,00</b>
Outubro	1,4603	0,0000	1,2321	<b>500,00</b>
Novembro	1,3889	0,0000	1,1698	<b>500,00</b>
Dezembro	0,9094	0,0120	0,7802	350,00
<b>Média</b>	<b>0,6575</b>	<b>0,2716</b>	<b>0,7552</b>	-

#### 6.2.4– 4 SITUAÇÃO

Assim como no cenário normal, os resultados foram idênticos aos obtidos para a 1ª situação evidenciando que, para este cenário, o sistema dispõe de água suficiente para o atendimento das demandas estabelecidas, sendo o principal fator limitante as restrições físicas dos componentes (área máxima do perímetro irrigado, vazão de descarga de fundo máxima).

## 6.3 – CENÁRIO SECO

### 6.3.1 – 1º SITUAÇÃO

A Figura 6.19 apresenta vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. Observa-se que esta demanda é totalmente atendida para esta situação neste cenário.

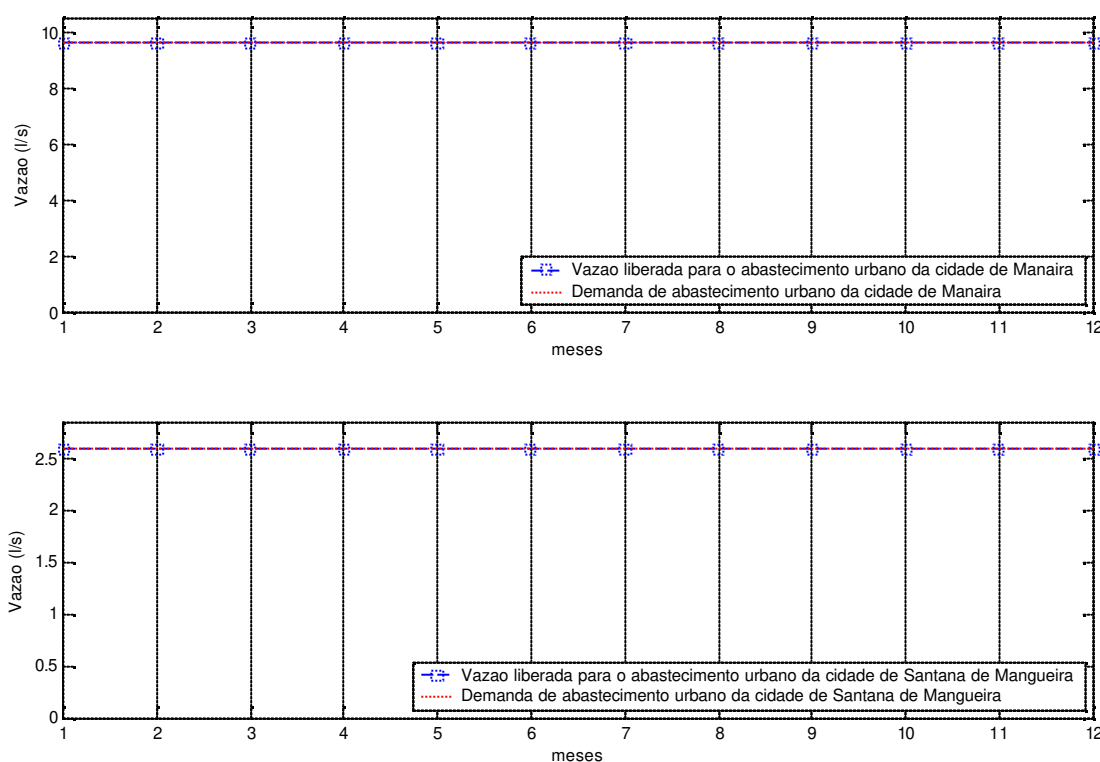


Figura 6.19 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 1º Situação no cenário seco.

As Tabelas 6.25 e 6.26 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente. Observa-se que os reservatórios apresentaram volumes no final do período de otimização é igual ou maior do que os volumes iniciais estabelecidos. O maior volume dos reservatórios foi observado no mês de maio.

Os maiores volumes evaporados são observados nos meses de agosto a dezembro (estação seca). Apenas no mês de maio o volume precipitado nos reservatórios ultrapassa o volume evaporado pelos mesmos. Comparando com os outros cenários já descritos, tem que esta situação apresenta um volume médio evaporado menor devido a menor área do espelho d'água dos reservatórios. As perdas por evaporação dos reservatórios Poço Redondo e Catolé

II foram de cerca 12% e 24% de suas respectivas capacidade. Em nenhum dos reservatórios estudados houve vertimentos mostrando que foi utilizada toda a água disponível para as demandas estabelecidas.

Tabela 6.25 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 1º Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1017	0,0000	0,0868	0,1601	0,0250	0,0000	0,0000
Fevereiro	4,0211	0,0622	0,0580	0,1261	0,0748	0,0000	0,0000
Março	4,7557	1,2753	0,2096	0,1242	0,6261	0,0000	0,0000
Abril	9,0906	5,1918	0,0330	0,1730	0,7169	0,0000	0,0000
Mai	9,4255	1,2079	0,0000	0,2131	0,6598	0,0000	0,0000
Junho	9,1959	0,0181	0,0000	0,2083	0,0395	0,0000	0,0000
Julho	8,9646	0,0000	0,0111	0,2174	0,0250	0,0000	0,0000
Agosto	7,9442	0,0000	0,0024	0,2601	0,7627	0,0000	0,0000
Setembro	7,6600	0,0000	0,0000	0,2592	0,0250	0,0000	0,0000
Outubro	7,3500	0,0000	0,0000	0,2850	0,0250	0,0000	0,0000
Novembro	6,5741	0,0000	0,0052	0,2542	0,5270	0,0000	0,0000
Dezembro	5,7098	0,0052	0,0655	0,2297	0,7053	0,0000	0,0000
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>0,6467</b>	<b>0,0393</b>	<b>0,2092</b>	<b>0,3510</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.26 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 1º Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	24,0243	0,0000	0,0918	0,6191	0,0067	0,0000	0,5422
Fevereiro	23,2464	0,1951	0,1523	0,4898	0,1270	0,0000	0,5085
Março	25,4963	3,6747	0,7888	0,4660	1,7423	0,0000	0,0054
Abril	34,3236	13,3857	0,2685	0,5535	3,5825	0,0000	0,6909
Mai	34,7613	3,5418	0,0000	0,6150	1,5674	0,0000	0,9217
Junho	33,5861	0,0597	0,0000	0,5945	0,0440	0,0000	0,5964
Julho	32,4891	0,0026	0,0000	0,6166	0,0088	0,0000	0,4742
Agosto	31,6316	0,6639	0,0000	0,7566	0,0067	0,0000	0,7582
Setembro	29,7325	0,0000	0,0000	0,7710	0,0067	0,0000	1,1213
Outubro	27,4545	0,0000	0,0000	0,8322	0,0067	0,0000	1,4392
Novembro	25,8414	0,4518	0,0000	0,7460	0,0067	0,0000	1,3122
Dezembro	25,1005	0,6252	0,1389	0,7080	0,0171	0,0000	0,7799
<b>Vol. inicial</b>	<b>25,1005</b>						
<b>Média</b>	-	<b>1,8834</b>	<b>0,1200</b>	<b>0,6474</b>	<b>0,5936</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,7625</b>

A Figura 6.20 apresenta o atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos. Observa-se que a vazão efluente mínima estabelecida para o reservatório Catolé II no mês de março não é plenamente atendida devido ao limite da vazão de descarga de fundo máxima nesse mês. Tem-se que nos

meses de agosto, novembro e dezembro há uma maior liberação de água do que o necessário para a perenização do rio e o abastecimento urbano evidenciando a transferência de água entre os reservatórios nesses meses. Para o reservatório Poço Redondo a vazão efluente mínima estabelecida é atendida sem falhas.

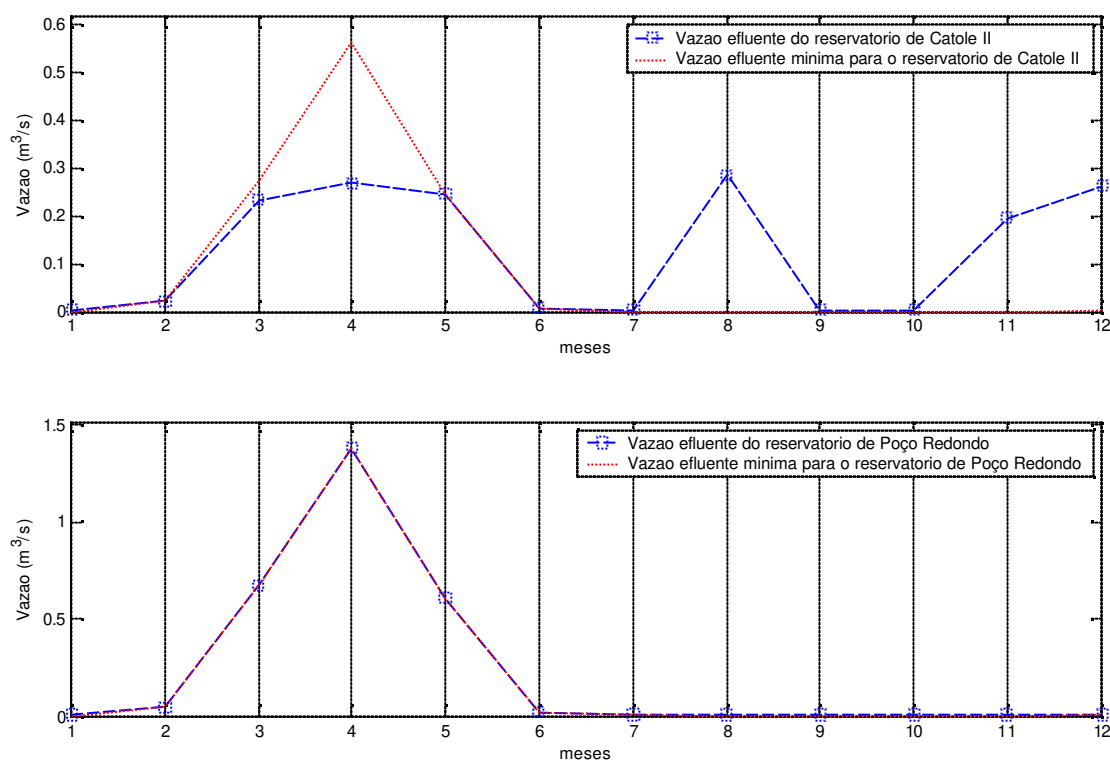


Figura 6.20 – Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 1ª Situação no cenário seco.

Com relação à tomada d'água do reservatório Poço Redondo, tem-se que todas as restrições foram atendidas, não havendo impedimento a esse componente.

A Tabela 6.27 apresenta os valores das áreas alocadas para cada cultura (representada na Figura 6.27) e suas respectivas receitas líquidas auferidas e mãos-de-obra requeridas para o perímetro irrigado estudado. Observa-se que foram alocadas áreas para um número maior de culturas do que o cenário normal e chuvoso nesta situação. Apesar de utilizar uma área maior no ano (773,18 ha) há uma redução na receita líquida de R\$ 156.395,51 e de R\$ 217.043,87 em comparação aos cenários normal e chuvoso, respectivamente, para esta situação. Pois, com o menor valor da taxa de precipitação tem-se uma maior demanda hídrica das culturas resultando assim em maiores custos com bombeamento e com a água. A mão-de-obra requerida teve uma redução de 1.122,33 homem/dia.

Tabela 6.27 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário seco.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	50,00	-8683,24	5950,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	23,18	26629,86	1530,13	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	49665,53	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	38015,24	6850,00	março a junho
	Melão	50,00	-39774,98	10550,00	março a maio
	Tomate	50,00	399625,15	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3285,07	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	23,18	4423,45	1530,13	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165326,07	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164125,74	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	17770,90	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	812711,49	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	468119,61	10650,00	Todo ano
	Manga	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Coco	50,00	471861,07	10000,00	Todo ano
	Maracujá	50,00	93543,98	7100,00	Todo ano
	Graviola	50,00	194946,07	9000,00	Todo ano
	Mamão	26,82	26659,01	4317,42	Todo ano
	Goiaba	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	<b>Total</b>	<b>773,18</b>	<b>2.888.250,04</b>	<b>127527,67</b>	<b>-</b>

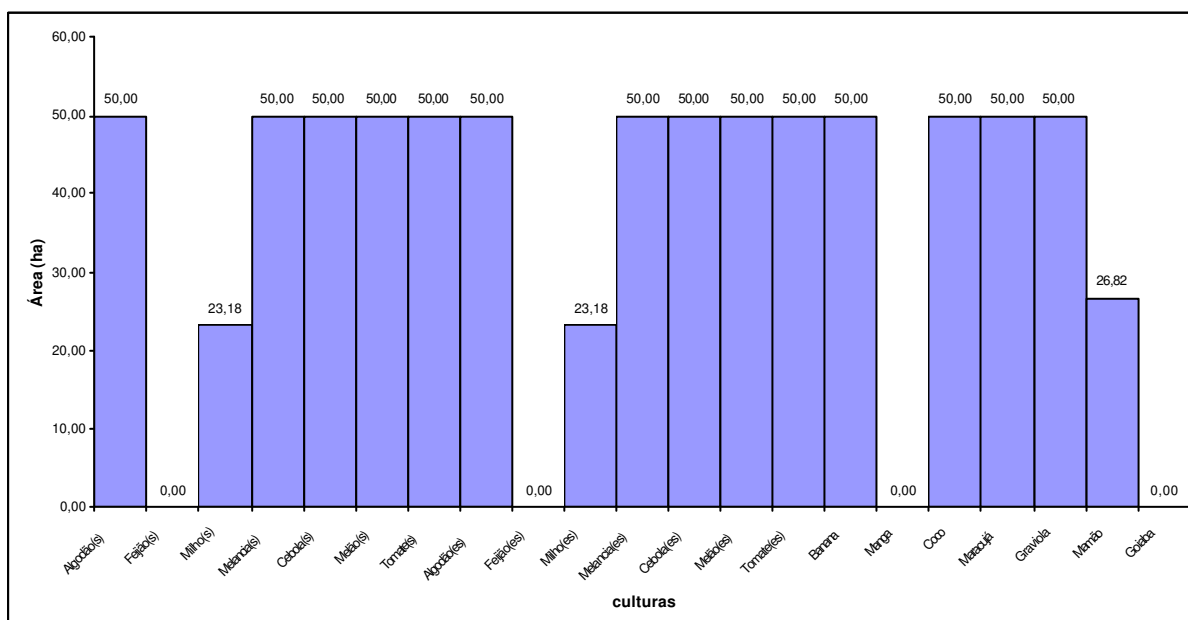


Figura 6.21 – Alocação da área de cada cultura para a 1º Situação no cenário seco.

Constata-se que a alocação de áreas, para esta situação e este cenário, não considerou apenas só as culturas que tivessem um bom retorno financeiro e/ou de mão-de-obra, mas,

também, aquelas que acarretassem uma diminuição na água utilizada, assim, a manga pode ser substituída pelo mamão (com uma área menor) e pode-se cultivar o milho.

A Tabela 6.28 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado. Como esperado, a precipitação efetiva neste cenário é menor do que nos outros cenários estudados para esta situação resultando em uma maior vazão para a irrigação do perímetro. A área total do perímetro foi utilizada nos meses de março, abril, setembro e outubro.

Tabela 6.28 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 1º Situação no cenário seco.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,5422	0,0196	0,4832	226,82
Fevereiro	0,5085	0,0652	0,4951	300,00
Março	0,0000	0,9530	0,6501	<b>500,00</b>
Abril	0,6909	0,2006	0,7828	<b>500,00</b>
Mai	0,9217	0,0000	0,7756	476,82
Junho	0,5964	0,0000	0,5032	326,82
Julho	0,4742	0,0000	0,4055	226,82
Agosto	0,7582	0,0000	0,6408	300,00
Setembro	1,1213	0,0000	0,9420	<b>500,00</b>
Outubro	1,4392	0,0000	1,2113	<b>500,00</b>
Novembro	1,3122	0,0000	1,1043	476,82
Dezembro	0,7799	0,0581	0,7164	326,82
<b>Média</b>	<b>0,7625</b>	<b>0,1080</b>	<b>0,7259</b>	-

### 6.3.2 – 2º SITUAÇÃO

A Figura 6.22 apresenta vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. Tem-se que os reservatórios atenderam completamente a demanda estabelecida para o abastecimento.

As Tabelas 6.29 e 6.30 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente. Observa-se que os reservatórios apresentaram, assim como na 1º Situação deste cenário, volumes no final do período de otimização igual ou maior do que o volume inicial estabelecidos, garantindo assim a sustentabilidade do sistema. O maior volume dos reservatórios foi observado no mês de maio.

Houve uma ligeira redução no volume evaporado do reservatório Catolé II (nos meses de novembro e dezembro), em comparação a 1º Situação do mesmo cenário, devido à redução do volume armazenado no reservatório. O reservatório de Poço Redondo não apresentou mudanças significativas nos volumes evaporados e precipitados. As perdas por evaporação dos reservatórios Poço Redondo e Catolé II foram de cerca 12% e 24% de suas respectivas

capacidade. Em nenhum dos reservatórios estudados houve vertimentos, assim como na 1ª Situação deste cenário.

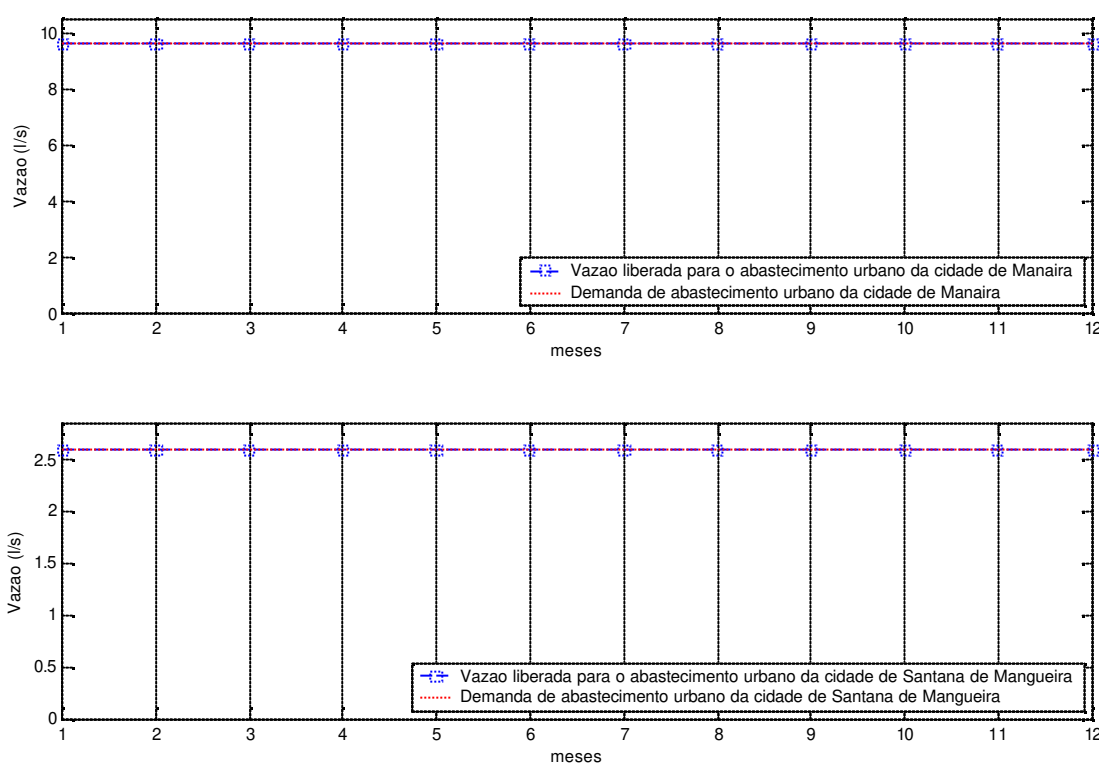


Figura 6.22 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 2ª Situação no cenário seco.

Tabela 6.29 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 2ª Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1017	0,0000	0,0868	0,1601	0,0250	0,0000	0,0000
Fevereiro	4,0211	0,0622	0,0580	0,1261	0,0748	0,0000	0,0000
Março	4,7557	1,2753	0,2096	0,1242	0,6261	0,0000	0,0000
Abril	9,0906	5,1918	0,0330	0,1730	0,7169	0,0000	0,0000
Maió	9,4255	1,2079	0,0000	0,2131	0,6598	0,0000	0,0000
Junho	9,1959	0,0181	0,0000	0,2083	0,0395	0,0000	0,0000
Julho	8,9646	0,0000	0,0111	0,2174	0,0250	0,0000	0,0000
Agosto	7,9442	0,0000	0,0024	0,2601	0,7627	0,0000	0,0000
Setembro	7,6600	0,0000	0,0000	0,2592	0,0250	0,0000	0,0000
Outubro	7,3500	0,0000	0,0000	0,2850	0,0250	0,0000	0,0000
Novembro	6,4295	0,0000	0,0052	0,2526	0,6732	0,0000	0,0000
Dezembro	5,5720	0,0052	0,0646	0,2267	0,7006	0,0000	0,0000
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>0,6467</b>	<b>0,0392</b>	<b>0,2088</b>	<b>0,3628</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.30 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 2ª Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	23,9425	0,0000	0,0917	0,6185	0,0067	0,0000	0,6245
Fevereiro	23,0709	0,1951	0,1518	0,4884	0,1270	0,0000	0,6032
Março	25,3135	3,6747	0,7857	0,4641	1,7423	0,0000	0,0113
Abril	34,1591	13,3857	0,2675	0,5516	3,5825	0,0000	0,6737
Mai	34,7037	3,5418	0,0000	0,6137	1,5674	0,0000	0,8162
Junho	33,5836	0,0597	0,0000	0,5941	0,0440	0,0000	0,5416
Julho	32,4570	0,0026	0,0000	0,6163	0,0088	0,0000	0,5041
Agosto	31,6316	0,6639	0,0000	0,7563	0,0067	0,0000	0,7263
Setembro	29,7795	0,0000	0,0000	0,7714	0,0067	0,0000	1,0740
Outubro	27,5174	0,0000	0,0000	0,8331	0,0067	0,0000	1,4223
Novembro	25,9367	0,5834	0,0000	0,7472	0,0067	0,0000	1,4101
Dezembro	25,1005	0,6211	0,1390	0,7088	0,0171	0,0000	0,8704
<b>Vol. inicial</b>	<b>25,1005</b>						
<b>Média</b>	<b>-</b>	<b>1,8940</b>	<b>0,1196</b>	<b>0,6470</b>	<b>0,5936</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,7731</b>

A Figura 6.23 apresenta o atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos.

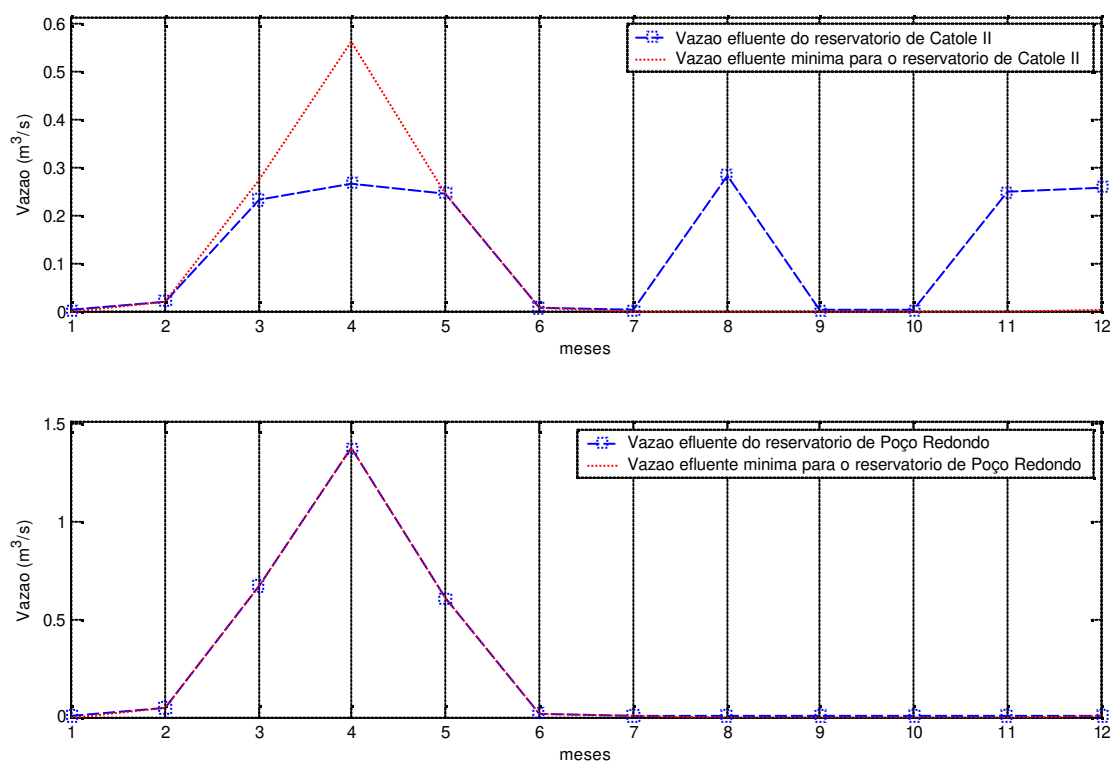


Figura 6.23 – Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 2ª Situação no cenário seco.



Observa-se que a vazão efluente mínima estabelecida para o reservatório Catolé II, no mês de março, não é plenamente atendida devido ao limite da vazão de descarga de fundo máxima nesse mês. Novamente, nos meses de agosto, novembro e dezembro, há uma maior liberação de água do que o necessário para a perenização do rio e o abastecimento urbano evidenciando a transferência de água entre os reservatórios nesses meses. Para o reservatório Poço Redondo a vazão efluente mínima estabelecida é atendida sem falhas.

Com relação à tomada d'água do reservatório Poço Redondo, tem-se que, novamente, todas as restrições foram atendidas.

A Tabela 6.31 apresenta os valores da área alocada para cada cultura (representada na Figura 6.24) e suas respectivas receitas líquidas auferidas e mãos-de-obra requeridas para o perímetro irrigado estudado.

Tabela 6.31 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 2ª Situação no cenário seco.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	30,92	-5370,56	3680,06	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	50,00	57432,20	3300,00	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	49665,53	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	38015,24	6850,00	março a junho
	Melão	0,00	0,00	0,00	março a maio
	Tomate	50,00	399625,15	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3285,07	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165326,07	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164125,74	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	17770,90	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	812711,49	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	468119,61	10650,00	Todo ano
	Manga	50,00	72165,14	7550,00	Todo ano
	Coco	50,00	471861,07	10000,00	Todo ano
	Maracujá	50,00	93543,98	7100,00	Todo ano
	Graviola	50,00	194946,07	9000,00	Todo ano
	Mamão	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Goiaba	0,00	0,00	0,00	Todo ano
<b>Total</b>	<b>730,92</b>	<b>3.003.222,70</b>	<b>118180,06</b>	-	

Tem-se que foram alocadas áreas para diferentes culturas em comparação com a 1ª Situação deste cenário, ocorrendo uma diminuição na área utilizada do perímetro durante o ano de 42,26 ha. Entretanto, tais culturas resultam em uma maior receita líquida (um aumento de cerca de R\$ 115.000) e uma menor mão-de-obra (redução de 9347,61 homem/dia), fato também constatado nos outros cenários estudados para esta situação. Comparando com os

cenários anteriores, a receita líquida é a menor devido a um maior requerimento hídrico no perímetro irrigado acarretando maiores custos com a água e com o bombeamento.

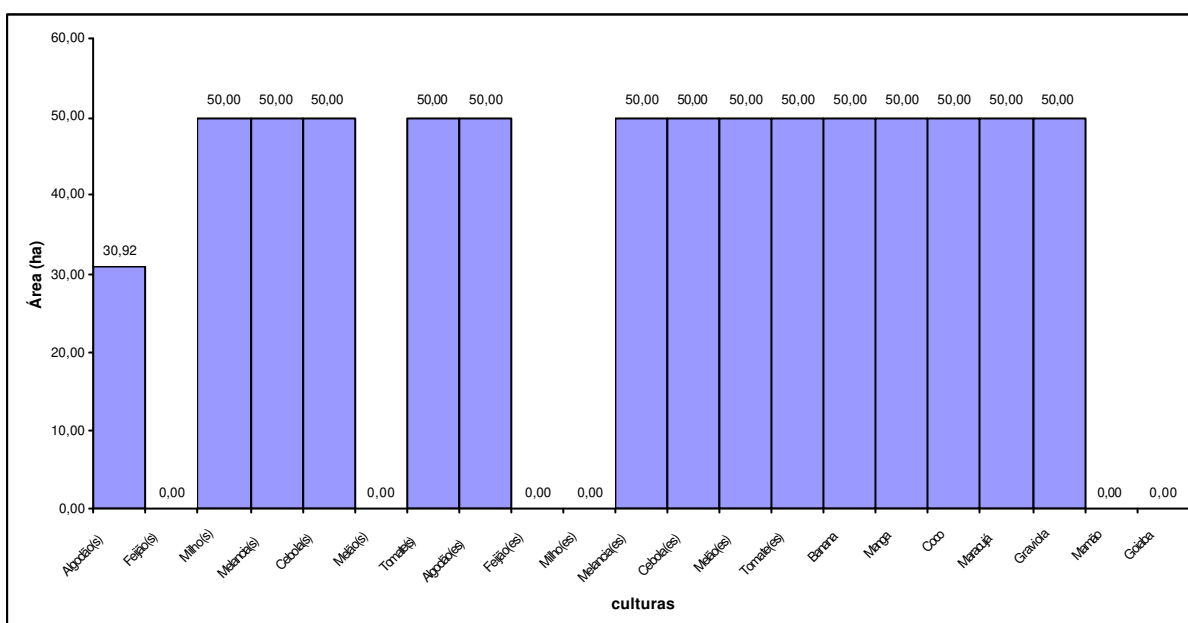


Figura 6.24 – Alocação da área de cada cultura para a 2ª Situação no cenário seco.

A Tabela 6.32 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado.

Tabela 6.32 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 2ª Situação no cenário seco.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,6245	0,0217	0,5556	250,00
Fevereiro	0,6032	0,0719	0,5814	330,92
Março	0,0113	0,9166	0,6589	480,92
Abril	0,6737	0,1929	0,7620	480,92
Maió	0,8162	0,0000	0,6914	430,92
Junho	0,5416	0,0000	0,4601	300,00
Julho	0,5041	0,0000	0,4310	250,00
Agosto	0,7263	0,0000	0,6167	300,00
Setembro	1,0740	0,0000	0,9055	<b>500,00</b>
Outubro	1,4223	0,0000	1,1996	<b>500,00</b>
Novembro	1,4101	0,0000	1,1880	<b>500,00</b>
Dezembro	0,8704	0,0622	0,7979	350,00
<b>Média</b>	<b>0,7731</b>	<b>0,1054</b>	<b>0,7373</b>	

Comparando os dados da Tabela 7.32 com os dados da 1ª Situação deste cenário, nota-se que houve um ligeiro aumento, da vazão de irrigação, da precipitação efetiva e da evapotranspiração do perímetro, mesmo com uma área menor utilizada e menos culturas

selecionadas, fato ocorrido nos cenários normal e chuvoso da mesma situação. A área total do perímetro só foi utilizada entre os meses de setembro a novembro.

### 6.3.3 – 3º SITUAÇÃO

A Figura 6.25 apresenta vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. Como nos cenários e situações anteriores os reservatórios atenderam completamente a demanda estabelecida para o abastecimento urbano.

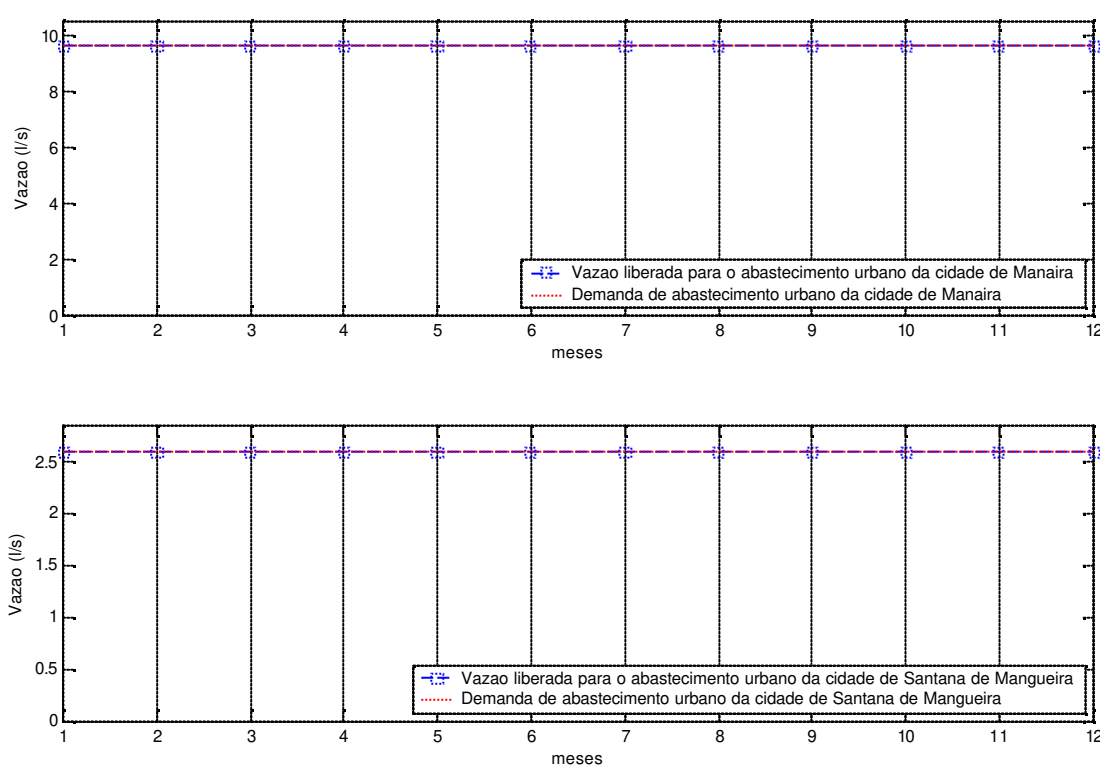


Figura 6.25 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 3º Situação no cenário seco.

As Tabelas 6.33 e 6.34 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, respectivamente.

Os reservatórios apresentaram, assim como na 1º e 2º Situação deste cenário, volumes no final do período de otimização é igual ou maior do que os volumes iniciais estabelecidos. O maior volume dos reservatórios foi observado no mês de maio.

Não houve mudanças significativas da operação dos reservatórios em relação às outras Situações para o mesmo cenário.

Tabela 6.33 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 3ª Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1017	0,0000	0,0868	0,1601	0,0250	0,0000	4,1017
Fevereiro	4,0211	0,0622	0,0580	0,1261	0,0748	0,0000	4,0211
Março	4,7557	1,2753	0,2096	0,1242	0,6261	0,0000	4,7557
Abril	9,0906	5,1918	0,0330	0,1730	0,7169	0,0000	9,0906
Mai	9,4255	1,2079	0,0000	0,2131	0,6598	0,0000	9,4255
Junho	9,1959	0,0181	0,0000	0,2083	0,0395	0,0000	9,1959
Julho	8,9646	0,0000	0,0111	0,2174	0,0250	0,0000	8,9646
Agosto	7,9442	0,0000	0,0024	0,2601	0,7627	0,0000	7,9442
Setembro	7,6600	0,0000	0,0000	0,2592	0,0250	0,0000	7,6600
Outubro	7,3500	0,0000	0,0000	0,2850	0,0250	0,0000	7,3500
Novembro	6,5628	0,0000	0,0052	0,2540	0,5384	0,0000	6,5628
Dezembro	5,6990	0,0052	0,0654	0,2295	0,7049	0,0000	5,6990
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>0,6467</b>	<b>0,0393</b>	<b>0,2092</b>	<b>0,3519</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.34 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 3ª Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	24,0361	0,0000	0,0918	0,6191	0,0067	0,0000	0,5303
Fevereiro	23,2439	0,1951	0,1523	0,4899	0,1270	0,0000	0,5228
Março	25,4913	3,6747	0,7888	0,4659	1,7423	0,0000	0,0078
Abril	34,3109	13,3857	0,2685	0,5534	3,5825	0,0000	0,6987
Mai	34,7592	3,5418	0,0000	0,6149	1,5674	0,0000	0,9111
Junho	33,5943	0,0597	0,0000	0,5945	0,0440	0,0000	0,5861

cenário. Porém, tais culturas resultaram em um aumento no valor da mão-de-obra em comparação as outras situações deste cenário, como mostrado na Tabela 6.35.

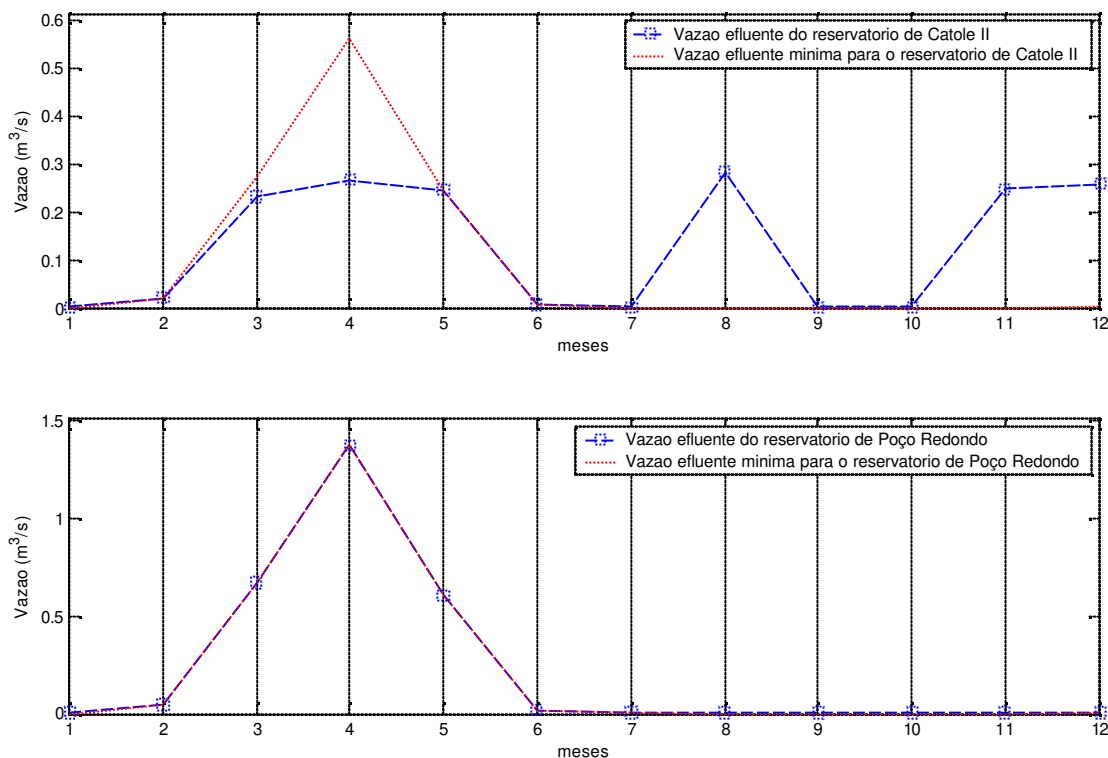


Figura 6.26 – Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 3ª Situação no cenário seco.

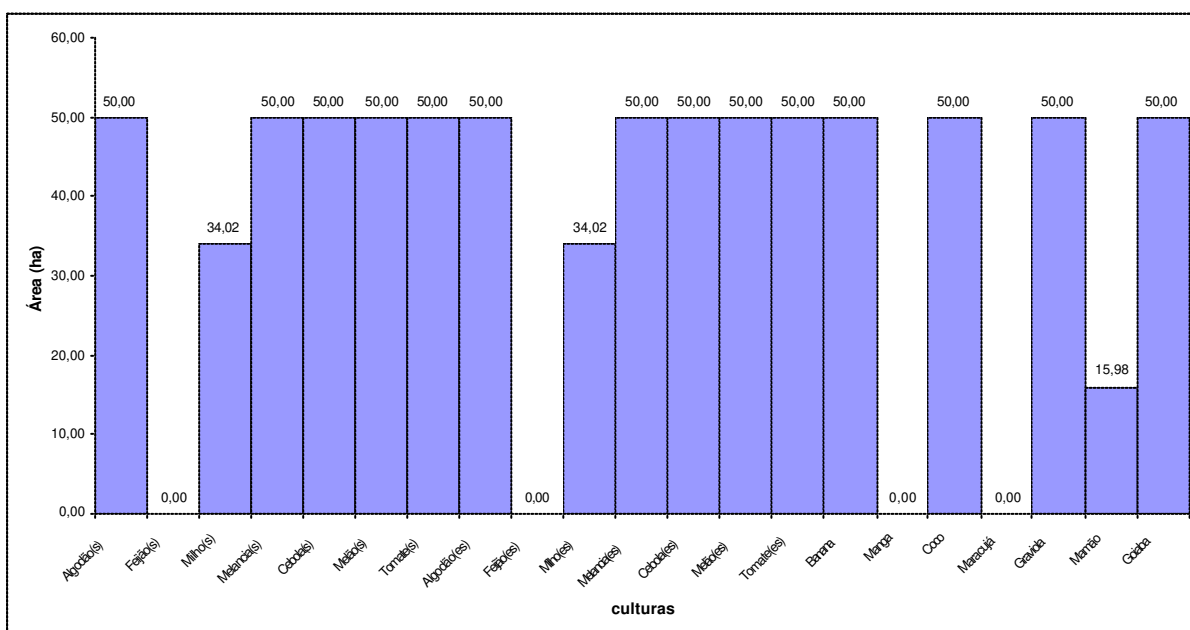


Figura 6.27 – Alocação da área de cada cultura para a 3ª Situação no cenário seco.

Tabela 6.35 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 3ª Situação no cenário seco.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	50,00	-8683,24	5950,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	34,02	39078,50	2245,41	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	49665,53	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	38015,24	6850,00	março a junho
	Melão	50,00	-39774,98	10550,00	março a maio
	Tomate	50,00	399625,15	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3285,07	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	34,02	6491,28	2245,41	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165326,07	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164125,74	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	17770,90	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	812711,49	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	468119,61	10650,00	Todo ano
	Manga	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Coco	50,00	471861,07	10000,00	Todo ano
	Maracujá	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Graviola	50,00	194946,07	9000,00	Todo ano
	Mamão	15,98	15884,88	2572,55	Todo ano
	Goiaba	50,00	29882,52	8000,00	Todo ano
	<b>Total</b>	<b>784,02</b>	<b>2.828.330,92</b>	<b>128113,38</b>	<b>-</b>

A Tabela 6.36 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado.

Tabela 6.36 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 3ª Situação no cenário normal.

Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,5303	0,0187	0,4721	215,98
Fevereiro	0,5228	0,0652	0,5064	300,00
Março	0,0078	0,9530	0,6643	<b>500,00</b>
Abril	0,6987	0,2006	0,7888	<b>500,00</b>
Mai	0,9111	0,0000	0,7666	465,98
Junho	0,5861	0,0000	0,4944	315,98
Julho	0,4633	0,0000	0,3961	215,98
Agosto	0,7770	0,0000	0,6554	300,00
Setembro	1,1475	0,0000	0,9626	<b>500,00</b>
Outubro	1,4516	0,0000	1,2206	<b>500,00</b>
Novembro	1,2972	0,0000	1,0914	465,98
Dezembro	0,7676	0,0562	0,7039	315,98
<b>Média</b>	<b>0,7634</b>	<b>0,1078</b>	<b>0,7269</b>	<b>-</b>

Observa-se, na Tabela 6.36, uma redução, em relação à 3ª Situação, dos valores da vazão para irrigação, da precipitação efetiva e da evapotranspiração do perímetro, mesmo

com o aumento da área total utilizada durante o ano e mais culturas selecionadas, fato também ocorrido na mesma situação dos outros cenários. A área total do perímetro foi utilizada nos meses de março, abril, setembro e outubro.

### 6.3.4– 4 SITUAÇÃO

Nesta situação a prioridade máxima é o abastecimento urbano das cidades, seguida da receita líquida e mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado, perenização dos rios (vazão efluente dos reservatórios), sendo o último objetivo o volume meta dos reservatórios.

Diferentemente dos outros cenários, esta situação apresentou os resultados diferentes da 1ª situação demonstrando que, quando a disponibilidade for insuficiente para atender as demandas as prioridades estabelecidas influenciaram no atendimento das mesmas.

A Figura 6.28 apresenta as vazões liberadas pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. Tem-se que a demanda estabelecida para o abastecimento urbano foi atendida completamente.

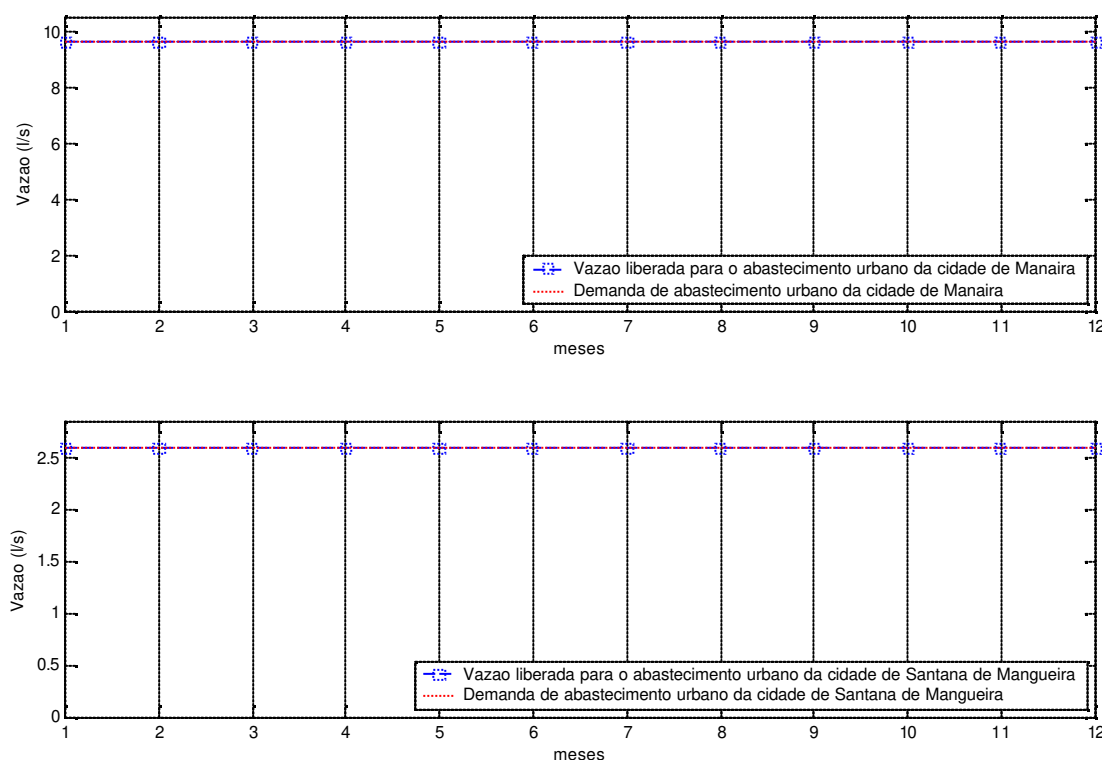


Figura 6.28 – Vazão liberada pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira para a 4ª Situação no cenário seco.

As Tabelas 6.37 e 6.38 apresentam os resultados operacionais e hidrológicos dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo respectivamente.

Tabela 6.37 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Catolé II para a 4º Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	4,1017	0,0000	0,0868	0,1601	0,0250	0,0000	4,1017
Fevereiro	4,0211	0,0622	0,0580	0,1261	0,0748	0,0000	4,0211
Março	4,7557	1,2753	0,2096	0,1242	0,6261	0,0000	4,7557
Abril	9,0906	5,1918	0,0330	0,1730	0,7169	0,0000	9,0906
Maió	9,4255	1,2079	0,0000	0,2131	0,6598	0,0000	9,4255
Junho	9,1959	0,0181	0,0000	0,2083	0,0395	0,0000	9,1959
Julho	8,9646	0,0000	0,0111	0,2174	0,0250	0,0000	8,9646
Agosto	8,6748	0,0000	0,0024	0,2672	0,0250	0,0000	8,6748
Setembro	8,3760	0,0000	0,0000	0,2739	0,0250	0,0000	8,3760
Outubro	7,3282	0,0000	0,0000	0,2929	0,7549	0,0000	7,3282
Novembro	6,3537	0,0000	0,0052	0,2515	0,7282	0,0000	6,3537
Dezembro	5,4998	0,0052	0,0642	0,2251	0,6982	0,0000	5,4998
<b>Vol. inicial</b>	<b>4,200</b>						
<b>Media</b>	-	<b>0,6467</b>	<b>0,0392</b>	<b>0,2111</b>	<b>0,3665</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Tabela 6.38 – Resultados operacionais e hidrológicos do reservatório Poço Redondo para a 4º Situação no cenário seco.

Mês	Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Vazão afluente (hm <sup>3</sup> )	Volume precipitado (hm <sup>3</sup> )	Volume evaporado (hm <sup>3</sup> )	Vazão de descarga de fundo (hm <sup>3</sup> )	Volume vertido (hm <sup>3</sup> )	Vazão de tomada d'água (hm <sup>3</sup> )
Janeiro	23,9242	0,0000	0,0917	0,6184	0,0067	0,0000	0,6429
Fevereiro	23,1168	0,1951	0,1519	0,4886	0,1270	0,0000	0,5389
Março	25,3709	3,6747	0,7866	0,4646	1,7423	0,0000	0,0003
Abril	34,4710	13,3857	0,2686	0,5537	3,3052	0,0000	0,6954
Maió	34,8632	3,5418	0,0000	0,6165	1,5674	0,0000	0,9655
Junho	33,6444	0,0597	0,0000	0,5954	0,0440	0,0000	0,6391
Julho	32,5017	0,0026	0,0000	0,6170	0,0088	0,0000	0,5195
Agosto	30,9973	0,0000	0,0000	0,7521	0,0067	0,0000	0,7456
Setembro	29,1347	0,0000	0,0000	0,7617	0,0067	0,0000	1,0943
Outubro	27,5123	0,6569	0,0000	0,8276	0,0067	0,0000	1,4451
Novembro	25,9597	0,6329	0,0000	0,7474	0,0067	0,0000	1,4314
Dezembro	25,1005	0,6189	0,1391	0,7089	0,0171	0,0000	0,8911
<b>Vol. inicial</b>	<b>25,1005</b>						
<b>Média</b>	-	<b>1,8974</b>	<b>0,1198</b>	<b>0,6460</b>	<b>0,5704</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,8008</b>

O reservatório Catolé II apresentou, assim como nas situações anteriores do mesmo cenário, volume armazenado de água no final do período de otimização maior do que o volume armazenado de água inicial. Porém, para o reservatório Poço Redondo seu volume de água final foi exatamente igual ao seu volume de água inicial estabelecido. O maior volume dos reservatórios foi observado no mês de maio.



Comparando com a 1ª Situação deste cenário, não houve mudanças significativas da operação dos reservatórios. Não houve, novamente, volume vertido nos reservatórios.

A Figura 6.29 apresenta o atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a perenização do rio a jusante dos mesmos.

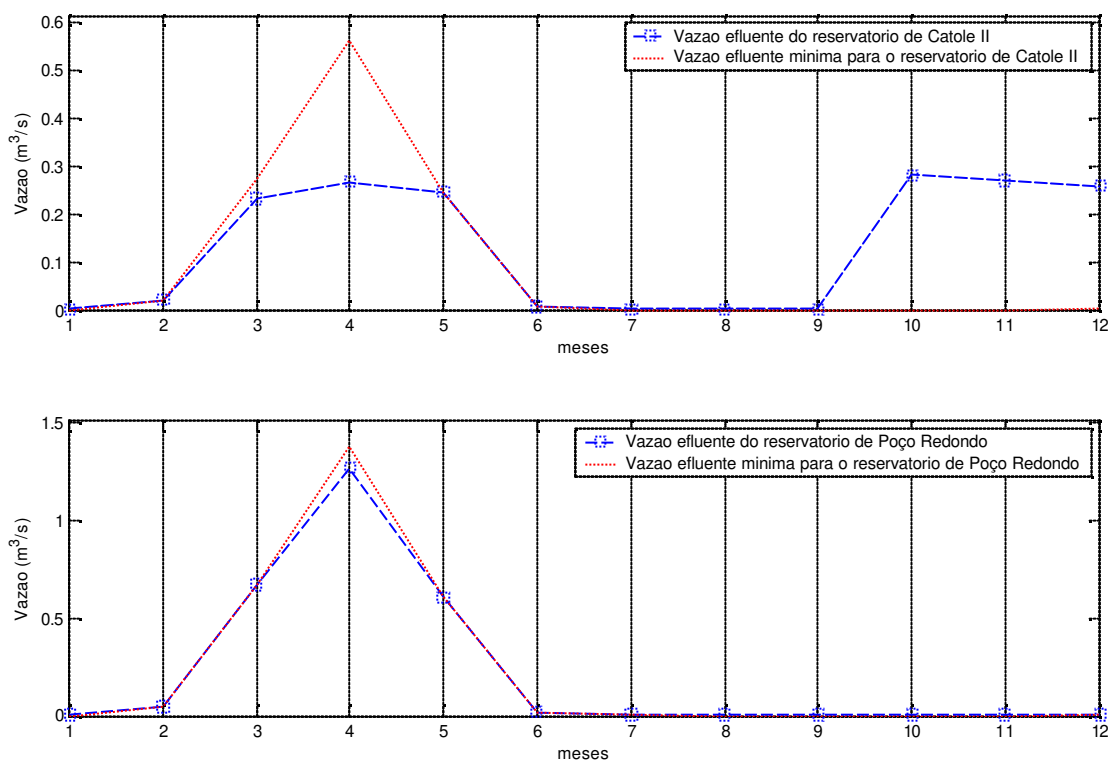


Figura 6.29 – Atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para cada reservatório para a 4ª Situação no cenário seco.

Tem-se que a vazão efluente mínima estabelecida para o reservatório de Catolé II apresenta falha no atendimento dessa demanda nos meses de março e abril. A única mudança significativa é o aumento da vazão efluente no mês de outubro e a diminuição no mês de agosto. Com relação ao reservatório Poço Redondo, pela 1ª vez ocorreu uma falha no atendimento dessa demanda no mês de abril, por causa da maior prioridade à maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda do perímetro irrigado.

A Figura 6.30 apresenta as áreas alocadas para cada cultura. Observa-se que foram alocadas áreas para outras culturas em comparação com a 1ª situação deste cenário. A Tabela 6.39 mostra que tais culturas resultaram em um aumento no valor da mão-de-obra (1122,33 homem/dia) e uma redução no valor da receita líquida (R\$ 29.384,37) e da área utilizada (23,18 ha) em comparação a 1ª Situação deste cenário.

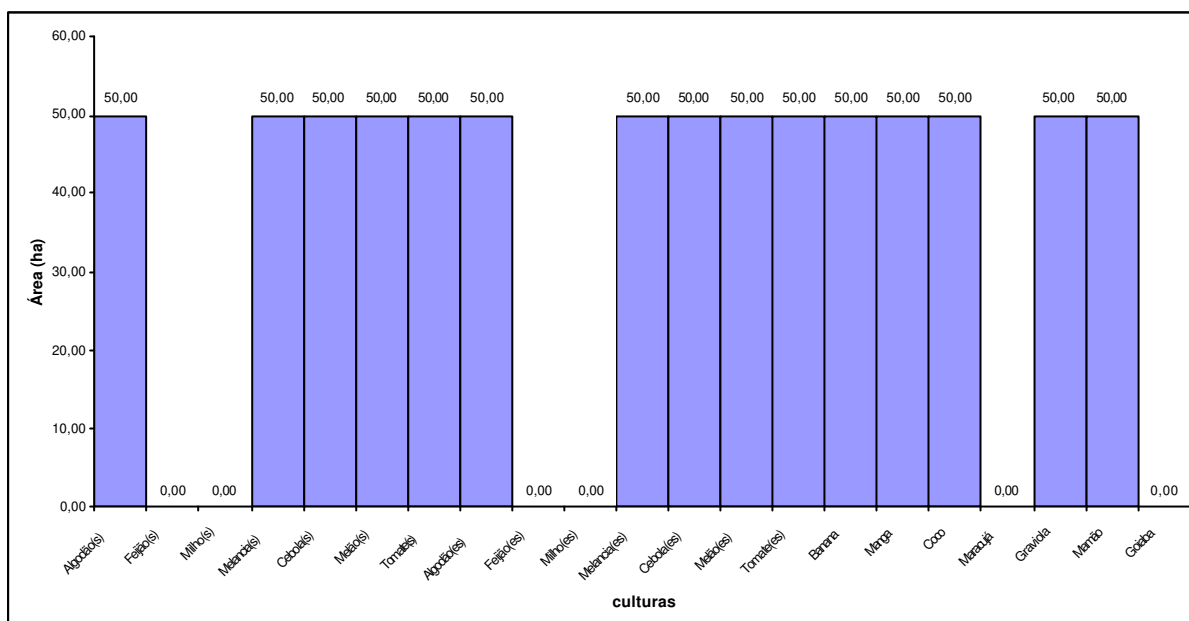


Figura 6.30 – Alocação da área de cada cultura para a 4ª Situação no cenário seco.

Tabela 6.39 – Resultados referentes à área alocada, receita líquida auferida, mão-de-obra requerida do perímetro irrigado para a 4ª Situação no cenário seco.

Cultura	Área (ha)	Receita Líquida (R\$)	Mão-de-obra (homem/dia)	Período de cultivo	
SAFRA	Algodão	50,00	-8683,24	5950,00	fevereiro a maio
	Feijão	0,00	0,00	0,00	fevereiro a maio
	Milho	0,00	0,00	0,00	fevereiro a abril
	Melancia	50,00	49665,53	5750,00	março a maio
	Cebola	50,00	38015,24	6850,00	março a junho
	Melão	50,00	-39774,98	10550,00	março a maio
	Tomate	50,00	399625,15	12600,00	março a junho
ENTRESSAFRA	Algodão	50,00	3285,07	5950,00	agosto a novembro
	Feijão	0,00	0,00	0,00	agosto a novembro
	Milho	0,00	0,00	0,00	agosto a outubro
	Melancia	50,00	165326,07	5750,00	setembro a novembro
	Cebola	50,00	164125,74	6850,00	setembro a dezembro
	Melão	50,00	17770,90	10550,00	setembro a novembro
	Tomate	50,00	812711,49	12600,00	setembro a dezembro
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	468119,61	10650,00	Todo ano
	Manga	50,00	72165,14	7550,00	Todo ano
	Coco	50,00	471861,07	10000,00	Todo ano
	Maracujá	0,00	0,00	0,00	Todo ano
	Graviola	50,00	194946,07	9000,00	Todo ano
	Mamão	50,00	49706,80	8050,00	Todo ano
	Goiaba	0,00	0,00	0,00	Todo ano
<b>Total</b>	<b>750,00</b>	<b>2.858.865,67</b>	<b>128650,00</b>	<b>-</b>	

A redução da receita líquida nesta situação, apesar de ela ter uma prioridade maior do que na 1ª Situação neste cenário, não pode ser visto como um fato a contestar pois o sistema

apresenta outro objetivo, que pode ser conflitante (no sentido da alocação dos recursos disponíveis) ou não, a maximização da mão-de-obra. Assim, nesta situação, o modelo tem que selecionar as culturas que atendam os dois objetivos ao mesmo tempo. Porém, algumas culturas podem ser conflitantes, analisando 2º e 3º Situações do mesmo cenário percebe-se isso, ou seja, tem conjunto de culturas que proporciona maior receita líquida e outras maiores mão-de-obra. Apesar de algumas culturas serem conflitantes, a aquelas que tanto resultam em uma maior mão-de-obra e em uma maior receita líquida, sendo sempre selecionadas (caso do tomate, por exemplo).

A Tabela 6.40 apresenta os resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado. Observa-se um aumento, em relação à 1ª Situação deste cenário, dos valores da vazão de irrigação, da precipitação efetiva e da evapotranspiração do perímetro. Toda área do perímetro foi utilizada entre os meses de março a abril e setembro a julho.

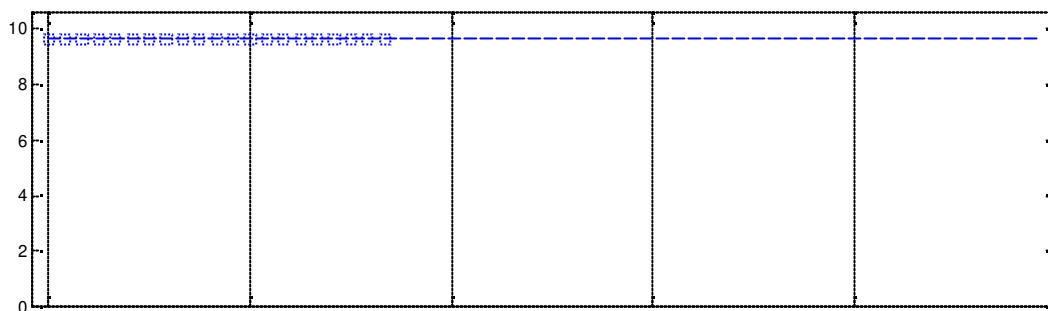
Tabela 6.40 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para a 4ª Situação no cenário seco.

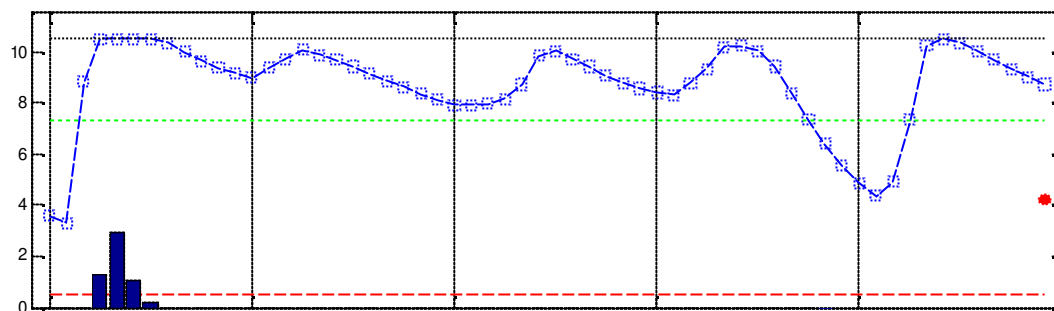
Mês	Vazão de irrigação (hm <sup>3</sup> )	Precipitação efetiva (hm <sup>3</sup> )	Evapotranspiração (hm <sup>3</sup> )	Área (ha)
Janeiro	0,6429	0,0216	0,5714	250,00
Fevereiro	0,5389	0,0652	0,5233	300,00
Março	0,0003	0,9530	0,6368	<b>500,00</b>
Abril	0,6954	0,2006	0,7879	<b>500,00</b>
Mai	0,9655	0,0000	0,8131	<b>500,00</b>
Junho	0,6391	0,0000	0,5397	350,00
Julho	0,5195	0,0000	0,4442	250,00
Agosto	0,7456	0,0000	0,6332	300,00
Setembro	1,0943	0,0000	0,9228	<b>500,00</b>
Outubro	1,4451	0,0000	1,2191	<b>500,00</b>
Novembro	1,4314	0,0000	1,2061	<b>500,00</b>
Dezembro	0,8911	0,0622	0,8156	350,00
<b>Média</b>	<b>0,8008</b>	<b>0,1086</b>	<b>0,7594</b>	-

#### 6.4 – CENÁRIO PLURIANUAL

Neste cenário só é considerado a situação onde a prioridade máxima é o abastecimento urbano das cidades, seguida da perenização dos rios (vazão efluente dos reservatórios), receita líquida e mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada do perímetro irrigado, sendo o último objetivo o volume meta dos reservatórios. Os cinco anos utilizados foram classificados segundo a metodologia apresentado por Silva et. al (2004) como Chuvoso, Seco, Normal, Normal e Chuvoso respectivamente.

A Figura 6.31 apresenta as vazões mensais liberadas pelos reservatórios para o atendimento do abastecimento urbano das cidades de Manaíra e Santana de Mangueira. As demandas estabelecidas nos cinco anos de estudo foi atendida completamente.





Observa-se que o atendimento da vazão efluente mínima estabelecida para o reservatório de Catolé II no mês de abril apresenta falha, por causa da limitação da vazão da descarga de fundo máxima no mês, fato só não ocorrido no 3º ano. Para o reservatório de Poço Redondo a vazão efluente mínima estabelecida é atendida sem falhas. Provavelmente no 5º ano, o atendimento desta demanda tenha sido auxiliado pela vazão descarregada pelo reservatório Catolé II.

A Tabela 6.41 apresenta os valores das áreas alocadas para cada cultura do perímetro irrigado estudado nos 5 anos estudados, representada nas Figuras 6.34 e 6.35, apresentando as áreas alocadas para as culturas sazonais na safra e entressafra para cada ano estudado, respectivamente, e na Figura 6.36 apresentando as áreas alocadas para as culturas perenes nos 5 anos de estudo.

Tabela 6.41 – Resultados referentes à área alocada (ha) do perímetro irrigado para os 5 anos de estudo do cenário plurianual.

Cultura		1º ano	2º ano	3º ano	4º ano	5º ano
SAFRA	Algodão	29,60	0,00	0,00	0,02	29,59
	Feijão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Milho	50,00	0,00	0,00	49,99	50,00
	Melancia	50,00	0,00	49,99	50,00	50,00
	Cebola	50,00	0,00	49,98	50,00	50,00
	Melão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Tomate	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	<b>Total</b>	<b>229,60</b>	<b>50,00</b>	<b>149,97</b>	<b>200,01</b>	<b>229,59</b>
ENTRESSAFRA	Algodão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
	Feijão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Milho	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
	Melancia	0,00	0,04	49,98	50,00	50,00
	Cebola	0,00	0,08	0,02	50,00	49,97
	Melão	0,00	0,00	0,00	10,01	49,99
	Tomate	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	<b>Total</b>	<b>50,00</b>	<b>50,12</b>	<b>100,00</b>	<b>160,01</b>	<b>200,01</b>
PERENES E SEMI-PERENES	Banana	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	Manga	49,99	49,99	49,99	49,99	49,99
	Coco	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	Maracujá	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Graviola	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	Mamão	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40
	Goiaba	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	<b>Total</b>	<b>270,39</b>	<b>270,39</b>	<b>270,39</b>	<b>270,39</b>	<b>270,39</b>

Nota-se uma maior alocação de áreas para as culturas sazonais na safra durante os 5 anos devido a menor disponibilidade hídrica requerida por estas culturas. No 2º ano de estudo (considerado seco) temos que, praticamente, só o tomate é selecionado tanto na safra e entressafra. Para as culturas sazonais na safra, o 1º e 5º anos (considerados chuvosos) são aqueles onde é selecionada uma maior variedade de culturas devido a maior disponibilidade

hídrica. Na entressafra são os 4º e 5º anos. Com relação às culturas perenes tem-se que mais da metade da área do perímetro é destinado ao seu cultivo. Dentre todas só o maracujá não foi selecionado.

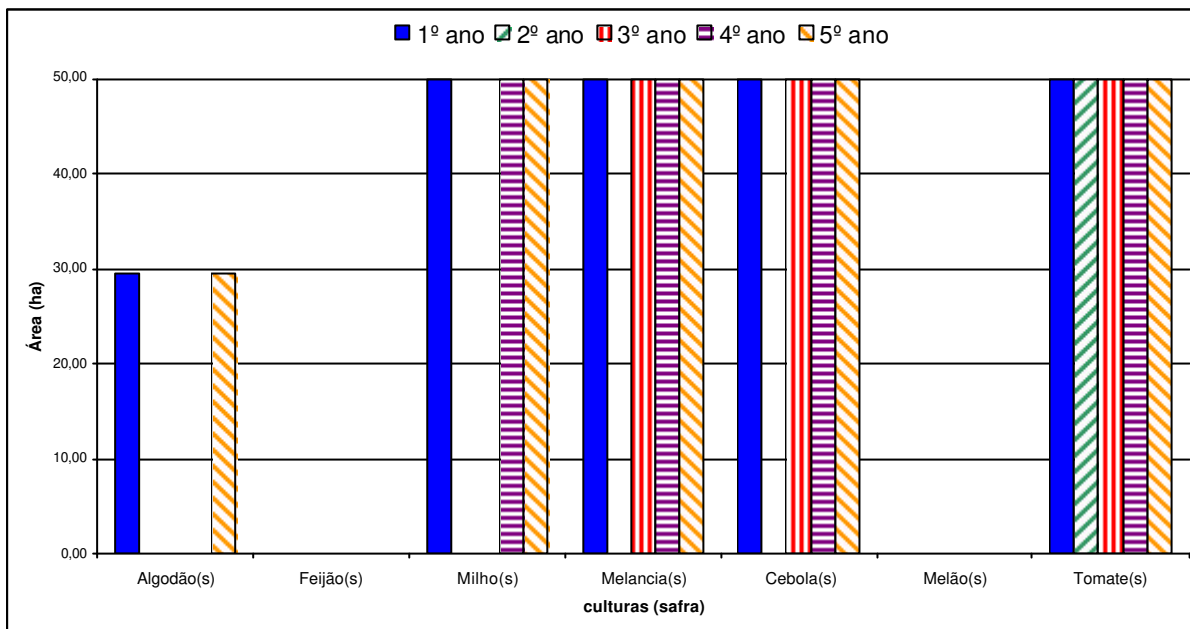


Figura 6.34 – Alocação da área de cada cultura sazonal na safra para o cenário plurianual.

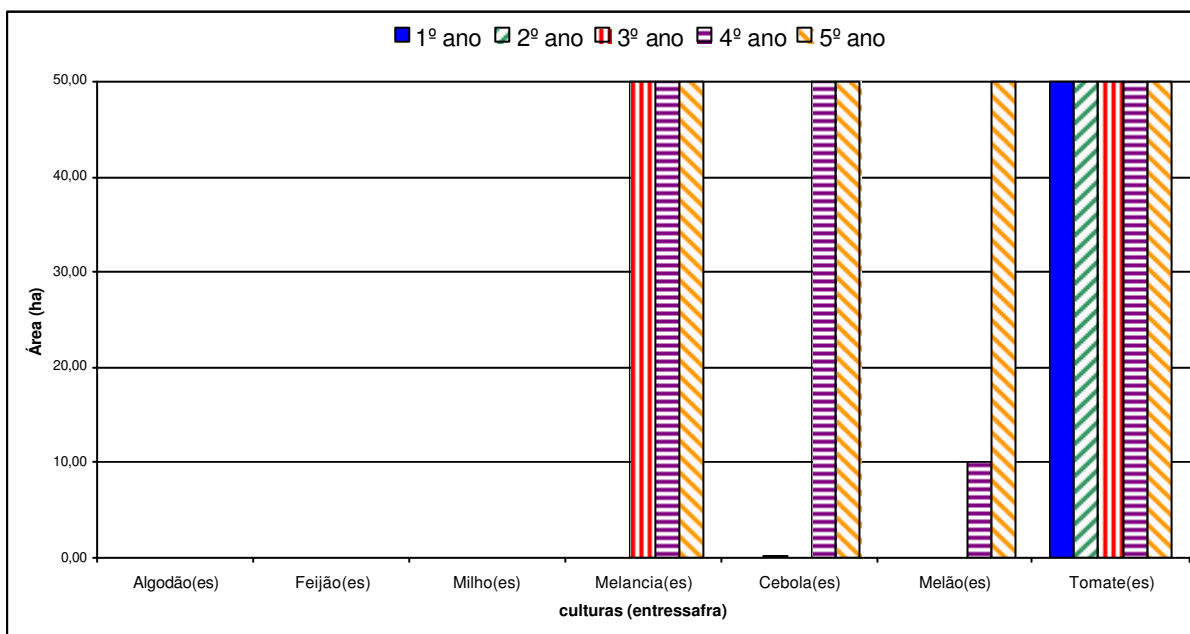


Figura 6.35 – Alocação da área de cada cultura sazonal na entressafra para o cenário plurianual.

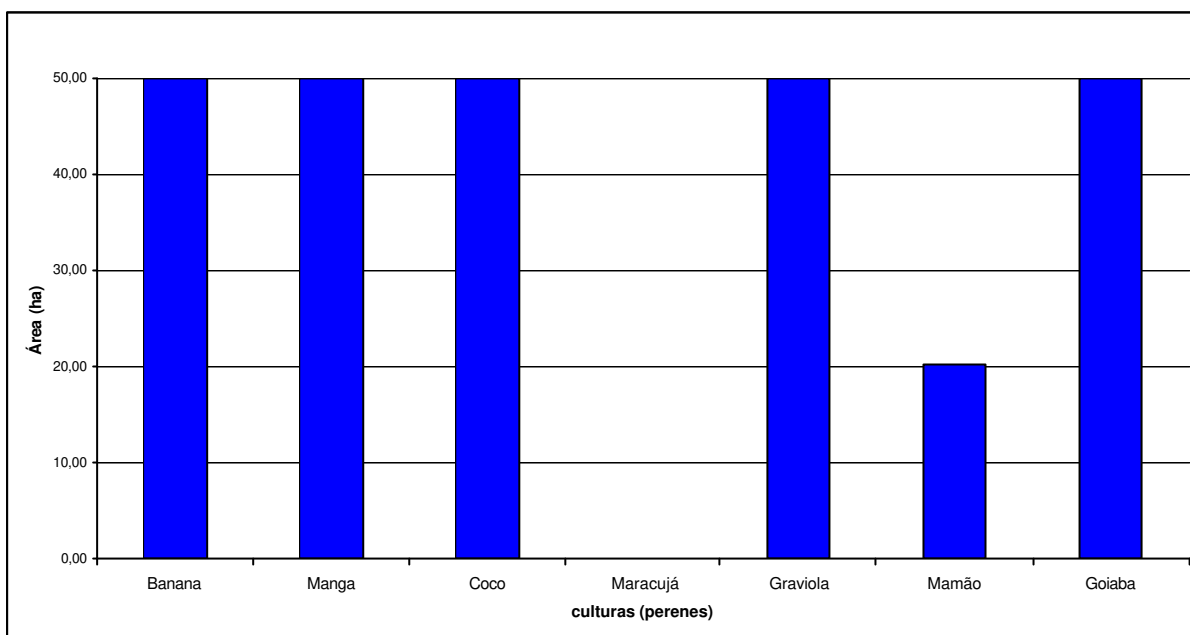


Figura 6.36 – Alocação da área de cada cultura perene para o cenário plurianual.

As Tabelas 6.42 e 6.43 apresentam os valores da receita líquida, respectivamente, para cada cultura do perímetro irrigado nos 5 anos estudados.

Tabela 6.42 – Resultados referentes à receita líquida auferida (R\$) do perímetro irrigado para os 5 anos de estudo do cenário plurianual.

Cultura	1ºano	2ºano	3ºano	4ºano	5ºano	TOTAL
Algodão	17.758,20	0,00	0,00	3,74	10.976,75	





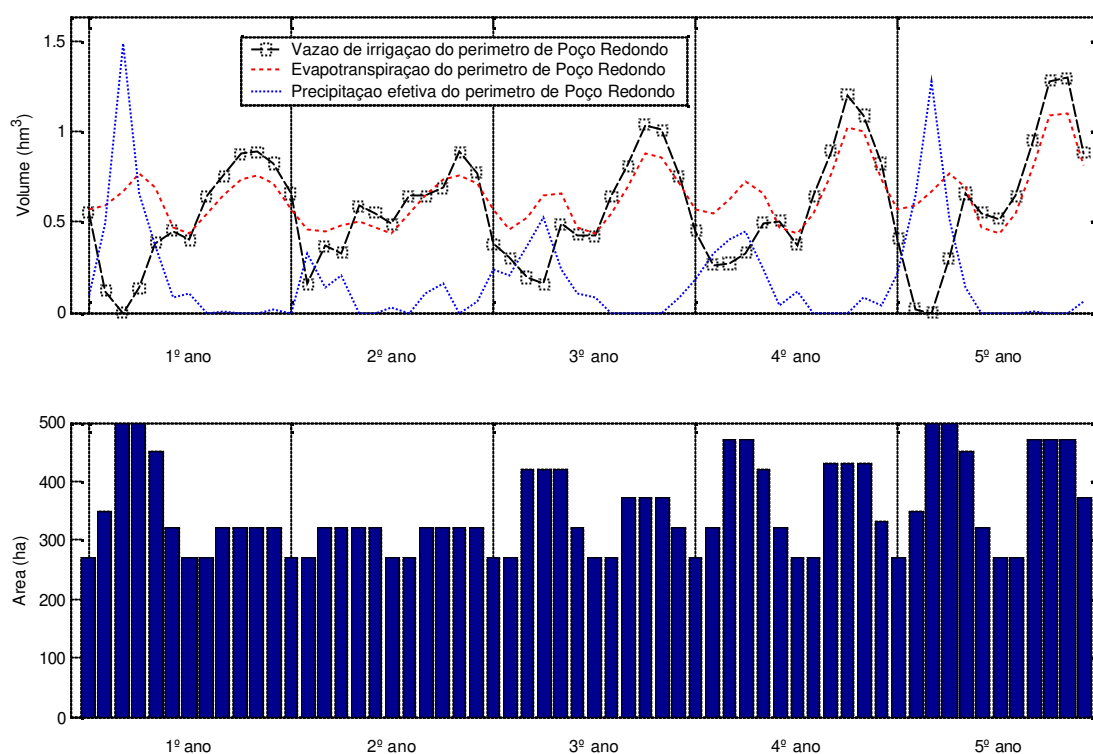


Figura 6.37 – Resultados operacionais e hidrológicos do perímetro irrigado para o cenário plurianual.

Tabela 6.44 – Resultados operacionais e hidrológicos médios anuais do perímetro irrigado para o cenário plurianual.

Ano	Vazão de irrigação ( $\text{hm}^3$ )	Precipitação efetiva ( $\text{hm}^3$ )	Evapotranspiração ( $\text{hm}^3$ )	Área (ha)	
				Mínima	Máxima
1º	0,5027	0,2743	0,6323	270,4	500,0
2º	0,5645	0,0821	0,5625	270,4	320,5
3º	0,5516	0,1523	0,6210	270,4	420,4
4º	0,6125	0,1550	0,6749	270,4	470,4
5º	0,6257	0,2385	0,7124	270,4	500,0
<b>Média</b>	<b>0,5714</b>	<b>0,1804</b>	<b>0,6406</b>	-	

Nota-se que as menores vazões para irrigação no perímetro são aquelas em que a precipitação efetiva é maior. Porém, a maior vazão para irrigação é observada nos 4º e 5º anos, por causa da maior área alocada e o 5º ano é considerado um ano chuvoso. A menor precipitação efetiva é observada no 2º ano (ano considerado seco e com a menor área alocada).

Observa-se que no 1º e 5º anos, a área mensal utilizada para irrigação no perímetro irrigado atinge a área máxima estabelecida, sendo esse o principal fator limitante do sistema

para esses anos. Para os outros anos o reservatório tem que armazenar água para garantir o atendimento das demandas com maiores prioridades.

## CAPITULO VII

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 7.1 – CONCLUSÕES

##### 7.1.1 – SOBRE O MODELO

O trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo de otimização multiobjetivo para a operação integrada de reservatórios, rios e áreas irrigadas, utilizando a programação linear. O modelo foi concebido em termos de componentes pré-definidos como reservatório, calha de rio, demandas mensais fixas de água, perímetros e/ou unidades de produção agrícola irrigadas, sistemas de bombeamento, culturas e sistemas de irrigação. As funções objetivo e restrições conferem ao modelo o caráter desejado da generalidade de sua aplicação, ou seja, facilidade de estabelecimento de uma variedade de cenários climatológicos, operacionais, agronômicos, ambientais, etc. As não-linearidades foram representadas por segmentos de retas (através do Artifício de Linearização por Segmentos) e a solução do problema fez uso de um processo iterativo (Programação Linear Seqüencial) até atingir uma dada convergência.

O modelo foi aplicado a um sistema constituído de dois reservatórios, Catolé II e Poço Redondo, ligados em série na bacia do Rio Piancó, e um perímetro irrigado de 500 ha. Para a operação do sistema foram considerados os seguintes objetivos: atendimento da demanda destinada ao abastecimento humano e a vazão ecológica (ou regularizável), volume meta, maximização da receita líquida e mão-de-obra oriunda da atividade agrícola. As demandas hídricas consideradas dizem respeito ao abastecimento humano nas cidades, irrigação das culturas no perímetro irrigado e perenização do rio a jusante dos reservatórios.

Os resultados mostraram que os objetivos são atendidos considerando as prioridades de atendimento pré-estabelecidas (comprovando que o modelo efetua uma análise multiobjetivo) e com as restrições físicas do componente do sistema.

O método proposto para a implementação das não-linearidades dos componentes do sistema, representadas nas equações de restrições do problema, e das funções objetivo permitiram, entre outras coisas, o uso da PL com todas as suas vantagens, consistência nos valores obtidos por causa da convergência numérica e um tempo de processamento para a

obtenção da solução ótima foi considerado satisfatório (para o referido sistema com 5 anos de operação foram necessários cerca de 15 segundos).

Os resultados obtidos para a operação do sistema podem servir como subsídio na geração de regras operacionais para a alocação da água atendendo as demandas, os objetivos estabelecidos e as restrições físicas estabelecidas.

Com relação ao perímetro irrigado, as culturas foram selecionadas de acordo com os objetivos específicos para cada situação, comprovando novamente o caráter multiobjetivo do modelo. Observa-se, também, a realização do balanço hídrico no solo, resultando no uso racional da água nos perímetros.

O modelo torna-se bastante útil para aplicação em regiões de escassos recursos hídricos, como o semi-árido nordestino, nas quais os perímetros de irrigação de pequeno a médio porte são, em geral, alimentados por reservatórios de pequeno e médio portes e, portanto, mais sujeitos aos efeitos de variações climáticas. Advém daí, portanto, a extrema importância do planejamento e otimização conjunta da definição das áreas irrigadas e do uso da água do reservatório de forma a que o produtor não venha a ter sérios prejuízos em função do não atendimento da demanda hídrica das suas culturas irrigadas, principalmente as perenes.

### **7.1.2 – SOBRE O SISTEMA**

O modelo desenvolvido nesta pesquisa e a metodologia estabelecida para o estudo do comportamento hídrico do sistema mostraram resultados importantes que poderão subsidiar, em um processo decisório, a utilização de seus recursos hídricos. A seguir serão apresentadas as principais conclusões obtidas, comentadas para os cenários e situações estabelecidas para estudo do sistema.

#### **7.1.2.1 – PARA OS CENÁRIOS NORMAL, CHUVOSO E SECO**

As demandas de abastecimento urbano das cidades do sistema, por terem uma maior prioridade de atendimento, foram atendidas sem falhas em todos os cenários e situações analisadas.

O reservatório Catolé II apresenta altas perdas por evaporação, sendo recomendado à utilização das suas disponibilidades o máximo possível, evitando volumes altos de armazenamento, diminuindo assim, as perdas por evaporação e maximizando o uso das

disponibilidades hídricas do reservatório. Para o reservatório Poço Redondo as perdas evaporativas foram consideradas satisfatórias.

A vazão efluente mínima estabelecida para o reservatório Catolé II não é plenamente atendida na estação chuvosa devido à maior demanda requerida nesse período e a limitação da vazão de descarga de fundo máxima do mesmo. O reservatório Poço Redondo, por apresentar uma maior estrutura física, não apresenta restrição quanto ao atendimento dessa demanda em qualquer mês do ano.

Percebe-se que há uma maior liberação de água, pela descarga de fundo, do que a destinada a perenização do rio nos meses que antecedem o período de vertimento, diminuindo assim seu valor. No cenário seco nota-se a transferência de água do reservatório Catolé II para o reservatório Poço Redondo, sem a qual não seria possível o desenvolvimento do perímetro irrigado e o atendimento de suas demandas, já que o reservatório Poço Redondo se mostrou no limite de sua disponibilidade, apresentando o volume final igual ao volume inicial estabelecido.

As áreas das culturas, em cada situação, são alocadas de acordo com os objetivos estabelecidos, ou seja, certas culturas podem proporcionar uma maior receita líquida ou um número maior de mão-de-obra. Porém algumas culturas atendem aos dois objetivos simultaneamente, como o tomate que apresenta uma boa lucratividade gerando um maior número de emprego (comparado com outras culturas). Quando não há preferência por nenhum desses objetivos, as áreas das culturas são alocadas de modo a atender aos dois objetivos ao mesmo tempo, podendo ocasionar numa redução nos valores da receita líquida e/ou da mão-de-obra, comparada com as situações onde esses objetivos tenham prioridade maior. No cenário seco nota-se a preferência por aquelas que reduzem à necessidade hídrica nas situações onde a receita líquida e/ou a mão-de-obra tem uma menor prioridade do que a perenização do rio.

O tomate cultivado, tanto na safra e entressafra, a banana, o coco e a graviola são as culturas que geram maior receita líquida. O tomate, o melão, a banana e o coco são as que requerem um número maior de mão-de-obra.

O principal fator limitante do uso do sistema não é a quantidade de água dos reservatórios e sim as restrições físicas dos componentes, demonstrando que, neste cenário, com base nos dados utilizados, há água suficiente para o desenvolvimento do perímetro irrigado, abastecimento urbano e para a perenização do rio a jusante dos reservatórios.

Este fato observado também no atendimento da sustentabilidade hídrica, ou seja, os volumes de água final dos reservatórios sempre foram maiores ou iguais ao volume inicial

estabelecido. Logo, pode-se dizer que o sistema é sustentável para os dados utilizados neste cenário. Espera-se, portanto, assegurar que os resultados possam se repetir em anos que tiverem condições climáticas iguais ou melhores e em situações onde as demais demandas sejam, também, iguais ou menores que a considerada.

Porém no cenário seco, por apresentar uma menor reserva hídrica, ocorreu a competição pelo uso da água, sendo as demandas atendidas pelas suas prioridades de atendimento. Fato observado na 4ª Situação, onde ocorreu uma falha no atendimento da vazão efluente mínima do reservatório Poço Redondo, pois a receita líquida e a geração de emprego tinham maior prioridade do que a perenização do rio nesta situação, havendo assim uma alocação da água primeiramente ao perímetro irrigado, atendendo posteriormente as outras demandas.

#### **7.1.2.2 – CENÁRIO PLURIANUAL**

Nos outros cenários as conclusões se basearam em apenas um ano hidrológico, não sendo possível analisar, por exemplo, como a transferência de água interanual dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo, bem como as consequências na seleção das culturas da agricultura irrigada.

A demanda destinada ao abastecimento urbano das cidades é atendida sem problemas durante os cinco anos de estudo, devido a sua maior prioridade.

O comportamento do volume de água nos reservatórios, em todos os anos, é bem típico, ou seja, aumentam na estação chuvosa, diminuindo na estação seca, nunca atingindo o volume mínimo estabelecido.

Após o 1º ano (ano considerado chuvoso), o volume de água do reservatório Poço Redondo é mantido em certo nível, garantindo, assim, uma cota hidráulica para que a descarga de fundo possa atender a vazão efluente mínima estabelecida. Porém para que ocorresse tal fato foi necessário uma redução da área cultivável no 2º e 3º ano diminuindo, assim, a demanda hídrica do perímetro irrigado nesse período, como também uma contribuição do reservatório Catolé II no 4º ano por meio de uma maior liberação de água pela descarga de fundo, aumentando a disponibilidade hídrica do reservatório Poço Redondo.

O volume de água do reservatório Catolé II, após o 1º ano, mantém-se, quase todo período, acima de 70% de sua capacidade, constatando-se que sua potencialidade de uso ainda

não foi atingida. Mesmo assim, o atendimento da vazão efluente mínima não é possível em todos os meses devido às limitações físicas da descarga de fundo.

Com relação ao perímetro irrigado, o tomate, na safra e entressafra, e as culturas perenes como banana, coco, manga, graviola e goiaba são as culturas mais atrativas para os 5 anos estudados. Outras culturas podem ser selecionadas dependendo da disponibilidade hídrica do sistema no ano. O perímetro irrigado só é plenamente utilizado nos anos considerados chuvosos. Durante os 5 anos, a demanda hídrica requerida pelo perímetro irrigado não ultrapassa o volume evaporado do reservatório Poço Redondo.

## **7.2 – RECOMENDAÇÕES**

### **7.2.1 – SOBRE O MODELO**

O modelo aqui desenvolvido tem grande potencial para ser utilizado no planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos podendo ser utilizado em escala decenal ou semanal, dependendo da estrutura física do problema. Entretanto, para a consideração da escala diária (operação em tempo real) é necessário incorporar ao modelo a propagação das vazões liberadas pelo reservatório.

A prática do uso da piscicultura em reservatórios é bastante comum no Nordeste do Brasil. Assim, o estudo do retorno financeiro e da mão-de-obra oriunda de práticas da piscicultura desenvolvida a nível extensivo, nos quais não são promovidas modificações no ambiente aquático, pode ser facilmente implementado no modelo (determinação de áreas mínimas da superfície líquida).

Uma inovação interessante aos modelos de otimização de sistema de recursos hídricos é a consideração da interligação entre dois reservatórios por meio de condutos livres e/ou forçados, como é o caso dos reservatórios Coremas e Mãe D'Água.

### **7.2.1 – SOBRE O SISTEMA**

Ficou evidenciando que não é utilizada toda a disponibilidade hídrica do reservatório Catolé II sendo interessante utilizá-la, por exemplo, para uso agrícola de culturas sazonais e/ou na prática da piscicultura extensiva.



Para avaliar como o volume inicial e/ou mês inicial tem influencia na operação do reservatório e no planejamento do perímetro irrigado é recomendada uma análise de sensibilidade para cada cenário.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ARCE, R.A.B. (1990). *Otimização de um Projeto Hidroagrícola, no Município de Guaiá (Sp), Utilizando Programação Linear*. Piracicaba: USP. 76p. Dissertação de Mestrado.
- ANA (2004). *Resolução nº 687, de 03 de Dezembro de 2004*. Agencia Nacional de Águas.
- ALBUQUERQUE, A. S. O., FARIAS, S. R. A., CURI, R. C., CURI, W. F. (2003a). *Avaliação do Potencial de Atendimento de uma Área Passível de Irrigação de 10 000 ha pelo Reservatório de Jataúba - PE*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba. CD-ROM.
- ALBUQUERQUE, A. S. O., ANDRADE, P. R. G. S., CURI, R. C., CURI, W. F. (2003b). *Uma Análise da Operação de um Sistema de Cinco Reservatórios do Alto Capibaribe, Pernambuco*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba. CD-ROM
- ALMEIDA, M. A., CURI, R. C., CURI, W. F. (2001). *Estimativa de Variações no Desempenho Otimizado de um Sistema Hídrico para o Semi-Árido Paraibano para Diferentes Cenários Climáticos, Fontes Hídricas e de Funções Objetivo*. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- ANDRADE, E. L. (2000). *Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise de Decisão*, 2ª ed., LTC, Rio de Janeiro.
- ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. (2002a). *ORNAP na Otimização d Receita de Três Perímetros Irrigados Abastecidos por Dois Reservatórios Conectados em Série*. Revista Engenharia Agrícola, v. 22, n. 1, p. 22-32.
- ANDRADE, P. R. G. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C. (2001). *Otimização da Operação do Sistema Hídrico Jucazinho – Carpina para Múltiplos Usos Via Modelo de Programação Não-Linear*. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L.; FILHO, K. Z. (2002). *Modelos de Simulação e de Redes de Fluxo*. In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. 2ª Edição. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS : ABRH. p.164-237.

- AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; PORTO, M. (1998). *Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da água: Metodologia e Estudo de Caso*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.3, n. 1, p. 21-51.
- BANCO DO NORDESTE S/A (2003). *Manual de Orçamentos Agropecuários*. Campina Grande – PB.
- BARBOSA, D. L.; RODRIGUES, A. C. L.; BARBOSA, E. M.; CURI, R. C.; CURI, W. F. (2005). *Vazão Ecológica – Metodologias Aplicadas e Estudo de Caso*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. CD-ROM.
- BARBOSA, P. S. F. (2002) *Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos*. In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p. 97-163.
- BARBOSA, D. L.; CURI, R. C.; CURI, W. F. (2001). *Um Estudo de Caso da Operação Integrada Ótima de Três Reservatórios em Paralelo com Usos Múltiplos*. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- BARTH, F. T. (1987). *Fundamentos para a Gestão dos Recursos Hídricos*. In: Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. São Paulo: NOBEL/ABRH. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1). p. 1-91.
- BELAINEH, G.; PERALTA, R. C.; HUGHES, T. C. (1999). *Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management*. Journal Water Resource Planning e Management, v. 125, n. 3, p.154-161.
- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. (2003). *Metodologias para Determinação de Vazões Ecológicas em Rios*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 2, p. 161-171.
- BRAGA, B.; GOBETTI, L. (2002). *Análise Multiobjetivo*. In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p. 361-420.
- BRAGA, B. P. F. (1987). *Técnicas de Otimização e Simulação Aplicadas em Sistemas De Recursos Hídricos*. In: Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. NOBEL/ABRH. São Paulo, p. 427-518.

- BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R. (2000). *Hydrological Simulation of the International Catchment of Guadiana River*. Physics and Chemistry of the Earth, vol. 25, n.3, p. 329-339.
- BRAVO, J. M., COLLISCHONN, W., PILAR, J. V. (2005). *Otimização da Operação de Reservatórios: Estado-da-Arte*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. CD-ROM.
- CARVALHO, D. F. C., SOARES, A. A., RIBEIRO, C. A. A. S., SEDIYAMA, G. C. e PRUSKI, F. F. (2000). *Otimização do Uso da Água no Perímetro Irrigado do Gorutuba, Utilizando-se a Técnica da Programação Linear*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 4, n. 2, p. 203-209.
- CELESTE, A. B. (2006). *Determinação e Análise de Indicadores de Desempenho e de Sustentabilidade de Seis Açudes na Bacia do Rio Piancó-PB e de Suas Potenciais Demandas*. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 118p. Dissertação de Mestrado.
- CELESTE, A. B. (2004). *Stochastic Optimization for Integrating Long And Short-Term Reservoir Operation Models, Matsuyama, Ehime, Japan*. 215f. - Thesis in Engineering for Productions – Faculty of Engineering, Ehime University.
- CELESTE, A. B., CURI, W. F., CURI, R. C. (2004). *Otimização de Modelagens de Alternativas de Esvaziamento de um Sistema de Reservatórios na Bacia do Rio Piancó*. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. São Luís. CD-ROM
- CELESTE, A. B.; CURI, R. C.; CURI, W. F. (1996). *Um Modelo de Operação Ótima de Reservatório, Sujeitos a Múltiplos Usos*. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, v. 1, p. 39-45. Salvador.
- CENSO 2000. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/censo>. Data da consulta: 12/05/2006.
- CHU, W. S.; YEH, W. W-G. (1978). *A Nonlinear Programming Algorithm for Real-Time Hourly Reservoir Operations*. Water Resources Research, v. 14, n. 5, p. 1048-1063.
- CIRILO, J. A. (2002) *Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos*. In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p. 305-359.

- COHON, J. L.; MARKS, D. H. (1975). *A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques*. Water Resources Research, v. 11, n. 2. p. 208-220.
- COLLISCHONN, W.; AGRA, S.G.; FREITAS, G.K.; PRIANTE, G.R.; TASSI, R.; SOUZA, C.R. (2005). *Em Busca do Hidrograma Ecológico*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. CD-ROM.
- COOMES, R.T. (1979). *Regulation of Arkansas Basin Reservoir*. The National Workshop on Reservoirs Systems Operations, University Of Colorado, Boulder, Colorado, p. 254-265.
- CRAWLEY, P. D., DANDY, G. C. (1993). *Optimal Operation of Multiple-Reservoir System*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 119, n.1, p.1-17.
- CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A. (2005). *Análise de Alterações na Receita Líquida de um Perímetro Irrigado no Semi-árido sob Condições de Variações Hídricas e Econômicas*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. vol. 9, n. 3, p. 39-53.
- CURI, W. F e CURI, R.C. (2001). *CISDERGO – Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Optimal Operation*. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- CURI, W. F.; CURI, R.C. (2001). *ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program*. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM
- CURI, W. F., CURI, R. C. e BATISTA, A. C. (1997). *Alocação Ótima da Água do Reservatório Engenheiro Arco Verde para Irrigação via Programação Não-Linear*. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória. CD-ROM.
- CUNHA, R. G. L. (1999). *Operação Integrada do Reservatório Engenheiro Arco Verde, Poços Amazonas e Perímetro Irrigado de Condado – PB, Utilizando-se de Programação Linear*. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 112p. Dissertação de Mestrado.
- DAEE (2005). *Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas*. São Paulo. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 116p.
- DANTAS NETO, J. (1994). *Modelos de Decisão para Otimização do Padrão de Cultivo, em Áreas Irrigadas, Baseados nas Funções de Resposta das Culturas à Água*. Botucatu: UNESP. 125p. Tese de Doutorado.

- DOORENBOS, J. e KASSAM, A. H. (2000). Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Sousa, F. A. V. Damasceno, J. F. de Medeiros. *Efeito da Água no Rendimento das Culturas*. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, v. 33, UFPB, Campina Grande.
- EVANSON, D. E.; MOSELEY, J. C. (1970). *Simulation/Optimization Techniques for Multi-Basin Water Resource Planning*. Water Resource Bulletin, vol. 6, n.5, p. 125-736.
- FEIRING, B. R. et al. (1998). *A Stochastic Programming Model for Water Resource Planning*. Mathematical and Computer Modelling, vol. 27, p. 1-7.
- FRAGOSO JUNIOR, C. R.; SOUZA, C. F; GIACOMONI, M. H. (2004). *Vazão Ecológica Constante vs. Vazão Ecológica Variável*. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. São Luiz. CD-ROM.
- FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F. (1996). *Programação Ótima da Operação Energética de Sistemas Hidroelétricos*. In: XVII Congresso Latino-Americano de Hidráulica, Guayaquil, Equador.
- GARCIA, L. A. V.; ANDREAZZA, A. M. P. (2004). *Estabelecimento de Vazões Ambientais Efluentes de Barragens – Sugestão Metodológica*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 9, n. 2, pp. 74-95.
- GOMES, H. P. (1999). *Engenharia de Irrigação Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento*. Editora Universitária – UFPB, Campina Grande-PB, 3ª Edição. 412p.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. (1982). *Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation*. Water Resources Research, vol. 18, n. 1, p. 14-20.
- HOUCK, M. H. (1982). *Real-Time Daily Reservoir Operation by Mathematical Programming*. Water Resources Research, v. 18 n. 5, p. 1345-1351.
- HOUCK, M.H. e COHON, J. L. (1978). *Sequential Explicitly Stochastic Linear Programming Models: A Proposed Method for Design and Management of Multipurpose Reservoir System*. Water Resource Research, vol. 14, n. 2, p. 161-169.
- KARAMOUZ, M.; HOUCK, M. H.; DELLEUR, J. W. (1992). *Optimization and Simulation of Multiple Reservoir Systems*. Journal Water Resource Planning & Management, v. 118, n. 1, p. 78-81.

- KUCZERA, G. (1989). *Fast Multi-Reservoir Multiperiod Linear Programming Models*. Water Resources Research, v. 25, n. 2 p. 169-176.
- KUMAR, R.; KHEPAR, S.D. (1980). *Decision Models for Optimal Cropping Patterns in Irrigations Based on Crop Water Production Functions*. Agriculture Water Management, v. 3, p. 65-76.
- KUO, S.F.; LIU, C.W.; CHEIN, S.K. (2003). *Comparative Study of Optimization Techniques for Irrigation Project Planning*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), p. 59-73.
- LABADIE, J. W. (2004). *Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-Of-The-Art Review*. Journal of Water Resources Planning and Management. v. 130. n. 2, p. 93-111.
- LABADIE, J.W., PINEDA, A. M., BODE, D. A. (1984). *A Network Analysis of Raw Water Supplies Under Complex Water Rights and Exchanges: Documentation For Program MODSIM3*. Colorado Water Resources Institute. Fort Collins, Colorado, EUA.
- LANNA, A. E. (1997). *Análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos*. In: Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Rubem La Laina Porto. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, RS.
- LANNA, A. E. (1993). *Gestão de Recursos Hídricos*. In: TUCCI, E. Hidrologia – Ciência e Aplicação. Porto Alegre-RS: ABRH/EDUSP, p. 727-804.
- LIMA, C. A. G. (2004). *Análise e Sugestões para Diretrizes de Uso das Disponibilidades Hídricas Superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó, Localizada no Estado da Paraíba*. Campina Grande: UFCG - Doutorado Temático em Recursos Naturais. 274p. Tese de Doutorado.
- LIMA, G. (2002). *Aplicação de Simulação Computacional na Análise dos Conflitos Entre os Usos Múltiplos da Água na Bacia do Rio Atibaia no Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, 141 p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L. (2005). *Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n. 3, p.5-22.

- LIMA, H. V. C.; LANNA, A. E. L. (2001). *Operação Ótima de Sistemas de Reservatórios: Aplicação ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- LOÁICIGA, H. A., P. E. (2002). *Reservoir Design and Operation with Variable Lake Hydrology*. Journal of Water Resources Planning and Management, p. 399-405, November/December.
- LOUCKS, D. P. (2000). *Sustainable Water Resources Management*. Water International Resource Association, v. 25, n. 1 p. 3-10.
- LOUCKS, D. P.; STAKHIV, E. Z.; MARTIN, L. R. (2000). *Sustainable Water Resources Management*. Journal of Water Resources Planning and Management, v 126, n. 2, p. 43-47.
- LOUCKS, D. P; STENDIGER, J. R ; HAIT, D. A.(1981). *Water Resources Planning Systems Planing and Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 55p.
- MAIA, A. G. & VILELLA, S. M. (2001). *Gerenciamento do Estoque de Água do Sistema de Múltiplos Reservatórios da Bacia do Paraguaçu*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- MANNOCCHI, F.; MECARELLI, P. (1994). *Optimization Analysis of Deficit Irrigation Systems*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.120, n3, p.484-503.
- MARTIN, Q. (1995). *Optimal Reservoir Control for Hydropower on Colorado River, Texas*. Journal Water Resource Planning e Management, v. 121, n. 6, p. 438-446.
- MATANGA, G.B.; MARIÑO, M.A. (1979). *Irrigation Planning I. Cropping Pattern*. Water Resources Research, v.15, n.3, p. 672-8.
- MATEUS, G. R.; LUNA, H. P. C. (1986). *Programação Não Linear*. Belo Horizonte. UFMG, 289p.
- MELO, D. M., CURI, R. C., CURI, W. F., LIMA, C. A. G. (2004). *Avaliação dos Efeitos de Variação das Condições Iniciais no Processo Otimizante do Reservatório de Saco de Nova Olinda - PB*. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís. CD-ROM.
- MOHAN, S. & RAIPURE, D. M. (1992). *Multiobjective Analysis of Multireservoir System*. Journal of Water resources Planning and Management, vol. 118, p. 356-370.



- MOUSAVI, H.; RAMAMURTHY, A. S. (2000). *Optimal Design of Multi-Reservoir Systems for Water Supply*. Advances in Water Resources, vol. 23, p. 613-624.
- MUJUMDAR, P. P.; RAMESH, T. S. V. (1997). *Real-Time Reservoir Operation for Irrigation*. Water Resource Research, v. 33 n. 5, p. 1157-1164.
- OLIVEIRA, J. A.; LANNA, A. E. L. (1997). *Otimização de um Sistema de Reservatórios Atendendo a Múltiplos Usos no Nordeste Brasileiro*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.2, n.2, p. 123-141.
- OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O.; LEITÃO, T. H. V. (2005). *Estimativa da Evaporação e Análise de Uso do Coeficiente (kp) do Tanque “Classe A” nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 10, n. 4, p. 73-83.
- OVERTON, D. E., MEADOWS, M. E. (1976) *Introduction and Modeling Concepts*. In: *Stormwater Modeling*. New York, Academic Press, Inc. 355p.
- PEIXOTO, L. S. (2002). *A Utilização de Simulação Computacional no Gerenciamento de Usos Múltiplos da Água na Bacia do Sapucaí/Grande no Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, 130 p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- PELLISSARI, V. B.; SARMENTO, R. (2001). *Determinação da Demanda Ecológica para o Rio Santa Maria da Vitória, Estado do Espírito Santo*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- PERERA, B. J. C., CODNER, G. P. (1996). *Reservoir Targets for Urban Water Supply Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 122, n. 4, p. 270-279.
- PORTO, R. L. L. (1997). *Estudos de Operação do Sistema França – São José do Jacuípe*, Relatório Técnico para a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia.
- PORTO, R. L. L. (1999). *Estudos de Operação do Reservatório de Ponto Novo no Rio Itapicuru*, Relatório Técnico para a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia.
- RIGHETTO, A. M., FILHO, J. A. G. (2003). *Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 8, n. 2 p. 19-29.
- ROBERTO, A. N. (2002). *Modelos de Rede de Fluxo Para Alocação da Água Entre Múltiplos Usos em uma Bacia Hidrográfica*. Dissertação de Mestrado, 116 p., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.

- ROBERTO, A. N. e PORTO, R. L. L. (2001). *O Sistema MODSIMLS: Um Modelo de Rede de Fluxo para Simulação De Bacias Hidrográficas*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.
- ROBERTO, A. N. e PORTO, R. L. L. (1999). *Alocação da Água Entre Múltiplos em uma Bacia Hidrográfica*. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. CD-ROM
- ROS, D. A.; BARROS, M. (2003). *Estratégias Operacionais de Sistemas Hidroenergeticos: Impactos de Diferentes Objetivos*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba. CD-ROM
- SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. S. (2006). *Análise de Metodologia para Determinação de Vazão a Jusante de Reservatórios no Semi-árido Nordeste*. In: XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Gravatá. CD-ROM.
- SCHARDONG, A. (2006). *Aplicação de Técnicas de Programação Linear e Extensões para Otimização da Alocação de Água em Sistemas de Recursos Hídricos, Utilizando Métodos de Pontos Interiores*. São Paulo: USP – Pós-graduação em Engenharia. 141p. Dissertação de Mestrado.
- SCIENTEC (1997). Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba: Bacias do Rio Piancó e do Alto Piranhas*. SEPLAN. Paraíba. Brasil.
- SHELTON, R. A. (1979). *Management of TVA Reservoir Systems*. The National Workshop on Reservoir Systems Operations, University Of Colorado, Boulder, Colorado, p. 13-17.
- SIGVALDASON, O. T. (1976). *A Simulation Model for Operation a Multipurpose Multireservoir System*. Water Resources Research, v. 12, n. 2, p. 263-278.
- SILVA, C. A. B. (2004). *Estudo da Otimização do Uso dos Recursos Hídricos dos Açudes Santa Inês, Condado, Serra Vermelha I, Piranhas, Vídeo, Vazante e Poço Redondo na Bacia do Rio Piancó*. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 160p. Dissertação de Mestrado
- SILVA, M. C. L.; BRITO, J. I. B. e COSTA, A. M. N. (2004). *Proposta de Monitoramento da Precipitação Pluvial no Estado da Paraíba Utilizando a Técnica dos Quantis*. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza. 14p.
- 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.

- SIMONOVIC, S. P.; BURN, D. H. (1989). *An Improved Methodology for Short-term Operation of a Single Multipurpose Reservoir*. *Water Resource Research*, v. 25, n. 1 p. 1-8.
- SINHA, A. K.; RAO, B. V.; BISCHOF, C. H. (1999). *Nonlinear Optimization Model For Screening Multipurpose Reservoir Systems*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n. 4, p. 229-233.
- SOUZA FILHO, F. A. & PORTO R. L. L. (1997). *Definição dos Níveis-Meta do Sistema de Abastecimento de Fortaleza*. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. Vitória, vol. 2 p. 351-357.
- SUDENE (1990). *Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado da Paraíba*. Série pluviométrica 5. Recife – PE. Brasil.
- TEEGAVARAPU, R. S. V.; SIMONOVIC, S. P. (2000). *Short-Term Operation Model for Coupled Hydropower Reservoir*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 2, p. 98-106.
- TEEGAVARAPU, R. S. V.; SIMONOVIC, S. P. (2001). *Optimal Operation of Water Resource Systems: Trade-Offs Between Modeling and Practical Solutions*. In: Marino, M. A.; Simonovic, S. P. *Integrated Water Resources Management*. Iahs Publish, n. 272, p. 257-263.
- VIEIRA, V. P. P. B. (1996). *Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semi-árido Nordestino*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 1, n. 1, p. 91-107.
- WURBS, R. A. (2005). *Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models*. Technical Report n. 282. Texas Water Resources Institute.
- WURBS, R. A. (1996). *Modeling and Analysis of Reservoir System Operations*. Editorial Prentice-Hall, Inc. 356p.
- WURBS, R. A. (1993). *Reservoir-System Simulation and Optimization Models*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, n. 4, p.455-472.
- YAZICIGIL, H.; HOUCK, M. H.; TOEBES, G. (1983). *Daily Operation of a Multipurpose Reservoir System*. *Water Resource Research*, v. 19 n. 1 p.1-13.
- YEH, W. W-G. (1985). *Reservoir Management and Operation Models: a State-of-the-Art Review*, *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p.1797-1818.
- YOUNG, G. K., Jr. *Finding Reservoir Operating Rules*. (1967). *Journal Water Resource Planning & Management*, v. 93, n. 4, p. 297-321.
- YEN, B. C. (1988). *Stochastic Methods and Reliability Analysis in Water Resources*. *Advance Water Resources*, vol. 11.