



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



TESE DE DOUTORADO

ROSINETE BATISTA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE INTERVENÇÕES HIDRÁULICAS
NA BACIA DO RIO GRAMAME-PB COM O USO
DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTIOBJETIVO
E MULTICRITERIAL**

**CAMPINA GRANDE – PB
MAIO DE 2009**

ROSINETE BATISTA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE INTERVENÇÕES HIDRÁULICAS NA BACIA DO RIO
GRAMAME-PB COM O USO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTIOBJETIVO E
MULTICRITERIAL**

Tese submetida ao Programa de Doutorado em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Recursos Naturais.

ORIENTADOR: PROF. Ph.D. WILSON FADLO CURI

**CAMPINA GRANDE – PB
MAIO DE 2009**

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais Antônio Batista (in Memoriam) e Maria Salvina (in Memoriam) pelo exemplo de vida, à minha doce Maria Luíza e ao meu esposo Luiz pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Deus fonte da minha existência.

Ao professor Wilson Fadlo Curi, pela orientação e, perseverança em ver a conclusão de mais um trabalho.

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão de bolsa de estudo, para a realização da tese.

Ao programa de doutorado em recursos naturais da UFCG, na pessoa do professor Pedro Vieira (coordenador) sempre pronto a esclarecer dúvidas pertinentes à questão administrativa e à Cleide (secretária), exemplo de paciência.

Ao amigo, Valterlin Santos, pela disponibilidade em ajudar em vários momentos e pelo suporte técnico do modelo de otimização multiobjetivo.

Aos membros da banca examinadora pela valiosa contribuição para a melhoria da qualidade da tese.

Aos meus irmãos, sogros, cunhados e sobrinhos pelo incentivo em mais uma conquista da minha vida.

Aos amigos de curso, em especial, Francisco Neto, Djane Fonseca e Gildarte Barbosa.

À AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba), à CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba) e à SUPLAN (Superintendência de Planejamento da Paraíba) por disponibilizarem dados e informações necessários à pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste sonho.

RESUMO

As crescentes mudanças ambientais e impactos sociais decorrentes de ações humanas e a necessidade em reverter ou minimizar seus prejuízos tem resultado, nos últimos anos, na reformulação do planejamento e do gerenciamento de recursos hídricos. Atualmente buscam incluir, nos processos de avaliação de obras hidráulicas, aspectos que vão além da análise econômica, que objetiva a maximização dos benefícios econômicos. Isto é, tem-se buscado uma análise mais realista representada através de diversos aspectos, tais como: social, ambiental, político, dentre outros. Este estudo visa buscar, estruturar, processar e analisar informações para o auxílio à tomada de decisão quanto as melhores escolhas entre possíveis ações de intervenção hidráulicas, sob as óticas multiobjetivo e multicriterial, para a ampliação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Gramame, situada no litoral Sul do estado da Paraíba, a fim de minimizar futuros conflitos de uso da água.

A seleção de indicadores de sustentabilidade e eficiência do sistema visam refletir os aspectos sócio-econômicos e ambientais a serem utilizados como critérios de julgamento numa análise multicriterial. Utilizou-se um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em programação linear, que permite um estudo mensal e integrado de reservatórios, rios, perímetros irrigados, adutoras e abastecimento urbano através da análise multiobjetivo para um período plurianual, na sua determinação. O método PROMETHEE II foi utilizado no processo de seleção das melhores alternativas de intervenções hidráulicas na bacia, tendo em vista diferentes possibilidades de preferências.

A partir dos resultados obtidos na otimização foi possível constatar que a prática da irrigação poderá ser comprometida, uma vez que o sistema hídrico atual não garante o atendimento desta demanda em nenhum dos perímetros considerados.

As ordenações das alternativas variaram de acordo com as preferências adotadas. Quando privilegiou-se o aspecto ambiental, a alternativa 1 (infra-estrutura hídrica atual) foi a preferida; quando privilegiou-se o aspecto social, a alternativa 8 (reservatórios nos rios Mumbaba e Gramame e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame) foi a preferida, e quando privilegiou-se o aspecto econômico a alternativa 4 (reservatório no rio Gramame) foi a preferida. Levando-se em consideração todas as análises, as alternativa 1 teve a preferência máxima e ocupou 42 % do primeiro lugar no ordenamento das alternativas.

Os resultados fornecidos pelo modelo de otimização multiobjetivo e pelo método de análise multicriterial poderão dar subsídios às questões operacionais e de implantação de obras hidráulicas para os tomadores de decisão através de informações sobre o comportamento do sistema e a ponderação de critérios de julgamento.

Palavras-Chave: Indicadores; Otimização multiobjetivo; Análise multicriterial.

ABSTRACT

The growing environmental changes and social impacts imposed by human actions and the need of reverting or minimizing their harmful aspects have resulted, over the last years, in the reformulation of the planning and management of water resources. Nowadays they look for including, in the processes of hydraulic interventions impacts evaluation, aspects that go beyond the economical analysis itself, which aims at the maximization of the economical benefits. That is, a more realistic analysis, which takes into account several dimensions, such as social, environmental, political, among others, has been searched. This study aims to look for, to structure, to process and to analyze informations to give support to decision makers about the best choices that can be taken among possible hydraulic intervention actions, under a multiobjective and multicriteria analysis view, for the increase of the Gramame river basin water resources availability, which is located in the south coast of the Paraíba state, in order to minimize future water use conflicts.

The efficiency and sustainability indexes selection try to portrait the social-economical and environmental aspects that are used as judgment criteria in a multicriteria analysis. The indexes were determined via the application of a multiobjective monthly based multi annual optimization model, which is based on linear programming and allows one to perform a river system study in an integrated way, which includes reservoir, irrigated perimeters, pipes and urban water supply. The PROMETHEE II method was used for the selection and ranking the best system hydraulic interventions, having in mind different preferences possibilities.

From the obtained results in the optimization process it was possible to verify that the practice of the irrigation can result in financial losses, once the current water system doesn't guarantee the fulfillment of their water demand supply in none of the considered perimeters and scenarios.

The obtained rankings for the alternatives varied according to the adopted preferences. Alternative 1 (no hydraulic intervention) was selected when the environmental criteria was privileged, alternative 8 (construction of reservoirs at Mumbaba and Gramame rivers and provide water transposition from Abiaí-Papocas rivers to Gramame's Water Treatment Station) was selected when social criteria was privileged and alternative 6 (construction of reservoir at Mumbaba and provide water transposition from Abiaí-Papocas rivers to Gramame's Water Treatment Station) was selected when economical criteria was privileged. Taking into account all analysis performed, the best ranked alternatives were 1 and 8, which were ranked in the first place with 42 %.

The results supplied by the multi-objective optimization model and the multicriterial analysis may provide important insights regarding to the operational subjects and the implantation of hydraulic interventions for the decision makers through the consideration of the system behavior information and the different judgments criteria.

Key Words: Indicators; multi-objective optimization; multicriterial analysis.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiv
1 – INTRODUÇÃO	01
1.1 - Objetivos.....	03
1.1.1 - Objetivo geral.....	03
1.1.2 - Objetivos específicos.....	03
1.2 - Estrutura do trabalho.....	04
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1 - Indicadores de sustentabilidade dos recursos hídricos.....	05
2.2 – Otimização multiobjetivo.....	07
2.2.1. Programação linear.....	08
2.2.2. Programação não linear.....	09
2.2.3. Programação dinâmica.....	10
2.3 - Métodos de otimização multiobjetivo.....	10
2.4 – Alguns estudos de caso envolvendo otimização multiobjetivo.....	12
2.5 – Processo de tomada de decisão.....	14
2.6 – Abordagem multicriterial.....	15
2.7 – Métodos de análise multicritério.....	20
2.8 – Aplicações dos Métodos de análise multicritério.....	24
3 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA	28
3.1 – Caracterização física da bacia.....	28
3.1.1 - Localização.....	28
3.1.2 - Hidrografia.....	30

3.1.3 - Climatologia	31
3.1.4 - Geologia.....	32
3.1.5 - Pedologia.....	34
3.1.6 - Relevo e vegetação.....	36
3.2 - Abastecimento humano.....	37
3.2.1 - Sistema de abastecimento d'água da RMJP.....	37
3.2.2 - Sistema de abastecimento d'água de Pedras de Fogo.....	40
3.3 - Abastecimento industrial.....	41
3.4 - Irrigação.....	42
3.5 - Dessedentação de animais.....	42
4 – METODOLOGIA E ESTRATÉGIA DE AÇÃO.....	44
4.1 – Coleta de dados e informações.....	45
4.2 - Intervenções hidráulicas.....	46
4.2.1 - Reservatório no alto Gramame.....	46
4.2.2 - Reservatório no rio Mumbaba.....	48
4.2.3 - Importação de água da bacia Abiaí-Papocas.....	48
4.3 - Cenários estudados.....	49
4.4 - Otimização multiobjetivo.....	54
4.4.1 - Modelo de otimização multiobjetivo.....	54
4.4.2 - Funções objetivo.....	55
4.4.3 - Equações de restrições.....	61
4.4.4 - Implementação do modelo de otimização multiobjetivo.....	67
4.4.5 - Indicadores.....	71
4.4.5.1 - Indicadores de desempenho das demandas.....	71
4.4.5.2 - Indicadores de eficiência associados aos reservatórios.....	72
4.5 - Análise multicriterial.....	73
4.5.1 - O Método PROMETHEE.....	74
4.5.2 - Função de preferência.....	75
4.5.3 - Composição das alternativas avaliadas.....	80
4.5.4 - Implementação do método PROMETHEE.....	80
4.5.5 - Critérios de Avaliação.....	82
4.5.5.1 - Critérios segundo objetivos econômicos.....	84

4.5.5.2 - Critérios segundo objetivos sociais.....	87
4.5.5.3 - Critérios segundo objetivos ambientais.....	92
4.5.6 - Pesos dos critérios.....	94
4.5.6.1 - Critério econômico.....	95
4.5.6.2 - Critério social.....	96
4.5.6.3 - Critério ambiental.....	97
5 – DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	99
5.1 - Dados de pluviometria.....	99
5.2 - Dados de evaporação.....	100
5.3 - Dados de fluviometria.....	101
5.3.1 - Pontos de cálculo.....	102
5.4 - Dados dos reservatórios.....	105
5.4.1 - Cota-área-volume.....	105
5.4.2 - Volumes máximos e mínimos.....	105
5.4.3 - Vertedouros.....	105
5.4.4 - Descarga de fundo.....	106
5.5 - Capacidades das adutoras.....	106
5.6 - Demandas hídricas.....	107
5.6.1 - Abastecimento humano.....	107
5.6.2 - Abastecimento industrial.....	107
5.6.3 - Irrigação.....	108
5.7 - Critérios operacionais	111
5.8 - Objetivos considerados no modelo de otimização multiobjetivo.....	112
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	113
6.1 - Resultados da aplicação do modelo de otimização multiobjetivo.....	113
6.1.1 - Cenário 1	113
6.1.1.1 - Atendimento às demandas.....	113
6.1.1.2 - Agricultura irrigada.....	115
6.1.1.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	115
6.1.1.4 - Desempenho geral do sistema.....	118
6.1.2 - Cenário 2	119

6.1.2.1 - Atendimento às demandas.....	119
6.1.2.2 - Agricultura irrigada.....	121
6.1.2.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	121
6.1.2.4 - Desempenho geral do sistema.....	123
6.1.3 - Cenário 3.....	124
6.1.3.1 - Atendimento às demandas.....	124
6.1.3.2 - Agricultura irrigada.....	126
6.1.3.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	128
6.1.3.4 - Desempenho geral do sistema.....	129
6.1.4 - Cenário 4	130
6.1.4.1 - Atendimento às demandas.....	130
6.1.4.2 - Agricultura irrigada.....	132
6.1.4.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	132
6.1.4.4 - Desempenho geral do sistema.....	134
6.1.5 - Cenário 5.....	135
6.1.5.1 - Atendimento às demandas.....	135
6.1.5.2 - Agricultura irrigada.....	137
6.1.5.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	139
6.1.5.4 - Desempenho geral do sistema.....	141
6.1.6 - Cenário 6	142
6.1.6.1 - Atendimento às demandas.....	142
6.1.6.2 - Agricultura irrigada.....	144
6.1.6.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	146
6.1.6.4 - Desempenho geral do sistema.....	148
6.1.7 - Cenário 7.....	148
6.1.7.1 - Atendimento às demandas.....	148
6.1.7.2 - Agricultura irrigada.....	150
6.1.7.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	152
6.1.7.4 - Desempenho geral do sistema.....	153
6.1.8 - Cenário 8	154
6.1.8.1 - Atendimento às demandas.....	154
6.1.8.2 - Agricultura irrigada.....	156
6.1.8.3 - Comportamento dos reservatórios e das adutoras.....	158

6.1.8.4 - Desempenho geral do sistema.....	160
6.2 – Cenário 9 (incremento de 2,17 % nas demandas hídricas.....	161
6.3 - Resultados da aplicação do método multicriterial PROMETHEE.....	162
6.3.1 - Critério ambiental versus critério social.....	166
6.3.2 - Critério social versus critério econômico.....	168
6.3.3 - Critério econômico versus critério ambiental.....	168
7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	170
7.1 - Conclusões gerais.....	170
7.2 - Recomendações.....	172
7.3 - Contribuição científica da pesquisa.....	172
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	174

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Etapas do processo decisório.....	20
Figura 3.1 –	Localização das Bacias Hidrográficas do Rio Gramame e dos Rios Abiaí-Papocas.....	28
Figura 3.2 –	Vista parcial do sistema Gramame-Mamuaba.....	29
Figura 3.3 –	Perfil longitudinal do rio Gramame.....	31
Figura 3.4 –	Mapa Geológico.....	33
Figura 3.5 –	Classificação dos solos.....	35
Figura 3.6 –	Esquema do sistema de abastecimento d’água de João Pessoa.....	38
Figura 3.7 –	Vista parcial do sistema Marés	39
Figura 3.8 –	Barragem de elevação de nível, no rio Gramame, a 6 km abaixo do reservatório Gramame-Mamuaba.....	39
Figura 3.9 –	Estação elevatória de água bruta para a ETA Gramame.....	40
Figura 3.10 –	ETA Gramame.....	40
Figura 3.11 –	Esquema do sistema de abastecimento d’água de Pedras de Fogo.....	41
Figura 3.12 –	Localização dos irrigantes	43
Figura 4.1 –	Etapas metodológicas.....	45
Figura 4.2 –	Layout do sistema estudado com as intervenções hidráulicas	47
Figura 4.3 –	Esquema do Sistema Adutor Abiaí-Papocas.....	49
Figura 4.4 –	CENÁRIO 1: Infra-estrutura hídrica atual	50
Figura 4.5 –	CENÁRIO 2: Construção do reservatório no rio Mumbaba.....	50
Figura 4.6 –	CENÁRIO 3: Adutora Abiaí-Papocas.....	51
Figura 4.7 –	CENÁRIO 4: Reservatório no Alto Gramame.....	51
Figura 4.8 –	CENÁRIO 5: Reservatório no rio Mumbaba e no Alto Gramame.....	52
Figura 4.9 –	CENÁRIO 6: Reservatório no rio Mumbaba e Adutora Abiaí-Papocas.....	52
Figura 4.10 –	CENÁRIO 7: Reservatório no Alto Gramame e Adutora Abiaí-Papocas.....	53
Figura 4.11 –	Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.....	62
Figura 4.12 –	Fluxograma do modelo de otimização.....	70

Figura 4.13 – Funções de preferência.....	76
Figura 4.14 – Fluxograma do funcionamento do método PROMETHEE.....	81
Figura 4.15 – Critérios e subcritérios considerados na análise multicriterial.....	83
Figura 5.1 – Vazões observadas e simuladas pelo SMAP na calibração.....	102
Figura 5.2 – Vazões observadas e simuladas pelo SMAP na validação.....	102
Figura 5.3 – Localização dos postos pluviométricos e dos pontos de cálculo.....	103
Figura 6.1 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés (Cenário 1).....	114
Figura 6.2 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa (Cenário 1).....	115
Figura 6.3 – Comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 1).....	116
Figura 6.4 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 1).....	118
Figura 6.5 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 2.....	120
Figura 6.6 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 2.....	120
Figura 6.7 – Comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba, Marés e Mumbaba (Cenário 2).....	122
Figura 6.8 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 2).....	123
Figura 6.9 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 3.....	125
Figura 6.10 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa-Cenário 3.....	125
Figura 6.11 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 3).....	128
Figura 6.12 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame, Mumbaba para o reservatório de Marés e do rio Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame (Cenário 3).....	129
Figura 6.13 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 4.....	131
Figura 6.14 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 4.....	132
Figura 6.15 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba,	

	Marés e no alto Gramame (Cenário 4).....	133
Figura 6.16	– Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 4).....	134
Figura 6.17	– Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 5.....	136
Figura 6.18	– Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa-Cenário 5.....	136
Figura 6.19	– Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 5).....	140
Figura 6.20	– Comportamento hídrico dos reservatórios: Mumbaba e Alto Gramame (Cenário 5).....	140
Figura 6.21	– Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 5).....	141
Figura 6.22	– Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 6.....	143
Figura 6.23	– Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 6.....	143
Figura 6.24	– Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba, Marés e no rio Mumbaba (Cenário 6).....	146
Figura 6.25	– Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame, Mumbaba para o reservatório de Marés e do rio Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame (Cenário 6).....	147
Figura 6.26	– Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 7.....	149
Figura 6.27	– Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa – Cenário 7.....	150
Figura 6.28	– Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba, Marés e no Alto Gramame (Cenário 7).....	152
Figura 6.29	– Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame, Mumbaba e Abiaí-Papocas (Cenário 7).....	153
Figura 6.30	– Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 8.....	155
Figura 6.31	– Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 8.....	155
Figura 6.32	– Comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 8).....	158
Figura 6.33	– Comportamento hídrico dos reservatórios: Mumbaba e alto	

Gramame (Cenário 8).....	159
Figura 6.34 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame e Mumbaba para o sistema de Marés e Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame (Cenário 8).....	160
Figura 6.35 – Percentual de vezes em que as alternativas ocuparam a primeira posição.....	166
Figura 6.36 – Preferência no ranking de acordo com os critérios ambiental e social.....	167
Figura 6.37 – Preferência no ranking de acordo com os critérios social e econômico	168
Figura 6.38 – Preferência no ranking de acordo com os critérios econômico e ambiental.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Fundamentos básicos das Metodologias MCDM e MCDA no processo decisório.....	17
Tabela 3.1 –	Área das sub-bacias do rio Gramame.....	29
Tabela 3.2 –	Participação em área dos municípios na bacia hidrográfica.....	30
Tabela 3.3 –	Evapotranspiração potencial média diária segundo G.H. Hargreaves....	32
Tabela 3.4 –	Ocupação e uso do solo em 1998.....	36
Tabela 3.5 –	Parâmetros fluvio – morfológicos da Bacia do Rio Gramame e suas principais bacias constituintes.....	37
Tabela 4.1 –	Matriz de avaliação.....	74
Tabela 4.2 –	Funções de preferência e pesos para os atributos do critério econômico.....	96
Tabela 4.3 –	Funções de preferência e pesos para os atributos do critério social.....	97
Tabela 4.4 –	Funções de preferência e pesos para os atributos do critério ambiental.	98
Tabela 5.1 –	Postos Pluviométricos Utilizados.....	100
Tabela 5.2 –	Precipitação média mensal nas áreas de drenagem dos reservatórios e nos perímetros irrigados.....	100
Tabela 5.3 –	Dados de Evaporação Média Mensal (mm) do Tanque Classe A do Posto de Marés e do Coeficiente <i>kt</i>	101
Tabela 5.4 –	Descrição dos pontos de cálculo.....	103
Tabela 5.5 –	Vazões Médias Mensais, em m ³ /s, Geradas no SMAP entre 1996 e 2007.....	104
Tabela 5.6 –	Dados dos reservatórios estudados.....	105
Tabela 5.7 –	Dados dos vertedouros dos reservatórios estudados.....	106
Tabela 5.8 –	Dados do tubo da descarga de fundo dos reservatórios estudados.....	106
Tabela 5.9 –	Demandas hídricas para abastecimento urbano.....	107
Tabela 5.10 –	Dados das características das culturas agrícolas.....	108
Tabela 5.11 –	Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (<i>kc</i>).....	109
Tabela 5.12 –	Áreas máximas de cada cultura agrícola por área irrigada.....	110
Tabela 5.13 –	Sistema de irrigação de cada cultura agrícola por área irrigada.....	110
Tabela 5.14 –	Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas.....	110
Tabela 6.1 –	Índices de desempenho das demandas para o período de 12 anos –	

	Cenário 1.....	114
Tabela 6.2 –	Índices de eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 1.....	117
Tabela 6.3 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 1.....	119
Tabela 6.4 –	Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 2.....	119
Tabela 6.5 –	Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 2.....	121
Tabela 6.6 –	Índices de eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 2.....	122
Tabela 6.7 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 2.....	124
Tabela 6.8 –	Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 3.....	124
Tabela 6.9 –	Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 3.....	127
Tabela 6.10 –	Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 3.....	128
Tabela 6.11 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 3.....	130
Tabela 6.12 –	Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 4.....	131
Tabela 6.13 –	Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 4.....	133
Tabela 6.14 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário.....	135
Tabela 6.15 –	Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 5.....	137
Tabela 6.16 –	Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 5.....	138
Tabela 6.17 –	Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 5.....	139
Tabela 6.18 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 5.....	142
Tabela 6.19 –	Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 6.....	142
Tabela 6.20 –	Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 6.....	145

Tabela 6.21 –	Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 6.....	147
Tabela 6.22 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 6.....	148
Tabela 6.23 –	Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 7.....	149
Tabela 6.24 –	Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 7.....	151
Tabela 6.25 –	Índices de eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 7.....	152
Tabela 6.26 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 7.....	154
Tabela 6.27 –	Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 8.....	154
Tabela 6.28 –	Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 8.....	157
Tabela 6.29 –	Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 8.....	159
Tabela 6.30 –	Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 8.....	161
Tabela 6.31 –	Índices de Hashimoto para o período de 1 ano – demanda fixa e demanda variável.....	162
Tabela 6.32 –	Síntese dos elementos aplicados para a avaliação multicriterial do problema, via método PROMETHEE.....	164
Tabela 6.33 –	Ordenação das Alternativas na Análise Multicriterial.....	165

1 – INTRODUÇÃO

As crescentes mudanças ambientais impostas pelo homem e a necessidade em reverter o atual estado de degradação ambiental tem resultado nos últimos anos na reformulação do planejamento e do gerenciamento de recursos hídricos. Atualmente buscam incluir, nos processos de avaliação de obras hidráulicas, aspectos que vão além da análise econômica que objetiva a maximização dos benefícios econômicos. Isto é, tem-se buscado uma análise mais realista representada através de diversos aspectos, tais como: social, ambiental, político, dentre outros.

O crescente uso dos recursos hídricos e da sua escassez resultam muitas vezes em conflitos, cuja solução depende de um adequado planejamento e gerenciamento para que se promova uma melhor distribuição da água entre os diversos usos e usuários através de um melhor aproveitamento, controle e conservação desses recursos. A região da Grande João Pessoa vivenciou problemas relacionados com conflitos de usos da água durante o biênio 1998/1999 devido a problemas operacionais no reservatório Gramame-Mamuaba, principal reservatório da região. Estes conflitos foram caracterizados entre a demanda requisitada para irrigação e a exportação de água para cidades localizadas além dos limites geográficos da bacia (Bayeux, Cabedelo e a maior parte de João Pessoa). Segundo estudos que versam sobre esta região os conflitos ocorreram tanto à montante quanto à jusante do sistema Gramame/Mamuaba. A montante, os usuários queriam maiores quantidades de água para viabilizar projetos de irrigação e a jusante era necessário compatibilizar a preservação dos ecossistemas com as descargas dos efluentes industriais.

No entanto, alguns estudos vêm sendo realizados, para reduzir os problemas de conflitos entre os usuários da água, existentes durante períodos de estresse hídrico, como a construção de um reservatório de 41 hm³ no rio Mumbaba, outro de 8 hm³ no alto Gramame, próximo a cidade de Pedras de Fogo, e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a bacia do rio Gramame, cujo projeto técnico encontra-se em execução.

A construção e gerenciamento desses sistemas estão associados, geralmente,

- a investimentos de grande porte;
- muitos tipos de decisores com diferentes pontos de vista (autoridades federais, estaduais e municipais, empresas - indústrias, comércios, companhias de eletricidade e saneamento, etc.-, e as populações urbana e rural);

- diferentes usos consuntivos (abastecimento urbano e rural, agricultura irrigada, pecuária, indústrias, etc.) e não consuntivos (geração de energia, piscicultura, etc.);
- dinamismo ao longo da vida útil;
- diferentes características técnicas (implantação, operação e manutenção);
- necessidade de planejamento e políticas de implantação, operação e manutenção de longo prazo;
- diferentes formas de julgamentos (econômicos, sociais, ambientais, técnicos, políticos, legais, institucionais, etc.), métricas de julgamento (quantitativa ou qualitativa) e ordem de grandeza (valores pequenos e grandes);
- existência de conflitos e
- incertezas de diversas naturezas.

Portanto, a adequação de cada uma das intervenções ou de uma combinação delas deve ser feita levando-se em conta seus aspectos dinâmicos, qualitativos e quantitativos. Para atingir esta meta é necessário que se leve em consideração, além dos aspectos físicos, uma quantificação dos aspectos sócio-econômicos e ambientais, na forma de um planejamento integrado de todas as disponibilidades e usos, que cada ação venha a acarretar. Com isso, poder-se-á avaliar os impactos de cada intervenção sob a ótica multicritério (aplicados nos processos de escolha de alternativas), além de possibilitar a escolha da (s) melhor (es) alternativa (s), de acordo com os graus de preferências de decisores e auxiliar no processo de tomada de decisão sobre a implantação de nenhuma ou algumas intervenções. Desta forma, poder-se-á servir como um instrumento de suporte à decisão aos órgãos gestores.

O diferencial desta pesquisa está no uso integrado das metodologias multicritério e multiobjetivo. Inicialmente, será adotada a técnica de otimização multiobjetivo, para analisar o comportamento do sistema quando atendendo as preferências dos decisores, e multicritério, para determinar que alternativas distintas são escolhidas segundo uma ordem de prioridades atribuídas aos critérios.

Diante do exposto, será feito nesta pesquisa, um estudo de planejamento e gestão dos recursos hídricos, através da inclusão dos critérios econômicos, sociais e ambientais, para auxiliar a tomada de decisão para escolha de alternativas de infra-estrutura hídrica a serem implantadas na bacia do rio Gramame-PB, via método Promethee.

1.1 – Objetivos

1.1.1 – Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é aplicar uma metodologia, para auxiliar à tomada de decisão quanto as melhores escolhas entre possíveis ações propostas, sob a ótica multiobjetivo (aplicado nos processos de simulação e otimização) e multicriterial (aplicada nos processos de escolha de alternativas), para a ampliação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Gramame, situada no litoral Sul do estado da Paraíba, a fim de minimizar futuros conflitos de uso da água.

1.1.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo referem-se a:

- caracterizar os conflitos existentes em períodos de baixa disponibilidade hídrica;
- propor alternativas de solução do problema;
- estabelecer regras operacionais ótimas e quantificar os impactos decorrentes destas regras;
- selecionar e analisar indicadores de sustentabilidade;
- apresentar, de forma sintética, uma visão global dos principais aspectos decisórios do empreendimento sob o ponto de vista econômico, social e ambiental;
- caracterizar os pesos de critérios/atributos a serem levados em consideração em uma análise multicriterial para as alternativas de intervenções ou suas possíveis associações visando aspectos econômicos, sociais e ambientais;

1.2 – Estrutura do trabalho

Além deste capítulo, o presente trabalho é constituído de seis capítulos, dispostos da seguinte maneira:

Neste primeiro capítulo (*Introdução*) relata-se uma contextualização abrangendo o tema em estudo. E ainda, são estabelecidos os objetivos que se pretende alcançar bem como, apresenta-se a justificativa e relevância do trabalho.

No segundo capítulo (*Revisão Bibliográfica*) faz-se uma abordagem sobre a utilização de métodos e ferramentas de auxílio à tomada de decisão baseados na técnica de análise multicriterial e são apresentados alguns estudos de caso.

Já no terceiro capítulo (*Descrição do Sistema*) apresenta-se um breve histórico do sistema (a bacia hidrográfica do rio Gramame), enfocando características gerais de localização, usos e ocupação de solos, e ainda, ações de intervenção a serem implantadas.

No quarto capítulo (*Metodologia*) estão descritas as etapas metodológicas a serem desenvolvidas no decorrer da pesquisa tais como: coleta de dados, método multicriterial e a definição dos prováveis atributos de cada critério a ser considerado.

Enquanto que no quinto capítulo (*Dados de Entrada do Modelo*) são apresentados os dados necessários para o modelo de otimização multiobjetivo.

No sexto capítulo (*Resultados e Discussões*) é feita a apresentação dos resultados obtidos na pesquisa e as discussões acerca dos mesmos.

O último capítulo (*Conclusões e Recomendações*) contém a conclusão do estudo realizado e recomendações para trabalhos futuros.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas informações obtidas a partir da revisão de literatura. Inicialmente, será feita uma explanação sobre o uso de indicadores como medidas do grau de eficiência e sustentabilidade. Em seguida, é feita uma abordagem sobre otimização multiobjetivo. Finalmente, tem-se um dos enfoques do tema central desta pesquisa que é a utilização de métodos e ferramentas de auxílio à tomada de decisão baseados na técnica de análise multicriterial.

2.1 – Indicadores de Sustentabilidade dos Recursos Hídricos

Neste estudo far-se-á uso de indicadores de eficiência e de sustentabilidade do sistema hídrico que serão obtidos a partir do modelo de otimização multiobjetivo. Estes indicadores serão utilizados para auxiliar na análise do desempenho do sistema hídrico, além de servirem como dados de entrada (subcritérios) do método multicriterial para auxiliar no processo de tomada de decisão.

A década de 1980 viu surgir a primeira geração de indicadores - os indicadores ambientais - que continuam sendo usados como ferramentas de apoio à decisão em planejamento de recursos hídricos. Este grupo de indicadores impulsionou a criação dos indicadores de segunda geração, isto é, os indicadores de desenvolvimento sustentável que incluem indicadores ambientais, econômicos, sociais e institucionais. Os dois grupos de indicadores originaram-se no Canadá e em alguns países da Europa, sendo consagrado na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no ano de 1992 no Rio de Janeiro (CEPAL, 2001 apud Ribeiro e Heller, 2007). Contudo, os indicadores de desenvolvimento sustentável têm como objetivo principal medir a evolução em direção ao desenvolvimento sustentável, monitorando, assim, os impactos da política pública no meio ambiente e fortalecendo a participação das comunidades pela promoção do conhecimento e da consciência dos parâmetros considerados (Ribeiro e Heller, 2007).

Os indicadores apresentam vasta aplicação em diversas áreas, conduzindo a uma gama de estudos acerca deste tema. A crescente preocupação com a qualidade ambiental tem levado vários autores e organizações internacionais a desenvolverem sistemas de indicadores que caracterizem a qualidade do meio ambiente, a exemplo do modelo

Pressão-Estado-Resposta da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômicos (OECD, 1993), que busca demonstrar as relações causa-efeito, e auxiliar os decisores e público em geral, a reconhecer os fatores ambientais, econômicos e outros como interligados. Ele é considerado como sendo um modelo neutro, pelo fato de apenas considerar e tentar perceber as inter-relações existentes, tendo a vantagem de ser facilmente compreendido e usado, e não apontar impacto positivo ou negativo, que estas exercem sobre o ambiente. Não se pode esquecer a complexidade das relações existentes nos ecossistemas, nas relações ambiente-economia e ambiente-sociedade (Oliveira *et al.*, 2007).

Tomasoni (2006) considera um indicador como sendo um delineamento da realidade, uma tentativa de medir fenômenos de natureza diversa e contribuir no acompanhamento de realidades mais complexas, podendo ser de natureza quantitativa ou qualitativa e tem como meta representar as transformações sofridas em um dado sistema. Para o referido autor, o uso destes é dificultado devido ao seu grau de generalização, dado que ele qualifica e quantifica pontualmente um elemento, fator ou sistema a ser analisado. Contudo, ele os considera como uma importante ferramenta de análise espacial e afirma que, na sua definição, devem ser considerados os aspectos que afetam a sua operacionalidade, nas dimensões político, econômico, social e ambiental ao invés da abordagem meramente técnico-formal.

Para Ribeiro e Heller (2007) a construção de indicadores deve ser iniciada pela identificação dos impactos ambientais significativos e estes impactos tornam-se a base para a sua definição. E ainda, o processo de seleção de indicadores pode incluir tanto indicadores já existentes, como criar novos indicadores e conter agregações e ponderações capazes de refletir características estratégicas da política ambiental.

Os indicadores devem ser capazes de (Ribeiro e Heller, 2007):

- identificar as pressões sobre o meio ambiente, o estado do meio ambiente devido a estas pressões e as respostas sociais a tais pressões, porém além de informar a situação atual deve prever as tendências de qualidade do meio ambiente e dos estoques de recursos naturais;
- subsidiar o processo de tomada de decisões, bem como a análise daquelas já implementadas;
- interagir de forma sistêmica;
- associar os aspectos ambientais aos processos econômicos e sociais.

A OCDE define a aplicação dos indicadores em quatro categorias (Tomasoni, 2006):

- avaliação do funcionamento dos sistemas ambientais;
- integração das preocupações ambientais nas políticas setoriais;
- contabilidade ambiental;
- avaliação do estado do ambiente.

Diante do exposto constata-se a valiosa contribuição que o uso dos indicadores promove ao estudo da análise de sistemas, em especial de sistemas hídricos, assim sendo, com o objetivo de avaliar o comportamento hídrico dos reservatórios serão utilizados indicadores de desempenho capazes de representar as características relativas: a variabilidade volumétrica, a evaporação, a precipitação, a utilização da água, e outras. Também serão utilizados indicadores que expressem características inerentes a potencialidade e a disponibilidade hídrica do sistema.

Outro grupo de indicadores incluídos neste estudo são os de desempenho das demandas propostos por Hashimoto e que são denominados de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

Os indicadores utilizados neste estudo serão obtidos a partir do modelo de otimização multiobjetivo e serão usados como ferramenta para o estudo da análise de sistemas e, também, como subsídios no processo de tomada de decisão através de dados de entrada para o método multicriterial.

2.2 – Otimização Multiobjetivo

Labadie (1987) apud Lima e Lanna (2005) considera os avanços da tecnologia dos computadores digitais como os principais responsáveis pelo acentuado desenvolvimento dos modelos matemáticos na análise de sistemas de recursos hídricos e que estes avanços permitiram reduzir custos operacionais, aumentar a eficiência e a produtividade dos sistemas, e aumentar a confiabilidade dos resultados.

De acordo com Andrade (2006), a análise de sistemas de recursos hídricos deve ser realizada segundo cinco etapas:

- definição dos objetivos;
- formulação de medidas quantitativas dos objetivos;
- geração de alternativas de solução;
- quantificação das alternativas;
- seleção da alternativa ótima.

Para Lanna (1997) apud Andrade (2006), a análise de sistemas de recursos hídricos busca dois propósitos, quais sejam: simular o comportamento da realidade e otimizar os processos decisórios que atuam sobre esta. Os modelos de otimização utilizados em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos são ferramentas que permitem a escolha da alternativa ótima que maximize um índice de eficiência.

Os modelos de otimização buscam encontrar os valores de um conjunto de variáveis de decisão que otimizem (maximizem ou minimizem) uma função objetivo sujeita a restrições. A função objetivo e as restrições são representadas por expressões matemáticas em função das variáveis de decisão.

Dentro das técnicas de otimização mais utilizadas podem ser citadas: a programação linear, a programação não-linear e a programação dinâmica. Contudo, neste estudo será utilizado um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em programação linear.

2.2.1 – Programação Linear

A técnica de programação linear (PL) tem sido bastante aplicada para gerenciamento de sistemas de recursos hídricos e segundo Lima e Lanna (2005) o modelo geral de programação linear pode ser representado por:

$$\max (\text{ou min}) Z = C^T X$$

submetido a:

$$AX \geq b, X \geq 0$$

Onde: C – é vetor n-dimensional dos coeficientes da função-objetivo;

T – indica a operação matricial de transposição;

X – é vetor n-dimensional das variáveis de decisão;

b – é vetor m-dimensional de parâmetros do modelo;

A – é a matriz m x n dos coeficientes das restrições;

n – é o número de variáveis de decisão;

m – é o número de restrições.

Yeh (1985), apud Lima e Lanna (2005), considera a PL como uma preciosa ferramenta para otimização da operação de reservatórios e descreve as principais vantagens desta técnica como sendo:

- a habilidade para se ajustar facilmente a problemas multidimensionais;
- a garantia de obtenção de valores ótimos globais;
- a não necessidade de uma política inicial de operação dos reservatórios; e
- a existência de pacotes computacionais prontos para a resolução de problemas de programação linear.

Para Lima e Lanna (2005) a principal desvantagem dos métodos de PL é a hipótese de linearidade nas relações, principalmente na função-objetivo.

2.2.2 – Programação não-linear

A programação não linear caracteriza-se por não possuir um método geral de resolução dos seus problemas. Ela utiliza métodos numéricos iterativos, gerando soluções a cada passo (são muitos algoritmos e quase sempre voltados para problemas específicos, se prendendo a características diversas tais como continuidade, unimodalidade, diferenciabilidade de primeira ordem e/ou de segunda ordem, etc.) (Barbosa, 2008).

Um problema de programação não-linear (PNL) pode ser descrito de forma geral como (Cirilo, 1997):

Minimizar $f(X)$

sujeito a:

$$g_j(X) < 0; \quad j = 1, 2, \dots, m_1$$

$$h_k(X) = 0; \quad k = 1, 2, \dots, m_2$$

$$X^L \leq X \leq X^U$$

Onde:

$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ é um vetor formado por n variáveis de decisão;

$f(X)$ é a função-objetivo;

X^L, X^U representam fronteiras do domínio para o problema.

A região do espaço limitada pelas restrições é denominada região viável ou factível.

Cirilo (1997) considera a abrangência da programação não-linear como sendo a sua grande vantagem.

2.2.3 – Programação dinâmica

Para Barros (1997), a solução de problemas de decisão sequencial através da programação dinâmica deve ser efetivada segundo a linha de raciocínio apresentada a seguir:

- divide o problema geral em estágios;
- determina-se o ótimo em cada estágio;
- relaciona-se o ótimo de um estágio a outro através de uma função recursiva;
- percorre-se todos os estágios para determinar o ótimo global.

A desvantagem da programação dinâmica é a “praga da dimensionalidade”, que ocorre quando a discretização das variáveis de estado é muito elevada, dificultando a busca do ótimo.

2.3 – Métodos de otimização multiobjetivo

Os métodos para análise multiobjetivo podem ser classificados em [Cohon (1978) apud Bravo *et al* (2005)]:

- técnicas para a geração de soluções não dominadas;
- métodos contínuos com articulação antecedente das preferências;
- métodos discretos com articulação antecedente das preferências;
- técnicas com articulação progressiva das preferências.

Uma solução não dominada ou não inferior é definida como uma solução multiobjetiva que não pode ser melhorada em um objetivo sem piorar outro. Dentre as técnicas que geram o conjunto de soluções não dominadas as mais utilizadas são:

- o método das ponderações;

- o método das restrições;
- os algoritmos genéticos multiobjetivo.

O método das ponderações produz o conjunto de soluções não dominadas tanto no espaço das decisões como no espaço dos objetivos. Os objetivos dados por $f_1(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_n(x)$ são ponderados através de pesos w_i para fornecer um novo problema dado por:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n w_i \times f_i(x)$$

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 indicará a importância relativa de cada objetivo.

O método das restrições também gera o conjunto de soluções não dominadas. Deve-se escolher um objetivo j para ser otimizado deixando-se os demais ($n-j$) como restrições através de:

$$\text{Max} \rightarrow f_j(x)$$

$$\text{sujeito a: } f_i(x) \geq I_i, \text{ para todo } i \neq j.$$

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 superior a três (Bravo *et al.*, 2005).

De acordo com Bravo *et al.* (2005), o método das ponderações é o mais utilizado na otimização de operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos e apresenta maior simplicidade na sua formulação, porém se faz necessário que os diferentes objetivos

tenham a mesma unidade. Enquanto, para Cohon (1978), *apud* Bravo *et al.* (2005), o método das restrições apresenta bons resultados e não precisa de uma unidade comum aos diferentes objetivos, mas só podem ser considerados três objetivos.

Os algoritmos genéticos, introduzidos por John Holland em 1975, são métodos de otimização e busca inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. Apresentam várias vantagens, tais como: o funcionamento com parâmetros contínuos e discretos, a otimização de um grande número de variáveis, não necessitam de profundos conhecimentos matemáticos, apresentam facilidade de implementação, dentre outros. Contudo, não são eficientes para muitos problemas (Lacerda e Carvalho, 1999).

Bravo *et al.* (2005) consideram a habilidade na resolução de problemas não lineares e não convexos e a possibilidade de ser diretamente conectados com módulos de simulação hidrológica, como sendo as grandes vantagens dos algoritmos genéticos.

Apesar da generalidade de aplicações, uma vez que estes métodos não exigem continuidade e diferenciabilidade, eles são considerados de alto custo computacional, em termos de tempo requerido para se achar uma solução ótima.

2.4 – Alguns estudos de caso envolvendo otimização multiobjetivo

Braga (1987) utilizou a análise multiobjetivo, para avaliar a alteração da política operacional do sistema de reservatórios da CESP (Companhia Energética de São Paulo), objetivando incorporar à geração de energia hidroelétrica, outros objetivos como o controle de cheias e risco de déficit energético. A operação do Sistema de Reservatórios do Baixo Tietê com objetivos múltiplos foi analisada através da: i) maximização da geração de energia, ii) minimização do risco de falha no atendimento à demanda de energia e iii) maximização do grau de controle de cheias. Estes objetivos foram subdivididos em 3 atributos: i) retorno econômico (MWh), ii) probabilidade de não atingir o estado cheio ao final do período de operação (%) e iii) período de retorno da cheia evitada (anos). Tendo como conclusão que à medida que se aumenta o tempo de retorno da cheia, a ser controlada a jusante do reservatório, o benefício energético esperado do sistema é reduzido.

Teixeira e Barbosa (1993) estudaram a viabilidade de se adotar as técnicas de análise multiobjetivo de projetos de recursos hídricos na esfera brasileira. Neste estudo os autores

investigaram a origem, evolução e tendência dos procedimentos de planejamento e avaliação de decisões de projetos e, fizeram uma revisão histórica dos recursos hídricos no Brasil. Obtiveram como resposta do estudo que o enfoque multiobjetivo só será factível no Brasil se os pré-requisitos políticos e institucionais forem estabelecidos e que, ainda, não se pode prescindir da definição institucionalizada dos denominados procedimentos de planejamento e avaliação de planos e projetos dos sistemas hídricos.

Teixeira e Barbosa (1995) aplicaram a análise multiobjetivo para avaliar alternativas de projeto da barragem do Castanhão, no Rio Jaguaribe, Região Nordeste brasileira. Dentre os múltiplos usos a que se destina o reservatório destacam-se: o abastecimento de água da região metropolitana de Fortaleza, o controle de enchentes do baixo Jaguaribe, a irrigação de cerca de 43.000 ha, a geração de energia elétrica e o desenvolvimento da pesca e do turismo. A partir da análise dos relatórios oficiais e da polêmica gerada sobre o empreendimento, foram adotados dois objetivos fundamentais: i) eficiência econômica ou aumento da reserva nacional líquida e ii) qualidade ambiental. Associados a estes objetivos, foram adotados como funções objetivo: maximização dos benefícios líquidos e minimização da capacidade da barragem. Observaram uma adequação da metodologia, na qual as técnicas de modelagem distintas foram usadas de maneira integrada em diferentes etapas do processo decisório.

Plá (2004) desenvolveu um modelo matemático multiobjetivo para elaborar a proposta de ponderação entre os custos de recuperação e os níveis de alguns indicadores ambientais relacionados com os impactos da mineração e do esgoto sanitário sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Tubarão, Santa Catarina. Concluiu que é possível obter soluções que permitam a avaliação financeira no custeio da recuperação ambiental, bem como uma previsão desta recuperação em termos de poluição e o impacto produzido no manejo dos índices de poluição na calha do rio Tubarão.

Santos *et al.* (2006) fizeram um estudo da operação ótima multiobjetivo e plurianual dos recursos hídricos dos reservatórios, em série, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, situados no alto curso do rio Piranhas no semi-árido paraibano e concluíram que é importante a operação conjunta dos reservatórios permitindo a transferência de águas entre os mesmos para a plena utilização do perímetro irrigado e, ainda, que a vazão transposta do rio São Francisco não interfere no atendimento das demandas estabelecidas.

No estudo realizado por Santos (2007), foi desenvolvido um modelo de otimização multiobjetivo, visando otimizar os múltiplos usos de um sistema de reservatórios com a implantação ou melhoramento da operação de um ou mais perímetros irrigados. Utilizou-se

o Método das Ponderações, cujas funções objetivo são normalizadas. O referido autor atribuiu pesos para definir as prioridades no atendimento às demandas e combinou o Artifício de Linearização por segmentos com a Programação Linear Seqüencial, para obter linearizações apropriadas das não-linearidades relativas aos processos de cada um dos componentes. Para avaliar o desempenho operacional dos reservatórios, foram utilizados dois tipos de funções objetivos: *linear* e *quadrática*. A função linear apresentou melhores valores de confiabilidade e resiliência, enquanto que, a função quadrática apresentou valores favoráveis de vulnerabilidade. O autor argumenta que a função quadrática apresenta melhor desempenho operacional, uma vez que, os impactos terão menor representatividade quando a confiabilidade e a vulnerabilidade apresentarem baixos valores, o que resulta numa melhor distribuição das falhas, isto é, o sistema sofrerá mais falhas, porém de menor magnitude.

Barbosa (2008) aplicou as técnicas de otimização e simulação no planejamento e operação do uso da água para um sistema integrado de recursos hídricos formado por 5 reservatórios – Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, localizados na bacia do rio Capibaribe-PE, para atendimento das demandas de abastecimento humano, vazão ecológica, irrigação, piscicultura e controle de cheias, alguns destes usos conflitantes. Observou que os resultados obtidos a partir dos vários cenários permitem verificar a adequação e aplicabilidade dos modelos ao sistema de multi-reservatórios com usos e objetivos múltiplos. E concluiu que, o uso dos modelos e a análise do conjunto dos indicadores possibilitam a adoção de políticas com maior segurança para o gerenciamento da operação dos reservatórios com problemas de déficit hídrico e conflitos de uso da água.

2.5 – Processo de Tomada de Decisão

Schmidt (1995) define a tomada de decisão como sendo um esforço para resolver o dilema dos objetivos conflitantes, cuja presença não permite a existência da “solução ótima” e conduz para a busca da “solução de melhor acordo”, enquanto Soares (2003) diz que o processo de tomada de decisão visa obter o melhor acordo entre as expectativas do “decisor” e as suas disponibilidades em adotá-la, considerando a relação entre elementos objetivos e subjetivos (Boas, 2005).

Os atores do processo de decisão, segundo Boas (2005), são identificados como facilitadores e decisores, o primeiro tem a função de dar suporte à tomada de decisão, isto

é, esclarecer o processo de avaliação e/ou negociação e construir um modelo que inclua os pontos de vistas dos atores e seus juízos de valores; enquanto os decisores têm a função de decidir e de intervir na construção e na utilização do modelo como ferramenta de avaliação.

Uma ferramenta bastante útil no processo de tomada de decisão refere-se aos sistemas de suporte à decisão. De acordo com Roy (1985), *apud* Santos (2006), estas ferramentas apresentam como característica auxiliar, através de modelos, a obtenção de respostas relativas às indagações que são apresentadas a um inventor no processo de decisão. Para Johnson (1986), *apud* Ramos (2005), estes sistemas devem ser interativos e proporcionar fácil acesso aos usuários, objetivando apoiar atividades semi estruturadas ou não-estruturadas.

Ramos (2005) considera que a eficácia dos sistemas de apoio à decisão depende de informações confiáveis, robustas e relevantes sobre a situação analisada e que a qualidade das informações incorporadas nesse tipo de sistema influencia sobremaneira a sua utilidade e os seus resultados.

De acordo com Schmidt (1995), *apud* Boas (2005), estas abordagens são baseadas no princípio de que a experiência e o conhecimento das pessoas é pelo menos tão valioso quanto os dados utilizados para a tomada de decisão.

A tomada de decisão envolvendo problemas de recursos hídricos é bastante complexa, devido a qualidade das informações disponíveis, aos vários decisores envolvidos no processo, a inclusão de vários critérios e outros. Bana (1988) considera que para ser capaz de tomar decisões em problemas complexos é importante envolver, manter, rever e atualizar, continuamente, todos os pontos de vista, valores, opiniões e convicções sobre a realidade.

2.6 – Abordagem Multicriterial

A complexidade dos problemas reais próprios da sociedade moderna é caracterizada, principalmente, pela divergência de opiniões dos participantes envolvidos, refletindo aspectos econômicos, sociais, políticos, administrativos, psicológicos, e outros. Geralmente, não há uma solução capaz de satisfazer a todos os aspectos, então as metodologias multicriteriais se revelam adequadas para representar esta realidade, estas metodologias desenvolveram-se, basicamente, segundo duas escolas (Ensslin, 2002):

- a *Escola Americana* – responsável pelas Metodologias Multicritério de Tomada de Decisão (MCDM), cuja corrente de pensamento é o racionalismo; e,
- a *Escola Européia* – que desenvolveu as Metodologias Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA), baseada no construtivismo.

Para Ensslin (2002) a diferença entre estas duas linhas de pensamento é caracterizada segundo três aspectos:

- 1 – a postura quanto ao *reconhecimento*, ou não dos limites da objetividade nos processos decisórios;
- 2 – a *atitude* do facilitador ao conduzir o processo; e,
- 3 – o *enfoque* para o qual o processo é encaminhado.

As duas correntes científicas concordam que para uma adequada decisão é mister que sejam considerados outros aspectos além dos relacionados ao econômico.

Para Matzenauer e Jardim (2001), as metodologias multicritério (MCDM e MCDA) são importantes ferramentas para aqueles que precisam lidar com incertezas para auxiliar no processo de estruturação de problemas e para identificar e construir alternativas a serem utilizadas; na primeira o decisor deve usar a solução fornecida pelo método, enquanto que na MCDA é possível optar pelo uso ou não da solução recomendada. Os referidos autores consideram ainda, que não importa a metodologia adotada e sim, entender e ter sempre presente os procedimentos científicos e metodológicos que por aceitação e consenso dos decisores devem ser aplicados em cada situação específica.

Na Tabela 2.1 são apresentados os fundamentos básicos das Metodologias MCDM e MCDA no processo decisório, segundo Matzenauer e Jardim (2001).

Tabela 2.1 – Fundamentos básicos das Metodologias MCDM e MCDA no processo decisório

Racionalismo	Construtivismo
Valorização da objetividade	Valorização da subjetividade
<ul style="list-style-type: none"> - Decisores admitidos como totalmente racionais, com mesmo nível e tipo de conhecimento e de raciocínio lógico, buscando os mesmos objetivos racionais (minimizar custos e maximizar benefícios). - Busca-se a qualificação dos decisores. Vale a experiência. - Admite-se que exista um conjunto bem definido de alternativas viáveis de solução, mutuamente exclusivas. - Admite-se que haja um modelo de preferências bem definido na mente dos decisores, racionalmente estruturado, através de um conjunto de critérios de avaliação. - Admite-se o problema como bem formulado matematicamente, sendo a finalidade encontrar uma solução ótima (no conceito de Pareto), a solução de melhor compromisso. - Os decisores precisam concordar com a solução ótima encontrada. - Os julgamentos são feitos com base nos critérios de avaliação, exclusivamente. - Na comparação das alternativas somente são admitidas a preferência estrita (P) e a indiferença (I). 	<ul style="list-style-type: none"> - O conjunto de ações potenciais não é necessariamente estável. - As ações potenciais não são mutuamente exclusivas, nem necessariamente factíveis (podem ser recomendações). - As preferências dos decisores não são bem definidas. Existem incertezas, crenças parciais, preconceitos, conflitos e contradições. - Os valores numéricos das avaliações e os pesos relativos dos critérios de avaliação são considerados imprecisos, incertos, mal definidos e arbitrários. - É impossível definir se uma decisão é boa ou ruim apenas com base em um modelo matemático. - No processo decisório há influência de fatores organizacionais, culturais e pedagógicos, que contribuem para a qualidade e o sucesso da decisão. - Há a convicção do permanente aprendizado. - O problema é mal-definido matematicamente. - O objetivo não é encontrar uma solução ótima, mas sim gerar conhecimento aos decisores. - O decisor único é um mito. Vários atores tomam parte do processo decisório direta ou indiretamente.

Fonte: Matzenauer e Jardim (2001)

Vincke (1992) define o auxílio à decisão multicritério como sendo um conjunto de ferramentas, que permite ao tomador de decisões um avanço na resolução de problemas de decisão que envolvem vários pontos de vista, os quais devem ser levados em conta na decisão. E aponta como características centrais e encorajadoras destas metodologias os seguintes aspectos:

1 – Independente da corrente de pensamento, os atores engajados nessa metodologia concordam que nos problemas decisórios, sejam eles teóricos ou reais (práticos), existem múltiplos critérios.

2 – A ênfase dada ao termo *melhor solução*. A pesquisa operacional tradicional tem como objetivo, a otimização de uma alternativa, enquanto que, nas metodologias multicritérios buscam uma solução que atenda melhor as necessidades do decisor.

As etapas relativas à análise multicriterial, segundo Soares (2003), são:

1. *Formulação do problema*: refere-se à definição do que se quer decidir;
2. *Determinação de um conjunto de ações potenciais*: nesta etapa os atores envolvidos na tomada de decisão devem constituir um conjunto de ações (alternativas) que atendam ao problema colocado;
3. *Definição dos critérios*: definem-se os critérios de avaliação dos efeitos causados ao meio ambiente;
4. *Avaliação dos critérios*: geralmente se dá através de uma matriz de avaliação ou tabela de performance;
5. *Determinação de pesos dos critérios*: os pesos representam a importância relativa de cada critério;
6. *Agregação dos critérios*: após o preenchimento da matriz de avaliação e a definição de um modelo matemático, é feita a associação das avaliações dos diferentes critérios para cada ação.

De acordo com Boas (2005), os critérios são estruturados em parâmetros e indicadores de forma hierárquica. Sendo a base da estrutura composta pelos parâmetros (geralmente dados cardinais), no nível intermediário encontram-se os indicadores (geralmente informações ordinais), e no nível superior estão os critérios.

Vale salientar que ao fazer uso da técnica multicriterial, não pretende-se selecionar uma única ação e daí considerá-la como uma solução do problema, esta metodologia busca apresentar várias alternativas de solução que sirvam de apoio ao processo decisório. Para Boas (2005) esta ferramenta fornece subsídios para se alcançar uma solução que melhor atenda os anseios do grupo participante no processo de tomada de decisão.

Para Soares (2003) os resultados obtidos através da análise multicriterial dependem:

- do conjunto de ações consideradas;
- da qualidade dos dados;
- da escolha e estruturação dos critérios;
- dos valores de ponderação atribuídos aos critérios;
- do método de agregação utilizado; e,
- da participação dos diferentes atores.

Os métodos de análise multicriterial têm como finalidade apresentar de forma ordenada as alternativas que servem de solução para um problema, de acordo com as preferências dos decisores. Rosakis *et al.* (2001) consideram estes métodos como sendo de bases sólidas, realísticas e transparentes no apoio à decisão (Boas, 2007).

A aplicação dos métodos multicritérios de apoio à decisão apresenta duas fases distintas conforme apresentado em Boas (2005), quais sejam:

- Estruturação: identificação, caracterização e hierarquização dos principais atores intervenientes e definição das alternativas de decisão que serão comparadas segundo alguns critérios;
- Avaliação: esclarece a escolha através de análise de sensibilidade.

Medeiros *et al.* (2006) consideram que a adequada estruturação do problema favorece para que a melhor solução seja alcançada e que nesta fase são estabelecidos os objetivos, os critérios, os processos de avaliação e as alternativas de solução do problema. Nesse sentido, os métodos multicriteriais destacam-se como ferramenta bastante útil para dar suporte ao processo de tomada de decisão, estas técnicas são função da modelagem matemática e da análise matricial.

Para Boas (2005) as abordagens multicritérios são formas de modelar os processos de decisão, que envolvem: uma decisão a ser tomada, os eventos desconhecidos que podem afetar os resultados, os possíveis cursos de ação e os próprios resultados. E ainda, que estas abordagens são adaptáveis aos contextos decisórios e permitem avaliação integrada de um grande número de dados, interações e objetivos. Contudo, aponta a inexistência de uma metodologia única que supra as deficiências inerentes a cada método, como desvantagem desta técnica.

Souza *et al.* (2006) apontam como vantagens dos métodos multicritérios: a capacidade de refletir melhor os objetivos, analisar as particularidades de cada alternativa, quantificar custos implícitos que não são traduzidos na análise custo-benefício e estabelecer uma lista de propriedades. E como desvantagens do uso desta ferramenta, eles apontam a necessidade de um grande número de informações para cada alternativa avaliada. Os autores ressaltam, ainda, o fato dos resultados dependerem dos critérios avaliados, da sua aplicabilidade e dos agentes decisores, que torna a análise mais subjetiva.

As respostas obtidas por estes métodos dependem do tipo de informação que lhes são fornecidas, vale ressaltar as apontadas por Ensslin (2002) que julga relevante considerar todas as variáveis envolvidas, conduzir as diversas opiniões dos decisores de forma que o consenso seja alcançado, definir o contexto decisório, determinar e ordenar os objetivos

dos decisores, além de definir os impactos das alternativas nos objetivos. Estes métodos agregam valor substancial à informação, pois dão clareza e transparência ao processo de tomada de decisão (Boas, 2005).

2.7 – Métodos de Análise Multicritério

Os primeiros métodos de apoio à decisão surgiram em meados dos anos 50 juntamente com a pesquisa operacional e foram impulsionados na segunda Guerra Mundial. Em seguida, foi a vez dos métodos probabilísticos de apoio à tomada de decisão surgidos na década de 60, estes métodos matemáticos tinham como único objetivo encontrar a solução ótima de um problema. Roy (1985) considera que esta busca serviu de estímulo para a criação de novos métodos.

Na Figura 2.1 é apresentado o modelo decisório citado por Uris (1989), *apud* Binder (1999), cuja descrição encontra-se a seguir.

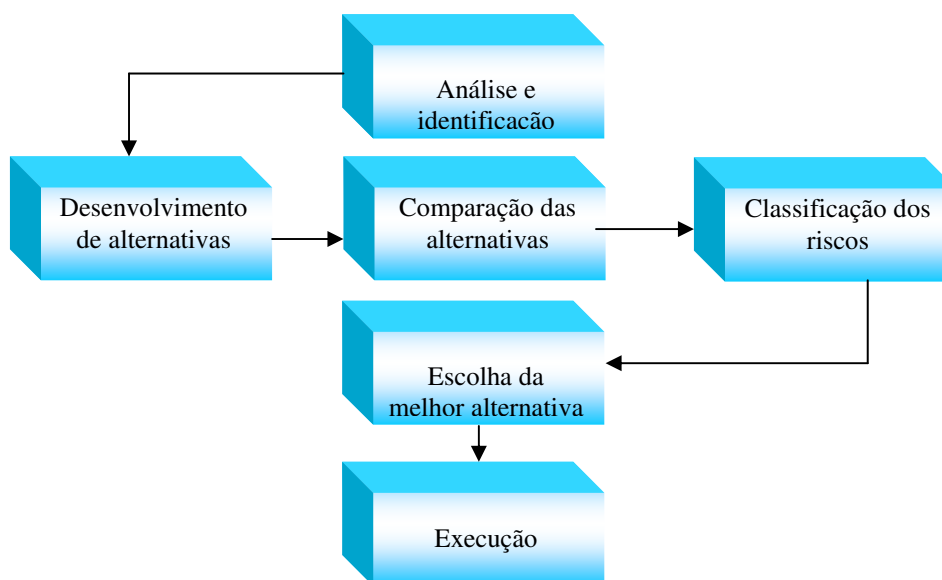


Figura 2.1 – Etapas do processo decisório (Binder, 1999)

Análise e identificação da situação: nesta etapa deve ser feito um adequado levantamento de dados para uma acurada identificação do ambiente de estudo;

Desenvolvimento das alternativas: após o levantamento dos dados devem ser identificadas as possíveis alternativas;

Comparação entre as alternativas: devem ser identificadas as vantagens e desvantagens das alternativas;

Classificação dos riscos de cada alternativa: etapa responsável pela análise dos possíveis riscos de cada alternativa para medir os seus graus de incerteza;

Escolha da melhor alternativa: após comparar e classificar os riscos de cada alternativa, é permitido ao usuário escolher a melhor opção e fazer uma estimativa dos resultados esperados, para uma avaliação posterior;

Execução e avaliação: implementa-se a alternativa escolhida. Após algum tempo são fornecidos resultados que permitem ao usuário continuar com a alternativa escolhida ou reiniciar o ciclo de tomada de decisão.

Os métodos multicritérios foram divididos em três grandes famílias, descritas a seguir (Souza *et al.*, 2006):

1 - Métodos baseados na teoria de utilidade multiatributo – mais difundidos na América do Norte, consistem em agregar vários atributos em uma única função e tem como objetivo encontrar a alternativa que possa otimizar essa função.

2 - Métodos seletivos – bastante utilizados na Europa, consistem em comparar pares de alternativas através de relação de preferências sugeridas pelos decisores, podendo ser considerados pesos para representar a importância relativa entre os critérios.

3 - Métodos iterativos – são mais recentes que os apresentados anteriormente. Tem grande flexibilidade, podendo ser aplicados a um vasto número de casos e neles verifica-se a articulação progressiva de preferências, isto é, as preferências são discutidas e reavaliadas ao longo do processo decisório. Nestes métodos, os decisores contribuem diretamente na elaboração da solução e intervêm durante os procedimentos.

Dos vários métodos desenvolvidos pela escola européia, os mais conhecidos são os métodos ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality) e PROMETHEE-Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (Vincke, 1992).

Conforme apresentado em Gonçalves *et al.* (2003), o método ELECTRE desenvolvido por Benayoun e Tergny (1969) e Roy (1971), fundamenta-se nos conceitos de concordância, discordância e valores-limite (“outranking”); utiliza um intervalo de escala para estabelecer as relações-de-troca na comparação de pares de alternativas e os resultados sofrem grande influência dos pesos atribuídos aos critérios.

Este método utiliza dois valores limites para cada critério que são: o valor limite de preferência “p”, que possibilita definir um limite em que uma ação é estritamente preferível à outra e um valor limite de indiferença “q”, que é o limite em que uma ação é

indiferente à outra. Estes limites mostram o grau de sensibilidade desejado entre duas alternativas; e, a mudança de um limite para outro ocorre em uma faixa de transição denominada zona de preferência fraca.

Compete ao decisor a definição dos limites de indiferença (q), preferência (p) e o veto (v). Contudo, segundo apresentado em Rogers e Bruen (1998), os limites p e v , geralmente são múltiplos de q , e a relação entre estes limites é sempre apresentada como $q < p < v$ (Santos *et al.*, 2006).

O estabelecimento de pesos não adequados aos critérios, a utilização de critérios redundantes ou, ainda, a utilização de um conjunto de critérios que não reflita a complexidade do problema podem distorcer os resultados obtidos.

Para Buchanan e Sheppard (1998), apud Santos *et al.* (2006), as várias versões da família ELECTRE baseiam-se em um mesmo conceito fundamental diferindo, no entanto, na sua operacionalização. O ELECTRE I, desenvolvido em 1968, foi o primeiro método de apoio à decisão em utilizar o conceito da relação "*outranking*", consiste em separar do conjunto total de alternativas, aquelas que são preferidas na maioria dos critérios de avaliação e não apresenta níveis inaceitáveis de insatisfação dos outros critérios. Em seguida foi a vez do ELECTRE II, desenvolvido entre 1971-1972, é considerado como um aprimoramento do método ELECTRE I, busca facilitar a decisão através da priorização de alternativas. Em 1978 surgiu o método ELECTRE III, que além de introduzir na estrutura dois limiares no índice de concordância (indiferença e preferência) e um limiar de veto no índice de discordância ele transforma-se num método mais sofisticado e complexo que os anteriores ao incorporar o conceito de credibilidade. O ELECTRE IV é o mais recente de todos, foi desenvolvido em 1982, uma das características deste método é que não incorpora os pesos correspondentes à importância relativa dos critérios; porém, não significa que cada critério tenha exatamente o mesmo peso.

O método multicriterial PROMETHEE (Brans e Vincke, 1985) trabalha com os conceitos de dominância, que expressa o quanto uma alternativa prevalece sobre as demais e, não-dominância, isto é, o quanto uma alternativa é dominada pelas demais. Cada critério é representado por uma função de preferência, cujos valores variam entre 0 (indiferença) e 1 (preferência total), que permitem comparar duas alternativas e demonstrar a influência de uma sobre a outra, através dos símbolos P (Preference), I (Indiferença) e R (relaciona alternativas sem apresentar preferência entre elas).

As seguintes vantagens podem ser listadas com a utilização do método (Medeiros *et al.*, 2006): *considera as regras de dominância; apresenta matemática simples, com lógica*

pouco mais complexa do que a matriz de ponderações; e, permite opções de relacionamento entre as alternativas através das funções de preferência.

Através do método PROMETHEE I obtém-se um ranking parcial das alternativas, que considera o fluxo positivo ($\Phi+$), isto é, expressa o quanto uma alternativa domina as demais, e o fluxo negativo ($\Phi-$), que representa o quanto uma alternativa é dominada pelas demais. Enquanto, o PROMETHEE II fornece um ranking total dos valores de fluxo de cada alternativa, que é o somatório dos valores de fluxo positivo ($\Phi+$) e negativo ($\Phi-$).

Outra metodologia bastante utilizada na análise multicriterial é o método AHP (Analytical Hierarchy Process). Este método tem como característica analisar um problema de tomada de decisão, através de níveis hierárquicos. Ele realiza a seleção, ordenamento e avaliação subjetiva de várias alternativas em relação a um ou mais objetivos (Ramos, 2005). Para Schmidt (1995) o sucesso das aplicações com o uso do AHP deve-se ao fato dele incluir e medir fatores importantes, qualitativos e/ou quantitativos, sejam eles, tangíveis ou intangíveis, bem como a facilidade de uso.

Outra abordagem multicritério refere-se ao Método da Programação de Compromisso (Zeleny, 1973). Gonçalves *et al.* (2003) destacam que este método apresenta um processo iterativo e as preferências dos decisores são, em geral, estabelecidas de forma progressiva até que seja alcançada uma solução satisfatória, podendo a estrutura do problema, influenciar nos pesos dos critérios de avaliação. Também consideram este método ágil, de fácil visualização gráfica e permitem aos avalistas e decisores interagirem durante o processo decisório e, que os pesos atribuídos também apresentam grande influência nos resultados. A desvantagem da utilização deste método, segundo os autores, é que, em geral, a solução ideal não é atingida e serve como padrão de referência no processo de classificação das soluções não-dominadas.

O método Macbeth – Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (Costa e Chagas, 1994) é uma abordagem de análise multicritério de decisão que requer apenas julgamentos qualitativos sobre diferenças de valor para ajudar um indivíduo (ou grupo) a quantificar a atratividade relativa das opções (Costa *et al.*, 2004). Através dele é possível medir o grau de preferência de um “decisor” sobre um conjunto de alternativas e, dessa forma, verificar a inconsistência nos juízos de valores, possibilitando a revisão das preferências. Fernandes (1996) aponta a interatividade como sendo a maior vantagem deste método (Boas, 2005).

2.8 – Aplicações dos Métodos de Análise Multicriterial

No Brasil e no exterior, estudos desenvolvidos na área de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos têm contemplado vários aspectos no auxílio à tomada de decisão através de técnicas de análise multicriterial. A seguir são apresentados alguns trabalhos realizados com o uso destas técnicas.

Em seu estudo, Duckstein e Opricovic (1980) utilizaram o método de Programação de Compromisso, para auxiliar a implementação de quatro possíveis sistemas (alternativas) de recursos hídricos, na Bacia Hidrográfica do Rio Tisza (Hungria). Foram considerados os seguintes critérios de avaliação: i) custo total, ii) probabilidade de escassez da água, iii) qualidade da água, iv) fator de reuso de energia e v) proteção de cheias.

Brans e Vincke (1985) aplicaram o método PROMETHEE e do plano GAIA para decidir onde deveria ser construída uma nova usina de energia elétrica na Europa, dentre seis países (alternativas) distintos: Itália, Bélgica, Alemanha, Grã Bretanha, Portugal e França. Foram considerados os seguintes critérios de avaliação: i) minimizar mão-de-obra na operação, ii) maximizar energia produzida, iii) minimizar custo de manutenção, iv) minimizar número de povoado evacuado e v) maximizar o nível de segurança.

Netto *et al* (1993) utilizaram técnicas de análise multicriterial com o objetivo de simular o processo decisório de escolha de uma solução para mobilização de novas reservas de água em uma área da região sudoeste da França. Os autores avaliaram a pertinência das técnicas adotadas através dos resultados obtidos.

Gobbetti e Barros (1993) analisaram quatro métodos diferentes de análise multicriterial: Programação de compromisso, função utilidade multidimensional, Electre e Promethee e aplicaram ao problema de revisão do Plano Diretor de Esgotos da região Metropolitana de São Paulo. E concluíram que as diferentes técnicas apresentaram resultados consistentes.

Matzenauer e Jardim (2001) fizeram um estudo comparativo das metodologias MCDM e MCDA, com o objetivo de esclarecer questões relativas à utilização destas metodologias na gestão dos recursos hídricos e concluíram que as duas metodologias devem ser utilizadas, porém dentro do contexto específico de cada uma.

Zuffo *et al.* (2002), avaliaram os resultados dos métodos ELECTRE II, PROMETHEE, Programação por Compromisso (CP), Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT) e o método Analítico Hierárquico (AHP), utilizados no planejamento para reabilitação, expansão e conservação do sistema produtor de água potável da Bacia do

Baixo Cotia, localizada na Região Metropolitana de São Paulo. Na aplicação dos métodos multicritérios incorporou características ambientais, sociais, econômicas e técnicas. Foram adotados vinte critérios e nove diferentes alternativas para o estudo do problema. Os métodos PROMETHEE, CP, CGT e AHP apresentaram resultados satisfatórios. Entretanto, segundo os autores, devido à insensibilidade do método ELECTRE, a qualquer mudança de cenários de pesos, seus resultados não foram satisfatórios.

Zuffo e Santos (2002) aplicaram o método ELECTRE II ao planejamento de recursos hídricos: uma proposta para melhorar a performance do método. Os autores sugeriram duas propostas de alteração aplicadas a quatro cenários definidos a partir de um estudo de caso realizado na Bacia do rio Cotia, São Paulo. E concluíram que o ELECTRE II pode mostrar-se eficiente em estudos que envolvam múltiplos critérios.

Em seu estudo Gonçalves *et al.* (2003) utilizaram a programação linear e a análise multicritério (o método ELECTRE I e o método de Programação de Compromissos) para auxiliar os participantes do comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Curu, no estado do Ceará, sobre a escolha da vazão adequada para atender a diversos critérios envolvidos no processo e, concluíram que os métodos utilizados permitem considerar simultaneamente os aspectos sociais, ambientais e econômicos em complexo contexto decisório dos comitês gestores de bacia hidrográfica e que estes métodos permitem considerar aspectos qualitativos (subjetivos) do processo decisório, isto é, introduzir variáveis discretas através de escalas adequadas de avaliação.

Jardim e Lanna (2003) aplicaram e compararam as técnicas de análise multicritério ELECTRE I e II, Programação de Compromisso e Analítico Hierárquico em um estudo de caso, para suporte à decisão em um Comitê de Gerenciamento, tendo como objetivo estratégico o desenvolvimento sustentável em uma Bacia Hidrográfica. Na análise desenvolvida através dos métodos acima citados, consideram-se a participação de múltiplos decisores, a questão da subjetividade e o reconhecimento da incerteza como inerente ao processo.

Pompermayer (2003) aplicou a análise multicritério em gestão de recursos hídricos nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, no estado de São Paulo com o objetivo de formular procedimento multicritério como instrumento de auxílio à tomada de decisão na gestão de recursos hídricos e a simulação do seu uso em uma bacia hidrográfica. Para o estudo foram selecionados vinte indicadores de sustentabilidade e o método multicritério ELECTRE III que demonstraram-se bastante adequados ao caso estudado. Os resultados obtidos indicaram que o grau de preferência por determinada intervenção varia

significativamente entre bacias e pode ser uma informação importante na implementação de um dado plano de ação ou programa de investimento.

Castro *et al.* (2004) aplicaram e verificaram indicadores para a avaliação de sistemas de drenagem urbana, através dos métodos ELECTRE III e Programação de Compromissos em áreas cujos projetos de drenagem incluíam a utilização de sistemas clássicos, intermediários e alternativos. E constataram que os sistemas dotados de técnicas alternativas apresentam melhor performance ao incluírem na análise os aspectos ambientais, sanitários e sociais, além dos aspectos hidráulicos e hidrológicos comumente empregados.

Boas (2005) desenvolveu um método multicritério, baseado no método Analytic Hierarchy Process (AHP), para auxiliar na escolha de alternativas de políticas, programas e projetos relacionados à gestão de recursos hídricos, quanto ao uso múltiplo de reservatórios. E constatou que, com o emprego da análise multicriterial, é possível utilizar os julgamentos subjetivos dos atores envolvidos no processo decisório, com precisão e confiabilidade, conferindo maior aceitabilidade, transparência e robustez à decisão.

Ramos (2005) desenvolveu um modelo multicritério utilizando uma abordagem construtivista, para avaliar potenciais candidatos a receber a outorga de uso da água na bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Sul – RS. O autor considerou a utilização da metodologia MCDA como sendo essencial para a negociação e entendimento do processo de outorga dos recursos hídricos pelos tomadores de decisão. E concluiu que o modelo construído pode dar suporte à tomada de decisão pelo poder público em relação às solicitações de outorga de uso da água da bacia.

Santos *et al.* (2006) utilizaram o método de análise multicriterial ELECTRE III, cujo objetivo foi hierarquizar medidas de conservação de água em um edifício padrão em Curitiba, Paraná. E concluíram que a aplicação da análise multicritério para este fim exige cautela e precisão por parte do agente que toma decisões.

Medeiros *et al.* (2006) utilizaram o método multicriterial PROMETHEE como ferramenta no apoio ao processo decisório de alocação de águas para o rio São Francisco e concluíram que a utilização dessas técnicas podem contribuir no apoio à decisão.

Boas (2007) utilizou o método Analytic Hierarchy Process (AHP) no estudo do uso múltiplo do reservatório Ribeirão João Leite, em Goiás e obteve uma lista ordenada das alternativas de uso múltiplo possíveis de serem implantadas no reservatório, sendo a geração de energia elétrica a alternativa mais preferida. E, constatou que o método AHP é flexível e capacita os decisores a se adequarem às constantes mudanças, que são típicas de

problemas complexos e dinâmicos e facilita a análise e sintetização das informações. O método atribui em sua análise, o mesmo grau de importância tanto aos elementos subjetivos quanto aos elementos objetivos. Quanto à desvantagem de aplicação do método, a autora apontou a grande quantidade de julgamento, pois causa desmotivação e falta de interesse dos participantes e sua baixa participação.

Vários outros estudos que contemplam o uso destas técnicas no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos podem ser encontrados na literatura, o que demonstra a crescente preocupação por parte dos pesquisadores e a grande relevância dada ao processo.

Diante da vasta aplicação dos métodos multicriteriais, sendo alguns trabalhos aqui descritos e outros conhecidos, porém não citados, é que ocorreu a motivação para utilização do método de apoio à decisão (PROMETHEE II), cuja escolha deve-se a sua facilidade de implementação computacional, a obtenção de uma hierarquização das alternativas, segundo suas preferências e a grande representatividade comparativa (de faixas de indiferença a preferências progressivas lineares ou exponencial) de suas funções de preferências.

3 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA

3.1 – Caracterização Física da Bacia

3.1.1 – Localização

A bacia hidrográfica do rio Gramame está localizada no litoral Sul do estado da Paraíba na região Nordeste do Brasil, entre as latitudes 7°11' e 7°23' Sul e longitudes 34°48' e 35°10' Oeste. Limita-se ao Norte com a bacia do rio Paraíba, ao Sul com o estado de Pernambuco e a bacia do rio Abiaí-Papocas, a Leste com o oceano Atlântico e a Oeste com a bacia do rio Paraíba (Figura 3.1). Sua área de drenagem é de aproximadamente 589,1 km², e o comprimento da linha divisor de água que a delimita é de 123,3 km. É formada pelas sub-bacias (Tabela 3.1): Mumbaba, Mamuaba, Água Boa e a sub-bacia do rio Gramame, contribuinte do açude Gramame-Mamuaba (Figura 3.2), principal reservatório da bacia com capacidade máxima de acumulação de 56,9 hm³.

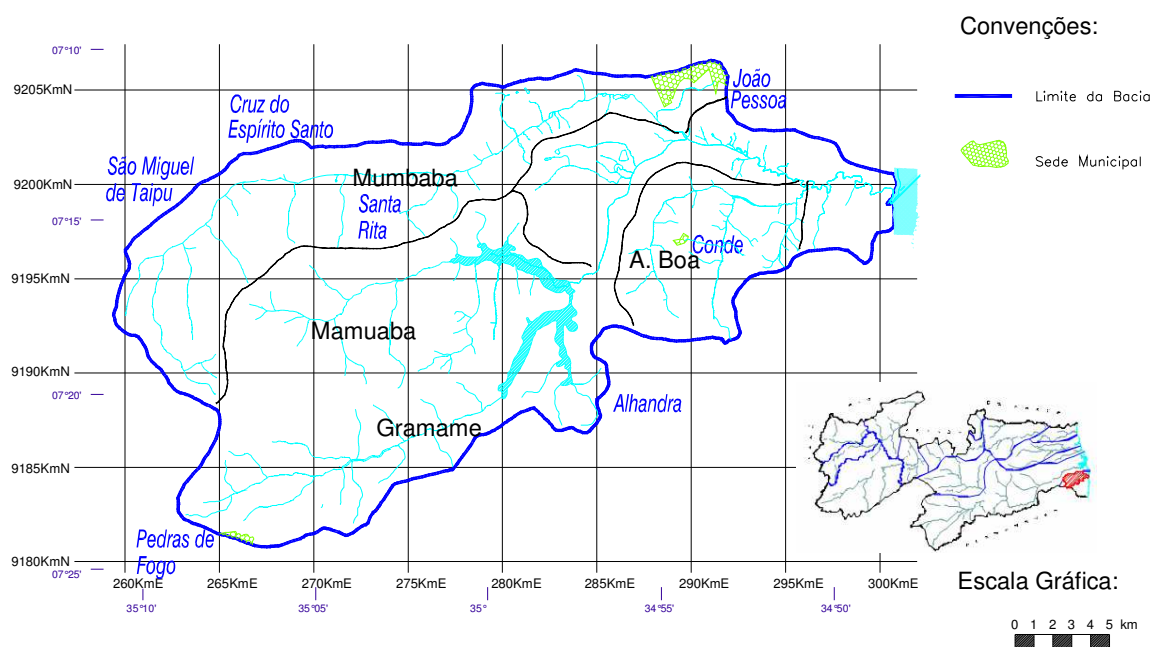


Figura 3.1 – Localização das Bacias Hidrográficas do Rio Gramame e dos Rios Abiaí-Papocas.

Fonte: SCIENTEC (2000)

Tabela 3.1 – Área das sub-bacias do rio Gramame (SCIENTEC, 2000)

Sub-Bacia	Área (ha)	Percentual (%)
Gramame	21.850	37,1
Mumbaba	17.720	30,1
Água Boa	6.540	11,1
Mamuaba	12.800	21,7
TOTAL	58.910	100,0



a) barragem do rio Gramame



b) barragem do rio Mamuaba

Figura 3.2 – Vista parcial do sistema Gramame-Mamuaba

No ano 2000 era atendida por esta Bacia uma população urbana de 794.887 e na zona rural 21.304 habitantes (SCIENTEC, 2000). A bacia abrange os municípios de Alhandra, Conde, Cruz do Espírito Santo, João Pessoa, Santa Rita, São Miguel de Taipu e Pedras de Fogo, cujos percentuais de participação na área da bacia estão indicados na Tabela 3.2, a seguir.

Tabela 3.2 – Participação em área dos municípios na bacia hidrográfica (SCIENTEC,2000)

Município	Área do Município (Km ²)	Área da Bacia (Km ²)	Participação (%)
Alhandra	224,42	99,72	16,93
Conde	164,10	76,47	12,98
Cruz do Espírito Santo	189,32	3,50	0,59
João Pessoa	209,94	59,07	10,03
Santa Rita	762,33	155,59	26,41
São Miguel de Taipu	63,60	2,20	0,37
Pedras de Fogo	348,02	192,56	32,69

3.1.2 – Hidrografia

O Gramame, principal rio, nasce na região do Oratório (município de Pedras de Fogo) a uma altitude de aproximadamente 150 metros (Figura 3.3) e percorre 54,3 km até chegar a sua foz na praia de Barra de Gramame (limitada pelos municípios de João Pessoa e Conde). Sendo subdividido em alto, médio e baixo curso, com declividades médias de 11,6m/km, 2,4m/km e 0,9m/km, respectivamente (SCIENTEC, 2000).

O rio Gramame apresenta regime fluvial perene e os seus principais afluentes são:

- Rio Utinga, rio Pau Brasil, riacho Pitanga, riacho Ibura, riacho Piabuçu, rio Água Boa, localizados na margem direita;

- Riacho Santa Cruz, riacho da Quizada, riacho do Bezerra, riacho do Angelim, riacho Botamonte, rio Mamuaba, rio Camaço, rio Mumbaba, situados na margem esquerda.

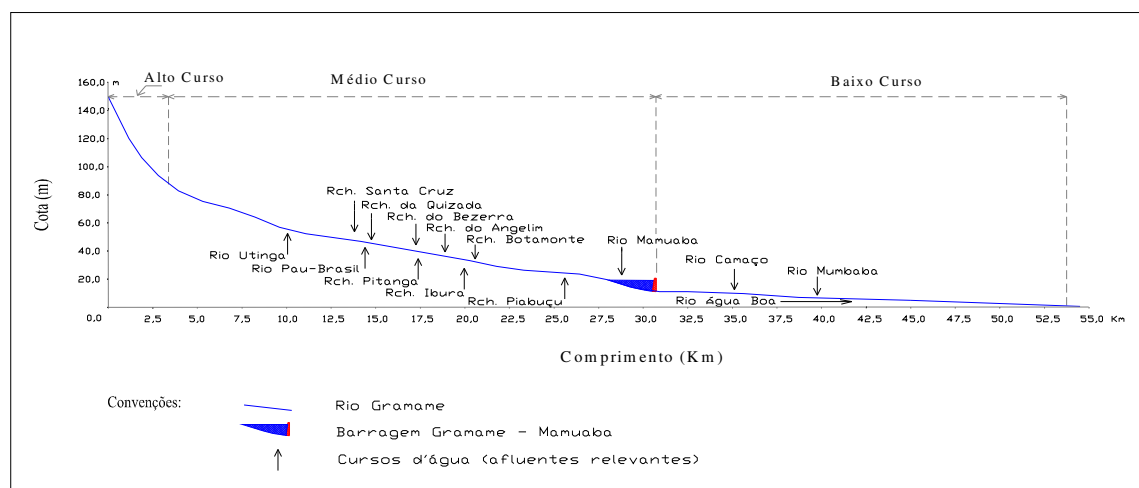


Figura 3.3 – Perfil longitudinal do rio Gramame

Fonte: SCIENTEC (2000)

3.1.3 – Climatologia

Do ponto de vista climático, a região litorânea, na qual a bacia do rio Gramame está inserida, classifica-se como tropical úmida. A região apresenta evaporação média anual de 1300 mm, enquanto a precipitação média anual é de 1740 mm.

A proximidade do Estado à Linha do Equador, com alta radiação solar e alto número de horas de insolação, determina um clima quente com temperatura média anual de 26°C e poucas variações intra-anual. Segundo a classificação climática de Koeppen (adaptada para a região por Varejão e Silva, 1987) a região litorânea, na qual se encontra a bacia do rio Gramame, está sujeita a dois tipos climáticos, quais sejam:

- Aw'i, que indica um clima tropical chuvoso, com estação seca na primavera e variação de temperatura mensal do ar ao longo do ano praticamente desprezível, e;
- BSw'h', indica um clima seco tipo estepe com estação seca na primavera e temperatura média mensal superior a 18°C. Pequena parte da área ocidental da bacia encontra-se classificada com esse tipo climático.

Os valores da evapotranspiração potencial média calculada pelo método de Hargreaves (Tabela 3.3 sobre a bacia hidrográfica, obtidos em SUDENE (1984) demonstram a ocorrência de baixa variabilidade espacial na mesma.

Tabela 3.3 Evapotranspiração potencial média diária segundo G.H. Hargreaves (mm).

Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Alhandra	5,0	4,9	4,6	4,0	3,3	2,9	2,9	3,3	4,0	4,6	4,9	4,9
João Pessoa	4,9	4,8	4,5	3,9	3,1	2,8	2,9	3,4	4,1	4,7	4,9	4,9
Sapé	5,1	5,0	4,7	4,0	3,4	2,9	2,9	3,4	4,1	4,6	5,0	5,1
També	5,1	4,9	4,4	3,9	3,2	2,9	3,1	3,5	4,2	4,8	5,0	5,0

3.1.4 – Geologia

Os corpos graníticos e granitóides, alongados e laminados são predominantes na superfície da bacia do rio Gramame e aparecem em pontos esparsos a Oeste da mesma (Figura 3.4).

Os rios Gramame, Mamuaba e Mumbaba têm suas nascentes localizadas próximo ao complexo cristalino na porção Sudoeste da bacia, caracterizada por falhas e fraturas.

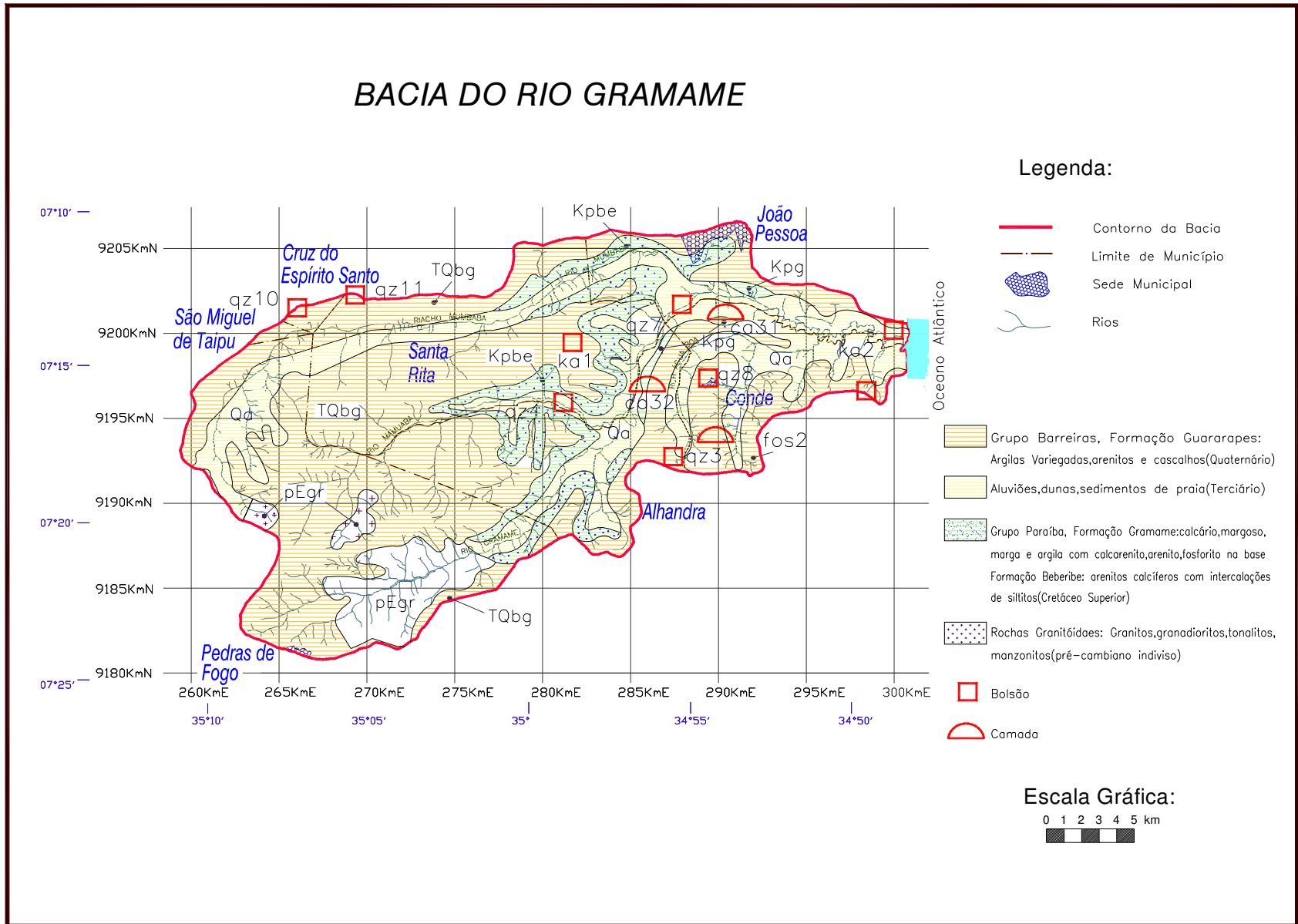


Figura 3.4 – Mapa Geológico (SCIENTEC, 2000)

3.1.5 – Pedologia

A distribuição espacial dos solos na bacia do rio Gramame (Figura 3.5) ocorre da seguinte maneira:

- i) no alto curso dos rios Gramame e Mamuaba, encontram-se dois tipos: os latossolos Vermelhos Amarelo Distrófico, que são muito profundos, porosos e fortemente drenado e os solos Podzólicos Vermelho Amarelo Orto (PV1 e Pv2) que apresentam perfis profundos e bem diferenciados e tem baixa fertilidade natural além de serem bem drenados.
- ii) no curso médio dominam os Podzóis Hidromórficos (HP) que são solos muito arenosos, bem diferenciados, profundos, ácidos, com saturação de bases muito baixa e alta saturação com alumínio, desenvolvem-se sobre sedimentos arenosos do Grupo Barreiras, referidos ao Terciário e sobre sedimentos arenosos quartzosos marinhos da Baixada Litorânea, referidas Haloceno.
- iii) no baixo curso predominam os Podzólicos sendo que, nas zonas de acumulação ocorrem os Aluissolos (Al) são solos de fertilidade natural alta, pouco profundos ou profundos, moderadamente ácidos e/ou moderadamente alcalinas nas camadas inferiores, sem problemas de erosão, apresentam Areias Quartzozas e solos de Mangue.

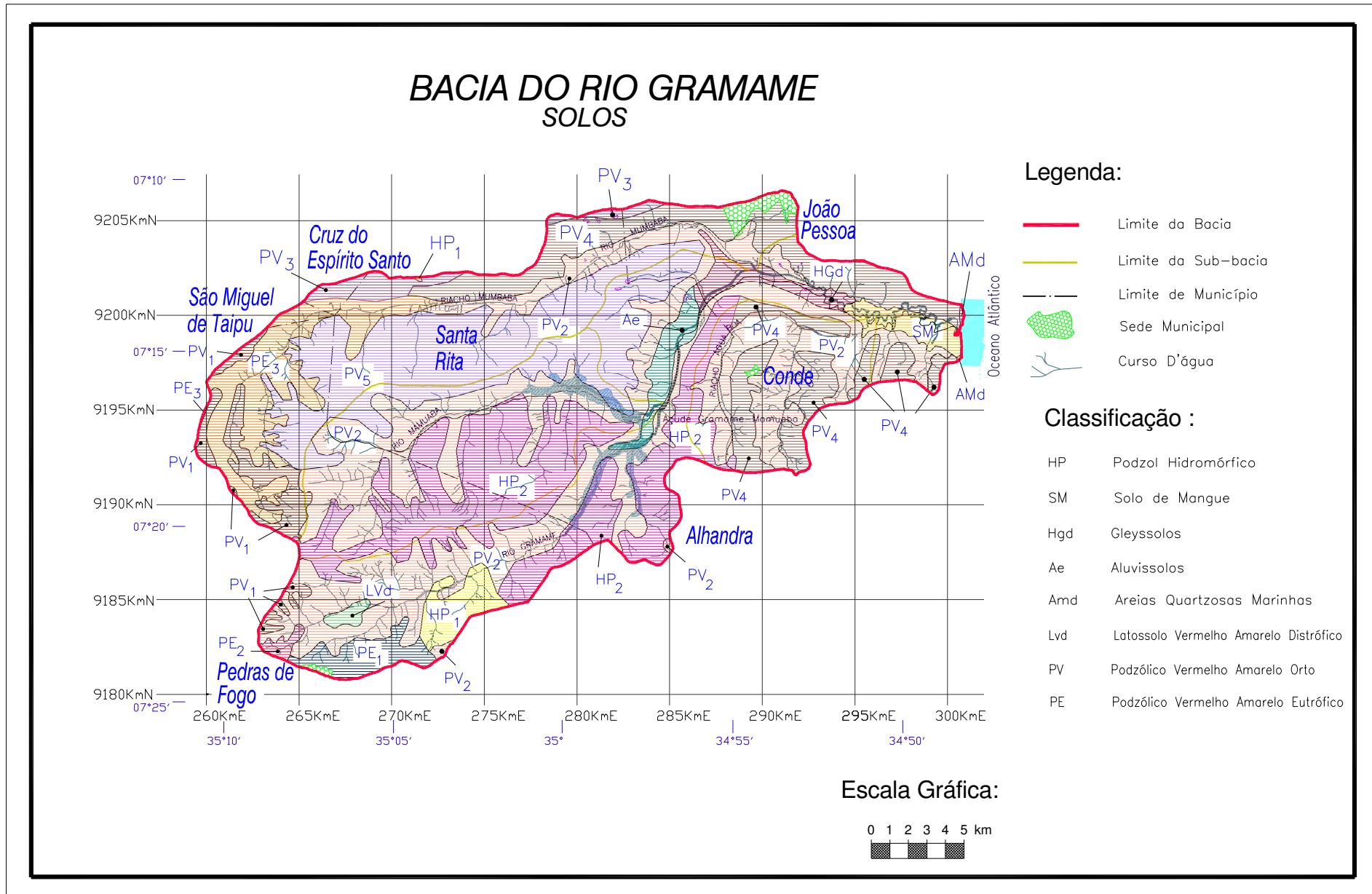


Figura 3.5 – Classificação dos solos (SCIENTEC, 2000)

3.1.6 – Relevo e Vegetação

A instalação de indústrias, loteamento, atividade agrícola, implantação de açudes e estrutura viária, resultou na devastação da vegetação nativa. Em 1998 o antropismo equivalia a 87,1% da área da bacia hidrográfica restando apenas 12,9% de vegetação nativa, conforme mostrado na Tabela 3.4

Tabela 3.4 – Ocupação e uso do solo em 1998 (SCIENTEC/2000)

Tipo de Ocupação	Área (ha)	Percentual
Mata Atlântica	3.820	6,5
Cerrado	1.137	1,9
Vegetação de Várzea	2.074	3,5
Vegetação de Mangue	613	1,0
Antropismo	51.266	87,1
Soma	58.910	100,0

De acordo com a classificação de relevo de Dubreuil (1974) apud Nouvelot e Ferreira (1977), para a Região Nordeste do Brasil, tem-se que a bacia do rio Gramame apresenta relevo predominantemente ondulado, com as sub-bacias variando de suave a ondulado.

Na Tabela 3.5 estão mostrados os principais parâmetros fisiográficos da bacia e de suas sub-bacias.

Tabela 3.5– Parâmetros fluvio – morfológicos da Bacia do Rio Gramame e suas principais bacias constituintes (SCIENTEC, 2000)

Sub-Bacia	A	P	Lp	Kc	L	l	F	Dd	Rc	Ri	Ordem	ESM	H(95%)	H(5%)	Ig	Ds
Gramame	589,1	123,3	54,3	1,43	50,30	11,71	0,20	1,23	4,87	2,54	5	0,41	15,0	162,0	3,01	73,05
Mumbaba	177,2	87,2	42,5	1,85	39,49	5,95	0,14	0,93	4,99	3,58	4	0,54	27,4	152,6	3,26	44,66
Mamuaba	128,0	54,7	25,0	1,36	21,52	5,95	0,07	1,43	5,02	3,09	4	0,35	42,5	170,0	75	65,15
Água Boa	65,4	33,5	16,8	1,17	10,89	6,01	0,23	1,28	2,82	4,62	4	0,39	14,5	115,0	9,53	76,92

A = Área da bacia (Km)

P = Perímetro da bacia (Km)

Lp = Comprimento do rio principal (Km)

Kc = Índice de compacidade

L = Lado maior do Retângulo Equivalente (Km)

l = Lado menor do Retângulo Equivalente (Km)

F = Fator de Forma

Dd = Densidade de Drenagem (Km/Km²)

Rc = Coeficiente de Confluência

Ri = Coeficiente de Comprimento

Ordem = Ordem do curso d'água principal

ESM = Extensão Superficial Média (Km)

H (95%) = Cota correspondente a 95% da área

H (5%) = Cota correspondente a 5% da área

Ig = Índice de declividade global

Ds = Desnível específico (m).

3.2 – Abastecimento Humano

3.2.1 – Sistema de abastecimento d'água da RMJP

O sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de João Pessoa (Figura 3.6) utiliza na, sua totalidade, mananciais subterrâneos e superficiais. É constituído de duas Estações de Tratamento (ETA), duas Elevatórias de Água Bruta (EEAB), dez Elevatórias de Água Tratada (EEAT), vinte e dois Reservatórios (SCIENTEC, 2000).

Este sistema é abastecido pelos seguintes mananciais superficiais: rio Marés (não inserido na bacia do rio Gramame), rio Mumbaba e os rios Gramame e Mamuaba. Estes rios formam os sistemas Mumbaba/Marés e Gramame/Mamuaba e são interligados através de adutoras de água bruta e tratada no sentido Gramame/Mamuaba para Mumbaba/Marés conforme descrição abaixo.

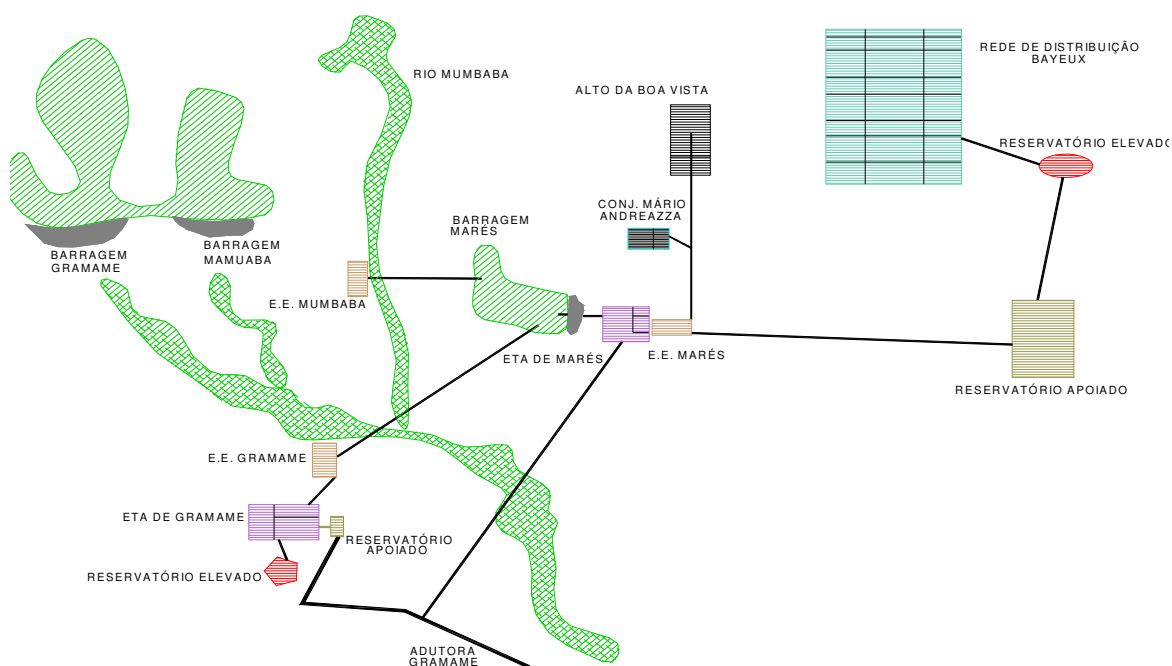


Figura 3.6–Esquema do sistema de abastecimento d’água de João Pessoa
(Fonte: SCIENTEC, 2000)

- O rio Marés, com barragem de regularização (Figura 3.7) e captação através de torre de tomada com adução de (101m) de água bruta por gravidade até a ETA/Marés (Figura 3.7) e depois para a Estação Elevatória de Água Tratada (EEAT) (Figura 3.7);
- O rio Mumbaba, com barragem de elevação de nível e captação em canal de derivação até a Estação Elevatória de Água Bruta (EEAB) que bombeia a água até a barragem de Marés;
- Os rios Gramame e Mamuaba (afluente do primeiro), com barragens de regularização construídas a cerca de 2 km da confluência destes, e interligadas por um canal de 785 m de comprimento, cuja finalidade é manter estável o nível da água do rio Gramame, através da sangria de Mamuaba para dentro deste. A captação é feita através de barragem de elevação de nível (Figura 3.8), no rio Gramame, a 6 km abaixo das barragens de regularização, com canal de derivação e caixa de areia, seguido de EEAB (Figura 3.9), onde a água é bombeada até a ETA/Gramame (Figura 3.10) situada à 1.200 m da captação. Da EEAB/Gramame parte uma adutora para o sistema Mumbaba/Marés e da ETA/Gramame parte outra adutora (água tratada) até o reservatório de distribuição da ETA/Marés.

A captação de água do rio Mumbaba para o reservatório de Marés não ocorre em regime permanente. A CAGEPA monitora a vazão desta adutora e da adutora de água bruta que capta água do rio Gramame. Esta captação visa complementar a vazão do sistema de Marés, sem sobrecarregar a estação de tratamento e não causar, também, o afogamento das bombas da estação elevatória, para não acarretar danos ao sistema.



a) ETA Marés



b) Elevatória de água tratada Marés



c) Reservatório Marés

Figura 3.7 – Vista parcial do sistema Marés



Figura 3.8 – Barragem de elevação de nível, no rio Gramame, a 6 km abaixo do reservatório Gramame-Mamuaba



Figura 3.9 – Estação elevatória de água bruta para a ETA Gramame



Figura 3.10 – ETA Gramame

3.2.2 – Sistema de abastecimento d'água de Pedras de Fogo

O sistema de abastecimento d'água de Pedras de Fogo (Figura 3.11) é alimentado pelo rio Gramame, através de um reservatório formado por uma barragem de terra. A captação ocorre por tomada direta, daí a água é aduzida por uma adutora de 20 m de extensão até uma estação elevatória. Em seguida é recalçada através de uma tubulação de ferro fundido com 750 m de extensão e 300 mm de diâmetro até uma caixa de passagem num ponto de cota elevada. Depois, a água é aduzida por gravidade através de uma canalização de 300 mm de diâmetro até a ETA, percorrendo 1.320 m de extensão.

Nesse sistema o tratamento de água é físico-químico através de processo convencional, compreendendo as seguintes unidades: mistura rápida, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Após o tratamento, a água é recalçada para um

reservatório elevado de distribuição com capacidade de 200 m³, situado na zona urbana da cidade. Então, a água é distribuída para a população através de um sistema coletivo (rede de distribuição), constituído de tubos de cimento amianto e PVC com diâmetros entre 60 e 75 mm e extensão de 2.723 m de canalizações, e atende a 2.885 ligações prediais ativas (SCIENTEC, 2000).

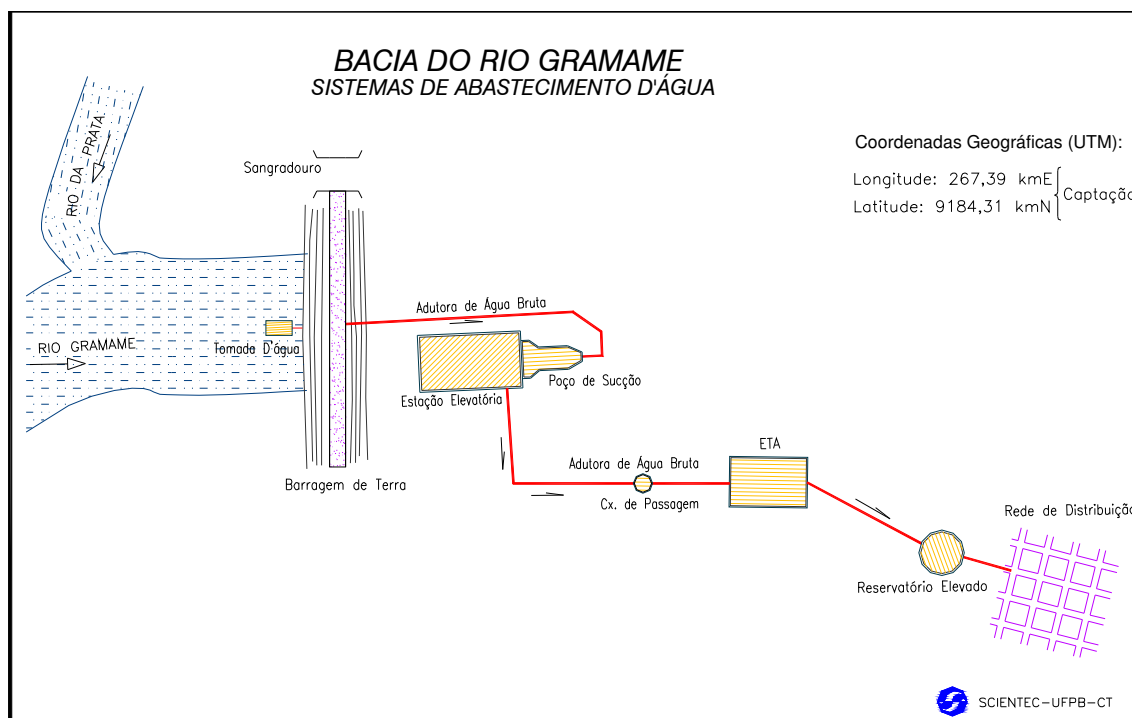


Figura 3.11 – Esquema do sistema de abastecimento d'água de Pedras de Fogo

Fonte: SCIENTEC (2000)

3.3 – Abastecimento Industrial

No Plano Diretor da Bacia em estudo consta que pequenas e médias indústrias inseridas no perímetro urbano são abastecidas por redes de distribuição da CAGEPA, tendo os seus consumos d'água já incluídos na demanda para abastecimento humano. As demais indústrias não incluídas nesse perímetro são abastecidas por poços. A única exceção refere-se à agroindústria GIASA.

3.4 – Irrigação

De acordo com o cadastro das áreas irrigadas entre os anos de 1998 e 2006, obtido na AESA, a bacia do rio Gramame é caracterizada por conter captações difusas ao longo dos seus rios, principalmente para irrigação, cujas áreas irrigadas variam de muito pequena até muito grande (Figura 3.12).

3.5 – Dessedentação de Animais

Segundo informações contidas no plano diretor da bacia, a demanda hídrica para abastecimento animal é pouco significativa, e o baixo consumo existente é suprido por poços e pequenos barreiros. A justificativa para o baixo consumo faz-se em virtude de prolongados períodos de estiagem, que resultou em desfalques significativos nos efetivos pecuaristas e, também, em crise financeira no setor que obrigou os pecuaristas a venderem seus rebanhos em larga escala.

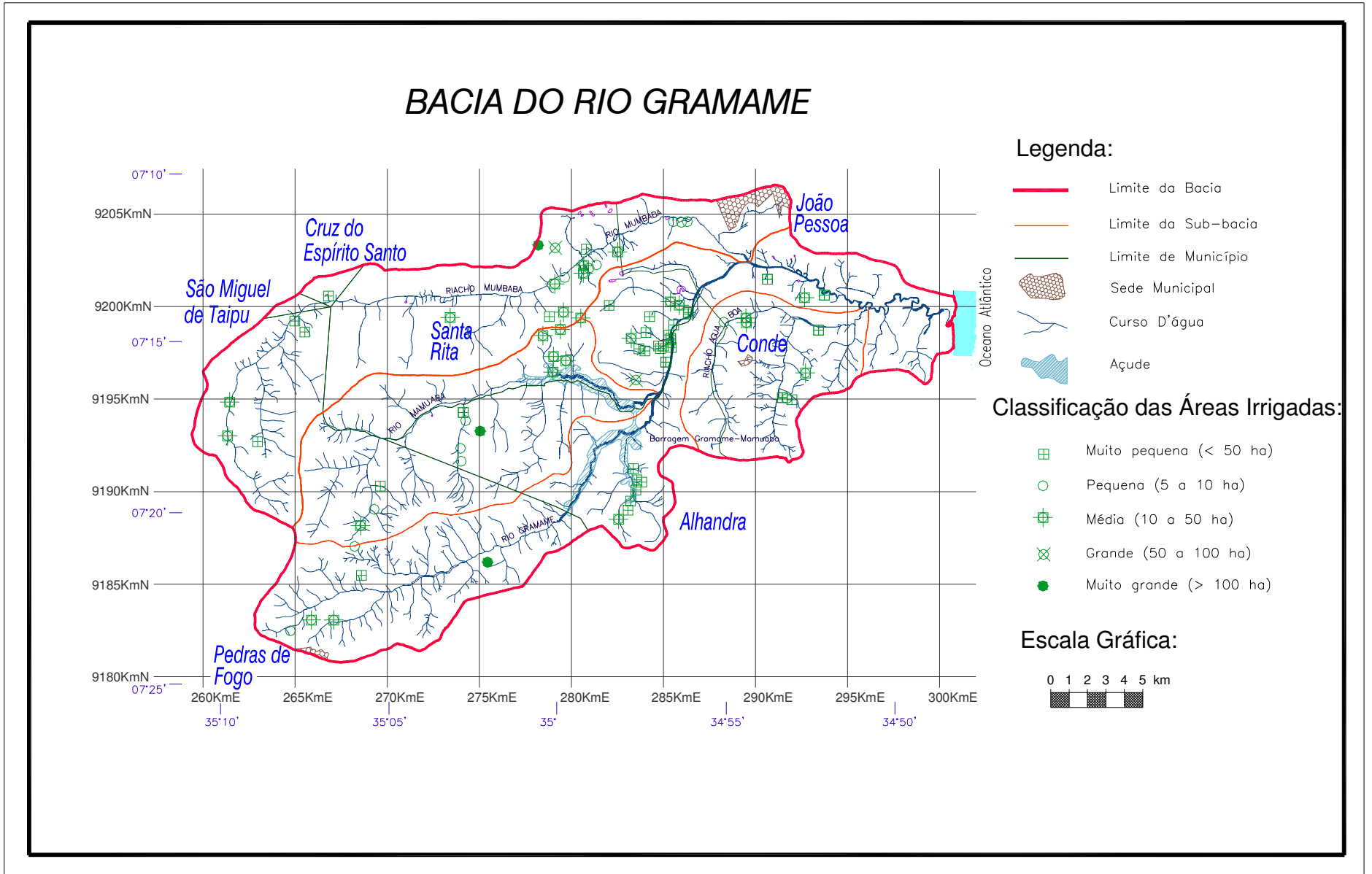


Figura 3.12 – Localização dos irrigantes (SCIENTEC, 2000)

4 – METODOLOGIA E ESTRATÉGIA DE AÇÃO

Este estudo visa buscar, estruturar, processar e analisar informações para o auxílio à tomada de decisão quanto as melhores escolhas entre possíveis ações de intervenção (obras hidráulicas), sob a ótica multicriterial (aplicada nos processos de escolha de alternativas), para a ampliação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Gramame, situada no litoral Sul do estado da Paraíba, a fim de minimizar futuros conflitos de uso da água. A técnica de análise multicriterial tem como critérios de julgamento os aspectos social, econômico e ambiental cuja análise será efetuada com a aplicação do método PROMETHEE II. Outra metodologia a ser adotada neste estudo refere-se ao modelo de otimização multiobjetivo desenvolvido por Santos (2007), este modelo possibilita um estudo integrado de reservatórios, rios, perímetros irrigados e adutoras através da análise multiobjetivo para um período plurianual. A análise dos resultados foi efetivada através dos conceitos de indicadores de: sustentabilidade do sistema e de eficiência dos reservatórios.

A seleção das duas abordagens se justifica pela possibilidade de analisar o comportamento do sistema quando operar segundo as preferências dos decisores (otimização multiobjetivo) e também de determinar que alternativas distintas serão escolhidas segundo uma ordem de prioridades atribuídas aos critérios (multicriterial) de análise.

Na Figura 4.1 é apresentado um resumo das etapas norteadoras deste estudo que serão descritas nas seções a seguir:

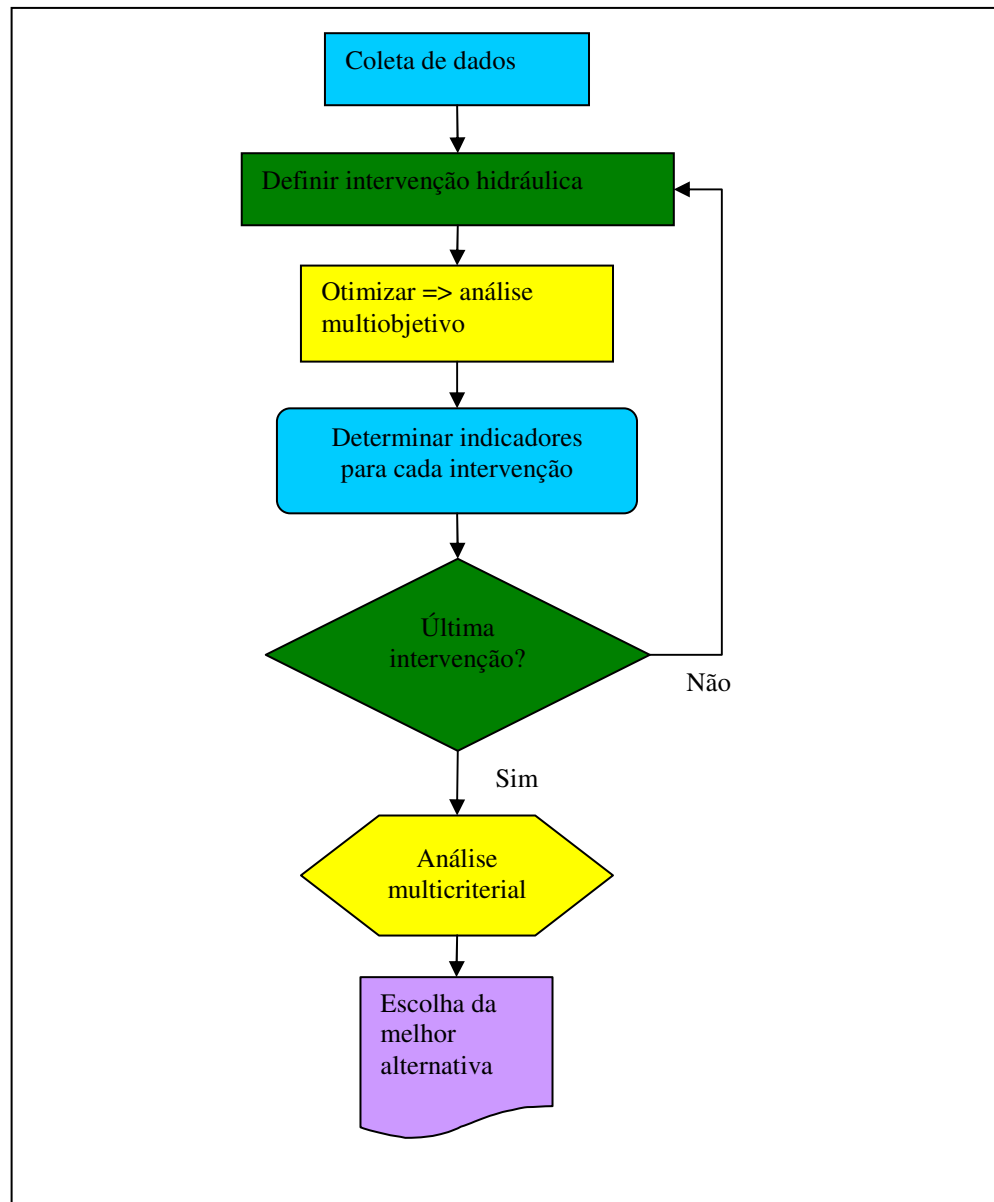


Figura 4.1 – Etapas metodológicas

4.1 – Coleta de Dados e Informações

A primeira etapa desenvolvida neste estudo diz respeito a coleta dos dados utilizados na pesquisa que foram obtidos junto a órgãos administrativos, tais como: Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado – AESA/PB; Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA; Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente – SECTMA/PB e Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Também obteve-se dados através de estudos existentes na região, a exemplo de Plano Diretor de

Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame; Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba; Relatórios técnicos e Artigos, dentre outros. A série histórica de vazões foi gerada, para este estudo, através do modelo de simulação SMAP.

4.2 – Intervenções Hidráulicas

A pouca disponibilidade hídrica para o atendimento das demandas de abastecimento, irrigação, indústria e outros tem resultado, na maioria das vezes em conflitos de uso da água. Este tipo de fato ocorreu durante o biênio 1998/1999 na bacia do rio Gramame no estado da Paraíba, cujos conflitos se deram entre a demanda de água requisitada para irrigação e a exportação de água para o abastecimento urbano de cidades localizadas além dos limites geográficos da bacia (Bayeux, Cabedelo e a maior parte de João Pessoa).

Segundo informações contidas em CAGEPA (2008), os atuais sistemas de abastecimento de água que atendem a região da Grande João Pessoa não têm condições de atender as demandas destas cidades, principalmente devido à baixa capacidade de vazão de seus mananciais, que estão no limite máximo de utilização dos recursos hídricos disponíveis. Alguns estudos constantes no plano diretor da bacia indicam para a necessidade da construção de nova infra-estrutura hídrica que vise minimizar os problemas existentes.

4.2.1 – Reservatório no Alto Gramame

Segundo recomendações contidas no Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do rio Gramame (2000), deve ser estudada a possibilidade de construção de um reservatório de regularização com capacidade de acumulação da ordem de 8 hectômetros cúbicos no alto curso do rio Gramame, próximo ao município de Pedras de Fogo (Figura 4.2). A finalidade é mitigar conflitos entre os irrigantes e a exportação de água para a região da Grande João Pessoa, bem como contribuir para o abastecimento de água da cidade de Pedras de Fogo e no suprimento de água da Empresa Agroindustrial GIASA.

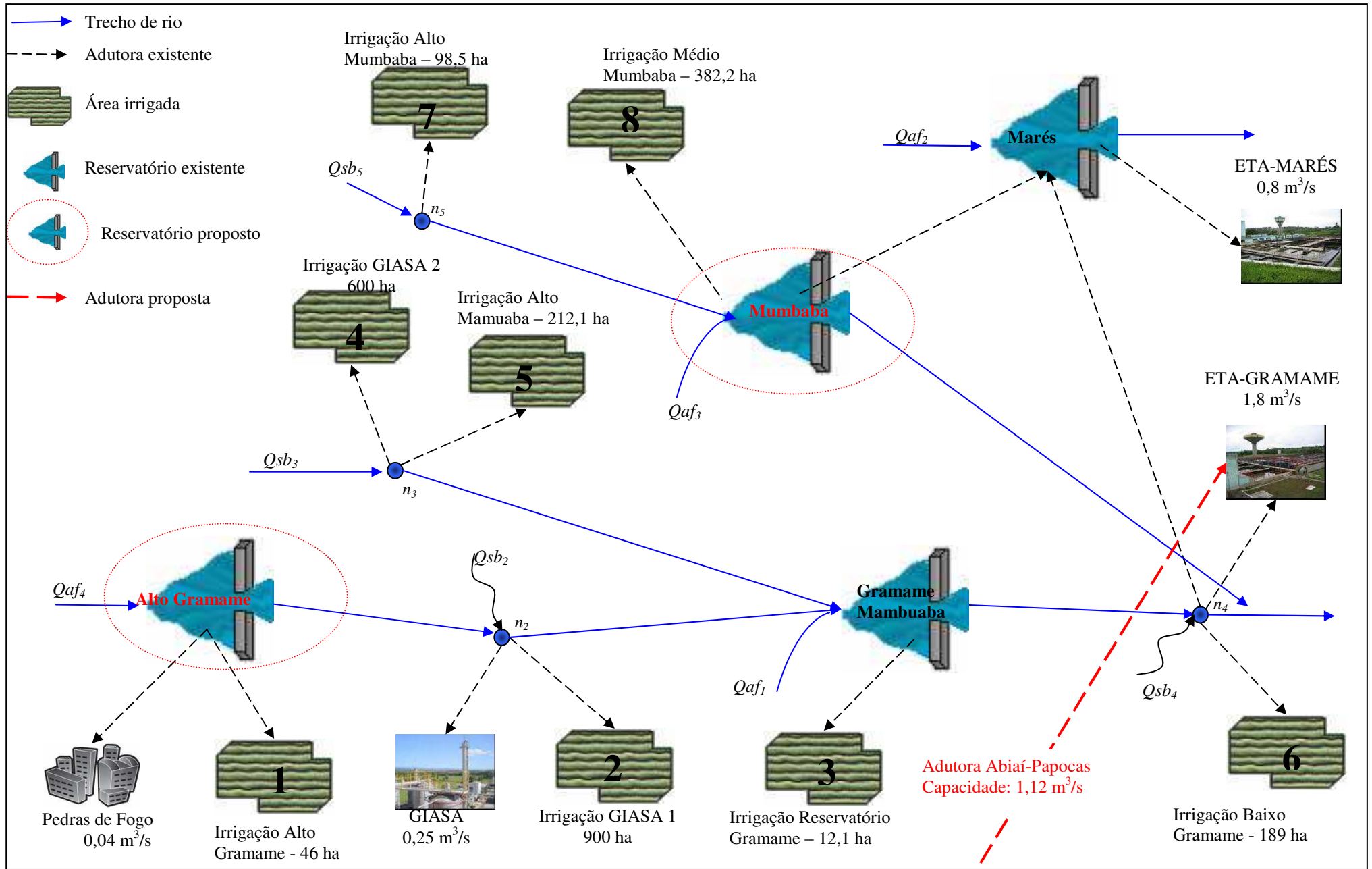


Figura 4.2 – Layout do sistema estudado com as intervenções hidráulicas (Cenário 8)

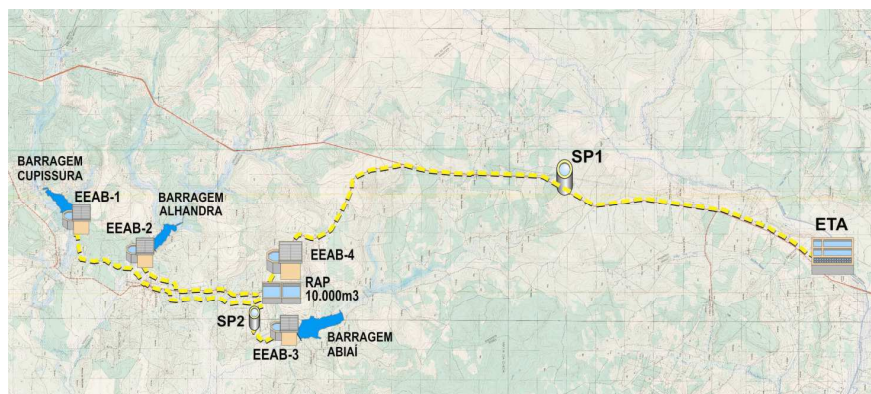
4.2.2 – Reservatório no Rio Mumbaba

A captação de água do rio Mumbaba para o abastecimento da Grande João Pessoa, através do sistema de Marés, não ocorre em regime permanente. Com o aumento das vazões nos rios em decorrência de altos índices pluviométricos em períodos de chuva, a retirada de água através do rio Mumbaba é suspensa para não sobrecarregar o sistema de Marés. Assim, uma parcela de água do rio Mumbaba não é utilizada e tem como destino final o exutório da bacia. Todavia, durante o período de estiagem, a suspensão da recarga dos mananciais e os altos índices de evaporação favorecem uma substancial redução nas vazões dos cursos d'água.

Desde 1994 está prevista pela CAGEPA a construção de um reservatório de regularização, com capacidade de acumulação no valor de 41 hectômetros cúbicos, que permitirá regularizar uma vazão de $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Mumbaba (Figura 4.2), logo à montante da barragem de nível atual. A construção desse reservatório, além de evitar o desperdício da água não utilizada durante o inverno, irá suprir a carência no verão, ou seja, haverá uma compensação entre excesso de água dos rios em períodos chuvosos e a redução durante a estiagem. Contudo, a principal finalidade da construção do reservatório no rio Mumbaba é servir de reforço para o sistema de Marés e consequentemente para o sistema Gramame-Mamuaba, no atendimento às demandas requeridas para abastecimento de água da Região Metropolitana de João Pessoa e contribuir para o suprimento de água para irrigação.

4.2.3 – Importação de Água da Bacia Abiaí-Papocas

Alguns estudos vêm sendo realizados, para reduzir os problemas de conflitos de usos da água, existentes durante períodos de estresse hídrico nesta região e melhorar o atendimento da demanda de água da Região Metropolitana de João Pessoa, como a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a bacia do rio Gramame, cujo projeto técnico denominado Sistema Adutor Abiaí-Papocas encontra-se em execução. O destino final da água será a Estação de Tratamento de Água de Gramame, conforme mostrado no Layout do sistema (Figura 4.2) e na Figura 4.3 a seguir.



OBS: EEAB: Estação Elevatória de Água Bruta, RAP: Reservatório de apoio, SP: Stande Pipe
ETA: Estação de tratamento de água

Figura 4.3 – Esquema do Sistema Adutor Abiaí-Papocas (CAGEPA, 2008)

4.3 – Cenários Estudados

Tendo em vista avaliar a disponibilidade hídrica atual do sistema e aquelas provenientes de intervenções hidráulicas a serem implantadas na bacia do rio Gramame foram considerados, neste estudo, 9 (nove) cenários de avaliação. Que foram estabelecidos a partir de informações contidas no Plano Diretor da Bacia do rio Gramame (2000) bem como de informações e estudos desenvolvidos pela CAGEPA, que versam sobre a disponibilidade hídrica existente na bacia e a sua possível expansão através da adoção de medidas de intervenção hidráulica a ser tomada com o intuito de minimizar os problemas de conflito do uso da água acarretado em períodos de escassez hídrica.

O Cenário 1 corresponde a infra-estrutura hídrica atual e tem como objetivo avaliar a garantia no atendimento às demandas existentes na região, quando for considerada apenas a estrutura hídrica atual, e os demais referem-se a implantação de obras que visem promover um incremento na disponibilidade hídrica, conforme descritos a seguir.

Cenário 1

Este cenário corresponde a infra-estrutura hídrica atual.

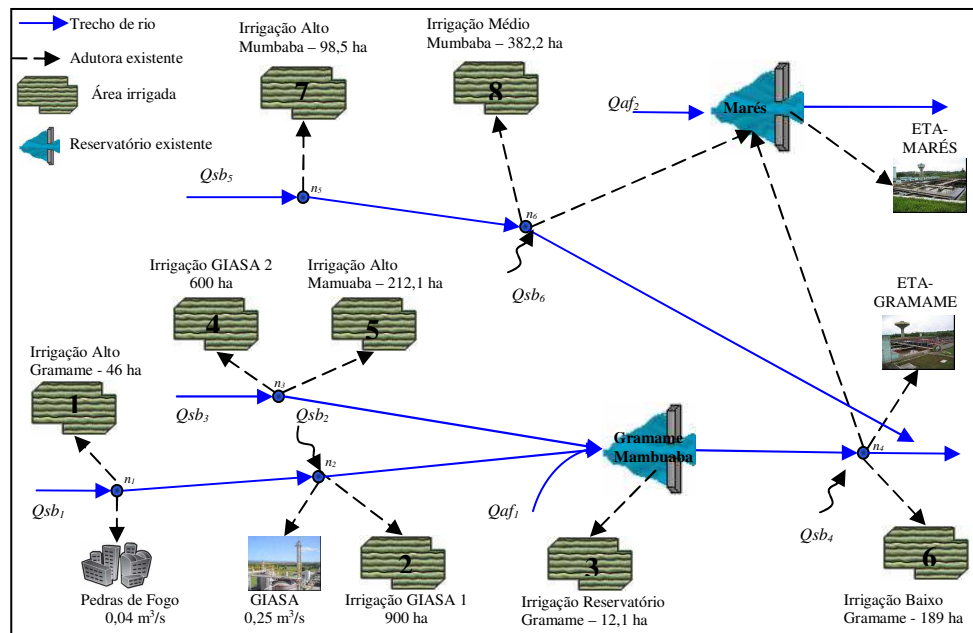


Figura 4.4 – CENÁRIO 1: Infra-estrutura hídrica atual

Cenário 2

Para este cenário é avaliado o atendimento às demandas quando for contemplada a construção de um reservatório com capacidade de acumulação de 41 hectômetros cúbicos no rio Mumbaba à montante da barragem de nível atual.

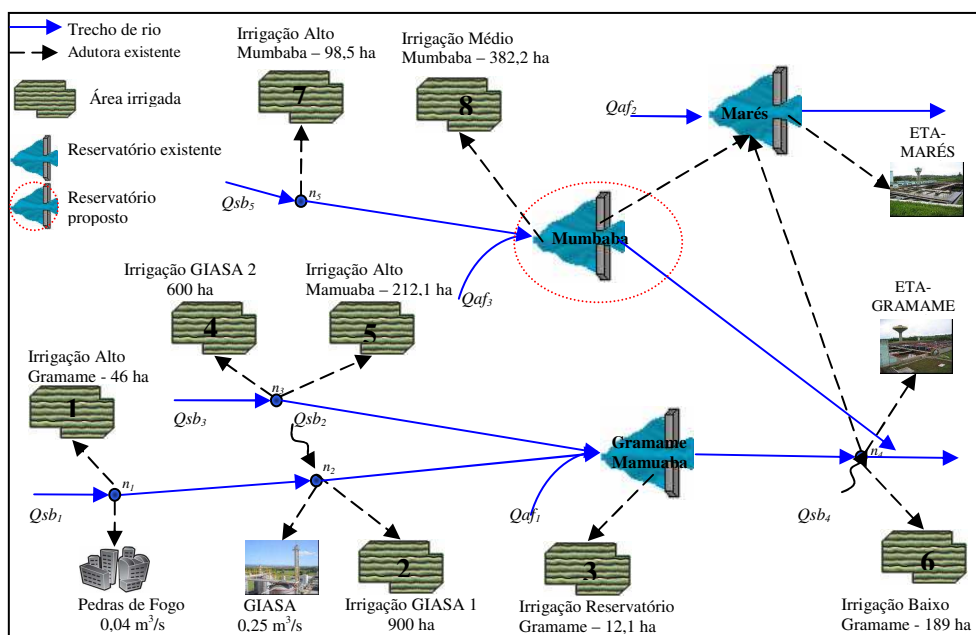


Figura 4.5 – CENÁRIO 2: Construção do reservatório no rio Mumbaba

Cenário 3

O objetivo deste cenário é avaliar a disponibilidade hídrica do sistema quando o Sistema Adutor Abiaí-Papocas, em execução, estiver operando.

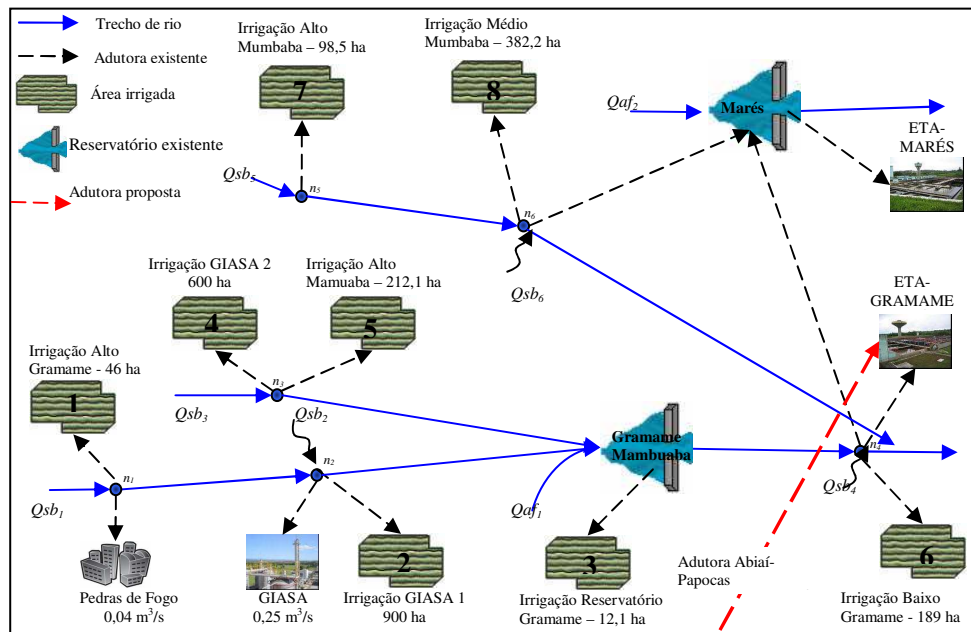


Figura 4.6 – CENÁRIO 3: Adutora Abiaí-Papocas

Cenário 4

Este cenário visa avaliar a disponibilidade hídrica do sistema quando for implantado um reservatório com capacidade de acumulação de 8 hectômetros cúbicos no alto curso do rio Gramame, próximo a cidade de Pedras de Fogo.

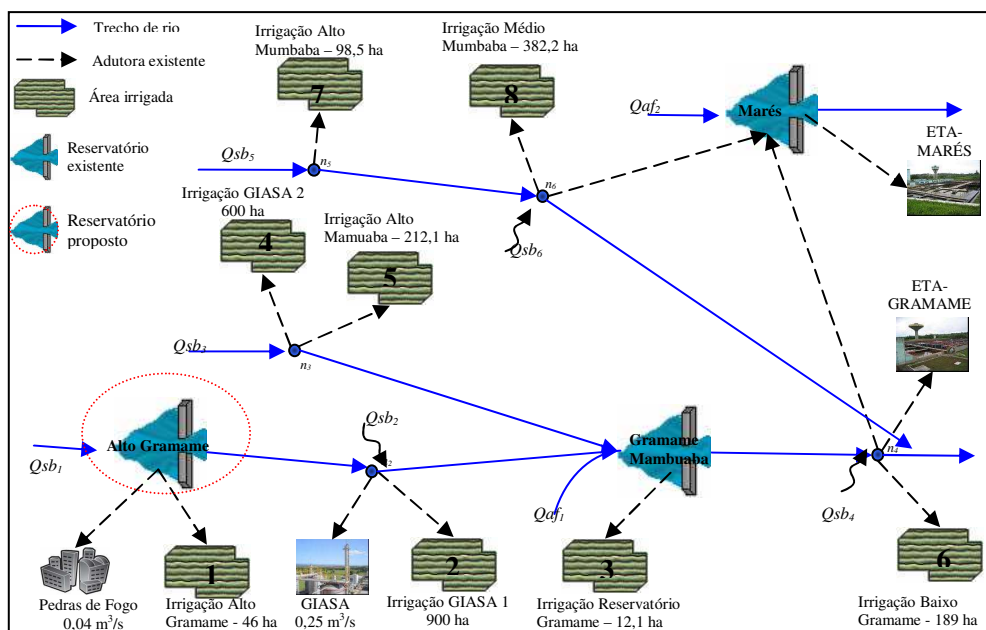


Figura 4.7 – CENÁRIO 4: Reservatório no Alto Gramame

Cenário 5

Neste cenário é contemplada a construção de um reservatório no rio Mumbaba (41 hectômetros cúbicos) e outro no alto curso do rio Gramame, com capacidade de 8 hectômetros cúbicos.

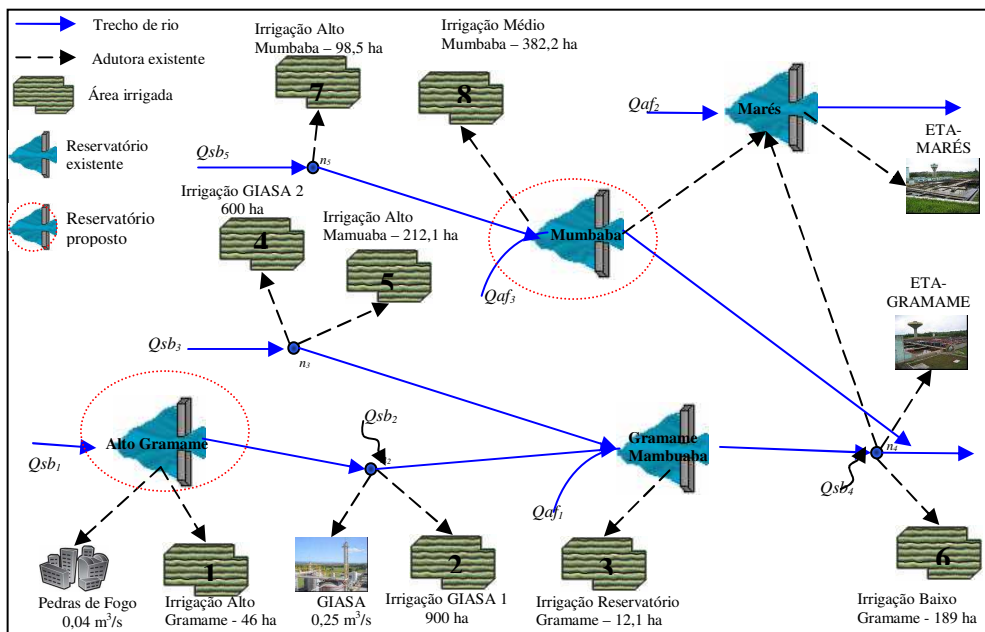


Figura 4.8 – CENÁRIO 5: Reservatório no rio Mumbaba e no Alto Gramame

Cenário 6

Este cenário corresponde à construção de um reservatório no rio Mumbaba (41 hectômetros cúbicos) e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame, via adutora.

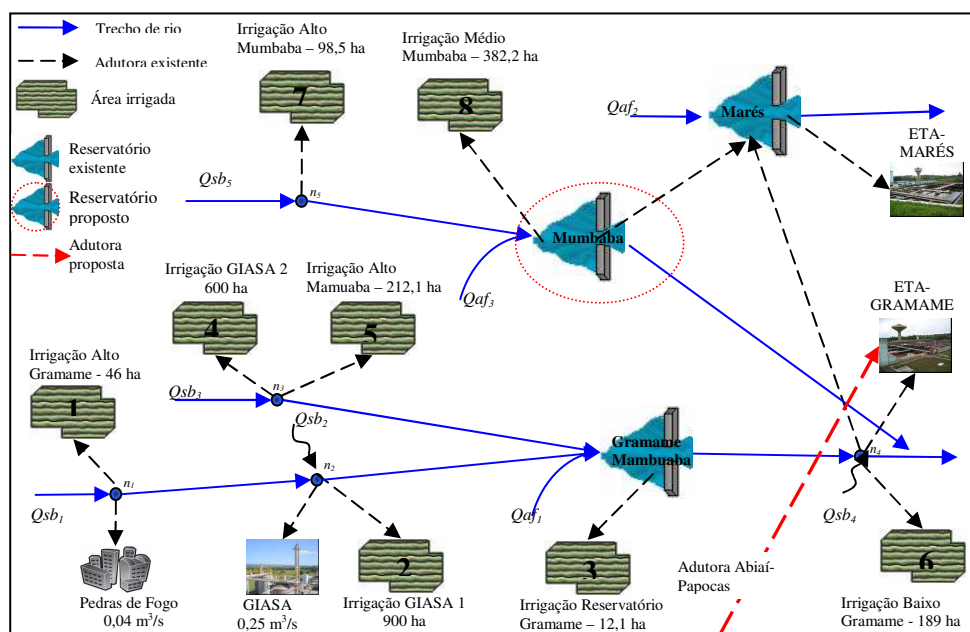


Figura 4.9 – CENÁRIO 6: Reservatório no rio Mumbaba e Adutora Abiaí-Papocas

Cenário 7

Neste cenário é avaliada a disponibilidade hídrica do sistema, devido à construção de um reservatório no alto curso do rio Gramame (8 hectômetros cúbicos) e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame, via adutora.

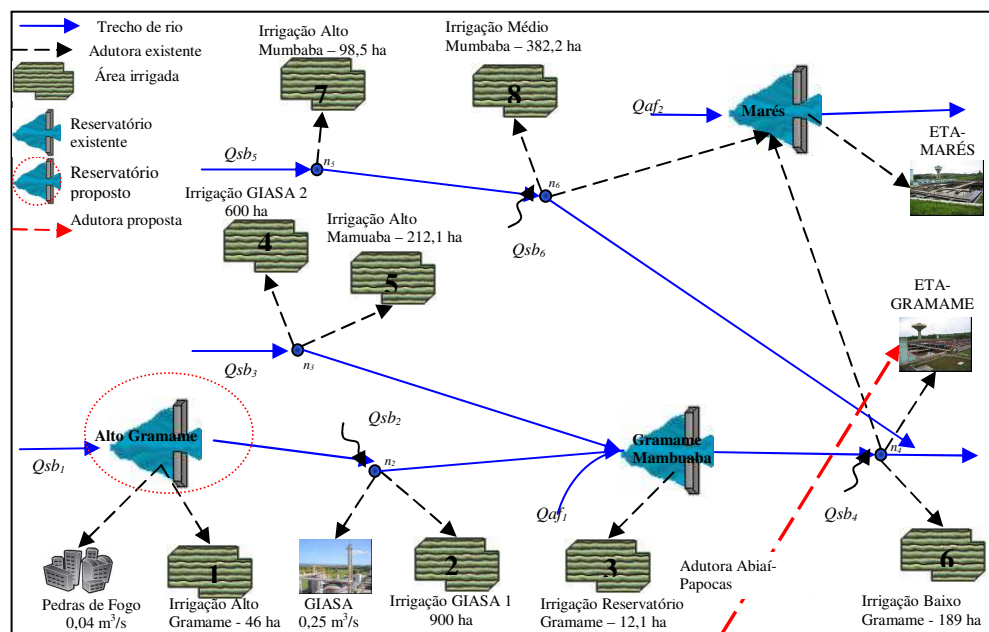


Figura 4.10 – CENÁRIO 7: Reservatório no Alto Gramame e Adutora Abiaí-Papocas

Cenário 8

Este cenário refere-se à construção de um reservatório no rio Mumbaba (41 hectômetros cúbicos), outro no alto curso do rio Gramame (8 hectômetros cúbicos) e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame, via adutora (Figura 4.2).

Cenário 9

Neste cenário, pretende-se avaliar o comportamento do sistema na garantia do atendimento às demandas hídricas, quando for observado um aumento de 2,17 % destas demandas, valor este baseado em dados do Plano diretor da bacia em estudo. Será considerado o aumento da demanda para todos os cenários anteriores e analisado o comportamento de cada sistema.

4.4 – Otimização Multiobjetivo

No estudo de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, é imprescindível o conhecimento do sistema no tocante às demandas hídricas necessárias, às disponibilidades, bem como as falhas ocorridas. Objetivando avaliar as relações demandas versus disponibilidades hídricas atual do sistema e aquelas provenientes de intervenções hidráulicas a serem implantadas na bacia, utilizou-se o modelo de otimização multiobjetivo, conforme descrito a seguir.

4.4.1 – Modelo de Otimização Multiobjetivo

O modelo de otimização multiobjetivo utilizado neste estudo, desenvolvido por Santos (2007), é baseado em programação linear, utilizando 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 Artifício de Linearização por Segmentos e da Programação Linear Sequencial.

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

4.4.2 – Funções Objetivo

A função objetivo especificada é uma medida do desempenho do modelo que se pretende otimizar e está sujeita as inúmeras restrições, representadas por equações de natureza linear e não linear (mas linearizadas) 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 dos objetivos utilizados nesse estudo serão abordadas a seguir.

- Demandas nas Tomadas 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 (DTDQ) foi utilizada a seguinte equação:

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

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 .

- 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.

Outro objetivo do modelo é minimizar o déficit entre o volume de água do reservatório no final do mês t e o volume meta estabelecido neste mês (VMR), representada na Equação 4.2:

$$VMR = \sum_t \left(\frac{VRmeta(t) - VR(t)}{VRmeta(t)} \right)^2 \quad (4.2)$$

onde,

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

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

- 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:

$$RL = \sum_{n=1}^{na} \left[\sum_{j=1}^{nc} Rb_j(n) - Cp_j(n) - Ca_j(n) - Cb_j(n) \right] \quad (4.3)$$

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:

$$Rb_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} Prod_{jk}(n) * Prc_j(n) * Ac_{jk}(n) \quad (4.4)$$

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:

$$Cp_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} Cprod_{jk}(n) * Ac_{jk}(n) \quad (4.5)$$

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 a 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:

$$ETO_{kt} = Kt_{kt} * Ev_{kt} \quad (4.6)$$

onde,

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

$E_{v_{kt}}$ – 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:

$$ETP_{jkt} = kc_{jt} * ETO_{kt} \quad (4.7)$$

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):

$$Pe_{kt} = 0,8 * P_{kt} - 25, \text{ para } P_{kt} \geq 75\text{mm} \quad (4.8)$$

$$Pe_{kt} = 0,6 * P_{kt} - 10, \text{ para } P_{kt} < 75\text{mm} \quad (4.9)$$

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:

$$Nl_{jkt} = ETP_{jkt} - Pe_{kt} - G_{jkt} - W_{kt} \quad (4.10)$$

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):

$$Eirr_{jk} = Eap_j * Esis_{jk} \quad (4.11)$$

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:

$$LR_{jkt} = \frac{CEa_{kt}}{5 * CE_j - CEa_{kt}} \quad (4.12)$$

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

$$LR_{jkt} = \frac{CEa_{kt}}{5 * CE_j} \quad (4.13)$$

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 4.12 e de 100% para a aplicação da Equação 4.13.

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:

$$Qirr_{jkt} = \frac{NI_{jkt}}{(1 - LR_{jkt}) * Eirr_{jk}} \quad (4.14)$$

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:

$$Ca_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} \left[\sum_{t=12(n-1)+1}^{12(n-1)+12} Pra_k * Qirr_{jkt} * Ac_{jk} \right] \quad (4.15)$$

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:

$$Cb_j(n) = \sum_{k=1}^{ni} \left[\sum_{t=12(n-1)+1}^{12(n-1)+12} \left(\frac{0,02726 * Prb_k * \Delta H_{jkt} * Qirr_{jkt} * Ac_{jk}(n)}{\eta_k} \right) \right] \quad (4.16)$$

onde,

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

ΔH_{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 ;

η_k – eficiência do sistema de bombeamento da unidade de produção ou perímetro k .

- 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 agrônômicas. A mão-de-obra total empregada MO (em diárias/ano) requerida nas unidades de produção ou perímetros é dada pela expressão:

$$MO = \sum_{n=1}^{na} \sum_{k=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nc} Hdc_{jk}(n) * Ac_{jk}(n) \quad (4.17)$$

onde,

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

- Função Multiobjetivo

Conforme mencionado 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 4.18.

$$\text{min fo} = \omega_1 * \text{DTDQ} + \omega_2 * \text{VER} + \omega_3 * \text{VMR} - \omega_4 * \text{RL} - \omega_5 * \text{MO} \quad (4.18)$$

onde,

ω_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.

4.4.3 – Equações de Restrições

- 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 descarregador de fundo, vertedouros e tomadas de água, através de nós (Figura 4.11). A vazão em cada um destes elementos depende de seus parâmetros hidráulicos e do nível de água dos reservatórios.

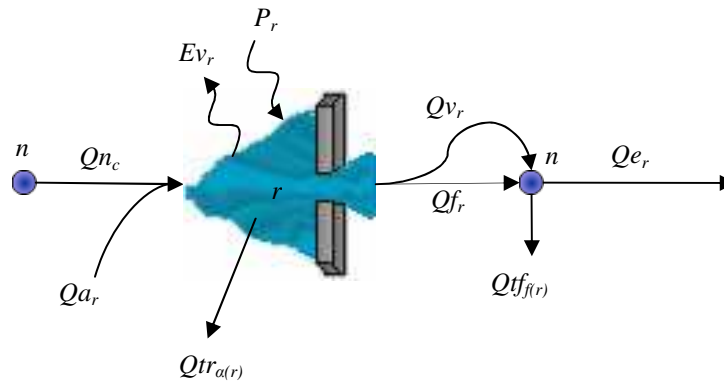


Figura 4.11 – Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.

O reservatório tem vários dados e equações associadas a ele. Dentre os dados podem ser ressaltados 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:

$$VR_r(t) = VR_r(t-1) + Qa_r(t) - \sum_{\alpha(r)} Qtr_{\alpha(r)}(t) - Qf_r(t) - Qv_r(t) + P_r(t) - Ev_r(t) + Qn_c(t) \quad (4.19)$$

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 ;

$Qa_r(t)$ – volume correspondente a vazão afluyente ao reservatório r no mês t ;

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

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

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

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

$Qf_r(t)$ – volume correspondente a vazão de descarga de fundo do reservatório r no mês t ;

$Qv_r(t)$ – volume vertido do reservatório r no mês t ;

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

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

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

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

$$P_r(t) = p_r(t) * \left(\frac{AR_r(t) + AR_r(t-1)}{2} \right) \quad (4.20)$$

$$E_r(t) = e_r(t) * \left(\frac{AR_r(t) + AR_r(t-1)}{2} \right) \quad (4.21)$$

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 ;

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:

$$0 \leq Qtr_{\alpha(r)}(t) \leq Qtrmax_{\alpha(r)}(t) \quad (4.22)$$

$$Qtr_{\alpha(r)}(t) \geq 0, \text{ se } HR_r(t) \geq Htr_{\alpha(r)} \quad (4.23)$$

onde,

$Qtrmax_{\alpha(r)}$ – vazão máxima de captação pela α -ésima tomada d'água do reservatório r ;

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

$Htr_{\alpha(r)}$ – representa a cota da α -ézima tomada d'água no reservatório r .

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

$$0 \leq Qv_r(t) \leq Qvmax_r \quad (4.24)$$

$$Qv_r(t) \geq 0, \text{ se } HR_r(t) \geq Hvert_r \quad (4.25)$$

onde,

$Qvmax_r$ – representa a vazão máxima vertida projetada para o reservatório r ;

$Hvert_r$ – representa a cota da soleira do vertedor do reservatório r .

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

$$Qfmax_r(t) = Cf_r * Af_r * \sqrt{2g(HR_r(t) - Hfs_r)} \quad (4.26)$$

onde,

Cf_r – coeficiente de vazão de descarga de fundo do reservatório r ;

Af_r – área da seção transversal do tubo de descarga de fundo do reservatório r ;

Hfs_r – cota de jusante da geratriz inferior do tubo de descarga de fundo do reservatório r .

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

O volume de água do reservatório r esta limitado por:

$$VRmorto_r \leq VR_r(t) \leq VRcap_r \quad (4.27)$$

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 superior ao 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.

- Critérios Operacionais e Agronômicos

Outros aspectos relacionados com a agricultura irrigada são as 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:

$$\sum_{j=1}^{nc} Q_{irr_{jkt}} * A_{c_{jk}} \leq Qtmax_k \quad (4.28)$$

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 motor-bomba, como é mostrado a seguir:

$$Qtmax_k = 3,6 * nh_k * nb_k * Vbcap_k \quad (4.29)$$

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 motor-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 caba 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:

$$\sum_{j=1}^{nc} \xi_{jkt} * Ac_{jk}(n) \leq Apmax_{kt} \quad (4.30)$$

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:

$$Acmin_{jk}(n) \leq Ac_{jk}(n) \leq Acmax_{jk}(n) \quad (4.31)$$

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 .

- 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:

$$Qnmin_c(t) \leq Qn_c(t) \leq Qnmax_c(t) \quad (4.32)$$

onde,

$Qnmin_c(t)$ – vazão mínima na c -ézima calha de rio no mês t ;

$Qnmax_c(t)$ – vazão máxima na c -ézima 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:

$$\sum_i Qentra_{i,n}(t) = \sum_j Qsai_{j,n}(t) \quad (4.33)$$

onde,

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

$Qsai_{j,n}(t)$ – representa a j -ézima 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.

4.4.4 – Implementação do Modelo de Otimização Multiobjetivo

O Artífício de Linearização por Segmentos (trechos) garante, para a minimização de uma função convexa (caso da Equação 4.18), que os valores atribuídos às variáveis de decisão associadas aos segmentos vão assumindo valores crescentes, até atingir seus valores máximos, de forma seqüencial, do primeiro trecho em direção ao último. Porém, observou-se que em certos casos isso não ocorre, ou seja, para a modelagem proposta, os volumes mensais do reservatório, representados por variáveis de decisão segmentadas, podem assumir valores que sejam combinações de valores de diferentes variáveis de decisão associadas aos trechos segmentados, resultando em incorretos volumes de água mensais armazenados no reservatório. Desta forma há a necessidade de que alguma restrição seja imposta a fim de auxiliar na determinação correta destes volumes.

Isso ocorre devido ao caráter multiobjetivo do modelo, onde o atendimento de uma 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 , é realizado uma diminuição do volume evaporado através do preenchimento dos últimos trechos segmentados do volume de água do reservatório, apesar da curva *área-volume* ser convexa. Isso decorre do fato de as declividades dos últimos trechos segmentados serem menores do que os primeiros trechos, o que resultará em um menor valor da área do espelho d'água do reservatório e conseqüentemente num 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.

Tem-se que, logo na primeira otimização ($l = 1$) 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 analisado o valor calculado para a função objetivo f_o , sendo avaliado através do erro relativo ($erro_{f_o}$), dado por:

$$erro_{f_o} = \left| \frac{f_{o_l} - f_{o_{l-1}}}{f_{o_l}} \right| \leq tol \quad (4.34)$$

onde,

l – indica o número de vezes que está sendo aplicado o processo de otimização em PL ($l \geq 2$);

f_{o_l} – valor da função objetivo para a l -ésima otimização.

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

O fluxograma geral do modelo está apresentado na Figura 4.12. 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.

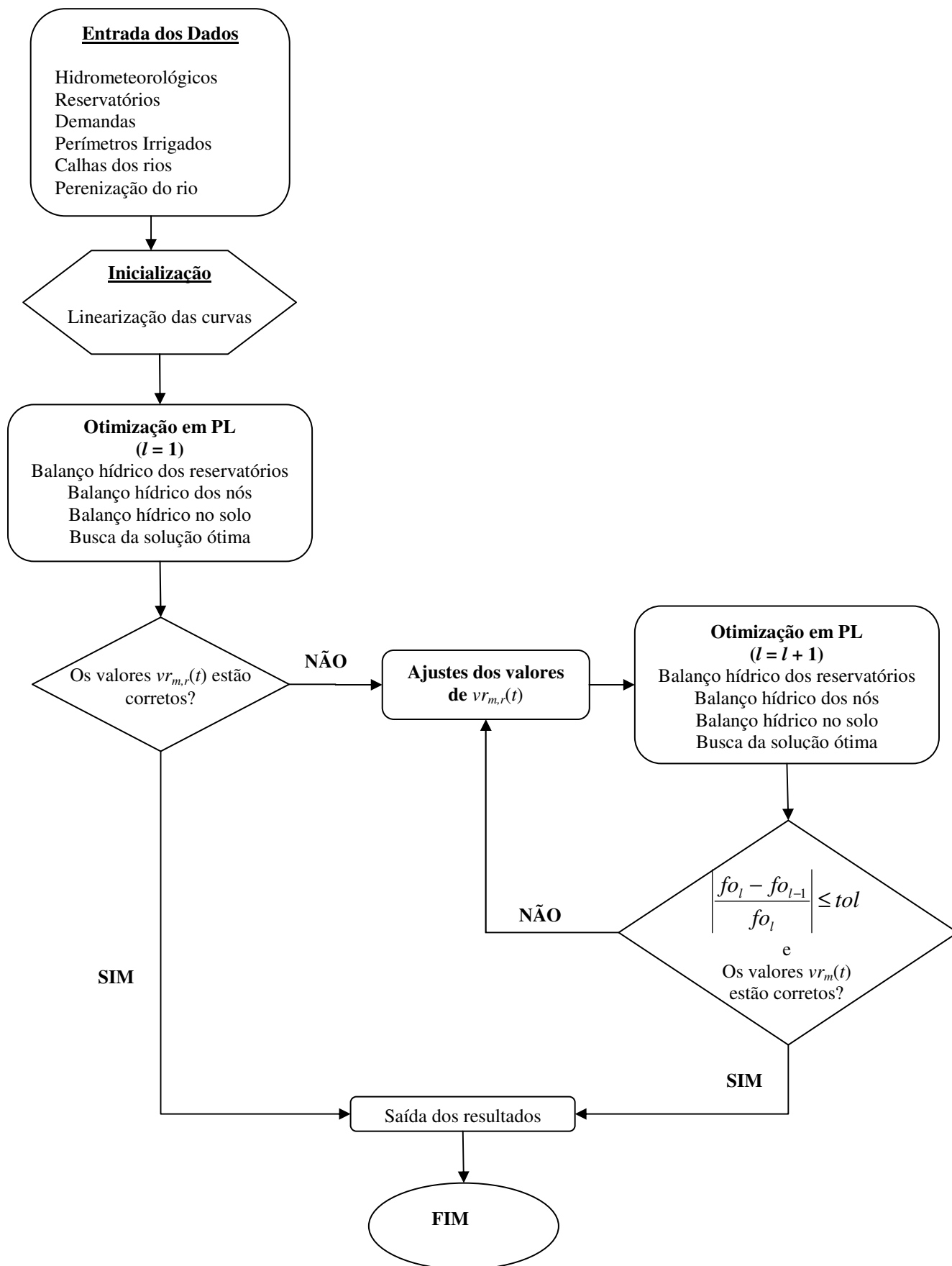


Figura 4.12 – Fluxograma do modelo de otimização

4.4.5 – Indicadores

Para a análise dos resultados do modelo de otimização multiobjetivo foram utilizados os indicadores de desempenho das demandas hídricas relativas aos abastecimentos humano e industrial e os indicadores de eficiência dos reservatórios.

4.4.5.1 – Indicadores de Desempenho das Demandas

Hashimoto *et al.* (1982) estabeleceram três indicadores de desempenho, que podem ser aplicados também a sistemas de recursos hídricos, os quais são denominados de *Confiabilidade, Resiliência e Vulnerabilidade*. Esses indicadores auxiliam na análise do desempenho do sistema hídrico especialmente em períodos críticos de seca, além de dar melhores condições para o analista prever cenários futuros. Portanto, para análise do desempenho do sistema hídrico analisado neste estudo, foram utilizados esses três indicadores e o indicador de sustentabilidade geral proposto por Loucks *et al.* (1997), apud Kjeldsen e Rosbjerg (2001), descritos a seguir.

- i) a confiabilidade expressa a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas, ou seja, esteja num conjunto S de NF_i valores considerados satisfatórios entre uma população de NT valores. Andrade (2006) considera a confiabilidade como sendo o oposto do risco e quanto mais próximo de 1 (um) for o seu valor, melhor será a confiabilidade do sistema;

$$Conf_i = \text{Prob}\{Q_{t,i} \in S\} = \text{Prob}\{Q_{t,i} \geq D_{t,i}\} = 1 - \frac{NF_i}{NT} \quad (4.35)$$

- ii) a resiliência representa a forma como o sistema retorna de uma falha caso esta tenha ocorrido. Em alguns casos ter um sistema que tenha muitas falhas, mas que se recupere rapidamente, é preferível a um sistema que tenha poucas falhas, mas que se recupere lentamente. A baixa resiliência é caracterizada por eventos com falhas prolongadas e de baixa recuperação. A Resiliência, também, é definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em um estado insatisfatório I .

$$Res_i = \text{Prob}\{Q_{t+1,i} \in S \mid Q_{t,i} \in I\} = \text{Prob}\{Q_{t,i} \geq D_{t,i} \mid Q_{t,i} < D_{t,i}\} \quad (4.36)$$

iii) a vulnerabilidade mede a magnitude da falha caso esta tenha ocorrido. Quanto maior o déficit hídrico, maior será a vulnerabilidade. Ela pode ser definida como a média do percentual de déficits do conjunto de todos os valores insatisfatórios.

$$Vul_i = \frac{1}{NF_i} \sum_{t=1}^{NT} \left| \frac{D_{t,i} - Q_{t,i}}{D_{t,i}} \right| \quad (4.37)$$

iv) outro indicador que foi adotado, neste estudo, para avaliar o comportamento hídrico do sistema é o índice de sustentabilidade geral proposto por Loucks (1997), mostrado a seguir:

$$\text{Sustentabilidade} = \text{Confiabilidade} * \text{Resiliência} * [1 - \text{Vulnerabilidade}] \quad (4.38)$$

Percebe-se que a sustentabilidade do sistema hídrico é diretamente proporcional a confiabilidade e a resiliência e inversamente proporcional a vulnerabilidade.

4.4.5.2 – Indicadores de Eficiência Associados aos Reservatórios

Os indicadores de eficiência dos reservatórios definidos por Curi (2005) constantes em Barbosa (2008) também foram utilizados neste estudo e estão descritos a seguir:

- η_{Vr} – relação entre a variação volumétrica do reservatório e o volume total afluente entre o período inicial e final. Esse índice denota a perda ou ganho de volume no reservatório.
- η_E - relação entre o volume evaporado e a vazão total afluente no período de estudo.
- η_P - relação entre o volume precipitado sobre o reservatório e a vazão total afluente no período de estudo. Esse índice indica o percentual de precipitação direta sobre a bacia hidráulica do reservatório.
- η_V - relação entre o vertimento (sangria do reservatório) e a vazão total afluente no período de estudo. Esse índice estabelece também a eficiência quanto ao armazenamento da água e capacidade do reservatório.

- η_e - relação entre a água utilizada (descarregadores, tomadas d'água para abastecimento humano e irrigação) e a vazão total afluyente no período de estudo.

A seguir são descritos outros indicadores associados aos reservatórios que foram desenvolvidos por Vieira (1996) para bacias hidrográficas e adaptados por Curi (2005).

- IAP – Índice de Ativação da Potencialidade, definido como a razão entre a disponibilidade e a potencialidade;
- IUD - Índice de Utilização da Disponibilidade, razão entre a demanda e a disponibilidade;
- IUP - Índice de Utilização da Potencialidade, razão entre a demanda e a potencialidade;

De acordo com Curi (2005), em um sistema integrado de reservatórios, a *potencialidade* pode ser considerada como o somatório de todos os afluxos ao sistema com as precipitações diretas sobre os reservatórios. Já a *disponibilidade* pode ser vista como a diferença entre a potencialidade e as perdas em trânsito, evaporações nos reservatórios e vertimentos no leito do rio à jusante do sistema e, as *demandas* são representadas por todos os usos consuntivos (abastecimento humano e irrigação).

4.5 – Análise Multicriterial

Objetivando-se uma análise multicriterial mais realista, este estudo fundamenta-se na análise de 03 (três) critérios: econômico, social e ambiental; que foram desmembrados hierarquicamente em outros critérios, cuja escolha foi baseada em levantamentos bibliográficos e disponibilidade de dados, além da representatividade dos principais problemas existentes na área de estudo.

Neste capítulo, procura-se identificar os critérios e seus atributos (variáveis representativas dos critérios), quantificá-los quantitativa ou qualitativamente, com sua apropriada definição de escala, estabelecer se serão maximizados ou minimizados e, em seguida, hierarquicamente vinculá-los ao seu correspondente critério.

4.5.1 – O Método PROMETHEE

O Método PROMETHEE é baseado na relação hierárquica que consiste em melhorar a ordem de dominância, através de comparações par-a-par. Este processo segue quatro etapas distintas:

- estruturação hierárquica;
- estabelecimento das funções de preferência;
- formação da matriz de avaliação e fluxos de importância;
- classificação das alternativas.

A análise multicriterial apresenta uma melhor compreensão quando estruturada na forma de matriz, que é denominada de matriz de avaliação ou de impacto, conforme mostrada a seguir:

Tabela 4.1 - Matriz de avaliação

		Alternativas				
		x_1	x_2	x_3	.....	x_n
Critérios	1	$f_1(x_1)$	$f_1(x_2)$	$f_1(x_3)$	.....	$f_1(x_n)$
	2	$f_2(x_1)$	$f_2(x_2)$	$f_2(x_3)$	.....	$f_2(x_n)$
	3	$f_3(x_1)$	$f_3(x_2)$	$f_3(x_3)$	.....	$f_3(x_n)$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	p	$f_p(x_1)$	$f_p(x_2)$	$f_p(x_3)$	.....	$f_p(x_n)$

Em síntese, cada uma das **n** alternativas de solução é avaliada de acordo com os **p** critérios estabelecidos no processo decisório.

Os critérios de avaliação das alternativas representam a especificação dos objetivos em características e qualidades, em medidas adequadas de desempenho das soluções de planejamento. Na análise, há uma comparação de cada alternativa com todas as demais, com estabelecimento de uma hierarquia que aponta o conjunto das soluções de maior atratividade (*não-dominadas*) e a escolha da *solução de melhor compromisso* e, ainda melhor, *a solução mais adequada*, em termos de melhor

atendimento do conjunto dos objetivos e sob os critérios fixados para a análise (Braga, 2001).

4.5.2 – Função de Preferência

As relações de preferência podem ser expressas em termos de uma função de preferência $P_j(d_i(a,b))$ para cada critério “i” e tipo $j = I, II, III, IV, V$ e VI . Esta função cujo valor está compreendido entre 0 e 1, indica a intensidade da preferência de uma alternativa “a” sobre uma alternativa “b” com relação aos desvios de valores:

$$d_i(a,b) = (-1)^k [f_i(a) - f_i(b)]$$

Onde: $k = 0$, se deseja maximizar; e

$k = 1$, se deseja minimizar o valor do critério i.

O valor 1 indica a preferência absoluta de uma alternativa sobre a outra com relação a um dado critério. As funções de preferência, ilustradas na Figura 4.13, são normalmente definidas para o método PROMETHEE. Para cada uma delas são fixados, no máximo, dois parâmetros que representam para cada tipo de função o seguinte (Braga e Gobetti, 1997):

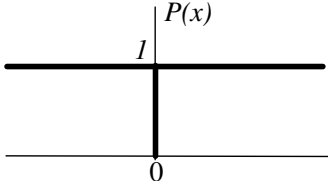
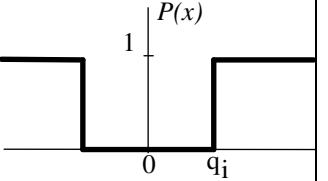
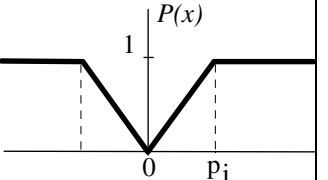
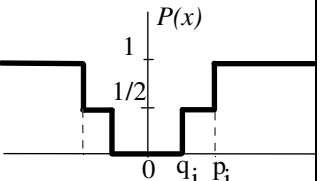
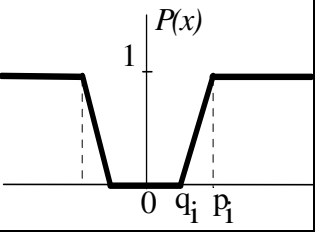
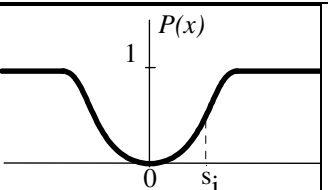
Função para o critério <i>i</i>	Gráfico <i>bP_ia</i> <i>aP_ib</i>	Parâmetros necessários
Tipo I $P_I(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } x_i = 0 \\ 1 & \text{se } x_i \neq 0 \end{cases}$		-
Tipo II $P_{II}(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } |x_i| \leq q_i \\ 1 & \text{se } |x_i| > q_i \end{cases}$		q_i
Tipo III $P_{III}(x_i) = \begin{cases} |x_i| / p_i & \text{se } |x_i| \leq p_i \\ 1 & \text{se } |x_i| > p_i \end{cases}$		p_i
Tipo IV $P_{IV}(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } |x_i| \leq q_i \\ 1/2 & q_i < |x_i| \leq p_i \\ 1 & |x_i| > p_i \end{cases}$		q_i, p_i
Tipo V $P_V(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } |x_i| \leq q_i \\ \frac{|x_i| - q_i}{p_i - q_i} & q_i < |x_i| \leq p_i \\ 1 & \text{se } |x_i| > p_i \end{cases}$		q_i, p_i
Tipo VI $P_{VI}(x_i) = 1 - e^{-x_i^2 / 2s_i^2}$		s_i

Figura 4.13 – Funções de preferência

TIPO I (Usual): Quando o desvio $d(a, b)$ entre as alternativas “*a*” e “*b*” for maior que zero, isto é, para a alternativa “*a*” o critério “*i*” assumir maior valor, a função de preferência assume valor um, neste caso a alternativa “*a*” é preferível a “*b*”. Caso contrário, a função de preferência é zero e não existe preferência absoluta da alternativa “*a*” sobre a alternativa “*b*”.

Simbolicamente: Se $d(a,b) > 0$, então $P(a,b) = 1$, caso contrário $P(a,b) = 0$.

TIPO II (U-shape): O intervalo delimitado por $x_i \leq q_i$, caracteriza uma região de indiferença com relação a preferência da alternativa “a” sobre a alternativa “b”, relativo ao critério “i” e a função de preferência assume o valor “0”. Para desvios maiores que q_i a função de preferência é igual a “1” e a alternativa “a” tem preferência absoluta sobre a alternativa “b”.

Simbolicamente: Se $d(a, b) > q_i$, então $P(a, b) = 1$, caso contrário $P(a, b) = 0$.

TIPO III (V-shape): No intervalo compreendido entre $x_i \leq p_i$, é estabelecido um aumento linear da intensidade da preferência da alternativa “a” sobre a alternativa “b”, proporcional ao desvio de valores do critério *i*. A partir deste valor a alternativa “a” passa a ter preferência absoluta sobre a alternativa “b”.

Usando símbolos: Se $d(a, b) > p_i$, então $P(a, b) = 1$, caso contrário $P(a, b) = (1/p_i) * d(a, b)$.

TIPO IV (Nível): A função ‘*tipo escada*’ assume indiferença quando o desvio $x_i \leq q_i$; no intervalo delimitado por $q_i < x_i \leq p_i$, a alternativa “a” tem a mesma preferência que a alternativa “b” e, a partir de p_i , a alternativa “a” tem preferência absoluta sobre a alternativa “b”.

Usando símbolos: Se $d(a, b) > p_i$, então $P(a, b) = 1$,

Se $d(a, b) \leq q_i$, então $P(a, b) = 0$,

Se $q_i < d(a, b) \leq p_i$, então $P(a, b) = 0,5$.

TIPO V (Linear): Quando o desvio $d(a, b)$ entre as alternativas “a” e “b” assumir valor maior que o parâmetro p_i , a função de preferência assume o valor 1, isto é, a alternativa “a” é preferível à alternativa “b”; quando $q_i < d(a, b) \leq p_i$, a intensidade da preferência da alternativa “a” aumenta linearmente sobre a alternativa “b”; e, quando $d(a, b)$ for menor que o parâmetro q_i , a alternativa não é preferível à alternativa “b”.

Usando símbolos: Se $d(a, b) > p_i$, então $P(a, b) = 1$,

Se $d(a, b) \leq q_i$, então $P(a, b) = 0$,

Se $q_i < d(a, b) \leq p_i$, então $P(a, b) = (1/(p-q)) * (d(a, b) - q)$.

TIPO VI (Gaussiana): A intensidade da preferência aumenta continuamente, de forma exponencial, de 0 até 1. O parâmetro “ s_i ” indica a distância da origem até o ponto de inflexão da derivada da função.

Neste trabalho foram adotadas para os critérios, as funções de preferência dos tipos II e III. Para a função do tipo II, o parâmetro “ q ” adotado foi de 10 % e para a função do tipo III foi adotado o parâmetro “ p ” como sendo igual a 5 %.

O método PROMETHEE é baseado em comparações par-a-par. O primeiro passo para a sua aplicação é a definição dos índices de preferência agregados e fluxos de hierarquização.

Índice de preferência agregado: sejam $a, b \in A$, e:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)\alpha_j$$

onde:

α_j são os pesos para cada critério.

$\pi(a, b)$ expressa como e com que grau “ a ” é preferível a “ b ” sobre todos os critérios e $\pi(b, a)$ expressa como “ b ” é preferível a “ a ”. Usualmente tem-se $\pi(a, b)$ e $\pi(b, a)$ positivos, e com as seguintes propriedades:

$$\begin{cases} \pi(a, a) = 0 \\ 0 \leq \pi(a, b) \leq 1 \end{cases} \quad \forall a, b \in A$$

Fluxos de importância: o índice de preferência global possibilita a avaliação de cada alternativa “ a ”, face a $(n-1)$ alternativas em “ a ”. Para tanto, define-se dois fluxos de importância, como seguem:

- *Fluxo de importância positivo:*

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

O fluxo de importância positivo expressa como uma alternativa “ a ” supera as demais, ou melhor, é o caractere de importância de “ a ”. O maior valor de $\Phi^+(a)$ corresponde à melhor alternativa.

- *Fluxo de importância negativo:*

$$\Phi^{-}(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

Expressa como uma alternativa “a” é superada pelas outras. $\Phi^{-}(a)$ representa a fraqueza de “a”.

A ordenação das alternativas é feita com base nos valores de $\Phi^{+}(a)$ e $\Phi^{-}(a)$. Uma ordenação parcial das alternativas é alcançada em PROMETHEE I e uma ordenação total em PROMETHEE II.

O balanço entre os fluxos de importância positivo e negativo proporciona a escolha baseada no maior fluxo líquido de preferência. O maior valor corresponderá a melhor alternativa:

$$\Phi(a) = \Phi^{+}(a) - \Phi^{-}(a)$$

A ordenação completa para o método PROMETHEE II é determinada por:

$$\text{“a” é preferido à “b” (a } P^{II} b) \quad \text{se} \quad \Phi(a) > \Phi(b)$$

$$\text{“a” é indiferente à “b” (a } I^{II} b) \quad \text{se} \quad \Phi(a) = \Phi(b)$$

O método PROMETHEE é de fácil aplicação, envolvendo ao mesmo tempo uma análise mais completa e explícita e apresenta, ainda, a grande vantagem de associar as incertezas inerentes ao sistema com o método.

4.5.3 – Composição das Alternativas Avaliadas

Os 8 (oito) primeiros cenários de avaliação considerados para avaliar as intervenções hidráulicas na bacia, aonde vários atributos associados aos critérios foram mensurados através da técnica de otimização multiobjetivo realizada na seção anterior, irão compor as alternativas que serão avaliadas na análise multicriterial e que estão apresentadas a seguir.

Alternativa 01 – corresponde a infra-estrutura hídrica atual;

Alternativa 02 – construção de um reservatório no rio Mumbaba (41 hectômetros cúbicos) à montante da barragem de nível atual;

Alternativa 03 – transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame, via adutora;

Alternativa 04 – construção de um reservatório no alto curso do rio Gramame (8 hectômetros cúbicos) próximo a cidade de Pedras de Fogo;

Alternativa 05 – sugere a construção dos reservatórios nos rios Mumbaba (41 hectômetros cúbicos) e Gramame (alto curso) com capacidade de 8 hectômetros cúbicos;

Alternativa 06 – construção de um reservatório no rio Mumbaba (41 hectômetros cúbicos) e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame, via adutora;

Alternativa 07 – sugere a construção do reservatório no alto curso do rio Gramame (8 hectômetros cúbicos) e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame, via adutora;

Alternativa 08 – sugere a construção dos reservatórios nos rios Mumbaba (41 hectômetros cúbicos) e Gramame (alto curso), com capacidade de 8 hectômetros cúbicos e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame, via adutora;

4.5.4 – Implementação do Método PROMETHEE

Na Figura 4.14 é apresentado o fluxograma geral do método PROMETHEE, que foi desenvolvido em ambiente Matlab.

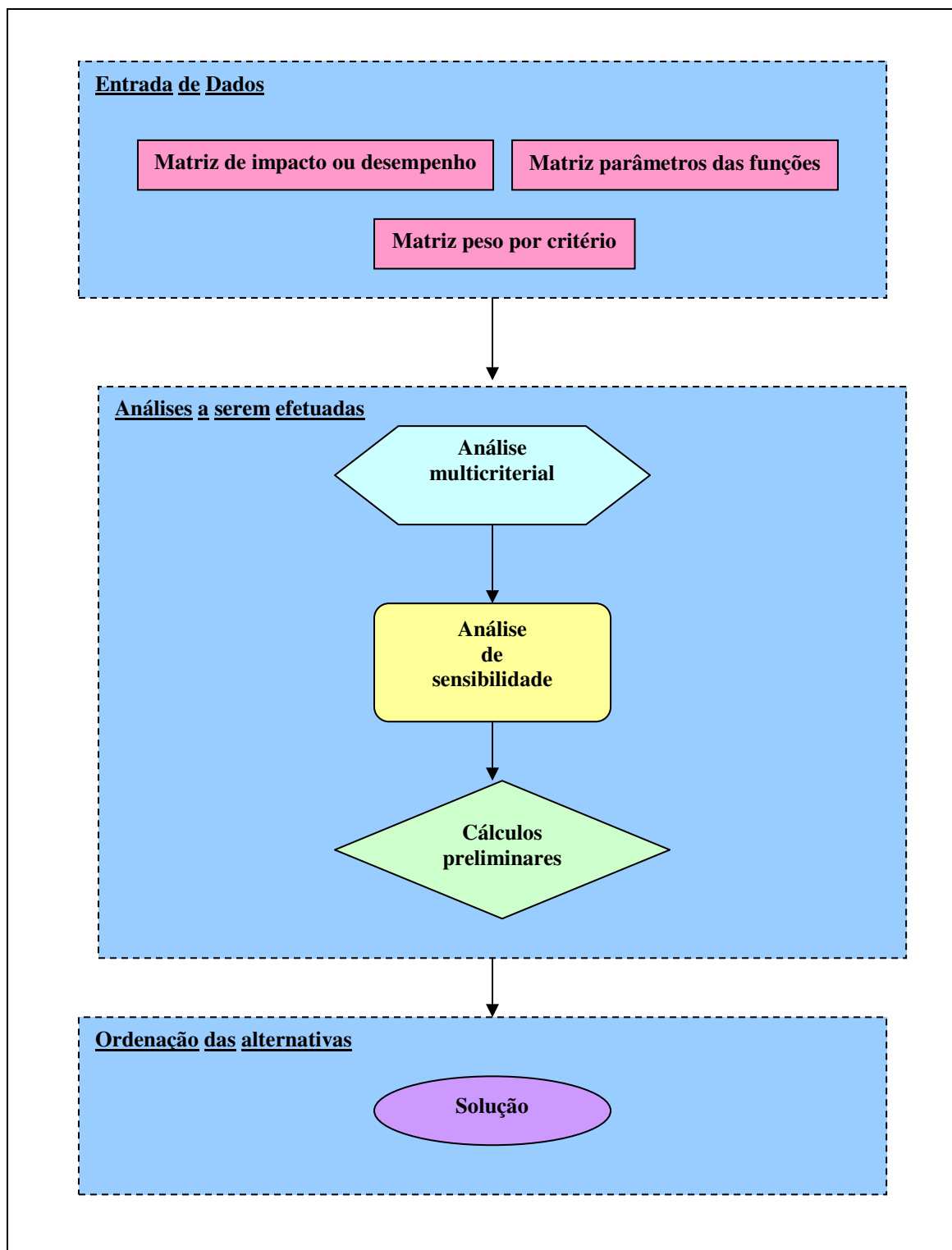


Figura 4.14 – Fluxograma do funcionamento do método PROMETHEE

Entrada de dados – os dados de entrada são fornecidos ao método através das seguintes matrizes: *matriz de impacto ou desempenho*, composta pelos valores atribuídos aos atributos do critério (i) para a ação (j); *matriz parâmetros das funções*, que informa se o problema é de maximização (0) ou minimização (1) do critério i, o tipo

de função aplicada ao critério i , os valores dos parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência forte) da função relativa ao critério i , e o peso relativo ao critério i (valor subjetivo para avaliação); **matriz peso por critério**, nesta matriz devem ser definidos os atributos por critério e o peso parcial do critério.

Análises a serem efetuadas – composta de três etapas, quais sejam: **análise multicriterial**, onde a matriz dos fluxos de hierarquização (importância) é calculada pelo método; **análise de sensibilidade**, isto é, é redefinida uma matriz de pesos totais para os atributos devido as variações nos pesos parciais atribuídos a cada critério; e, **cálculos preliminares**, nesta etapa é definido o número de ações (m), atributos (n) e critérios (nc).

Ordenação das alternativas – nesta etapa o método fornece um arquivo de solução com o ranking das alternativas.

4.5.5 – Critérios de Avaliação

De acordo com Porto *et al.* (1997) a tomada de decisões em sistemas de recursos hídricos exige que sejam considerados aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, mutáveis no tempo e associados a incertezas de difícil mensuração. Baseado nisso é que foram incluídos, neste estudo, os critérios econômicos, sociais e ambientais, para auxiliar a tomada de decisão para escolha de alternativas de infraestrutura hídrica a serem implantadas, na bacia em estudo, tendo em vista assegurar o abastecimento de água em períodos de escassez hídrica. Os critérios a serem avaliados foram subdivididos em subcritérios (Figura 4.15), cujas mensurações são os atributos, ou seja, adotou-se uma estrutura hierárquica para análise do sistema. A idéia por trás desta hierarquização está na forma de quantificá-los ou qualificá-los e expressar a preferência dos decisores. Desta forma a preferência relativa dos decisores poderá ser expressa em dois níveis: um técnico (seguindo uma certa lógica quando analisado a nível de atributos dos critérios) e outro mais subjetivo (que poderá expressar possíveis preferências dos decisores com relação aos critérios quando efetuada uma análise de sensibilidade, conforme será descrito posteriormente).

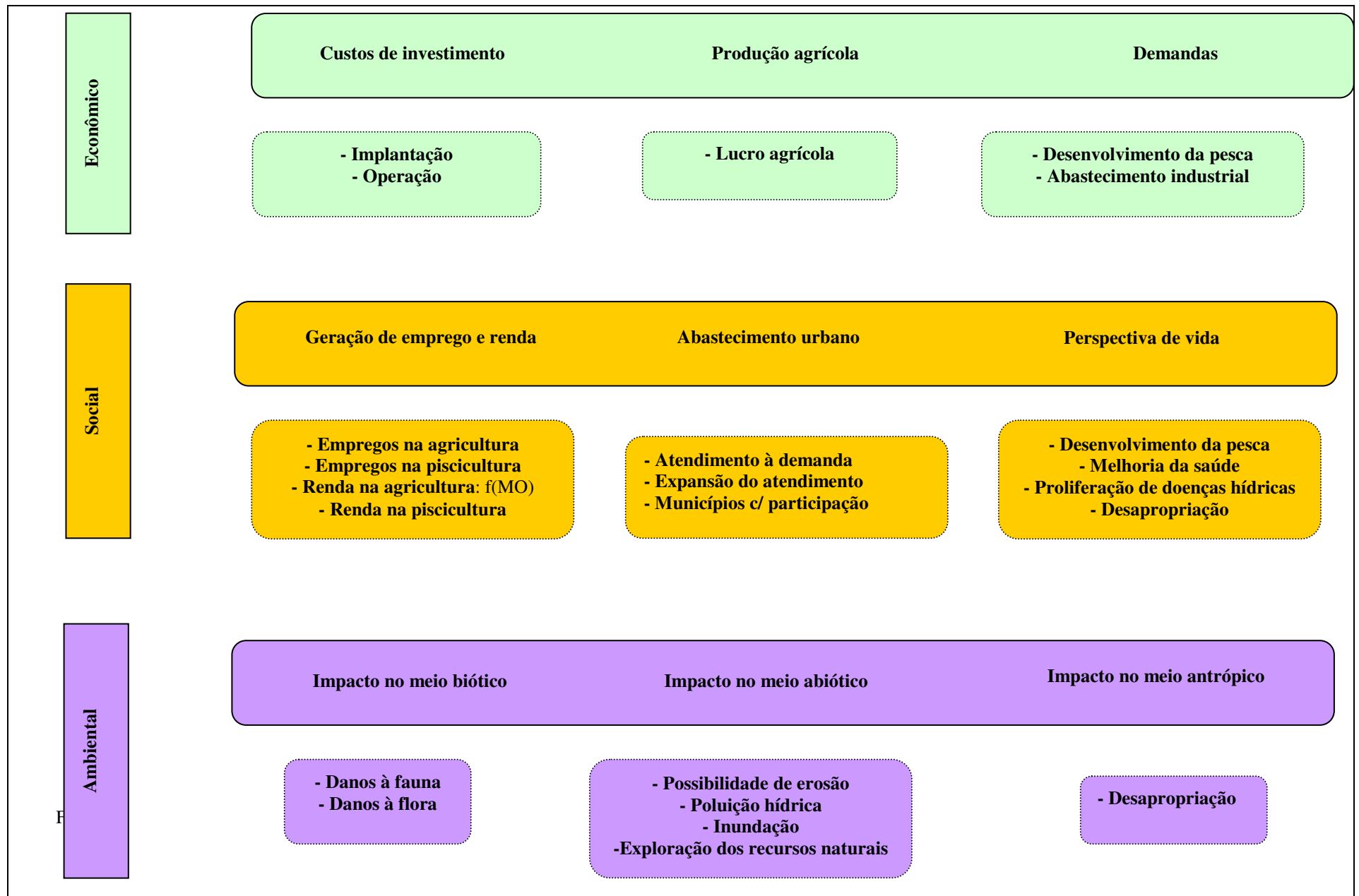


Figura 4.15 – Critérios e subcritérios considerados na análise multicriterial

4.5.5.1 – Critérios Segundo Objetivos Econômicos

Os critérios para a análise econômica foram estabelecidos com o objetivo de retratar os anseios dos decisores do ponto de vista econômico e, estabelecer a sua importância relativa aos demais aspectos a serem levados em consideração na análise multicriterial.

Neste estudo, o critério econômico é composto dos seguintes subcritérios:

1. Custos relativos às intervenções hidráulicas
 - de implantação
 - de operação
2. Lucro agrícola (R\$)
3. Piscicultura extensiva: Produtividade de peixes
4. Atendimento à demanda para abastecimento industrial

1 – Custos de Implantação e Operação

- Custos de implantação

A estimativa do custo de implantação de um reservatório é bastante complexa, considerando-se que, associado ao custo, existem vários fatores como: capacidade volumétrica, topografia do terreno, área de inundação, tipo de material, acesso ao local, disponibilidade de material e equipamento, etc. Então, uma estimativa razoável exigiria conhecimentos e uma quantificação de todos os fatores determinantes para a composição do custo de implantação de um reservatório. Esse tipo de custo (implantação) torna-se relevante quando da existência de limitações orçamentárias, passando a ser, neste caso, um fator preponderante para a efetiva execução da obra. Porém, neste estudo foi considerado que o custo de implantação poderá não ser de grande relevância por tratar-se de obra pública e, conseqüentemente, depender mais de uma decisão política. Além disso, numa análise multicriterial o mais importante é saber, numa análise comparativa, qual alternativa requer maiores recursos para sua implantação e o seu peso no processo decisório. Desta forma, pode-se definir como atributo a este critério o estabelecimento de um valor aproximado de construção, associado a ordem de grandeza da obra.

Os custos de implantação relativos à construção das barragens planejadas nos rios Mumbaba e Gramame adotados no estudo, são os mesmos considerados por Santos (2004); e o do sistema adutor Abiaí-Papocas foi obtido em CAGEPA (2007), ou seja:

- Barragem no rio Mumbaba => R\$ 9.450.000,00
- Barragem no rio Gramame => R\$ 2.057.500,00
- Sistema adutor Abiaí-Papocas => R\$ 88.934.656,72

- Custos de operação

Para o cálculo dos custos anuais de operação das barragens foram adotados os mesmos procedimentos adotados por Santos (2004), isto é, como sendo iguais aos seus respectivos custos de implantação vezes o coeficiente de 0,0067, admitido como sendo 0,05 % do fator de atualização (FA) dos custos energéticos (SCIENTEC, 2000b), dado por:

$$FA = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \times \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (4.39)$$

onde:

FA – é o fator de atualização igual a 13,46;

“*i*” – é a taxa de descontos ou de juros anuais, adotado como sendo igual a 12 %;

“*e*” – é a taxa de aumento anual da energia, adotado como igual a 6 %;

“*n*” – é o número de anos de vida útil do projeto, igual a 30.

A seguir, são apresentadas as estimativas dos custos anuais de operação das barragens planejadas nos rios Mumbaba e Gramame e do Sistema Adutor Abiaí-Papocas.

- Barragem no rio Mumbaba => R\$ 63.315,00
- Barragem no rio Gramame => R\$ 13.785,25
- Sistema adutor Abiaí-Papocas => R\$ 595.862,20

2 – Lucro Agrícola ou Receita Líquida

Com o aumento de água para atendimento à demanda das culturas agrícolas é possível alocar uma maior área para plantio e garantir a obtenção de lucro anual ao longo do período. Foi considerado, neste estudo, o efeito devido à lucratividade obtida com a adoção das medidas de intervenção que objetiva promover um incremento na oferta hídrica para atendimento das demandas. Os dados relativos à lucratividade ou receita líquida foram obtidos no modelo de otimização multiobjetivo e encontram-se na Tabela 6.31 do Capítulo 6.

3 – Piscicultura extensiva: Produtividade de peixes

Os tipos de piscicultura existentes são:

- piscicultura extensiva;
- piscicultura semi-intensiva;
- piscicultura intensiva;
- existe ainda, a piscicultura superintensiva.

A piscicultura extensiva consiste no cultivo de peixes sem a prática de fertilizar a água nem de alimentar os peixes, ou seja, os alimentos naturais da água do reservatório são a única fonte de alimentação. Diante disso, neste estudo, será adotada a prática da piscicultura extensiva, por tratar-se de açude público, cujo principal uso é o abastecimento humano e, neste caso, não se pode realizar a prática de adubação, a não ser em pequena escala, pois tornaria a água não potável. Será considerada ainda, a piscicultura de caráter comercial, onde a criação de peixes poderá servir como alternativa para geração de renda e como fonte geradora de emprego para a população ribeirinha.

Foram considerados para a prática da piscicultura extensiva em reservatórios os dados do Sistema de Produção de Tilápias (2008) e do Nordeste Rural (2007) constantes em Barbosa (2008), que estão descritos a seguir:

- custo médio dos alevinos (R\$/ha/ano) – 100,00
- produtividade média de pescado (Kg/ha/ano) – 500
- preço médio de venda (R\$/Kg) – 3,50
- despesa média anual por pescador (Kg/pescador/ano) – 1.500

Será adotado para o cálculo da produtividade piscícola o valor de 500 kg/ha/ano relativo à produtividade média de pescado, sendo esta diretamente proporcional a área mínima do espelho d'água registrada durante o ano.

Na Tabela 6.31 do Capítulo 6 são apresentados os dados da produtividade de peixes, estimados, para cada alternativa.

4 – Abastecimento Industrial

A falta de água para atendimento à demanda industrial pode refletir em impacto de ordem econômica muitas vezes incalculável, estes impactos podem ter como consequência a diminuição da produção de alimentos, o desemprego, entre outros. Devido a importância da garantia no atendimento à demanda industrial é que será considerada como seu atributo a sustentabilidade hídrica para o atendimento desta demanda na análise multicriterial e será obtida segundo a definição de Loucks *et al.* (1981) apud Kjeldsen e Rosbjerg (2001) expressa pela Equação 4.35.

4.5.5.2 – Critérios Segundo Objetivos Sociais

O aumento da oferta hídrica favorecido pela construção de obras de intervenção hidráulica poderá refletir nos seguintes efeitos sociais: melhoria da qualidade de água (reservatórios como reguladores de vazão), aumento da pesca, aumento do potencial de irrigação, ampliação da oferta de trabalho local, suprimento de água para períodos de baixa reserva, ampliação das atividades de recreação, entre outros.

Os subcritérios relativos ao critério social considerados, neste trabalho, estão mostrados na Tabela 6.31 do Capítulo 6 e descritos a seguir:

1. Geração de empregos
 - na agricultura
 - na piscicultura
2. Geração de renda
 - na agricultura
 - na piscicultura
3. Atendimento à demanda
4. Expansão do atendimento à demanda

5. Municípios com participação
6. Desapropriações devido à construção de obras
7. Perspectiva de melhoria de vida
 - desenvolvimento da pesca
 - melhoria da saúde
 - proliferação de doenças hídricas

1 – Geração de Empregos

É sabido que a geração de empregos se constitui em um dos mais importantes indicadores do desenvolvimento social, o seu crescimento favorece a melhoria de outros índices sociais, tais como: nível de renda, saúde, educação, lazer, etc. Foram considerados, neste estudo, apenas os empregos gerados na agricultura e na piscicultura extensiva.

Os empregos relativos à agricultura foram considerados em função da quantidade de diárias por ano, obtidas no modelo de otimização. Enquanto, os referentes à piscicultura extensiva foram estimados em função da despesa média anual por pescador (1500 kg/pescador/ano) e da produtividade média (500 kg/ha/ano), ou seja:

$$N^{\circ} \text{ empregos} = \frac{\text{Prod}_{med} * A_{min}}{\text{Desp}} \quad (4.40)$$

Onde:

Prod_{med} – Produtividade média de pescado por unidade de área;

A_{min} – Área mínima da superfície líquida;

Desp – Despesa média anual por pescador.

2 – Geração de renda

O aumento da oferta hídrica para a população e para atividades industriais, agrícolas e outras contribui para o aumento da geração de empregos e conseqüentemente para a melhoria da renda. Neste estudo foi levada em consideração a geração de renda para a prática da agricultura e da piscicultura.

A renda oriunda da agricultura foi calculada em função do número de diárias, do seu preço e do ciclo de cada cultura conforme apresentado no plano de cultivo (Capítulo 5, Item 5.6.3), ou seja:

$$Renda = \frac{N^{\circ} \text{ diárias} * \text{preço} * \text{ciclo}}{365} \quad (4.41)$$

A quantidade de diárias foi obtida no modelo de otimização e o preço de R\$ 16,00 (dezesesseis reais) relativo ao valor da diária na agricultura foi obtido no Manual de Orçamento Agropecuário do Banco do Nordeste S/A (2006).

O valor da renda na piscicultura foi estimado pela seguinte equação:

$$Renda = \frac{(Pd * Pr - Cal) * A_{\min}}{Ne} \quad (4.42)$$

onde:

Pd – produtividade média de pescado por unidade de área;

Pr – preço médio do pescado;

Cal – custo de alevinagem por unidade de área;

A_{\min} – área mínima da superfície líquida.

Ne – número de empregos gerados na piscicultura.

3 – Atendimento à demanda

O benefício obtido com o atendimento à demanda de água para abastecimento, devido à construção de barragens, pode superar o custo ambiental, uma vez que o impacto da falta d'água nas cidades e indústrias pode apresentar consequências desastrosas. Daí, devido a importância no atendimento à demanda será considerada a sustentabilidade hídrica para o atendimento desta demanda, obtida segundo a definição de Loucks *et al.* (1981) apud Kjeldsen e Rosbjerg (2001), expressa pela Equação 4.35.

4 – Expansão do atendimento à demanda

Os valores do índice de utilização da disponibilidade (razão entre a demanda e a disponibilidade) obtidos no modelo de otimização foram próximos de 1 (um) para todas as alternativas, o que pode indicar que já existe uma exaustão da vazão disponibilizada para a demanda e que é impossível a sua expansão. Com isso, será levado em consideração, neste estudo, o efeito da expansão da demanda pela potencialidade (IUP) na escolha das alternativas (Tabela 6.31) do Capítulo de resultados.

5 – Municípios com participação

As informações referentes aos municípios atendidos pelos empreendimentos foram obtidas no Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia em estudo Tabela 6.31 do Capítulo 6. A construção da barragem no rio Mumbaba e/ou a importação de água da bacia dos rios Abiaí-Papocas, beneficiará as cidades formadoras da Grande João Pessoa, isto é, João Pessoa, Cabedelo, Bayeux e Várzea Nova (Distrito de Santa Rita). A construção da barragem no rio Gramame favorecerá o suprimento de água para abastecimento da cidade de Pedras de Fogo.

6 – Desapropriações devido à construção de obras

Segundo constante em SCIENTEC (2000b), o traçado das adutoras para importação de água seguirá as margens das estradas e as tubulações serão assentadas, preferencialmente enterradas, nas faixas de domínios dessas rodovias. Com isso, os problemas decorrentes de desapropriações de terras serão evitados, devido à locação das obras quase sempre na faixa de domínio de rodovias (federais e estaduais) e estradas vicinais existentes.

A construção das barragens nos rios Mumbaba e Gramame resultará em desapropriação de áreas, que foi estimada, neste trabalho, como sendo igual a área a ser inundada pelos respectivos reservatórios. Na Tabela 6.31 do Capítulo de resultados são apresentados os dados de desapropriação, estimados, para cada alternativa.

7 – Perspectiva de Melhoria de Vida

Este atributo é de difícil quantificação, devido a sua subjetividade. Então, visando a representatividade do seu efeito foram adotados os seguintes fatores:

a) Desenvolvimento da pesca

O desenvolvimento da pesca reflete na perspectiva de melhoria de vida da população, uma vez que a pesca pode servir como fonte de alimento para consumo das famílias da

região do empreendimento, como alternativa para a geração de renda, bem como promover atividades esportivas, podendo ser fonte geradora de emprego para a população ribeirinha.

Diante disso, neste estudo, foi adotada a prática da piscicultura extensiva, e o efeito que ela causa para a melhoria de vida da população foi quantificado em função da produtividade piscícola, calculada anteriormente para o critério econômico, conforme Tabela 6.31 do Capítulo 6.

b) Melhoria da Saúde

O aumento da oferta hídrica contribui com melhores condições de saúde física e mental da população, através da melhoria da qualidade alimentar, do aumento de renda pelo comércio, de atividade de lazer, bem como pelo maior afluxo de água que acelera o processo de depuração dos corpos hídricos. Então, neste estudo, o benefício à saúde foi estimado em função da confiabilidade no atendimento à demanda para abastecimento urbano obtida no modelo de otimização.

c) Proliferação de doenças hídricas pela maior carga de efluentes domésticos

O aumento na disponibilidade hídrica para abastecimento humano e industrial contribui para o maior aporte de águas residuárias e de efluentes industriais, ocasionando um aumento da carga poluidora nos corpos hídricos, tornando-se provavelmente fonte para disseminação de doenças de veiculação hídrica. Contudo, a quantidade ou qualidade da carga de efluentes lançados nos corpos hídricos é de difícil obtenção, pois a ela estão atrelados vários fatores, tais como: disponibilidade de água para abastecimento urbano, quantidade de parcela destinada para consumo humano e industrial, o tipo de efluente lançado, quantidade de efluente tratado, etc. Como medida mitigadora, deve-se adotar o tratamento destes efluentes antes de serem lançados nos cursos d'água.

Neste estudo, a quantidade de efluente torna-se um fator secundário, pois esta informação não é de extrema importância. Na verdade, o que interessa é saber qual ou quais as alternativas que venham a gerar maior quantidade de carga de efluentes. Por isso, a carga de efluente doméstico foi estimada em função da vazão disponibilizada para atendimento à demanda de abastecimento humano (Tabela 6.31) do Capítulo 6, calculada por:

$$Q_{\text{Disp}} = Q_{\text{Dem}} * C_{\text{fb}} \quad (4.43)$$

Onde:

Q_{Disp} – é a vazão disponível, em m^3/s ;

Q_{Dem} – é a vazão de demanda média anual requisitada para abastecimento urbano;

C_{fb} – é a confiabilidade no atendimento à demanda, que foi obtida pelo modelo de otimização.

4.5.5.3 – Critérios Segundo Objetivos Ambientais

O desmatamento e a inundação necessários à construção de reservatórios de acumulação causam impactos sobre diversos aspectos ambientais de uma bacia hidrográfica, sobretudo danos à fauna e à flora local. Este tipo de empreendimento provoca a interrupção do movimento dos peixes e para minorar este efeito devem ser construídas escadas para que os peixes possam transpor o obstáculo.

Neste estudo, consideram-se como atributos para análise das alternativas sob a ótica do critério ambiental os impactos no meio biótico (conjunto de seres vivos), abiótico (meio físico) e meio antrópico, que serão subdivididos como mostrado a seguir:

1. Impacto no meio biótico
 - danos à fauna
 - danos à flora
2. Impacto no meio abiótico
 - possibilidade de erosão
 - poluição dos corpos hídrico pela maior carga de efluentes domésticos
 - inundação
 - exploração dos recursos naturais
3. Impacto no meio antrópico
 - desapropriação

1 – Impacto no Meio Biótico

a) Danos à fauna e à flora

A desapropriação de áreas para construção de canais ou para inundação de reservatórios acarreta impactos tanto na fauna quanto na flora, contudo não é possível quantificar com precisão estes impactos para definir, posteriormente, em quanto eles serão minimizados. Diante disso, para análise multicriterial das alternativas serão considerados

os impactos na fauna e na flora, da região, em função da área a ser inundada e da área agrícola que foi obtida no modelo de otimização multiobjetivo e estão dispostos na Tabela 6.31 do Capítulo 6.

2 – Impacto no Meio Abiótico

a) Possibilidade de erosão

O desmatamento de áreas para o cultivo da agricultura contribui para o aumento da erosão do solo, que deve ser minimizada através de adequadas técnicas de irrigação e de plantio para que esse fenômeno possa ocorrer de forma moderada.

A possibilidade de erosão foi estimada, neste estudo, em função da área agrícola obtida no modelo de otimização multiobjetivo (Tabela 6.31) do Capítulo 6.

b) Poluição dos corpos hídricos pela maior carga de efluentes domésticos

O aumento da oferta hídrica para abastecimento dos centros urbanos tem como consequência negativa, o aumento da geração de volume de efluentes domésticos pelos centros urbanos atendidos e contribui para maiores impactos nos corpos hídricos. Este impacto pode ser amenizado através da adoção da medida de tratamento dos efluentes domésticos para posterior lançamento nos corpos hídricos. A estimativa da carga de efluentes domésticos foi baseada na vazão disponibilizada para atendimento urbano, que foi calculada pela Equação 4.40 e mostrada na Tabela 6.31 do Capítulo 6.

c) Inundação

A inundação de áreas pela construção de barragem, em alguns casos, resulta em perdas para alguns setores da economia, a exemplo de terras agricultáveis que passam à condição de leito de reservatórios, ficando inutilizadas para o seu aproveitamento natural - a reprodução vegetal.

Em virtude da inexistência de dados das áreas de inundações dos reservatórios a serem construídos nos rios Gramame e Mumbaba, estas foram estimadas em função da interpolação dos dados das curvas Cota-Área-Volume (Anexo) dos mesmos, Tabela 6.31

do Capítulo 6. A área de inundação da obra de captação (estrutura vertedora) que irá transpor água da bacia dos rios Abiaí-Papocas para a bacia do rio Gramame foi obtida em SCIENTEC (2000b), cujo valor é de 141 ha. Os valores, estimados, da área inundada para cada alternativa são apresentados na Tabela 6.31 do Capítulo 6.

d) Exploração dos recursos naturais

A exploração do potencial natural contribui muitas vezes para um melhor desenvolvimento sócio-econômico. No entanto esta medida, geralmente, resulta em impactos ambientais, a exemplo do desmatamento pelos processos de exploração agrícola, inundação ou desertificação que afeta os aspectos geológicos, hídricos, antrópicos e a biodiversidade local. Devido aos efeitos adversos que esta medida pode causar sob a ótica ambiental, será levado em consideração aqui, o índice de utilização da potencialidade (IUP) na análise multicriterial.

3 – Impacto no Meio Antrópico

a) Desapropriação

Um mesmo atributo pode refletir em impactos sob diferentes critérios. Neste estudo, foi admitido o impacto decorrente da desapropriação, também, sob a ótica ambiental. A desapropriação de área foi estimada como sendo igual a área a ser inundada pela obra (Tabela 6.31) do Capítulo 6.

4.5.6 – Pesos dos Critérios

Em estudos que envolvem análise multicriterial, geralmente, é utilizada a técnica de aplicação de questionários com o objetivo de se poder representar nos pesos de cada critério ou atributo os anseios dos participantes diretamente envolvidos com as ações a serem tomadas em cada alternativa que for escolhida. Assim sendo, neste estudo, serão aplicados questionários aos especialistas das seguintes instituições: CAGEPA, AESA, UFCG e UFPB.

Os pesos foram representados de forma hierárquica, em dois níveis de importância, um relativo aos subcritérios que tem como objetivo representar a satisfação de aspectos técnicos a serem levados em consideração e outro relativo aos critérios social, ambiental e econômico para uma representação mais geral tendo em vista caracterizar as várias opiniões de possíveis decisores envolvidos. Os níveis correspondentes aos subcritérios foram quantificados através do método de Escores. Segundo Turnes (2004) para a aplicação deste método deve-se fazer uso de uma escala ordinal de 1 a 5, em que 1 representa o grau de menor importância e, 5 o de maior importância. Em seguida, os resultados devem ser transformados em valores percentuais. Para implementação do método cada participante deverá atribuir valores de 1 a 5 para cada um dos subcritérios econômicos, sociais e ambientais, respectivamente; o somatório dos valores atribuídos a cada subcritério será transformado num percentual, que equivalerá ao peso do mesmo. Para o nível correspondente aos critérios econômico, social e ambiental foram adotados pesos de valores variáveis para se caracterizar as várias opiniões de possíveis decisores envolvidos no processo.

As funções de preferência utilizadas no método PROMETHEE expressam a essência da preferência de uma alternativa sobre a outra com relação a cada critério. Procurou-se, quando possível, fazer uso de funções de preferência que pudessem incluir margens de erro ou tolerâncias tendo em vista que, ao estimar os valores para os critérios relativos às alternativas, eventuais erros poderão ser introduzidos nestes valores, desta maneira os parâmetros das funções possibilitarão a correção destes erros. Para isso, fez-se uso de funções de preferência dos tipos II e III. Para a função do tipo II, foi adotado o parâmetro “q” igual a 10 % e para a função do tipo III foi adotado o parâmetro “p” como sendo igual a 5 %, conforme pode ser observado na Tabela 4.1.

4.5.6.1 – Critério Econômico

Os pesos atribuídos aos subcritérios do critério econômico, pelos especialistas, foram adotados de acordo com o grau de importância considerado para cada um. A implantação de projetos de irrigação bem como o aumento da renda na indústria e a expansão das atividades piscícolas dependem da construção de obras que propiciem o aumento da oferta hídrica para essas demandas.

Na Tabela 4.2 estão sintetizadas as características dos atributos para o critério econômico.

Tabela 4.2 - Funções de preferência e pesos para os atributos do critério econômico

Critério Econômico							
Descrição do atributo	Obj	Função de Preferência					Peso
		Tipo	Parâmetros em % valor máximo				
			p	q	s	v	
Custo de implantação	Min	II	-	10 %	-	100 %	19 %
Custo de operação	Min	II	-	10 %	-	100 %	19 %
Lucro agrícola	Max	II	-	10 %	-	100 %	23 %
Piscicultura extensiva	Max	II	-	10 %	-	100 %	21 %
Abastecimento industrial	Max	II	-	10 %	-	100 %	18 %
Total							100 %

4.5.6.2 – Critério Social

Assim como no critério econômico, a classificação dos pesos relativos aos subcritérios do critério social (Tabela 4.3) foi feita de acordo com o grau de importância considerado para cada um, segundo o julgamento dos especialistas, e encontra-se descrito a seguir.

A Lei 9.433/97, que estabelece a política de recursos hídricos, torna prioritário o uso da água para o consumo humano e a dessedentação de animais em caso de escassez hídrica. Em virtude da importância do atributo associado ao atendimento à demanda para abastecimento humano em relação aos demais é que foi atribuído maior peso para este atributo (11 %).

Aos atributos relativos à empregos na agricultura e piscicultura, renda na piscicultura e melhoria da saúde foram atribuídos pesos relativamente iguais, isto é, segundo os especialistas estes atributos apresentam importâncias semelhantes.

Do ponto de vista social, os atributos associados à geração de renda na agricultura e a proliferação de doenças apresentam o mesmo grau de importância por isso foi concedido o mesmo peso para ambos, 9 %.

O atributo relativo a município com participação (peso de 8 %) propicia uma melhor distribuição espacial da água o que favorece um maior crescimento político e social das cidades e das suas áreas circunvizinhas, o que permite o crescimento de cidades de pequeno porte.

Os especialistas consideram a desapropriação e o desenvolvimento da pesca como sendo os atributos de menor importância, daí conferiu a estes dois subcritérios o peso de 6%.

Tabela 4.3 - Funções de preferência e pesos para os atributos do critério social

Critério Social							
Descrição do atributo	Obj	Função de Preferência					Peso
		Tipo	Parâmetros em % valor máximo				
			p	q	s	v	
Empregos na agricultura	Max	2	-	10 %	-	100 %	10 %
Empregos na piscicultura	Max	2	-	10 %	-	100 %	10 %
Renda na agricultura	Max	2	-	10 %	-	100 %	9 %
Renda na piscicultura	Max	2	-	10 %	-	100 %	10 %
Atendimento à demanda	Max	2	-	10 %	-	100 %	11 %
Expansão do atendimento	Max	2	-	10 %	-	100 %	11 %
Municípios c/ participação	Max	3	5	-	-	100 %	8 %
Desapropriação	Min	2	-	10 %	-	100 %	6 %
Piscicultura extensiva	Max	2	-	10 %	-	100 %	6 %
Melhoria da saúde	Max	2	-	10 %	-	100 %	10 %
Proliferação de doenças	Min	3	5	-	-	100 %	9 %
Total							100 %

4.5.6.3 – Critério Ambiental

A determinação dos pesos para os subcritérios do critério ambiental (Tabela 4.4) também foi realizada segundo certa lógica de importância considerada, pelos especialistas, para cada um dos subcritérios.

Sob a ótica ambiental, o conjunto de seres vivos (meio biótico) é considerado como sendo de maior importância, daí foram dados pesos de 17 % e 16 % para os subcritérios danos à fauna e à flora, respectivamente.

Ao explorar os recursos naturais é imprescindível que haja controle nesta prática tendo em vista que a exploração desordenada poderá resultar em reflexos negativos ao meio ambiente com danos ambientais muitas vezes irreparáveis, para este subcritério foi adotada a importância de 14 %.

Os prejuízos decorrentes da erosão ocorrem em maior dimensão do que em virtude da inundação, assim sendo foi conferido o peso de 18 % ao subcritério relativo a possibilidade de erosão, enquanto ao referente à inundação foi dado peso no valor de 13%.

Do ponto de vista ambiental os impactos no meio antrópico são pouco significativos daí foi dado o menor peso para o atributo relativo à desapropriação de áreas para inundação, no valor de 2 %.

Tabela 4.4 – Funções de preferência e pesos para os atributos do critério ambiental

Critério Ambiental							
Descrição do atributo	Obj	Função de Preferência					Peso
		Tipo	Parâmetros em % valor máximo				
			p	q	s	v	
Danos à fauna	Min	2	-	10 %	-	100 %	17 %
Danos à flora	Min	2	-	10 %	-	100 %	16 %
Possibilidade de erosão	Min	2	-	10 %	-	100 %	18 %
Poluição hídrica	Min	2	-	10 %	-	100 %	20 %
Inundação	Min	3	5	-	-	100 %	13 %
Exploração dos RN's	Min	3	5	-	-	100 %	14 %
Desapropriação	Min	3	5	-	-	100 %	2 %
Total							100 %

5 – DADOS DE ENTRADA DO MODELO

Neste estudo foi adotada uma série histórica de 12 anos, iniciada em janeiro de 1996. A seguir é feita uma descrição acerca dos dados de entrada do modelo de otimização multiobjetivo, que foram obtidos junto a órgãos administrativos, tais como: Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado – AESA/PB; Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA; Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente – SECTMA/PB e Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Também foram obtidos dados, de estudos existentes na região, a exemplo do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame; Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba; Relatórios técnicos; artigos, dentre outros. A série histórica de vazão média mensal foi gerada através do modelo de simulação SMAP.

O layout do sistema estudado onde são mostrados os reservatórios, demandas de abastecimento e irrigação é apresentado na Figura 4.4 do Capítulo de Metodologia.

5.1 – DADOS DE PLUVIOMETRIA

Os dados de precipitação observados no período de 1996 a 2007 foram fornecidos pela AESA. Foram considerados os postos pluviométricos mais próximos dos respectivos reservatórios e das áreas irrigadas.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os dados dos postos pluviométricos utilizados e na Tabela 5.2 os respectivos valores de precipitação média mensal nas áreas de drenagem dos reservatórios e perímetros irrigados.

Tabela 5.1 – Postos Pluviométricos Utilizados

Posto Utilizado	Dados dos Postos			
	Nome	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Reservatório Marés	Marés	7°09'	34°54'	47
Área Irrigada no Baixo Gramame	Conde	7°15'	34°55'	112
Reservatório Alto Gramame	Pedras de Fogo	7°24'	35°07'	177
Área Irrigada no Alto Gramame				
Área Irrigada da Giasa 1	Caaporã	7°30'	34°55'	29
Área Irrigada no reservatório Gramame				
Reservatório Gramame-Mambuaba	Santa Rita	7°08'	34°58'	16
Reservatório Mumbaba				
Área Irrigada da Giasa 2				
Área Irrigada no Alto Mamuaba				
Área Irrigada no Alto Mumbaba				
Área Irrigada no Médio Mumbaba				

Fonte: AESA (2008)

Tabela 5.2 – Precipitação média mensal nas áreas de drenagem dos reservatórios e nos perímetros irrigados (mm)

Caapora											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
89,25	123,78	161,25	217,62	214,99	319,91	223,33	139,32	77,46	31,90	23,71	52,86
Conde											
75,21	113,54	141,41	161,67	171,70	299,69	176,58	122,10	73,06	24,93	19,00	38,06
Marés											
90,37	112,31	163,99	200,83	222,45	328,25	187,60	144,50	76,15	28,84	21,02	44,34
Pedras de Fogo											
74,03	116,98	118,86	161,18	161,90	260,48	172,43	124,58	61,53	27,19	23,71	39,40
Santa Rita											
67,92	96,49	149,58	151,06	177,99	243,83	134,48	105,62	56,33	24,17	18,49	33,55

Fonte: AESA (2008)

5.2 – DADOS DE EVAPORAÇÃO

Para representar dados de evaporação em reservatórios, usualmente, faz-se uso de dados de evaporação em tanque classe A, aplicando-se fator de correção, denominado de coeficiente de tanque *kt*. Quando não existirem medições locais de evaporação, pode-se fazer uso de registros de dados existentes em regiões próximas ao reservatório, desde que mantida a semelhança das condições fisiográficas.

Os dados de evaporação nos reservatórios e nos perímetros irrigados foram obtidos a partir de dados observados do tanque “Classe A” medidos na Estação de Tratamento Marés. Os valores mensais do coeficiente de tanque kt foram estimados por Gomes (1999).

Os dados de evaporação média mensal e do coeficiente kt podem ser observados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados de Evaporação Média Mensal (mm) do Tanque Classe A do Posto de Marés e do Coeficiente kt .

Posto	Meses											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Marés	149,6	134,8	149,7	129,6	117,1	107,6	116,2	123,1	136,5	157,3	154,7	149,3
kt	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Fonte: SCIENTEC/UFPB (2000) e Gomes (1999)

5.3 – Dados de Fluviometria

Tendo em vista a carência de dados fluviométricos na área objeto deste estudo bem como obter a disponibilidade hídrica desta região, foi aplicado o modelo hidrológico de chuva-vazão SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) mensal, conforme apresentado em Tucci (1998). Este modelo, desenvolvido por Lopes *et al.* em 1982, tem como base os parâmetros do Departamento de Conservação do Solo Norte-Americano (Soil Conservation Service – SCS, 1975) e é utilizado para simular séries contínuas. É um modelo determinístico, conceitual e agregado.

O SMAP foi calibrado e validado com os dados dos postos fluviométricos Mamuaba e Mumbaba, respectivamente, para o período compreendido entre 1972 a 1977 (6 anos de dados) período em que a série de vazão coincide com a série de precipitação e usado para gerar uma série a partir de 12 anos de dados de precipitação.

Na calibração, a vazão média obtida foi de 1,68 m³/s e a simulada foi de 1,66 m³/s, com um coeficiente de correlação de 0,88 (Figura 5.2). Enquanto que na validação, a vazão média observada foi de 2,25 m³/s e a simulada foi de 2,06 m³/s, com um coeficiente de correlação de 0,75 (Figura 5.3), o que pode ser considerado um bom resultado, tendo em vista a pequena série de dados disponível para a calibração.

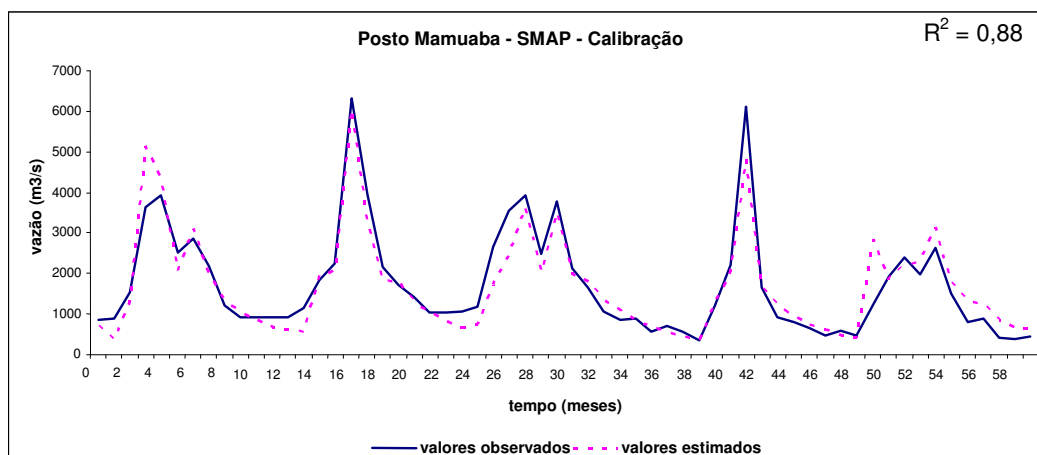


Figura 5.1 – Vazões observadas e simuladas pelo SMAP na calibração (1972-1977)

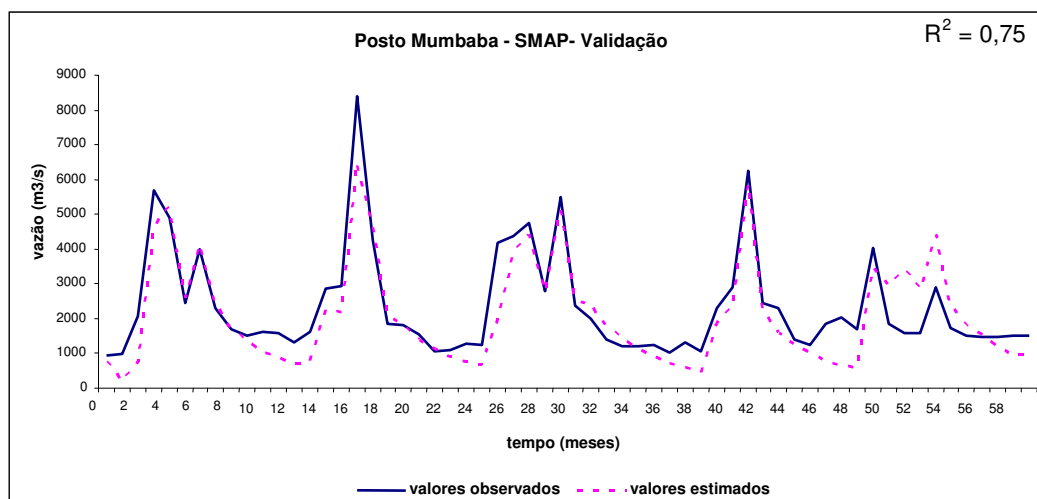


Figura 5.2 – Vazões observadas e simuladas pelo SMAP na validação (1972-1977)

A seguir são apresentados os pontos de cálculo onde foram geradas as séries de dados de vazão através do modelo SMAP.

5.3.1 – Pontos de Cálculo

Para o cálculo da precipitação média mensal em cada área de contribuição (pontos de cálculo) foram usados dados de precipitação dos postos pluviométricos de Alhandra, Caaporã, Conde, Marés, Pedras de Fogo, Sapé e Santa Rita (Figura 5.4), para o período compreendido entre 1996 e 2007, obtidos na AESA. A partir destes dados foram geradas as vazões de contribuição em cada um desses pontos através do modelo chuva-vazão SMAP. Foram considerados nove pontos de cálculo na bacia que estão identificados e descritos na

Tabela 5.4 e na Figura 5.4. Para a escolha destes pontos levou-se em consideração além da representatividade em pontos estratégicos da bacia (afluência de reservatórios, captações), os pontos em que serão construídos reservatórios e que receberão água de outra bacia.

Inicialmente, foram definidos os pontos de cálculo e delimitado as suas áreas de contribuição, em seguida calculou-se a precipitação média em cada ponto pelo método de Thiessen.

Tabela 5.4 – Descrição dos pontos de cálculo

Identificação do PC	Descrição do PC
P1	Captação CAGEPA (Pedras de Fogo)
P2	Captação da indústria Giasa
P3	Afluxo ao reservatório Gramame
P4	Afluxo ao reservatório Mamuaba
P5	Captação à jusante do Gramame-Mamuaba
P6	Captação do rio Mumbaba para Marés (vazão de contribuição da sub-bacia compreendida entre os pontos 6 e 9)
P7	Afluxo ao reservatório Marés
P8	Alto Mamuaba
P9	Alto Mumbaba (vazão de contribuição da sub-bacia a montante do ponto 9)

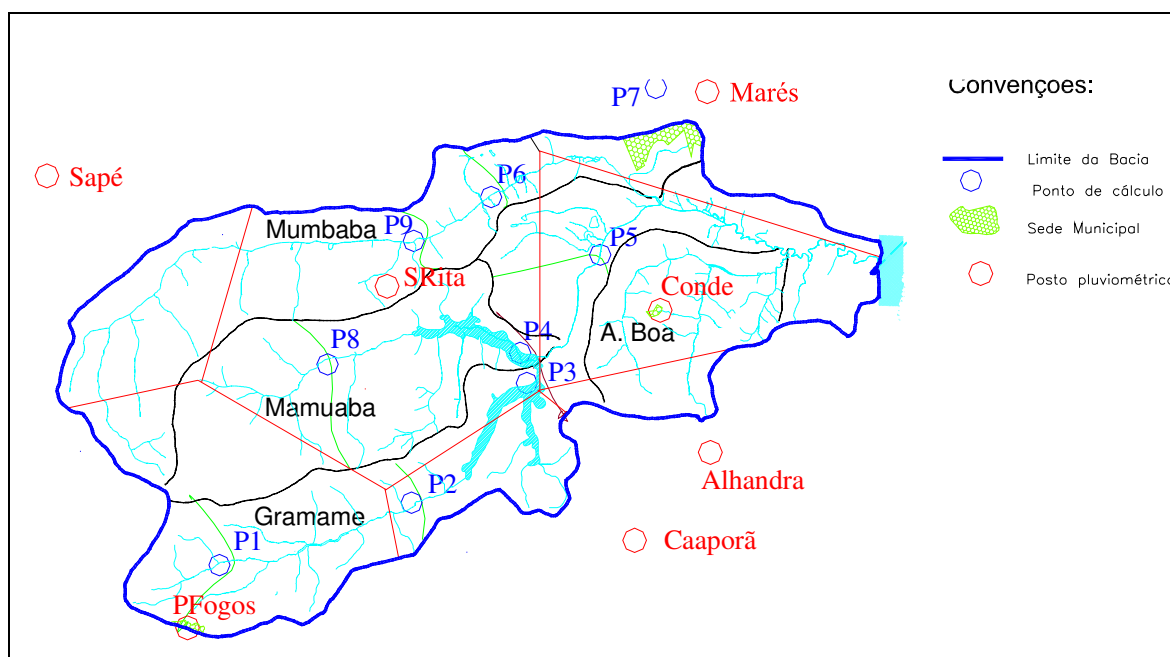


Figura 5.3 – Localização dos postos pluviométricos e dos pontos de cálculo

O cálculo da precipitação média mensal foi realizado através do Método de Thiessen que consiste em:

- 1 – ligar os postos por trechos retilíneos;
- 2 – traçar linhas perpendiculares aos trechos retilíneos passando pelo meio da linha que liga os dois postos;
- 3 – prolongar as linhas perpendiculares até encontrar outra. O polígono é formado pela intersecção das linhas, correspondendo à área de influência da cada posto;
- 4 – a precipitação média é calculada por:

$$P_m = \frac{1}{A} \cdot \sum A_i P_i \quad (5.1)$$

Onde: A_i = é a área de influência do posto i ;

P_i = a precipitação registrada no posto i ;

A = área total da bacia.

Na Tabela 5.5 estão apresentados os valores de vazões médias mensais para o período compreendido entre 1996 e 2007. Apesar de se tratar de uma série relativamente curta, ela é bem representativa uma vez que contempla períodos hidrológicos variados, isto é, prolongados períodos de estiagem (período de baixa precipitação referentes aos anos de 1998 a 2000) e o ano de 2004 em que ocorreu altos índices pluviométricos, caracterizado hidrológicamente como sendo atípico na região Nordeste do Brasil. Os dados de vazão obtidos através do modelo SMAP foram utilizados como dados de entrada do modelo de otimização para avaliar o balanço entre disponibilidade e demanda hídrica e, identificar as possibilidades no atendimento às demandas.

Tabela 5.5 – Vazões Médias Mensais, em m^3/s , Geradas no SMAP entre 1996 e 2007

Pontos de cálculo	Meses											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P1	0,11	0,15	0,12	0,20	0,24	0,47	0,39	0,29	0,23	0,16	0,13	0,11
P2	0,36	0,45	0,38	0,65	0,78	1,50	1,23	0,90	0,73	0,51	0,41	0,33
P3	0,26	0,31	0,42	0,62	0,76	1,33	1,03	0,71	0,59	0,41	0,32	253,6
P4	0,58	0,62	0,94	1,24	1,54	2,73	2,00	1,56	1,34	0,93	0,74	0,60
P5	0,16	0,17	0,22	0,30	0,37	0,75	0,51	0,38	0,33	0,22	0,18	0,14
P6	0,09	0,09	0,17	0,21	0,26	0,45	0,31	0,25	0,22	0,15	0,12	0,10
P7	0,14	0,14	0,21	0,32	0,39	0,69	0,48	0,36	0,29	0,19	0,15	0,13
P8	0,30	0,34	0,41	0,59	0,73	1,33	1,03	0,78	0,66	0,46	0,37	0,30
P9	0,50	0,51	0,73	0,91	1,10	2,36	1,77	1,34	1,14	0,81	0,64	0,52

5.4 – Dados dos reservatórios

5.4.1 – Cota-Área-Volume

Os dados das curvas *cota-área-volume* dos reservatórios Gramame-Mamuaba, Marés e Mumbaba foram obtidos no Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame (SCIENTEC/UFPB, 2000), enquanto que os dados referentes ao reservatório planejado no alto Gramame foram obtidos a partir da interpolação dos índices dos reservatórios existentes.

5.4.2 – Volumes Máximos e Mínimos

Na Tabela 5.6 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 6.308 de 02 de julho de 1997 que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos do estado da Paraíba. Os dados referentes aos volumes máximos dos reservatórios encontram-se no plano diretor da bacia enquanto os dados das áreas controladas dos reservatórios foram aqui estimados, conforme Figura 5.2. Adotou-se o volume mínimo dos reservatórios como sendo 10% das suas capacidades.

Tabela 5.6 – Dados dos reservatórios estudados.

Reservatório	Volumes (hm ³)		Área montante (km ²)	Classificação Lei 6.308/97
	Máximo	Mínimo		
Gramame-Mamuaba	56,9	5,69	257,5	Médio
Marés	2,14	0,21	20,9	Pequeno
Mumbaba	41,00	4,10	138,87	Médio
Alto Gramame	8,00	0,80	20,53	Médio

Fonte: SCIENTEC/UFPB (2000)

5.4.3 – 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 5.7 estão os dados dos vertedouros de cada reservatório utilizado neste estudo. Os dados referentes aos reservatórios planejados foram estimados em função da curva cota x área x volume e dos dados dos reservatórios existentes.

Tabela 5.7 – Dados dos vertedouros dos reservatórios estudados.

Reservatório	C_v^1	B_v^2 (m)	L_v^2 (m)	H_{vert}^2 (m)
Gramame-Mamuaba	0,45	50,0	3,5	35,0
Marés	0,35	10,0	3,0	16,5
Mumbaba	0,45	40,0	3,0	30,0
Alto Gramame	0,35	15,0	3,0	77,8

Fonte: ¹DAEE(2005) e ²(CAGEPA e SUPLAN, 2008)

5.4.4 – Descarga de Fundo

Na Tabela 5.8 são apresentados os dados sobre o tubo da descarga de fundo de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 5.8 – Dados do tubo da descarga de fundo dos reservatórios estudados.

Reservatório	C_f^1	D_f^2 (mm)	H_{fs}^2 (m)	H_{fe}^2 (m)
Gramame-Mamuaba	0,6	2 x 800	17,0	18,8 e 20,3
Marés	0,6	800	8,0	10,55
Mumbaba	0,6	800	18,0	18,5
Alto Gramame	0,6	800	72,0	72,2

Fonte: ¹DAEE(2005) e ²(CAGEPA e SUPLAN, 2008)

5.5 – Capacidades das Adutoras

As capacidades das adutoras destinadas ao abastecimento humano e para a GIASA foram consideradas iguais as suas respectivas demandas. Não se considerou a capacidade

do sistema adutor para as áreas irrigadas de modo que a única restrição da escolha das culturas agrícolas seja a disponibilidade de água no sistema.

As capacidades das adutoras que partem do rio Gramame e do rio Mumbaba para o reservatório Marés e, da adutora Abiaí-Papocas para a bacia do rio Gramame foram de 0,7 m³/s, 0,5 m³/s e 1,12 m³/s, respectivamente. Nos cenários 3, 6, 7 e 8, onde considerou-se a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas, foi admitido uma capacidade de 2,8 m³/s para a adutora que parte do rio Gramame até a ETA-Gramame.

5.6 – Demandas Hídricas

Na bacia estudada foram consideradas as seguintes demandas hídricas: abastecimento urbano, industrial e irrigação.

5.6.1 – Abastecimento Humano

As demandas hídricas médias para o abastecimento humano referentes ao ano 2006, fornecido pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba – CAGEPA, e as suas respectivas fontes hídricas encontram-se listadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Demandas hídricas para abastecimento humano

	Fonte Hídrica	Demanda (m ³ /s)
Pedras de Fogo	Rio Gramame	0,04
ETA-Gramame	Reservatório Gramame-Mamuaba	1,8
ETA-Marés	Reservatório Marés	0,8

Fonte: CAGEPA, 2006

5.6.2 – Abastecimento Industrial

A demanda da GIASA, para atender o seu parque industrial (Usina), foi de 0,25 m³/s funcionando durante 6 meses (outubro a março).

5.6.3 – Irrigação

Na avaliação das demandas hídricas de irrigação foi estabelecido, primeiramente, um plano de cultivo para as áreas irrigadas consideradas no estudo, considerando os sistemas de irrigação já implantados. Tomando-se por base os dados da agricultura da região em estudo constantes no plano diretor da bacia foram selecionadas doze culturas, das quais cinco são perenes, duas são semi-perenes e cinco culturas sazonais (temporárias). Para a otimização considerou-se a irrigação apenas na entressafra, uma vez que durante a safra a água precipitada na região é suficiente para a garantia do plantio das culturas, tornando-se assim desnecessária a prática da irrigação durante este período e ainda, com o intuito de avaliar o impacto da agricultura irrigada para os recursos hídricos da região.

Na Tabela 5.10 são apresentados dados característicos das culturas agrícolas adotadas 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 (2008). O preço médio de comercialização (*Prc*) das culturas, para o ano de 2006, foi obtido da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA).

Tabela 5.10 – Dados das características das culturas agrícolas.

Culturas	<i>Prod</i> (kg/ha/ano) *(fruto/ha/ano)			<i>Prc</i> (R\$/kg) *(R\$/fruto)	<i>Cprod</i> (R\$/ha/ano)			<i>Hdc</i> (diárias/ha/ano)		
	1º ano	2º ano	3º ano		1º ano	2º ano	3º ano	1º ano	2º ano	3º ano
Sazonais										
Batata doce	20.000			0,46	3.068			118		
Abacaxi	38.000			0,55	11.021			243		
Inhame	18.000			1,40	10.046			259		
Feijão	1.800			1,28	1.597			61		
Pimentão	20.000			0,88	5.723			192		
Semi-Perenes										
Mamão	10.000	30.000	15.000	0,66	5.357	5.218	4.208	200	216	161
Maracujá	8.000	15.000	10.000	1,05	10.326	4.052	2.947	182	177	142
Perenes										
Banana	40.000			0,30	4.691			213		
Cana-de-açúcar	60.000			0,045	2.400			17		
Coco*	40.000			0,42	3.049			120		
Graviola	7.000			0,80	3.932			180		
Laranja	57.000			0,48	5.200			309		

Assumiu-se que o custo da água bruta para irrigação é de R\$ 36,00/1.000 m³ de água, segundo estudos do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (TC/BR-CONCREMAT, 2006), e o custo de energia elétrica de R\$ 0,12664/KWh considerado fora de ponta segundo dados da concessionária local

(ENERGISA, 2008). Estima-se que o sistema de bombeamento tenha uma eficiência de 75%.

O plano de cultivo das culturas agrícolas e seus respectivos coeficientes de cultivo (kc) são mostrados na Tabela 5.11, sendo que a cor vermelha para kc indica mês de colheita. Os valores de kc para as culturas perenes foram considerados na fase de produção.

Tabela 5.11 – Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc).

Culturas	Meses do ano hidrológico											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Sazonais	Safra						Entressafra					
Batata doce								0,66	0,99	1,15	0,90	
Abacaxi	0,50	0,50	0,65	0,80	0,95	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	0,80	0,50
Inhame			0,45	0,45	0,45	0,64	0,69	0,77	0,90	0,90	0,90	
Feijão									0,55	1,13	0,70	
Pimentão								0,80	0,80	1,00	0,96	
Semi-Perenes												
Mamão – 1º ano	0,64	0,64	0,64	1,16	1,16	1,16	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	0,92
Mamão – 2º ano	0,64	0,64	0,64	1,16	1,16	1,16	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	0,92
Mamão – 3º ano	0,64	0,64	0,64	1,16	1,16	1,16	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	0,92
Maracujá – 1º ano	0,40	0,40	0,51	0,62	0,63	0,82	1,12	1,22	1,22	1,22	1,19	0,84
Maracujá – 2º ano	0,82	0,89	1,09	1,17	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,21	0,87
Maracujá – 3º ano	0,82	0,89	1,09	1,17	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,21	0,87
Perenes												
Banana	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,85	1,00	1,10	1,10	0,90	0,80	0,80
Cana-de-açúcar	0,55	0,80	0,95	1,00	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,80	0,60
Coco	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
Graviola	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Laranja	0,90	0,90	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85

Fonte: Gomes (1999)

Para cada uma das culturas agrícolas acima citadas foi designada uma área máxima de cultivo conforme a Tabela 5.12 abaixo. Não foram estabelecidas áreas mínimas para as culturas agrícolas, de forma que as que não dessem um retorno financeiro adequado pudessem ser excluídas da solução ótima.

Tabela 5.12 – Áreas máximas de cada cultura agrícola por área irrigada

Culturas agrícolas	Área 1 (ha)	Área 2 (ha)	Área 3 (ha)	Área 4 (ha)	Área 5 (ha)	Área 6 (ha)	Área 7 (ha)	Área 8 (ha)
Batata doce	18	-	1	-	3	0,5	33,5	-
Abacaxi	2	-	-	-	146,5	22	46,5	141,1
Inhame	2	-	0,5	-	4,4	27,5	7,5	6
Feijão	4	-	0,75	-	4	17,5	9	67,1
Pimentão	-	-	-	-	-	-	-	7
Mamão	1	-	7,8	-	17	19,5	-	68,6
Maracujá	-	-	0,8	-	-	-	-	-
Banana	-	-	1	-	-	-	-	-
Cana-de-açúcar	15	900	-	600	32	100	-	73,6
Coco	-	-	-	-	1	-	-	5
Graviola	-	-	-	-	-	-	-	10,6
Laranja	-	-	-	-	1	-	-	1

OBS: Área 1: Área Irrigada no Alto Gramame; Área 2: Área Irrigada da Giasa 1; Área 3: Área Irrigada do reservatório Gramame-Mamuaba; Área 4: Área Irrigada da Giasa 2; Área 5: Área Irrigada no Alto Mamuaba; Área 6: Área Irrigada no Baixo Gramame; Área 7: Área Irrigada no Alto Mumbaba; Área 8: Área Irrigada no Médio Mumbaba

Tabela 5.13 – Sistema de irrigação de cada cultura agrícola por área irrigada

Culturas agrícolas	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5	Área 6	Área 7	Área 8
Batata doce	ac	-	ac	-	ac	ac	ac	-
Abacaxi	ac	-	-	-	pc	ac	pc	pc
Inhame	ac	-	ac	-	ac	ac	ac	ac
Feijão	ac	-	ac	-	a	ac	ac	ac
Pimentão	-	-	-	-	-	-	-	ac
Mamão	ac	-	ac	-	ac	ac	-	ac
Maracujá	-	-	mc	-	-	-	-	-
Banana	-	-	g	-	-	-	-	-
Cana-de-açúcar	mc	cg	-	cg	mc	mc	-	pc
Coco	-	-	-	-	ac	-	-	ac
Graviola	-	-	-	-	-	-	-	ac
Laranja	-	-	-	-	ma	-	-	ma

OBS: ac: aspersão convencional móvel; mc: aspersão com mini-canhão; cg: aspersão com canhão gigante; pc: pivô central; ma: microaspersão; g: gotejamento.

Os dados referentes ao sistema de irrigação (Tabela 5.14), sua eficiência de distribuição (E_{sis}) e de aplicação (E_{ap}) e, seus requerimentos de pressão (ΔH) estão de acordo com Gomes (1999).

Tabela 5.14 – Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas

Sistema de irrigação	E_{sis}	E_{ap}	ΔH (mca)
Aspersão convencional móvel	0,90	0,70	30
Aspersão com canhão gigante	0,90	0,55	70
Aspersão com mini-canhão	0,90	0,65	50
Pivô central	0,90	0,80	40
Microaspersão	0,90	0,85	15
Gotejamento	0,90	0,90	10

5.7 – Critérios Operacionais

Os critérios operacionais idealizados, em todos os cenários, observaram os seguintes pressupostos:

- o período de estudo corresponde a 12 (doze) anos iniciando o processo de otimização no mês de janeiro;
- o volume inicial dos reservatórios foi de 80% do valor das suas respectivas capacidades de armazenamento;
- o volume dos reservatórios, ao final do período de estudo de otimização, deve ser maior ou igual ao volume inicial, garantindo a sustentabilidade hídrica das atividades econômicas;
- o volume meta dos reservatórios, em todos os meses, foi considerado igual à capacidade dos mesmos.

Para a operação das áreas agrícolas irrigadas foram observados os seguintes pressupostos:

- o calendário agrícola estabelecido, conforme apresentado na Seção 5.6.3 do presente capítulo, é mantido invariável em todos os cenários estudados; as culturas agrícolas permanentes estão consideradas em plena capacidade de produção;
- no cálculo das demandas de irrigação considerou-se não existir dotação por capilaridade na zona radicular das plantas;
- a condutividade elétrica da água da bacia do rio Gramame é de cerca 0,2 dS/m, considerada de boa qualidade não sendo necessário dotações de água para lixiviação de sais no solo (Ayers e Westcot, 1999).

O coeficiente de perda, que representa as perdas por evaporação e a infiltração nas calhas dos rios, foi considerado em torno de 5%.

Nas áreas agrícolas 2 e 4 não considerou-se a maximização da receita líquida, pois são áreas de cultivos da indústria.

5.8 – Objetivos Considerados no Modelo de Otimização Multiobjetivo

Para a efetivação da otimização multiobjetivo realizada neste estudo foram considerados cinco objetivos e definidas ordens de prioridades para cada um deles descritos a seguir:

- minimização do déficit das demandas de abastecimento humano: 1ª prioridade;
- maximização da receita líquida oriunda das áreas irrigadas: 2ª prioridade;
- maximização da mão-de-obra oriunda das áreas irrigadas: 2ª prioridade;
- minimização do déficit das demandas de abastecimento industrial: 3ª prioridade;
- maximização do atendimento do volume meta dos reservatórios: 4ª prioridade.

O modelo leva em consideração coeficientes de ponderação para cada objetivo de acordo com a prioridade de atendimento dos mesmos. Onde, o coeficiente de ponderação (ω) para 1ª prioridade é da ordem de 10^{10} ; para a 2ª prioridade assume 10^4 ; a 3ª prioridade tem 10^2 ; e a última (4ª) prioridade o valor é de 10^0 .

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa. Inicialmente será feita uma abordagem acerca dos resultados alcançados com o modelo de otimização multiobjetivo aplicado para análise da operação do sistema hídrico e, em seguida, a análise dos resultados alcançados através do método multicriterial PROMETHEE que visa apontar alternativas de solução que sirvam de apoio ao processo decisório.

6.1 – Resultados da Aplicação do Modelo de Otimização Multiobjetivo

Tendo em vista avaliar a garantia no atendimento às demandas existentes na região quando forem consideradas as disponibilidades hídricas fornecidas pela estrutura hídrica atual e aquelas provenientes de intervenções hidráulicas a serem implantadas na bacia, foram estabelecidos 8 (oito) cenários, conforme descritos no Capítulo 4. A seguir é apresentada a análise dos resultados obtidos para cada cenário.

6.1.1 – Cenário 1 (infra-estrutura hídrica atual)

6.1.1.1 – Atendimento às demandas

A infra-estrutura hídrica atual garante o atendimento da demanda da ETA-Marés na sua totalidade durante todo o período. No entanto, o sistema apresentou falhas no atendimento à demanda da ETA-Gramame (quarto ano) e na vazão requerida para abastecimento da cidade de Pedras de Fogo (três meses), conforme mostrado nas Figuras 6.1 e 6.2. De acordo com os dados apresentados na Tabela 6.1, percebe-se que estas falhas foram de 8 % na ETA-Gramame e 2 % em Pedras de Fogo. As falhas ocorreram principalmente, no biênio 1998-1999, que foram marcados por prolongados períodos de estiagem na região. O alto valor de resiliência obtido para a demanda de Pedras de Fogo indica uma boa capacidade de recuperação do sistema, caso este falhe, enquanto para a ETA-Gramame haverá um atraso na sua recuperação, caso haja falha. A vulnerabilidade obtida para ETA-Gramame e para Pedras de Fogo foi inferior a 20 % (de baixo valor), que

é um aspecto favorável, uma vez que pode ser um indicativo de um sistema sustentável. Situação bem mais crítica foi constatada para o atendimento da demanda hídrica da Giasa, conforme mostrado na Figura 6.2, esta demanda não foi atendida no período compreendido entre 1997 e 2000, devido ao fato do abastecimento ter prioridade superior a esta demanda e este período ser marcado por dificuldades no atendimento às demandas da região. De acordo com os dados da Tabela 6.1, para esta demanda ocorreram falhas em 33 % do tempo, o sistema apresentou dificuldade de recuperar-se de uma falha (baixa resiliência) e nos meses em que o sistema falhou, pelo menos um mês apresentou falha de grande magnitude, atingindo o seu déficit máximo (100 %) e, ainda, apresentou índice de sustentabilidade de apenas 3 %.

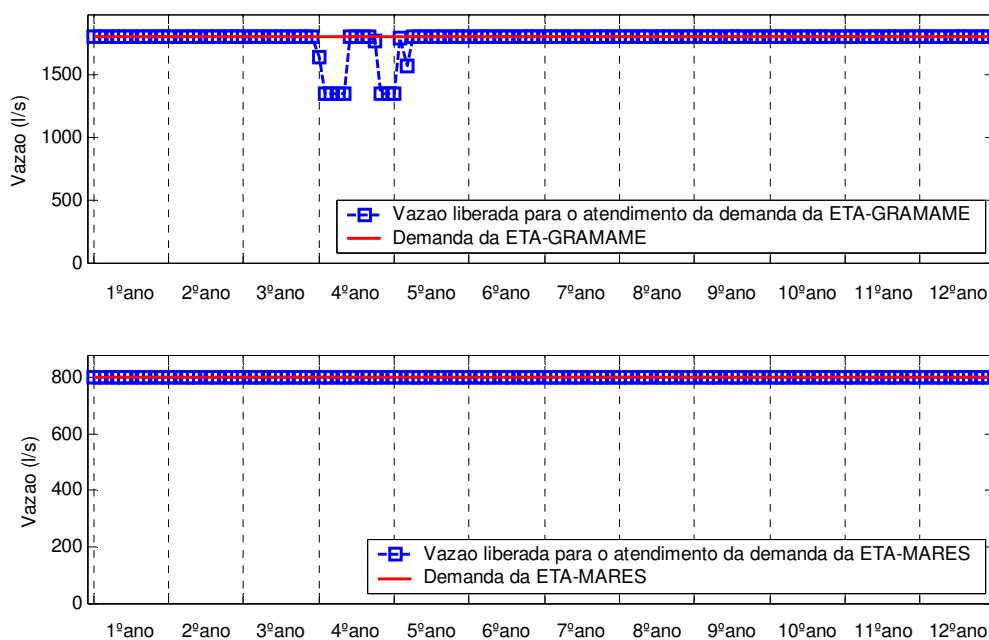


Figura 6.1 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés (Cenário 1)

Tabela 6.1 – Índices de desempenho das demandas para o período de 12 anos – Cenário 1

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	98	100	13	25	85	3
ETA-Gramame	92	18	18	25	14	11
ETA-Marés	100	-	-	-	100	-
Giasa	67	21	81	100	3	24

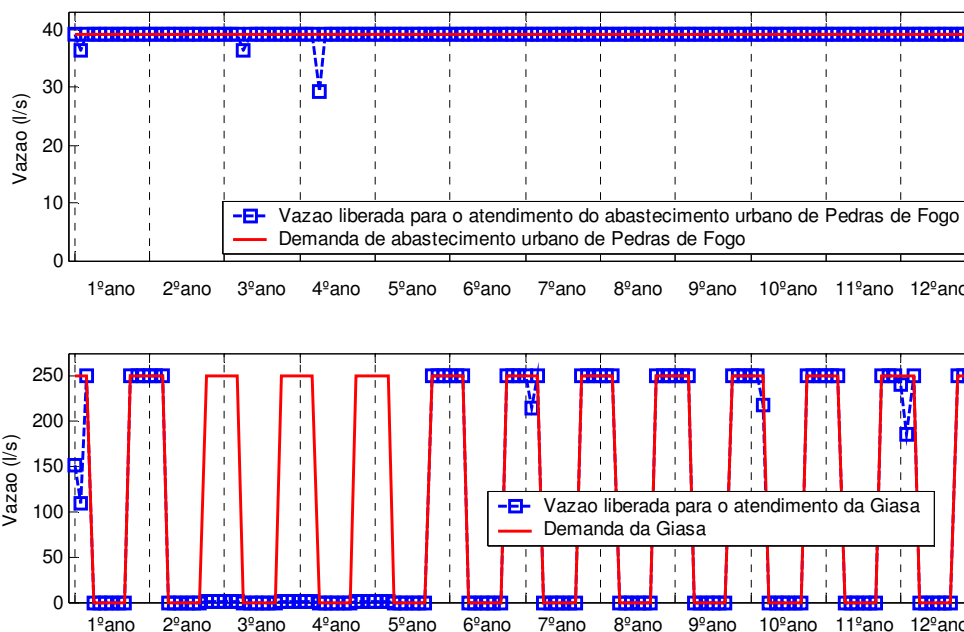


Figura 6.2 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa (Cenário 1)

6.1.1.2 – Agricultura irrigada

Tendo em vista que durante a safra a água precipitada na região é suficiente para a garantia do plantio das culturas, tornando-se assim desnecessária a prática da irrigação durante este período, e com o intuito de analisar o impacto da demanda de água da agricultura irrigada na disponibilidade dos recursos hídricos da região é que levou-se em consideração, para a otimização, a irrigação apenas na entressafra.

As áreas alocadas para todas as culturas agrícolas em todos os perímetros irrigados fornecidas pelo modelo de otimização multiobjetivo, para este cenário, foi nula, o que é possível constatar que a infra-estrutura hídrica atual não garante o atendimento das demandas hídricas das culturas agrícolas cultivadas na entressafra.

6.1.1.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

O comportamento hídrico mensal dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés relativo ao período simulado para o Cenário 1, gerado pelo modelo de otimização multiobjetivo pode ser observado na Figura 6.3. É possível constatar que: i) a condição de sustentabilidade hídrica foi atendida para os dois reservatórios, tendo em vista que ambos

apresentaram volume final pelo menos igual ao volume inicial estabelecido; ii) o menor volume atingido pelo reservatório Gramame-Mamuaba foi observado no quarto ano da série, justificado por longo período de estiagem na região. Contudo, o nível do reservatório ainda se manteve acima do seu volume mínimo; iii) não houve vertimento no reservatório Gramame-Mamuaba, daí o seu nível d'água foi mantido sempre abaixo das cotas dos respectivos sangradouros; iv) para o reservatório de Marés é possível constatar uma variabilidade e que o seu nível atingiu o mínimo vários meses; v) os menores volumes observados no reservatório de Marés ocorreram entre janeiro e março, meses de menores índices pluviométricos.

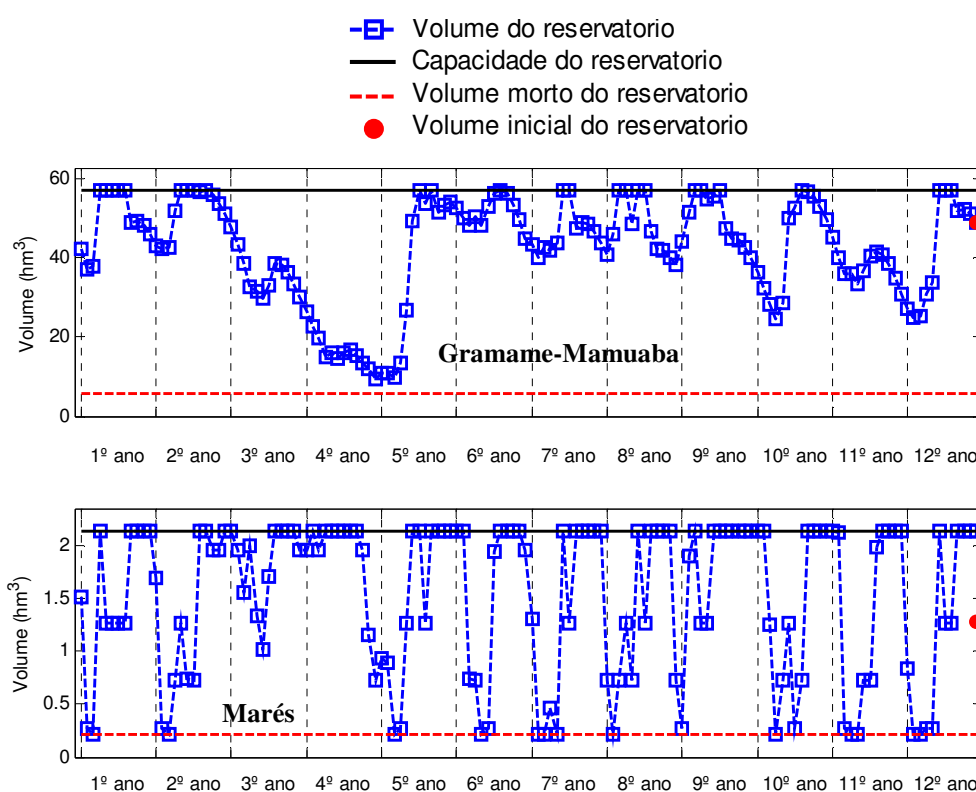


Figura 6.3 – Comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 1)

Na Tabela 6.2 são mostrados os índices de eficiência associados aos reservatórios, cuja descrição encontra-se na Seção 4.4.5.2 do capítulo de metodologia. Percebe-se claramente que quase todo o potencial do reservatório Gramame-Mamuaba e do reservatório de Marés está sendo disponibilizado ($IAP \approx 1$). Os dois reservatórios apresentam um elevado grau de utilização da potencialidade com a demanda hídrica (IUP) e ainda, um alto índice de utilização da disponibilidade com a demanda hídrica (IUD). Os

valores positivos do índice η_{VR} apresentados para os dois reservatórios corroboram com os resultados apresentados na Figura 6.3, isto é, o volume final dos reservatórios é superior ao volume inicial. O reservatório Gramame-Mamuaba perde 9 % de sua afluência por evaporação, enquanto Marés perde apenas 1 % (η_E). Na região Nordeste do Brasil este índice geralmente apresenta valores entre 5 e 30 %. Com relação a precipitação ocorrida na bacia hidráulica dos reservatórios, tem-se um percentual de 10 % no Gramame-Mamuaba e para Marés este índice foi de apenas 2 %. Foi observado vertimento apenas no reservatório de Marés, que teve um índice η_{QV} diferente de zero. No reservatório Gramame-Mamuaba 91 % da afluência é utilizado para atendimento das demandas consuntivas da água (abastecimento humano e irrigação) enquanto para o Marés tem-se um percentual de 95 % (η_e).

Tabela 6.2 – Índices de eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 1

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{QV}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,91	1,00	0,91	0,00	0,09	0,10	0,00	0,91
Marés	0,95	1,00	0,95	0,00	0,01	0,02	0,03	0,95

A CAGEPA monitora as vazões aduzidas dos rios Gramame e Mumbaba para o sistema de Marés e adota a transposição de água do rio Mumbaba apenas em períodos secos. Contudo, verifica-se que no processo de otimização é mais viável que seja transposta uma maior vazão do rio Mumbaba para Marés do que do rio Gramame, tendo em vista que este último atende a demanda da ETA-Gramame que é superior a da ETA-Marés e ainda, é possível reservar água no reservatório Gramame-Mamuaba, conforme mostrado na Figura 6.4.

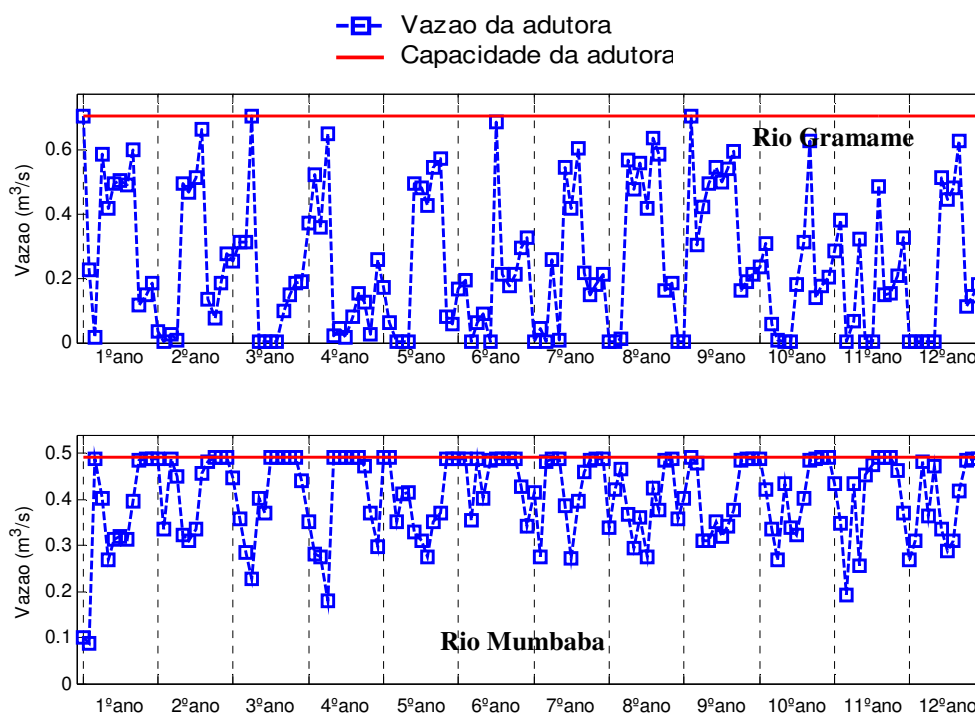


Figura 6.4 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 1)

6.1.1.4 – Desempenho Geral do Sistema

A falta de água para atendimento à demanda da Giasa constitui em prejuízo de menor dimensão do que para atendimento às culturas, assim sendo, faz-se necessário que haja uma garantia de 100 % para o atendimento agrícola. Por isso, mesmo a Giasa tendo prioridade inferior ao dos perímetros, a sua demanda foi atendida, conforme mostrado na Tabela 6.3.

Ainda de acordo com a Tabela 6.3, para o atendimento à demanda de abastecimento humano foram constatadas falhas de apenas 3 % (confiabilidade) ao longo do tempo. E caso haja falha, o sistema levará em média 3 meses para recuperar-se tendo esta falha uma magnitude média de 17 % do valor da demanda.

De maneira geral, constata-se que está sendo disponibilizado apenas 55 % do potencial do sistema (IAP), sendo possível aumentar a sua disponibilidade. Por outro lado, ocorre um alto índice de utilização da disponibilidade do sistema com a demanda hídrica (IUD), mas é possível um incremento através de uma expansão do IAP. Além disso, a irrigação é insustentável, isto é, a demanda necessária para as culturas agrícolas não será totalmente atendida ao longo de toda a série considerada.

Tabela 6.3 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 1

Índices Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abastecimento humano	0,97	0,36	0,17
Giasa	0,67	0,21	0,81
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,55	1,00	0,55
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	0,00	0,00	0,00

6.1.2 – Cenário 2 (reservatório no rio Mumbaba)

6.1.2.1 – Atendimento às demandas

Comparando-se com o Cenário 1, percebe-se que a construção do reservatório no rio Mumbaba favorecerá um melhor desempenho do sistema no tocante ao atendimento da demanda da ETA-Gramame, isto é, para este cenário, esta demanda terá uma redução no número de falhas (apenas 3% do tempo), uma melhor capacidade de recuperação de uma falha e maior sustentabilidade hídrica. Para o atendimento das demandas de Pedras de Fogo, ETA-Marés e da Giasa o comportamento hídrico do sistema permanecerá inalterado, conforme mostrado na Tabela 6.4 e nas Figuras 6.5 e 6.6.

Tabela 6.4 – Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 2

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	98	100	13	25	85	3
ETA-Gramame	97	50	19	25	39	4
ETA-Marés	100	-	-	-	100	0
Giasa	67	21	81	100	2,6	24

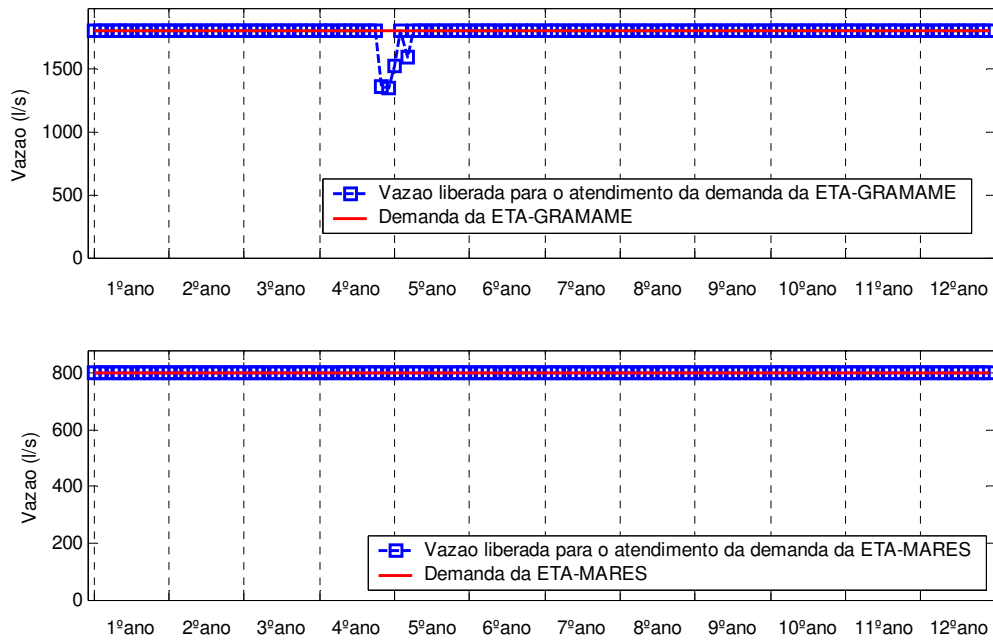


Figura 6.5 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 2

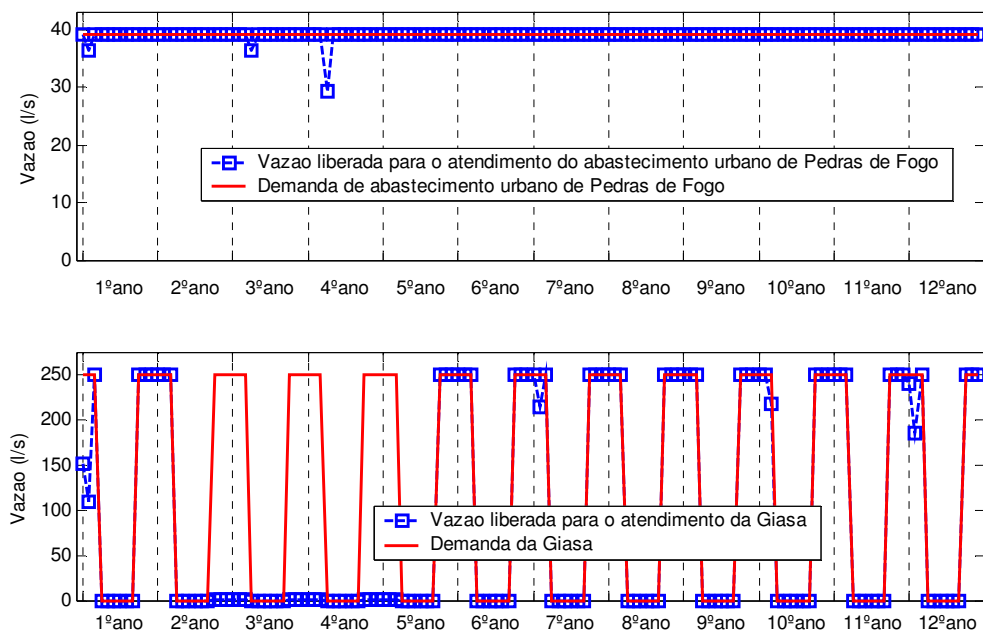


Figura 6.6 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 2

6.1.2.2 – Agricultura irrigada

Na Tabela 6.5 são apresentados os resultados relativos às áreas agrícolas otimizadas, lucratividade anual gerada, mão-de-obra necessária e consumo hídrico de cada cultura agrícola por perímetro, obtidos no modelo de otimização multiobjetivo. A construção do reservatório no rio Mumbaba favorece o atendimento da demanda para suprimento hídrico das culturas nos perímetros 7 (Alto Mumbaba) e 8 (Médio Mumbaba), onde é possível alocar uma área para plantio, com a garantia de obter lucro anual ao longo do período, com exceção apenas para o cultivo da cana-de-açúcar e do abacaxi no perímetro 8 que reflete em prejuízo.

Tabela 6.5 – Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 2.

Perímetro 7 – Alto Mumbaba					Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Area ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Area ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	33,5	181792,36	3953,00	1,81	Pimentão	7	96427,54	1344,00	0,37
Inhame	7,5	110245,29	1942,50	0,38	Inhame	6	87971,46	1554,00	0,32
Feijão	9	1164,34	549,00	0,36	Feijão	67,10	7086,22	4093,10	2,78
Abacaxi	46,5	389935,26	11299,50	3,59	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
					Cana-de-açúcar	0	0,00	0,00	0
					Coco-anão	5	62091,98	600,00	0,51
					Laranja-pêra	1	21470,42	168,00	0,08
					Graviola	10,6	418413,91	1908,00	1,60
					Abacaxi	0	0,00	0,00	0

6.1.2.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

Na Figura 6.7 e na Tabela 6.6 é apresentado o comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba, Marés e Mumbaba relativos ao Cenário 2. É possível observar que: i) o comportamento hídrico do reservatório Gramame-Mamuaba manteve-se praticamente inalterado com relação ao Cenário 1, contudo o reservatório de Marés apresentou melhores níveis e, atingiu o seu volume mínimo em apenas um mês; ii) o volume final do reservatório no rio Mumbaba é superior ao volume inicial estabelecido, garantindo a condição de sustentabilidade hídrica; iii) todo o potencial do reservatório no rio Mumbaba está sendo disponibilizado ($IAP \approx 1$), além de ocorrer um elevado grau de utilização da potencialidade e da disponibilidade com a demanda hídrica (IUP e IUD).

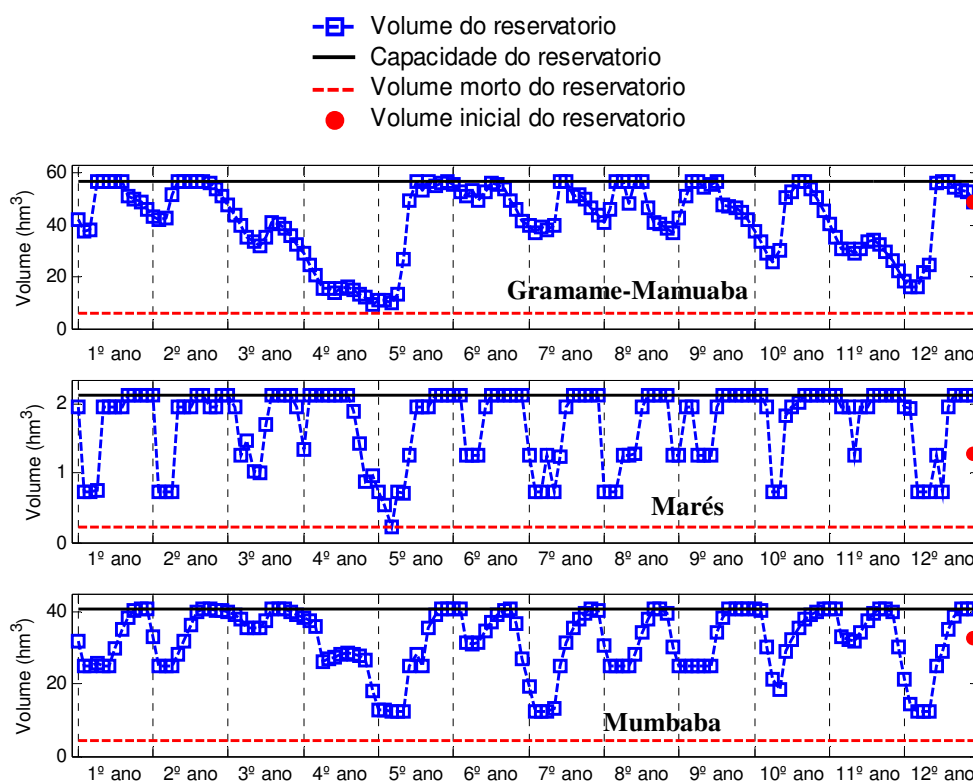


Figura 6.7 – Comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba, Marés e Mumbaba (Cenário 2)

Tabela 6.6 – Índices de eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 2

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{Qv}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,91	1,00	0,91	0,00	0,09	0,10	0,00	0,91
Marés	0,98	1,00	0,98	0,00	0,01	0,02	0,00	0,98
Mumbaba	0,87	0,98	0,86	0,02	0,12	0,12	0,00	0,86

As informações referentes às vazões aduzidas dos rios Gramame e Mumbaba até o reservatório de Marés para o atendimento da ETA-Marés são apresentadas na Figura 6.8. Comparando-se com Cenário 1 é possível constatar que houve uma redução na vazão captada do rio Mumbaba (reservatório) para o reservatório de Marés, devido à liberação de água para irrigação nos perímetros 7 e 8 sem prejuízo no atendimento da ETA-Marés. Porém, durante períodos de escassez hídrica esta vazão de captação foi superior. Assim

sendo, a adoção desta medida beneficiará, principalmente, o atendimento da demanda de irrigação ao longo do rio Mumbaba.

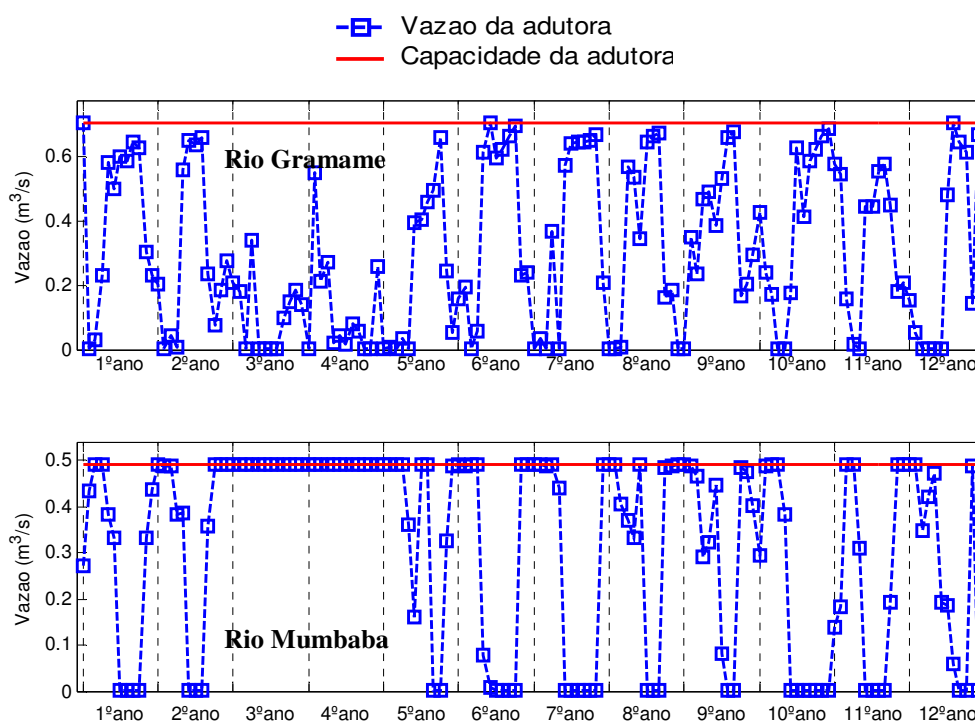


Figura 6.8 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 2)

6.1.2.4 – Desempenho Geral do Sistema

Os índices totais obtidos no modelo de otimização para o Cenário 2 estão dispostos na Tabela 6.7. Comparando-se ao Cenário 1 constata-se uma pequena redução do número de falhas no atendimento à demanda para abastecimento humano, contudo apresenta uma melhora significativa do sistema em recuperar-se de uma falha (resiliência de 71%). Para a Giasa o comportamento foi o mesmo apresentado no Cenário 1. Porém, é possível observar uma melhora significativa no que tange a área agrícola, lucratividade e mão-de-obra necessária para a irrigação. O abacaxi (Alto Mumbaba), o mamão e a graviola (Médio Mumbaba) foram as culturas alocadas pelo modelo que tiveram a maior receita líquida.

Tabela 6.7 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 2

Índices Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abastecimento humano	0,98	0,71	0,17
Giasa	0,67	0,21	0,81
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,55	0,99	0,54
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	261,80	1.754.198,51	40.605

6.1.3 – Cenário 3 (transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a ETA Gramame)

6.1.3.1 – Atendimento às demandas

A intervenção hidráulica correspondente à construção do sistema adutor Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame garantirá em 100% o atendimento da demanda da ETA-Gramame que refletirá na sustentabilidade hídrica de 100% e ainda, possibilitará o atendimento parcial da demanda da Giasa, em períodos críticos. Nas Figuras 6.9 e 6.10 e na Tabela 6.8, observa-se que o comportamento do sistema no atendimento às demandas da ETA-Marés e de Pedras de Fogo não sofrerá alterações, quando comparado com o Cenário 1.

Tabela 6.8 – Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 3.

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	98	100	13	25	85	3
ETA-Gramame	100	-	-	-	100	0
ETA-Marés	100	-	-	-	100	0
Giasa	67	33	42	100	13	24

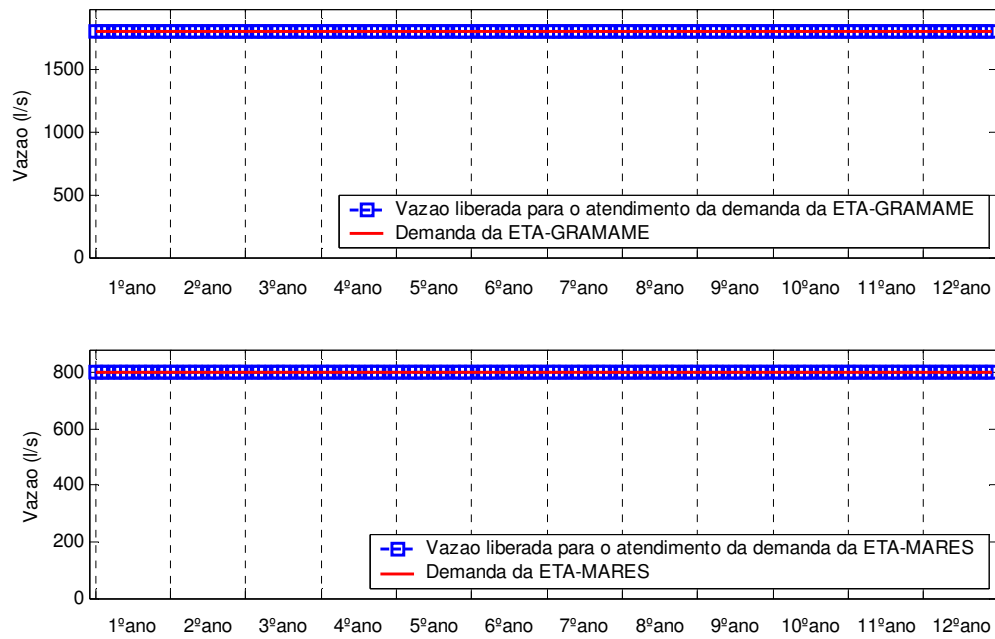


Figura 6.9 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 3

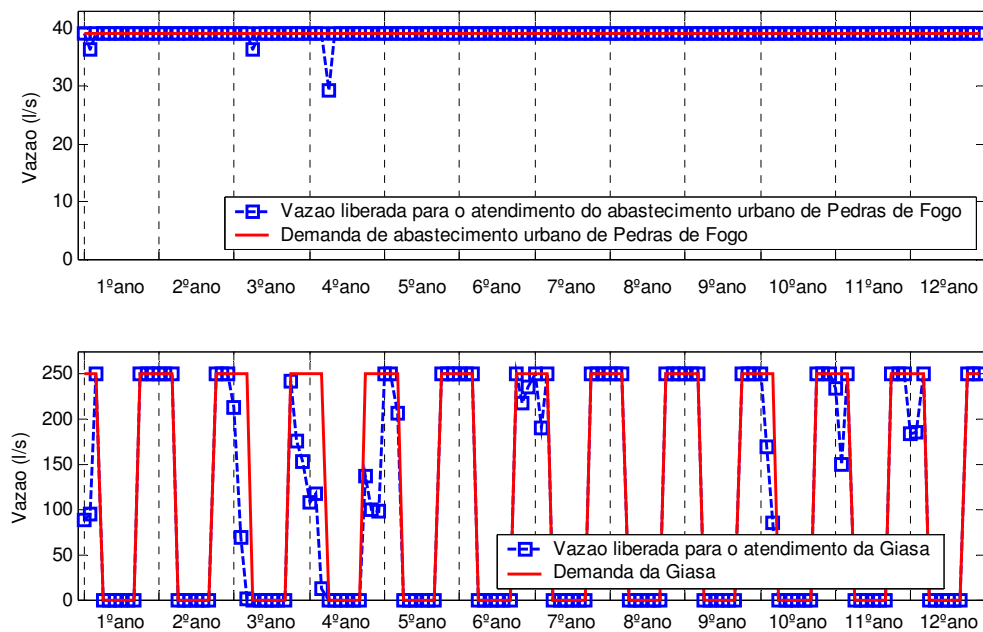


Figura 6.10 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa – Cenário 3

6.1.3.2 – Agricultura irrigada

Os dados relativos às áreas agrícolas otimizadas, lucratividade anual gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação das culturas em cada perímetro, obtidos no modelo de otimização multiobjetivo para o Cenário 3 podem ser vistos na Tabela 6.9. A adoção desta medida beneficiará o plantio de culturas na maioria dos perímetros, sendo que para o perímetro 1 (Alto Gramame) é sugerido o plantio apenas da batata doce e do feijão enquanto, nos demais perímetros quase todas as culturas apresentam sustentabilidade, com exceção apenas para a cana-de-açúcar.

Observam-se nos perímetros 2 (Giasa 1) e 4 (Giasa 2) que não foi considerada a receita líquida, tendo em vista que o lucro da Giasa é obtido com a venda do produto final.

O abacaxi alocado no perímetro 5 (Alto Mamuaba) é a cultura de maior rentabilidade seguida da graviola no perímetro 8 (Médio Mumbaba) e do inhame no perímetro 6 (Baixo Gramame).

Tabela 6.9 – Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 3.

Perímetro 1 – Alto Gramame					Perímetro 6 – Baixo Gramame				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³ /ano)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume hm ³ /ano
Batata doce	18	98053,28	2.124	0,95	Batata doce	0,5	2728,76	59	0,03
Inhame	0	0	0	0	Inhame	27,5	404762,37	7122,5	1,37
Feijão	4	542,18	244	0,16	Feijão	17,5	2603,92	1067,5	0,67
Mamão	0	0	0	0	Mamão	19,5	109625,06	3750,5	2,18
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Abacaxi	0	0	0	0	Abacaxi	22	189060,31	5346	1,83
Perímetro 2 – Giasa 1 (rio Gramame)					Perímetro 7 – Alto Mumbaba				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO (diárias/ano)	Volume hm ³ /ano	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume hm ³ /ano
Cana-de-açúcar	211,08	-	3588,29	20,89	Batata doce	33,5	181792,35	3953,00	1,81
					Inhame	7,5	110245,29	1942,50	0,38
					Feijão	9	1164,34	549,00	0,36
					Abacaxi	46,5	389935,26	11299,50	3,59
Perímetro 3 – Reservatório Gramame-Mamuaba					Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume hm ³ /ano	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume hm ³ /ano
Batata doce	1	5491,15	118	0,05	Pimentão	7	96427,54	1344	0,37
Inhame	0,50	7397,47	129,5	0,02	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Feijão	0,75	113,84	45,75	0,02	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Mamão	7,8	45600,28	1500,2	0,75	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Maracujá	0,8	3979,86	133,6	0,06	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Banana	1	6471,47	213	0,05	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
					Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
					Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
					Abacaxi	0	0	0	0
Perímetro 4 – Giasa 2 (rio Mamuaba)					Perímetro 5 – Alto Mamuaba				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO (diárias/ano)	Volume (hm ³ /ano)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume hm ³ /ano
Cana-de-açúcar	52,91	-	899,4	6,63	Batata doce	3	16208,62	354	0,17
					Inhame	4,4	64512,4	1139,6	0,24
					Feijão	4	422,43	244	0,17
					Mamão	17	93574,27	3269,67	2,04
					Cana-de-açúcar	0	0	0	0
					Coco-anão	1	12418,39	120	0,1
					Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
					Abacaxi	146,5	1222974,14	35599,5	11,62

6.1.3.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

De acordo com os dados relativos ao comportamento hídrico mensal dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés gerado pelo modelo de otimização multiobjetivo referente ao período simulado para o Cenário 3, mostrados na Tabela 6.10 é possível constatar que o comportamento hídrico do reservatório Gramame-Mamuaba foi praticamente o mesmo apresentado no cenário 1. No reservatório Marés houve uma redução na quantidade de água utilizada para atendimento da demanda da ETA-Marés e um incremento na água que sai por descarga de fundo.

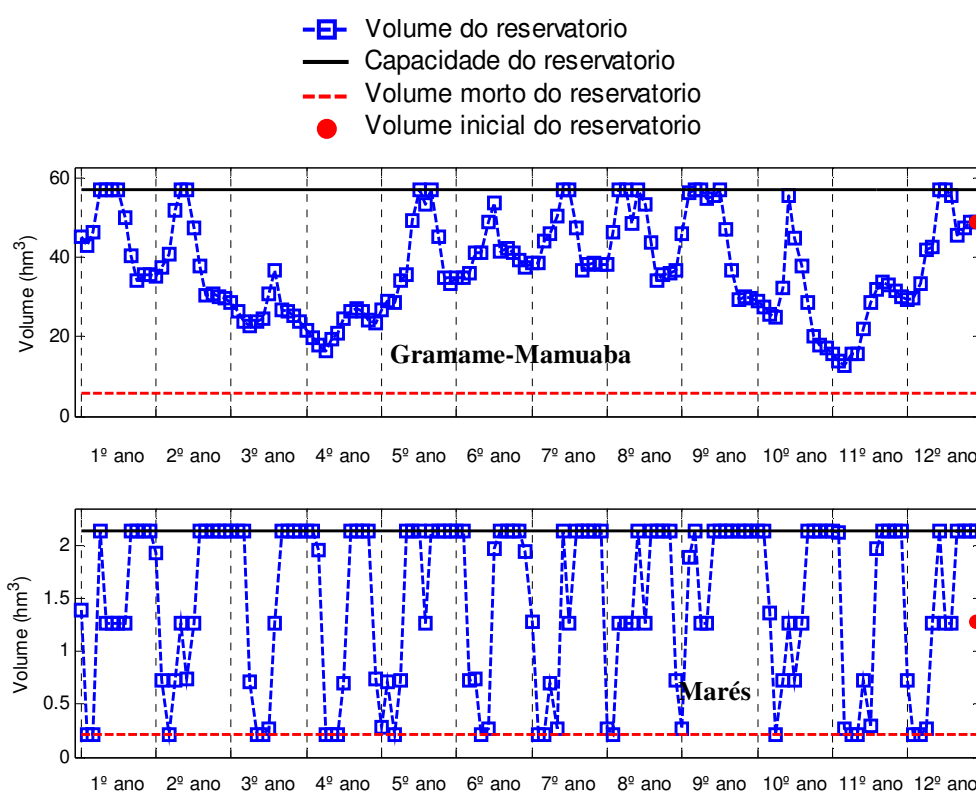


Figura 6.11 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 3)

Tabela 6.10 – Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 3

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_{π}	η_{Qv}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,91	1,00	0,91	0,00	0,09	0,11	0,00	0,91
Marés	0,94	1,00	0,93	0,00	0,01	0,01	0,05	0,93

Os dados referentes às vazões aduzidas dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés e da adutora dos rios Abiaí-papocas para a ETA-Gramame estão dispostos na Figura 6.12. Comparando-se ao Cenário 1, é possível notar que o comportamento das adutoras já existentes sofreu pequena variação e que, para o processo de otimização, a retirada de água do rio Mumbaba continua sendo mais viável. A construção da nova adutora garantirá durante o período uma vazão de até $1,12 \text{ m}^3/\text{s}$ para a ETA-Gramame.

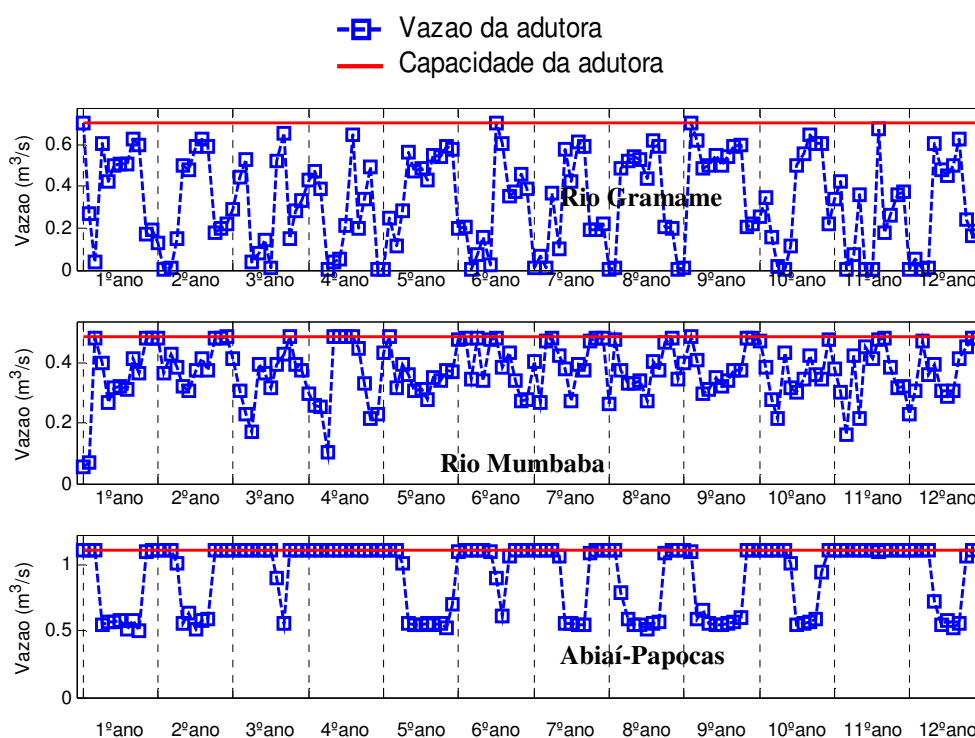


Figura 6.12 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame, Mumbaba para o reservatório de Marés e do rio Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame (Cenário 3)

6.1.3.4 – Desempenho Geral do Sistema

Os dados referentes ao desempenho geral do sistema obtidos para o Cenário 3 através do modelo de otimização multiobjetivo, podem ser vistos na Tabela 6.11. Comparados aos resultados do Cenário 1, tem-se para o abastecimento humano uma redução no número de falhas ao longo do tempo, alta capacidade de recuperação do sistema após a ocorrência de uma falha, isto é, havendo uma falha, no mês seguinte o sistema volta a sua normalidade, também é possível constatar a redução na magnitude da falha para atendimento desta

demanda. Para o atendimento da Giasa, constata-se melhoria na capacidade de recuperação e a redução na magnitude da falha. Os índices relativos à potencialidade, disponibilidade e demanda apresentaram comportamento parecido com o obtido no Cenário 1. Para este cenário, as culturas agrícolas tiveram incremento na área alocada, na receita líquida gerada e na mão-de-obra necessária, cujos valores superaram os do Cenário 2.

Tabela 6.11 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 3

Índices Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abastecimento humano	0,99	1,00	0,13
Giasa	0,67	0,33	0,42
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,50	1,00	0,50
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	823,54	3319851,82	107841

6.1.4 – Cenário 4 (reservatório no alto curso do rio Gramame)

6.1.4.1 – Atendimento às demandas

Na Tabela 6.12 e nas Figuras 6.13 e 6.14 estão dispostos os resultados relativos ao comportamento hídrico do sistema para o atendimento das demandas com a construção do reservatório no alto Gramame. Observa-se que houve uma melhora do sistema no atendimento de todas as demandas hídricas, quando comparado aos resultados obtidos para o Cenário 1, ficando Pedras de Fogo com 0% de falha e a máxima sustentabilidade. Para a ETA-Gramame houve uma redução de 5% das falhas e um melhor desempenho do sistema em recuperar-se de uma falha, além da melhoria na sustentabilidade hídrica. Apesar da melhoria no atendimento da demanda da Giasa, devido à redução no número de falhas ao longo do tempo, a capacidade do sistema em recuperar-se, quando entra em um estado de falha mostrou-se desfavorável e, em pelo menos um mês, ocorreu falha de grande magnitude com déficit máximo de 100%, isto é, a demanda requerida para abastecimento

da Giasa não teve nenhuma vazão alocada neste mês, ocasionando um índice de sustentabilidade de 0%.

Tabela 6.12 – Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 4.

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	100	-	-	-	100	0
ETA-Gramame	97	60	19	25	47	5
ETA-Marés	100	-	-	-	100	0
Giasa	75	6	100	100	0	18

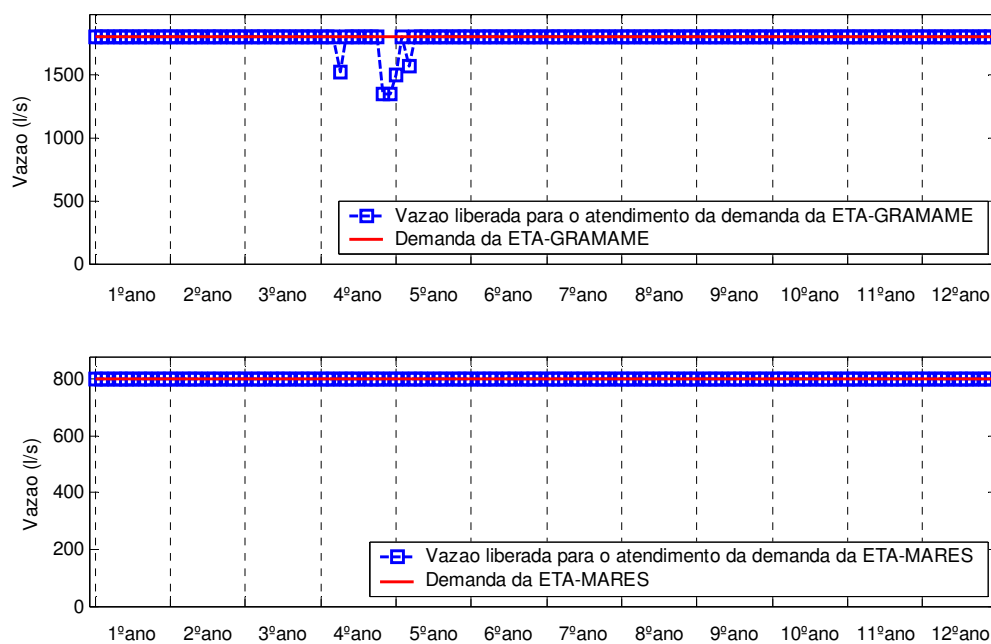


Figura 6.13 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 4

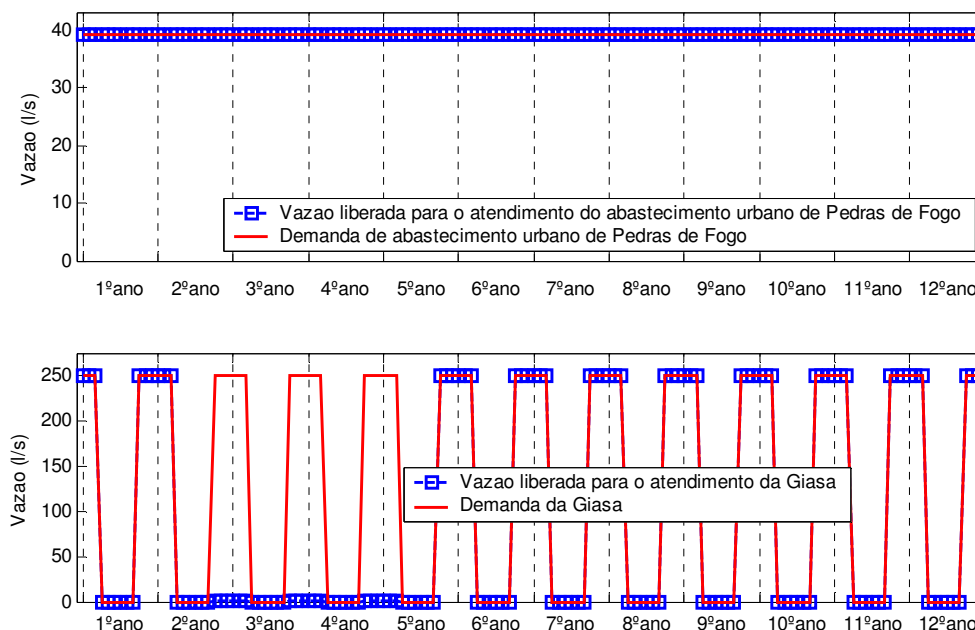


Figura 6.14 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 4

6.1.4.2 – Agricultura irrigada

Para este cenário o comportamento do sistema relativo à alocação de água para irrigação permanece inalterado quando comparado ao Cenário 1, ou seja, tem-se que o suprimento de água para irrigação torna-se, ainda, comprometido com a adoção desta medida de intervenção hidráulica, de maneira que a agricultura irrigada da região permanecerá insustentável, podendo ocorrer falhas no suprimento de água para as culturas de todos os perímetros durante o período considerado. Assim sendo, não foi alocada área em nenhum dos perímetros.

6.1.4.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

Os dados relativos ao comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba, Marés e do reservatório no alto Gramame estão disponibilizados na Figura 6.15 e na Tabela 6.13. A partir destes dados percebe-se que: i) o comportamento hídrico mensal dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés permaneceu inalterado comparado com o Cenário 1; ii) a condição de sustentabilidade hídrica foi atendida para todos os reservatórios, uma vez que, o volume final atingido pelos 3 reservatórios foi pelo menos igual ao volume inicial estabelecido; iii) o Gramame-Mamuaba foi o único reservatório

que não houve vertimento, ficando o seu nível d'água mantido sempre abaixo das cotas dos respectivos sangradouros; iv) de toda a água disponível no reservatório do alto curso do rio Gramame, 62 % sai por descarga de fundo e por tomada d'água para atendimento das demandas consuntivas.

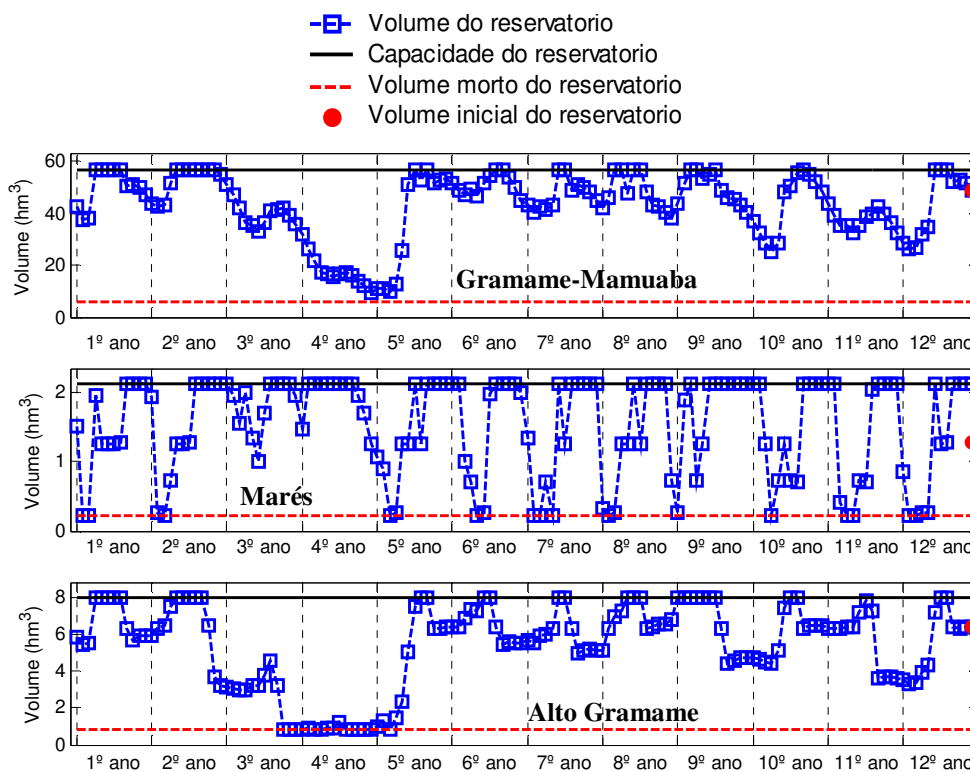


Figura 6.15 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba, Marés e no alto Gramame (Cenário 4)

Tabela 6.13 – Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 4

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{Qv}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,91	1,00	0,91	0,00	0,09	0,10	0,00	0,91
Marés	0,95	1,00	0,95	0,00	0,01	0,02	0,03	0,95
Alto Gramame	0,62	1,00	0,62	0,00	0,24	0,30	0,14	0,62

Na Figura 6.16 são apresentadas as vazões liberadas pelas adutoras que partem do rio Gramame e do rio Mumbaba para o reservatório de Marés, é possível constatar que as

adutoras apresentaram comportamento hídrico semelhante ao do Cenário 1 e, que para otimizar o uso da água, e assim garantir o atendimento às demandas, as vazões aduzidas não foram constantes ao longo do tempo.

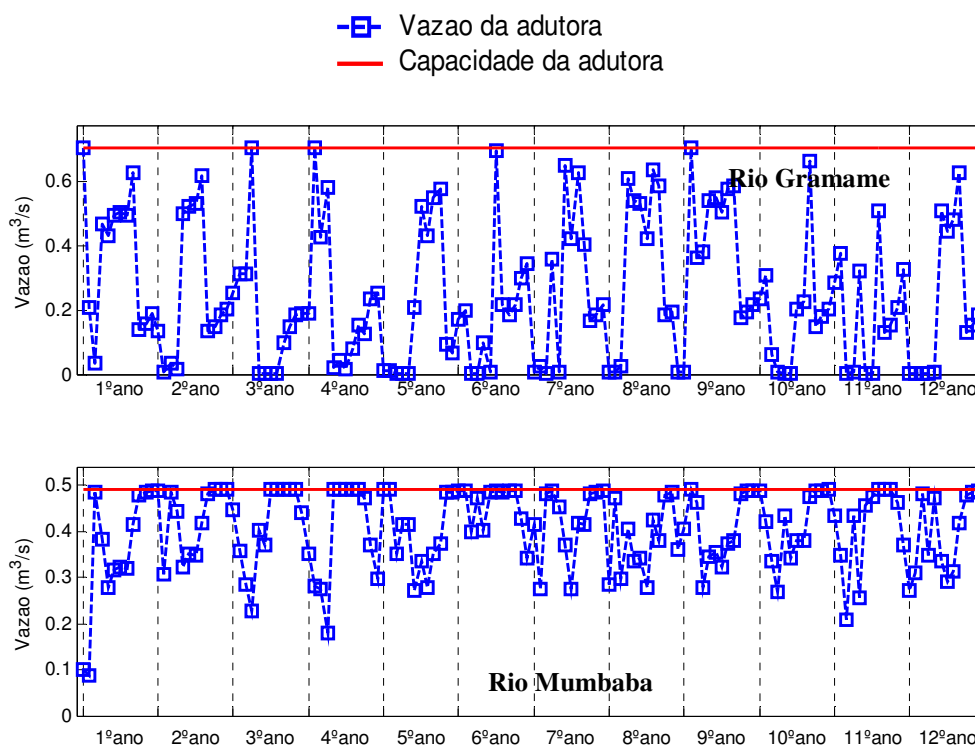


Figura 6.16 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 4)

6.1.4.4 – Desempenho Geral do Sistema

Os dados dispostos na Tabela 6.14 referem-se aos índices totais obtidos pelo modelo de otimização para o Cenário 4. Comparando-se com o Cenário 1, verifica-se que, para o atendimento da demanda de abastecimento humano, houve uma redução no percentual de falhas (confiabilidade) e uma melhora na capacidade de recuperação do sistema em caso de falha (resiliência). Já para o atendimento à demanda da Giasa também houve uma redução no número de falhas, contudo piorou a capacidade de recuperação do sistema.

No que se refere à irrigação, o sistema manteve as mesmas características apresentadas no Cenário 1, isto é, não foi possível alocar área para o cultivo agrícola em nenhum dos perímetros considerados no estudo.

Tabela 6.14 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 4

Índices Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abastecimento humano	0,99	0,60	0,19
Giasa	0,75	0,06	1,00
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,54	1,00	0,54
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	0	0	0

6.1.5 – Cenário 5 (reservatórios nos rios Mumbaba e Alto Gramame)

6.1.5.1 – Atendimento às demandas

Nas Figuras 6.17 e 6.18 e na Tabela 6.15 estão dispostos os resultados gerados pelo modelo de otimização, relativos ao comportamento hídrico do sistema para o atendimento das demandas com a construção dos reservatórios nos rios Mumbaba e alto Gramame. Comparados aos resultados obtidos para o Cenário 1, percebe-se que o comportamento do sistema no atendimento à demanda da ETA-Marés foi o mesmo, enquanto que as demandas da ETA-Gramame e Pedras de Fogos tiveram garantia de 100 % ao longo do tempo. Apesar da redução no número de falhas para atendimento da demanda da Giasa, ocorreu uma redução do índice de resiliência, que reflete numa maior dificuldade de recuperação de uma falha e ainda um aumento da magnitude, resultando numa sustentabilidade nula.

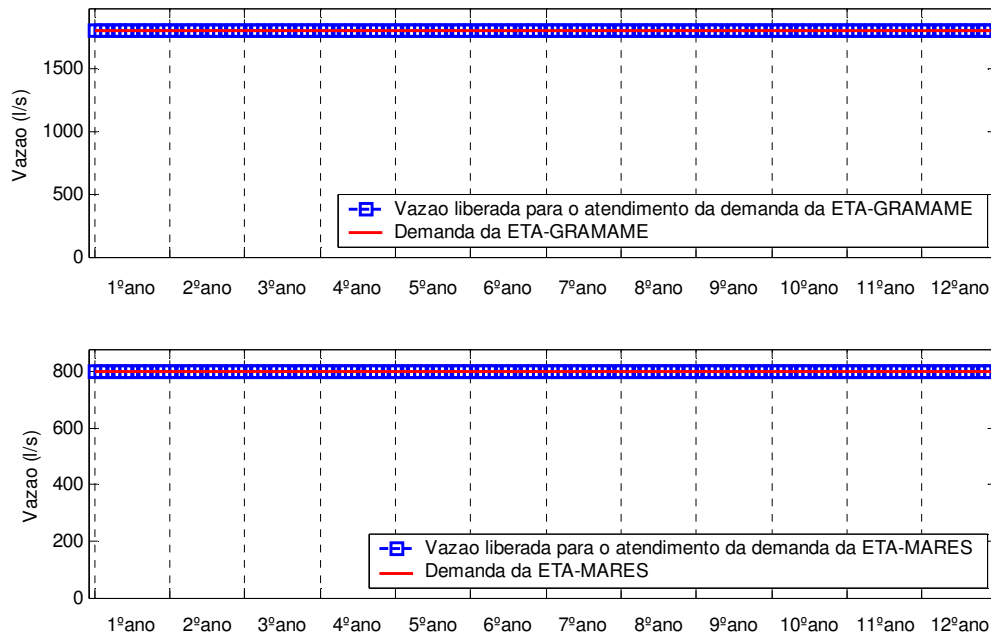


Figura 6.17 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 5

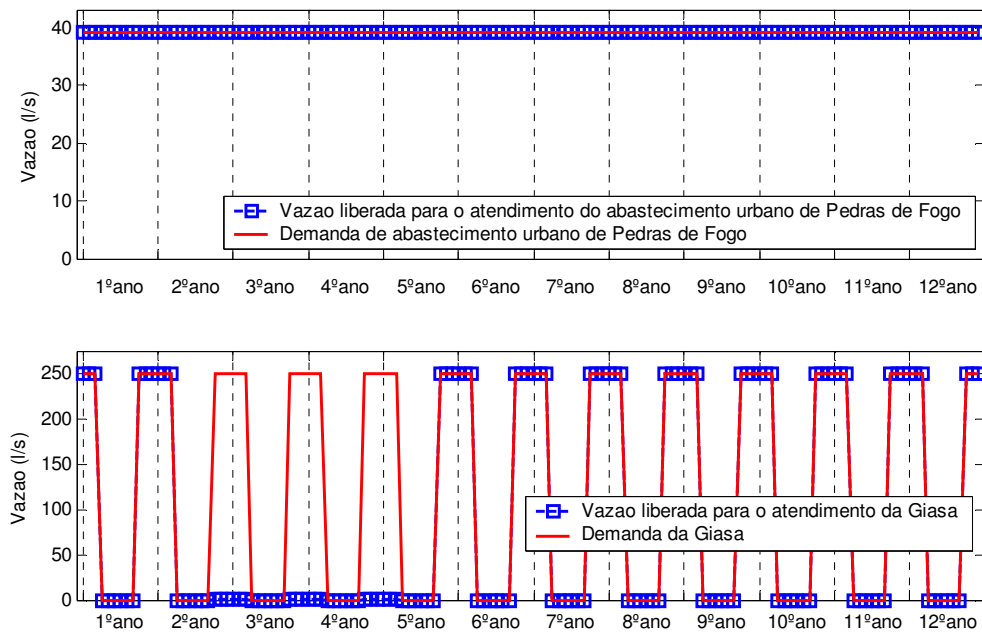


Figura 6.18 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa- Cenário 5

Tabela 6.15 – Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 5.

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	100	-	-	-	100	0
ETA-Gramame	100	-	-	-	100	0
ETA-Marés	100	-	-	-	100	0
Giasa	75	6	100	100	-	18

6.1.5.2 – Agricultura irrigada

Na Tabela 6.16 são apresentados os dados relativos à agricultura irrigada, obtidos no modelo de otimização multiobjetivo para o Cenário 5. A adoção desta medida de intervenção hidráulica favorece o cultivo da agricultura irrigada ao longo de toda a área da bacia, onde é possível alocar áreas para plantio da maioria das culturas com a garantia de obter lucro anual ao longo do período de 12 anos. Percebe-se que o cultivo da cana-de-açúcar é inadequado para todos os perímetros. As culturas que apresentaram a maior rentabilidade foram: o inhame no Perímetro 6 (Baixo Gramame), o abacaxi no Perímetro 7 (Alto Mumbaba), o mamão e a graviola no Perímetro 8 (Médio Mumbaba),

Tabela 6.16 – Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 5.

Perímetro 1 – Alto Gramame				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	18	98053,29	2.124	0,95
Inhame	2	29468,6	518	0,1
Feijão	4	542,18	244	0,16
Mamão	2	11238,79	384,67	0,22
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Abacaxi	2	17200,31	486	0,17

Perímetro 2 – Giasa 1 (rio Gramame)				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO (diárias/ano)	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	0	0	0	0

Perímetro 3 – Reservatório Gramame-Mamuaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	1	5491,16	118	0,05
Inhame	0,5	7397,47	129,5	0,02
Feijão	0,75	113,84	45,75	0,03
Mamão	7,8	45600,28	1500,2	0,75
Maracujá	0,8	3979,86	133,6	0,06
Banana	1	6471,47	213	0,05

Perímetro 4 – Giasa 2 (rio Mamuaba)				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO (diárias/ano)	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	0	0	0	0

Perímetro 5 – Alto Mamuaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	0	0	0	0
Inhame	4,4	64512,41	1139,6	0,24
Feijão	0	0	0	0
Mamão	0	0	0	0
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Coco-anão	0	0	0	0
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Abacaxi	0	0	0	0

Perímetro 6 – Baixo Gramame				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	0,5	2728,76	59	0,03
Inhame	27,5	404762,37	7122,5	1,37
Feijão	0	0	0	0
Mamão	0	0	0	0
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Abacaxi	2,35	20197,50	571,12	0,2

Perímetro 7 – Alto Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	33,5	181792,36	3953,00	1,81
Inhame	7,5	110245,29	1942,50	0,38
Feijão	9	1164,34	549,00	0,36
Abacaxi	46,5	389935,26	11299,50	3,59

Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Pimentão	7	96427,54	1344	0,37
Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Abacaxi	0	0	0	0

6.1.5.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

O comportamento hídrico mensal dos reservatórios Gramame-Mamuaba, Marés, Mumbaba e alto Gramame estão mostrados nas Figuras 6.19 e 6.20 e na Tabela 6.17. É possível constatar que: i) o comportamento do reservatório Gramame-Mamuaba não sofreu muita alteração, quando comparado ao Cenário 1, enquanto o reservatório de Marés apresentou um melhor desempenho, seu volume mínimo foi igual ao volume morto em apenas dois meses além, de operar sempre próximo da sua capacidade máxima; ii) a condição de sustentabilidade hídrica foi observada para todos os reservatórios, pois apresentaram volume final pelo menos igual ao volume inicial estabelecido; iii) os reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés não apresentaram vertimento; iv) todo o potencial hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés está sendo disponibilizado ($IAP \approx 1$) e ainda, apresentam elevados índices de utilização da potencialidade (IUP) e de utilização da disponibilidade (IUD) com a demanda; v) o reservatório do alto Gramame quando operado de forma integrada com o do Mumbaba apresenta um comportamento mais adequado, isto é, opera vários meses com a sua capacidade máxima além de não ocorrerem muitos meses subsequentes em que seu volume permaneça com valores baixos, favorecendo a manutenção da qualidade da água do reservatório.

Tabela 6.17 – Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 5

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{Qv}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,91	1,00	0,91	0,00	0,09	0,10	0,00	0,91
Marés	0,98	1,00	0,98	0,00	0,01	0,02	0,00	0,98
Alto Gramame	0,81	0,98	0,79	0,02	0,12	0,12	0,07	0,79
Mumbaba	0,82	1,00	0,82	0,00	0,10	0,12	0,08	0,82

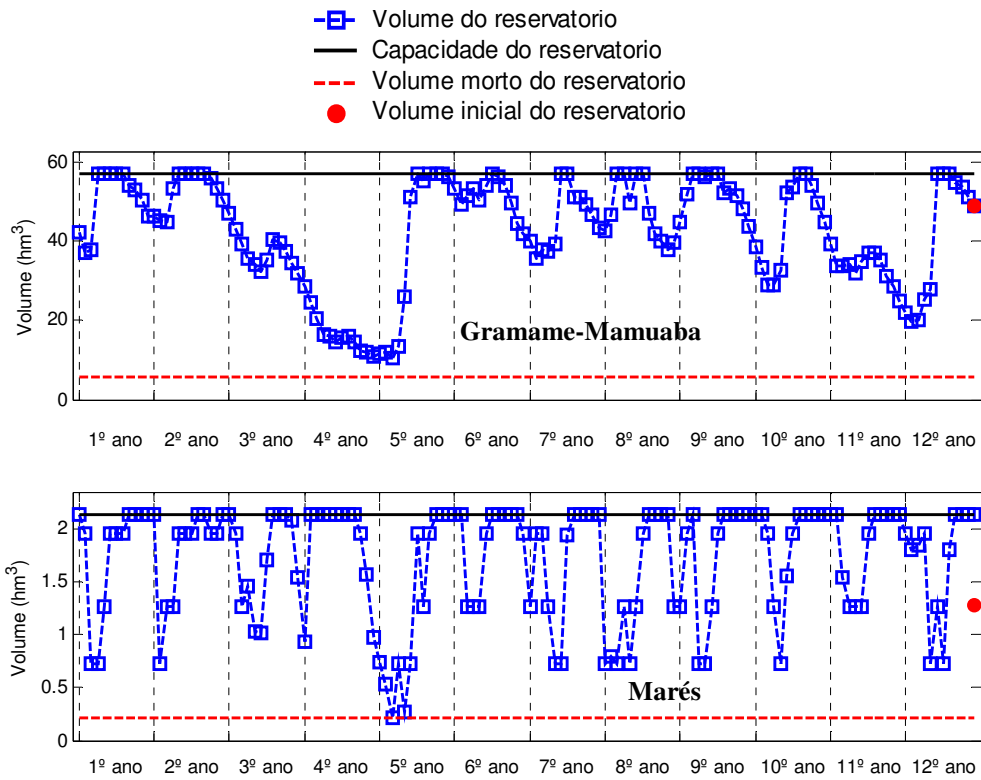


Figura 6.19 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 5)

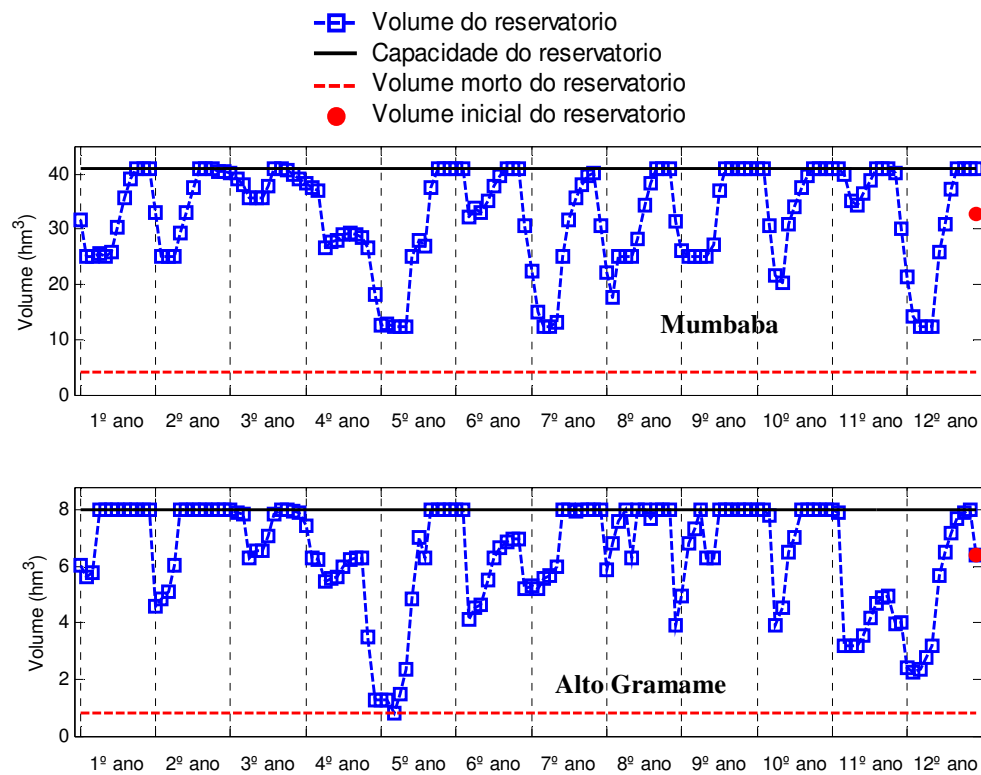


Figura 6.20 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Mumbaba e Alto Gramame (Cenário 5)

Os dados referentes às vazões aduzidas dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés, que irá atender a demanda da ETA-Marés estão disponibilizados na Figura 6.21, percebe-se que, durante o período de escassez hídrica ocorrido na região, a vazão liberada pela adutora do rio Mumbaba foi igual a sua capacidade.

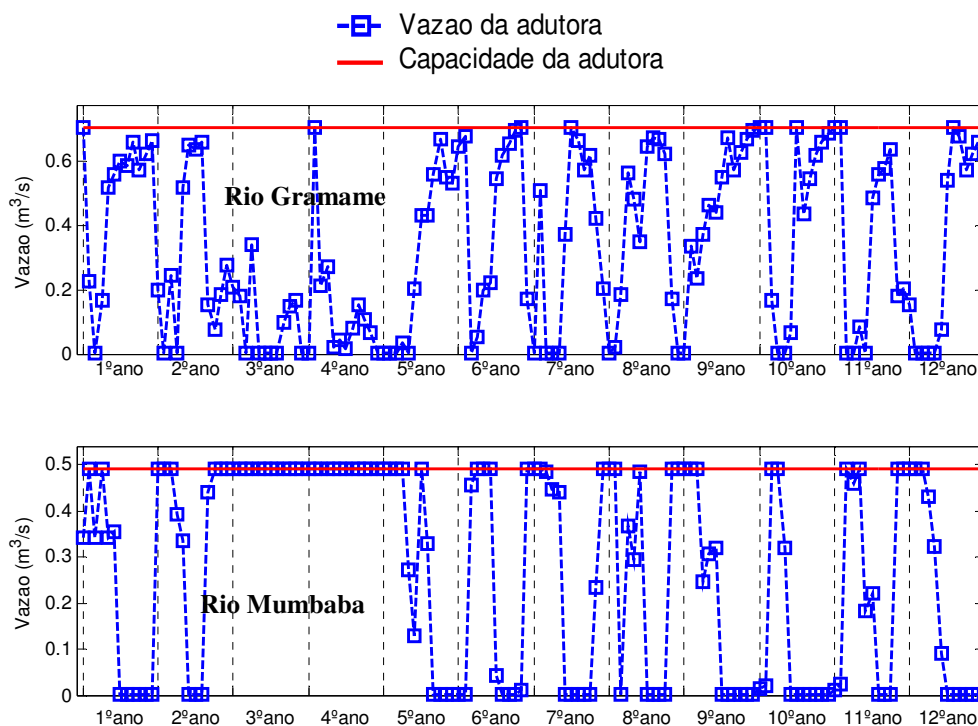


Figura 6.21 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés (Cenário 5)

6.1.5.4 – Desempenho Geral do Sistema

Para este cenário o atendimento à demanda para abastecimento humano é garantido integralmente, não havendo período de falhas. O atendimento da demanda da Giasa apresentou redução do número de falhas, uma menor capacidade de recuperar-se de uma falha e uma maior magnitude, conforme apresentado na Tabela 6.18.

Para este cenário é indicado o plantio de 337,40 ha de área por ano, que traduz numa receita líquida de 2.493.427 reais por ano e na criação de 55.562 empregos direto na agricultura.

Tabela 6.18 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 5

Índices Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abastecimento humano	1,00	–	–
Giasa	0,75	0,06	1,00
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,55	0,99	0,54
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	337,4	2493427,22	55562

6.1.6 – Cenário 6 (reservatório no rio Mumbaba e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas)

6.1.6.1 – Atendimento às demandas

Os resultados do comportamento hídrico do sistema para o atendimento das demandas, para este cenário, podem ser observados na Tabela 6.19 e nas Figuras 6.22 e 6.23. Comparando com os resultados do Cenário 1, percebe-se que, para este cenário, o comportamento do sistema no atendimento às demandas da ETA-Marés e de Pedras de Fogo manteve-se estável, enquanto que a demanda da ETA-Gramame foi plenamente atendida durante todo o período. Para o atendimento da Giasa é possível verificar uma melhor capacidade de recuperação do sistema em caso de falha, uma menor vulnerabilidade e um maior índice de sustentabilidade.

Tabela 6.19 – Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 6.

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	98	100	13	25	85	3
ETA-Gramame	100	-	-	-	100	0
ETA-Marés	100	-	-	-	100	0
Giasa	67	33	42	100	13	24

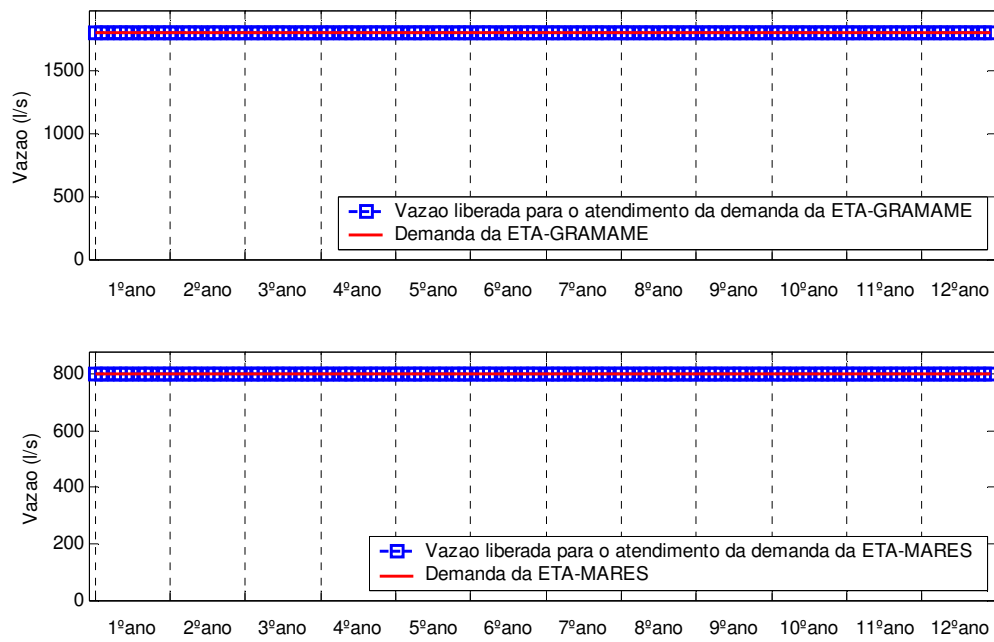


Figura 6.22 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 6

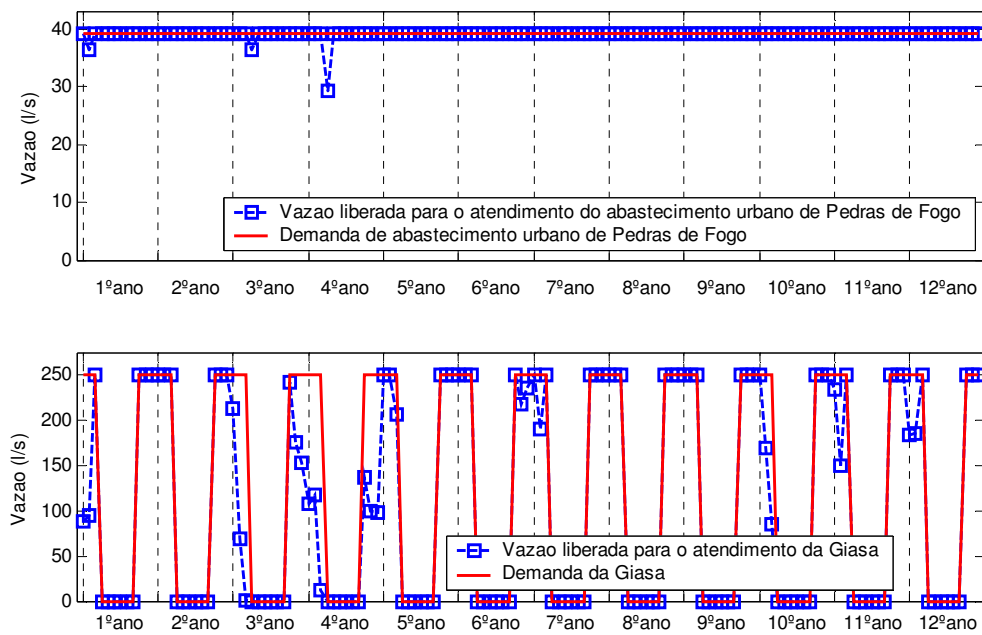


Figura 6.23 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 6

6.1.6.2 – Agricultura irrigada

De acordo com os dados da Tabela 6.20, observa-se que, para este cenário, é possível a otimização de áreas agrícolas com a garantia de obter lucratividade em todos os perímetros, contudo não é sugerido o plantio da cana-de-açúcar, uma vez que ela não gera receita líquida.

As culturas que apresentaram maior lucratividade foram: o inhame no perímetro 6 (Baixo Gramame), o abacaxi no perímetro 7 (Alto Mumbaba), o mamão e a graviola no perímetro 8 (Médio Mumbaba). Constatam-se nos perímetros 2 (Giasa 1) e 4 (Giasa 2), que foi alocada área para o plantio da cana-de-açúcar, contudo não foi considerada a receita líquida, tendo em vista que o lucro da Giasa é obtido com a venda do produto final.

Tabela 6.20 – Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 6.

Perímetro 1 – Alto Gramame					Perímetro 6 – Baixo Gramame				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	18	98053,28	2124	0,95	Batata doce	0,5	2728,76	59	0,03
Inhame	0	0	0	0	Inhame	27,5	404762,37	7122,5	1,37
Feijão	4	542,18	244	0,16	Feijão	17,5	2603,92	1067,5	0,67
Mamão	0	0	0	0	Mamão	19,5	109625,06	3750,5	2,18
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Abacaxi	0	0	0	0	Abacaxi	22	189060,31	5346	1,83
Perímetro 2 – Giasa 1 (rio Gramame)					Perímetro 7 – Alto Mumbaba				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	211,08	-	3588,29	20,89	Batata doce	33,5	181792,35	3953	1,81
Perímetro 3 – Reservatório Gramame-Mamuaba					Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	1	5491,15	118	0,05	Pimentão	7	96427,54	1344	0,37
Inhame	0,5	7397,47	129,5	0,02	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Feijão	0,75	113,84	45,75	0,03	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Mamão	7,8	45600,28	1500,2	0,75	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Maracujá	0,8	3979,86	133,6	0,06	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Banana	1	6471,47	213	0,05	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Perímetro 4 – Giasa 2 (rio Mamuaba)					Perímetro 5 – Alto Mamuaba				
Culturas	Área ha/ano	RL (R\$/ano)	MO (diárias/ano)	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	52,9	-	899,4	6,63	Batata doce	3	16208,62	354	0,17
Perímetro 5 – Alto Mamuaba					Perímetro 6 – Baixo Gramame				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	3	16208,62	354	0,17	Inhame	27,5	404762,37	7122,5	1,37
Inhame	4,4	64512,40	1139,6	0,24	Feijão	17,5	2603,92	1067,5	0,67
Feijão	4	422,43	244	0,17	Mamão	19,5	109625,06	3750,5	2,18
Mamão	17	93574,28	3269,67	2,04	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Abacaxi	22	189060,31	5346	1,83
Coco-anão	1	12418,39	120	0,1	Perímetro 7 – Alto Mumbaba				
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Abacaxi	147	1222974,14	35599,5	11,62	Batata doce	33,5	181792,35	3953	1,81
Perímetro 6 – Baixo Gramame					Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	0,5	2728,76	59	0,03	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Inhame	27,5	404762,37	7122,5	1,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Feijão	17,5	2603,92	1067,5	0,67	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Mamão	19,5	109625,06	3750,5	2,18	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Abacaxi	22	189060,31	5346	1,83	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Perímetro 7 – Alto Mumbaba					Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	33,5	181792,35	3953	1,81	Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Inhame	7,5	110245,29	1942,5	0,38	Abacaxi	0	0	0	0
Feijão	9	1164,34	549	0,36	Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Abacaxi	46,5	389935,26	11299,5	3,59	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Perímetro 8 – Médio Mumbaba					Batata doce	7	96427,54	1344	0,37
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Batata doce	7	96427,54	1344	0,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Inhame	6	87971,46	1554	0,32	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51	Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08	Abacaxi	0	0	0	0
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6	Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Abacaxi	0	0	0	0	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Perímetro 8 – Médio Mumbaba					Batata doce	7	96427,54	1344	0,37
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Batata doce	7	96427,54	1344	0,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Inhame	6	87971,46	1554	0,32	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51	Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08	Abacaxi	0	0	0	0
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6	Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Abacaxi	0	0	0	0	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Perímetro 8 – Médio Mumbaba					Batata doce	7	96427,54	1344	0,37
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Batata doce	7	96427,54	1344	0,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Inhame	6	87971,46	1554	0,32	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51	Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08	Abacaxi	0	0	0	0
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6	Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Abacaxi	0	0	0	0	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Perímetro 8 – Médio Mumbaba					Batata doce	7	96427,54	1344	0,37
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Batata doce	7	96427,54	1344	0,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Inhame	6	87971,46	1554	0,32	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51	Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08	Abacaxi	0	0	0	0
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6	Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Abacaxi	0	0	0	0	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Perímetro 8 – Médio Mumbaba					Batata doce	7	96427,54	1344	0,37
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Batata doce	7	96427,54	1344	0,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Inhame	6	87971,46	1554	0,32	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51	Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08	Abacaxi	0	0	0	0
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6	Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Abacaxi	0	0	0	0	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Perímetro 8 – Médio Mumbaba					Batata doce	7	96427,54	1344	0,37
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Batata doce	7	96427,54	1344	0,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Inhame	6	87971,46	1554	0,32	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51	Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08	Abacaxi	0	0	0	0
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6	Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Abacaxi	0	0	0	0	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Perímetro 8 – Médio Mumbaba					Batata doce	7	96427,54	1344	0,37
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Batata doce	7	96427,54	1344	0,37	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Inhame	6	87971,46	1554	0,32	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08

6.1.6.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

Na Figura 6.24 e na Tabela 6.21 é apresentado o comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba, Marés e Mumbaba. De acordo com esta figura, é possível constatar que o volume final atingido pelos reservatórios foi pelo menos igual ao volume inicial estabelecido, garantindo a condição de sustentabilidade hídrica. Os volumes atingidos pelos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés apresentaram maiores níveis quando comparado com o Cenário 1. Quase todo o potencial do reservatório Marés está sendo (IAP \approx 1), conforme apresentado na Tabela 6.21.

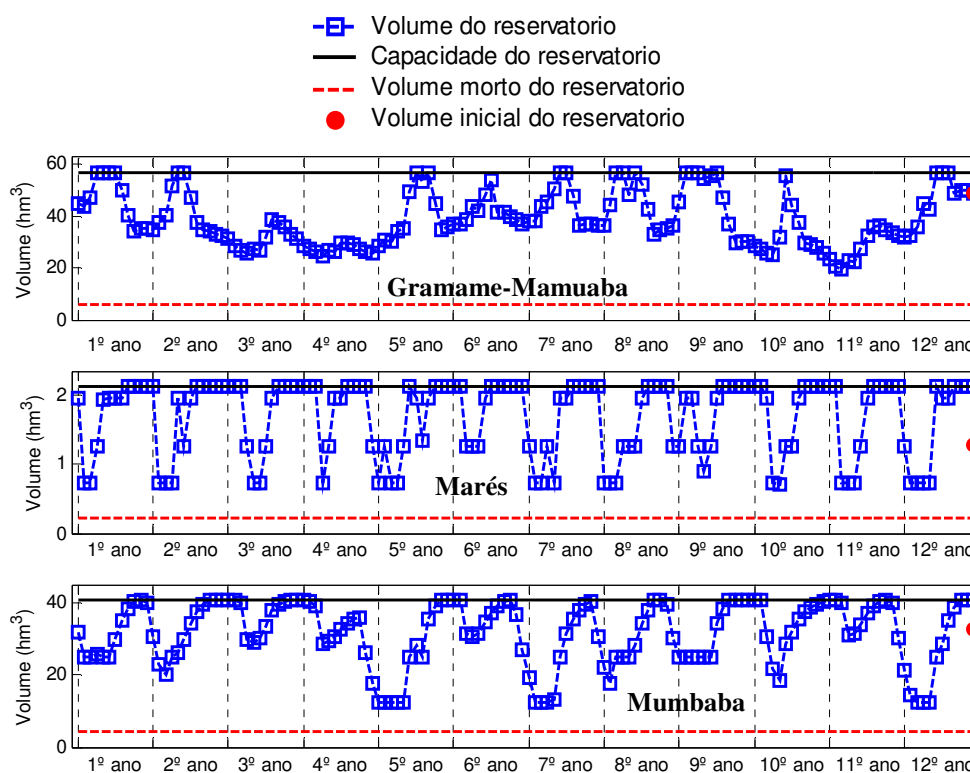


Figura 6.24 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba, Marés e no rio Mumbaba (Cenário 6)

Tabela 6.21 – Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 6

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{Qv}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,91	1,00	0,91	0,00	0,09	0,11	0,00	0,91
Marés	0,97	1,00	0,97	0,00	0,01	0,02	0,01	0,97
Mumbaba	0,87	0,98	0,85	0,02	0,12	0,12	0,01	0,85

Os dados referentes às vazões aduzidas dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés, que irá atender a demanda da ETA-Marés e da adutora do sistema Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame estão disponibilizados na Figura 6.25. Comparando-se com os resultados do Cenário 1 percebe-se uma maior retirada de água do rio Gramame e uma redução da vazão aduzida do rio Mumbaba. Na adutora dos rios Abiaí-Papocas é feita uma adução que atinge, por várias vezes a vazão máxima de $1,12 \text{ m}^3/\text{s}$.

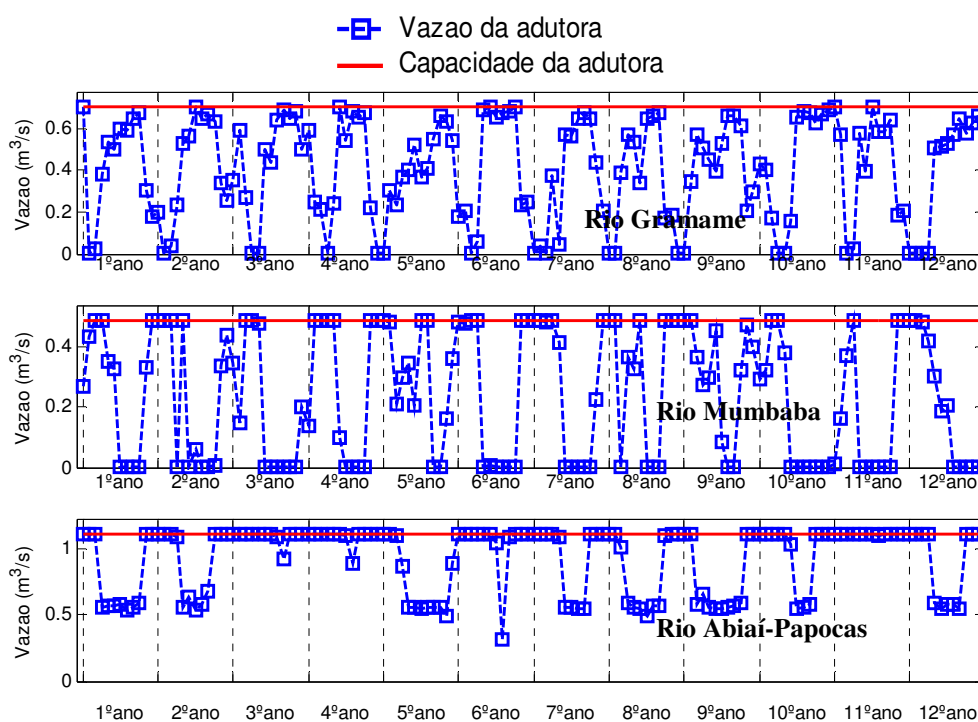


Figura 6.25 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios Gramame, Mumbaba para o reservatório de Marés e do rio Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame (Cenário 6)

6.1.6.4 – Desempenho Geral do Sistema

Os dados apresentados na Tabela 6.22 referem-se aos índices totais obtidos pelo modelo de otimização para o Cenário 6. Comparados com o Cenário 1 é possível constatar que ocorreu uma redução no número de falhas, o sistema apresentou uma melhor capacidade de recuperação de falhas e houve uma pequena redução na magnitude destas. O atendimento da demanda da Giasa não sofreu muita alteração e foi possível alocar uma maior área agrícola com a garantia de atendimento durante todo o período, com rentabilidade de 3.319.851,36 reais ao ano, além da criação de empregos diretos na agricultura.

Tabela 6.22 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 6

Índices Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abast.	0,99	1,00	0,13
Giasa	0,67	0,33	0,42
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,49	0,99	0,48
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	823,54	3319851,36	107841

6.1.7 – Cenário 7 (reservatório no alto curso do rio Gramame e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas)

6.1.7.1 – Atendimento às demandas

Na Tabela 6.23 e nas Figuras 6.26 e 6.27 são apresentados os dados relativos ao desempenho do sistema no atendimento às demandas, obtidos no modelo de otimização. Pode se verificar que a adoção desta medida garantirá o abastecimento de Pedras de Fogo, da ETA-Gramame e da ETA-Marés durante todo o período, isto é, estas demandas terão uma sustentabilidade hídrica igual a 100%. Haverá uma pequena redução no número de

falhas no atendimento da demanda da Giasa, bem como na capacidade de recuperação do sistema e ainda na magnitude da falha para esta demanda.

Tabela 6.23 – Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 7

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	100	0	0	0	100	0
ETA-Gramame	100	0	0	0	100	0
ETA-Marés	100	0	0	0	100	0
Giasa	72	20	78	100	3	20

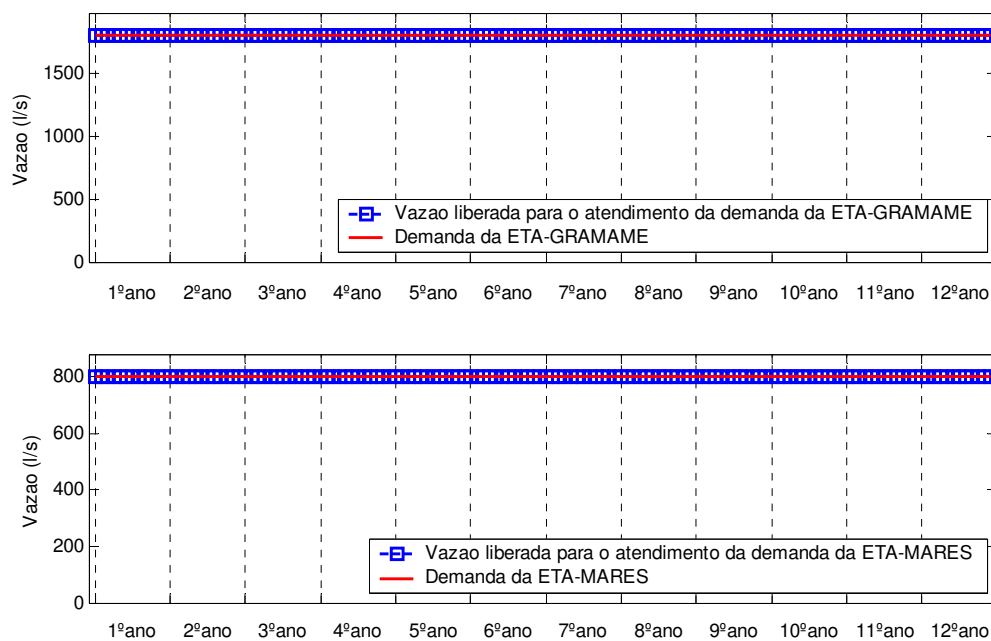


Figura 6.26 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 7

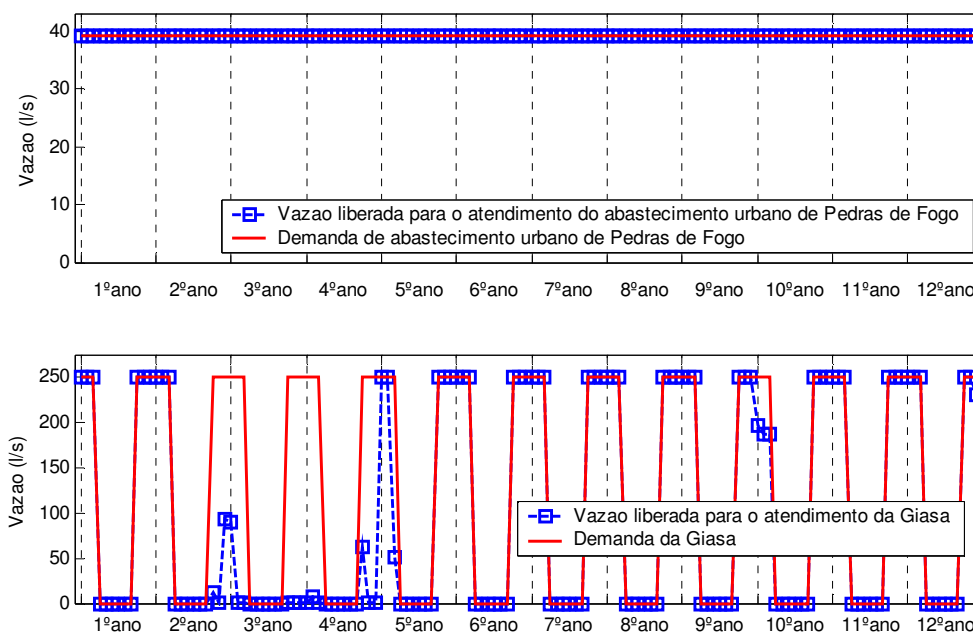


Figura 6.27 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de P. de Fogo e da Giasa – Cenário 7

6.1.7.2 – Agricultura irrigada

Os dados relativos às áreas agrícolas otimizadas, lucratividade anual gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação das culturas em cada perímetro, obtidos no modelo de otimização multiobjetivo para o Cenário 7 estão mostrados na Tabela 6.24. É possível constatar que para todos os perímetros é sugerido o plantio de culturas com a garantia de obter lucratividade e tendo em vista que, o lucro da Giasa é obtido com a venda do produto final, não foi considerada a receita líquida nos perímetros 2 (Giasa 1) e 4 (Giasa 2). As culturas mais rentáveis para este cenário são: o abacaxi nos perímetros 5 (Alto Mamuaba), 6 (Baixo Gramame) e 7 (Alto Mumbaba); o mamão e a graviola no perímetro 8 (Médio Mumbaba).

Tabela 6.24 – Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 7.

Perímetro 1 – Alto Gramame				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	18	98053,29	2124	0,95
Inhame	2	29468,6	518	0,1
Feijão	4	542,18	244	0,16
Mamão	2	11238,79	384,67	0,22
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Abacaxi	2	17200,31	486	0,17

Perímetro 2 – Giasa 1 (rio Gramame)				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	728,31	-	12381,21	72,09

Perímetro 3 – Reservatório Gramame-Mamuaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	1	5491,16	118	0,05
Inhame	0,5	7397,47	129,5	0,02
Feijão	0,75	113,84	45,75	0,03
Mamão	7,8	45600,28	1500,2	0,75
Maracujá	0,8	3979,86	133,6	0,06
Banana	1	6471,47	213	0,05

Perímetro 4 – Giasa 2 (rio Mamuaba)				
Culturas	Área ha/ano	RL (R\$/ano)	MO (diárias/ano)	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	52,91	-	899,4	6,63

Perímetro 5 – Alto Mamuaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	3	16208,62	354	0,17
Inhame	4,4	64512,41	1139,6	0,24
Feijão	4	422,43	244	0,17
Mamão	17	93574,28	3269,67	2,04
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Coco-anão	1	12418,40	120	0,10
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Abacaxi	146,5	1222974,14	35599,5	11,62

Perímetro 6 – Baixo Gramame				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	0,5	2728,76	59	0,03
Inhame	27,5	404762,37	7122,5	1,37
Feijão	17,5	2603,92	1067,5	0,67
Mamão	19,5	109625,06	3750,5	2,18
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Abacaxi	22	189060,31	5346	1,83

Perímetro 7 – Alto Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	33,5	181792,36	3953	1,81
Inhame	7,5	110245,29	1942,5	0,38
Feijão	9	1164,34	549	0,36
Abacaxi	46,5	389935,26	11299,5	3,59

Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Pimentão	7	96427,54	1344	0,37
Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
Abacaxi	0	0	0	0

6.1.7.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

Conforme mostrado na Figura 6.28 e na Tabela 6.25, todos os reservatórios apresentam sustentabilidade hídrica tendo em vista que seus volumes finais foram superiores aos volumes iniciais estabelecidos. O reservatório Gramame-Mamuaba atingiu volumes mensais superiores aos volumes apresentados no Cenário 1, isto é, um melhor comportamento hídrico. Quase todo o potencial do reservatório Marés está sendo utilizado (IAP) e o reservatório Gramame-Mamuaba foi o único que não apresentou vertimento.

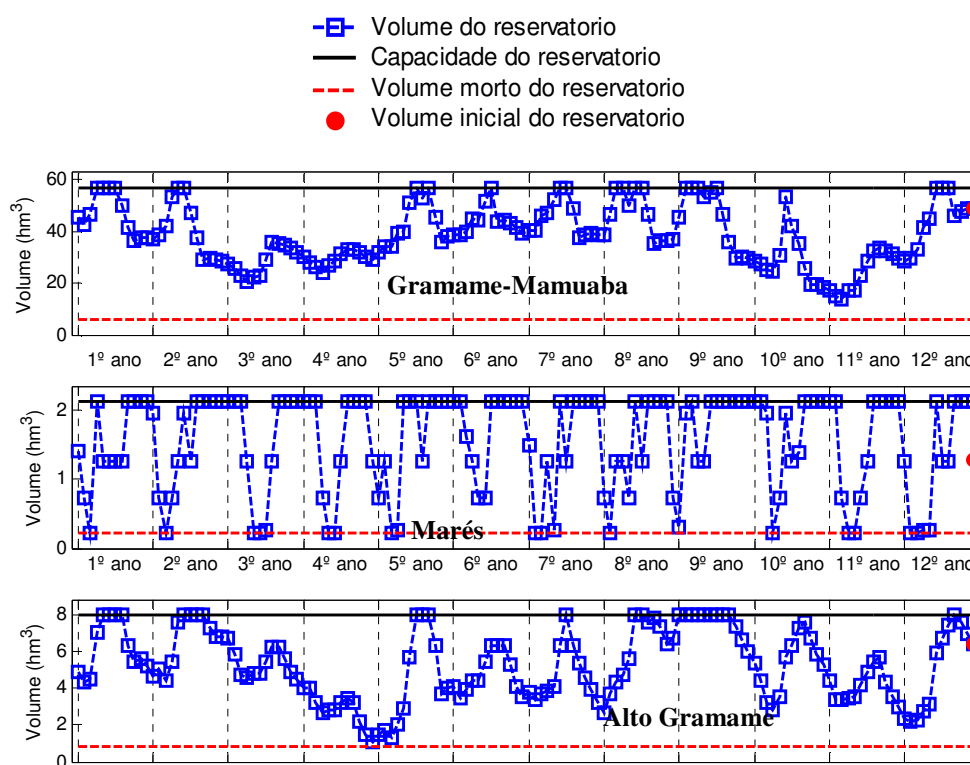


Figura 6.28 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Gramame-Mamuaba, Marés e no Alto Gramame (Cenário 7)

Tabela 6.25 – Índices de eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 7

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{Qv}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,90	1,00	0,90	0,00	0,10	0,11	0,00	0,90
Marés	0,94	1,00	0,93	0,00	0,01	0,02	0,05	0,93
Alto Gramame	0,66	1,00	0,66	0,00	0,25	0,29	0,10	0,66

Conforme apresentado na Figura 6.29, as adutoras que partem dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés para atender a demanda da ETA-Marés apresentaram neste cenário, comportamento hídrico semelhante ao Cenário 1. Através da adutora dos rios Abiaí-Papocas é possível aduzir uma vazão variável de até $1,12 \text{ m}^3/\text{s}$.

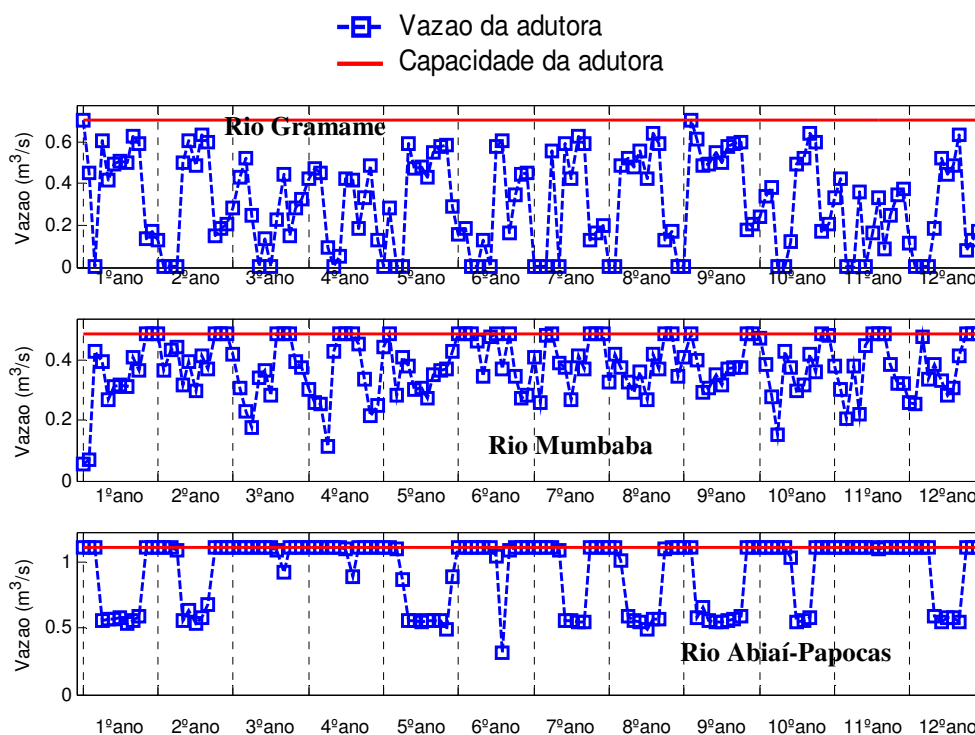


Figura 6.29 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame, Mumbaba e Abiaí-Papocas (Cenário 7)

6.1.7.4 – Desempenho Geral do Sistema

Com a adoção desta medida de intervenção hidráulica é possível garantir o atendimento da demanda humana durante todo período, no entanto para o atendimento da Giasa ocorrerá falha em 28 % do tempo, além de apresentar baixa capacidade de recuperação de uma falha. De maneira geral, apenas 51% do potencial hídrico da bacia está sendo explorado, sendo possível a sua expansão. É possível plantar até 1347 ha ao longo da bacia com garantia de atendimento durante todo o período e obter uma receita líquida de 2.004.615,33 e criar 118.023 novos empregos diretos na agricultura.

Tabela 6.26 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 7

Índices Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abast.	1,00	-	-
Giasa	0,72	0,20	0,78
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,51	1,00	0,51
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	1346,77	2004615,33	118023

6.1.8 – Cenário 8 (reservatórios nos rios Mumbaba e Gramame e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas)

6.1.8.1 – Atendimento às demandas

De acordo com os resultados apresentados para este cenário as demandas hídricas de Pedras de Fogo, ETA-Gramame e ETA-Marés serão atendidas durante todo o período e para estas demandas o comportamento hídrico do sistema terá sustentabilidade de 100%. Comparando-se com o Cenário 1, percebe-se que para o atendimento à demanda da Giasa haverá uma pequena redução no número de falhas, na capacidade de recuperação do sistema e na magnitude (Tabela 6.27 e Figuras 6.30 e 6.31).

Tabela 6.27 – Índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano para o período de 12 anos – Cenário 8.

Demandas	Confiabilidade (%)	Resiliência (%)	Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Máxima (%)	Sustentabilidade (%)	Nº de falhas
Pedras de fogo	100	-	-	-	100	0
ETA-Gramame	100	-	-	-	100	0
ETA-Marés	100	-	-	-	100	0
Giasa	69	18	67	100	4	22

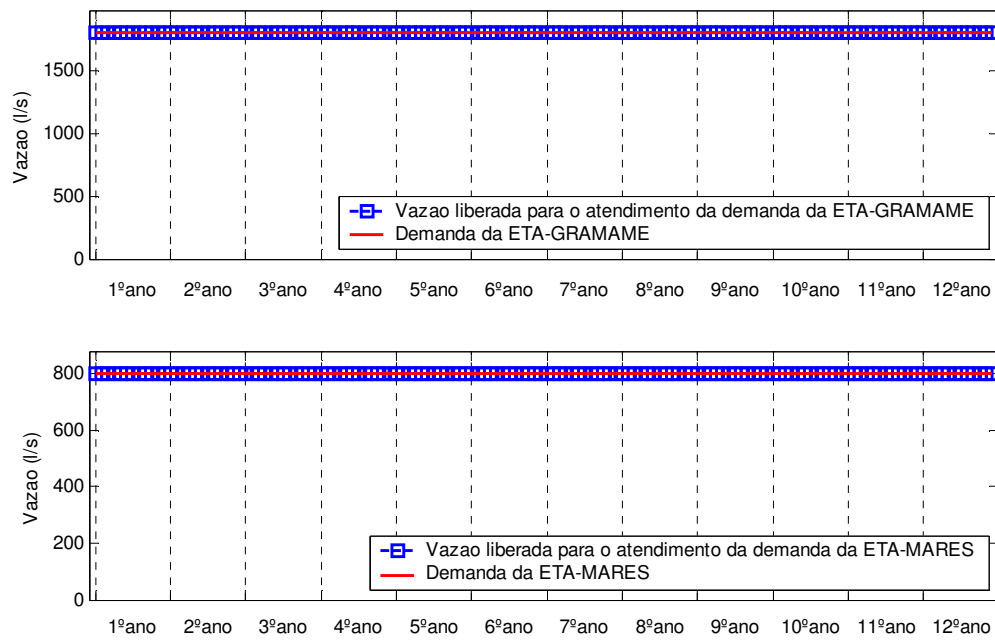


Figura 6.30 – Demandas e vazões liberadas para as ETA's Gramame e Marés – Cenário 8

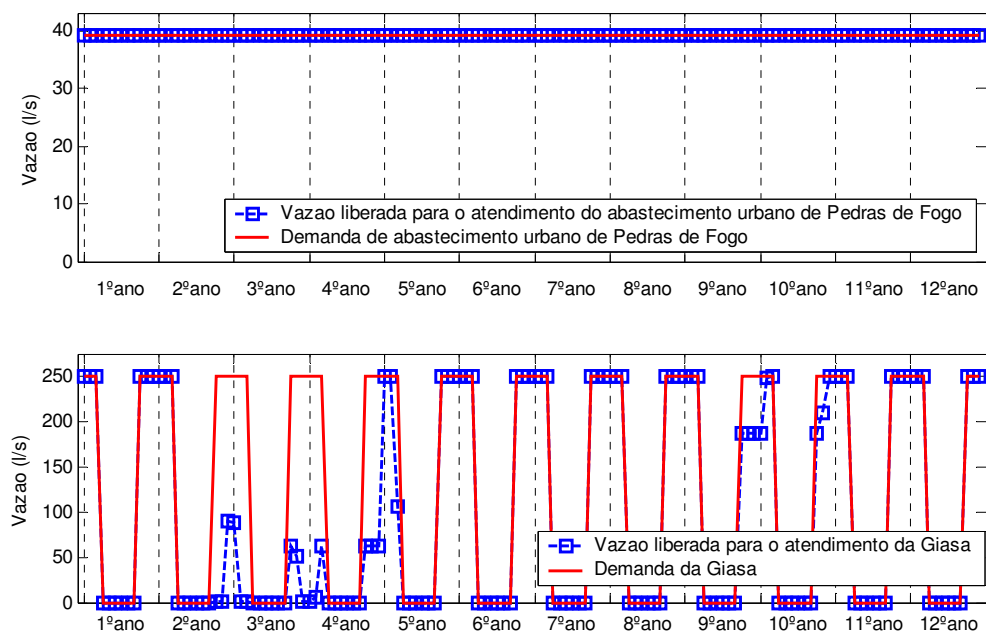


Figura 6.31 – Demandas e vazões liberadas para abastecimento de Pedras de Fogo e da Giasa – Cenário 8

6.1.8.2 – Agricultura irrigada

Na Tabela 6.28 são apresentados os resultados relativos à agricultura irrigada de cada cultura agrícola por perímetro, obtidos no modelo de otimização multiobjetivo, para este cenário. Verifica-se que é sugerido o plantio de culturas com a garantia de obter lucratividade para todos os perímetros, com exceção apenas para a cana-de-açúcar. Nos perímetros 2 (Giasa 1) e 4 (Giasa 2) não foi considerada a receita líquida, tendo em vista que o lucro da Giasa é obtido com a venda do produto final.

Observa-se também, que as culturas de maior rentabilidade são: o abacaxi nos perímetros 5 (Alto Mamuaba) e 7 (Alto Mumbaba), o inhame no perímetro 6 (Baixo Gramame), o mamão e a graviola no perímetro 8 (Médio Mumbaba).

Tabela 6.28 – Área de plantio otimizada, receita líquida gerada, mão-de-obra necessária e volume requerido para irrigação por cultura para cada perímetro, no período de 12 anos – Cenário 8.

Perímetro 1 – Alto Gramame					Perímetro 6 – Baixo Gramame				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	18	98053,29	2124	0,95	Batata doce	0,5	2728,76	59	0,03
Inhame	2	29468,6	518	0,1	Inhame	27,5	404762,37	7122,5	1,37
Feijão	4	542,18	244	0,16	Feijão	17,5	2603,92	1067,5	0,67
Mamão	2	11238,79	384,67	0,22	Mamão	19,5	109625,06	3750,5	2,18
Cana-de-açúcar	0	0	0	0	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Abacaxi	2	17200,31	486	0,17	Abacaxi	22	189060,31	5346	1,83
Perímetro 2 – Gíasa 1 (rio Gramame)					Perímetro 7 – Alto Mumbaba				
Culturas	Área (ha/ano)	RL (R\$/ano)	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	739,24	-	12567,15	73,18	Batata doce	33,5	181792,36	3953	1,81
					Inhame	7,5	110245,29	1942,5	0,38
					Feijão	9	1164,34	549	0,36
					Abacaxi	46,5	389935,26	11299,5	3,59
Perímetro 3 – Reservatório Gramame-Mamuaba					Perímetro 8 – Médio Mumbaba				
Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Batata doce	1	5491,16	118	0,05	Pimentão	7	96427,54	1344	0,37
Inhame	0,5	7397,47	129,5	0,02	Inhame	6	87971,46	1554	0,32
Feijão	0,75	113,84	45,75	0,03	Feijão	67,1	7086,22	4093,1	2,78
Mamão	7,8	45600,28	1500,2	0,75	Mamão	68,6	377599,73	13194,07	8,23
Maracujá	0,8	3979,86	133,6	0,06	Cana-de-açúcar	0	0	0	0
Banana	1	6471,47	213	0,05	Coco-anão	5	62091,98	600	0,51
					Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
					Graviola	10,6	418413,91	1908	1,6
					Abacaxi	0	0	0	0
Perímetro 4 – Gíasa 2 (rio Mamuaba)					Perímetro 5 – Alto Mamuaba				
Culturas	Área ha/ano	RL (R\$/ano)	MO (diárias/ano)	Volume (hm ³)	Culturas	Área ha/ano	RL R\$/ano	MO diárias/ano	Volume (hm ³)
Cana-de-açúcar	52,9	-	899,4	6,63	Batata doce	3	16208,62	354	0,17
					Inhame	4,4	64512,42	1139,6	0,24
					Feijão	4	422,43	244	0,17
					Mamão	17	93574,28	3269,67	2,04
					Cana-de-açúcar	0	0	0	0
					Coco-anão	1	12418,4	120	0,1
					Laranja-pêra	1	21470,42	168	0,08
					Abacaxi	146,5	1222974,14	35599,5	11,62

6.1.8.3 – Comportamento dos reservatórios e das adutoras

Conforme apresentado nas Figuras 6.32 e 6.33 e na Tabela 6.29 a condição de sustentabilidade hídrica pode ser verificada para todos os reservatórios, onde é possível verificar que os volumes finais atingiram níveis pelo menos iguais aos volumes iniciais estabelecidos. Os reservatórios planejados apresentaram volume acima do seu volume médio, em vários meses.

Está sendo utilizada quase toda a potencialidade hídrica dos reservatórios sem, contudo ser possível haver uma expansão. Verifica-se, ainda, que o reservatório Gramame-Mamuaba é o único a não apresentar vertimento.

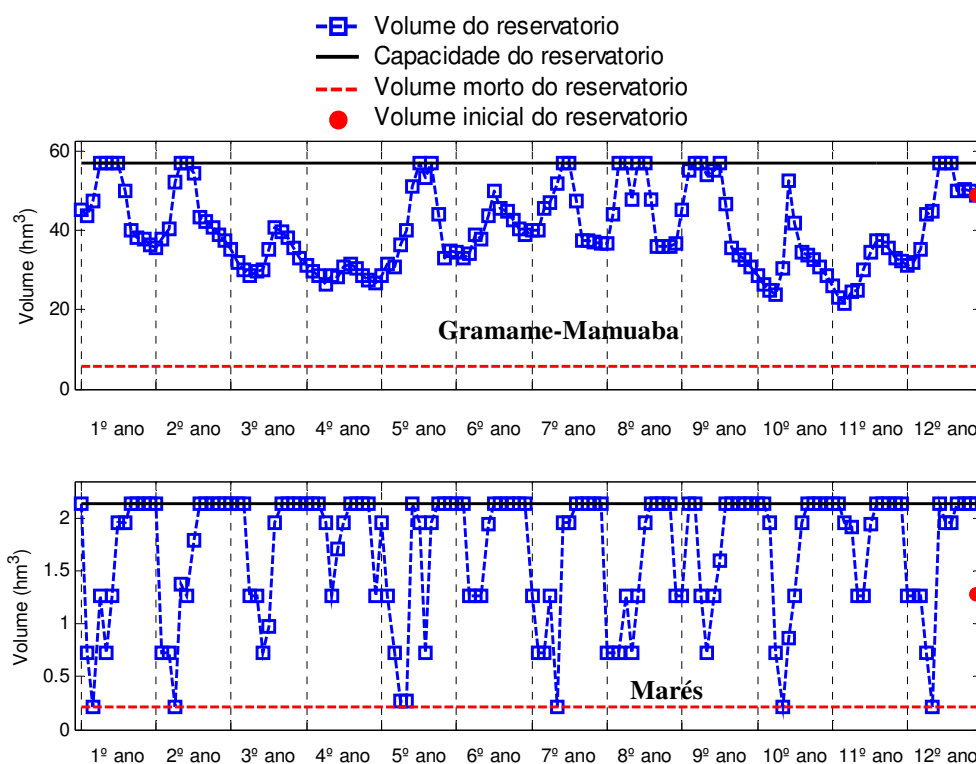


Figura 6.32 – Comportamento hídrico dos reservatórios Gramame-Mamuaba e Marés (Cenário 8)

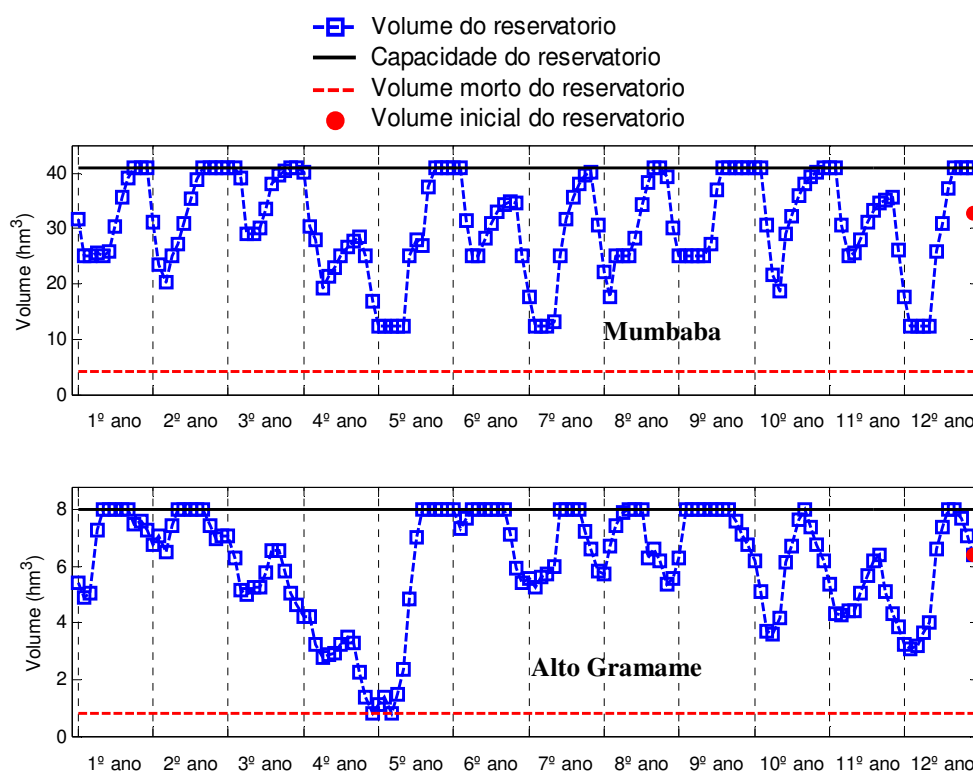


Figura 6.33 – Comportamento hídrico dos reservatórios: Mumbaba e alto Gramame (Cenário 8)

Tabela 6.29 – Índices de Eficiência relativos aos reservatórios para o período de 12 anos – Cenário 8

Reservatórios	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{Qv}	η_e
Gramame-Mamuaba	0,90	1,00	0,90	0,00	0,10	0,11	0,00	0,90
Marés	0,97	1,00	0,97	0,00	0,01	0,02	0,01	0,97
Alto Gramame	0,81	0,98	0,80	0,02	0,12	0,12	0,07	0,80
Mumbaba	0,84	1,00	0,84	0,00	0,10	0,12	0,07	0,84

Na Figura 6.34 são apresentados os dados das vazões das adutoras que partem dos rios Gramame e Mumbaba para o reservatório de Marés, que irá atender a demanda da ETA-Marés e da adutora do sistema Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame, comparando-se com o Cenário 1 percebe-se uma redução da vazão aduzida do rio Mumbaba para o reservatório de Marés chegando a atingir valores nulos durante vários meses, na adutora dos rios Abiaí-Papocas é feita uma adução de uma vazão variável de até 1,12 m³/s.

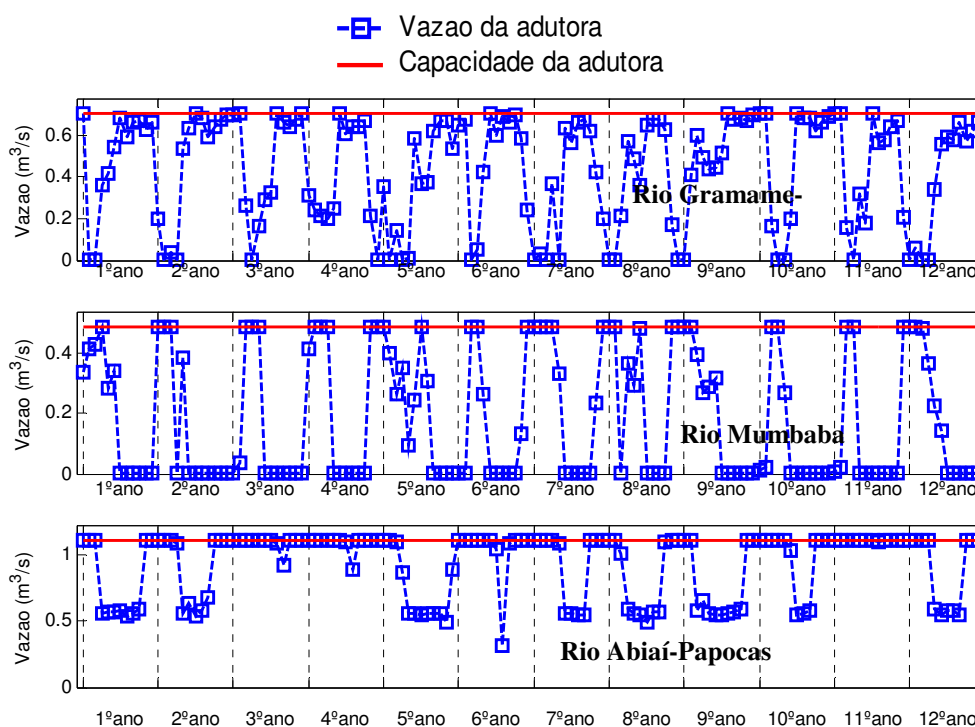


Figura 6.34 – Vazões e capacidades das adutoras dos rios: Gramame e Mumbaba para o sistema de Marés e Abiaí-Papocas para a ETA-Gramame (Cenário 8)

6.1.8.4 – Desempenho Geral do Sistema

Pela Tabela 6.30 percebe-se que o abastecimento humano tem garantia de 100% durante todo o tempo enquanto a Giasa tem 69%. De um modo geral é explorado apenas 51% do potencial hídrico dos reservatórios, podendo haver expansão da sua potencialidade. É sugerido o cultivo de 1358 ha com garantia de obter uma receita líquida de 1.975.578,06 e criar 118.209 novos empregos diretos na agricultura.

Tabela 6.30 – Índices totais para o período de 1 ano – Cenário 8

Índices de Hashimoto do sistema			
	Conf.	Res.	Vuln.
Abastecimento humano	1,00	–	–
Gíasa	0,69	0,18	0,67
Índices do sistema			
	IAP	IUD	IUP
Σ	0,51	0,99	0,50
Agricultura			
	Área	Receita líquida	Mão-de-obra
Σ	1358	1975578,06	118209

6.2 – Cenário 9 (incremento de 2,17 % nas demandas hídricas)

Tendo em vista o crescimento da demanda e com o objetivo de analisar o comportamento do sistema no tocante a este aumento, é que foi considerado um incremento de 2,17 % nas demandas hídricas de todos os cenários anteriores e, aplicado o modelo de otimização para análise desses sistemas.

Pelos resultados apresentados na Tabela 6.31, observa-se que ao considerar o aumento da demanda, os cenários que incluem a construção da adutora Abiaí-Papocas não sofrerão mudanças significativas. Para estes cenários, o valor da confiabilidade do abastecimento humano é mantido constante, isto é, o percentual de falhas no atendimento destas demandas é o mesmo verificado quando a demanda for considerada constante. Enquanto nos cenários: 1 (infra-estrutura hídrica atual), 2 (reservatório no rio Mumbaba), 4 (reservatório no rio Gramame) e 5 (reservatórios nos rios Mumbaba e Gramame) constatam-se maiores números de falhas na demanda de abastecimento humano, ao longo do tempo.

Para todos os cenários foram registradas reduções nos valores da resiliência, o que significa que com o aumento da demanda a capacidade de recuperação do sistema é inferior aquela obtida nos cenários cujas demandas são mantidas constantes.

No que tange o atendimento à demanda industrial, constata-se um aumento no número de falhas em todos os cenários (menor valor da confiabilidade), os cenários 3

(adutora Abiaí-Papocas) e 6 (reservatório no rio Mumbaba e adutora Abiaí-Papocas) apresentaram pequena variação no valor da confiabilidade, contudo os demais tiveram reduções acentuadas nestes valores.

Quase todos os cenários sofreram redução no valor da resiliência obtida para a demanda industrial o que indica, neste caso, uma maior dificuldade de recuperação do sistema, caso este falhe, isto é, ao considerar a variação da demanda o sistema terá uma recuperação mais lenta do que para demanda fixa.

Tabela 6.31 – Índices de Hashimoto para o período de 1 ano – demanda fixa e demanda variável

CENÁRIOS	ÍNDICES DE HASHIMOTO											
	Abastecimento humano						Abastecimento industrial					
	Demanda fixa			Demanda variável			Demanda fixa			Demanda variável		
	Conf	Res	Vuln	Conf	Res	Vuln	Conf	Res	Vuln	Conf	Res	Vuln
C1	0,97	0,36	0,17	0,94	0,29	0,21	0,67	0,21	0,81	0,42	0,10	0,80
C2	0,98	0,71	0,17	0,95	0,36	0,20	0,67	0,21	0,81	0,42	0,10	0,84
C3	0,99	1,00	0,13	0,99	0,83	0,10	0,67	0,33	0,42	0,65	0,32	0,42
C4	0,99	0,60	0,19	0,96	0,22	0,21	0,75	0,06	1,00	0,46	0,05	0,85
C5	1,00	-	-	0,98	0,22	0,21	0,75	0,06	1,00	0,54	0,06	0,93
C6	0,99	1,00	0,13	0,99	0,83	0,10	0,67	0,33	0,42	0,65	0,32	0,42
C7	1,00	-	-	1,00	-	-	0,72	0,20	0,78	0,68	0,22	0,71
C8	1,00	-	-	1,00	-	-	0,69	0,18	0,67	0,63	0,11	0,59

6.3 – Resultados da Aplicação do Método Multicriterial PROMETHEE

A análise multicriterial foi realizada a partir da matriz de avaliação composta por 08 (oito) alternativas e 03 (três) critérios divididos em 23 (vinte e três) subcritérios, conforme mostrado na Tabela 6.32.

No intuito de eliminar uma possível tendenciosidade, oriunda da aplicação de questionários, e obter resultados mais consistentes, foi feito uma análise de sensibilidade para o método, através de variações iguais a 10 % no peso de cada critério (econômico, social e ambiental) para o intervalo compreendido entre 0 e 100 %, de tal forma que a soma dos pesos atribuídos aos três critérios resultasse em 100 % (Tabela 6.33). Sendo

assim, foram estabelecidas condições para subsidiar a escolha das alternativas, atendendo as várias definições de preferência dos decisores.

A ordenação das alternativas na análise multicriterial foi estabelecida a partir do método PROMETHEE e das séries de valores atribuídos para os pesos dos critérios de avaliação considerados.

Tabela 6.32 – Síntese dos elementos aplicados para a avaliação multicriterial do problema, via método PROMETHEE

CRITÉRIOS	Atributos	Métrica e Unidade	Min ou max	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Alternativa 7	Alternativa 8	Função de preferência				Peso do atributo	Peso do critério	
												Tipo	Parâmetros					
													p	q	s			v
ECONÔMICO	Custo de implantação	R\$	Min	0	9.450.000,00	88.934.656,72	2.057.500,00	11.507.500,00	98.384.656,72	90.992.156,72	100.442.156,70	2	-	10 %	-	100 %	19 %	
	Custo de operação	R\$/ano	Min	0	63.315,00	595.862,20	13.785,25	77.100,25	659.177,20	609.647,45	672.962,34	2	-	10 %	-	100 %	19 %	
	Lucro agrícola	R\$/ano	Max	0	1.754.198,51	3.319.851,82	0,00	2.493.427,22	3.319.851,36	2.004.615,33	1.975.578,06	2	-	10 %	-	100 %	23 %	
	Piscicultura extensiva	kg/ano	Max	0	129.350	0	33.075	162.425	129.350	39.725	162.425	2	-	10 %	-	100 %	21 %	
	Abastecimento industrial	%	Max	3	3	13	0	0	13	3	4	2	-	10 %	-	100 %	18 %	
																100 %	Variável	
SOCIAL	Empregos na agricultura	Diária/ano	Max	0	40.605	107.841	0	55.562	107.841	118.023	118.209	2	-	10 %	-	100 %		10 %
	Empregos na piscicultura	Empregos	Max	0	86	0	22	109	86	27	109	2	-	10 %	-	100 %		10 %
	Renda na agricultura	R\$/ano	Max	0	522.274,06	1.515.287,67	0	696.277,12	1.515.287,67	1.676.035,96	1.679.011,00	2	-	10 %	-	100 %		9 %
	Renda na piscicultura	R\$/ano	Max	0	4.963,43	0,00	4.961,25	4.917,45	6.232,59	4.855,28	4.917,45	2	-	10 %	-	100 %		10 %
	Atendimento à demanda	%	Max	29	59	86	48	100	86	100	100	2	-	10 %	-	100 %		11 %
	Expansão do atendimento	%	Max	55	54	50	54	54	46	51	50	2	-	10 %	-	100 %		11 %
	Municípios c/ participação	Qtd	Max	0	4	4	1	5	5	5	5	3	5	-	-	100 %		8 %
	Desapropriação	ha	Min	0	516	141	265	781	657	406	922	2	-	10 %	-	100 %		6 %
	Piscicultura extensiva	kg/ano	Max	0	129.350	0	33.075	162.425	129.350	39.725	162.425	2	-	10 %	-	100 %		6 %
	Melhoria da saúde	%	Max	97	98	99	99	100	99	100	100	2	-	10 %	-	100 %	10 %	
Proliferação de doenças	m ³ /s	Min	2,55	2,60	2,62	2,61	2,64	2,62	2,64	2,64	3	5	-	-	100 %	9 %		
																100 %	Variável	
AMBIENTAL	Danos à fauna	ha	Min	0	777,8	964,53	265	1118,4	1480,53	1752,8	2279,7	2	-	10 %	-	100 %		17 %
	Danos à flora	ha	Min	0	777,8	964,53	265	1118,4	1480,53	1752,8	2279,7	2	-	10 %	-	100 %		16 %
	Possibilidade de erosão	ha	Min	0	261,8	823,53	0	337,4	823,53	1346,8	1357,7	2	-	10 %	-	100 %		18 %
	Poluição hídrica	m ³ /s	Min	2,55	2,60	2,62	2,61	2,64	2,62	2,64	2,64	2	-	10 %	-	100 %		20 %
	Inundação	ha	Min	0	516	141	265	781	657	406	922	3	5	-	-	100 %		13 %
	Exploração dos RN's	%	Min	55	54	50	54	54	46	51	50	3	5	-	-	100 %		14 %
	Desapropriação	ha	Min	0	516	141	265	781	657	406	922	3	5	-	-	100 %		2 %
																	100 %	Total
																100 %		

Tabela 6.33 - Ordenação das Alternativas na Análise Multicriterial

Pesos para os critérios (%)			Ordem das alternativas							
Econômico	Social	Ambiental	1ª ordem	2ª ordem	3ª ordem	4ª ordem	5ª ordem	6ª ordem	7ª ordem	8ª ordem
0.00	0.00	100.00	1	4	3	2	6	5	7	8
0.00	10.00	90.00	1	4	3	2	6	5	7	8
0.00	20.00	80.00	1	4	3	2	6	5	7	8
0.00	30.00	70.00	1	5	3	2	6	4	7	8
0.00	40.00	60.00	1	5	2	3	6	4	7	8
0.00	50.00	50.00	2	5	1	4	6	3	7	8
0.00	60.00	40.00	3	5	2	4	7	1	6	8
0.00	70.00	30.00	4	5	2	7	6	1	3	8
0.00	80.00	20.00	7	6	2	8	5	1	3	4
0.00	90.00	10.00	7	6	2	8	5	1	3	4
0.00	100.00	0.00	8	6	2	7	5	1	3	4
10.00	0.00	90.00	1	4	3	2	5	6	7	8
10.00	10.00	80.00	1	4	3	2	6	5	7	8
10.00	20.00	70.00	1	4	3	2	6	5	7	8
10.00	30.00	60.00	1	5	3	2	6	4	7	8
10.00	40.00	50.00	1	5	2	4	6	3	7	8
10.00	50.00	40.00	3	5	1	4	6	2	7	8
10.00	60.00	30.00	3	4	2	6	5	1	7	8
10.00	70.00	20.00	6	5	2	8	4	1	3	7
10.00	80.00	10.00	7	6	2	8	5	1	3	4
10.00	90.00	0.00	8	6	2	7	5	1	3	4
20.00	0.00	80.00	1	4	3	2	5	6	7	8
20.00	10.00	70.00	1	4	3	2	6	5	7	8
20.00	20.00	60.00	1	4	3	2	6	5	7	8
20.00	30.00	50.00	1	5	2	3	6	4	7	8
20.00	40.00	40.00	2	5	1	4	6	3	7	8
20.00	50.00	30.00	3	4	2	5	6	1	7	8
20.00	60.00	20.00	5	4	2	7	3	1	6	8
20.00	70.00	10.00	7	5	2	8	3	1	4	6
20.00	80.00	0.00	8	6	2	7	4	1	3	5
30.00	0.00	70.00	1	3	4	2	5	6	7	8
30.00	10.00	60.00	1	4	3	2	5	6	7	8
30.00	20.00	50.00	1	4	3	2	6	5	7	8
30.00	30.00	40.00	1	5	2	3	6	4	7	8
30.00	40.00	30.00	3	4	2	5	6	1	7	8
30.00	50.00	20.00	5	4	2	6	3	1	7	8
30.00	60.00	10.00	6	4	2	8	3	1	5	7
30.00	70.00	0.00	8	5	2	7	3	1	4	6
40.00	0.00	60.00	1	3	4	2	5	6	7	8
40.00	10.00	50.00	1	3	4	2	5	6	7	8
40.00	20.00	40.00	1	4	3	2	5	6	7	8
40.00	30.00	30.00	1	6	3	4	5	2	7	8
40.00	40.00	20.00	5	4	2	6	3	1	7	8
40.00	50.00	10.00	5	4	2	6	3	1	7	8
40.00	60.00	0.00	8	4	2	7	3	1	5	6
50.00	0.00	50.00	1	3	5	2	4	6	7	8
50.00	10.00	40.00	1	3	5	2	4	6	7	8
50.00	20.00	30.00	1	4	5	2	3	6	7	8
50.00	30.00	20.00	4	5	3	6	2	1	7	8
50.00	40.00	10.00	5	4	3	6	2	1	7	8
50.00	50.00	0.00	6	4	3	5	2	1	8	7
60.00	0.00	40.00	1	3	5	2	4	6	7	8
60.00	10.00	30.00	1	4	5	2	3	6	7	8
60.00	20.00	20.00	2	3	6	5	1	4	7	8
60.00	30.00	10.00	5	3	4	6	1	2	7	8
60.00	40.00	0.00	6	3	4	5	2	1	8	7
70.00	0.00	30.00	1	4	5	2	3	6	7	8
70.00	10.00	20.00	2	2	6	4	1	5	7	8
70.00	20.00	10.00	4	3	6	5	1	3	7	8
70.00	30.00	0.00	6	3	4	5	1	2	8	7
80.00	0.00	20.00	2	3	6	4	1	5	7	8
80.00	10.00	10.00	3	2	6	4	1	5	8	7
80.00	20.00	0.00	6	2	5	4	1	3	8	7
90.00	0.00	10.00	3	2	6	4	1	5	8	7
90.00	10.00	0.00	5	2	6	4	1	3	8	7
100.00	0.00	0.00	4	2	6	6	1	5	8	7

Na Figura 6.35 é mostrado o percentual de vezes em que as alternativas ocuparam a primeira posição no ranking de um total de 66 combinações de pesos atribuídos para os critérios. Observa-se que a alternativa 1 (infra-estrutura hídrica atual) foi a que teve maior

destaque de toda a série, cujo percentual foi de 42 %. Em seguida, foram as alternativas 3 (adutora Abiaí-Papocas) e 5 (reservatórios nos rios Mumbaba e Gramame) com um empate de 11 %.

As alternativas 4 (reservatório no rio Gramame) e 7 (reservatório no alto Gramame e adutora Abiaí-Papocas) foram as que menos ocuparam o primeiro lugar no ranking.

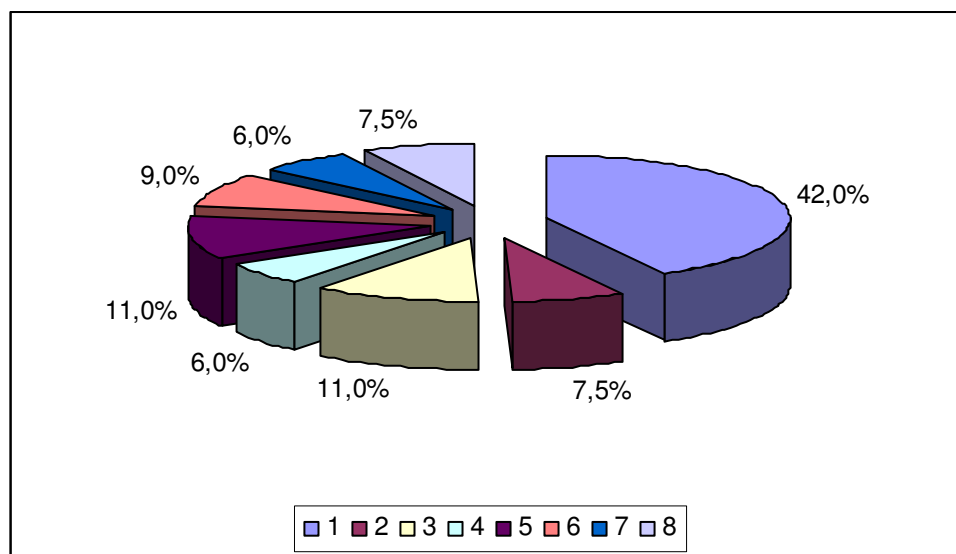


Figura 6.35 - Percentual de vezes em que as alternativas ocuparam a primeira posição

Nas seções a seguir será feito um paralelo entre pares de critérios com o intuito de avaliar o grau de importância de cada aspecto na escolha das alternativas. Inicialmente será feito um confronto entre os critérios ambiental e social, em seguida entre o social e o econômico e por último entre o econômico e o ambiental.

6.3.1 – Critério ambiental versus critério social

Na Figura 6.36 são mostradas as alternativas de maior preferência de acordo com os critérios ambiental e social. Observa-se que ao admitir o critério econômico como sendo nulo (diagonal superior) e atribuir maior peso ao critério ambiental a alternativa 1 (infra-estrutura hídrica atual) será preferível, porém o maior peso concedido ao aspecto social contempla as alternativas 8 (construção dos reservatórios nos rios Mumbaba e alto

Gramame e da adutora Abiaí-Papocas) e 7 (construção do reservatório no alto Gramame e da adutora Abiaí-Papocas), respectivamente.

Constata-se ainda, que a alternativa 1 (infra-estrutura hídrica atual) permanecerá na liderança quando o peso do critério econômico for mantido em 10 % (segunda diagonal) e o critério ambiental assumir pesos maiores ou iguais a 50 %. Porém, nesta mesma condição ao conceder pesos acima de 40 % ao critério social as alternativas 8 (construção dos reservatórios nos rios Mumbaba e alto Gramame e da adutora Abiaí-Papocas), 7 (construção do reservatório no alto Gramame e da adutora Abiaí-Papocas), 6 (construção do reservatório no rio Mumbaba e da adutora Abiaí-Papocas) e 3 (construção da adutora Abiaí-Papocas) terão a preferência.

Ao fixar o critério econômico em 20 % é observado comportamento semelhante ao caso anterior, isto é, a maior importância dada ao critério ambiental classifica a alternativa 1 (infra-estrutura hídrica atual) como preferível e o maior peso ao aspecto social contempla as alternativas 8, 7, 5, 3 e 2, conforme Figura 6.36.

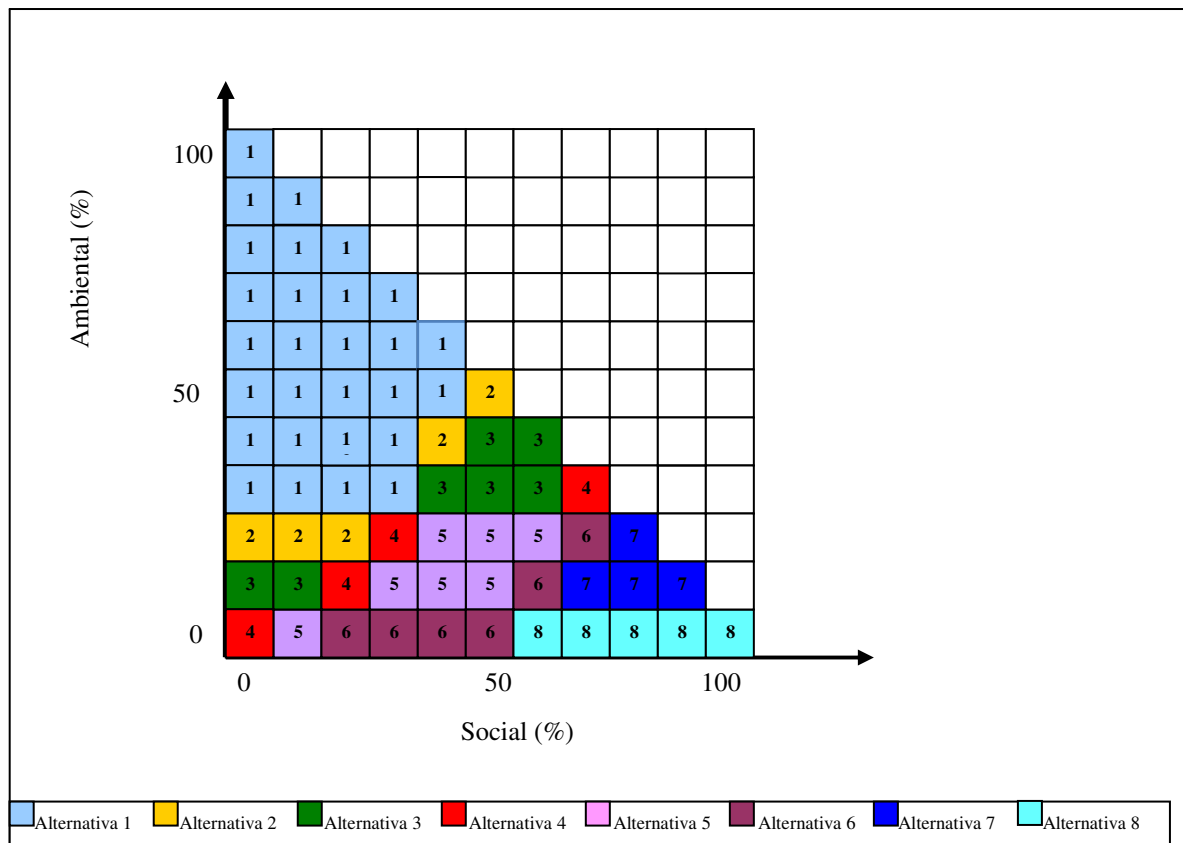


Figura 6.36 - Preferência no ranking de acordo com os critérios ambiental e social

6.3.2 – Critério social versus critério econômico

A maior importância concedida ao critério econômico, tem como preferência a alternativa 4 (reservatório no alto Gramame); enquanto, ao atribuir maior peso ao critério social a alternativa 8 (construção dos reservatórios nos rios Mumbaba e alto Gramame e da adutora Abiaí-Papocas) será a preferível, conforme mostrado na Figura 6.37.

De acordo com a diagonal superior da Figura 6.37, nota-se que ao desprezar o critério ambiental e admitir para o critério social, pesos entre 100 e 60 %, a alternativa 8 será a escolhida, enquanto ao admitir pesos acima de 40 % ao critério econômico as alternativas 6 (reservatório no rio Mumbaba e a adutora Abiaí-Papocas) e 5 (reservatórios nos rios Mumbaba e alto Gramame) e 4 (reservatório no alto Gramame) serão as contempladas.

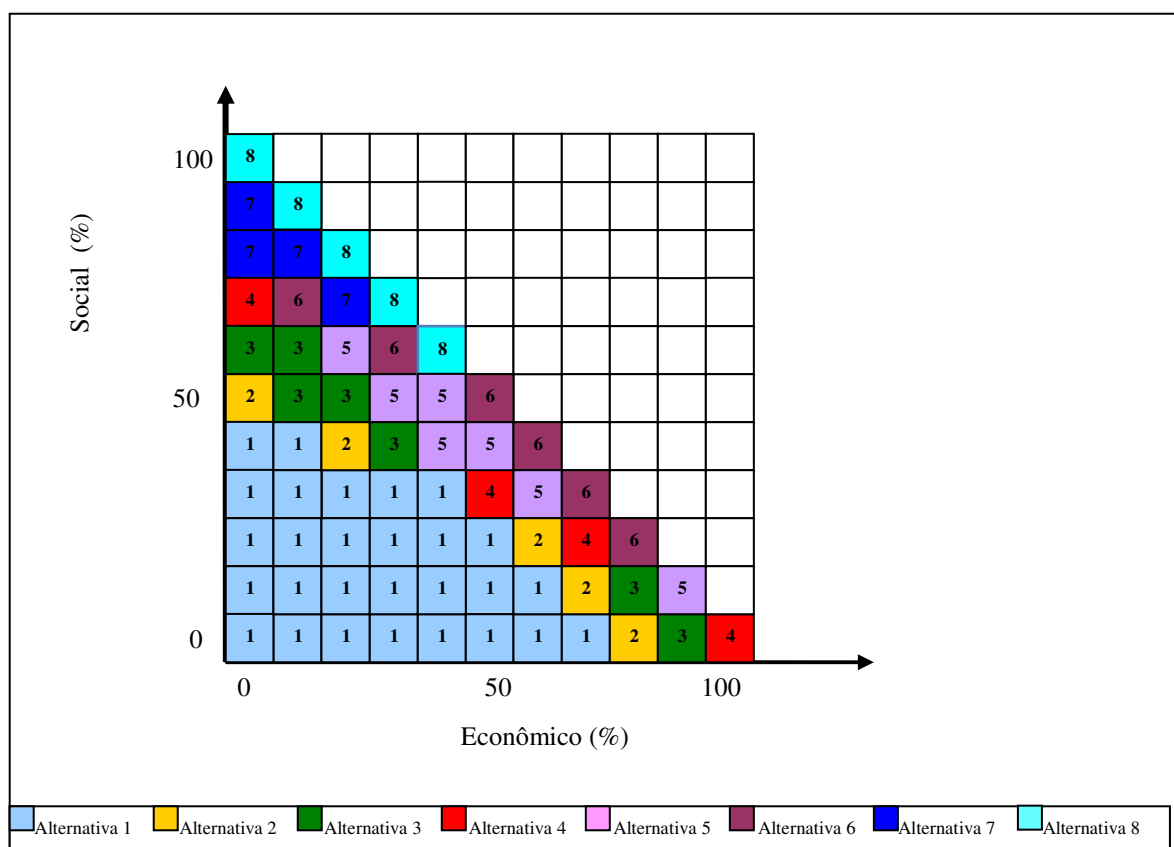


Figura 6.37 - Preferência no ranking de acordo com os critérios social e econômico

6.3.3 – Critério econômico versus critério ambiental

De acordo com a Figura 6.38, a maior importância concedida ao critério econômico, contempla a adoção das alternativas 4 (construção do reservatório no alto Gramame), 5 (reservatórios nos rios Mumbaba e alto Gramame) e 3 (adutora Abiaí-Papocas); enquanto, ao atribuir maior peso ao critério ambiental a alternativa 1 (infra-estrutura hídrica atual) será a de maior preferência.

Ao considerar o critério social igual a 0 % (diagonal superior) e atribuir maior peso para o critério econômico, as alternativas 4 (reservatório no alto Gramame), 3 (adutora Abiaí-Papocas) e 2 (reservatório no rio Mumbaba), serão preferíveis.

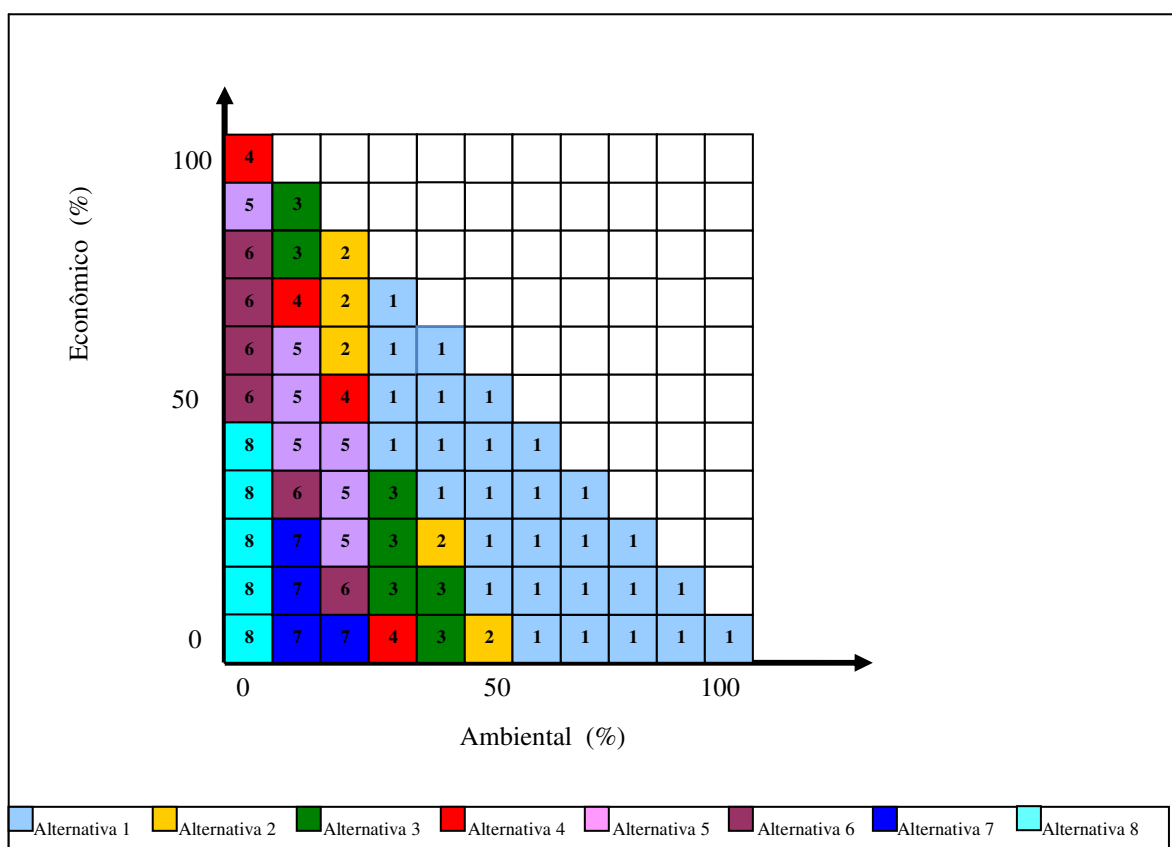


Figura 6.38 – Preferência no ranking de acordo com os critérios econômico e ambiental

De acordo com os resultados obtidos através do método PROMETHEE, a alternativa 1 foi a de maior preferência e ocupou 42 % do primeiro lugar no ranking.

Contudo, é importante ressaltar que os resultados obtidos através da metodologia utilizada, corroboram com os resultados a priori esperados, uma vez que sob a ótica ambiental o sistema hídrico atual é mais indicado.

7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 – Conclusões Gerais

Constatou-se através de pesquisa bibliográfica a artigos, plano diretor da bacia e de visitas técnicas a órgãos competentes que a região em estudo foi palco de conflitos de uso da água entre os usuários (irrigantes e exportação de água para localidades fora da bacia) em períodos de baixa disponibilidade hídrica. De acordo com informações fornecidas por um examinador deste trabalho, um especialista na área e conhecedor da região, a crise no atendimento às demandas hídricas ocorrida durante o biênio 98/99 ocorreu, principalmente, devido a problemas de ordem operacional no reservatório Gramame-Mamuaba, principal reservatório da região.

A importância do estudo de otimização multiobjetivo evidenciou-se na análise do sistema hídrico em estudo, pois permite estabelecer regras operacionais ótimas e quantificar o impacto destas regras a longo prazo para cada cenário analisado. Este estudo também foi relevante para realizar uma seleção e proceder análises, via análise multicriterial, de alternativas de solução do problema, conforme disposto a seguir:

Pela análise dos resultados obtidos através do processo de otimização para o Cenário 1 (infra-estrutura hídrica atual), constata-se que, na ocorrência de prolongados períodos de estiagem, o atendimento das demandas da ETA-Gramame, da cidade de Pedras de Fogo e da Giasa poderá ser comprometido, isto é, não será garantido integralmente durante todo o período. Ainda, de acordo com os resultados obtidos para este cenário, percebe-se que a prática da irrigação poderá resultar em prejuízos, uma vez que o sistema não garante o atendimento desta demanda em nenhum dos perímetros considerados. Outro fato evidenciado para este cenário diz respeito ao comportamento do sistema no que tange a vazão aduzida dos rios Gramame e Mumbaba para o sistema de Marés, onde conclui-se que é mais viável que a vazão retirada do rio Mumbaba seja superior a que é aduzida do rio Gramame.

Ainda de acordo com o processo de otimização, constatou-se que:

- os Cenários 5, 7 e 8 atenderam plenamente as demandas requeridas para a ETA-Gramame, ETA-Marés e Pedras de Fogo, enquanto nos demais ocorreram falhas no atendimento de alguma (s) destas demandas.
- o melhor atendimento da demanda da Giasa foi observado nos Cenários 3, 6 e 8, enquanto que nos demais, o comportamento do sistema no atendimento desta demanda foi praticamente igual ao apresentado para o Cenário 1.
- no Cenário 4 (construção do reservatório no Alto Gramame) foi constatado que mesmo com a adoção desta medida de intervenção, o atual quadro de instabilidade hídrica no que tange o suprimento de água das culturas agrícolas ainda é comprometido, podendo ocorrer falhas no atendimento da demanda de irrigação em todos os perímetros irrigados durante o período considerado. Para tanto, não foi alocada área para plantio em nenhum perímetro deste cenário.

De acordo com o estudo de otimização multiobjetivo realizado para o problema em estudo, constatou-se que os índices de desempenho das demandas de abastecimento urbano (confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade e sustentabilidade), de eficiência dos reservatórios (IAP, IUD e IUP) e de agricultura (área, receita líquida e mão de obra) obtidos através do modelo são de grande relevância na representação do comportamento do sistema hídrico e constituíram-se em importantes ferramentas para quantificar os impactos e atributos relativos às alternativas avaliadas na análise multicriterial.

Os resultados obtidos com a análise multicriterial através do método PROMETHEE demonstram que:

- ao conceder maior importância ao critério ambiental, a alternativa 1 (infra-estrutura hídrica atual) será a escolhida. Esta escolha pode ser justificada pelo fato desta alternativa não apresentar impacto ambiental adicional quando comparado com as demais alternativas, que contemplam a construção de obra hidráulica.
- ao atribuir maior peso ao critério social, a prioridade será da alternativa 8 (reservatórios nos rios Mumbaba e alto Gramame e a construção da adutora Abiaí-Papocas), devido a maior disponibilidade hídrica obtida através das intervenções hidráulicas, que favorece melhores condições sociais, a exemplo de empregos, lazer e etc.
- do ponto de vista econômico, as alternativas mais indicadas são respectivamente: a *alternativa 4* (reservatório no alto Gramame) que apresenta menores custos de implantação e operação, a *alternativa 5* (reservatórios nos rios Mumbaba e alto Gramame) que é favorável a piscicultura e a *alternativa 3* (adutora Abiaí-Papocas) que

obtem maior lucro agrícola e maior confiabilidade no atendimento à demanda industrial,

De uma maneira geral, constatou-se que:

- as variáveis consideradas possibilitaram uma melhor representatividade para o processo de tomada de decisão, visto que incluíram aspectos variados envolvendo as esferas econômica, social e ambiental;
- as soluções propostas para o problema foram pertinentes ao processo de tomada de decisão, tendo em vista que foram avaliadas várias opções de escolha de alternativa;
- a subjetividade relativa ao julgamento humano foi levada em consideração por meio da adoção de uma gama de valores atribuídos aos pesos dos critérios de avaliação, cujos valores adotados variaram entre 0 e 100 %, numa progressão aritmética de 10 %;

7.2 – Recomendações

É importante ressaltar as limitações a que está sujeito o estudo realizado e nessa perspectiva, sugerir as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- levar em consideração aspectos qualitativos de água na análise de sistema;
- na análise multicriterial levou-se em consideração aspectos relativos aos critérios econômicos, sociais e ambientais, no entanto faz-se necessária a inclusão de outros critérios a exemplo dos técnico-operacionais e políticos.

7.3 – Contribuição científica da pesquisa

Esta pesquisa poderá trazer contribuições para a área de estudo, no que tange o planejamento de sistemas de recursos hídricos, na metodologia para a escolha das obras de infra-estrutura hídrica a serem implantadas na bacia hidrográfica, que minimizem os prejuízos sociais e ambientais, de acordo com a preferência dos decisores, uma vez que estes aspectos foram levados em consideração neste estudo. E ainda, conscientizar para a

importância de compatibilizar as atividades econômicas geradas pela construção de obras hidráulicas com o bem estar do homem e a proteção ao meio ambiente.

Os resultados fornecidos pelo modelo de otimização multiobjetivo e pelo método de análise multicriterial são relevantes subsídios às questões operacionais e de implantação de obras hidráulicas para os tomadores de decisão através de informações sobre o comportamento do sistema e a ponderação de critérios de julgamento.

Enfim, neste estudo foi adotada uma metodologia que combina técnicas de otimização e simulação (para estabelecer regras operacionais ótimas e analisar os impactos destas regras a longo prazo) e de análise multicriterial (para apontar alternativas de solução segundo alguns critérios).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA (2008). Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. João Pessoa-PB

ANDRADE, P. R. G. S. (2006). Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, na bacia do rio Capibaribe-PE, Campina Grande: UFCG – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Tese de Doutorado. 227p.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. (1999) A qualidade da água na agricultura. 2a. edição. Campina Grande: DEAg/ CCT/UFPB. 153p. (Estudos FAO irrigação e drenagem, 29 revisado 1)

BANA, C.C. (1988). Introdução geral às abordagens multicritério de apoio à tomada de decisão. *Investigação Operacional*. V.8 (1), p. 117-139.

BANCO DO NORDESTE S/A (2006). Manual de Orçamentos Agropecuários. Campina Grande – PB, p.210.

BARBOSA, P. S. (1997). O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros. *A Água em Revista*. CPRM, Brasil, ano V (8).

BARBOSA, D. L. (2008). A Exploração de um sistema de reservatórios: uma análise otimizada dos usos e objetivos múltiplos na bacia do rio Capibaribe-PE. Campina Grande: UFCG – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Tese de Doutorado. 281p.

BARROS, M. T. L. (1997). A Programação dinâmica aplicada à engenharia de recursos hídricos. In: *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Ed. da Universidade/UFRGS-ABRH. Porto Alegre, p.239-277.

BENAYOUN, R e TERGNY, J (1969). Critères Multiples en Programmation Mathématique: une Solution dans le cas linéaire. *RIRO*, v.2, 31-56.

- BINDER, F. V. (1999). Sistemas de apoio à decisão. 10. Ed. São Paulo: Érika, p.102.
- BOAS, C. L. V. (2007). Modelo multicriterial para análise de alternativas de uso múltiplo de reservatórios: estudo de caso do reservatório do ribeirão João Leite/GO. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, Nov. 2007.
- BOAS, C. L. V. (2005). Análise da aplicação de métodos multicritérios de apoio à decisão (MMAD) na gestão de recursos hídricos. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa-PB, Nov. 2005.
- BRAGA, B. P. F. (1987). Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, v.1. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, p. 427 – 518.
- BRAGA, B. e GOBETTI, L. (1997). Análise Multiobjetivo. In: PORTO, R. L. L. Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Editora Universidade, UFRGS: ABRH, p. 361 – 418. Porto Alegre-RS.
- BRAGA, C. F. C. (2001). Avaliação Multicriterial e Multidecisória no Gerenciamento da Demanda Urbana de Água. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande-PB, 191 p.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. (2002). “Promethee-Gaia, une Methodologie d’Aide à la Décision em Présence de Critères Multiples”. Éditions Ellipses, Bruxelles.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method. Management Science, V. 31, n.6, p. 647 – 656.
- BRASIL, Lei nº 9.433 de 8 de Janeiro de 1997.
Disponível em: <http://www.aguameioambientevida.hpg.ig.com.br/ag/Lei/lei9433.htm>.
Acesso: 14 de Julho de 2002.

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.

BUCHANAN, J.; SHEPPARD, P. Project Ranking Using Electre III, apresentado na 33rd Annual Conference ORSNZ. Disponível em:

www.esc.auckland.ac.nz/organisations/orsnz/conf33/papers/p58.pdf.

Acesso em: junho de 2008

CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (2007). Sistema de Abastecimento de Água - Sistema Adutor Abiaí-Papocas. Volume IX – Resumo executivo. 24p.

CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (2008). Estudo hidrológico – Bacia hidrográfica do açude Marés. João Pessoa-PB. 56p.

CASTRO, L. M. A.; BAPTISTA, M. B. & NETTO, O. M. C. (2004). Análise multicritério para a avaliação de sistemas de drenagem urbana – Proposição de indicadores e de sistemática de estudo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 05-19.

CEPAL – Comissão de Estudos para a América Latina das Nações Unidas (2001). Indicadores de Sustentabilidade Ambiental y de Desarrollo Sostenible: estado del arte y perspectivas. Division de medio ambiente y asentamientos humanos. Serie Manuales N°16, Santiago de Chile.

CIRILO, J. A. (1997). Programação não linear aplicada a recursos hídricos. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Ed. Universidade/UFRGS-ABRH. Porto Alegre, p.305-359.

COHON, J. L. (1978). Multiobjective Programming and planning. Editorial academic Press. Inc. New York. 331p.

COSTA, C. A. B.; CHAGAS, M. P. (1994). A career choice problem: An example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on quantitative value judgments. London School of Economics and Political Science, Londres.

COSTA, C. A. B.; CORTE, J.; VANSNICK, J. (2004). On the mathematical foundations of MACBETH. London School of Economics and Political Science, Londres.

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. (2005). Notas de aula da disciplina STA: Modelos de planejamento dos múltiplos usos d'água em bacias hidrográficas.

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.

DUBREUIL, P. (1974). Initiation a L'analyse Hydrologique. (Dix Exercices Suivis des Corrigees). Paris, Masson & Cia./ ORSTOM, 216 Ilust.

DUCKSTEIN, L.; OPRICOVIC, S. (1980). Multiobjective Optimization in River Basin Development. Water Resources Research, v.16, n.1, p. 14 – 20.

EMPASA (2008). Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas. Disponível em: <http://www.empasa.pb.gov.br/programas/central.html>. Acesso em: março de 2008.

ENERGISA (2008). Energisa Paraíba - Distribuidora de Energia S/A. Disponível em: <http://www.paraiba.energisa.com.br/Default.aspx?tabid=1118>. Acesso em: 15 de maio de 2008.

ENSSLIN, S. R. (2002). A Incorporação da Perspectiva Sistêmico-Sinérgica na Metodologia MCDA-Construtivista: uma ilustração de implementação. Tese submetida ao

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. UFSC. Florianópolis. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta/ensslin/indice/index.html>. Acesso em: maio de 2007.

FERNANDES, C. H. (1996). Priorização de projetos hidrelétricos sob a ótica social – um estudo de caso utilizando análise custo/benefício e uma metodologia multicritério de apoio à decisão – “MACBETH”. Dissertação de Mestrado, 150p. UFSC, Florianópolis. Disponível em: www.eps.ufsc.br/disserta97/fernandes. Acesso em: dezembro de 2007.

GOBBETTI, L. E. C. e BARROS, M. T. L. (1993). *Análise Multiobjetivo Aplicada ao Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos*. In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS. ABRH. Vol. I.

GOICOECHEA, A.; HANSEN, D. R. & DUCKSTEIN, L. (1982). Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley & Sons. Inc. Canadá. 519p.

GOMES, H. P. (1999). Engenharia de Irrigação Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento. Editora Universitária – UFPB, Campina Grande-PB, 3ª Edição. 412p.

GONÇALVES, R. W.; PINHEIRO, P. R. & FREITAS, M. A. S. (2003). Métodos Multicritérios como Auxílio à Tomada de Decisão na Bacia Hidrográfica do rio Curu – Estado do Ceará. In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Nov. 2003.

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.

JARDIM, S. B. e LANNA, A. E. (2003). *Aplicabilidade de Algumas Técnicas de Análise Multiobjetivo ao Processo Decisório no Âmbito de Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica*. RBRH, Vol. 8, n. 4.

JOHNSON, L.E. (1986). Water resource management decision support systems. *Journal of Water Resource Planning and Management*, v. 112, n° 3. p. 308-325, July. 1986.

KJELDSEN, T. R. & ROSBJERG, D. (2001), “A framework for assessing the sustainability of a water resources system” in *Regional Management of Water Resources*. Org. por Schumann, A. H., Acremann, A. C., Davis, D., Marino, M. A., Rosbjerg, D. e Jun, X., IAHS Publ. 268, p.107-113.

LABADIE, J. W. (1987). Otimização da operação de projetos hidroagrícolas. Ministério da irrigação – PROINE, Brasília, 249p.

LACERDA, E. G. M. & CARVALHO, A. C. P. L. F. (1999). Introdução aos algoritmos genéticos. In: *Sistemas inteligentes – Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre. Editora da Universidade/UFRGS – ABRH, p.99-150.

LANNA, A. E. L. (1997). Introdução. In: *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Porto Alegre. Editora da Universidade/UFRGS – ABRH, p.15-41.

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*, vol. 10, n° 3, p. 5-22.

LOPES, J. E.; BRAGA, B. F. F. CONEJO, J. L. (1982). A simplified hydrologic model in applied modeling in catchment hydrology (ed. V. P. Singh) water resources publication.

LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R. & HAITH, D. A. (1997), *Water resources systems planning and analysis*, New Jersey, Prentice Hall, 55p.

MATZENAUER, H. B.; JARDIM, S. B. (2001). Estudo comparativo das metodologias MCDM e MCDA na gestão dos recursos hídricos. In: *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*. Aracaju. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, v.1.

MEDEIROS, Y. D. P.; CIDREIRA, T. S.; FARIA, A. S.; SRDJEVIC, B.; NETTO, O. C. & SOUZA, M. A. A. (2006). Processo Decisório de Alocação de Águas Utilizando Análise Multicritério: caso da Bacia do rio São Francisco. In: Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Gravatá-PE, Nov. 2006.

NETTO, O. M. C., PARENT, E. & L. DUCKSTEIN (1993). Métodos Multicritério Aplicados ao Planejamento de Recursos Hídricos: O Caso da Escolha de um Sítio de Barragem de Regularização no Sudoeste da França. In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS. ABRH. Vol. I.

NORDESTE RURAL (2007). Criar tilápias em tanques-rede no rio São Francisco assegura renda ao piscicultor. Disponível em:

<http://www.nordesterrural.com.br/nordesterrural/matler.asp?newsId=4883>.

Acesso em: maio de 2008

NOUVELOT, J. F. & FERREIRA, P. A. S. (1977). Bacia Representativa do Riacho do Navio, Série Hidrologia, n. 4, 249 p. SUDENE.

OECD (1993). OECD core set of indicators for environmental performance reviews. a synthesis report by the group on the state of the environment. Environment Monographs n. 83. Paris. 39p.

OLIVEIRA, R.; LIMA, M. M. C. L. & VIEIRA, J. M. P. (2007). Desenvolvimento de um Sistema de Indicadores de Qualidade de Águas Superficiais numa Bacia Hidrográfica. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt>. Acesso em: 25 fev. 2008.

PARAÍBA, Lei Estadual nº 6.308 de 02 de Julho de 1996, que Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/srh/estagio/legislaçã/estados/doc/630802.doc>.

Acesso: 25 de Junho de 2005.

PERH (2006). Plano Estadual de Recursos Hídricos – PB. Resumo Executivo e Atlas. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, SECTMA.

PLÁ, G. P. (2004). Modelo para análise de alternativas ponderadas entre custos de recuperação e níveis de indicadores ambientais com aplicação na bacia do rio Tubarão, SC. Tese de Doutorado. 156p. UFSC. Florianópolis – SC.

POMPERMAYER, R. S. (2003). Aplicação da Análise Multicritério em Gestão de Recursos Hídricos: Simulação para as Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí. Dissertação de Mestrado. 137p. UEC. Campinas – SP.

PORTO, R. L. L. *et al.* (1997). Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos – Editora Universidade/UFRGS/ABRH. 420 p., Porto Alegre - RS.

RAMOS, P. R. (2005). Modelo para outorga de uso da água utilizando a metodologia multicritério de apoio à decisão: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Cubatão do Sul. Tese de doutorado, 280p. UFSC. Florianópolis.

RIBEIRO E HELLER (2007). Indicadores Ambientais para Países em Desenvolvimento. Disponível em: www.bvsde.paho.org. Acesso em: 26 fev. 2008.

ROGERS, M.; BRUEN, M. (1998). Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. *European Journal of Operational Research*, v. 107, n. 3, p. 542-551,.

ROSAKIS, S.; SOURIE, J.C. & VANDERPOOTEN, D. (2001). Integrated Micro-economic Modeling and Multi-criteria Methodology to Support Public Decision-making: the case of liquid biofuels in France. *Biomass and Energy*, n.20, p. 385-398.

ROY, B. (1971). Problems and methods with multiple objective functions. *Mathematical Programming*, V.1, n.2, p.239-266.

ROY, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la decision*. Economica, Paris, França, 423p.

ROY, B. Partial Preference Analysis and Decision-aid: the Fuzzy Outranking Relation Concept, in: ROY, B., VANDERPOOTEN, D., 1997. An Overview on “The European

School of MCDA: Emergence, basic Features and Current Works”. *European Journal of Operational Research*. 99, 26-27.

SANTOS, D. C.; LOBATO, M. B.; VOLPI, N. M. P. e BORGES, L. Z. (2006). Hierarquização de medidas de conservação de água em edificações residenciais com o auxílio da análise multicritério. *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v.6, n.1, p. 31-47. Porto Alegre-RS.

Disponível on line: www.antac.org.br/ambienteconstruido/pdf/revista/artigos

SANTOS, R. B. (2004). Aplicação do método multicriterial PROMETHEE para ampliação da disponibilidade hídrica superficial na bacia do rio Gramame-PB. Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental-UFCG. Dissertação de mestrado. 134p. Campina Grande-PB.

SANTOS, V. S. (2007). Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos. Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental-UFCG. Campina Grande-PB. Dissertação de mestrado. 144p.

SANTOS, V. S.; VIEIRA, A. S.; CURI, W. F. & CURI, R. C. (2008). Otimização multiobjetivo plurianual e integrada dos recursos hídricos dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no semi-árido paraibano. In: *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Salvador-BA.

SCIENTEC/UFPB (2000). Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Gramame. Volumes 1, 2, 3 e 4. Paraíba. Brasil.

SCIENTEC/UFPB (2000b). Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. Sistema Adutor Abiaí-Papocas – Relatório Técnico Preliminar. 126 p. Paraíba. Brasil.

SCHMIDT, A. M. A. (1995). Processo de apoio à tomada de decisão – Abordagens: AHP e MACBETH. Dissertação de Mestrado. UFSC, p. 230. Florianópolis.

SCS – Soil Conservation Service (1975). *Urban hydrology for small watersheds*. Washington. U. S. Dept. Agr technical release n.55.

SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE TILÁPIAS (2008), 4p.

Disponível em: <http://www.ovomalta.com.br/aquamalta/informacoes1.htm>.

Acesso em: dezembro de 2008.

SOARES, S. R. (2003). Análise multicritério com instrumento de gestão ambiental. Dissertação de Mestrado, 155p. UFSC, Florianópolis. Disponível em: www.ens.ufsc.br/~soares. Acesso em: 10 ago. 2007.

SOUZA, M. A. A.; NETTO, O. M. C. & JUNIOR, R. P. L. (2006). Sistema de apoio à decisão (SAD) para seleção de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. 25p. Disponível em: www.finep.gov.br/prosab/livros/prosabcarlos/cap-10.pdf. Acesso em: 05 mai. 2007.

SUDENE (1984). Dados Climatológicos Básicos do Nordeste. Recife: SUDENE, 56 p.

TEIXEIRA, A.C. e BARBOSA, P. S. F. (1993). Enfoque multiobjetivo no planejamento de recursos hídricos e sua inserção no contexto institucional brasileiro. In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS. ABRH, vol. I.

TEIXEIRA, A. C. e BARBOSA, P. S. F. (1995). Avaliação multicriterial de alternativas de projeto de barragens de uso múltiplo. In: Anais do XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Ruy Sant’Ana, Mônica Porto, Rosa Martins (Ed). ABRH. Publicações 1, v. 3, p.73–84.

TOMASONI, M. A. (2006). Contribuição ao Estudo de Indicadores Ambientais. Geonordeste, ano XV, nº 2, p.90-118. Disponível em: www.posgrap.ufs.br. Acesso em: 25 fev. 2008.

TUCCI, E. M. (1998). Modelos hidrológicos. 1ª edição. ABRH. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 669p. Porto Alegre.

TURNES, V. A. (2004). Sistema Delos: Indicadores para Processos de Desenvolvimento Local Sustentável.. Tese de Doutorado. 227p. UFSC. Florianópolis – SC.

VAREJÃO e SILVA, M. A. (1987). Atlas Climatológico do Estado da Paraíba. Editora UFPB. 2ª Edição.

VINCKE, P. (1992). "Multicriteria decision-aid". John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane. Chichester e New York. 154p.

YEH, W. W-G. (1985). Reservoir Management and Operation Models: A State-of-the-Art Review, Water resources Research, v.21, no 12, p.1797-1818.

ZELNY, M. (1973). Compromise Programming. In: Cochrane, J.L. e Zeleny, M. (eds) multiple criteria decision making, Univ. of South Carolina Press, Columbia. p.373-391.

ZUFFO, A. C.; REIS, L. F. R.; SANTOS, R. F.; CHAUDHRY, F. H. (2002). Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento de recursos hídricos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, nº 1. p.81-102.

ZUFFO, A. C., SANTOS, R. F. (2002). Método ELECTRE II aplicado ao planejamento de recursos hídricos: Uma proposta para melhorar a performance do método. In: XX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Habana - Cuba.