



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



VALTERLIN DA SILVA SANTOS

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVO
MULTIOBJETIVO PARA O PLANEJAMENTO DOS
RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS, COM APLICAÇÃO À
BACIA DO RIO PARAÍBA**

Campina Grande - PB

Agosto de 2011.

VALTERLIN DA SILVA SANTOS

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVO MULTI OBJETIVO PARA
O PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS, COM
APLICAÇÃO À BACIA DO RIO PARAÍBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Recursos Naturais da Universidade Federal de
Campina Grande, como requisito parcial à obtenção
do grau de Doutor em Recursos Naturais.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SOCIEDADE E RECURSOS NATURAIS
LINHAS DE PESQUISAS: ANÁLISE DE SISTEMA E MANEJO INTEGRADO DE
BACIAS HIDROGRÁFICAS

ORIENTADOR: PROF. WILSON FADLO CURI

Campina Grande - PB
Agosto de 2011.

VALTERLIN DA SILVA SANTOS

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVO MULTIOBJETIVO PARA
O PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS, COM
APLICAÇÃO À BACIA DO RIO PARAÍBA**

Banca examinadora

Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Arthur Mattos
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Dantas Neto
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa
Universidade Federal de Campina Grande

Campina Grande - PB

Agosto de 2011.

DEDICATÓRIA

*A minha filha Lara, a minha esposa
Lívia e aos meus pais Valter e Irani,
dedico-lhes esta conquista.*

AGRADECIMENTOS

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

A minha esposa, aos meus pais, a meu irmão e a minha irmã, pelo amor, apoio e incentivo em mais uma etapa da minha vida.

Ao meu orientador professor Wilson Fadlo Curi, pela orientação e disposição em colaborar durante todo o trabalho.

A todos os professores e a coordenação do Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, pelo apoio e pelos novos conhecimentos adquiridos.

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

Ao CTHidro/CNPq pelo apoio financeiro concedido nos três primeiros anos de estudo.

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

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo de otimização multiobjetivo quali-quantitativo, baseado em programação linear, para o planejamento e operação integrada de sistemas de reservatórios e perímetros ou áreas irrigadas, visando estabelecer a alocação ótima dos recursos naturais existentes (água e terras aptas ao plantio) e políticas operacionais ótimas em bacias hidrográficas. Os múltiplos usos da água incluem o atendimento das demandas através de tomadas d'águas em reservatórios e/ou a fio d'água; dos volumes metas dos reservatórios; das concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nas seções dos rios; da alocação de áreas agrícolas; do controle de cheias e da regularização de vazões. Aspectos econômicos e sociais, como a maximização da receita líquida e da geração de empregos oriunda da agricultura irrigada, são contemplados pelo modelo.

O modelo foi aplicado a um sistema constituído por dois reservatórios, Eptácio Pessoa e Argemiro Figueiredo, ligados em série, na bacia do Rio Paraíba, uma área irrigada de 1020 ha e o trecho do rio Paraíba entre os dois reservatórios. As demandas hídricas consideradas dizem respeito ao abastecimento urbano de 27 cidades através de adutoras nos reservatórios, a irrigação, a perenização do rio a jusante do reservatório Argemiro Figueiredo e o atendimento das concentrações permitidas para a classe adotada para os parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e no trecho de rio considerado. Para a operação do sistema foram considerados os seguintes objetivos: minimização do déficit do atendimento das demandas das adutoras, das concentrações de certos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema, do atendimento ao volume meta dos reservatórios e da vazão defluente mínima do reservatório Acauã e a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da atividade agrícola no perímetro irrigado. Foram idealizados cenários, variando as prioridades de atendimentos dos objetivos, com o intuito de avaliar o comportamento das respostas do modelo para 4 anos de operação do sistema.

Os resultados mostraram que os objetivos são atendidos considerando as restrições e prioridades de atendimento pré-estabelecidas em cada cenário (comprovando que o modelo efetua uma análise multiobjetivo). A demanda de abastecimento urbano é atendida em todos os cenários sem apresentar falhas. A atividade agrícola pode ser desenvolvida sem comprometer a demanda de abastecimento urbano. Entretanto, a consideração do atendimento das concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade pode afetar a atividade agrícola, caso não seja implantado um sistema de tratamento de esgoto. Observa-se que tais resultados

podem prover subsídios para a tomada de decisão quanto ao estabelecimento de regras operacionais ou no processo de outorga.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Otimização. Programação linear. Qualidade de água.

ABSTRACT

This work presents a quali-quantitative multiobjective optimization model, based on linear programming, for planning and management of reservoirs and irrigated areas perimeters, besides other water uses, integrated system to provide optimal resources (water and land) allocation and establish optimal operational policies in riverbasin systems. The multiple water uses includes meeting the requirement of irrigation and human supplies demands, flood control, minimum regulated flows, target reservoirs volumes, optimal crop plantation area allocation and water quality parameters concentration in reservoirs and riverbeds. The water withdraw can be done at reservoirs or riverbed sections.

Social and economic aspects, such as maximization of net profit and irrigated perimeter labor, are considered in the model.

The nonlinearities of the objective function and the involved process, described by the constraints imposed in the optimization problem, were implemented through the use of a combined used of mathematical linearization techniques.

The model has been applied to the study of two reservoirs, Epitácio Pessoa and Argemiro Figueiredo, connected in series in the Paraíba river basin, a 1220 ha irrigated perimeter and the riverbed connecting both reservoirs. The considered water demands involved human supply for the cities in the neighborhood, irrigation, regulation of river flow downstream the Acauã reservoir and meeting adopted class water quality standard parameters within the reservoirs and the considered section of the river.

The following objectives were considered: minimization of water requirement deficiencies and some water quality parameters in reservoirs and the section of the river, meeting the reservoirs target volumes and the minimum regulated flow downstream the Acauã reservoir and maximization of net profit, labor in irrigated perimeter and dissolved oxygen water quality parameter.

In order to evaluate the model response regarding computational time and results consistency, scenarios with different priority assignments to the objectives were idealized. The results have shown that the considered objectives were met according to the pre-established constraints and priorities for each scenario (showing the model performs a multiobjective analysis). The urban water demand is fulfilled without any failure. Agricultural activities can be developed without compromising the fulfillment of urban water requirements. On the other hand, the requirement of certain water quality parameters may

compromise agricultural activities, if it is not implanted a sewer treatment system. The attained results may provide subsidies to decision making regarding the establishment of operational rules or water right processes.

Key-words: Water resources. Optimization. Linear Programming. Water Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Função objetivo não-linear e linearizada pelo artifício de linearização por segmentos.....	34
Figura 3.2	Ilustração do procedimento iterativo do uso da PL.....	37
Figura 3.3	Inter-relação das atividades potencialmente poluidoras em uma bacia.....	50
Figura 3.4	Perfil esquemático da concentração de (a) matéria orgânica, (b) bactérias decompositoras e (c) oxigênio dissolvido ao longo do percurso no curso d'água.....	55
Figura 3.5	Evolução do processo de eutrofização em um lago.....	57
Figura 3.6	Representação hidráulica dos corpos hídricos.....	58
Figura 3.7	Duração e volumes de déficit em períodos de falha.....	60
Figura 4.1	Componentes para representação do sistema de recursos hídricos	64
Figura 4.2	Esquema geral da estrutura do modelo.....	66
Figura 4.3	Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da demanda de uma tomada d'água d para um mês t	68
Figura 4.4	Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da demanda mínima a ser mantida a jusante de um reservatório r para um mês t	70
Figura 4.5	Exemplo de um gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos do volume meta de um reservatório r para um mês t	71
Figura 4.6	Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.....	76
Figura 4.7	Exemplo de um gráfico da curva área-volume linearizada de um reservatório r	77
Figura 4.8	Exemplo de um gráfico da vazão máxima aduzida por descarga de fundo versus o volume de água do reservatório r	79
Figura 4.9	Valor do volume de água do reservatório e a representação restrição imposta aos trechos segmentados para a 2ª iteração.....	84
Figura 4.10	Fluxograma do modelo otimização quantitativo.....	85
Figura 4.11	Diagrama representando os componentes avaliados pelo modelo no processo de autodepuração ao longo do trecho do rio.....	87

Figura 4.12	Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da μ - ézima concentração de DBO para um mês t.....	91
Figura 4.13	Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da v - ézima concentração de OD para um mês t.....	92
Figura 4.14	Fluxograma do modelo otimização quali-quantitativo.....	96
Figura 5.1	Subdivisões da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.....	99
Figura 5.2	Seção transversal dos trechos do rio Paraíba estudados.....	100
Figura 5.3	Reservatório Argemiro de Figueiredo (Acauã).....	101
Figura 5.4	Reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão).....	102
Figura 5.5	Layout do sistema estudado.....	103
Figura 5.6	Cidades atendidas pelas adutoras do sistema.....	104
Figura 5.7	Fontes poluidoras do sistema.....	112
Figura 6.1	Atendimento das demandas de abastecimento urbano no cenário 1.....	122
Figura 6.2	Volume de água dos reservatórios no cenário 1.....	123
Figura 6.3	Afluência aos reservatórios no cenário 1.....	124
Figura 6.4	Vertimento nos reservatórios no cenário 1.....	125
Figura 6.5	Vazões defluentes dos reservatórios no cenário 1.....	125
Figura 6.6	Área utilizada na área irrigada no cenário 1.....	126
Figura 6.7	Vazões aduzidas para a área irrigada no cenário 1.....	126
Figura 6.8	Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada no cenário 1.....	128
Figura 6.9	Concentração do parâmetro DBO para os reservatórios do sistema no cenário 1.....	129
Figura 6.10	Concentração do parâmetro DBO para os nós do sistema no cenário 1.....	130
Figura 6.11	Concentração do parâmetro OD para os reservatórios do sistema no cenário 1.....	130
Figura 6.12	Concentração do parâmetro OD para os nós do sistema no cenário 1.....	131
Figura 6.13	Vazões defluente do reservatório Boqueirão no cenário 2.....	132
Figura 6.14	Concentração do parâmetro DBO para os nós do sistema no cenário 2.....	133
Figura 6.15	Concentração do parâmetro OD para os nós do sistema no cenário 2.....	133
Figura 6.16	Concentração do parâmetro DBO e OD para os reservatórios do sistema no cenário 2.....	135
Figura 6.17	Volume de água dos reservatórios estudados no cenário 2.....	135

Figura 6.18	Afluência ao reservatório Acauã no cenário 2.....	136
Figura 6.19	Vertimento no reservatório Acauã no cenário 2.....	136
Figura 6.20	Vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 2.....	137
Figura 6.21	Vazões defluente do reservatório Boqueirão no cenário 3.....	138
Figura 6.22	Concentração do parâmetro DBO para os nós do sistema no cenário 3.....	138
Figura 6.23	Concentração do parâmetro OD para os nós do sistema no cenário 3.....	139
Figura 6.24	Concentração do parâmetro DBO e OD para os reservatórios do sistema no cenário 3.....	140
Figura 6.25	Área utilizada e vazão aduzida para o perímetro irrigado no cenário 3.....	140
Figura 6.26	Volume de água dos reservatórios estudados no cenário 3.....	142
Figura 6.27	Vertimento no reservatório Acauã no cenário 3.....	142
Figura 6.28	Vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 3.....	143
Figura 6.29	Vazões defluente do reservatório Boqueirão no cenário 4.....	144
Figura 6.30	Concentração do parâmetro DBO e OD para os nós do sistema no cenário 4.....	144
Figura 6.31	Concentração do parâmetro DBO e OD para os reservatórios do sistema no cenário 4.....	145
Figura 6.32	Volume de água dos reservatórios estudados no cenário 4.....	146
Figura 6.33	Vertimento nos reservatórios no cenário 4.....	147
Figura 6.34	Vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 4.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Valores da precipitação efetiva em função da evapotranspiração potencial da cultura agrícola e da precipitação média mensal.....	74
Tabela 4.2	Fator de correção da precipitação efetiva em função do armazenamento inicial de água no solo.....	74
Tabela 5.1	Comprimento longitudinal e a declividade dos trechos do rio Paraíba estudados.....	100
Tabela 5.2	Sistemas adutores do sistema estudado.....	105
Tabela 5.3	Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc).....	106
Tabela 5.4	Dados característicos das culturas.....	107
Tabela 5.5	Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas agrícolas.....	107
Tabela 5.6	Áreas máximas das culturas agrícolas.....	107
Tabela 5.7	Postos pluviométricos utilizados.....	109
Tabela 5.8	Precipitação média mensal dos postos utilizados.....	109
Tabela 5.9	Dados de evaporação média mensal do tanque “Classe A” e do coeficiente k_t e k_p	110
Tabela 5.10	Média mensal dos valores da vazão afluente nos reservatórios e nós do sistema.....	110
Tabela 5.11	Dados dos reservatórios estudados.....	111
Tabela 5.12	Vazão vertida máxima dos vertedores dos reservatórios estudados.....	111
Tabela 5.13	Características físicas do tubo de descarga de fundo dos reservatórios estudados.....	111
Tabela 5.14	Valores da concentração mensal do parâmetro DBO afluente aos reservatórios e nós do sistema estudado.....	113
Tabela 5.15	Temperatura média mensal da água.....	114
Tabela 5.16	Valores da altitude e concentração de sais dissolvidos nos pontos estudados.....	114
Tabela 5.17	Valores da concentração mensal do parâmetro OD afluente aos reservatórios e nós do sistema estudado.....	114
Tabela 5.18	Valores da concentração inicial dos parâmetros DBO e OD dos reservatórios.....	114

Tabela 6.1	Valores das funções objetivos, do tempo de processamento e do número de iterações para cada cenário.....	120
Tabela 6.2	Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 1.....	123
Tabela 6.3	Índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã no cenário 1.....	124
Tabela 6.4	Valores médios anuais da área cultivada, receita líquida auferida, mão-de-obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada no perímetro irrigado para o cenário 1.....	127
Tabela 6.5	Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO para os nó 1 e 2 no cenário 1.....	129
Tabela 6.6	Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro OD para o nó 1 no cenário 1.....	130
Tabela 6.7	Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO para os nó 1 e 2 no cenário 2.....	134
Tabela 6.8	Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 2.....	136
Tabela 6.9	Índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã no cenário 2.....	137
Tabela 6.10	Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO para os nó 1 e 2 no cenário 3.....	138
Tabela 6.11	Valores anuais da área cultivada, receita líquida auferida, mão-de-obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 3.....	141
Tabela 6.12	Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 3.....	142
Tabela 6.13	Índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã no cenário 3.....	143
Tabela 6.14	Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 4.....	146
Tabela 6.15	Valores médios e máximos do erro relativo dos parâmetros de qualidade de água DBO nos reservatórios e nós do sistema.....	148
Tabela 6.16	Valores médios e máximos do erro relativo dos parâmetros de qualidade de água OD nos reservatórios e nós do sistema.....	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1	Relação entre a altura da lâmina d'água e a velocidade do curso d'água com vazão em cada trecho do rio	116
Quadro 5.2	Prioridades de atendimento dos objetivos do modelo em cada cenário	118

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. GERAL.....	22
2.2. ESPECÍFICOS	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1. PLANEJAMENTO EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	24
3.2. SIMULAÇÃO	26
3.3. OTIMIZAÇÃO.....	28
3.3.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	30
3.3.2 PROGRAMAÇÃO DINÂMICA.....	31
3.3.3 PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR.....	32
3.3.4 ARTIFÍCIOS DE LINEARIZAÇÃO	33
3.3.4.1 Artificio de Linearização Por Segmentos	33
3.3.4.2 Programação Separável por Partes.....	35
3.3.4.3 Programação Linear Sequencial ou Sucessiva.....	37
3.3.4.4 Método das Aproximações Lineares.....	38
3.3.5 OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO	39
3.3.5.1 Método das Ponderações.....	41
3.3.5.2 Método das Restrições	41
3.3.6 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVOS	42
3.4. QUALIDADE DAS ÁGUAS.....	48
3.4.1. POLUIÇÃO HÍDRICA.....	48
3.4.2. PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS.....	49
3.4.3. PROCESSOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS	52
3.4.3.1. Transporte e balanço de massa.....	53
3.4.3.2. Autodepuração	54
3.4.3.3. Eutrofização	55
3.4.4. MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA	56
3.5. INDICADORES DE DESEMPENHO.....	60
4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVO	62
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	62

4.2. OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVA	67
4.2.1. FUNÇÕES OBJETIVO	67
4.2.2. EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO.....	76
4.2.3. PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVA	82
4.3. OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA	85
4.3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	85
4.3.2. ESTIMATIVA INICIAL DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA.....	86
4.3.3. FUNÇÕES OBJETIVO	90
4.3.4. EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO.....	93
4.3.5. PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA	95
4.4. VERIFICAÇÃO DAS LINEARIZAÇÕES DO MODELO	97
5. ESTUDO DE CASO	98
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	98
5.1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	98
5.1.2. CARACTERIZAÇÃO HÍDRICA DO SISTEMA	99
5.2. DADOS DO SISTEMA	103
5.2.1. DEMANDAS HÍDRICAS	103
5.2.2. PRECIPITAÇÃO.....	108
5.2.3. EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	109
5.2.4. VAZÕES AFLUENTES.....	110
5.2.5. DADOS ESTRUTURAIS DOS RESERVATÓRIOS ESTUDADOS	111
5.2.6. CARGAS POLUIDORAS	111
5.3. CENÁRIOS ESTUDADOS	116
5.3.1. CRITÉRIOS OPERACIONAIS	118
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	120
6.1. CENÁRIO 1	121
6.2. CENÁRIO 2	132
6.3. CENÁRIO 3	137
6.4. CENÁRIO 4	143
6.5. VERIFICAÇÃO DAS LINEARIZAÇÕES DO MODELO	147
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	149

7.1. SOBRE O MODELO	149
7.2. SOBRE O SISTEMA ESTUDADO	150
7.3.RECOMENDAÇÕES	151
8. REFERÊNCIAS	152
APÊNDICE A.....	163
APÊNDICE B.....	164
APÊNDICE C.....	165
APÊNDICE D.....	166
APÊNDICE E	167
APÊNDICE F	168
APÊNDICE G.....	169
APÊNDICE H.....	170

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial, seja como componente bioquímico de seres vivos, como elemento representativo de valores sociais e culturais e até como fator de produção de vários bens de consumo final e intermediário.

Dependendo da disponibilidade, da realidade socioeconômica e cultural, das formas de captação, tratamento e distribuição, o homem pode utilizar a água de diversas maneiras, sendo os principais usos: *Abastecimento humano* – o uso mais nobre da água, subdividido em uso doméstico (como fonte de vida, no preparo de alimentos, higiene pessoal, entre outros) e público (escolas, hospitais e demais estabelecimentos públicos, irrigação de parques e jardins, paisagismo, combate a incêndios etc); *Industrial* – como matéria-prima na produção de alimentos e produtos, refrigeração, para lavagem nas áreas de produção de papel, tecido, em abatedouros e matadouros etc e em atividades em que é utilizada para fabricação de vapor, como na caldeiraria, entre outros; *Comercial* – em escritórios, oficinas, nos centros comerciais e lojas, em bares, restaurantes, sorveterias, etc; *Agrícola e pecuário* - na irrigação para produção de alimentos, para tratamento de animais, lavagem de instalações, máquinas e utensílios; *Piscicultura e carcinocultura* – na criação de peixes e camarões em reservatórios ou em tanques e viveiros; *Recreacional* – em atividades de lazer, turismo e socioeconômicas, nas piscinas, lagos, parques, rios, etc; *Geração de energia elétrica* – na produção de energia através da derivação das águas de seu curso natural; *Navegação* – transporte de pessoas e/ou cargas em navios, praticada em rios que comporte tal prática; e *Saneamento* – na diluição e tratamento de efluentes.

O aumento dos usos – causado pelo desenvolvimento econômico – e a degradação – causada pela poluição dos recursos hídricos – está ocasionando um desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, acarretando constantes conflitos entre usuários, principalmente em regiões com escassez desses recursos. Essa escassez de água está se tornando um dos maiores problemas da humanidade e a exploração racional dos recursos hídricos, considerando seus múltiplos usos, é, sem dúvida, um grande desafio a ser enfrentado neste século.

Para Lanna (1993) a questão dos recursos hídricos é uma atividade complexa de natureza multidisciplinar e inter-setorial, onde se destacam as atividades de gerenciamento e planejamento, que devem ser integradas de forma contínua, permanente e dependente.

O planejamento dos recursos hídricos busca a eficiência econômica, a equidade social, ao uso dentro da capacidade de suporte do meio ambiente e a flexibilidade operacional, que

são bases para a sustentabilidade, de forma a adequar e conciliar as intervenções humanas aos sistemas de recursos hídricos. Ele define as metas de racionalização de uso, de aumento da disponibilidade quantitativa e da melhoria da qualidade dos recursos hídricos e apontam as medidas a serem tomadas, os programas a serem desenvolvidos e os projetos a serem implantados para o atendimento das metas previstas.

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

Curi et al. (2004) argumentam que para proporcionar melhorias no padrão sócio-econômico e, conseqüentemente, na qualidade de vida da população, torna-se necessário a aplicação de tecnologias adequadas ao clima da região, promovendo, dessa forma, o uso racional dos recursos hídricos naturais existentes, em especial a água e terras aptas ao plantio. Oliveira e Lanna (1997) afirmam que as causas do pouco desenvolvimento da região semiárida está relacionado aos baixos investimentos na infra-estrutura hídrica existente e à ineficiência no seu aproveitamento.

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

Por ser um problema de grande complexidade, a alocação de água entre os usos múltiplos pode ser solucionada através de técnicas de análise de sistemas numa abordagem sistêmica e do uso de técnicas computacionais agregadas à modelagem matemática.

Quando existe o interesse em otimizar certos aspectos do processo decisório de acordo com uma valoração estabelecida por uma função, devem-se aplicar técnicas de otimização. Uma técnica que merece destaque é a Programação Linear (PL), por determinar o ótimo global, se ele existir, além de ser uma técnica bem estabelecida para a qual há diversos softwares disponíveis. Ela foi estabelecida por G. B. Dantzig, em 1947, para resolver problemas de logística da Força Área Americana. Aplicações na área de recursos hídricos remontam a década de 60, no âmbito dos trabalhos do “Harvard Water Resources Group”,

onde se fez uma aplicação de PL a um problema de gerenciamento de água subterrânea (BARBOSA, 2002). Desde então muitas aplicações de PL em recursos hídricos tem sido registradas.

A principal limitação da PL é a hipótese da linearidade entre as variáveis, traduzidas pelas equações que descrevem o problema. Porém, sob certas hipóteses, problemas não-lineares podem ser linearizados utilizando-se de aproximações matemáticas ou de procedimentos iterativos.

Dentro deste contexto, pretende-se estabelecer uma metodologia capaz de ser aplicada a sistemas de recursos hídricos, com a possibilidade de representar o sistema de forma mais detalhada, tendo em vista a escolha de políticas operacionais que possam melhorar, de forma sustentável, o uso da água e das áreas irrigadas em regiões com escassez hídrica, avaliando os impactos do lançamento de cargas poluidoras, minimizando problemas peculiares de déficit hídrico e os conflitos de uso da água.

Este trabalho apresenta um modelo de otimização multiobjetivo quali-quantitativo, baseado em programação linear, para prover o estudo da alocação ótima dos recursos naturais existentes (água e terras aptas ao plantio) entre os múltiplos usos de sistemas de recursos hídricos, com a operação integrada de sistemas de reservatórios, a implantação ou melhoramento da operação de um ou mais perímetros irrigados ou áreas irrigadas e a análise das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e/ou nas seções dos trechos dos rios. Os múltiplos usos da água incluem o atendimento de demandas hídricas, através de tomadas d'águas, em reservatórios ou a fio d'água, como de irrigação ou de demandas urbanas; o volume meta dos reservatórios; a alocação de áreas agrícolas; o controle de cheias; regularização de vazões e as concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nas seções dos rios.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O trabalho tem como objetivo estabelecer uma metodologia capaz de ser aplicada a sistemas de recursos hídricos, que possa prover o planejamento e a operação integrada dos diversos componentes do sistema com a possibilidade de representação de forma mais detalhada, tendo em vista a alocação ótima dos recursos naturais existentes (águas e terras aptas ao plantio) entre os múltiplos usos, através de uma análise multiobjetivo

2.2. ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos, podem ser citados:

- Desenvolver um modelo de otimização quali-quantitativo, para planejamento integrado em sistemas de recursos hídricos, que:
 - Seja baseado em programação linear;
 - Vise obter uma melhor representação matemática dos processos e componentes do sistema;
 - Integre e analise os diversos componentes do sistema simultaneamente;
 - Otimize para um período maior que um ano, para caracterizar transferências inter-anuais de água;
 - Incorpore, de forma natural e estruturada, a análise multi-objetivo.
 - Analise o desempenho dos vários tipos de usos da água (além do usual atendimento às demandas d'água incluem, também, a agricultura irrigada, as concentrações dos parâmetros de qualidade de água, a perenização dos rios, etc.);

- Quanto ao sistema de recursos hídricos em estudo, procurar-se-á:
 - Verificar a adequação do modelo de otimização desenvolvido para aplicações práticas (facilidade no uso, tempo de processamento, limitações quanto à capacidade de memória, adequação dos resultados, etc.);

- Identificar intervenções operacionais do sistema e avaliar suas consequências sobre as disponibilidades hídricas, com vista a sua viabilidade econômica, ambiental e social, priorizando as demandas já estabelecidas;
- Avaliar os benefícios financeiros e sociais advindos da agricultura irrigada na área irrigada beneficiado pelos recursos hídricos do sistema;
- Avaliar as alterações nas respostas hídricas do sistema quanto a mudanças de prioridades do atendimento dos objetivos, analisando a susceptibilidade do mesmo às falhas de atendimento, em função de prioridades previamente estabelecidas;
- Identificar e propor critérios para operação ótima do sistema, subsidiando os órgãos gestores na expedição de outorga de direito de uso da água.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PLANEJAMENTO EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

A análise de sistemas de recursos hídricos pode ser definida como o conjunto de princípios e métodos usados na análise do comportamento e estruturação de sistemas complexos. O termo sistema, nesse contexto, refere-se a um conjunto de elementos inter-relacionados, os quais podem ter natureza social ou natural, física, concreta ou abstrata, existente ou planejada, estática ou dinâmica, etc., e que, em geral, é de natureza interdisciplinar.

Segundo Wurbs (2005) os modelos de sistemas de recursos hídricos têm como objetivos:

- A diminuição dos danos causados por inundações e enchentes;
- A diminuição dos riscos e consequências de falta da água;
- A avaliação da capacidade de armazenamento e múltiplos usos;
- A otimização do uso e benefício da água, da energia, e dos recursos da terra;
- O controle dos recursos ambientais;
- Em sistemas já concebidos, a expansão para múltiplas finalidades e usos; e
- A formulação de estratégias operacionais mensais, anuais, sazonais ou por estação.

Os modelos em sistemas de recursos hídricos são comumente feitos por meio de aplicação de elaboradas metodologias matemáticas e computacionais, que incluem técnicas de Otimização e Simulação (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993, 2005; LABADIE, 2004).

Para Lanna (2002) os grandes propósitos da análise de sistemas de recursos hídricos é simular o comportamento da realidade que eles representam e otimizar os processos decisórios que atuam sobre a realidade, o que dá margem a utilização das técnicas de simulação e otimização.

Apesar de se reconhecer que simulação, otimização e métodos associados são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de bases quantitativas para a tomada de decisão, autores como Yeh (1985), Wurbs (1993) e Labadie (2004) notaram que existia uma lacuna entre a pesquisa e a aplicação dessas teorias na prática. Labadie (2004) aponta algumas razões para o fato:

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

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

- Modelos amplos, mas também fáceis de usar;
- Transferência no ambiente de modelagem para que sejam possíveis a adoção, modificação e execução de uma variedade de situações em tempo real;
- Interface interativa do modelo com o usuário e ferramentas adicionais para obter cenários operacionais em tempo real;
- Recursos computacionais razoáveis e tempo dentro do qual as decisões operacionais possam ser obtidas;
- Qualidade de soluções aceitáveis contanto que o desempenho do sistema seja melhor do que o obtido com decisões operacionais existentes.

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

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

Lima e Lanna (2005) ressaltam que a escolha da metodologia dependerá das particularidades do sistema em análise. Tanto os modelos que utilizam programação

matemática (linear, dinâmica ou não linear) como os modelos de simulação serão importantes em situações específicas.

3.2. SIMULAÇÃO

Um modelo de simulação é caracterizado como uma representação de um sistema físico com a finalidade de prever seu comportamento dentro de certo conjunto de condições. Assim, a simulação é uma técnica de modelagem usada para aproximar o comportamento espacial e/ou temporal de um sistema, representando as suas principais características por meio de equações matemáticas.

Sua principal característica é a flexibilidade, sendo esta considerada uma das suas principais vantagens, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática mais detalhada, devido ao requerimento de se resolver um sistema de equações associado a um instante de tempo de cada vez. Por isso, a simulação é considerada míope, ou seja, as decisões são baseadas no estado das variáveis no presente, sem levar em consideração o que ocorrerá no futuro. Dessa forma, a simulação é diferente de otimização visto que não identifica políticas ótimas de operação. Entretanto, ela permite uma representação bem detalhada e mais realista da complexidade do sistema estudado.

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

De modo geral, pode-se dizer que modelos de simulação são mais apropriados para análise do desempenho de alternativas operacionais, principalmente, de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança.

Os trabalhos de Wurbs (2005, 1993) citam várias referências de modelos de simulação, tais como: HEC-3, HEC-5 e HEC-ResSim desenvolvido pelo USACE Hydrologic Engineering Center; TAMUWRAP, desenvolvido pelo Texas A&M University; IRAS e IRIS desenvolvido pelo Ford Foundation, United Nations Environment Program, International Institute for Applied Systems Analysis, and Cornell University; HYSSR, HYSYS, HLDPA e SSARR desenvolvido pelo North Pacific Division; StateMod desenvolvido pelo Colorado

Water Conservation Board e Colorado Division of Water Resources; OASIS desenvolvido pelo HydroLogics, Inc.; RIBASIN desenvolvido pelo Delft Hydraulics.

Tem sido uma tendência nos últimos anos a incorporação de rotinas de otimização em modelos de simulação. De acordo com Wurbs (1993), várias estratégias têm sido empregadas para a utilização conjunta de modelos de simulação e otimização, como por exemplo: o modelo pode preliminarmente definir, através de um algoritmo de otimização, algumas alternativas que serão, posteriormente, detalhadas e testadas por um algoritmo de simulação. Lima e Lanna (2005) relatam, também, que os modelos de simulação podem servir como uma técnica preliminar para delimitar espaços de soluções possíveis, espaços estes que serão pesquisados de maneira mais precisa pelos modelos de otimização para localizar o ponto de solução ótima. Outra forma é a utilização de rotinas de otimização no modelo de simulação, em cada intervalo de tempo, com o intuito de obter a solução ótima no tempo t , sendo os resultados utilizados como passo inicial no tempo $t + 1$.

Vieira (2007) desenvolveu um modelo de simulação, em ambiente MATLAB, para operação integrada dos sistemas de recursos hídricos utilizando técnicas combinadas de simulação e otimização. O intervalo de tempo do modelo é mensal, sendo que o algoritmo de otimização, baseado em programação linear, é aplicado mês a mês. O modelo foi aplicado por Vieira et al. (2007) em um sistema composto de dois reservatórios em série e um perímetro irrigado na bacia do rio Piancó – PB para analisar as regras de operação propostas pelo modelo de otimização desenvolvido por Santos (2007) e pelo plano diretor da referida bacia.

O modelo CALSIM (MUNEVAR; CHUNG, 1999), do California Department of Water Resources, é um modelo de alocação de água projetado para avaliar alternativas operacionais de grandes e complexos sistemas de recursos hídricos. A modelagem do sistema integra uma linguagem de simulação para a definição dos critérios de operação e o uso da programação linear (PL) ou programação linear inteira mista (PLIM) para determinar a solução ótima do problema para cada período de tempo dado um conjunto de pesos e um sistema de restrições. O intervalo de tempo da simulação é mensal e o algoritmo de otimização é aplicado para cada mês.

Outro emprego de técnicas conjuntas de simulação e otimização são os modelos de rede de fluxo que representam o sistema utilizando uma rede formada por nós e arcos. Os nós representam elementos pontuais do sistema (reservatórios, demandas, importações e confluências) enquanto os arcos representam as ligações entre os nós (trechos de rios, adutoras, canais naturais ou artificiais e outros elementos semelhantes).

Um dos modelos de rede de fluxo bastante utilizados é o MODSIM, desenvolvido no Colorado State University por Labadie et al. (1984). É essencialmente um modelo de simulação que permite fazer a otimização aplicada individualmente para cada mês, da alocação de água via modelo de rede de fluxo. A solução ótima é obtida mediante a utilização de um algoritmo chamado “out of kilter” que se trata essencialmente de um algoritmo de programação linear desenvolvido para a solução de problemas de otimização de rede de fluxo (LIMA, 2004).

O MODSIM tem sido foco de pesquisa do Laboratório de Sistema de Suporte a Decisão da Escola Politécnica da USP, na área de desenvolvimento de técnicas de análise de sistemas de recursos hídricos. Atualmente, devido a várias modificações, o MODSIM desenvolvido na USP passou a ter a denominação de AquacNet (FIRMINO, 2007). Aplicações do modelo MODIM e AquacNet podem ser observadas nos trabalhos de Azevedo et al. (2002, 1998); Roberto (2002); Roberto e Porto (1999, 2001).

Labadie (2004) e Wurbs (1993, 2005) citam os seguintes modelos baseados em rede de fluxo: HEC-PRM, desenvolvido pelo USACE Hydrologic Engineering Center; RESOP-II, SIMYLD-II, AL-V e SIM-V desenvolvido pelo The Texas Water Development Board; ARSP desenvolvido pelo Acres International Corporation; MIKE BASIN 2000 desenvolvido pelo Danish Hydraulic Institute.

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

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

3.3. OTIMIZAÇÃO

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

Há três décadas Yeh (1985) apontava que os mais importantes avanços no campo da engenharia de recursos hídricos foram o desenvolvimento e adoção de técnicas de otimização para o planejamento e gerenciamento de sistemas complexos de recursos hídricos. Sabendo-se que existem inúmeras políticas viáveis, utilizar um modelo de simulação torna difícil o processo de busca da melhor regra. No entanto, as técnicas de otimização fornecem um meio de superar esta dificuldade, já que possuem a habilidade de examinar todas as alternativas possíveis e buscar a decisão ótima.

Os modelos de otimização são representados por uma formulação matemática, na qual um algoritmo é usado para calcular um conjunto de valores para as variáveis de decisão que minimizem ou maximizem uma função objetivo, sujeita as restrições. A escolha da técnica a ser usada depende da forma e propriedades matemáticas da função objetivo e restrições.

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

- Custos e prejuízos;
- Lucros ou benefícios diretos ou indiretos;
- Indicadores econômicos, de desenvolvimento, sociais e ambientais;
- Funções estritamente matemáticas, como erros e desvios, calibração de parâmetros de modelos;

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

A maioria dos modelos de otimização é baseada em algum tipo de programação matemática, sendo que uma classificação básica das técnicas de otimização é dada por (LABADIE, 2004):

- Programação Linear (PL);

- Programação Dinâmica (PD);
- Programação Não-Linear (PNL) e
- Métodos Heurísticos (Algoritmos Genéticos, Redes Neurais e Lógica Fuzzy, etc.).

Cada uma dessas técnicas pode ser resolvida de forma determinística (os dados de entrada do modelo são perfeitamente conhecidas) ou estocástica (incorporam incertezas nos dados de entrada do modelo), podendo ser estocástica implícita (quando os dados de entrada são gerados sinteticamente ou por métodos de previsão com base na série histórica) ou estocástica explícita (a otimização é realizada sem a presunção do perfeito conhecimento de eventos futuros).

3.3.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR

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

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

Yeh (1985) e Labadie (2004) apontam as seguintes vantagens da PL:

- a) A habilidade para se ajustar e resolver problemas de grandes dimensões;
- b) Atinge valores ótimos globais;
- c) A não necessidade de uma política inicial de operação dos reservatórios;
- d) Teoria da dualidade bem desenvolvida para a análise de sensibilidade;
- e) A existência de pacotes computacionais prontos para resolução de problemas.

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

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

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

Nas obras de Braga (1997) e Barbosa (2002) são apresentadas aplicações de PL usando pacotes computacionais específicos, como o SIMPLEX, o LINDO, o EXCEL, o MINUS e o GAMS.

Nos trabalhos de Curi e Curi (2001a), Santos (2007), Vieira (2007), Curi et al. (2004), Sudha et al. (2008), Mousavi et al. (2004), Bessa et al. (2003), Carvalho et al. (2000), Vieira et al. (2008), Amir e Fisher (1999), Salmam et al. (2001) encontram-se aplicações da PL.

3.3.2 PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

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

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

A popularidade e o sucesso dessa técnica podem ser atribuídos à vantagem de que as características estocásticas e não lineares, que caracterizam um grande número de sistemas de

recursos hídricos, podem ser incorporadas numa formulação de PD. Porém, o método tem uma deficiência se aplicada a sistema de múltiplos reservatórios, chamada “Maldição da dimensionalidade”, decorrente da qual o tempo computacional cresce exponencialmente com o número de variáveis de estado (YEH, 1985; LABADIE, 2004).

Lima e Lanna (2005) e Labadie (2004) apresentam diversos algoritmos de PD e suas aplicações em sistemas de recursos hídricos, dando ênfase aos problemas de operação de reservatórios. Outras aplicações de programação dinâmica em sistemas de recursos hídricos são ilustradas nos trabalhos de Young (1967), Karamouz et al. (1992), Mujumdar e Ramesh (1997), Perera e Codner (1996), Lima e Lanna (2001) entre outros.

3.3.3 PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

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

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

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

Segundo Labadie (2004), os algoritmos de PNL, geralmente considerados como os mais poderosos e robustos, são:

1. a programação linear sucessiva (ou sequencial);
2. a programação quadrática sucessiva (ou método Lagrangeano projetado);

3. o método Lagrangeano aumentado (ou método dos multiplicadores), e
4. o método do gradiente reduzido generalizado.

Vários programas computacionais estão disponíveis, atualmente, para a resolução de problemas de PNL. Na obra de Cirilo (2002) estão citados alguns programas como o ADS, da Universidade da Califórnia; o GAMS, da GAMS Development Corporation; o LANCELOT, o SOLVER do EXCEL, e outros.

A grande vantagem da PNL é a sua abrangência, oferecendo uma formulação matemática mais geral, não necessitando de simplificações, o que, uma vez elaborado o modelo matemático que descreve o sistema a otimizar, aumenta a precisão nos resultados a serem alcançados (CIRILO, 2002; SIMONOVIC, 1992). Como desvantagem, destaca-se a incerteza de que, em muitos casos, a solução ótima obtida não é a melhor dentre todas as soluções ótimas no espaço viável, dado à natureza de não linearidade dos problemas.

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

3.3.4 ARTIFÍCIOS DE LINEARIZAÇÃO

Conforme mencionado, a principal restrição da aplicação da PL é a exigência de linearidade das funções, o que não se verifica em muitos problemas de recursos hídricos (BARBOSA, 2002). No entanto, existem aproximações matemáticas para tratar problemas de natureza não linear, que devem obedecer a certas condições e cujos resultados são obtidos através de processos iterativos, que são chamadas de artifícios de linearização.

3.3.4.1 Artifício de Linearização Por Segmentos

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

O método consiste em dividir a função não-linear em vários segmentos de reta. A Figura 3.1 apresenta uma função objetivo não linear e linearizada pelo artifício de linearização por segmentos.

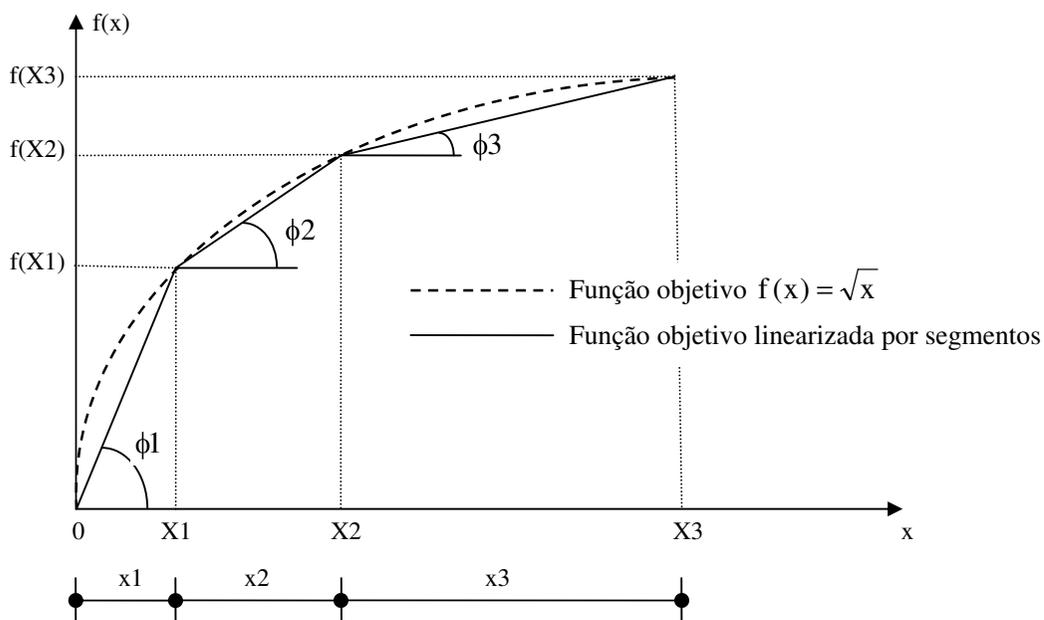


Figura 3.1 – Função objetivo não-linear e linearizada pelo artifício de linearização por segmentos.

A função objetivo linearizada $f^*(x)$ e a variável de decisão x serão dadas por:

$$f^*(x) = \phi_1 \cdot x_1 + \phi_2 \cdot x_2 + \phi_3 \cdot x_3 \quad (3.1)$$

$$x = x_1 + x_2 + x_3 \quad (3.2)$$

sendo ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 as declividades da reta em cada trecho segmentado; x_1 , x_2 e x_3 os segmentos da variável de decisão.

Os segmentos são delimitados pelos pontos de quebra X_1 , X_2 e X_3 . Logo:

$$0 \leq x_1 \leq X_1 \quad (3.3)$$

$$0 \leq x_2 \leq X_2 - X_1 \quad (3.4)$$

$$0 \leq x_3 \leq X_3 - X_2 \quad (3.5)$$

Esta aproximação funcionará se houver garantia de que os segmentos para a variável de decisão serão “percorridos”, inicialmente, pelo primeiro segmento para, então, ser percorrida pelo segundo, e assim sucessivamente até o último segmento. Ou seja, ao segmento x_2 só será atribuído algum valor quando o segmento x_1 atingir o seu valor máximo (no caso X_1). Da mesma forma, ao segmento x_3 só será atribuído algum valor quando x_2 atingir o seu valor máximo (no caso $X_2 - X_1$) e assim sucessivamente.

A garantia para isso ocorrer dependerá da forma da função objetivo não-linear e o tipo de otimização. Em problemas de maximização a função objetivo deverá ser côncava e em problemas de minimização ela deverá ser convexa. Isso por que uma função côncava, ao ser linearizada por segmentos, determina que os segmentos sucessivos tenham declividades cada vez menores (ou em termos matemáticos, a derivada primeira é decrescente). Isto faz com que os coeficientes dos segmentos (declividade de cada segmento) na função objetivo linearizada sejam sucessivamente menores. Para efeito do valor da variável de decisão x tanto faz aumentá-lo através de qualquer segmento, mas na maximização da função objetivo é mais vantajoso aumentar-se primeiro o valor das variáveis segmento que tiverem maior coeficiente. Isto garante que a variável do primeiro segmento será inicialmente aumentada até o seu limite, para, então, aumentar a do segundo segmento, e, de forma sucessiva, o processo continua até aumentar a do último segmento. Em um problema de minimização será exatamente o oposto, deve-se aumentar primeiro a variável associada ao segmento que tiver o menor coeficiente. Por isto a função não-linear deverá ser convexa.

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

3.3.4.2 Programação Separável por Partes

Outra forma de tratar problemas desse tipo é utilizar o método da Programação Linear Separável por Partes (PLSP). Marins e Perin Filho (1996 apud SCHARDONG, 2006) apresentam várias aplicações desse método. Os autores observam que os modelos lineares equivalentes obtidos possuem um número muito maior de variáveis e restrições que o modelo

original, pois estes métodos definem ao menos uma variável e/ou restrição adicional para cada termo linear de todas as parcelas que formam a função objetivo.

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

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

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

Fazendo a linearização da função $f(x) = \sqrt{x}$, utilizando o “método λ ”, chegamos às seguintes expressões para a função objetivo linearizada $f^*(x)$ e da variável de decisão x :

$$x = \lambda_1 \cdot X_1 + \lambda_2 \cdot X_2 + \lambda_3 \cdot X_3 \quad (3.6)$$

$$f^*(x) = \lambda_1 \cdot f(X_1) + \lambda_2 \cdot f(X_2) + \lambda_3 \cdot f(X_3) \quad (3.7)$$

Os valores λ devem atender as seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1 \quad (3.8)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (3.9)$$

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

3.3.4.3 Programação Linear Sequencial ou Sucessiva

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

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

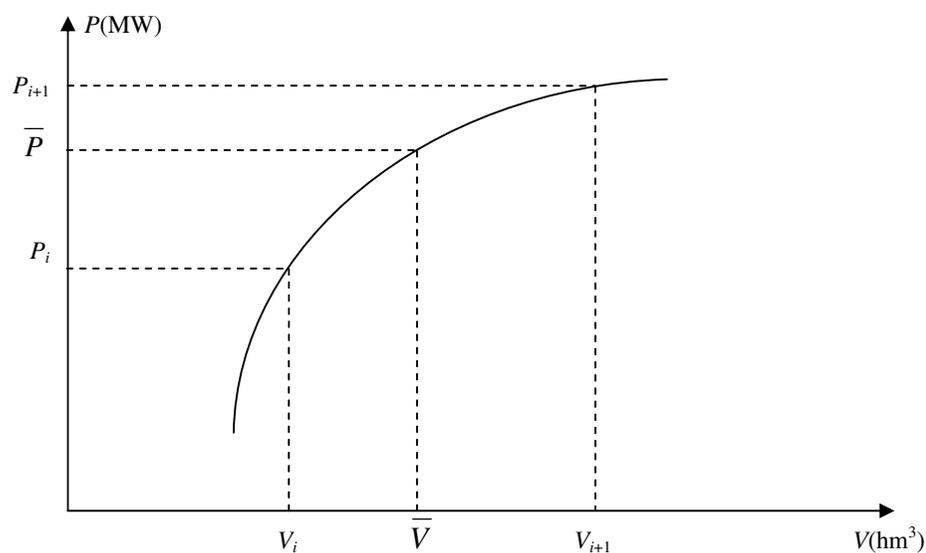


Figura 3.2 – Ilustração do procedimento iterativo do uso da PL.

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

aplicação da PL sejam muitos próximos dos resultados anteriormente obtidos, o que indica a convergência do processo iterativo.

Os trabalhos de Santos (2007) e Vieira (2007) apresentam aplicações dessa técnica. Labadie (2004) cita algumas aplicações com destaque para os trabalhos de Martin (1983), Lund e Ferreira (1996) e Barros et al. (2003).

3.3.4.4 Método das Aproximações Lineares

O Método de Programação por Aproximações, desenvolvido por Griffith e Stewart (1961 apud CIRILO, 2002), é baseado em expansão de funções em séries de Taylor e consiste em solucionar problemas de PNL por sucessivos sistemas lineares com aplicação da programação linear.

A forma geral do problema de Programação Linear é:

$$\text{minimizar } f(X) \quad X \in E^{nj} \quad (3.10)$$

$$\text{sujeito a: } hw(X) = 0 \quad w=1,2,\dots,m \quad (3.11)$$

$$gw(X) \leq 0 \quad w= m+1, \dots mp \quad (3.12)$$

sendo $f(X)$ a função objetivo; X um vetor com nj variáveis de decisão; E^{nj} o espaço da função; $hw(X)$ a w -ésima restrição de igualdade; $gw(X)$ a w -ésima restrição de desigualdade.

Na estrutura de Programação por Aproximações, segundo Cirilo (2002), tem-se em cada iteração u :

$$\text{minimizar } f(X^u) - f(X^{u-1}) = \sum_{j=1}^{nj} \frac{\partial f(X^{u-1})}{\partial X_j} (X^u - X^{u-1}) \quad (3.13)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{w=1}^{nj} \frac{\partial h_w(X^{u-1})}{\partial X_w} (X^u - X^{u-1}) = -h_w(X^{u-1}) \quad w = 1,2,\dots,m \quad (3.14)$$

$$\sum_{w=1}^{nj} \frac{\partial g_w(X^{u-1})}{\partial X_w} (X^u - X^{u-1}) \geq -g_w(X^{u-1}) \quad w = m+1,\dots mp \quad (3.15)$$

sendo X^u um vetor com n_j variáveis de decisão na iteração u .

A partir da estimativa do valor inicial, ou aqui simulado, X^0 monta-se e obtém-se a solução do sistema linearizado. Repete-se o processo sucessivamente até atingir uma convergência desejada. Para evitar que surjam soluções não viáveis do problema não linear original, restringe-se a variação entre sucessivas soluções lineares da forma

$$|x_j^u - x_j^{u-1}| \leq \delta_j \quad (3.16)$$

sendo δ_j o limite do passo de cálculo na iteração u , nas várias direções de busca, estabelecida para que a solução permaneça na região viável.

Firmino (2007) aplicou esse método para o desenvolvimento do modelo META-F, destinado a otimização quali-quantitativa dos recursos hídricos em uma escala mensal.

3.3.5 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

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

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

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

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

As técnicas que geram o conjunto de soluções não dominadas consideram um vetor de funções objetivo e , mediante tal vetor, geram o conjunto das soluções não dominadas. Uma solução não dominada ou não inferior é definida como uma solução multiobjetivo que não

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

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

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

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

3.3.5.1 Método das Ponderações

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

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

$$\max \text{ ou } \min \sum_{i=1}^n w_i \times f_i(x) \quad (3.17)$$

sendo w_i o fator de ponderação do objetivo i e $f_i(x)$ a função objetivo i .

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

Aplicações desse método podem ser observadas nos modelos CISDERGO (CURI; Curi 2001a), ORNAP (CURI; Curi 2001b), CALSIM (MUNEVAR; CHUNG 1999), ACQUANET (PORTO et al., 2005) e nos trabalhos de Santos (2007), Vieira (2007), Firmino (2007), Celeste (2004), entre outros.

3.3.5.2 Método das Restrições

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

$$\max \text{ ou } \min \quad f_j(x) \quad (3.18)$$

$$\text{sujeito a} \quad f_i(x) \geq I_i \quad \text{para todo } i \neq j \quad (3.19)$$

sendo I_i um limite inferior do objetivo i .

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

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

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

3.3.6 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVOS

A seguir estão descritos alguns modelos de otimização quantitativa aplicados em sistemas de recursos hídricos.

O modelo Aquarius (DIAS et al., 2000), desenvolvido pelo Colorado State University, é um modelo destinado a alocação temporal e espacial da água entre usos em uma bacia hidrográfica onde cada componente do sistema de recursos hídricos é interpretado como um objeto de uma rede de fluxo. O modelo é direcionado por um critério operacional de eficiência econômica que exige a redistribuição dos fluxos de água até que o retorno marginal líquido em todos os usos da água esteja igual. Desse modo, cada uso é representado por uma curva de demanda caracterizada por uma função exponencial, linear ou constante. As funções de benefícios econômicos são refletidas na função objetivo do modelo, os quais são: maximização dos benefícios econômicos da geração de energia hidroelétrica, abastecimento humano e industrial, suprimento hídrico de áreas agrícolas, controle de cheias e recreação em rios e reservatórios. O problema da alocação de água é solucionado utilizando Programação Quadrática (PQ) aproximando as funções objetivo originais em uma função quadrática por meio da expansão da Série de Taylor. Como a PQ exige restrições lineares, a curva área \times volume do reservatório é linearizada por regressão linear simples. O volume final de água armazenado no reservatório deve ser igual (ou maior) a certa porcentagem do volume inicial, prevenindo que ocorra uma depleção excessiva no final do horizonte de operação (intervalo de tempo). O intervalo de tempo é mensal. Os autores não recomendam a utilização de um

horizonte de operação muito grande. O modelo foi aplicado por Melo e Cirilo (2007) a um sistema de 5 reservatórios no sertão paraibano onde os usos estabelecidos foram abastecimento humano e irrigação para um período de 1 ano obtendo resultados sobre o volume de água armazenado nos reservatórios, evaporação, entrada e saída de fluxo, fluxo alocado e preço marginal para irrigação e abastecimento humano.

O modelo ORNAP (CURI; CURI 2001b) é um modelo de otimização baseado em programação não-linear, desenvolvido no ambiente MATLAB, destinado a maximizar múltiplos benefícios ou objetivos relativos aos múltiplos usos da água resultante da operação de um sistema de reservatórios com vistas a dar subsídios para o planejamento ou gerenciamento do uso de bacias hidrográficas. Estes múltiplos usos podem incluir atendimento de demandas urbanas, geração de energia, irrigação, piscicultura, controle de cheias, prevenção contra secas, regularização de vazões, etc. O volume final de água armazenado no reservatório deve ser igual (ou maior) ao volume inicial. O intervalo de tempo é mensal. A análise multiobjetiva é realizada através do método das ponderações. A solução do problema de otimização é obtida por meio de um processo iterativo na qual são normalizadas as restrições do problema. A análise da convergência do processo de otimização é feita através de cálculos de erros relativos em termos da função objetivo e de uma função de penalidade que, para uma boa aceitação, devem respeitar certo nível de tolerância especificado. O modelo gera resultados para análise da convergência do processo iterativo e de restrições, dentro da tolerância requerida, descrevendo o tipo das restrições violadas, ou não, suas quantidades mensais e valores totais, seja em vazões, volumes, níveis e áreas.

Lima (2004) utilizou o modelo para a determinação das demandas hídricas de seis perímetros irrigados na bacia do rio Piancó no sertão paraibano, a partir dos dados (plano de cultivo, produtividade, preço médio de mercado, trabalho médio requerido, custo atual de trabalho, etc) das culturas agrícolas temporárias e perenes e dos sistemas de irrigação para o período de um ano considerando um cenário hidroclimático normal. Melo et al. (2006) verificou através do modelo o potencial econômico de um sistema composto por cinco reservatórios, situado na bacia do rio Piancó, com a atividade de piscicultura extensiva para três cenários hidroclimáticos. Serrano et al. (2002) estudou, com o auxílio do modelo, a operação integrada de dois reservatórios, em série, de múltiplos usos, para atender requerimentos hídricos de três áreas irrigáveis na bacia do rio Capibaribe – PE objetivando a maximização da receita líquida advinda da agricultura irrigada, avaliando também o lucro da piscicultura extensiva nos reservatórios. Outras aplicações deste modelo podem ser vistas nos

trabalhos de Celeste et al. (2007), Andrade (2006), Celeste (2006), Pedreira (2005), Silva (2004), Farias (2004), Melo (2004).

O modelo CISDERGO (CURI; CURI 2001a) é um modelo de otimização baseado em programação linear recursiva, desenvolvido no ambiente MATLAB, destinado a maximizar múltiplos benefícios ou objetivos relativos ao planejamento ou gerenciamento de perímetros irrigados, otimizando a água aduzida de um reservatório, poços e rios e os usos de vários sistemas de moto-bomba. O mesmo utiliza o método das ponderações para efetuar uma otimização multiobjetivo. O volume final de água armazenado no reservatório deve ser igual (ou maior) ao volume inicial. O intervalo de tempo pode ser mensal, anual ou plurianual. A solução do problema é feita através da aplicação de um método de programação linear de forma recursiva. Este método leva em consideração, de forma heurística, a natureza intrínseca não-linear (curva área \times volume do reservatório) do problema..

O modelo foi utilizado por Albuquerque et al. (2003) para analisar o potencial de atendimento de uma área passível de irrigação de 10.000 ha com os recursos hídricos do reservatório de Jataúba, no agreste do estado de Pernambuco, através de diversos cenários hidroclimáticos, visando a maximização da receita líquida obtida com agricultura irrigada. Almeida et al. (2001) aplicou o modelo CISDERGO para otimizar a seleção de culturas do perímetro irrigado de Condado, alimentado pelo reservatório Engenheiro Arcoverde e poços amazonas, localizados no semi-árido paraibano, objetivando a maximização da receita líquida e a mão de obra oriunda da agricultura irrigada em diferentes situações hidroclimáticas. Oliveira et al. (2001) analisou, através do modelo CISDERGO, a alocação ótima de áreas entre um conjunto de culturas agrícolas no perímetro irrigado de 5.000 ha localizado nas várzeas de Sousa, PB, alimentado por um canal ligado ao reservatório Coremas Mãe D'Água, para quatro cenários hidroclimáticos, em um período de 6, anos objetivando a maximização da receita líquida.

Santos (2007) desenvolveu um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em programação linear, para o estudo integrado da operação de sistemas de reservatórios e perímetros irrigados, além de outros usos da água, estabelecendo a alocação ótima dos recursos naturais existentes (água e terras aptas ao plantio) para o planejamento e estabelecimento políticas operacionais ótimas em bacias hidrográficas. Os múltiplos usos da água incluem o atendimento de demandas em reservatórios ou em fio d'água, como de irrigação ou de demandas urbanas, controle de cheias, regularização de vazões, prevenção contra as secas e volumes metas dos reservatórios. Aspectos econômicos e sociais, com a maximização da receita líquida e da geração de empregos oriunda da agricultura irrigada, são

contemplados pelo modelo. As não-linearidades das funções objetivo e dos processos representados em cada restrição foram implementadas através do uso combinado do Artífício de Linearização por Segmentos e da Programação Linear Seqüencial. A função objetivo do é uma escalarização das (múltiplas) funções objetivo do problema, utilizando o Método das Ponderações no qual cada função objetivo é normalizada, sendo atribuídos pesos para definir as prioridades de atendimento (quando o peso for nulo a específica função objetivo não será considerada no processo de otimização).

O modelo vem sendo testado e continuamente aprimorado a fim de se tornar capaz de resolver um maior número de problemas complexos de grande porte com suas determinadas particularidades. Barbosa (2010) aplicou o modelo na bacia hidrográfica do rio Gramame com o intuito de analisar as possíveis ações de intervenção hidráulicas na bacia para a ampliação da disponibilidade hídrica, determinando indicadores de sustentabilidade e eficiência do sistema refletindo os aspectos sócio-econômicos e ambientais a serem utilizados como critérios de julgamento numa análise multicriterial. Barros (2010) utilizou o modelo para verificar a potencialidade de 42 pequenos açudes, a montante do açude de Sumé, para os usos de abastecimento humano, dessedentação de animais, agricultura irrigada e piscicultura extensiva. Alencar (2009) utilizou o modelo como finalidade uma analisar comparativamente um sistema de produção convencional e um sistema de produção orgânico, tendo como base as áreas irrigadas da cidade de Boqueirão, Estado da Paraíba, cujas demandas hídricas são supridas por um reservatório que abastece várias cidades utilizando uma série de 10 anos hidroclimáticos da região. Barbosa (2008) utilizou o modelo para um período de 10 (dez) anos consecutivos com o objetivo de buscar a solução ótima para operação de sistema formado por 5 reservatórios – Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Várzea do Uma – e seis perímetros irrigados, localizados na bacia do rio Capibaribe, para atendimento das demandas de abastecimento humano, vazão ecológica, irrigação e controle de cheias, alguns destes usos conflitantes. Outras aplicações podem ser observadas nos trabalhos de Santos et al. (2007a; 2007b).

Curi et al. (2004) desenvolveram um modelo de otimização, com base na programação linear seqüencial, para fornecer subsídios com vistas ao planejamento da utilização da água do sistema de reservatórios Coremas – Mãe D'Água, para um perímetro irrigado localizado nas várzeas da cidade de Sousa – PB. A função objetivo visa à maximização da receita líquida oriunda da atividade agrícola. As restrições do problema traduzem os limites físicos dos elementos do sistema, assim como os critérios operacionais para os reservatórios e perímetros irrigados. O volume final de água armazenado no reservatório deve ser igual (ou maior) ao

volume inicial. As não-linearidades intrínsecas do problema (balanço hídrico do reservatório) foram solucionadas por meio da programação linear seqüencial. O intervalo de tempo é mensal.

Sudha et al. (2008) desenvolveram um modelo de otimização, baseado em programação linear inteira mista, para estudar o projeto de irrigação do reservatório Malmpuzha na bacia do rio Bharathapuzha na Índia. O modelo tem como função objetivo a maximização da água alocada para as áreas agrícolas e, como restrições o balanço hídrico do reservatório, os volumes máximos e mínimos do reservatório e a demanda de água para a irrigação. A curva área \times volume do reservatório é linearizada por regressão linear simples. É utilizada uma restrição com uma variável inteira (1 – caso o volume de água do reservatório seja maior que o volume máximo, 0 – caso contrário) impedindo que haja volume vertido antes que o volume de água do reservatório atinja o volume máximo. O intervalo de tempo é mensal.

Mousavi et al. (2004) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo, utilizando a programação linear, para a operação do sistema de 6 reservatórios na bacia do rio Karoon-Dez no Irã utilizando programação linear através do método do ponto interior. O modelo tem como função objetivo minimizar o déficit da alocação de água e maximizar a geração de energia hidroelétrica. As restrições do modelo dizem respeito ao balanço hídrico nos reservatórios e nós, os volumes máximos e mínimos dos reservatórios e, as vazões máximas e mínimas dos vertedores e turbinas dos geradores. O volume final de água armazenado no reservatório deve ser igual (ou maior) ao volume inicial. A curva cota \times volume e a relação entre a cota e a vazão da turbina do gerador é linearizada por meio de regressão linear simples. Não considera a evaporação e/ou precipitação no balanço hídrico do reservatório. Os autores utilizaram tanto o método das restrições como o método das ponderações para realizar uma análise multiobjetivo. O intervalo de tempo é mensal com o horizonte de planejamento de 1 ano. Os autores destacam também o uso da programação linear como ferramenta para solução de problemas de otimização de larga escala.

Bessa et al. (2003) desenvolveram um modelo, em programação linear, para a otimização da operação de 2 reservatórios na bacia do rio Iguaçu com o objetivo específico de maximizar a geração de energia hidroelétrica. As restrições do modelo dizem respeito ao balanço hídrico nos reservatórios, os volumes máximos e mínimos dos reservatórios e, as vazões máximas e mínimas dos vertedores e turbinas dos geradores. A energia gerada é relacionada com o volume do reservatório e a vazão de descarga das turbinas por meio de

uma regressão linear múltipla. Não considera a evaporação e/ou precipitação no balanço hídrico do reservatório. O intervalo de tempo é mensal.

Consoli et al. (2008) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em programação não linear, com o intuito de estudar a operação do reservatório Pozzillo que abastece uma área irrigada de 20.000 ha, localizado no leste da Sicília, Itália. O modelo tem como funções objetivo minimizar o déficit hídrico e maximizar receita líquida da área irrigada e, como restrições o balanço hídrico do reservatório, os volumes máximos e mínimos do reservatório e a demanda de água para a irrigação. Não considera o vertimento e a precipitação. O intervalo de tempo é mensal. Os autores aplicaram esta regra para três anos consecutivos não considerados no processo de otimização e constataram a que a técnica reduziu o volume de água alocado comparado com os dados históricos.

Carvalho et al. (2000) desenvolveram um modelo em programação linear com a finalidade de selecionar as culturas e os meses de plantio que proporcionem a maximização da renda do agricultor e da utilização de recursos hídricos no Perímetro Irrigado do Gorutuba. A função objetivo visa maximizar as receitas líquidas mensais em função da área cultivada com as culturas normalmente utilizadas na região, tendo-se como restrição a área irrigável do lote e a quantidade de água disponível.

Vieira et al. (2008) desenvolveram um modelo multiobjetivo para alocar áreas ótimas de culturas agrícolas, utilizando programação linear, cuja função objetivo visa à maximização da receita líquida e da mão-de-obra e a minimização do uso dos defensivos agrícolas, tendo como restrição a área máxima irrigável do perímetro e a quantidade de água disponível. O modelo foi aplicado usando dados climatológicos e de solo do Perímetro Irrigado das Várzeas de Sousa, situada na região semi-árida do Estado da Paraíba. Foi realizada uma análise de sensibilidade, com diferentes cenários de preferências, com o intuito de exprimir a subjetividade do tomador de decisão quanto à importância de cada objetivo.

O modelo AGSW (AMIR; FISHER 1999), do Instituto de Tecnologia de Israel, é um modelo de otimização linear para analisar a produção agrícola considerando a quantidade e o preço da água. A função objetivo visa maximizar a receita líquida (diferença entre a renda total obtida pela atividade agrícola e o preço da água, ambas por unidade de área) em função da área cultivada com as culturas normalmente utilizadas na região, tendo-se como restrição a área total irrigável e a quantidade de água disponível. Os autores aplicaram o modelo em vários distritos localizado no vale do rio Jordão, Israel, considerando os preços da água em função da sazonalidade e da qualidade, obtendo como resultados curva de preço médio da

água em função da quantidade ótima e o coeficiente de elasticidade da demanda de água para cada distrito.

O modelo SAWAS (Salmam et al., 2001), da Faculty of Agriculture, University of Jordan, é uma evolução do modelo AGSW, desenvolvido em programação linear com o intuito de analisar a alocação intersazonal de água para a irrigação em termos de quantidade e qualidade e seus impactos na produção e receita líquida agrícola. A função objetivo continua sendo maximizar a receita líquida, tendo como restrições a área total irrigável e a quantidade de água disponível. Porém, o preço da água é obtido função de sua qualidade para cada estação, considerando o armazenamento e transferência de água de uma estação para outra com seu respectivo custo. Os autores aplicaram o modelo no vale do rio Jordão na Jordânia comparando com os resultados com o do modelo AGSW observando que o SAWAS permite uma maior alocação das áreas agrícolas por causa da possibilidade de armazenamento e transferência de água.

3.4. QUALIDADE DAS ÁGUAS

Em qualquer etapa do ciclo hidrológico a água entra em contato com o meio ambiente e incorpora em sua composição diversos elementos existentes que a definirão qualitativamente. A utilização dos recursos hídricos pelo homem tem gerado modificações nas condições naturais da bacia hidrográfica o que tem provocado alterações na qualidade da água da bacia.

Assim, pode-se dizer que a qualidade da água de uma bacia hidrográfica é resultante de fenômenos naturais (como o escoamento superficial e infiltração no solo decorrente da precipitação atmosférica, que podem incorporar à água sólidos dissolvidos ou em suspensão) e da atuação do homem, quer de forma concentrada, como geração de despejos domésticos ou industriais, ou de forma dispersa, como aplicação de defensivos agrícolas. (VON SPERLING, 2007). Entretanto, a interferência do homem na qualidade da água é tão significativa que esta pode ser definida em função do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica (VON SPERLING, 1996).

3.4.1. POLUIÇÃO HÍDRICA

O principal impacto da interferência humana na qualidade da água é a poluição hídrica. A poluição hídrica decorre da adição de substâncias ou de formas de energia que,

direta ou indiretamente, alteram as características físicas e químicas do corpo d'água de tal maneira que prejudiquem os usos que dele são feitos e/ou afetam as comunidades aquáticas.

Para Firmino (2007) a poluição hídrica possui dois aspectos: o sanitário e o ecológico. Na abordagem sanitária, poluição é considerada como qualquer alteração nas propriedades físicas, químicas e/ou biológicas das águas que afetem diretamente o homem ou o impeça de utilizá-las. No conceito ecológico, poluição é a alteração nas propriedades das águas que provocam ruptura nos ecossistemas naturais, causando ou não danos diretos ao homem ou aos seus usos para a água.

Tucci (2005) classifica as principais fontes de poluição das águas como: atmosférica, pontuais, difusa e mista. As fontes atmosféricas são de efeitos mais globais e influenciam o corpo d'água de acordo com o regime de precipitação. A poluição hídrica pontual refere-se ao lançamento específico e de forma individual e quantificada com padrões bem definidos. A poluição hídrica difusa se dá quando a poluição ocorre de forma não controlada, em termos de quantidade, frequência ou composição. As poluições mistas são aquelas que englobam características de cada uma das fontes anteriormente descritas.

Larentis (2004) classifica as fontes como pontuais caracterizadas por uma descarga concentrada em um ponto bem definido; e não-pontuais ou difusas, decorrentes da deposição atmosférica, do escoamento superficial e subterrâneo e os sistemas de drenagem urbana.

De maneira geral as principais fontes de poluição pontuais são os sistemas de esgoto sanitário urbano não tratado ou parcialmente tratado e a descargas industriais. As atividades agropecuárias, a drenagem urbana e as alterações físicas da bacia (mudança da cobertura do solo, captações de água nos leitos dos rios, construção de barragens, modificações nos cursos dos rios, etc) caracterizam como fontes de poluição não pontuais.

A Figura 3.3 apresenta um exemplo de possíveis inter-relações entre o uso e ocupação do solo e a origem das fontes poluidoras de água.

3.4.2. PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS

A qualidade da água é avaliada através de componentes ou substâncias na água, denominadas de parâmetros, constituintes ou substâncias de qualidade de água, que traduzem as principais características físicas, químicas e biológicas do corpo hídrico. Estes elementos diferenciam as condições da água para diferentes usos e para sua preservação ambiental.

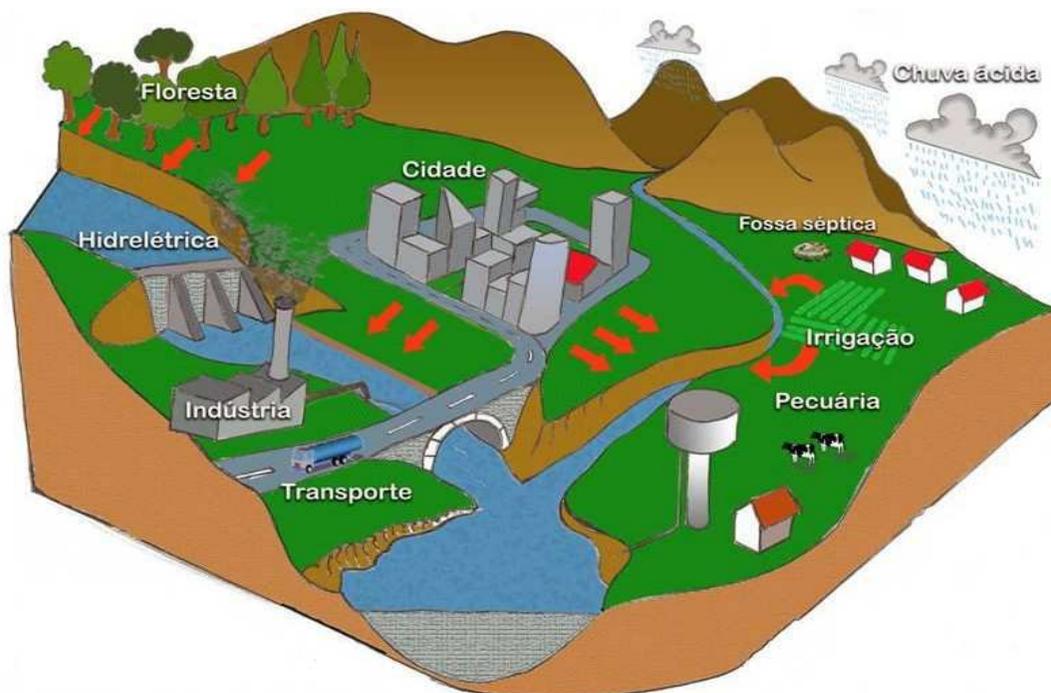


Figura 3.3 – Inter-relação das atividades potencialmente poluidoras em uma bacia. (Fonte: FIRMINO, 2007)

Os parâmetros são classificados em três categorias: físicas, químicas e biológicas (TUCCI, 2005; LARENTIS, 2004; VON SPERLING, 2007). Os parâmetros físicos da água são aqueles que afetam os sentidos humanos, exemplo: temperatura da água, densidade e turbidez. Alguns dos parâmetros químicos são resultados de ciclos e processos que ocorrem na água, exemplo: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio e fósforo. Estes são essenciais no controle dos diferentes usos da água e para preservação ambiental. Os parâmetros biológicos representam os organismos patogênicos, de importante relevância para saúde pública. São exemplos destes: bactérias, vírus, protozoários e vermes.

A seguir são apresentados alguns dos parâmetros mais utilizados na caracterização de corpos receptores (GASTALDINI; MENDONÇA 2003 apud FIRMINO, 2007):

- **DBO:** É uma medida aproximada da quantidade de matéria orgânica biodegradável presente em uma amostra de água. Representa a quantidade de oxigênio necessária para microorganismos presentes na amostra oxidarem a matéria orgânica para uma forma estável inorgânica. A DBO é medida através de um procedimento laboratorial padrão que mede a quantidade de oxigênio consumida após incubação da amostra a uma temperatura

especificada, geralmente 20°C, por específico período de tempo, geralmente de 5 dias. As principais fontes de DBO são os despejos domésticos e industriais, tendo como origem natural a matéria orgânica vegetal e animal e os microorganismos presentes no corpo hídrico.

- **OD:** O oxigênio é essencial para todas as formas de vida aquática, incluindo os organismos responsáveis pela autodepuração em águas naturais. A quantidade de oxigênio presente na água depende da temperatura, salinidade, turbulência, atividade fotossintética de algas e plantas e da pressão atmosférica. A solubilidade do oxigênio diminui com o aumento da temperatura e da salinidade. Em água doce, o oxigênio dissolvido varia de 15 mg/l a 0°C a 8 mg/l a 25°C. O OD pode ser expresso também em percentagem do teor de saturação. O OD varia sazonalmente e dentro do período de 24 horas, de acordo com a temperatura e atividade biológica (fotossíntese e respiração).
- **Coliformes:** As bactérias do grupo coliforme habitam normalmente os intestinos de homens e animais, servindo como indicadoras da contaminação de uma água por fezes. Tendo em vista que a maior parte das doenças associadas com a água é transmitida por via fecal, ou seja, os organismos patogênicos são eliminados pelas fezes, atingem o ambiente aquático e voltam a contaminar as pessoas que se abastecem indevidamente desta água, conclui-se que as bactérias coliformes podem ser usadas como indicadoras desta contaminação.
- **Fósforo:** É um nutriente essencial para organismos vivos e existe na água na forma dissolvida e de material particulado. É geralmente o nutriente limitante para o crescimento de algas. Em águas naturais ocorrem principalmente nas formas de ortofosfatos, polifosfatos e fosfatos organicamente ligados. Fontes naturais de fosfatos são, principalmente, intemperismos de rochas contendo fósforo e decomposição de matéria orgânica. Esgotos, particularmente aqueles contendo detergentes, efluentes industriais e fertilizantes contribuem para aumento da concentração de fósforo em corpos d'água. Altas concentrações de fosfatos são indicativas de presença de poluição e são responsáveis por condições eutróficas. As principais fontes são os despejos domésticos e industriais, excrementos de animais, detergentes e fertilizantes, tendo como origem natural a dissolução de compostos no solo, a decomposição da matéria orgânica e o fósforo de composição celular de microorganismos.
- **Nitrogênio:** É importante elemento químico, pois reações biológicas só podem ocorrer com presença de quantidade de nitrogênio suficiente. Está presente na água em quatro

formas: nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. Água contendo altas concentrações de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal e pequenas concentrações de nitratos e nitritos não pode ser considerada segura devido a recente poluição. Por outro lado, amostra sem nitrogênio orgânico nem nitrogênio amoniacal e com algum nitrato pode ser considerada relativamente segura pelo fato de que a nitrificação já ocorreu e a poluição não é recente. As principais fontes são os despejos domésticos e industriais, excrementos de animais e fertilizantes, tendo como origem natural os constituintes de proteínas e vários outros compostos biológicos e o nitrogênio de composição celular de microorganismos.

No Brasil as características dos corpos hídricos devem estar de acordo com os limites estabelecidos no enquadramento do corpo d'água. Segundo a Resolução do CONAMA nº 357/2005 o enquadramento é definido como o estabelecimento da meta ou objetivo de qualidade da água (classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado e/ou mantido em um segmento de corpo de água, de acordo com os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo.

A referida Resolução dividiu as águas do território nacional em águas doces, salobras e salinas. As águas doces são classificadas em 5 classes (classe especial e 1 a 4); as salobras e salinas em 4 classes (classe especial e 1 a 3), totalizando 13 classes. A cada uma dessas classes corresponde um determinado padrão de qualidade a ser mantida no corpo d'água. Além desses padrões de qualidade dos corpos hídricos a Resolução apresenta, ainda, padrões para o lançamento de efluentes nos corpos hídricos (padrões de descarga ou de emissão). Von Sperling (2007) comenta que ambos os padrões estão relacionados, sendo que o real objetivo de ambos é a preservação da qualidade no corpo d'água.

3.4.3. PROCESSOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS

Um dos grandes desafios da engenharia ambiental para compreensão física e matemática da natureza é conhecer suficientemente os efeitos da associação de duas ou mais substâncias na qualidade da água (FIRMINO, 2007).

Larentis (2004) enfatiza que o entendimento dos mecanismos dos corpos d'água frente às condições de aporte de cargas poluentes, características físicas e morfológicas dos sistemas e variáveis climáticas são determinantes na tentativa de representar os sistemas hídricos através de modelos matemáticos.

Deste modo o processo de transporte e balanço de massa nos corpos d'água e os fenômenos da eutrofização e a autodepuração utilizados na modelagem da qualidade de água serão analisados a seguir.

3.4.3.1. Transporte e balanço de massa

O balanço de massa pode ser entendido como uma descrição quantitativa de todos os materiais que entram, saem e se acumulam em um sistema com limites físicos definidos. É baseado na lei de conservação da massa, isto é, a massa nunca é criada ou destruída.

Sendo assim a quantidade de material acumulado deve ser igual à quantidade de material que entra menos a quantidade que sai mais a quantidade que é gerada menos a quantidade que é consumida. Logo:

$$\text{Acumulação} = \text{Entrada} - \text{Saída} + \text{Produção} - \text{Consumo} \quad (3.20)$$

Matematicamente, a relação da Equação 3.20 pode ser expressa como:

$$\frac{d(V \cdot C)}{dt} = Q_0 \cdot C_0 - Q \cdot C + r_p \cdot V - r_c \cdot V \quad (3.21)$$

sendo C a concentração do composto em um tempo t , C_0 a concentração afluyente do composto, V o volume considerado na mistura, Q_0 a vazão de entrada, Q a vazão de saída, r_p a taxa da reação de produção do composto, r_c a taxa da reação de consumo do composto.

Num sistema hídrico, a concentração dos parâmetros de qualidade de água é alterada devido ao transporte da substância ao longo do tempo e do espaço, estando sujeito a processos físicos (advecção, difusão e dispersão) e bioquímicos e físicos (conversão).

A advecção de uma substância é o transporte resultante do gradiente do escoamento não alterando as características da substância. A difusão refere-se ao movimento da massa devido ao movimento aleatório do líquido ou da mistura. Este transporte causa o espalhamento e a diluição do constituinte ao longo do tempo. A dispersão é o efeito da flutuação turbulenta sobre a concentração (TUCCI, 2005; VON SPERLING, 2007).

3.4.3.2. Autodepuração

Eiger (2003 apud FIRMINO, 2007) define a autodepuração como um mecanismo de origem físico-bioquímica responsável pelo aumento ou diminuição das concentrações de poluentes descartadas em corpos d'água.

A quantificação e a compreensão do fenômeno de autodepuração são de extrema importância, principalmente quando se busca controlar o lançamento de cargas de efluentes que estejam acima da capacidade de assimilação do corpo hídrico (VON SPERLING, 1996).

Von Sperling (2007) afirma que a autodepuração está vinculada ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após alterações induzidas pelos despejos afluentes. Tem-se que o ecossistema de um corpo d'água antes do lançamento de despejos encontra-se usualmente em estado de equilíbrio. Após a entrada da carga poluidora, o equilíbrio entre as comunidades é afetado, resultando numa desorganização inicial, seguida por uma tendência posterior na reorganização. Neste sentido, a autodepuração pode ser entendida como um fenômeno de sucessão ecológica, com uma seqüência sistemática de substituições de uma comunidade por outra, até que uma comunidade estável se estabeleça em equilíbrio com as condições locais.

A autodepuração é decorrente da associação de vários processos de natureza física (diluição, sedimentação e reaeração atmosférica), química e biológica (oxidação e decomposição) havendo um balanço entre as fontes de consumo e de produção de oxigênio.

Em um curso d'água que recebe esgotos podem ser identificadas quatro zonas de autodepuração: zona de águas limpas, zona de degradação, zona de decomposição ativa, zona de recuperação (Figura 3.4). Cada zona apresenta características distintas habitadas por comunidades aquáticas próprias como descrito a seguir:

- Zona de águas limpas - localizada em região a montante do lançamento do efluente (caso não exista poluição anterior) e também após a zona de recuperação. Essa região é caracterizada pela elevada concentração de oxigênio dissolvido e vida aquática superior;
- Zona de degradação - localizada a jusante do ponto de lançamento, sendo caracterizada por uma diminuição inicial na concentração de oxigênio dissolvido e presença de organismos mais resistentes;
- Zona de decomposição ativa - região onde a concentração de oxigênio dissolvido atinge o valor mínimo e a vida aquática é predominada por bactérias e fungos (anaeróbicos);

- Zona de recuperação - região onde se inicia a etapa de restabelecimento do equilíbrio anterior à poluição, com presença de vida aquática superior.

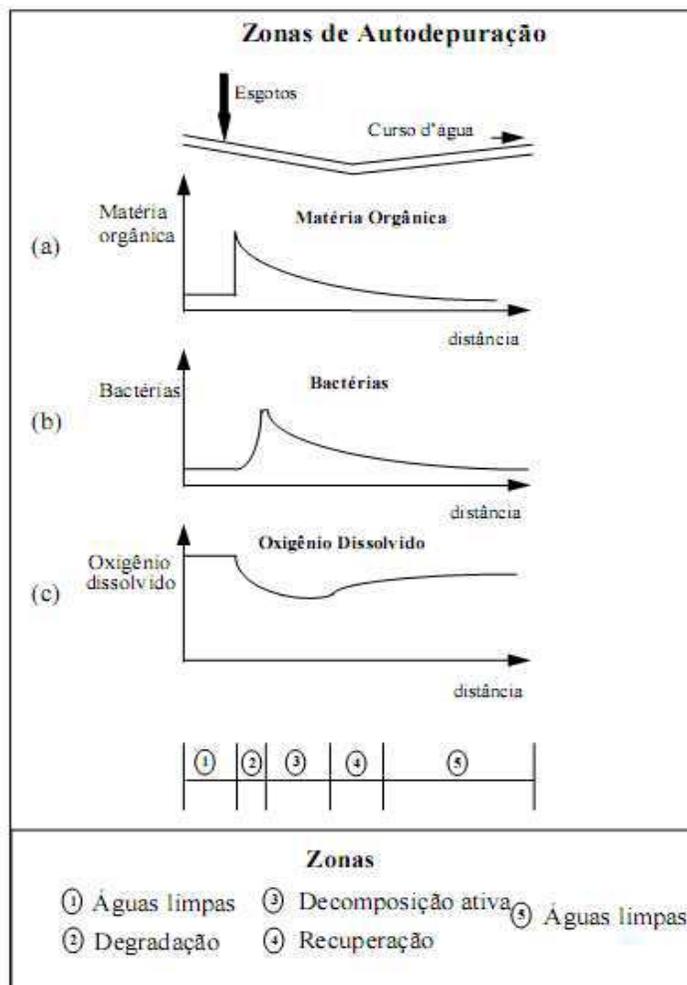


Figura 3.4 – Perfil esquemático da concentração de (a) matéria orgânica, (b) bactérias decompositoras e (c) oxigênio dissolvido ao longo do percurso no curso d'água. (Fonte: VON SPERLING, 2007)

3.4.3.3. Eutrofização

Fenômeno causado pelo excesso de nutrientes num corpo de água, o que leva à proliferação excessiva de algas, que, ao entrarem em decomposição, levam ao aumento do número de microorganismos e a consequente deterioração da qualidade da água. Os principais nutrientes que provocam o crescimento excessivo das plantas aquáticas são o nitrogênio e o fósforo. Em alguns casos a disponibilidade de nutrientes é tão grande que os organismos vegetais chegam a cobrir completamente o espelho d'água de lagos e represas.

Em rios, a eutrofização é menos freqüente devido as altas velocidades, ou seja, baixo tempo de residência (tempo de permanência do corpo d'água “armazenado”), e a elevada turbidez, que formam condições desfavoráveis ao crescimento de plantas aquáticas. Este fenômeno ocorre com maior intensidade nos lagos, principalmente em função do elevado período de residência da água, o qual proporciona tempo suficiente para o crescimento das plantas aquáticas, notadamente algas e macrófitas (plantas aquáticas superiores).

A eutrofização pode ser classificada, em função de seu estado trófico, como: oligotróficos (poucos nutrientes), mesotrófico (médios nutrientes) e eutrófico (muitos nutrientes).

A variação da ocupação do solo em meios urbanos causa mudança no estado trófico em reservatórios, principalmente devido ao assoreamento, drenagem pluvial urbana e esgotos. Em bacias rurais o processo de eutrofização se dá, principalmente, por sistemas agrícolas intensivos e a pecuária (MERTEN; MINELLA 2002 apud FIRMINO, 2007).

A Figura 3.5 ilustra a possível evolução do processo de eutrofização em um corpo d'água, como um lago ou represa. O nível de eutrofização está usualmente associado ao uso e ocupação do solo predominante na bacia hidrográfica.

3.4.4. MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA

Segundo Tucci (2005) a escolha de um modelo matemático, para simular as condições de qualidade da água num sistema de rios e reservatórios, depende das características do sistema a ser simulado; do nível de precisão desejado em função dos objetivos do projeto, dos dados disponíveis sobre o sistema e da disponibilidade de metodologia para representar os processos identificados.

Firmino (2007) comenta que as principais características a serem consideradas na escolha de um modelo de qualidade das águas são: tipo do corpo d'água, escala espacial, escala temporal e parâmetros de qualidade das águas disponíveis.

Os tipos de corpos d'água considerados na modelagem são: lagos e reservatórios, rios e canais, e estuários e sistemas costeiros (PEREIRA, 2004 apud FIRMINO, 2007).

Quanto à escala temporal, os modelos podem ser permanentes (desconsideram a variação no tempo para as variáveis envolvidas) e não permanentes (permite a análise no decorrer do tempo). Os modelos em regime permanente podem ser uniformes (quando considera a velocidade, vazão ou volume constante no corpo d'água) e não uniformes (TUCCI, 2005).

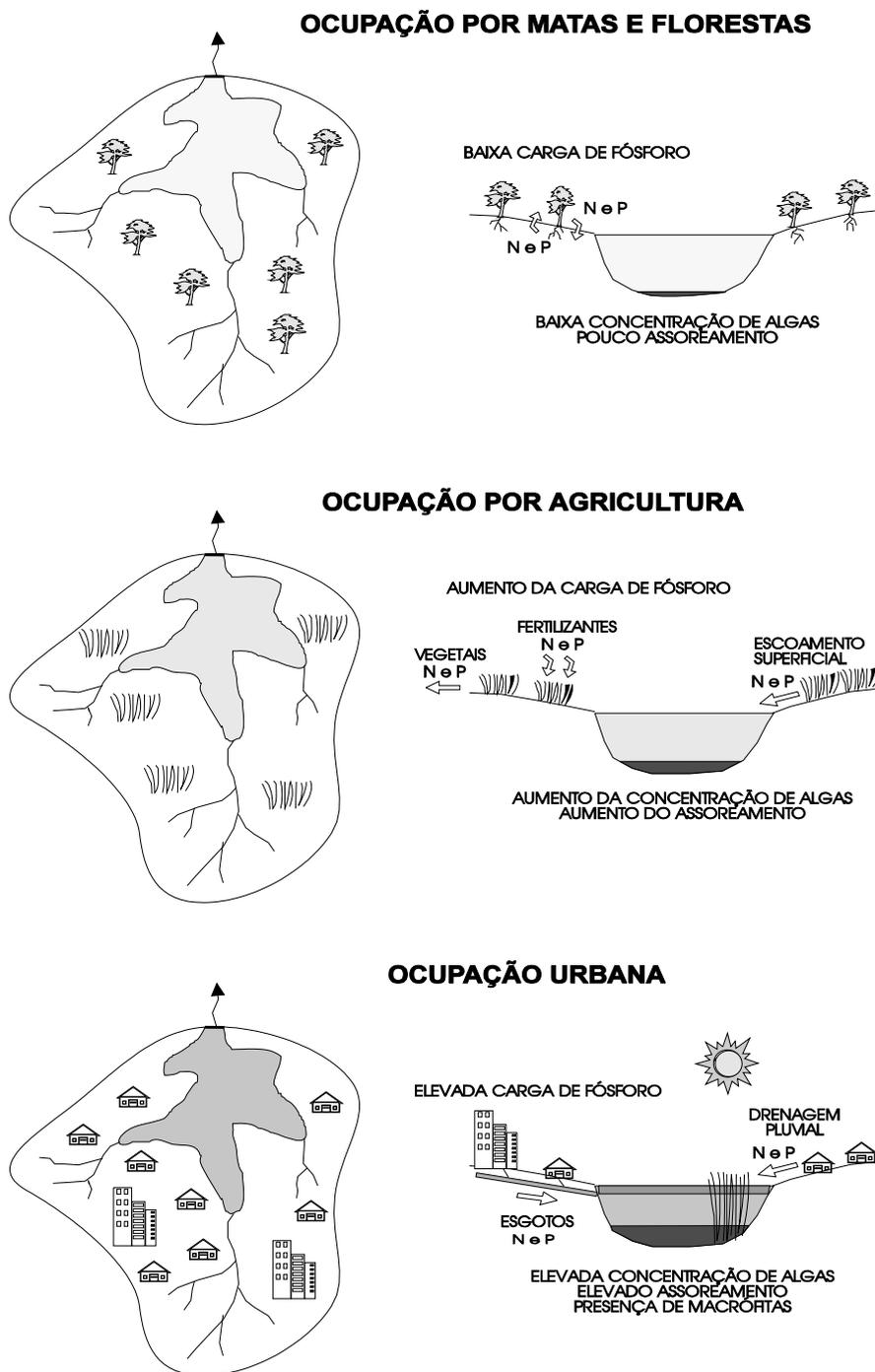


Figura 3.5 - Evolução do processo de eutrofização em um lago. (Fonte: VON SPERLING, 1996)

Quanto à escala espacial os modelos para reservatórios são classificados em (TUCCI, 2005):

- Concentrado: considerar o reservatório totalmente misturado, portanto não analisa a variabilidade espacial da concentração no reservatório;
- Unidimensional: simulam os processos considerando apenas uma dimensão do espaço, podendo ser unidimensional vertical para reservatórios profundo e unidimensional longitudinal para reservatórios rasos;
- Bidimensional: simulam os fenômenos desprezando uma das direções, podem ser bidimensional no plano ou bidimensional no perfil;
- Tridimensionais: representam todas as direções do espaço.

Para os rios os modelos são classificados como: Unidimensionais (consideram uma velocidade e concentração média na seção) e Bidimensionais (utilizando quando a variação da densidade é marcante).

Os parâmetros de qualidade de água podem ser (TUCCI, 2005): conservativos (não mudam devido a reações químicas e biológicas internas, como sal e outros cloridos) e não-conservativos (reagem por processos químicos e biológicos internos, modificando sua concentração, como a DBO e o OD).

A representação dos processos na modelagem dos corpos d'água depende ainda das condições hidráulicas do meio. De acordo com Von Sperling (2007), há basicamente três tipos de regimes hidráulicos para os corpos hídricos (Figura 3.6): fluxo em pistão (dispersão nula), mistura completa (dispersão infinita) e fluxo disperso. Num corpo d'água em regime de fluxo em pistão não há intercâmbios entre as seções de montante e jusante, ou seja, não há dispersão longitudinal e o transporte das substâncias dá-se inteiramente pela advecção. No regime de mistura completa todos os elementos que adentram o reator são instantânea e totalmente dispersos, assim a concentração de qualquer componente é a mesma em qualquer ponto da massa líquida. Na prática os corpos d'água apresentam características intermediárias entre os dois regimes (fluxo disperso).

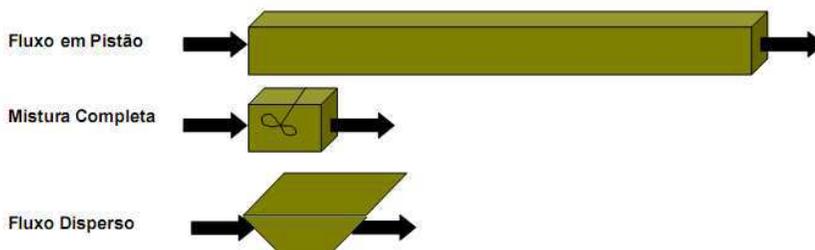


Figura 3.6 – Representação hidráulica dos corpos hídricos. (Fonte: SANTOS, 2001 apud NUNES, 2008).

Von Sperling (2007) cita que os modelos de qualidade das águas de rios vêm sendo utilizados desde o desenvolvimento do modelo clássico de Streeter e Phelps, em 1925. O modelo considera o escoamento permanente e uniforme e simula, ao longo do curso do rio, as concentrações dos parâmetros DBO e OD.

Um dos modelos de qualidade de água em rios bastante utilizado é o modelo QUAL2E (BROWN; BARNWELL 1987). O modelo possibilita a simulação, em regime permanente e não-uniforme com fluxo unidirecional, vários parâmetros de qualidade de água como o OD, DBO, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes entre outros.

O modelo de simulação WATERWARE desenvolvido por Jamieson e Fedra (1996 apud WURBS, 2005) permite avaliar a concentração inicial de oxigênio dissolvido e da DBO e a análise do decaimento de outros poluentes, estimando o valor máximo, mínimo e a média dos parâmetros utilizados a partir de um nó de controle.

Larentis et al. (2008) desenvolveram o modelo IPH-MGBq, modelo hidrológico e de qualidade de água que permite a simulação de intervenção em bacias de grande porte. O modelo permite, a partir de dados de precipitação, o cálculo e a representação da variabilidade temporal da vazão e da concentração de OD, DBO, nitrogênio, fósforo totais e coliformes fecais ao longo da rede de drenagem.

O AcquaNet é um modelo baseado em técnicas de redes de fluxo que engloba o gerenciamento de quantidade e qualidade de água. Tais aspectos podem trabalhar isoladamente ou de forma integrada, dependendo das necessidades do usuário (TEIXEIRA; PORTO 2008). O modelo de qualidade de água pode ser utilizado em rios, considerando lançamentos pontuais, tais como a entrada de efluentes industriais e a descarga de esgotos domésticos, podendo simular as concentrações de DBO, OD, Coliformes Totais, Fósforo Total, Algas, Nitrogênio Orgânico, Amônia, Nitrito e Nitrato. No processo de modelagem, os rios estão sendo considerados como escoamentos unidimensionais e estão sujeitos, principalmente, aos fenômenos de conservação de massa e de reações cinéticas. O rio pode ser dividido em trechos que deverá apresentar parâmetros constantes, tais como: área da seção, declividade, velocidade, vazão, altura média da lâmina d'água, entre outros.

Firmino (2007) desenvolveu o modelo o META-F: Modelo de Enquadramento Tático das Águas Fluviais para alocação ótima da qualidade e da quantidade da água em nível mensal via programação linear seqüencial, onde a função objetivo visa à satisfação de metas de atendimento às demandas e de enquadramento de águas fluviais e as restrições representam as limitações físicas e operacionais dos componentes hidráulicos do sistema de recursos

hídricos. As não-linearidades intrínsecas aos processos de cada um de seus componentes foram implementadas através de um procedimento iterativo, fazendo uso de aproximações lineares.

Outros modelos de qualidade de água utilizados e suas principais características podem ser observados nos trabalhos de Firmino (2007), Souza (2006), Albano (2004), Wurbs (2005) e Von Sperling (2007).

3.5. INDICADORES DE DESEMPENHO

O grau de atendimento das demandas de um sistema pode ser avaliado pelos seguintes indicadores: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Tais índices foram propostos por Hashimoto et al. (1982) e fornecem meios de avaliar os efeitos das várias regras de operação, além de auxiliar na avaliação de futuros projetos a serem implantados (VIANNA; LANNA 2002).

Seja $D_{t,i}$ a i -ésima demanda do sistema e $Q_{t,i}$ os volumes fornecidos para o atendimento da demanda $D_{t,i}$ no horizonte de $t = 1, \dots, NT$. Separam-se os valores satisfatórios S dos insatisfatórios I de modo que uma falha ocorra quando $Q_{t,i} < D_{t,i}$. Seja NF_i o número total de intervalos de tempo no qual $Q_{t,i} < D_{t,i}$ e seja $d_{i,j}$ a duração j -ésimo evento de falhas, $j = 1, \dots, M_i$, sendo M_i é o número de eventos insatisfatórios da i -ésima demanda do sistema (Figura 3.8).

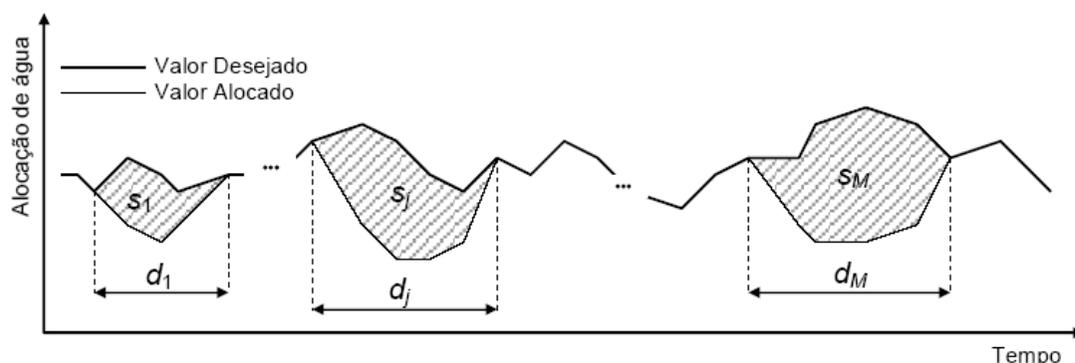


Figura 3.7 – Duração e volumes de déficit em períodos de falha

A Confiabilidade ($Conf_i$) da demanda i do sistema é a probabilidade da série temporal permanecer em estado satisfatório S durante o horizonte de operação, ou seja, a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas:

$$\text{Conf}_i = \text{Prob}\{Q_{t,i} \in S\} = \text{Prob}\{Q_{t,i} \geq D_{t,i}\} = 1 - \frac{\text{NF}_i}{\text{NT}} \quad (3.22)$$

A Resiliência avalia a média do quão rapidamente o sistema retorna a um estado satisfatório de atendimento a demanda, uma vez que a falha tenha ocorrido. A Resiliência (Res_i) da demanda i do sistema é a probabilidade de haver um estado satisfatório no período $t+1$ dado um valor insatisfatório no período t :

$$\text{Res}_i = \text{Prob}\{Q_{t+1,i} \in S \mid Q_{t,i} \in I\} = \text{Prob}\{Q_{t+1,i} \geq D_{t+1,i} \mid Q_{t,i} < D_{t,i}\} \quad (3.23)$$

A resiliência, também, é definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em estado insatisfatório.

$$\text{Res}_i = \frac{1}{E(d_{i,j})} = \left[\frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_{i,1}} d_{i,j} \right]^{-1} \quad (3.24)$$

Um sistema que tenha muitas falhas, mas tende a se recuperar rapidamente é, em alguns casos, preferível a um sistema com poucas falhas, mas o qual as se recuperem lentamente (VIANNA; LANNA 2002).

A Vulnerabilidade (Vul_i) da demanda i do sistema mede a magnitude das falhas a que o sistema esta sujeito. Ela pode ser definida como a média do percentual de déficits do conjunto de todos os valores insatisfatórios.

$$\text{Vul}_i = \frac{1}{\text{NF}_i} \sum_{t=1}^{\text{NT}} \left| \frac{D_{t,i} - Q_{t,i}}{D_{t,i}} \right| \quad (3.25)$$

4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

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

Lima (2004) afirma que fatores como a configuração do sistema a ser analisado (número de reservatórios e suas interligações), os tipos de uso dos recursos hídricos do sistema, o estágio de aplicação (diagnóstico e planejamento) e os cenários (padrão de afluência, operação do sistema, prioridades de atendimento das demandas, volumes meta dos reservatórios, etc) influenciam na escolha da metodologia a ser adotada.

Dentre as técnicas de otimização a Programação Linear (PL) merece destaque por determinar o ótimo global, se ele existir, não necessitar de uma política inicial de operação, além de ser uma técnica bem estabelecida para a qual há diversos softwares disponíveis, sendo que várias não linearidades dos processos e componentes dos sistemas de recursos hídricos podem ser superadas por artifícios de linearização.

Entretanto, a maioria das metodologias de linearização existentes (BARBOSA, 2002; LANNA, 1998) apenas linearizam a função objetivo do modelo. Sendo que, normalmente, as não-linearidades intrínsecas aos processos de cada componente, representadas nas equações de restrição do modelo, como as curvas cota-área-volume, por exemplo, não são consideradas no modelo (HSU et al., 2008; MOUSAVI et al., 2004) ou linearizadas com o uso de regressão linear simples (SUDHA et al., 2008; DIAS et al., 2000).

Além do mais, muitos modelos utilizam apenas uma função objetivo (SUDHA et al., 2008; AHMED; SARMA 2005; CURI et al., 2004) para analisar o sistema, não contemplando, simultaneamente, diferentes formas de avaliação do uso dos recursos hídricos durante um processo decisório.

Tem-se, também, que a grande maioria dos modelos de qualidade de água, como o QUAL2E (BROWN; BARNWELL 1987), IPH-MGBq (LARENTIS et al., 2008), ALOC SERVER (RODRIGUES; SILVA 2007), Acquanet (PORTO et al., 2005), entre outros, apenas simulam os processos de qualidade água para avaliar o comportamento e os impactos ambientais no sistema. Estes não permitem, assim, alocar de forma ótima os recursos hídricos do sistema e nem efetuar análises otimizadas no processo de planejamento dos recursos hídricos.

Muitos dos modelos utilizados na análise de sistema de recursos hídricos focalizam apenas ou em aspectos quantitativos ou em aspectos qualitativos. Sendo que, grande parte dos modelos quantitativos simplesmente despreza os aspectos de qualidade de água, pouco contribuindo para proteção ou melhora da qualidade da água e para a manutenção de vazões mínimas necessárias para a sustentabilidade do habitat aquático e de espécies, preservação dos mangues e fluxos de água doce nas baías e nos estuários.

Muitos dos modelos de qualidade de água, como o QUAL2E ((BROWN; BARNWELL 1987), ALOC SERVER (RODRIGUES; SILVA 2007) utilizam uma vazão de referência constante ao longo do tempo para determinar as concentrações dos parâmetros de qualidade de água não avaliando como as mudanças hidrológicas afetam os processos de qualidade de água.

Larentis et al. (2008) destaca que na avaliação da qualidade de água é necessário integrar o modelo quantitativo com a representação das fontes de poluição, seu transporte nos rios e reservatórios para representar os efeitos integradas ou sinérgicos dos impactos sobre a qualidade da água dos rios e reservatórios. Brites (2010) ressalta a necessidade da integração de modelos de quantidade com modelos de qualidade de água, uma vez que estes aspectos são indissociáveis e devido aos problemas de disponibilidade de água em quantidade e qualidade necessária para atender os usos desejados.

Entretanto, em muitos modelos, como o Acquanet (PORTO et al., 2005), IPH-MGBq (LARENTIS et al., 2008), entre outros, essa integração é realizada de forma indireta, ou seja, primeiramente realizam a alocação quantitativa e com base nesse dados determinam as concentrações dos parâmetros de qualidade, não interligando diretamente os aspectos quali-quantitativos. Não é possível, assim, otimizar a alocação da água em diferentes cenários de desenvolvimento na bacia e, ainda, manter as concentrações dos parâmetros de qualidade das águas dentro de determinado limite ou violar esse quando as condições operacionais não forem apropriadas.

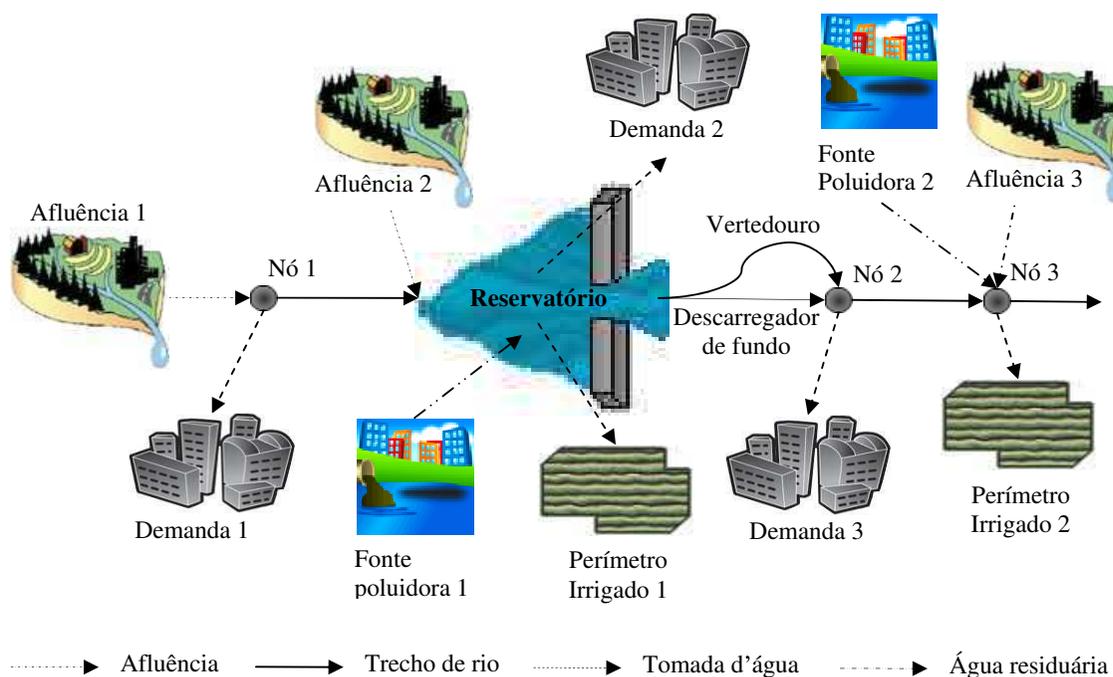
Firmino (2007) comenta que para incluir a otimização nos processos de planejamento envolvendo, implicitamente, aspectos quali-quantitativos da água se faz necessário dispor de formas de modelagem matemática apropriadas para tratamento das funções objetivo e das equações de restrições não-separáveis e não lineares do modelo.

Contudo, este trabalho apresenta um modelo de otimização quali-quantitativo, utilizando Programação Linear, a nível mensal, destinado a otimizar os múltiplos usos dos sistemas de recursos hídricos, através de uma análise multiobjetivo, com a operação integrada de sistemas de reservatórios, a implantação ou melhoramento da operação de um ou mais

perímetros ou áreas irrigadas, e a análise das concentrações dos parâmetros de qualidade de água DBO e OD nos reservatórios e nas seções dos trechos dos rios.

As não-linearidades das funções objetivo e dos processos representados em cada restrição foram implementadas através do uso combinado de técnicas matemáticas de linearizações, denominadas Artifício de Linearização por Segmentos (LANNA, 1998), Programação Linear Seqüencial ou Sucessiva (BARBOSA, 2002) e Método de Programação por Aproximações (GRIFFITH; STEWART 1961 apud CIRILO, 2002).

A representação do sistema estudado (Figura 4.1) é constituída por elementos artificiais – nós e links – e naturais, descritos a seguir:



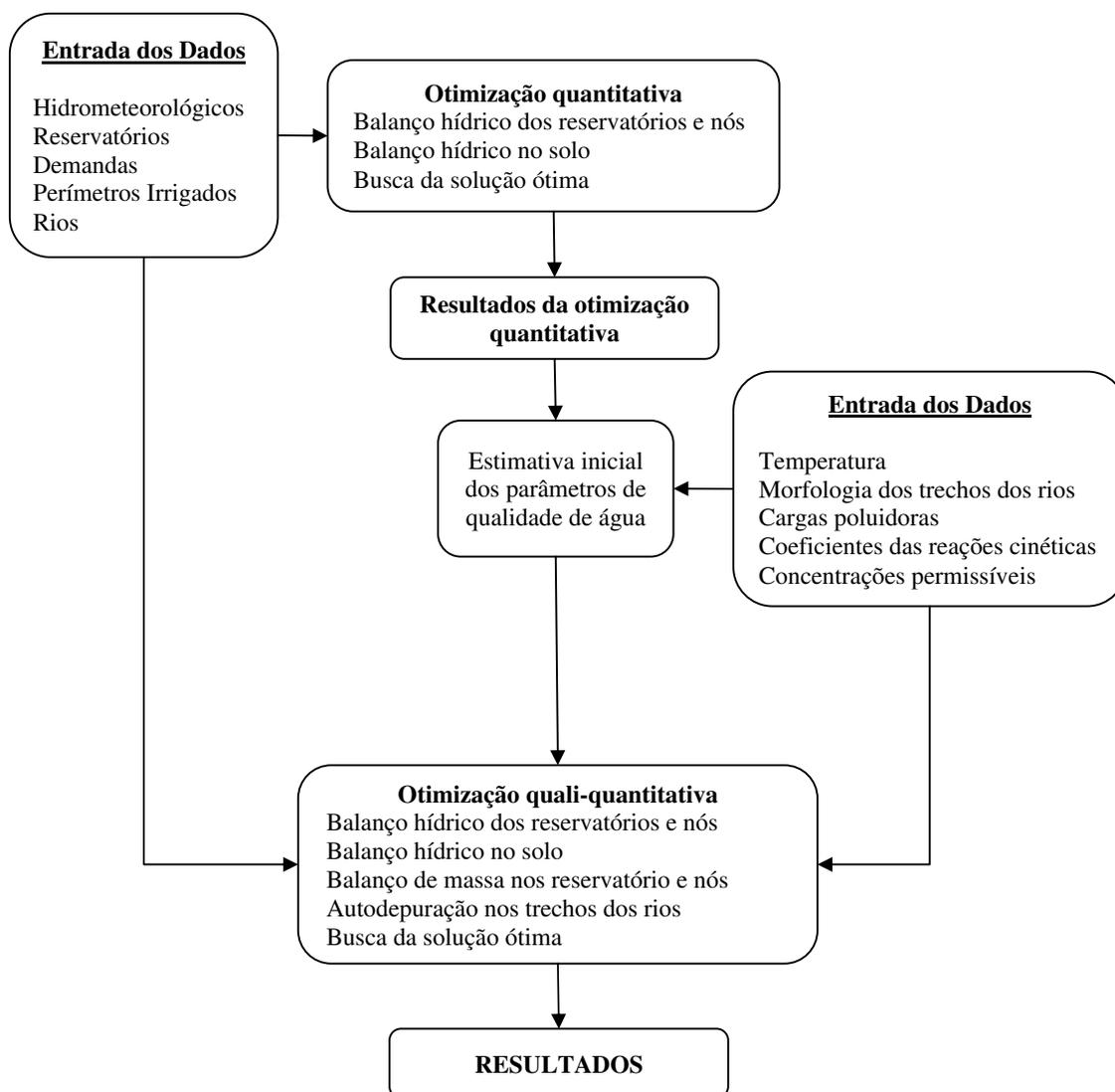
Figuras 4.1 – Componentes para representação do sistema de recursos hídricos.

- **Nó:** elemento artificial onde se interligam dois ou mais elementos do sistema. Pode ser uma seção do trecho do rio onde se pretende estudar algum parâmetro de qualidade de água ou o valor da vazão regularizada.
- **Link:** elemento artificial utilizado para representar o transporte de água e massa entre os elementos do sistema. Pode ser um trecho do rio, canal, adutora ou uma tomada d'água (estrutura hidráulica para derivar água para atender alguma demanda hídrica, cuja vazão é independente da altura da coluna d'água na fonte).

- Afluência: representa entrada de vazão ao sistema, com certa concentração de determinado parâmetro de qualidade de água (DBO, OD, etc.), proveniente de uma alguma fonte hídrica (sub-bacia, por exemplo). Pode estar conectado a um nó ou a um reservatório.
- Reservatório: elemento destinado a armazenar água. Ele está conectado a uma afluência, a um vertedouro e/ou a um descarregador de fundo, ou a tomadas d'água.
- Vertedouro: estrutura artificial, conectado ao reservatório e a um nó do sistema, com a finalidade de conduzir, de forma segura, o excesso de água armazenado no reservatório.
- Descarregador de fundo: elemento utilizado para descarga de água de um reservatório, cuja vazão máxima é controlada pela diferença entre o nível de água no reservatório e no leito do rio localizado em sua saída. Está conectado ao reservatório e a um nó do sistema.
- Demanda: quantidade de água requerida por determinado usuário do sistema. Pode ser conectado a um nó ou a um reservatório.
- Perímetro ou área irrigada: área destinada ao cultivo de culturas agrícolas com infraestrutura e procedimentos capazes de permitir a aplicação da água nas culturas agrícolas. Pode se conectar a um nó ou a um reservatório.
- Fonte poluidora: elemento que representa qualquer despejo ou resíduo líquido, proveniente de atividade humana, com potencialidade de causar poluição. Pode ser conectado a um nó ou a um reservatório.

O modelo desenvolvido é estruturado basicamente em duas etapas: a primeira etapa realiza a otimização dos múltiplos usos dos recursos hídricos do sistema sem considerar a concentração dos parâmetros de qualidade de água, denominada *otimização quantitativa*. Os resultados dessa etapa são utilizados como passo inicial na estimativa de algumas variáveis de decisão da etapa seguinte denominada *otimização quali-quantitativa* que realiza a otimização dos múltiplos usos dos recursos hídricos do sistema considerando a concentração dos parâmetros de qualidade de água.

A Figura 4.2 apresenta um esquema da estrutura do modelo, relacionando os modelos de otimização quantitativa e quali-quantitativa.



Figuras 4.2 – Esquema geral da estrutura do modelo de otimização.

As duas etapas do modelo são baseadas em Programação Linear utilizando o Toolbox Optimization do software MATLAB 6.5 com o Método do Ponto Interior para a busca da solução ótima. A função objetivo é uma combinação linear das (múltiplas) funções objetivo do problema, ou seja, utilizando o Método das Ponderações (BRAGA; GOBETTI 2002) cada função objetivo é normalizada sendo atribuídos pesos às funções para definir suas prioridades de atendimento.

Tais funções estão sujeitas a inúmeras restrições, representadas por equações de natureza linear e não linear, que traduzem, a nível mensal, as limitações físicas dos reservatórios, perímetros ou áreas irrigadas e equipamentos hidráulicos, as limitações

hidrológicas, ambientais, econômicas, sociais e legais, inerentes aos sistemas de usos múltiplos. As variáveis do modelo e as equações que regem o seu comportamento estão relacionadas com as informações obtidas dos elementos naturais (como aspectos hidroclimáticos, hidroagrícolas, ambientais, etc.) e da infraestrutura (demandas hídras, das características físicas dos componentes hidráulicos das estruturas de armazenamento e transporte de água) identificadas no sistema hídrico em estudo. A dinâmica de operação do reservatório e dos nós é fundamentada na equação do balanço hídrico. A demanda hídrica de cada perímetro ou área irrigada é determinada com base na necessidade suplementar líquida de irrigação, estabelecidas através do balanço hídrico no solo para as culturas agrícolas selecionadas, estando a área a ser plantada limitada pela disponibilidade de água e solo, além da sua prioridade de atendimento. São considerados os diferentes tipos de sistemas de irrigação, suas necessidades de altura manométrica, a área a ser irrigada por cada tipo de cultura agrícola, preço da água, os aspectos econômicos e a combinação ou variação nas fontes de bombeamento e a quantidade de água captada. As concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nos nós do sistema obedecem à equação do balanço de massa, e a limitações de ordem física e legal. Ao longo do trecho do rio é considerado o processo de autodepuração das concentrações dos parâmetros de qualidade de água através da equação de transporte de massa.

As equações matemáticas representativas das funções objetivo e restrições serão abordadas na seqüência.

4.2. OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVA

4.2.1. FUNÇÕES OBJETIVO

O modelo de otimização quantitativo apresenta 5 (cinco) funções objetivo, que serão tratadas a seguir.

A Equação 4.1 representa a função objetivo destinada à minimização do déficit do atendimento das demandas nas tomadas d'água dos reservatórios e dos nós do sistema.

$$DTD_d = \sum_t \left(\frac{Dt_{d,t} - Qt_{d,t}}{Dt_{d,t}} \right)^2 \quad (4.1)$$

sendo d a d -ézima tomada d'água do sistema; $D_{d,t}$ a demanda requerida na tomada d'água d no mês t ; e $Q_{d,t}$ o volume mensal destinado ao atendimento da demanda na tomada d'água d no mês t ($Q_{d,t} \leq D_{d,t}$).

Para que a Equação 4.1 possa ser utilizada em PL, optou-se por linearizá-la através do Artifício de Linearização por Segmentos, dividindo volume mensal destinado ao atendimento da demanda na tomada d'água, no mês t , em 4 segmentos iguais, como mostra a Figura 4.3.

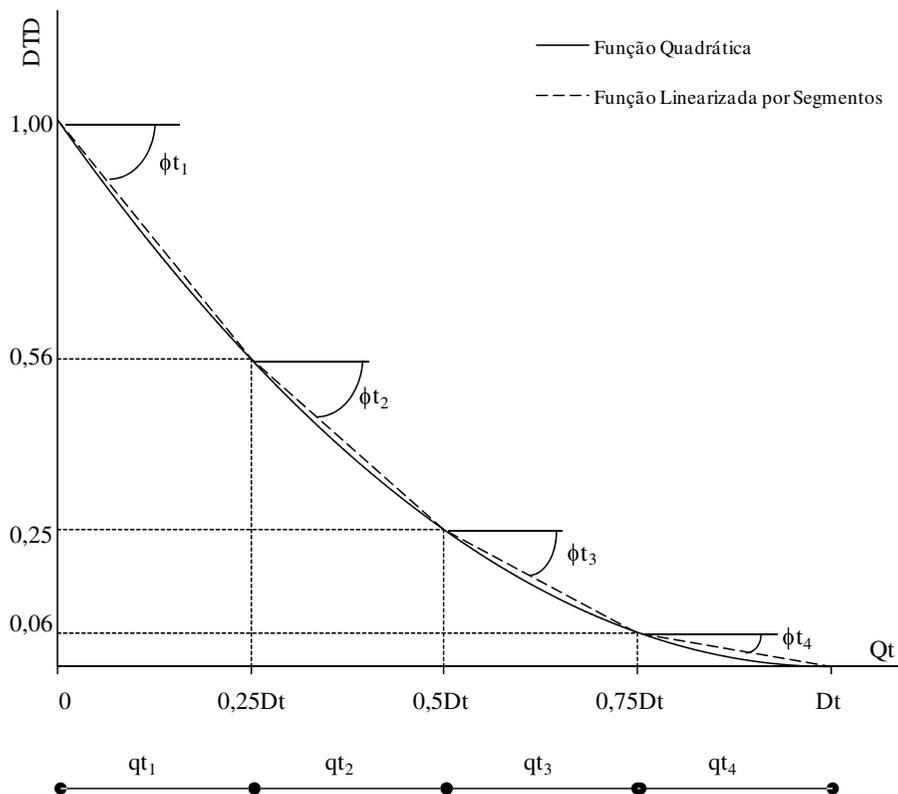


Figura 4.3 – Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da demanda de uma tomada d'água d para um mês t .

Assim a função objetivo quadrática linearizada e o volume mensal destinado ao atendimento das tomadas d'água do sistema são representados por:

$$\left(\frac{D_{d,t} - Q_{d,t}}{D_{d,t}} \right)^2 = 1 + \sum_{q=1}^4 \phi_{d,q,t} \cdot q_{d,q,t} \quad (4.2)$$

$$Qt_{d,t} = \sum_{q=1}^4 qt_{d,q,t} \quad (4.3)$$

sendo q os segmentos de volumes mensais destinados ao atendimento da demanda na tomada d'água d no mês t , $q = 1, \dots, 4$; $\phi_{t,d,q,t}$ a declividade do segmento de reta q da função objetivo destinada ao atendimento da demanda na tomada d'água d no mês t ; $qt_{d,q,t}$ o incremento do volume mensal destinado ao atendimento da demanda na tomada d'água d do trecho segmentado q , no mês t , limitado por:

$$0 \leq qt_{d,q,t} \leq 0,25 \cdot Dt_{d,t} \quad (4.4)$$

O volume mensal defluente dos reservatórios permite a perenização ou regularização da vazão a jusante, assim como o atendimento das demandas ecológicas ou outros usos da água. A Equação 4.5 representa a função objetivo que se destina a minimizar o déficit entre o volume defluente liberado pelo reservatório r no mês t ($Qe_{r,t}$) e a demanda mínima a ser mantida a jusante do reservatório r no mês t ($De_{r,t}$):

$$VE_r = \begin{cases} \sum_t \left(\frac{De_{r,t} - Qe_{r,t}}{De_{r,t}} \right)^2 & \text{se } Qe_{r,t} \leq De_{r,t} \\ 0 & \text{se } Qe_{r,t} > De_{r,t} \end{cases} \quad (4.5)$$

A linearização da Equação 4.5 procedeu-se de maneira análoga a Equação 4.1, como mostra a Figura 4.4. Assim a função objetivo quadrática e o volume defluente liberado pelo reservatório são representados por:

$$\left(\frac{De_{r,t} - Qe_{r,t}}{De_{r,t}} \right)^2 = 1 + \sum_{p=1}^4 \phi_{e_{r,p}} \cdot qe_{r,p,t} \quad (4.6)$$

$$Qe_{r,t} = \sum_{p=1}^5 qe_{r,p,t} \quad (4.7)$$

sendo p os segmentos de volumes defluentes liberado pelo reservatório r no mês t , $p = 1, \dots, 5$; $\phi_{e_r,p}$ a declividade do segmento de reta p da função objetivo destinada ao atendimento da demanda mínima a ser mantida a jusante do reservatório r no mês t ; $q_{e_r,p,t}$ o incremento do volume mensal destinado ao atendimento da demanda mínima a ser mantida a jusante do reservatório r no mês t limitado por:

$$0 \leq q_{e_r,p,t} \leq \begin{cases} 0,25De_{r,t} & \text{se } p \leq 4 \\ Q_{\text{max}_r} - De_{r,t} & \text{se } p = 5 \end{cases} \quad (4.8)$$

sendo Q_{max_r} volume defluente máximo liberado pelo reservatório r no mês t

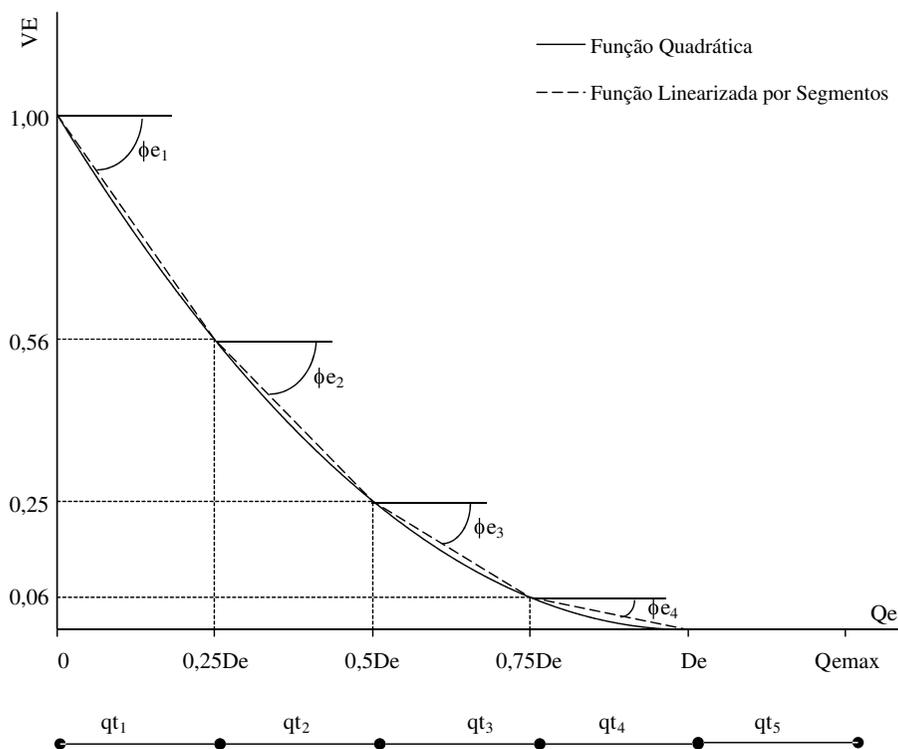


Figura 4.4 – Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da demanda mínima a ser mantida a jusante de um reservatório r para um mês t .

O volume meta se destina a manter o volume de água do reservatório em certo nível para atender certas demandas, como controle de cheias, recreação, piscicultura, ou geração de energia elétrica. O modelo tem como objetivo minimizar o déficit entre o volume de água do reservatório r no final do mês t ($VR_{r,t}$) e o volume meta estabelecido neste mês ($VR_{\text{meta},r,t}$), representada na Equação 4.9:

$$VM_r = \sum_t \left(\frac{VR_{meta_{r,t}} - VR_{r,t}}{VR_{meta_{r,t}}} \right)^2 \quad (4.9)$$

Logo a Equação 4.9 é linearizada através do Artífício de Linearização por Segmentos. Um possível exemplo de linearização da Equação 4.9 é mostrado na Figura 4.5.

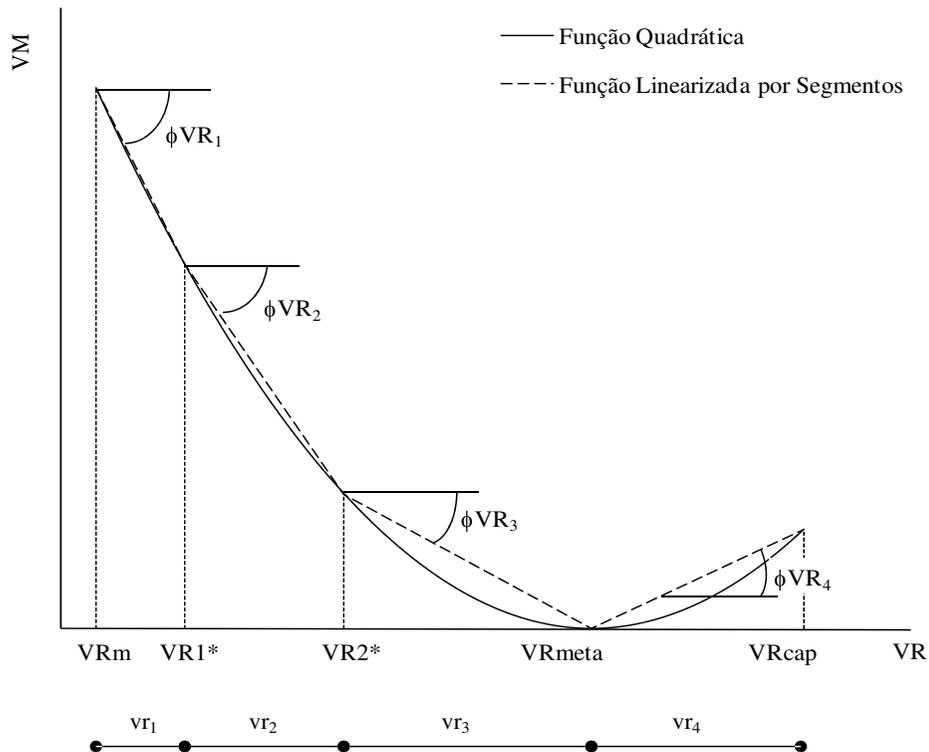


Figura 4.5 – Exemplo de um gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos do volume meta de um reservatório r para um mês t.

Assim a função objetivo quadrática para o volume meta e o volume de água do reservatório r, em um dado mês t, é representada por:

$$\left(\frac{VR_{meta_{r,t}} - VR_{r,t}}{VR_{meta_{r,t}}} \right)^2 = \left(\frac{VR_{meta_{r,t}} - VR_{m_r}}{VR_{meta_{r,t}}} \right)^2 + \sum_{m=1}^{nm} \phi VR_{r,m,t} \cdot VR_{r,m,t} \quad (4.10)$$

$$VR_{r,t} = VR_{m_r} + \sum_{m=1}^{nm} vr_{r,m,t} \quad (4.11)$$

sendo m o segmento de cada trecho do volume de água do reservatório r no mês t , $m = 1, \dots, nm$, ($nm =$ número de segmentos do volume de água do reservatório); $\phi VR_{r,m,t}$ a declividade do segmento de reta m da função objetivo do volume meta do reservatório r no mês t ; $vr_{r,m,t}$ o incremento do volume de água do reservatório r para o trecho segmentado m , no mês t .

O volume morto, VR_m , e a capacidade do reservatório, VR_{cap} , assim como os volumes intermediários, $VR1^*$ e $VR2^*$, são volumes de controle (ou pontos de quebra) que devem ser definidos previamente. Cada trecho segmentado m do volume de água do reservatório r está limitado pelos volumes de controle. Os volumes $VR1^*$, $VR2$, podem ser volumes físicos pré-estabelecidos, como volume corresponde a cota de entrada do descarregador de fundo ou da cota de entrada da tomada d'água, bem como pontos da curva cota-área-volume.

Outra função objetivo do modelo é a maximização da receita líquida (RL) oriunda da agricultura irrigada, 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 agrícola prevista nos perímetros irrigados.

A receita líquida de um perímetro ou área irrigada k , em (R\$/ano) é dada pela expressão:

$$RL_k = \sum_{n=1}^{na} \sum_{j=1}^{nc} Rb_{k,j,n} - Cp_{k,j,n} - Ca_{k,j,n} - Cb_{k,j,n} \quad (4.12)$$

sendo n o ano, $n = 1, 2, \dots, na$, ($na =$ número de anos); j o tipo de cultura agrícola, $j = 1, 2, \dots, nc$, ($nc =$ número de culturas); $Rb_{k,j,n}$ a renda bruta anual da cultura agrícola j no ano n no perímetro ou área irrigada k ; $Cp_{k,j,n}$ o custo de produção anual da cultura agrícola j no ano n no perímetro ou área irrigada k ; $Ca_{k,j,n}$ o custo da água anual usada na cultura agrícola j no ano n no perímetro ou área irrigada k ; $Cb_{k,j,n}$ o custo anual de bombeamento de água para a cultura agrícola j no ano n no perímetro ou área irrigada k ;

A renda bruta anual no perímetro ou área irrigada k ($Rb_{k,j,n}$), em R\$/ano/cultura, pode ser estimada por:

$$Rb_{k,j,n} = Prod_{k,j,n} \cdot Prc_{j,n} \cdot Ac_{k,j,n} \quad (4.13)$$

sendo $Prod_{k,j,n}$ a produtividade da cultura agrícola j por unidade de área no perímetro ou área irrigada k no ano n ; $Prc_{j,n}$ é o preço atual de comercialização da cultura agrícola j no ano n e $Ac_{k,j,n}$ é a área plantada com a cultura agrícola j no perímetro ou área irrigada k no ano n .

O custo de produção anual no perímetro ou área irrigada k ($Cp_{k,j,n}$), em R\$/ano/cultura, relativos aos gastos com insumos, mão de obra e máquinas, entre outros, pode ser dado por:

$$Cp_{k,j,n} = Cprod_{k,j,n} \cdot Ac_{k,j,n} \quad (4.14)$$

sendo $Cprod_{k,j,n}$ o custo atual de produção por unidade de área da cultura agrícola j referentes aos gastos relativos ao ano n no perímetro ou área irrigada k .

O custo da água anual, $Ca_{k,j,n}$ (em R\$/ano/cultura), captada para o perímetro ou área irrigada k pode ser obtido pela expressão:

$$Ca_{k,j,n} = \sum_{t=12(n-1)+1}^{12(n-1)+12} (Pra_k \cdot Qirr_{k,j,t} \cdot Ac_{k,j,n}) \quad (4.15)$$

sendo Pra_k é o preço da água por unidade de volume destinado ao perímetro ou área irrigada k e $Qirr_{k,j,t}$ é a lâmina mensal de água para a irrigação da cultura agrícola j no perímetro ou área irrigada k durante o mês t , transformada em vazão por unidade de área fornecida pelo sistema, obtida por:

$$Qirr_{k,j,t} = \frac{NI_{k,j,t}}{(1 - LR_{k,j,t}) \cdot Esis_{k,j} \cdot Eap_j} \quad (4.16)$$

sendo $NI_{k,j,t}$ a necessidade hídrica suplementar da cultura agrícola j no perímetro ou área irrigada k durante o mês t ; $LR_{k,j,t}$ é a necessidade de lixiviação dos sais para a cultura agrícola j no mês t no perímetro ou área irrigada k ; $Esis_{k,j}$ é a eficiência do sistema de distribuição de água para cada cultura agrícola j no perímetro ou área irrigada k e Eap_j é a eficiência da aplicação da irrigação por cultura agrícola.

A necessidade hídrica suplementar ($NI_{k,j,t}$) ou a lâmina de rega suplementar que a planta necessita, para cada intervalo de tempo do seu ciclo vegetativo, pode ser estimada por:

$$NI_{k,j,t} = ETP_{k,j,t} - Pe_{k,t} - G_{k,j,t} - W_{k,t} \quad (4.17)$$

sendo $Pe_{k,t}$ a taxa de precipitação que infiltra no solo, que fica efetivamente a disposição das plantas no mês t no perímetro ou área irrigada k ; $G_{k,j,t}$ é a dotação de água à zona radicular da cultura j durante o mês t por capilaridade que depende do tipo de solo e do nível do lençol freático no perímetro ou área irrigada k e $W_{k,t}$ é a reserva de água no solo no início do mês t que depende da capacidade de armazenamento de água no solo no perímetro ou área irrigada k . $ETP_{k,j,t}$ é a taxa de evapotranspiração potencial da cultura agrícola j no perímetro ou área irrigada k durante o mês t , que pode ser estimada, de forma aproximada, por:

$$ETP_{k,j,t} = kc_{j,t} \cdot ET0_{k,t} \quad (4.18)$$

sendo $kc_{j,t}$ é o coeficiente de cultivo mensal da cultura agrícola j que reflete a sua necessidade hídrica no mês t e $ET0_{k,t}$ é a evapotranspiração de referência no mês t no perímetro ou área irrigada k .

A precipitação que fica efetivamente a disposição das plantas $Pe_{k,t}$ é estimada pela metodologia desenvolvido pela USDA – Soil Conservation Service em 1969 (DOORENBOS; PRUIT 1992) relaciona a precipitação média mensal com a evapotranspiração potencial da cultura agrícola j no mês t , como apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores da precipitação efetiva em função da evapotranspiração potencial da cultura agrícola e da precipitação média mensal.

		Precipitação média (mm/mês)															
		12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125	137,5	150	162,5	175	187,5	200
		Precipitação efetiva (mm/mês)															
Evapotranspiração potencial (mm/mês)	25	8	16	24													
	50	8	17	25	32	39	46										
	75	9	18	27	34	41	48	56	62	69							
	100	9	19	28	35	43	52	59	66	73	80	87	94	100			
	125	10	20	30	37	46	54	62	70	76	85	92	98	107	116	120	
	150	10	21	31	39	49	57	66	74	81	89	97	104	112	119	127	133
	175	11	23	32	42	52	61	69	78	86	95	103	111	118	126	134	141
	200	11	24	33	44	54	64	73	82	91	100	109	117	125	134	142	150
	225	12	25	35	47	57	68	78	87	86	108	115	124	132	141	150	159
	250	13	25	38	50	61	72	84	92	102	112	121	132	140	150	158	167

A metodologia considera que a altura da água da irrigação que pode ser armazenada eficazmente sobre a zona da raiz é igual a 7,5 cm. A Tabela 4.2 apresenta os fatores de correção para diferentes altura de armazenamento.

Tabela 4.2 – Fator de correção da precipitação efetiva em função do armazenamento inicial de água no solo

Armazenamento inicial de água no solo (mm)	20	25	27,5	50	62,5	75	100	125	150	175	200
Fator de correção	0,73	0,77	0,86	0,93	0,97	1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08

O custo anual de bombeamento de água, $Cb_{k,j,n}$ (em R\$/ano/cultura) para o perímetro ou área irrigada k é obtido através da expressão:

$$Cb_{k,j,n} = \sum_{t=12(n-1)+1}^{12(n-1)+12} \left(\frac{0,02726 \cdot Prb_k \cdot \Delta H_{k,j,t} \cdot Qirr_{k,j,t} \cdot Ac_{k,j,n}}{\eta_k} \right) \quad (4.19)$$

sendo Prb_k o preço da energia elétrica (em R\$/Kwh) para o perímetro ou área irrigada k ; $\Delta H_{k,j,t}$ é a altura manométrica média (em metros de coluna de água), requerido pelo sistema de irrigação da cultura agrícola j e aduzido para o perímetro ou área irrigada k no mês t e η_k é a eficiência do sistema de bombeamento do perímetro ou área irrigada k .

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

$$MO_k = \sum_{n=1}^{na} \sum_{j=1}^{nc} Hdc_{k,j} \cdot Ac_{k,j,n} \quad (4.20)$$

sendo $Hdc_{k,j}$ a mão-de-obra, por unidade de área, requerida pela cultura agrícola j no perímetro irrigado k ;

O modelo utiliza o Método das Ponderações para efetuar a análise multiobjetivo, sendo cada função objetivo, descrita anteriormente, normalizada. Assim, a função objetivo do modelo de otimização quantitativo (fo_{quant}) é dada pela Equação 4.21.

$$\begin{aligned} \min fo_{quant} = & \sum_d \omega_{1,d} \cdot DTD_d + \sum_r \omega_{2,r} \cdot VE_r + \sum_r \omega_{3,r} \cdot VM_r \\ & + \sum_k \omega_{4,k} \cdot RL_k + \sum_k \omega_{5,k} \cdot MO_k \end{aligned} \quad (4.21)$$

sendo ω_* o coeficiente de ponderação que mede a relativa importância ou prioridade de atendimento entre as funções objetivo. Quando $\omega_* = 0$ a função objetivo não será considerada no processo de otimização.

4.2.2. EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO

Os reservatórios podem estar conectados, através dos links, a outros elementos do sistema como a nós, demandas, perímetros irrigados, sendo sempre conectado a uma afluência, a descargas de fundo e/ou vertedouros como exemplifica a Figura 4.6.

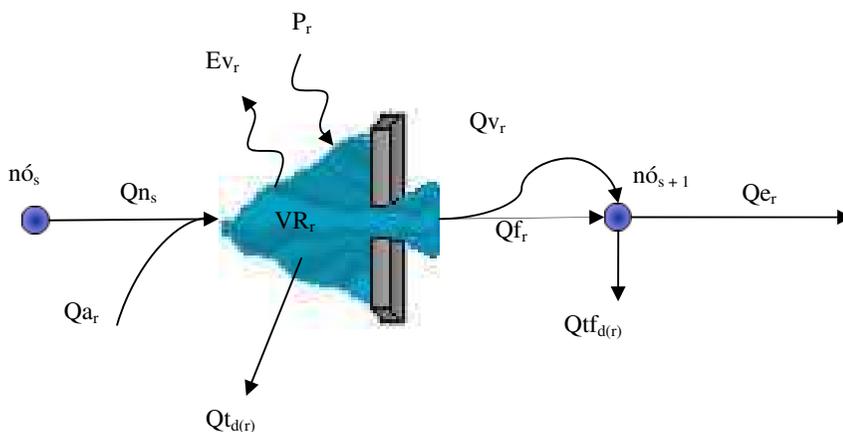


Figura 4.6 – Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.

O balanço hídrico, baseado no princípio de conservação da massa, é expresso pela Equação 4.22.

$$VR_{r,t} = VR_{r,(t-1)} + Qa_{r,t} - \sum_{d(r)} Qtr_{d(r),t} - Qf_{r,t} - Qv_{r,t} + P_{r,t} - Ev_{r,t} + Qn_{s,t} \quad (4.22)$$

sendo s o índice que representa o s -ésimo nó do sistema; $VR_{r,t}$ o volume de água do reservatório r no final do mês t ; $VR_{r,(t-1)}$ o volume de água do reservatório r no início do mês t ; $Qa_{r,t}$ a volume afluente ao reservatório r durante o mês t ; $d(r)$ o índice que representa a d -ésima tomada d'água do reservatório r ; $Qtr_{d(r),t}$ o d -ésimo volume alocado para a tomada d'água do reservatório r no mês t ; $Qtf_{d(r),t}$ o d -ésimo volume alocado para a tomada d'água de fundo do reservatório r no mês t ; $Qf_{r,t}$ o volume liberado através da descarga de fundo do reservatório r durante o mês t ; $Qv_{r,t}$ o volume vertido do reservatório r durante o mês t ; $P_{r,t}$ o volume precipitado no reservatório r durante o mês t ; $Ev_{r,t}$ o volume evaporado no reservatório r durante o mês t e $Qn_{s,t}$ o volume afluente oriundo do s -ésimo nó a montante do reservatório r no mês t .

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

$$P_{r,t} = p_{r,t} \left(\frac{AR_{r,t} + AR_{r,(t-1)}}{2} \right) \quad (4.23)$$

$$E_{r,t} = e_{r,t} \left(\frac{AR_{r,t} + AR_{r,(t-1)}}{2} \right) \quad (4.24)$$

sendo $p_{r,t}$ a taxa de precipitação para o reservatório r no mês t ; $e_{r,t}$ a taxa de evaporação para o reservatório r no mês t ; $AR_{r,t}$ a área do espelho d'água do reservatório r no final do mês t ; $AR_{r,(t-1)}$ a área do espelho d'água do reservatório r no início do mês t .

A área do espelho de água do reservatório é relacionada com o volume do reservatório através de segmentos de reta na curva área-volume de modo a obter um bom ajuste linear da mesma, como exemplificado na Figura 4.7.

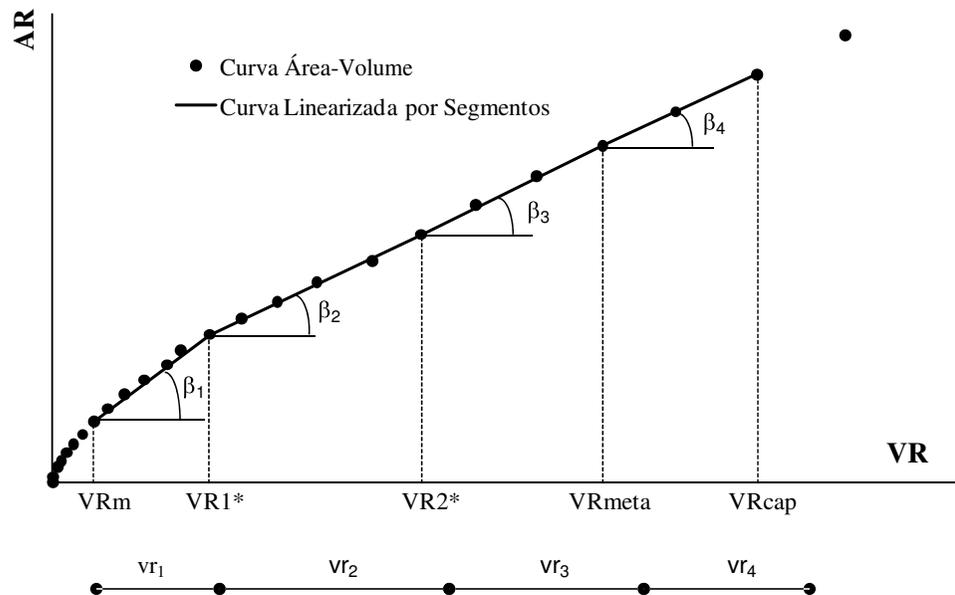


Figura 4.7 – Exemplo de um gráfico da curva área-volume linearizada de um reservatório r .

Assim a área do espelho d'água do reservatório r no mês t ($AR_{r,t}$) é dada pela expressão:

$$AR_{r,t} = AR_{m_r} + \sum_{m=1}^{nm} \beta_{m,r} \cdot vr_{m,r,t} \quad (4.25)$$

sendo $AR_{m,r}$ a área do espelho de água do reservatório r correspondente ao volume morto do mesmo; $\beta_{m,r}$ coeficiente angular do segmento de reta m da curva área-volume do reservatório r .

Os volumes de controle (ou pontos de quebra) utilizados devem ser os mesmos considerados na linearização da Equação 4.10. Desse modo as Equações 4.10 e 4.25 terão os mesmos trechos segmentados m do volume de água do reservatório r ($v_{r,m,r,t}$).

O volume a ser captado através das tomadas d'água está limitado pela sua capacidade máxima ($Qt_{max,d}$), dado por:

$$0 \leq Qt_{d,t} \leq Qt_{max,d} \quad (4.26)$$

Caso a tomada d'água esteja conectada a um reservatório ela também estará limitada pela a cota de entrada do tubo da tomada d'água d no reservatório r ($Htr_{d(r)}$), assim:

$$Qt_{d(r),t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq Htr_{d(r)} \quad (4.27)$$

sendo $HR_{r,t}$ a cota do nível d'água do reservatório r no mês t .

Os volumes extravasados através dos vertedouros são limitados de acordo com as equações abaixo:

$$0 \leq Qv_{r,t} \leq Qv_{max,r} \quad (4.28)$$

$$Qv_{r,t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq Hvert_r \quad (4.29)$$

sendo $Qv_{max,r}$ o volume mensal máximo vertido que é projetado para o reservatório r ; $Hvert_r$ representa a cota da soleira do vertedor do reservatório r .

O volume liberado através da descarga de fundo ($Qf_{r,t}$) do reservatório r em cada mês t está limitado pela cota de entrada da tubulação de descarga de fundo (Hfe_r) e pelo volume máximo que pode ser aduzida pela descarga de fundo em cada mês t ($Qf_{max,r,t}$), matematicamente tem-se:

$$0 \leq Qf_{r,t} \leq Qf_{max,r,t} \quad (4.30)$$

$$Q_{f,r,t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq H_{fe_r} \quad (4.31)$$

O volume máximo que pode ser aduzido pela descarga de fundo ($Q_{fmax,r,t}$) pode ser estimado pela equação abaixo, referida em DAEE (2005):

$$Q_{f \max_{r,t}} = C_{f_r} \cdot A_{f_r} \cdot \sqrt{2g(HR_{r,t} - H_{fs_r})} \quad (4.32)$$

sendo C_{f_r} o coeficiente de vazão de descarga de fundo do reservatório r ; A_{f_r} a área da seção transversal do tubo de descarga de fundo do reservatório r , g a aceleração da gravidade e H_{fs_r} a cota de jusante da geratriz inferior do tubo de descarga de fundo do reservatório r .

A curva da vazão máxima aduzida por descarga de fundo em função do volume de água do reservatório é obtida com o auxílio da curva cota-volume sendo a mesma linearizada através de segmentos de reta, como exemplificado na Figura 4.8, na qual $VR1^*$ representa o volume correspondente a cota de entrada da tubulação de descarga de fundo (H_{fe_r}). Os volumes de controle (ou pontos de quebra) devem ser os mesmos que foram utilizados para a linearização da Equação 4.10.

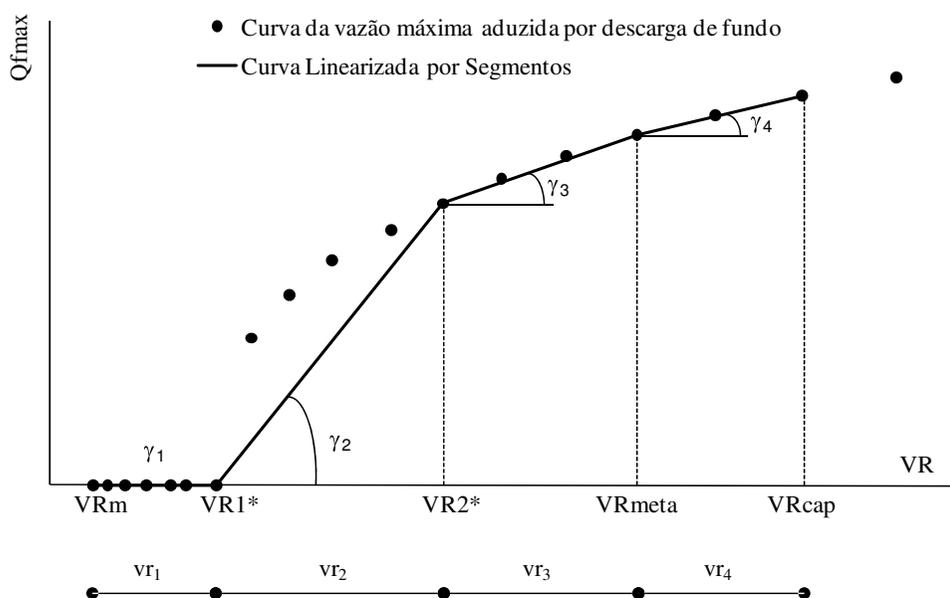


Figura 4.8 – Exemplo de um gráfico da vazão máxima aduzida por descarga de fundo versus o volume de água do reservatório r .

A vazão máxima aduzida pela descarga de fundo do reservatório r é dada pela expressão:

$$Qf \max_{rt} = \sum_{m=1}^{nm} \gamma_{m,r} * vr_{m,r,t} \quad (4.33)$$

sendo γ_{mr} coeficiente angular do segmento de reta m da curva da vazão máxima aduzida pela descarga de fundo versus o volume de água do reservatório r .

Na operação do reservatório, tem-se um volume final de água ($VR_{r,t}$) e um volume inicial de água ($VR_{r,(t-1)}$) que resultarão em duas vazões máximas ($Qfmax_{r,t}$ e $Qfmax_{r,(t-1)}$) que poderão ser aduzidas pela descarga de fundo para um mês t . Para minimizar esse problema utilizou-se média destas duas vazões.

O volume de água do reservatório r esta limitado por:

$$VRm_r \leq VR_{rt} \leq VRcap_r \quad (4.34)$$

A sustentabilidade hídrica do sistema pode ser garantida fazendo-se que o volume de água do reservatório no último mês de estudo seja igual ou superior ao volume inicial estabelecido para o mesmo. (CURI; CURI 2001b).

Com relação à agricultura irrigada as restrições físicas consideradas são as áreas a ser irrigada, a vazão a ser captada para o perímetro ou área irrigada e a não negatividade das variáveis de decisão.

As limitações impostas pelas capacidades dos canais ou dos sistemas adutores, pelos quais a água será transportada até os respectivos perímetros ou áreas irrigadas, podem ser representadas por:

$$\sum_{j=1}^{nc} Qirr_{k,j,t} \cdot Ac_{k,j,n} \leq Qt \max_{k,t} \quad (4.35)$$

sendo $Qtmax_{k,t}$ a capacidade de vazão do sistema de captação para o perímetro ou área irrigada k no mês t .

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

$$\sum_{j=1}^{nc} \xi_{k,j,t} \cdot Ac_{j,k,n} \leq Ap_{\max_{k,t}} \quad (4.36)$$

sendo $Ap_{\max_{k,t}}$ o limite máximo da área total que poderá ser plantada no perímetro ou área irrigada k no mês t , com:

$\xi_{k,j,t} = 1$, se a cultura agrícola j for plantada no mês t no perímetro ou área irrigada k ;

$\xi_{k,j,t} = 0$, se a cultura agrícola j não for plantada no mês t no perímetro ou área irrigada 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 perímetro ou área irrigada, expressa por:

$$Ac_{\min_{k,j,n}} \leq Ac_{k,j,n} \leq Ac_{\max_{k,j,n}} \quad (4.37)$$

sendo $Ac_{\min_{k,j,n}}$ a área mínima a ser plantada com a cultura agrícola j no perímetro ou área irrigada k no ano n ; $Ac_{\max_{k,j,n}}$ a área máxima a ser plantada com a cultura agrícola j no perímetro ou área irrigada k no ano n .

As vazões nos trechos dos rios estão 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:

$$Qn_{\min_{c,t}} \leq Qn_{c,t} \leq Qn_{\max_{c,t}} \quad (4.38)$$

sendo $Qn_{c,t}$ a vazão no trecho de rio c no mês t ; $Qn_{\min_{c,t}}$ a vazão mínima no c -ézima trecho de rio no mês t ; $Qn_{\max_{c,t}}$ é a vazão máxima no c -ézima trecho de rio no mês t .

O modelo promove o balanço hídrico em cada nó s do sistema, através da seguinte expressão:

$$\sum_e Qentra_{e,s,t} = \sum_i Qsai_{i,s,t} \quad (4.39)$$

sendo $Qentra_{e,s,t}$ a e -ézima vazão de entrada no nó s , no mês t ; $Qsai_{i,s,t}$ a i -ézima vazão de saída do nó s , no mês t .

4.2.3. PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVA

O Artificio de Linearização por Segmentos garante para a minimização de uma função convexa (caso da Equação 4.9) que os trechos segmentados da variável de decisão serão “percorridos” numa forma seqüencial, do primeiro ao último, atingindo a cada trecho percorrido o seu valor máximo. Porém, observou-se que, em certos casos, isso não ocorre. Para a modelagem proposta, pode haver combinações dos valores dos trechos segmentados das relações cota x área x volume para os volumes de água armazenados no reservatório em um mês t que resultem em um aumento do atendimento (de forma incorreta) a uma demanda ou restrição imposta. Isso ocorre devido ao caráter multiobjetivo do modelo, em que o atendimento de uma determinada demanda do sistema pode ter 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 de uma demanda muito alta, por exemplo), para se garantir o atendimento das demandas com prioridade maior do que o volume meta do reservatório, o volume evaporado pode ser diminuído preenchendo os últimos trechos segmentados do volume de água armazenado no reservatório, para curva área-volume convexa. Neste caso, as declividades dos últimos trechos segmentados são menores do que nos primeiros trechos, o que resultará em um menor valor da área do espelho d’água do reservatório e, conseqüentemente, no volume evaporado, garantindo assim uma maior quantidade de água para o suprimento das demandas.

Para contornar tal problema é utilizado um procedimento iterativo no uso da PL, denominado Programação Linear Seqüencial (ou Sucessiva) onde a cada iteração os trechos segmentados do volume do reservatório são ajustados de modo a resultarem em um volume de água armazenado de forma correta.

Para melhor explicar o procedimento, supõe-se que o volume meta de um reservatório em um mês qualquer seja 7,5, o volume morto de 0,5 e a capacidade de armazenamento igual 10,5, logo a função objetivo é:

$$VM = \left(\frac{7,5 - VR}{7,5} \right)^2 \quad (4.40)$$

O volume de água do reservatório (VR) e a função objetivo linearizada (VM’) podem ser obtidos através das expressões:

$$VR = 0,5 + vr1 + vr2 + vr3 + vr4 \quad (4.41)$$

$$VM' = 0,87 - 0,23vr1 - 0,16vr2 - 0,06vr3 + 0,05vr4 \quad (4.42)$$

com $0 \leq vr1 \leq 1,25$; $0 \leq vr2 \leq 2,25$; $0 \leq vr3 \leq 3,50$ e $0 \leq vr4 \leq 3,00$.

Supondo que ao resolver o problema de otimização pela primeira vez (1ª iteração) com todas as restrições impostas, o volume de água do reservatório VR seja igual a 6,0. Porém os valores dos trechos segmentados foram: $vr1 = 0$; $vr2 = 0$; $vr3 = 2,50$; $vr4 = 3,00$ (os valores corretos seriam: $vr1 = 1,25$; $vr2 = 2,25$; $vr3 = 2,00$; $vr4 = 0$).

Os valores incorretos dos trechos segmentados resultam em valores incorretos da área do espelho de água do reservatório e da vazão máxima que pode ser aduzida pela descarga de fundo, pois ambas as curvas são linearizadas com os mesmos trechos segmentados utilizados na linearização da função objetivo do volume meta do reservatório.

O ajuste proposto para resolver tal incoerência consiste em impor restrições, inicialmente com certa relaxação nos valores dos trechos segmentados, para que, na próxima iteração, o valor do volume de água armazenado no reservatório seja próximo ao que foi obtido na iteração anterior

Para o exemplo proposto, inicialmente será estabelecido que: $vr1 = 1,25$ (seu valor máximo) e $vr4 = 0$. Os trechos segmentados $vr2$, $vr3$ continuam com suas restrições iniciais. Aplicando-se a PL novamente - 2ª iteração - podemos obter os seguintes valores: $vr1 = 1,25$; $vr2 = 0,45$; $vr3 = 3,5$; $vr4 = 0$; resultando num volume de água do reservatório, ainda incorreto, de $VR = 5,7$.

A Figura 4.9 mostra os valores do volume de água do reservatório entre a 1ª e a 2ª iteração e a restrição imposta aos trechos segmentados para a 2ª iteração. Nota-se que, tanto na 1ª iteração como na 2ª iteração, o valor do volume de água do reservatório permaneceu entre os valores de 4,00 e 7,50. Espera-se que o valor ótimo do volume de água do reservatório esteja entre esses valores. Assim, na próxima iteração – 3ª iteração – será estabelecido que: $vr1 = 1,25$; $vr2 = 2,25$ (seus valores máximos) e $vr4 = 0$. O trecho segmentado $vr3$ continuará com sua restrição inicial.

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

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

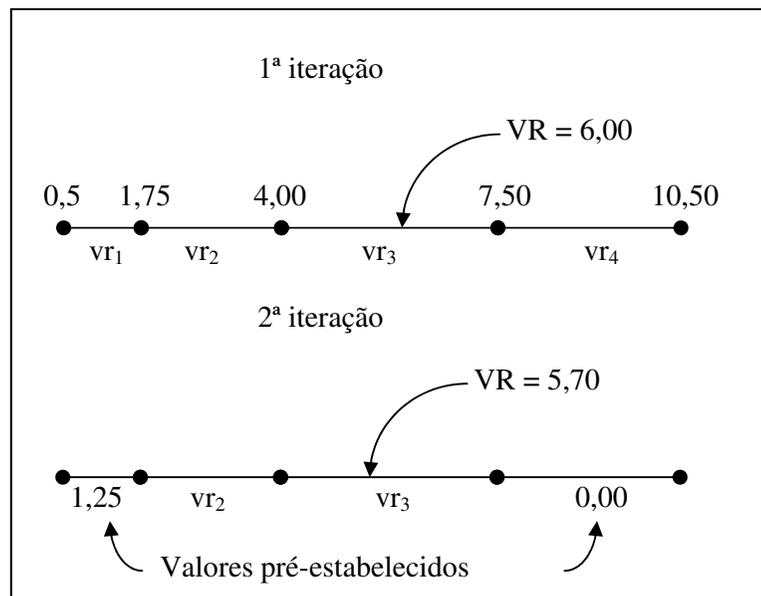


Figura 4.9 – Valor do volume de água do reservatório e a representação restrição imposta aos trechos segmentados para a 2ª iteração.

Tem-se, na maioria das vezes, que logo na primeira iteração 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 processo de convergência da função objetivo f_o , que é avaliado através do cálculo do erro relativo ($erro_{f_o}$), dado por:

$$erro_{f_o} = \left| \frac{f_{o_l} - f_{o_{l-1}}}{f_{o_l}} \right| \leq tol \quad (4.43)$$

onde, f_{o_l} é o valor da função objetivo para a l -ésima iteração ($l \geq 2$); tol é o nível de tolerância especificado para o sistema a ser otimizado.

O fluxograma do modelo de otimização quantitativo está apresentado na Figura 4.10.

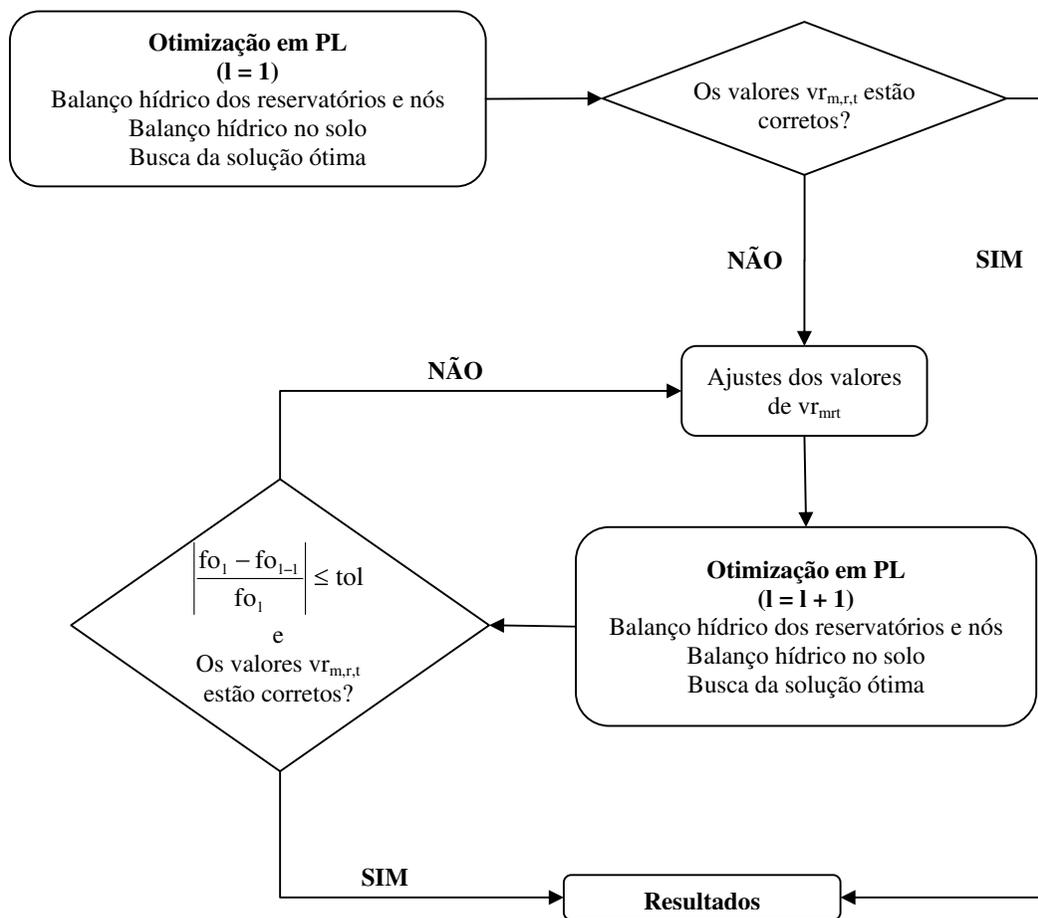


Figura 4.10 – Fluxograma do modelo otimização quantitativo.

4.3. OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA

4.3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os parâmetros de qualidade de água analisados pelo modelo são a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e o Oxigênio Dissolvido (OD).

A modelagem dos processos de qualidade de água baseia-se nas seguintes hipóteses:

- As fontes poluidoras são cargas pontuais lançadas nos nós e nos reservatórios do sistema.
- A mistura das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos nós ocorre de forma perfeita e instantânea no ponto de lançamento
- Em cada trecho de rio o escoamento é unidimensional (longitudinal), permanente e uniforme sujeito aos fenômenos de conservação de massa e da autodepuração.

- As reações cinéticas dos parâmetros ao longo do trecho do rio são consideradas através do regime de fluxo de pistão.
- O reservatório é totalmente misturado, ou seja, sem estratificação térmica, considerando a existência de uma mesma concentração dos parâmetros de qualidade de água em todo o seu volume.
- As reações cinéticas dos parâmetros nos reservatórios são consideradas através do regime de mistura completa.

4.3.2. ESTIMATIVA INICIAL DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA

Com os resultados da otimização quantitativa são estimados os valores iniciais das concentrações dos parâmetros de qualidade de água para a otimização quali-quantitativa.

A concentração de determinado parâmetro de qualidade de água, no mês t , em uma dada seção do rio (nó s) é estimada pela equação:

$$C_{s,t} = \frac{\sum_u C_{u,t} \cdot Q_{u,t}}{\sum_u Q_{u,t}} \quad (4.44)$$

sendo $C_{s,t}$ a concentração de determinado parâmetro de qualidade de água no s -ésimo nó do sistema no mês t ; $C_{u,t}$ é a u -ésima concentração afluyente de determinado parâmetro de qualidade de água no s -ésimo nó do sistema no mês t ; $Q_{u,t}$ é a u -ésima vazão afluyente no s -ésimo nó do sistema no mês t .

Para representar o transporte de massa (processo de autodepuração dos parâmetros de qualidade de água) ao longo do trecho do rio, como explicitado na Figura 4.11, considerou-se as seguintes equações baseadas no modelo de Streeter e Phelps (1925 apud VON SPERLING 2007):

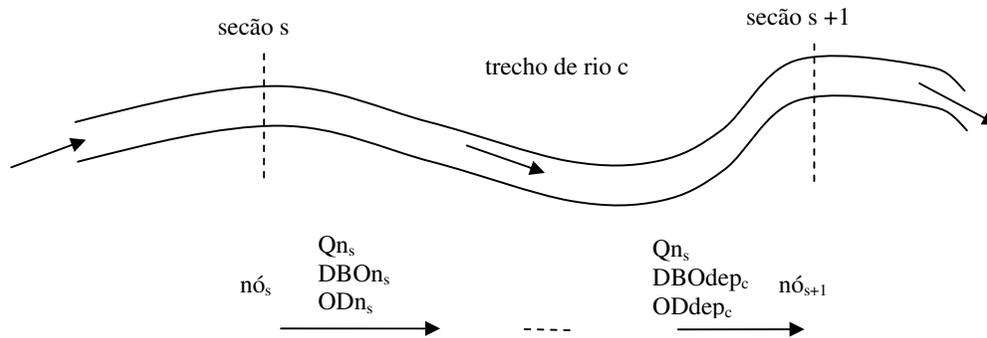


Figura 4.11 – Diagrama representando os componentes avaliados pelo modelo no processo de autodepuração ao longo do trecho do rio.

$$DBO_{dep_c} = DBO_{n_s} \cdot \exp(-(kd_c + ks_c) \cdot tp_c) \quad (4.45)$$

$$OD_{dep_c} = OD_{nsat_c} - \left\{ \frac{kd_c \cdot kT_c \cdot DBO_{n_s}}{ka_c - (kd_c + ks_c)} [\exp(-(kd_c + ks_c) \cdot tp_c) - \dots] - \exp(-ka_c \cdot tp_c) \right\} + (OD_{nsat_c} - OD_{n_s}) \exp(-ka_c \cdot tp_c) \quad (4.46)$$

sendo DBO_{dep_c} a concentração do parâmetro DBO no trecho de rio c afluyente ao nó $s + 1$; DBO_{n_s} a concentração do parâmetro DBO do nó s ; kd_c o coeficiente de decomposição da DBO no trecho de rio c ; ks_c coeficiente de sedimentação da DBO no trecho de rio c ; tp_c o tempo de percurso no trecho c ; OD_{dep_c} a concentração do parâmetro OD no trecho de rio c afluyente ao nó $s + 1$; OD_{n_s} a concentração do parâmetro OD no nó s ; OD_{nsat_c} a concentração de saturação do OD no trecho de rio c ; ka_c coeficiente de reaeração do trecho de rio c ; kT_c coeficiente para transformação da DBO padrão em DBO última no trecho de rio c dada por:

$$kT_c = \frac{1}{1 - e^{-5 \cdot k1_c}} \quad (4.47)$$

sendo $k1_c$ o coeficiente de desoxigenação da DBO no trecho de rio c .

A área da seção transversal (An_c) do trecho do rio c é relacionada com vazão no trecho de acordo com a expressão:

$$An_{c,t} = \alpha n_c (Qn_{s,t})^{\beta n_c} \quad (4.48)$$

sendo $Qn_{s,t}$ a vazão no trecho de rio c oriunda do nó s no mês t ; αn_c e βn_c são parâmetros ajustados para o trecho de rio c .

Pela equação da continuidade temos que a velocidade media vm_c no trecho do rio c no mês t é dada pela expressão:

$$vm_{c,t} = \frac{Qn_{s,t}}{An_{c,t}} = \frac{Qn_{s,t}}{\alpha n_c \cdot (Qn_{s,t})^{\beta n_c}} = \frac{(Qn_{s,t})^{1-\beta n_c}}{\alpha n_c} \quad (4.49)$$

Logo o tempo de percurso tp_c ao longo do rio c no mês t é dada por:

$$tp_{c,t} = \frac{Ln_c}{vm_{c,t}} = \frac{Ln_c}{\frac{(Qn_{s,t})^{1-\beta n_c}}{\alpha n_c}} = \frac{\alpha n_c \cdot Ln_c}{(Qn_{s,t})^{1-\beta n_c}} = \alpha n_c \cdot Ln_c \cdot (Qn_{s,t})^{\beta n_c - 1} \quad (4.50)$$

sendo Ln_c o comprimento longitudinal do trecho de rio c

Substituindo a equação 4.50 nas equações 4.45 e 4.46 e considerando um mês t temos:

$$DBOdep_{c,t} = DBO_{n_{s,t}} \cdot \exp\left[-(kd_c + ks_c) \cdot \alpha n_c \cdot Ln_c \cdot (Qn_{s,t})^{\beta n_c - 1}\right] \quad (4.51)$$

$$ODdep_{c,t} = ODnsat_{c,t} - \left\{ \begin{array}{l} \frac{kd_c \cdot kT_c \cdot DBO_{n_{s,t}}}{ka_c - (kd_c + ks_c)} \left[-\exp\left(-ka_c \cdot \alpha n_c \cdot Ln_c \cdot (Qn_{s,t})^{\beta n_c - 1}\right) + \dots \right] \\ + \exp\left[-(kd_c + ks_c) \cdot \alpha n_c \cdot Ln_c \cdot (Qn_{s,t})^{\beta n_c - 1}\right] + \dots \\ + (ODnsat_{c,t} - ODn_{s,t}) \cdot \exp\left(-ka_c \cdot \alpha n_c \cdot Ln_c \cdot (Qn_{s,t})^{\beta n_c - 1}\right) \end{array} \right\} \quad (4.52)$$

A equação do balanço de massa do parâmetro DBO em um reservatório r do sistema é expressa por (TUCCI, 2005):

$$\frac{d(VR_r \cdot DBOres_r)}{dt} = \sum_a Q_a \cdot DBOa_a - \left(\sum_b Q_b - (kdres_r + ksres_r) \cdot VR_r \right) \cdot DBOres_r \quad (4.53)$$

sendo DBO_{res_r} a concentração do parâmetro DBO do reservatório r ; DBO_{a_a} a a -ésima concentração afluyente do parâmetro DBO no reservatório r ; Q_a a a -ésima vazão afluyente do reservatório r ; Q_b a b -ésima vazão defluyente do reservatório r ; kd_{res_r} o coeficiente de decomposição da DBO do reservatório r ; ks_{res_r} coeficiente de sedimentação da DBO do reservatório r .

A solução da Equação 4.53 considerando um volume médio de água $S_{r,t}$ do reservatório r entre os meses $t - 1$ e t , resulta em:

$$DBO_{res_r,t} = \left\{ \begin{array}{l} DBO_{res_r,(t-1)} \cdot \exp \left(- \left(\frac{\sum_a Q_{a,t}}{S_{r,t}} + (kd_{res_r} + ks_{res_r}) \right) \Delta t \right) + \dots \\ + \frac{\sum_a Q_{a,t} \cdot DBO_{a_a,t}}{\sum_a Q_{a,t} + (kd_{res_r} + ks_{res_r}) \cdot S_{r,t}} \cdot [1 - \dots \\ - \exp \left(- \left(\frac{\sum_a Q_{a,t}}{S_{r,t}} + (kd_{res_r} + ks_{res_r}) \right) \Delta t \right)] \end{array} \right. \quad (4.54)$$

$$\text{sendo } S_{r,t} = \frac{VR_{r,t} + VR_{r,(t-1)}}{2}$$

A equação do balanço de massa do parâmetro OD em um reservatório r do sistema é expressa por (TUCCI, 2005):

$$\frac{d(VR_r \cdot OD_{res_r})}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_a Q_a \cdot ODa_a - \sum_b Q_b \cdot OD_{res_r} - kd_{res_r} \cdot VR_r \cdot DBO_{res_r} \\ + kares_r \cdot VR_r \cdot (OD_{ressat_{r,t}} - OD_{res_r,t}) \end{array} \right. \quad (4.55)$$

sendo OD_{res_r} a concentração do parâmetro OD do reservatório r ; ODa_a a a -ésima concentração afluyente do parâmetro OD no reservatório r ; $OD_{ressat_{r,t}}$ a concentração de saturação do OD do reservatório r no mês t ; $kares_r$ coeficiente de reaeração do reservatório r ;

A solução da Equação 4.55 considerando um volume de água médio $S_{r,t}$ do reservatório r entre os meses $t - 1$ e t , resulta em:

$$\text{ODres}_{r,t} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_a Q_{a,t} \cdot \text{ODa}_{a,t} + k_{a_r} \cdot \text{ODressat}_{r,t} \cdot S_{r,t}}{\sum_a Q_{a,t} + k_{a_r} \cdot S_{r,t}} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{\sum_a Q_{a,t}}{S_{r,t}} + k_{a_{res_r}} \right) \Delta t \right) \right] + \dots \\ + \frac{k_{dres_r} \cdot k_{Tres_r} \cdot \text{DBOres}_{r,t}}{\frac{\sum_a Q_{a,t}}{S_{r,t}} + k_{a_{res_r}} - (k_{dres_r} + k_{sres_r})} \left[\exp \left(- \left(\frac{\sum_a Q_{a,t}}{S_{r,t}} + k_{a_{res_r}} \right) \Delta t \right) - \dots \right. \\ \left. - \exp(- (k_{dres_r} + k_{sres_r})) \right] + \text{ODres}_{r,(t-1)} \cdot \exp \left(- \left(\frac{\sum_a Q_{a,t}}{S_{r,t}} + k_{a_r} \right) \Delta t \right) \end{array} \right. \quad (4.56)$$

sendo k_{Tres_r} coeficiente para transformação da DBO padrão em DBO última no reservatório r dada por:

$$k_{Tres_r} = \frac{1}{1 - \exp(-5 \cdot k_{lres_r})} \quad (4.57)$$

sendo k_{lres_r} o coeficiente de desoxigenação da DBO no reservatório r .

4.3.3. FUNÇÕES OBJETIVO

As funções objetivos do modelo de otimização quali-quantitativa são as mesmas do modelo de otimização quantitativa acrescida das funções objetivos a seguir.

A Equação 4.58 representa a função objetivo que se destina a minimizar o déficit entre a μ -ésima concentração do parâmetro DBO ($\text{DBO}_{\mu,t}$) e a concentração permitida da μ -ésima concentração do parâmetro DBO ($\text{DBOmeta}_{\mu,t}$) nos nós e reservatórios do sistema no mês t .

$$\text{CDBO}_{\mu} = \left\{ \begin{array}{ll} \sum_t \left(\frac{\text{DBOmeta}_{\mu,t} - \text{DBO}_{\mu,t}}{\text{DBOmeta}_{\mu,t}} \right)^2 & \text{se } \text{DBO}_{\mu,t} > \text{DBOmeta}_{\mu,t} \\ 0 & \text{se } \text{DBO}_{\mu,t} \leq \text{DBOmeta}_{\mu,t} \end{array} \right. \quad (4.58)$$

A linearização da Equação 4.58 procedeu-se de maneira análoga a Equação 4.1, como mostra a Figura 4.12.

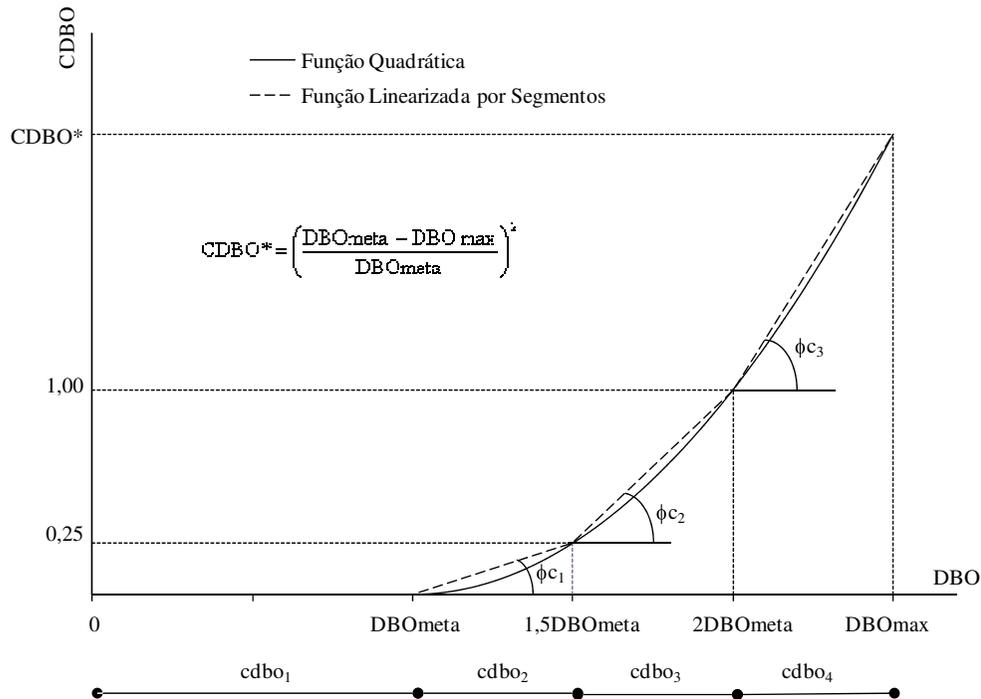


Figura 4.12 – Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da μ -ésima concentração de DBO para um mês t .

Assim, a função objetivo quadrática e a concentração do parâmetro DBO nos reservatórios e nós do sistema são representados por:

$$\left(\frac{DBO_{meta_{\mu,t}} - DBO_{\mu,t}}{DBO_{meta_{\mu,t}}} \right)^2 = \sum_{h=2}^4 \phi c_{\mu,h-1} \cdot cdbo_{\mu,h,t} \quad (4.59)$$

$$DBO_{\mu,t} = \sum_{h=1}^4 cdbo_{\mu,h,t} \quad (4.60)$$

sendo h os segmentos da concentração de DBO do reservatório r ou nó s no mês t , $h = 1, \dots, 4$; $\phi c_{\mu,h-1}$ a declividade do segmento de reta h da função objetivo destinada ao atendimento da μ -ésima concentração permitida do parâmetro DBO no mês t ; $cdbo_{\mu,h,t}$ o incremento da μ -ésima concentração do parâmetro DBO mês t limitado por:

$$0 \leq \text{cdbo}_{\mu,h,t} \leq \begin{cases} \text{DBOmeta}_{\mu,t} & \text{se } h = 1 \\ 0,5\text{DBOmeta}_{\mu,t} & \text{se } h = 2, 3 \\ \text{DBOmax}_{\mu,t} - 2\text{DBOmeta}_{\mu,t} & \text{se } h = 4 \end{cases} \quad (4.61)$$

sendo $\text{DBOmax}_{\mu,t}$ a μ -ésima concentração máxima do parâmetro no mês t .

A Equação 4.62 representa a função objetivo que se destina a minimizar o déficit entre a v -ésima concentração do parâmetro OD nos nós e reservatórios do sistema no mês t ($\text{OD}_{v,t}$) e a concentração permitida da v -ésima concentração do parâmetro OD no mês t ($\text{ODmeta}_{v,t}$):

$$\text{COD}_v = \begin{cases} \sum_t \left(\frac{\text{ODmeta}_{\mu,t} - \text{OD}_{v,t}}{\text{ODmeta}_{v,t}} \right)^2 & \text{se } \text{OD}_{v,t} < \text{ODmeta}_{v,t} \\ 0 & \text{se } \text{OD}_{v,t} \geq \text{ODmeta}_{v,t} \end{cases} \quad (4.62)$$

A linearização da Equação 4.62 procedeu-se de maneira análoga a Equação 4.1, como mostra a Figura 4.13.

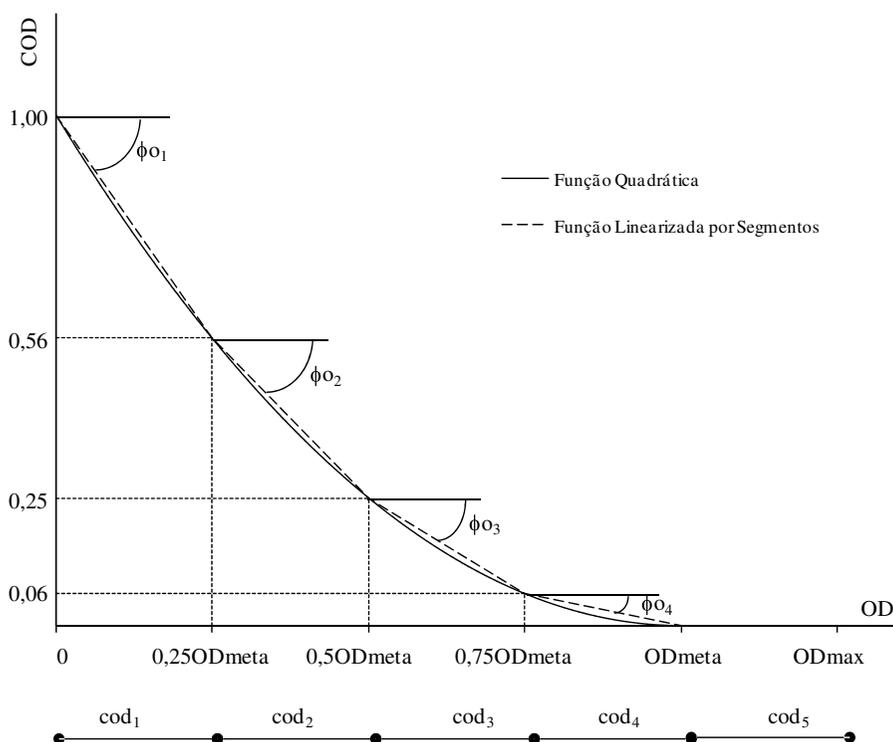


Figura 4.13 – Gráfico da função objetivo quadrática linearizada por segmentos da v -ésima concentração de OD para um mês t .

Assim a função objetivo quadrática e a concentração do parâmetro OD nos reservatórios e nós do sistema serão representados por:

$$\left(\frac{\text{ODmeta}_{\mu,t} - \text{OD}_{\mu,t}}{\text{ODmeta}_{\mu,t}} \right)^2 = 1 + \sum_{f=1}^4 \phi_{o_{v,f}} \cdot \text{cod}_{v,f,t} \quad (4.63)$$

$$\text{OD}_{v,t} = \sum_{f=1}^5 \text{cod}_{v,f,t} \quad (4.64)$$

sendo f os segmentos da concentração de OD no reservatório r ou nó s no mês t , $f = 1, \dots, 5$; $\phi_{o_{v,f}}$ a declividade do segmento de reta f da função objetivo destinada ao atendimento da v -ésima concentração permitida do parâmetro OD no mês t ; $\text{cod}_{v,f,t}$ o incremento da v -ésima concentração do parâmetro OD mês t limitado por:

$$0 \leq \text{cod}_{v,f,t} \leq \begin{cases} 0,25\text{ODmeta}_{v,t} & \text{se } f \leq 4 \\ \text{ODmax}_{v,t} - \text{ODmeta}_{v,t} & \text{se } f = 5 \end{cases} \quad (4.65)$$

Contudo, a função objetivo do modelo de otimização quali-quantitativo (fo_{quali}) é dada pela Equação 4.66.

$$\begin{aligned} \min \text{fo}_{\text{quali}} = & \sum_d \omega_{1,d} \cdot \text{DTD}_d + \sum_r \omega_{2,r} \cdot \text{VE}_r + \sum_r \omega_{3,r} \cdot \text{VM}_r \\ & + \sum_k \omega_{4,k} \cdot \text{RL}_k + \sum_k \omega_{5,k} \cdot \text{MO}_k \\ & + \sum_{\mu} \omega_{6,\mu} \cdot \text{CDBO}_{\mu} + \sum_v \omega_{7,v} \cdot \text{COD}_v \end{aligned} \quad (4.66)$$

4.3.4. EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO

As restrições do modelo de otimização quali-quantitativa são as mesmas do modelo de otimização quantitativa acrescida das equações a seguir.

Para a modelagem do balanço de massa nos nós e nos reservatórios do sistema as vazões afluentes a esses componentes, com as respectivas concentrações de determinado parâmetro, são divididas em duas categorias: com autodepuração – vazões provenientes de

trechos de rio; e sem autodepuração – vazões provenientes dos demais elementos do sistema, por exemplo, afluências, fontes poluidoras, etc.

Assim, a equação do balanço de massa em um nó s do sistema é dada por:

$$\sum_{\psi} QI_{t,\psi,s} \cdot CI_{t,\psi,s} + \sum_{\kappa} Qs_{t,\kappa,s} \cdot Cs_{t,\kappa,s} = Cn_{t,s} \cdot Qn_{t,s} \quad (4.67)$$

sendo $QI_{t,\psi,s}$ a ψ -ézima vazão afluente ao s -ézimo nó do sistema no mês t com autodepuração; $CI_{t,\psi,s}$ a ψ -ézima concentração afluente de determinado parâmetro de qualidade de água no s -ézimo nó do sistema no mês t com autodepuração; $Qs_{t,\kappa,s}$ a κ -ézima vazão afluente ao s -ézimo nó do sistema no mês t sem autodepuração; $Cs_{t,\kappa,s}$ a κ -ézima concentração afluente de determinado parâmetro de qualidade de água no s -ézimo nó do sistema no mês t sem autodepuração; $Cn_{t,s}$ a concentração de determinado parâmetro de qualidade de água no s -ézimo nó do sistema no mês t ;

A equação do balanço de massa do parâmetro DBO em um reservatório r do sistema é dada por:

$$DBOres_{r,t} = \left\{ \begin{array}{l} DBOres_{r,(t-1)} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\sum_{\lambda} QI_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} Qs_{\zeta,r,t}}{S_{r,t}} + (kdres_r + ksres_r) \right) \Delta t \right] + \dots \\ + \frac{\sum_{\lambda} QI_{\lambda,r,t} \cdot DBOI_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} Qs_{\zeta,r,t} \cdot DBOs_{\zeta,r,t}}{\sum_{\lambda} QI_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} Qs_{\zeta,r,t} + (kdres_r + ksres_r) \cdot S_{r,t}} \cdot \dots \\ \cdot \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{\sum_{\lambda} QI_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} Qs_{\zeta,r,t}}{S_{r,t}} + (kdres_r + ksres_r) \right) \Delta t \right] \right] \end{array} \right. \quad (4.68)$$

sendo $QI_{\lambda,r,t}$ a λ -ézima vazão afluente ao r -ézimo reservatório do sistema no mês t com autodepuração; $DBOI_{\lambda,r,t}$ a λ -ézima concentração afluente do parâmetro DBO no r -ézimo reservatório do sistema no mês t com autodepuração; $Qs_{\zeta,r,t}$ a ζ -ézima vazão afluente ao r -ézimo reservatório do sistema no mês t sem autodepuração; $DBOs_{\zeta,r,t}$ a ζ -ézima concentração afluente do parâmetro DBO no r -ézimo reservatório do sistema no mês t sem autodepuração.

A equação do balanço de massa do parâmetro OD em um reservatório r do sistema é dada por:

$$\text{ODres}_{r,t} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{\lambda} \text{QI}_{\lambda,r,t} \cdot \text{ODI}_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} \text{QS}_{\zeta,r,t} \cdot \text{ODs}_{\zeta,r,t} + \text{kares}_r \cdot \text{ODressat}_{r,t} \cdot S_{r,t}}{\sum_{\zeta} \text{QS}_{\zeta,r,t} + \sum_{\lambda} \text{QI}_{\lambda,r,t} + \text{kares}_r \cdot S_{r,t}} \cdot \dots \\ \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{\sum_{\lambda} \text{QI}_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} \text{QS}_{\zeta,r,t}}{S_{r,t}} + \text{kares}_r \right) \Delta t \right) \right] + \dots \\ + \frac{\text{kdres}_r \cdot \text{kTres}_r \cdot \text{DBOres}_{r,t}}{\frac{\sum_{\lambda} \text{QI}_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} \text{QS}_{\zeta,r,t}}{S_{r,t}} + \text{kares}_r - (\text{kdres}_r + \text{ksres}_r)} \cdot \dots \\ \cdot \left[\exp \left(- \left(\frac{\sum_{\lambda} \text{QI}_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} \text{QS}_{\zeta,r,t}}{S_{r,t}} + \text{kares}_r \right) \Delta t \right) - \exp(-(\text{kdres}_r + \text{ksres}_r) \Delta t) \right] + \dots \\ + \text{ODres}_{r,(t-1)} \cdot \exp \left(- \left(\frac{\sum_{\lambda} \text{QI}_{\lambda,r,t} + \sum_{\zeta} \text{QS}_{\zeta,r,t}}{S_{r,t}} + \text{kares}_r \right) \Delta t \right) \end{array} \right. \quad (4.69)$$

sendo $\text{ODI}_{\lambda,r,t}$ a λ -ézima concentração afluyente do parâmetro OD no r -ézimo reservatório do sistema no mês t com autodepuração; $\text{ODs}_{\zeta,r,t}$ a ζ -ézima concentração afluyente do parâmetro OD no r -ézimo reservatório do sistema no mês t sem autodepuração

O processo de autodepuração (transporte de massa) dos parâmetros DBO e OD ao longo do trecho do rio c é calculado através das Equações 4.51 e 4.52 respectivamente.

Para que as Equações 4.51, 4.52, 4.67, 4.68 e 4.69 possam ser utilizadas em PL, optou-se em linearizá-las através do Método de Programação por Aproximações.

4.3.5. PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA

As considerações de convergência do modelo de otimização quali-quantitativa são as mesmas do modelo de otimização quantitativa acrescida da equação de análise do processo de convergência da z -ézima variável de decisão x_z linearizada pelo Método de Programação por Aproximações, que é avaliado através do cálculo do erro da variável (erro_{x_z}), dado por:

$$\text{erro}_{x_z} = |x_z^1 - x_z^{1-1}| \leq \text{tol} \quad (4.70)$$

sendo x_z^1 o valor da da z-ésima variável de decisão linearizada pelo Método de Programação por Aproximações na l-ésima iteração; tol é o nível de tolerância especificado para o sistema a ser otimizado.

O fluxograma do modelo de otimização quali-quantitativo está apresentado na Figura 4.14.

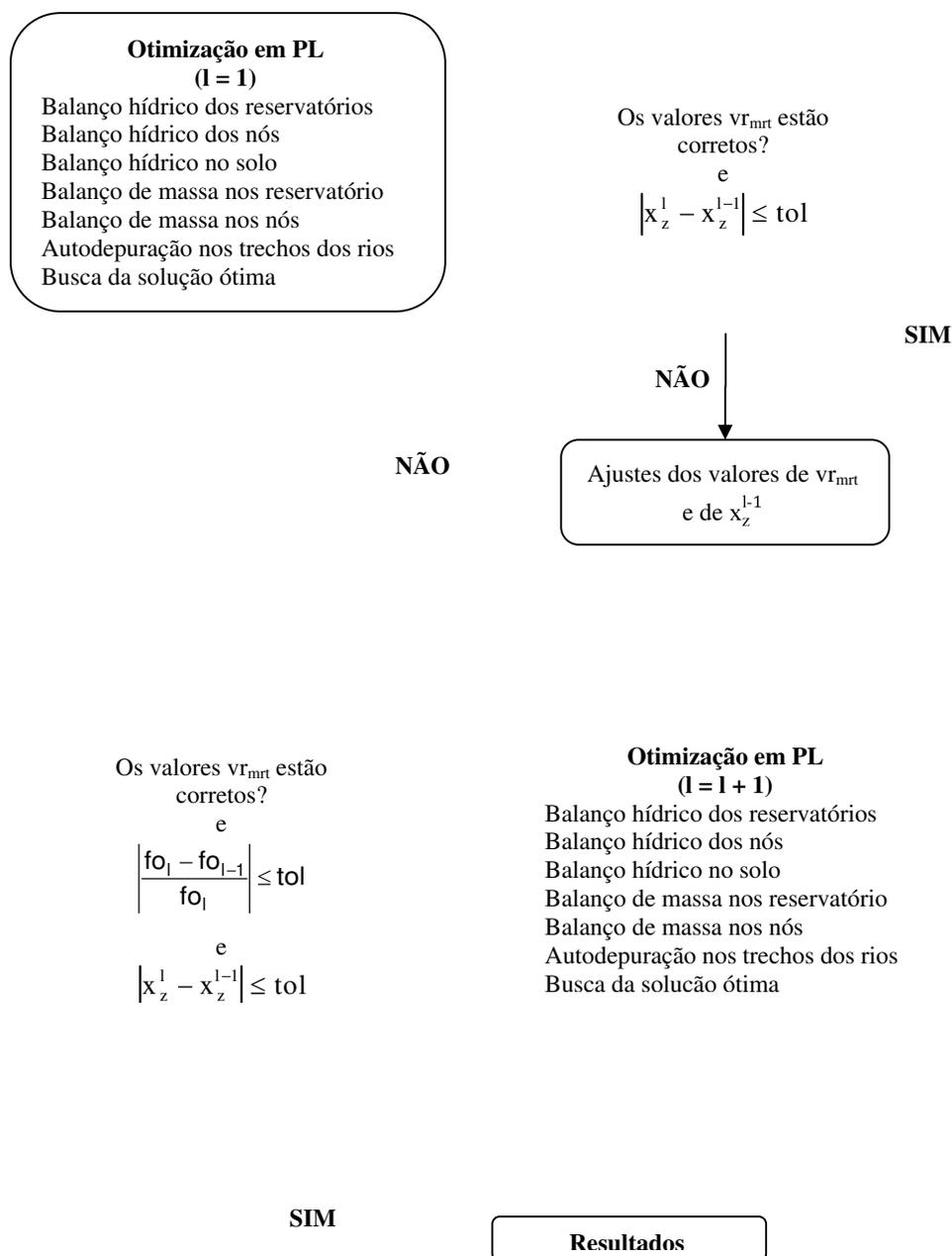


Figura 4.14 – Fluxograma do modelo otimização quali-quantitativo.

4.4. VERIFICAÇÃO DAS LINEARIZAÇÕES DO MODELO

Com o intuito de avaliar a convergência dos processos linearizados pelo Método das Aproximações Lineares determinou-se o erro relativo (Equação 4.71) dos valores das variáveis determinada pela equação linearizada e pela equação não linearizada.

$$\text{errorel}_i = \left| \frac{\text{var}_i - \text{var line}_i}{\text{var}_i} \right| \quad (4.71)$$

sendo var_i a i -ésima variável determinada pela equação não linearizada; varline_i a i -ésima variável determinada pela equação linearizada.

5. ESTUDO DE CASO

Com o intuito de verificar a adequação do modelo em aplicações práticas (facilidade no uso, tempo de processamento, etc), avaliando as alterações na resposta quanto às mudanças de prioridade de atendimento dos objetivos, este foi aplicado no estudo do comportamento quali-quantitativo dos reservatórios Epitácio Pessoa (mais conhecido como Boqueirão) e Argemiro Figueiredo (mais conhecido como Acauã) e no trecho do rio Paraíba entre os dois reservatórios.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

A área de estudo está localizada na bacia hidrográfica do rio Paraíba (Figura 5.1), no Estado da Paraíba. Em razão da grande extensão geográfica e das diversidades de clima e características físicas, a bacia apresenta as seguintes sub-divisões: Sub-bacia do rio Taperoá e Regiões do Alto Curso do rio Paraíba, Médio Curso do rio Paraíba e Baixo Curso do rio Paraíba.

Como pode ser observado na Figura 5.1, os reservatórios em estudo delimitam a Região do Médio Curso do rio Paraíba e contém o trecho do rio Paraíba considerado no estudo.

Segundo informações do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (AESAs, 2010a) a Região do Médio Curso do rio Paraíba tem 3.760,65 km². O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSw'h', isto é, semi-árido quente, com temperaturas médias mínimas e máximas, respectivamente, variando entre 18 a 22°C e 28 a 31°C. A umidade relativa varia de 68% a 85%, com os valores máximos ocorrendo entre os meses de junho a agosto, e os mínimos, de novembro a janeiro. A insolação na bacia apresenta variações nos valores médios mensais de janeiro a julho, cuja duração efetiva do dia é de 7 a 8 horas diária, e de agosto a dezembro, da ordem de 8 a 9 horas diária. Os dados pluviométricos indicam precipitação média anual entre 600 a 1.100 mm, com chuvas predominantes de abril a julho. Os dados de evaporação, obtidos a partir de tanque classe A, variam entre 2.200 a 2.000 mm/ano.



Figura 5.1 – Subdivisões da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. (Fonte: AESA, 2010b)

Os solos predominantes na região são o Bruno não Cálculo de pouca espessura, Litólico, Solonetz Solodizado, Regossolo e Cambissolo. O relevo apresenta setores ondulados, forte ondulados e montanhosos. A vegetação natural predominante é a Caatinga hiperxerófila, hipoxerófila, floresta caducifólia e subcaducifólia (AESA, 2010a).

5.1.2. CARACTERIZAÇÃO HÍDRICA DO SISTEMA

A única seção transversal no trecho do rio Paraíba estudado correspondente a da estação fluviométrica Bodocongó (38860000) de responsabilidade da Agência Nacional das Águas – ANA e operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Em levantamento batimétrico realizado no dia 8 de outubro de 2009 constatou-se a seguinte seção transversal (Figura 5.2):

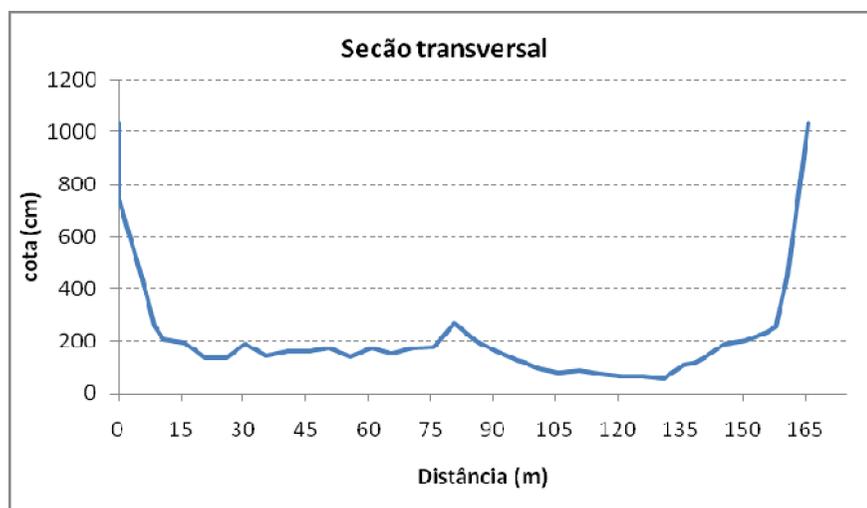


Figura 5.2 – Seção transversal do trecho do rio Paraíba estudado. (Fonte: HIDROWEB, 2010)

O trecho do rio Paraíba foi dividido em dois: Trecho 1 – trecho que vai do reservatório Epitácio Pessoa até a confluência com o Riacho de Bodocongó; Trecho 2 - trecho que vai da confluência com o Riacho de Bodocongó até o reservatório Argemiro Figueiredo. O comprimento longitudinal e a declividade dos trechos do rio Paraíba podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Comprimento longitudinal e a declividade dos trechos do rio Paraíba estudados.

Característica	Rio Paraíba	
	Trecho 1	Trecho 2
Comprimento longitudinal (km)	16,5	66,7
Declividade (m/km)	1,21	2,25

Fonte: AESA (2010c)

Utilizando a Fórmula de Manning, adotando um coeficiente de rugosidade para o rio igual a $n = 0,03$ (SILVA et al., 2007) e os dados da Tabela 5.1, ajustou-se, por meio de análise de regressão, o valor a área da seção transversal com vazão na seção transversal para cada trecho do rio, obtendo as seguintes equações para os trechos 1 e 2, respectivamente:

$$An_1 = 5,97(Qn_1)^{0,62} \quad (5.1)$$

$$An_2 = 4,93(Qn_2)^{0,62} \quad (5.2)$$

sendo An_1 a área da seção transversal do trecho 1; Qn_1 a vazão no trecho 1; Sendo An_2 a área da seção transversal do trecho 2 e Qn_2 a vazão no trecho 2.

O Açude Público Argemiro de Figueiredo (Figura 5.3) está localizado no município de Natuba, no limite entre as Regiões do Médio e do Baixo Cursos do rio Paraíba. Com uma capacidade de armazenamento de 253 milhões de metros cúbicos (2º maior reservatório da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba e o 3º maior do Estado) suas águas são utilizadas para o abastecimento público de diversos municípios das Regiões do Médio e do Baixo Cursos do rio Paraíba; para a prática de piscicultura intensiva com cerca de 15 tanques-redes, em média, colocadas de forma permanente; para o abastecimento rural das propriedades situadas nas margens do açude; na dessedentação animal e irrigação de pequenas áreas cultivadas nas margens do açude (VIEIRA, 2008).



Figura 5.3 – Reservatório Argemiro de Figueiredo (Acauã).

Um grande problema do reservatório é em relação à qualidade da água. Lins (2006), estudando as águas do reservatório entre agosto de 2004 a julho de 2005, concluiu que o reservatório está hipereutrofizado com a ocorrência de algas potencialmente tóxicas. Arruda (2009) conclui, em estudo realizado entre agosto de 2008 a agosto de 2009, que o referido reservatório se manteve eutrofizado durante todo o horizonte de estudo não sendo

recomendado a prática de piscicultura, sendo que a sazonalidade repercute nas características físicas, químicas e biológicas do reservatório.

O Açude Público Epitácio Pessoa (Figura 5.4) está localizado nos municípios de Boqueirão, Barra de São Miguel e Cabaceiras, no limite entre as Regiões do Alto e do Médio Curso do rio Paraíba. Com uma capacidade de armazenamento de 411 milhões de metros cúbicos (maior reservatório da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba e o 2º maior do Estado) as águas do reservatório são utilizadas para o abastecimento público de diversos municípios da Sub-bacia do rio Taperoá, e das Regiões do Médio e do Alto Cursos do rio Paraíba; para a perenização do trecho do rio Paraíba a jusante do reservatório; para o abastecimento rural das propriedades situadas nas margens do açude, para a dessedentação animal; para a irrigação praticada por concessionários do DNOCS e particulares nas margens do açude; para a prática de piscicultura extensiva e intensiva; para o turismo e o lazer (DNOCS, 2007 apud VIEIRA, 2008).

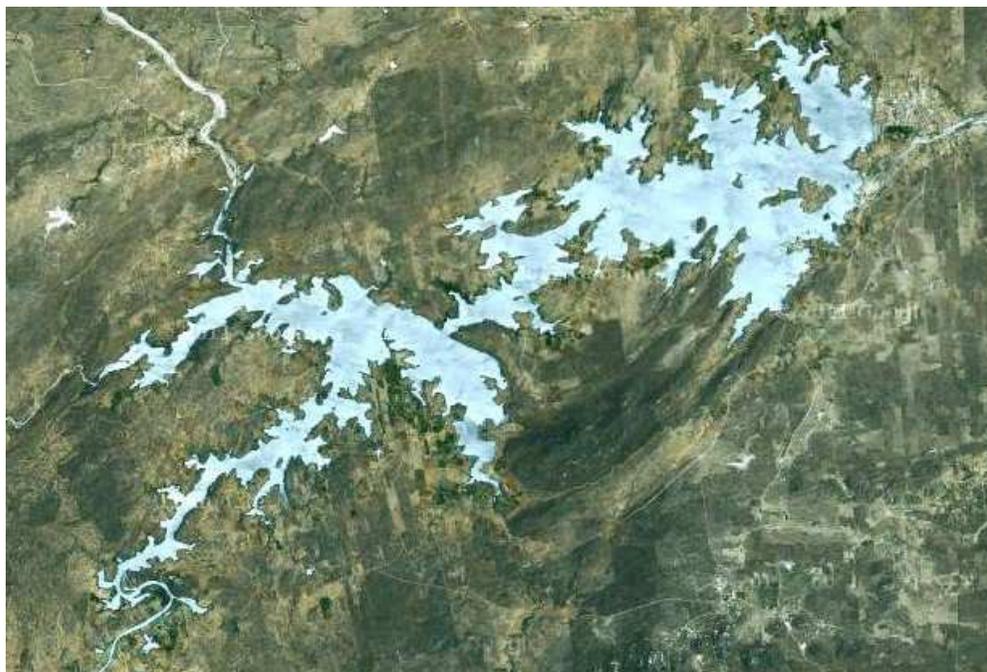


Figura 5.4 – Reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão) – Fonte: Google Maps

Durante a ocorrência da seca de 1997-1999, diante da ameaça de colapso total do abastecimento urbano, representado pelo baixo nível a que ficou reduzido o volume d'água acumulado no açude Epitácio Pessoa, foi necessário a implantação de um regime de racionamento da distribuição de água, que teve início no segundo semestre de 1998 e prolongou-se até os primeiros meses do ano 2000. Ao racionamento seguiu-se a suspensão,

por medida judicial, da irrigação que vinha sendo praticada, sem nenhum controle técnico, nas margens do açude (RÊGO et al., 2000) e o fechamento da comporta de descarga de fundo. Porém, depois de sucessivas cheias, a partir do ano de 2004, há uma pressão para o retorno das atividades agrícolas em torno do açude.

5.2. DADOS DO SISTEMA

5.2.1. DEMANDAS HÍDRICAS

As demandas hídricas consideradas na área de estudo dizem respeito ao abastecimento urbano de 27 cidades através de adutoras nos reservatórios, irrigação de uma área de 1020 hectares nas margens do reservatório Epitácio Pessoa; a perenização do rio Paraíba a jusante do reservatório Argemiro Figueiredo; e a diluição das cargas poluidoras. A Figura 5.5 apresenta o layout do sistema estudado.

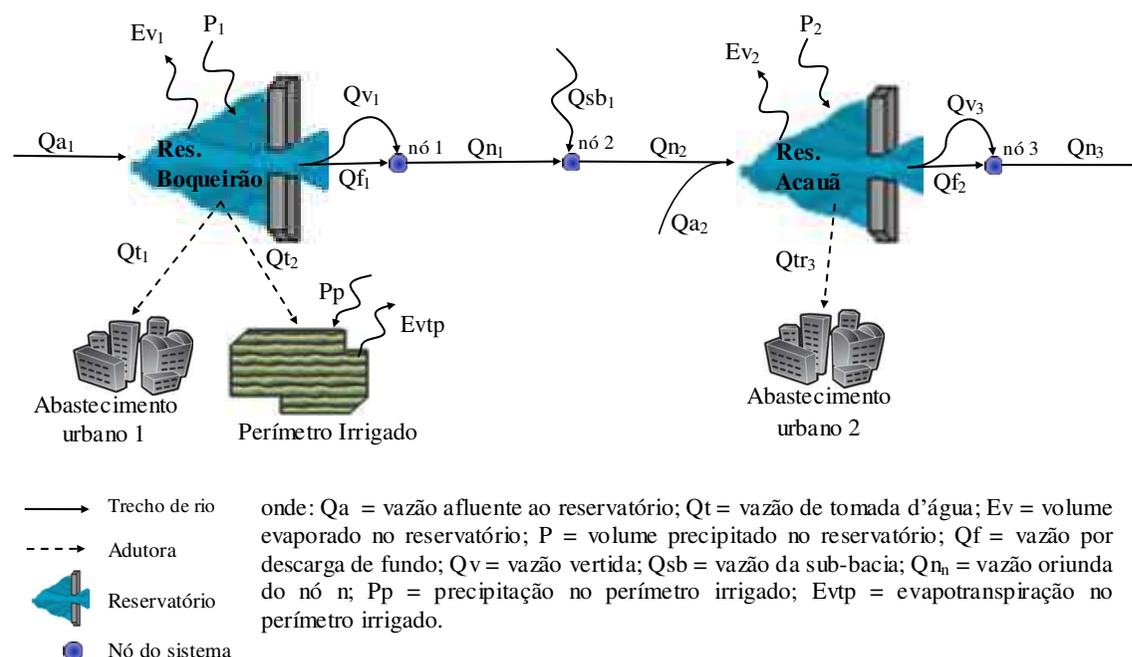


Figura 5.5 – Layout do sistema estudado.

O abastecimento urbano das 27 cidades é realizado através dos sistemas adutores Boqueirão e Cariri no reservatório Epitácio Pessoa e das adutoras Acauã – ramal norte, Acauã – ramal leste e Acauã – ramal oeste no reservatório Argemiro Figueiredo (Figura 5.6).

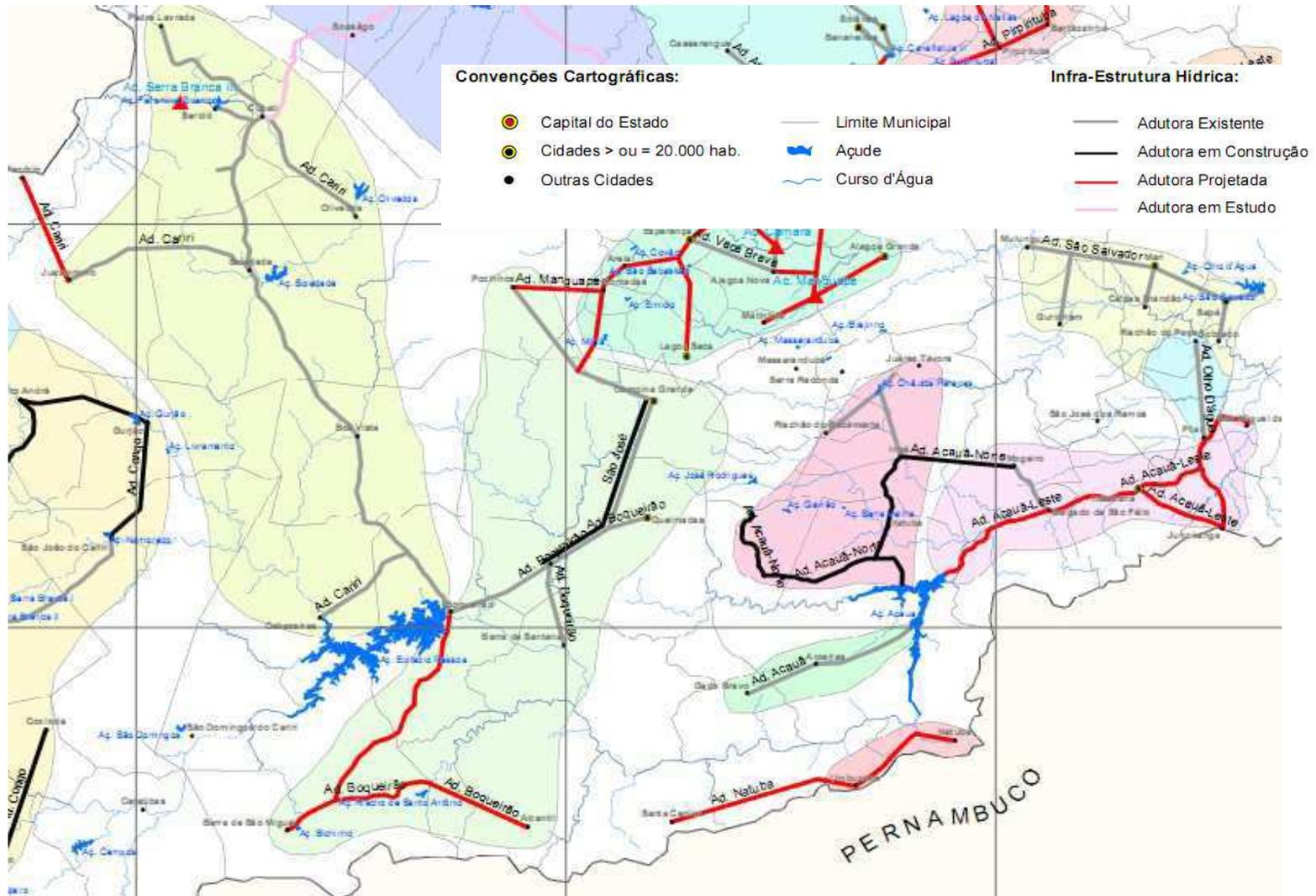


Figura 5.6 – Cidades atendidas pelas adutoras do sistema. (Fonte: AESA, 2009a)

Para a estimativa das demandas das adutoras consideradas, primeiramente, foi realizado um estudo, através de análise de regressão, do crescimento populacional das cidades atendidas e com previsão de atendimento pelas adutoras, com base nos dados dos censos de 1980, 1991, 1996, 2000 e 2007 realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, 2009). Os valores da população das cidades para o horizonte de estudo se encontram no Apêndice A.

A estimativa da demanda média da j -ésima adutora ($Qd_{j,n}$) foi calculada pela seguinte equação:

$$Qd_{j,n} = \sum_i Pop_{i(j),n} \cdot QPC_j \quad (5.3)$$

sendo $Pop_{i(j),n}$ a população da i -ésima cidade atendida pela adutora j no ano n , QPC_j a quota per capita de água da adutora j .

A quota per capita de água das Adutoras de Boqueirão e do Cariri foi determinada através dos dados fornecidos pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA), através da Gerencia da Divisão de Controle Operacional, Regional Borborema considerando as demandas do ano de 2007, sendo incluindo o consumo para a lavagem dos filtros, retiradas por caminhões pipas e as perdas por distribuição (ARAGÃO, 2008). Para as adutoras Acauã – ramal norte, Acauã – ramal leste e Acauã – ramal oeste a quota per capita de água foi obtida do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (AESAs, 2010a). As cidades atendidas e com previsão de atendimento pelas adutoras e os valores das quotas per capita de água podem ser observados na Tabela 5.2. Os valores das demandas das adutoras para o horizonte de estudo se encontram no Apêndice B.

Tabela 5.2 – Sistemas adutores do sistema estudado.

Sistema Adutor	Cidades atendidas	Quota per capita (l/had/dia)
Boqueirão	Campina Grande, Queimadas, Caturité, Pocinhos, Barra de Santana, Riacho de Santo Antônio, Barra de São Miguel, Alcantil*.	236,7
Cariri	Boqueirão, Cabaceiras, Boa Vista, Soledade, Seridó, Olivedos, Juazeirinho, Cubati, Pedra Lavrada, Tenório*.	217,5
Acauã – ramal norte	Itatuba, Fagundes, Ingá, Juarez Tavorá, Mogeiro, Riachão do Bacamarte	192,0
Acauã – ramal leste	Itabaiana, Juripiranga, Salgado de São Felix, Pilar, São Miguel de Taipu.	193,0
Acauã – ramal oeste	Gado Bravo, Aroeiras	200,0

Para a avaliação das demandas hídricas de irrigação foi estabelecido um plano de cultivo das culturas agrícolas a serem cultivadas na área irrigada considerado no estudo com base nas suas aptidões agrícolas obtidos de estudos de viabilidade realizados anteriormente e, também, considerando os sistemas de irrigação já implantados.

Segundo AIAB – Associação dos Irrigantes do Açude Boqueirão (ALENCAR, 2009) as culturas agrícolas previstas a serem cultivadas na safra e entressafra são: tomate, pimentão, feijão, repolho, alface e cebola; e no ano todo: banana, goiaba e limão.

O plano de cultivo e seus respectivos coeficientes de cultivo (kc) são mostrados na Tabela 5.3. Os valores de kc para as culturas agrícolas perenes foram considerados na fase de produção.

Tabela 5.3 – 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				
Tomate		0,45	0,84	1,15	0,95			0,45	0,84	1,15	0,95		
Pimentão		0,80	0,80	1,00	0,96			0,80	0,80	1,00	0,96		
Feijão		0,58	1,10	0,57				0,58	1,10	0,57			
Repolho		0,55	0,84	0,95				0,55	0,84	0,95			
Alface		0,48	0,60	0,98				0,48	0,60	0,98			
Cebola		0,75	0,85	0,95	0,72			0,75	0,85	0,95	0,72		
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	
Goiaba	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
Limão	0,83	0,83	0,78	0,78	0,78	0,75	0,75	0,75	0,75	0,78	0,78	0,78	

Na Tabela 5.4 são apresentados dados característicos das culturas agrícolas adotados neste estudo. Os valores da produtividade das culturas agrícolas (Prod), custo de produção (Cprod) e mão-de-obra requerida (Hdc) foram retirados Manual de Orçamento Agropecuário do Banco do Nordeste S/A (2006). O preço médio de comercialização (Prc) foi obtido da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas – EMPASA. (EMPASA, 2009) para o ano de 2009.

Os dados referentes ao sistema de irrigação (Tabela 5.5), sua eficiência de distribuição (Esis) e requerimento de pressão (ΔH) estão de acordo com Doorenbos e Kassam (2000) e Gomes (1999). A eficiência de aplicação (Eap) segue a disposta na Resolução nº 687 da Agência Nacional de Águas (ANA, 2004).

Tabela 5.4 – Dados característicos das culturas.

Culturas agrícolas	Prod (kg/ha/ano)	Prc (R\$/kg)	Cprod (R\$/ha/ano)	Hdc (diárias/ha/ano)	Sistema de irrigação
Sazonais					
Tomate (s)	50.000	1,83	10.631,00	367	Gotejamento
Tomate (es)		0,47			
Pimentão (s)	20.000	0,70	7.162,00	192	Gotejamento
Pimentão (es)		0,42			
Feijão(s)	1.800	1,20	2.408,00	61	Sulco
Feijão (es)		1,17			
Repolho (s)	25.000	0,88	4.984,00	142	Gotejamento
Repolho (es)		0,35			
Alface (s)	14.5000	0,42	5.482,00	196	Sulco
Alface (es)		0,21			
Cebola (s)	15.000	1,16	6.394,00	211	Gotejamento
Cebola (es)		1,16			
Perenes					
Banana	40.000	0,49	4.909,00	213	Microaspersão
Goiaba	16.000	0,87	4.276,00	155	Microaspersão
Limão	30.000	0,96	4.082,00	146	Microaspersão

s – safra; es – entressafra

Tabela 5.5 - Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas agrícolas.

Sistema de irrigação	Esis	Eap	$\Delta H(mca)$
Microaspersão	0,90	0,85	15
Gotejamento	0,90	0,90	10
Sulco	0,90	0,50	0

Assumiu-se que o preço da água bruta para irrigação é de R\$5,00/1.000 m³ de água segundo estudos do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (AESA, 2010a) e o preço de energia elétrica de R\$ 0,12664/kWh, considerado fora de ponta segundo dados da concessionária local (ENERGISA, 2009). Estima-se que o sistema de bombeamento tenha uma eficiência de 75%. Para cada uma das culturas agrícolas foi designada uma área máxima (Tabela 5.6), não sendo 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 5.6 – Áreas máximas das culturas agrícolas.

Culturas agrícolas	Área máxima (ha)
Tomate, pimentão, feijão, repolho	150
Alface, cebola, e goiaba	100
Banana	350

Para a determinação da necessidade de lixiviação dos sais ($LR_{j,k,t}$) dissolvidos que se acumulam no solo cultivado utilizou as equações propostas por Rhoades e Merrill (1976 apud GOMES, 1999):

- Para irrigação por inundação ou aspersão de baixa frequência:

$$LR_{j,k,t} = \frac{CEa_{k,t}}{5 \cdot CE_j - CEa_{k,t}} \quad (5.4)$$

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

$$LR_{j,k,t} = \frac{CEa_{k,t}}{5 \cdot CE_j} \quad (5.5)$$

sendo $CEa_{k,t}$ a condutividade elétrica da água de irrigação aduzida para o perímetro irrigado k durante o mês t (em dS/m), medida a 25 °C; CE_j a condutividade elétrica do extrato de solo saturado (em dS/m) e que acarreta uma determinada redução no rendimento potencial da cultura agrícola 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 agrícola j para a aplicação da Equação 2 e de 100% para a aplicação da Equação 3.

A condutividade elétrica das águas do reservatório Boqueirão, segundo dados da SUDEMA (2010), é de cerca 0,43125 dS/m. A condutividade elétrica do extrato de solo saturado que acarreta uma determinada redução no rendimento potencial da cultura agrícola foi obtida de Ayers e Westcot (1999).

A vazão mínima a ser liberada pelo reservatório Acauã para a perenização do trecho do rio Paraíba a jusante do mesmo, segundo informações da AESA, é de cerca 1 m³/s.

5.2.2. PRECIPITAÇÃO

Para o cálculo da precipitação direta nos reservatórios e da precipitação efetiva nos perímetros irrigados foram utilizados valores precipitados nos postos pluviométricos (Tabela 5.7) mais próximos dos reservatórios e o perímetro irrigado.

Tabela 5.7 – Postos pluviométricos utilizados.

	Posto Utilizado			
	Nome	Código	Longitude	Latitude
Res. Boqueirão	Boqueirão	00736023	36°07'W	07°29'S
Res. Acauã	Aroeiras	00735029	35°41'W	07°31'S
Perímetro Irrigado	Cabaceiras	00736022	36°17'W	07°36'S

Fonte: SUDENE (1990)

A média mensal dos valores da precipitação nos postos pluviométricos pode ser observada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Precipitação média mensal dos postos utilizados.

Posto	Precipitação mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Boqueirão	27,9	53,0	79,2	96,1	51,2	55,9	56,4	23,6	12,8	5,4	5,4	17,0
Aroeiras	34,5	45,4	88,6	104,6	73,3	85,6	103,3	41,0	20,6	10,2	10,1	24,6
Cabaceiras	15,1	37,8	58,2	79,6	38,8	39,0	35,7	13,4	4,6	2,8	2,9	9,7

Fonte: SUDENE (1990)

5.2.3. EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A estimativa dos volumes médios mensais evaporados em reservatórios e da evapotranspiração das culturas agrícolas é obtida pela multiplicação da lâmina de evaporação pela área do espelho d'água e pelo coeficiente de cultivo da cultura agrícola, respectivamente. Não se obtendo, em geral, medições locais de evaporação, pode-se lançar mão do uso de registro de dados existente em regiões próximas aos reservatórios e perímetros irrigados, desde que seja resguardada a semelhança das condições fisiográficas. Para representar a evaporação é comum, na prática, o uso de dados do Tanque Classe A, onde se aplica um fator de correção, chamando de coeficiente de tanque. Os valores desse fator podem variar entre 0,7 e 1,0, sendo mais provável estar entre os valores de 0,80 e 0,85 (LARAQUE, 1989 apud LIMA, 2004).

Oliveira et. al. (2005) estudando os valores do coeficiente de tanque para a região do sertão e cariri paraibano, verificaram que o uso do valor 0,7 ao invés de corrigir contribui para subestimar a evaporação obtida no Tanque “Classe A” durante os períodos frios e úmidos. Os autores propuseram diferentes valores mensais do coeficiente de tanque para a região do sertão e cariri paraibano (mais precisamente na cidade de Patos e Boqueirão, respectivamente).

Nesse trabalho foram utilizados dados observados do tanque “Classe A” dos postos climatológicos de Campina Grande (para o reservatório Acauã) e São João do Cariri (para o reservatório Boqueirão e a área irrigada). Os valores mensais do coeficiente de tanque kt para os reservatórios foram estimados por Oliveira et al. (2005) para a região do cariri paraibano. Os valores mensais do coeficiente do tanque kp para a área irrigada foram estimados de acordo com a metodologia de Doorenbos e Pruitt (1976 apud GOMES, 1999) considerando os dados da mensais da velocidade do vento e a umidade relativa do ar da estação climatológica de São João do Cariri.

Os dados de evaporação média mensal de cada posto e dos coeficientes de tanque kt e kp podem ser observados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Dados de evaporação média mensal do tanque “Classe A” e do coeficiente kt e kp .

Posto Climatológico	Evaporação média mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Campina Grande ¹	147,1	132,5	108,1	88,3	102,5	64,9	73,0	105,1	126,1	153,6	151,2	165,0
São J. do Cariri ²	228,5	202,4	200,1	174,2	153,6	119,4	128,8	159,6	197,2	250,5	238,6	238,0
kt^3	0,78	0,80	0,78	0,89	0,93	0,92	0,87	0,82	0,76	0,79	0,80	0,80
kp^4	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60

Fonte: ¹Normais climatológicas (BRASIL, 1992); ²Aragão (2008); ³Oliveira et. al. (2005); ⁴Doorenbos e Pruitt (1976 apud GOMES, 1999)

5.2.4. VAZÕES AFLUENTES

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios e nós do sistema foram fornecidos pela AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. A série sintética de vazões médias mensais foi gerada pelo o modelo hidrológico chuvaxvazão MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável), calibrado no posto fluviométrico Poço de Pedras, a partir de dados de precipitação totais diários, com extensão de 59 anos (1933 a 1991).

A média mensal dos valores da vazão afluente nos reservatórios e nós do sistema pode ser observada na Tabela 5.1.

Tabela 5.10 – Média mensal dos valores da vazão afluente nos reservatórios e nós do sistema.

	Vazões médias mensais (m ³ /s)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Res. Boqueirão	0,42	1,63	8,76	15,02	11,74	4,16	2,11	0,14	0,01	0,10	0,07	0,32
Res. Acauã	0,18	0,38	1,35	2,83	3,20	3,61	5,19	2,53	0,10	0,19	0,01	0,06
Rch. Bodocongó	0,08	0,18	0,64	1,35	1,52	1,71	2,47	1,20	0,05	0,09	0,01	0,03
Rio Paraíba –trecho 1	0,03	0,06	0,22	0,45	0,51	0,58	0,83	0,40	0,02	0,03	0,00	0,01

5.2.5. DADOS ESTRUTURAIS DOS RESERVATÓRIOS ESTUDADOS

Os dados das curvas cota-área-volume do reservatório Boqueirão foram obtidos do levantamento batimétrico da bacia hidráulica do mesmo (SEMARH, 2004 apud ALENCAR, 2009). Os dados do reservatório Acauã foram fornecidos pela AESA.

A Tabela 5.11 mostra a capacidade máxima de armazenamento (volume máximo) dos reservatórios fornecido pela AESA e o volume morto, considerado como sendo 11% da capacidade de armazenamento.

Tabela 5.11 – Dados dos reservatórios estudados.

Reservatório	Volume (hm ³)	
	Máximo	Morto
Boqueirão	411,69	45,93
Acauã	253,10	27,50

A vazão vertida máxima projetada para os vertedouros de cada reservatório foi fornecida pela AESA e pode ser observada na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Vazão vertida máxima dos vertedores dos reservatórios estudados.

Reservatório	Vazão vertida máxima projetada (m ³ /s)
Boqueirão	2610,0
Acauã	4000,0

A Tabela 5.13 apresenta os dados do coeficiente de vazão de descarga de fundo (Cf), diâmetro da seção transversal (Df), da cota de jusante da geratriz inferior (Hfs) e da cota de entrada (Hfe) do tubo de descarga de fundo de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 5.13 – Características físicas do tubo de descarga de fundo dos reservatórios estudados.

Reservatório	Cf ¹	Df ² (m)	Hfs (m)	Hfe (m)
Boqueirão	0,60	0,75	361	361
Acauã	0,60	2,00	108	108

Fonte: ¹DAEE (2005), ²AESA

5.2.6. CARGAS POLUIDORAS

As fontes poluídas consideradas no sistema dizem respeito aos esgotos domésticos provenientes dos centros urbanos lançadas nos nós e nos reservatórios estudados como mostra a Figura 5.7.

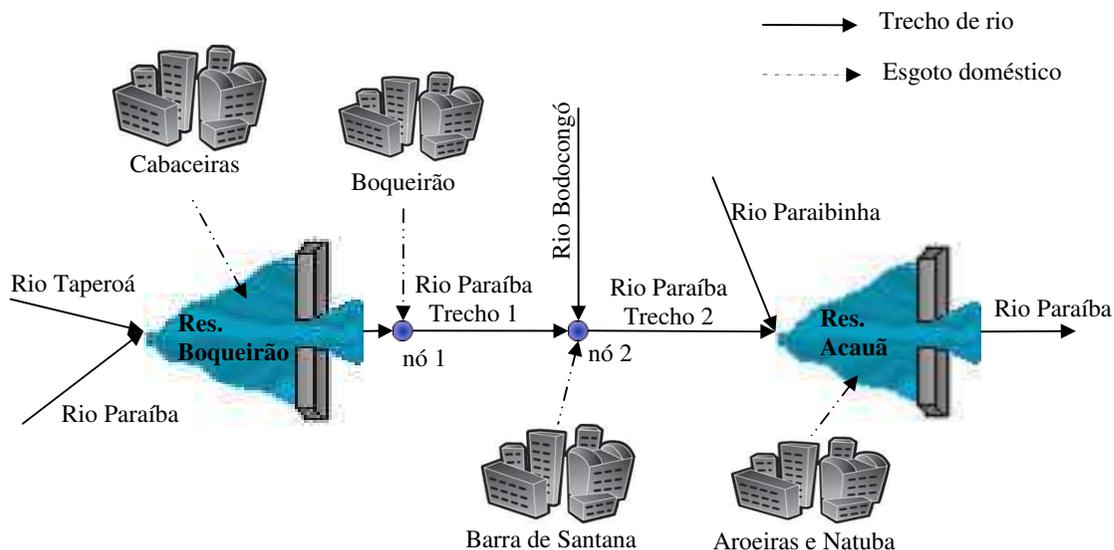


Figura 5.7 – Fontes poluidoras do sistema.

A estimativa da vazão média de esgoto da i -ésima cidade (Q_{esg_i}) foi calculada pela seguinte equação:

$$Q_{\text{esg}_{i,n}} = Q_{\text{dc}_{i,n}} \cdot R \quad (5.6)$$

sendo $Q_{\text{dc}_{i,n}}$ a demanda de abastecimento da i -ésima cidade no ano n , R coeficiente de retorno esgoto/água. Considerado, neste trabalho, igual a 0,8 (Von Sperling, 1996).

A concentração do parâmetro DBO proveniente dos esgotos domésticos ($\text{DBO}_{\text{esg}_{i,n}}$) foi estimada pela Equação 5.6 (VON SPERLING, 1996).

$$\text{DBO}_{\text{esg}_{i,n}} = \frac{\text{Pop}_{i,n} \cdot \text{CPC}_i}{Q_{\text{esg}_{i,n}}} \quad (5.7)$$

sendo $\text{Pop}_{i,n}$ a população da i -ésima cidade no ano n , CPC_i a carga per capita do parâmetro DBO. Considerado, neste trabalho, igual a 54 g/hab/dia (VON SPERLING, 1996).

Os valores mensais da concentração do parâmetro DBO (Tabela 5.14) oriundos do riacho de Bodocongô e do trecho 1 do rio Paraíba foram obtidos por análise de regressão com base nos dados da Superintendência de Administração do Meio Ambiente – SUDEMA, órgão ambiental do Estado da Paraíba (SUDEMA, 2009). Os valores do trecho 2 do rio Paraíba e do rio Paraibinha foram obtidos de Lins (2006).

Tabela 5.14 – Valores da concentração mensal do parâmetro DBO afluente aos reservatórios e nós do sistema estudado.

Riacho/Rio	Concentração mensal do parâmetro DBO (mg/l)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bodocongó	7,0	6,8	5,2	5,1	1,6	2,4	2,9	3,8	4,1	6,0	6,5	6,9
Paraíba –trecho 1	8,8	7,6	7,9	2,9	1,0	1,0	2,1	3,9	4,9	8,3	8,7	9,1
Paraíba –trecho 2	6,9	4,6	6,7	3,2	3,3	3,0	5,0	4,8	5,5	6,8	6,2	3,1
Paraibinha	4,1	7,0	5,6	2,9	4,2	4,0	3,0	4,9	4,0	5,4	5,8	5,1

As águas do rio Taperoá e da Região do Alto Curso do rio Paraíba são consideradas limpas, sendo utilizado o valor de 2 mg/l (KLEIN, 1962 apud VON SPERLING, 2007).

A concentração de saturação do OD (OD_{sat_t}) nos nós e reservatórios do sistema no mês t foi calculada pela equação (PÖPEL, 1979 apud VON SPERLING, 2007):

$$OD_{sat_t} = (14,652 - 4,1022 \times 10^{-1} \cdot T_t + 7,9910 \times 10^{-3} \cdot T_t^2 - 7,7774 \times 10^{-5} \cdot T_t^3) \cdot f_H \cdot \gamma \quad (5.8)$$

sendo T_t a temperatura da água no mês t (°C); f_H o fator de correção da concentração de saturação de OD pela altitude e γ fator de correção na solubilidade do oxigênio pela salinidade.

A influência da altitude pode ser calculada pela seguinte relação (QASIM, 1985 apud VON SPERLING, 2007):

$$f_H = 1 - \frac{alt}{9450} \quad (5.9)$$

sendo alt o valor da altitude (m)

A influência de sais dissolvidos pode ser computada pela seguinte fórmula empírica (PÖPEL, 1979 apud VON SPERLING, 2007):

$$\gamma = 1 - 9 \times 10^{-6} \cdot C_{sal} \quad (5.10)$$

sendo C_{sal} a concentração de sais dissolvidos (mg Cl⁻/L)

Os valores da temperatura média mensal da água nos reservatórios e trechos de rio (SUDEMA, 2010) podem ser observados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Temperatura média mensal da água.

Reservatório/Rio	Temperatura média da água (°C)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Res. Acauã	28,3	30,7	33,0	29,5	28,0	27,6	27,0	27,5	28,0	27,5	26,8	26,0
Res. Boqueirão	29,1	29,5	30,0	28,3	28,0	27,2	26,4	25,5	24,7	27,7	28,2	28,6
Paraíba –trecho 1	28,3	28,7	29,0	28,0	28,0	27,3	26,5	25,8	25,0	27,3	27,6	28,0
Paraíba –trecho 2	28,8	29,7	30,5	28,5	28,0	27,3	26,5	25,8	25,0	26,3	27,1	28,0

Os valores da altitude e da concentração média de sais dissolvidos na água (SUDEMA, 2010) nos reservatórios e nos nós estudados podem ser observados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Valores da altitude e concentração de sais dissolvidos nos pontos estudados.

	Altitude (m)	Concentração de sais (mg Cl/L)
Res. Boqueirão	404	118,6
Res. Acauã	200	297,5
Nó 1	370	118,6
Nó 2	350	957,5

Os valores mensais da concentração do parâmetro OD (Tabela 5.17) oriundos do riacho de Bodocongó e do trecho 1 do rio Paraíba foram obtidos por análise de regressão com base nos dados da Superintendência de Administração do Meio Ambiente – SUDEMA, órgão ambiental do Estado da Paraíba (SUDEMA, 2010). Por não dispor de dados confiáveis, as concentrações do parâmetro OD provenientes do trecho 2 do rio Paraíba, do rio Paraibinha, do rio Taperoá e da Região do Alto Curso do rio Paraíba foram consideradas com sendo 70% do valor da concentração de saturação do OD nos respectivos trechos.

Tabela 5.17 – Valores da concentração mensal do parâmetro OD afluente aos reservatórios e nós do sistema estudado.

Riacho/Rio	Concentração mensal do parâmetro OD (mg/l)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bodocongó	7,9	6,3	6,4	7,9	8,0	8,2	8,6	8,3	8,3	7,8	7,0	6,5
Paraíba –trecho 1	6,7	5,5	5,5	7,3	7,0	7,9	8,4	8,3	8,3	7,4	6,8	6,2

Considerou as concentrações iniciais dos parâmetros DBO e OD dos reservatórios (Tabela 5.18) como sendo a média histórica dos dados da SUDEMA (2010) para reservatórios estudados.

Tabela 5.18 – Valores da concentração inicial dos parâmetros DBO e OD dos reservatórios.

Reservatório	Valor inicial da concentração do parâmetro (mg/l)	
	DBO	OD
Acauã	4,6	8,8
Boqueirão	1,1	6,8

Os valores do coeficiente de decomposição da DBO (kd_{20}), a 20 °C, dos reservatórios e trechos de rio, foram considerados 0,001 dia⁻¹ e 0,5 dia⁻¹, respectivamente. Considerou-se o valor do coeficiente de sedimentação da DBO (ks_{20}), a 20 °C, dos reservatórios igual a zero e dos trechos de rio igual 0,1 dia⁻¹. Os valores do coeficiente de desoxigenação da DBO ($k1_{20}$), a 20 °C, nos trechos de rio foi considerado igual a 0,35 dia⁻¹ (VON SPERLING, 2007).

O efeito da temperatura nos valores dos coeficientes de decomposição, de sedimentação e de desoxigenação da DBO foi considerado pelas seguintes equações (EPA, 1987 apud VON SPERLING, 2007):

$$k1_t = k1_{20} \cdot 1,047^{T_t-20} \quad (5.11)$$

$$kd_t = kd_{20} \cdot 1,047^{T_t-20} \quad (5.12)$$

$$ks_t = ks_{20} \cdot 1,024^{T_t-20} \quad (5.13)$$

sendo $k1_t$, kd_t e ks_t , respectivamente, o coeficiente de desoxigenação da DBO, o coeficiente de decomposição da DBO e o coeficiente de sedimentação da DBO no mês t.

Para o cálculo do coeficiente de reaeração ka_{20} , a 20° C, nos trechos do rio foi considerada a equação de Owens et al. apud Von Sperling (2007) devido a sua faixa de aplicabilidade ser mais adequada ao rio em análise.

$$ka_{20} = 5,3 \cdot v^{0,67} \cdot H^{-1,85} \quad (5.14)$$

sendo H a altura da lâmina d'água (m); v a velocidade do curso d'água (m/s).

Utilizando a Fórmula de Manning, adotando um coeficiente de rugosidade $n = 0,03$ (SILVA et al., 2007) e os dados da Tabela 5.2, ajustou-se, por meio de análise de regressão, o valor da altura da lâmina d'água e a velocidade do curso d'água com vazão em cada trecho do rio, obtendo as seguintes equações (Quadro 5.1) para cada trecho de rio analisado.

	Trecho 1	Trecho 2
Altura versus vazão	$H_1 = 0,05569(Qn_1)^{0,5694}$	$H_2 = 0,04671(Qn_2)^{0,5694}$
Velocidade versus vazão	$v_1 = 0,1909(Qn_1)^{0,3623}$	$v_2 = 0,2325(Qn_1)^{0,3623}$

Quadro 5.1 – Relação entre a altura da lâmina d'água e a velocidade do curso d'água com vazão em cada trecho do rio.

sendo H_1 a altura da lâmina d'água do trecho 1; H_2 a altura da lâmina d'água do trecho 2; v_1 a velocidade do curso d'água do trecho 1; v_2 a velocidade do curso d'água do trecho 2.

Substituindo as equações do Quadro 5.1 na fórmula de Owens et al, tem-se:

$$ka_{1_{20}} = 365,36 \cdot Qn_1^{-0,8112} \quad (5.15)$$

$$ka_{2_{20}} = 356,69 \cdot Qn_2^{-0,8112} \quad (5.16)$$

sendo $ka_{1_{20}}$ coeficiente de reaeração, a 20° C, do trecho 1; $ka_{2_{20}}$ coeficiente de reaeração, a 20° C, do trecho 2.

Considerou o valor de 0,23 (VON SPERLING, 2007) para o coeficiente de reaeração, a 20° C, dos reservatórios Boqueirão e Acauã

O efeito da temperatura no valor do coeficiente ka_{20} foi considerado pela equação (EPA, 1987 apud VON SPERLING, 2007):

$$ka_t = ka_{20} \cdot 1,024^{T_t - 20} \quad (5.17)$$

sendo ka_t o coeficiente de reaeração no mês t.

5.3. CENÁRIOS ESTUDADOS

Para a operação do sistema foram considerados os seguintes objetivos:

- minimização do déficit do atendimento das demandas de abastecimento urbano através das adutoras;
- minimização do déficit do atendimento do volume meta dos reservatórios;

- minimização do déficit do atendimento da vazão defluente mínima do reservatório Acauã;
- maximização da receita líquida oriunda da agricultura irrigada no perímetro irrigado;
- maximização da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada no perímetro irrigado;
- minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema;

Para permitir uma boa compreensão e avaliação do comportamento das respostas hídricas do modelo, quando submetido a mudanças de prioridade de atendimento dos objetivos, foram estabelecidos cenários que estão centrados em aspectos operacionais do sistema. Tais cenários serão descritos a seguir:

CENÁRIO 1: considerado o cenário padrão, é realizada a otimização do recursos hídricos do sistema sem considerar as concentrações dos parâmetros de qualidade de água;

CENÁRIO 2: é realizada a otimização do recursos hídricos do sistema considerando as concentrações dos parâmetros de qualidade de água, tendo a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada no perímetro irrigado maior prioridade do que a minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema;

CENÁRIO 3: é realizada a otimização dos recursos hídricos do sistema considerando as concentrações dos parâmetros de qualidade de água, tendo a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada no perímetro irrigado menor prioridade do que a minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema;

CENÁRIO 4: idêntico ao cenário 3, entretanto será implantado um sistema de tratamento de esgoto nas cidades consideradas.

O Quadro 5.2 apresenta as prioridades de cada objetivo para cada cenário analisado, sendo a demanda de abastecimento das adutoras considerada a 1ª prioridade e o volume meta dos reservatórios sempre a última prioridade em todos os cenários.

OBJETIVOS	PRIORIDADES			
	Cenário - C1	Cenário 2 – C2	Cenário 3 – C3	Cenário 4 – C4
Abastecimento Urbano	1º	1º	1º	1º
Perenização do rio	3º	4º	4º	4º
Receita líquida	2º	2º	3º	3º
Mão-de-obra	2º	2º	3º	3º
Volume meta	4º	5º	5º	5º
Qualidade de água	-	3º	2º	2º

Quadro 5.2 – Prioridades de atendimento dos objetivos do modelo em cada cenário.

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

5.3.1. CRITÉRIOS OPERACIONAIS

Os critérios operacionais idealizados para todos os cenários observaram os seguintes pressupostos:

- O período de estudo corresponde a 4 (quatro) anos, iniciando o processo de otimização no mês de janeiro.
- O volume inicial dos reservatórios Boqueirão e Acauã foram estabelecidos como sendo 70% e 72%, respectivamente, da capacidade dos mesmos, correspondente ao menor valor do dia 1 de janeiro da série histórica dos volumes de água dos reservatórios fornecida pela AESA;
- O volume do reservatório, ao final do período de estudo, 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;
- As capacidades das tomadas d'água destinadas ao abastecimento humano foram consideradas iguais as suas respectivas demandas.

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

- O calendário agrícola estabelecido para o perímetro irrigado é mantido invariável para todos os cenários estudados e as culturas agrícolas permanentes estão em plena capacidade de produção;

- No cálculo das demandas de irrigação considerou-se não existir dotação por capilaridade na zona radicular das plantas;
- Quanto à capacidade do sistema adutor para o perímetro irrigado considerou-se um sistema formado de 5 bombas com uma vazão de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ trabalhando 20 horas por dia.

Quanto aos parâmetros de qualidade de água:

- A seção transversal dos dois trechos do rio Paraíba foi considerada constante e igual à seção transversal do posto fluviométrico Bodocongó;
- Considerou-se uma lagoa facultativa para o tratamento de esgotos das cidades com uma eficiência média de remoção da matéria orgânica de 75%;
- Considerou-se as águas do rio Paraíba e dos reservatórios enquadradas na Classe 2, sendo as concentrações permitidas para OD e DBO de 5 mg/l.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos via um computador de processador Intel Core 2 Duo, 2.00 GHz e com 2 Gigabytes de memória RAM. Para os 4 anos de operação foram consideradas 3.813 variáveis de decisão e 834 equações de restrições de igualdade e 146 equações de restrições de desigualdade.

Na Tabela 6.1 encontram-se os valores de cada função objetivo, o tempo de processamento e o número de iterações para a obtenção da solução ótima para os cenários propostos.

Tabela 6.1 – Valores das funções objetivos, o tempo de processamento e a número de iterações para cada cenário.

OBJETIVO		Cenário 1 – C1	Cenário 2 – C2	Cenário 3 – C3	Cenário 4 – C4
MIN	DTD1	0.00	0,00	0,00	0,00
MIN	DTD2	0.00	0,00	0,00	0,00
MIN	VE	0.00	0,06	0,01	0,00
MIN	VM1	0.11	0,21	0,20	0,13
MIN	VM2	0.04	0,01	0,01	0,03
MAX	RL	0.96	0,96	0,44	0,96
MAX	MO	0.90	0,90	0,18	0,90
MIN	CDBORES1	-	0,00	0,00	0,00
MIN	CODRES1	-	0,00	0,00	0,00
MIN	CDBON1	-	0,07	0,01	0,00
MIN	CODN1	-	0,00	0,00	0,00
MIN	CDBON2	-	0,00	0,00	0,00
MIN	CODN2	-	0,00	0,00	0,00
MIN	CDBORES2	-	0,00	0,00	0,00
MIN	CODRES2	-	0,00	0,00	0,00
Tempo (s)		5	64	10	15
Iterações		4	36	8	10

DTD1 e DTD2 - minimização do déficit do atendimento das adutoras dos reservatórios Boqueirão e Acauã, respectivamente; VE - minimização do déficit do atendimento da vazão defluente mínima do reservatório Acauã; VM1 e VM2 - do déficit do atendimento do volume meta dos reservatórios Boqueirão e Acauã, respectivamente; RL - maximização da receita líquida oriunda da agricultura irrigada na área irrigada; MO - maximização da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada na área irrigada; CDBORES1 e CDBORES2 minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros minimização do déficit do atendimento das concentrações do parâmetro de qualidade de água DBO nos reservatórios Boqueirão e Acauã, respectivamente; CODRES1 e CODRES2 minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros minimização do déficit do atendimento das concentrações do parâmetro de qualidade de água OD nos reservatórios Boqueirão e Acauã, respectivamente; CDBON1 e CDBON2 minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros minimização do déficit do atendimento das concentrações do parâmetro de qualidade de água DBO nos nós 1 e 2, respectivamente; CODN1 e CODN2 minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros minimização do déficit do atendimento das concentrações do parâmetro de qualidade de água OD nos nós 1 e 2, respectivamente.

Analisando os valores da Tabela 6.1 tem-se que as funções objetivo RL, MO e CDBON1 nos cenários 2 e 3 apresentam valores melhores nos cenários onde seus respectivos objetivos têm maior prioridade de atendimento, ou seja, no cenário onde a maximização da receita líquida e da mão de obra oriunda da atividade agrícola na área irrigada teve maior prioridade do que a minimização do valor da concentração do parâmetro de qualidade de água DBO no nó 1 (cenário 2) o valor das funções objetivo RL e MO é nitidamente melhor do que no cenário onde ocorre o inverso (cenário 3), no qual o valor da função objetivo CDBON1 é melhor do que o valor no cenário 2, ficando evidenciada, assim, a capacidade do modelo em realizar análises multiobjetivo.

Observa-se na Tabela 6.1 que as funções objetivo RL e MO apresentam valores iguais nos cenários 1, 2 e 4. No cenário 1 não há preocupação com os valores das concentrações dos parâmetros de qualidade de água, assim a disponibilidade hídrica do sistema, depois de suprir as demandas de abastecimento urbano, foi utilizada para atender as demandas hídricas da área irrigada. Fato também ocorrido no cenário 2, que apesar da consideração dos valores das concentrações dos parâmetros de qualidade de água, a maximização da receita líquida e da mão de obra oriunda da atividade agrícola na área irrigada tem maior prioridade de atendimento do que o atendimento das concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema.

O cenário 3 apresentou os menores valores das funções objetivo RL e MO. Essa mudança de comportamento ocorreu devido ao fato que, nesse cenário, o atendimento das concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema tem maior prioridade do que a maximização da receita líquida e da mão de obra oriunda da atividade agrícola na área irrigada e não há a implantação de um sistema de tratamento de esgotos nas cidades consideradas. Assim, a disponibilidade hídrica do sistema, depois de suprir as demandas de abastecimento urbano, foi utilizada para atender as concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema. Deste modo não houve disponibilidade hídrica suficiente para suprir as demandas hídricas da área irrigada.

6.1. CENÁRIO 1

Neste cenário é realizada a otimização dos recursos hídricos do sistema sem considerar as concentrações dos parâmetros de qualidade de água.

A Figura 6.1 apresenta o atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano através das adutoras nos reservatórios. Observa-se que as demandas foram atendidas sem apresentarem falhas ao longo dos 4 anos de operação.

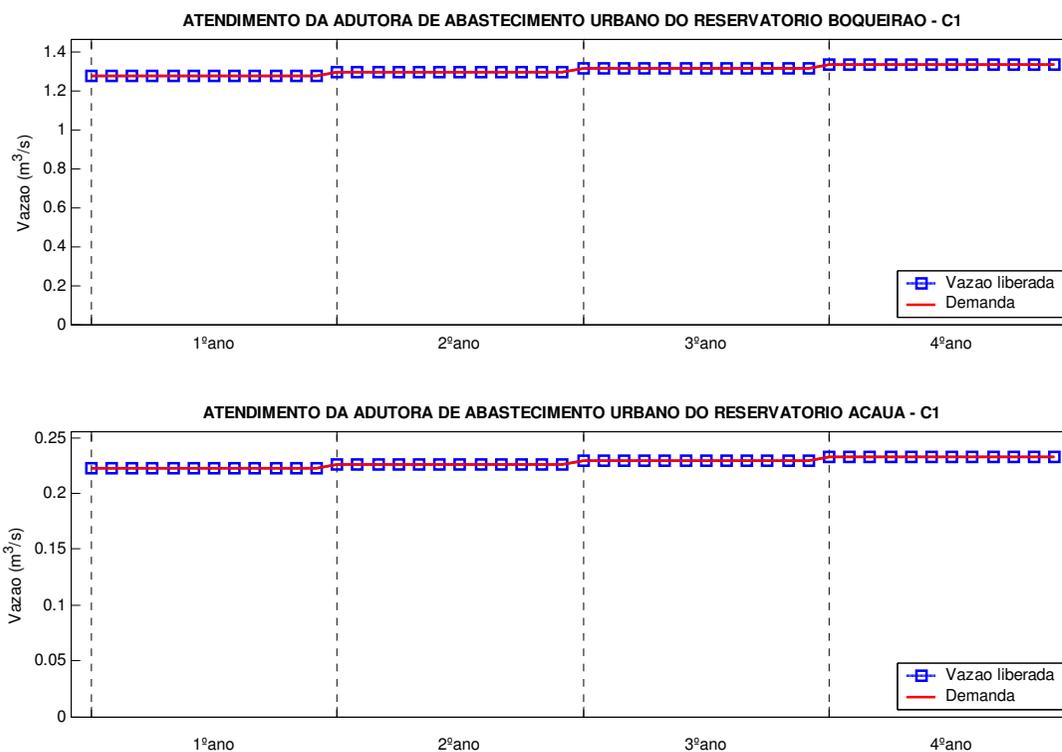


Figura 6.1 – Atendimento das demandas de abastecimento urbano no cenário 1.

A Figura 6.2 apresenta o volume de água dos reservatórios nos 4 anos estudados para o cenário 1. Observa-se que o volume de água armazenado no reservatório apresenta comportamento característico, diminuem entre agosto a janeiro (meses com menores vazões afluentes) aumentando na estação chuvosa (entre abril a maio). O volume final do reservatório é maior que o volume inicial proposto garantindo assim a sustentabilidade hídrica dos reservatórios para o período estudado.

Tem-se uma queda acentuada do volume de água do reservatório no 2º e 3º ano, principalmente no reservatório Boqueirão, chegando ao valor de 159,9 hm³ no reservatório Boqueirão (39% da capacidade de acumulação do reservatório) e 172 hm³ no reservatório Acauã (68% da capacidade de acumulação do reservatório). Isso se deve ao fato da pouca afluência aos reservatórios nesse período como pode ser observado na Figura 6.3.

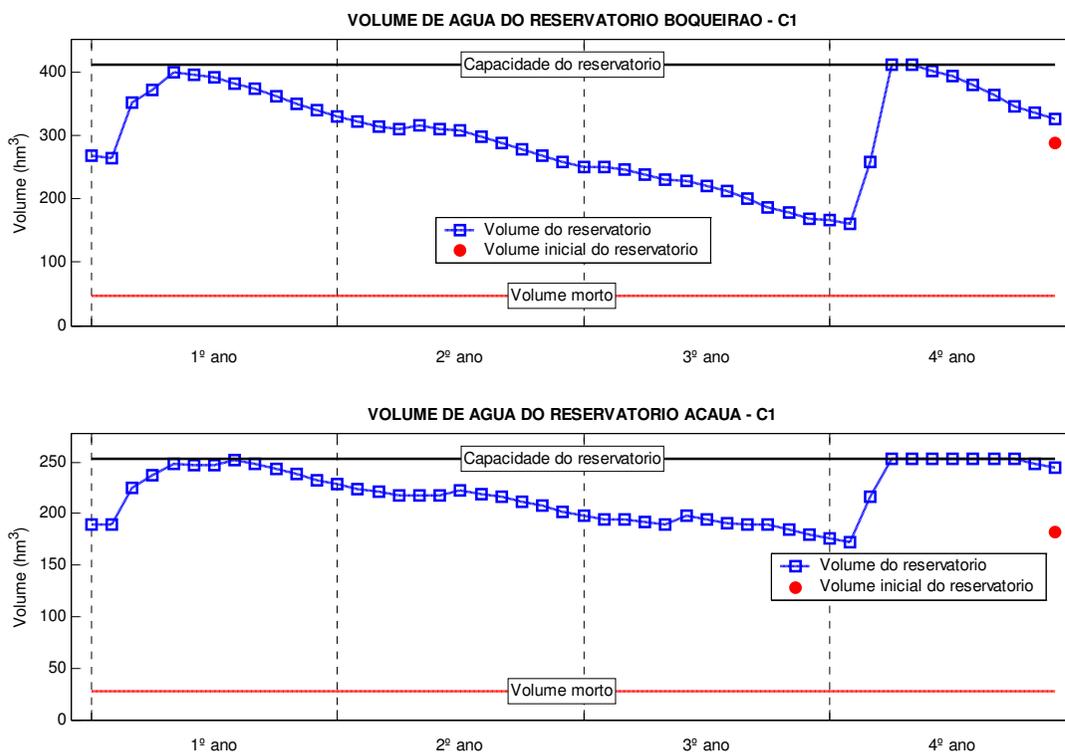


Figura 6.2 – Volume de água dos reservatórios no cenário 1.

A precipitação direta ao reservatório Boqueirão (Figura 6.3) representa cerca de 9% (1,1 hm³/mês) de toda a afluência. No reservatório Acauã a precipitação direta representa cerca de 7% (0,6 hm³/mês) de toda a afluência, sendo que mais da metade da afluência, 56% (4,9 hm³/mês), é proveniente da vazão defluente do nó 2.

Na Tabela 6.2 encontram-se os valores dos volume evaporados médios mensais dos reservatórios no cenário 1. Os maiores volumes evaporados ocorrem entre os meses de outubro a dezembro. Devido à maior área do espelho d'água o reservatório Boqueirão apresenta um maior volume evaporado do que o reservatório Acauã. Nota-se que o volume evaporado dos reservatórios é bastante superior ao volume precipitado nos reservatório.

Tabela 6.2 – Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 1

Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Boqueirão	5,2	4,6	4,7	5,1	4,9	3,8	3,8	4,4	4,9	6,3	5,9	5,8	4,9
Acauã	1,7	1,6	1,3	1,2	1,5	1,0	1,0	1,4	1,5	2,0	1,9	2,1	1,5

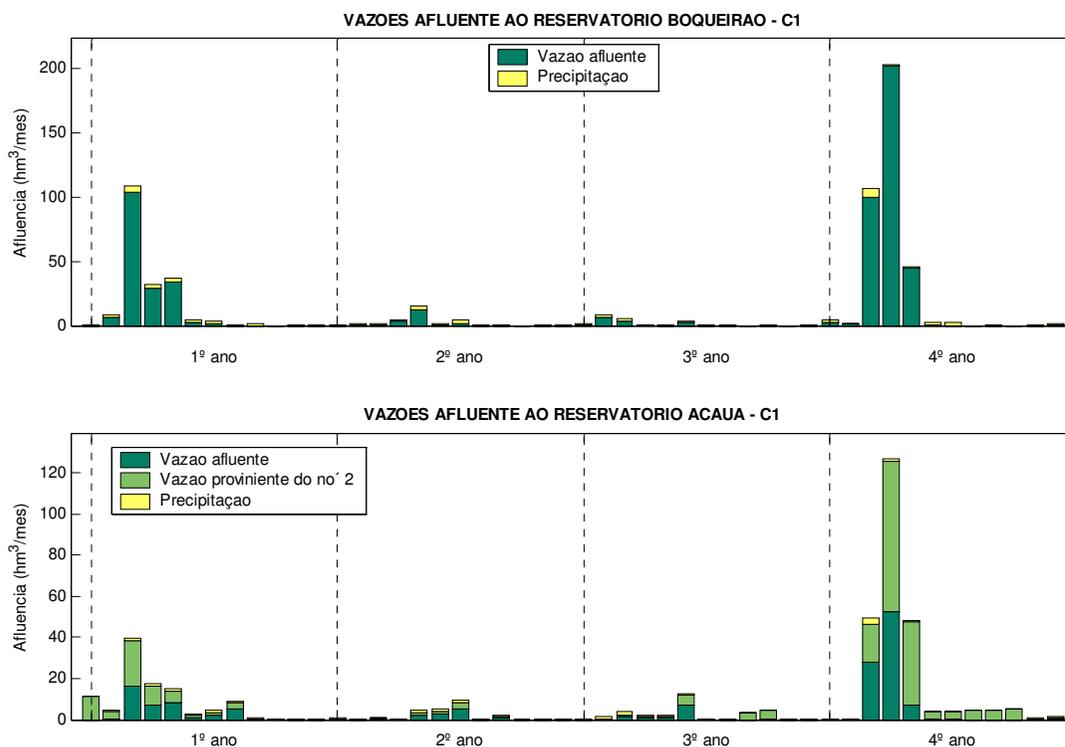


Figura 6.3 – Afluência aos reservatórios no cenário 1.

Os vertimentos neste cenário (Figura 6.4) ocorreram apenas no 4º ano, principalmente nos meses de abril e maio, período este que apresentou as maiores afluências ao reservatório. A média dos vertimento foi de 13,13 m³/s no reservatório Boqueirão e 5,47 m³/s no reservatório Acauã.

A Figura 6.5 apresenta a vazão defluente dos reservatórios no cenário 1. Percebe-se que o reservatório Boqueirão, por não ser obrigado a perenizar o rio a jusante, ficou mais de 2 anos (28 meses) sem liberar água no rio. O reservatório Acauã apresentou falha no atendimento da vazão defluente mínima apenas no mês de janeiro do primeiro ano.

Os índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã (Tabela 6.3) indicam que a garantia de atendimento da demanda é de 98% com 100% de chance, caso ocorra uma falha, de sair desse um estado de falha no próximo mês, entretanto a magnitude esperada da falha é de 37% do valor demandado.

Tabela 6.3 – Índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã no cenário 1.

Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
0.98	1.00	0.37

A área mensal utilizada na área irrigada no cenário 1 pode ser observada na Figura 6.6. Tem-se que a área utilizada anualmente na área irrigada corresponde a 77 % da área máxima considerada, atingindo o valor máximo nos meses entre fevereiro e abril, na safra, e nos meses entre agosto e outubro, na entressafra.

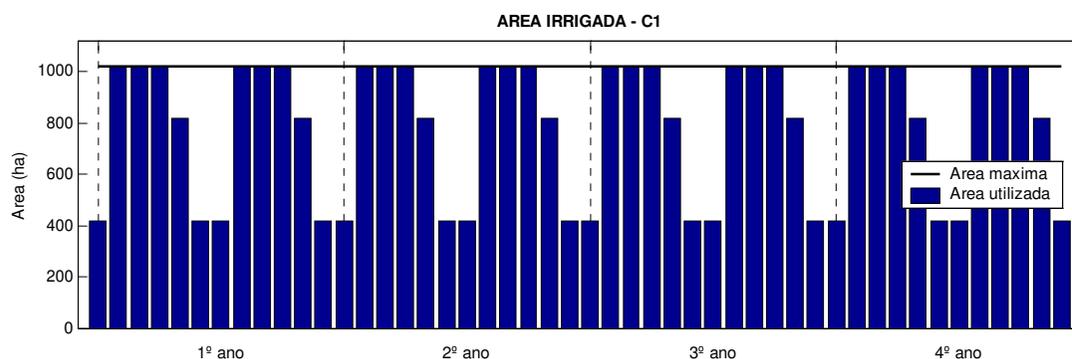


Figura 6.6 – Área utilizada na área irrigada no cenário 1.

A Figura 6.7 mostra que a vazão destinada ao suprimento hídrico da área irrigada é variável ao longo do tempo, tendo um comportamento típico, com os menores valores na estação chuvosa (fevereiro a abril) e os maiores na estação seca (setembro a novembro), chegando ao 0,8 m³/s, valor este próximo ao valor demandado ao reservatório Boqueirão para o abastecimento urbano.

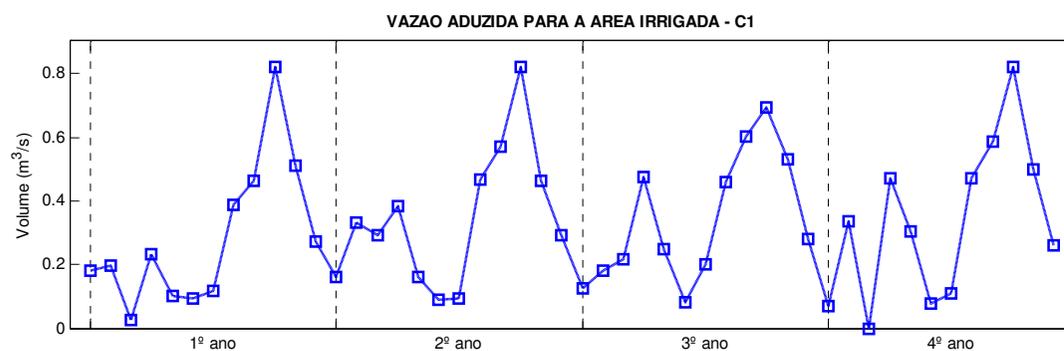


Figura 6.7 – Vazões aduzidas para a área irrigada no cenário 1.

Na Tabela 6.4 encontram-se os valores médios anuais das áreas cultivadas de cada cultura agrícola e suas respectivas receitas líquidas, mão-de-obra e consumo hídrico para a área irrigada no cenário estudado.

Tabela 6.4 – Valores médios anuais da área cultivada, receita líquida auferida, mão-de-obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1.

Cultura	Área (ha/ano)	Receita Líquida (R\$/ano)	Mão-de-obra (diárias/ano)	Vazão (m³/s/ano)
Tomate (s)	150,0	12.110.026,1	55.050,0	0,15
Pimentão (s)	150,0	1.003.232,8	28.800,0	0,17
Feijão (s)	0,0	0,0	0,0	0,00
Repolho (s)	100,0	1.692.221,1	14.200,0	0,07
Alface (s)	100,0	5.540.293,2	19.600,0	0,12
Cebola (s)	100,0	1.085.522,7	21.100,0	0,11
Tomate (es)	150,0	1.891.814,0	55.050,0	0,29
Pimentão (es)	150,0	146.220,3	28.800,0	0,30
Feijão (es)	0,0	0,0	0,0	0,00
Repolho (es)	100,0	359.779,0	14.200,0	0,13
Alface (es)	100,0	2.494.010,7	19.600,0	0,22
Cebola (es)	100,0	1.073.450,0	21.100,0	0,21
Banana	320,0	4.372.456,6	68.160,0	1,71
Limão	100,0	2.389.114,3	14.600,0	0,43
Goiaba	0,0	0,0	0,0	0,00
Total	1.620,0	34.158.104,9	360.260,0	3,91

Tem-se que as culturas agrícolas sazonais são às mais alocadas (1200 ha/ano, em média) devido principalmente ao menor consumo hídrico (45% do consumo hídrico total do perímetro). Tais culturas agrícolas representam mais de 80% de toda receita líquida oriunda da atividade agrícola e mais de 77% de toda mão de obra na área irrigada. Não foram alocadas áreas para as culturas agrícolas do feijão e goiaba.

A Figura 6.8 apresenta o percentual correspondente de cada cultura agrícola na área utilizada na área irrigada, na geração da receita líquida e mão-de-obra e no consumo hídrico do perímetro. Apesar de a banana ser a cultura agrícola mais cultivada, consumindo 44% de toda vazão destinada a área irrigada e empregando 19% de toda mão de obra da área irrigada, as culturas agrícolas do tomate e da alface, ambos cultivado na safra, são as mais rentáveis representando, ambas, mais de 50% da receita líquida oriunda da área irrigada.

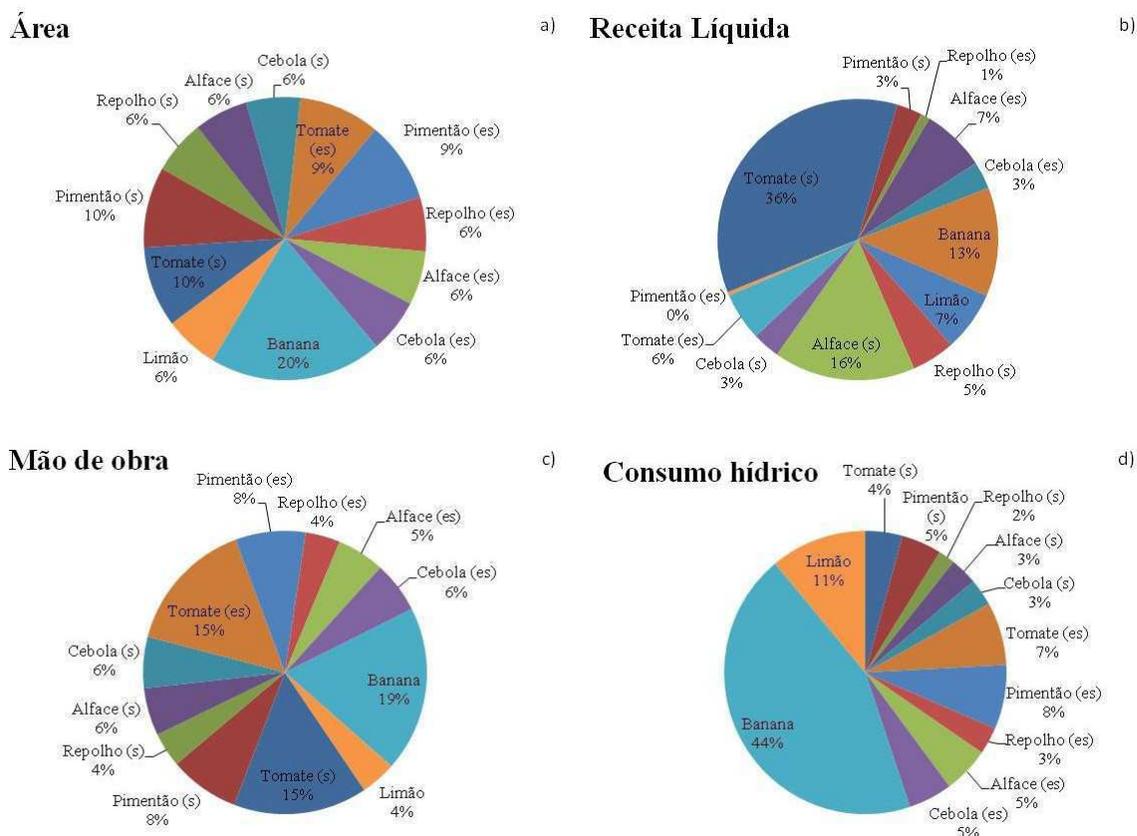


Figura 6.8 – Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada no cenário 1

A Figura 6.9 apresenta a concentração do parâmetro DBO nos reservatórios estudados no cenário 1. Tem-se que os valores da concentração do parâmetro DBO nos reservatórios atenderam a meta estabelecida, ou seja, estão abaixo da concentração máxima permitida. Fato também constatado na Tabela 6.1, onde o valor das funções objetivo CDBORES1 e CDBORES2 são iguais a zero. Nota-se que os valores da concentração do parâmetro DBO no reservatório Boqueirão são bem inferiores aos valores do reservatório Acauã devido à sua capacidade volumétrica e às menores cargas afluentes.

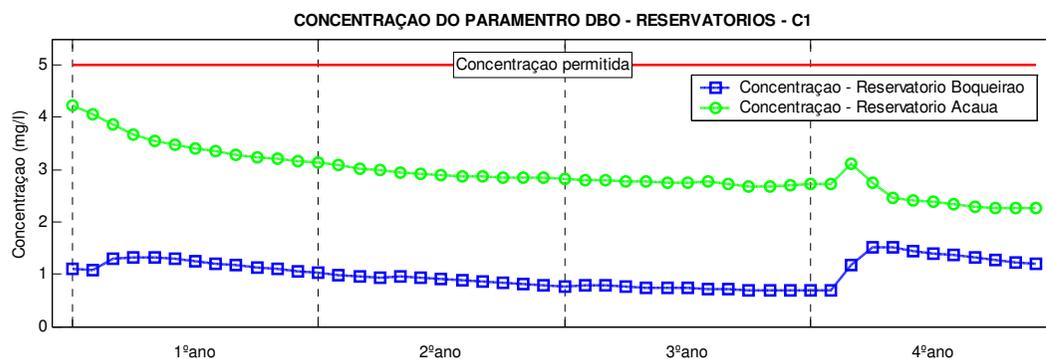


Figura 6.9 – Concentração do parâmetro DBO para os reservatórios do sistema no cenário 1.

Os valores da concentração do parâmetro DBO para os nós do sistema no cenário 1 podem ser visualizados na Figura 6.10. Observa-se que, em muitos períodos, os valores da concentração do parâmetro DBO no nó 1 estão muito acima (cerca de 310 mg/l) do valor da concentração permitida, pois como, nesse cenário, não há preocupação com os valores das concentrações dos parâmetros de qualidade de água, não houve liberação de água pelo reservatório Boqueirão para diluir tal parâmetro como mostrou a Figura 6.5. No nó 2, devido ao processo de autodepuração ao longo do curso do rio e a mistura no nó, as concentrações apresentam valores menores, porém apresenta, ainda, muitos valores acima da concentração permitida.

Os índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO nos nós 1 e 2 do cenário estudado podem ser observado na Tabela 6.5. Tem-se que o atendimento da concentração máxima permitida do parâmetro DBO nos nós do sistema no cenário 1 apresenta baixos índices de confiabilidade e de resiliência e alto índice de vulnerabilidade, ou seja, o atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO nos nós do sistema nesse cenário apresenta muitas falhas, com baixa probabilidade de sair desse estado de falha e quando acontecer uma falha sua magnitude será, em média, alta (cerca de 5075% e de 265% do valor da concentração permitida do parâmetro DBO para os nós 1 e 2, respectivamente).

Tabela 6.5 – Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO para os nós 1 e 2 no cenário 1.

Nó	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
1	0,13	0,12	50,75
2	0,46	0,19	2,65

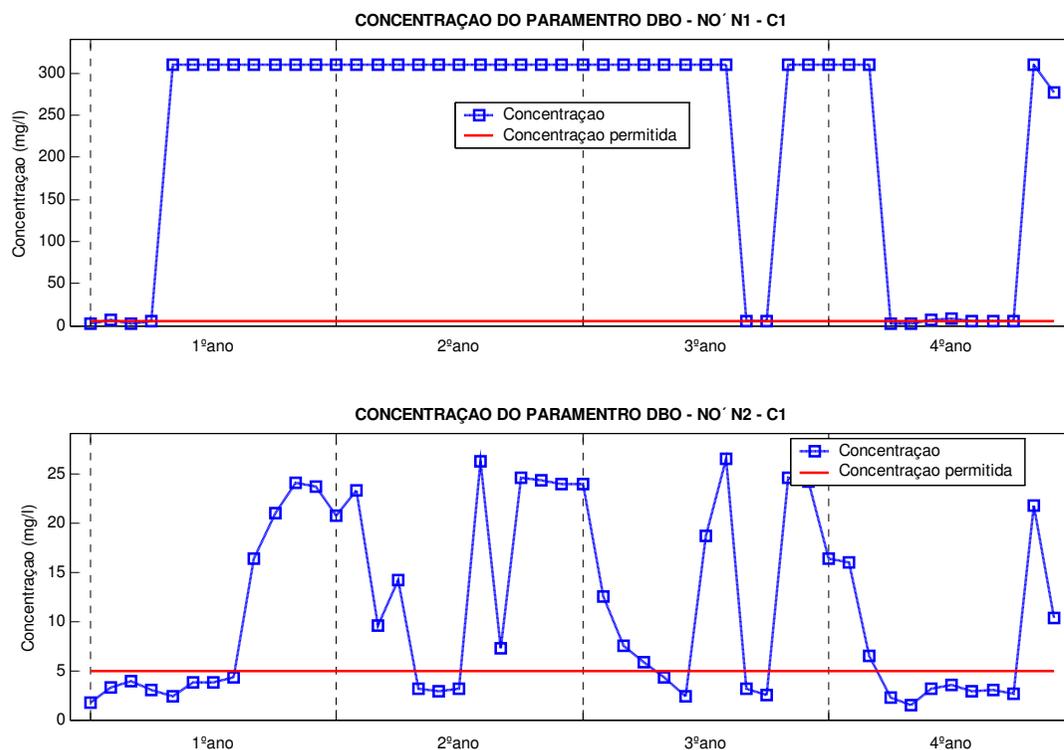


Figura 6.10 – Concentração do parâmetro DBO para os nós do sistema no cenário 1.

Observa-se que a concentração do parâmetro OD nos reservatórios (Figura 6.11) está sempre acima da concentração mínima permitida.

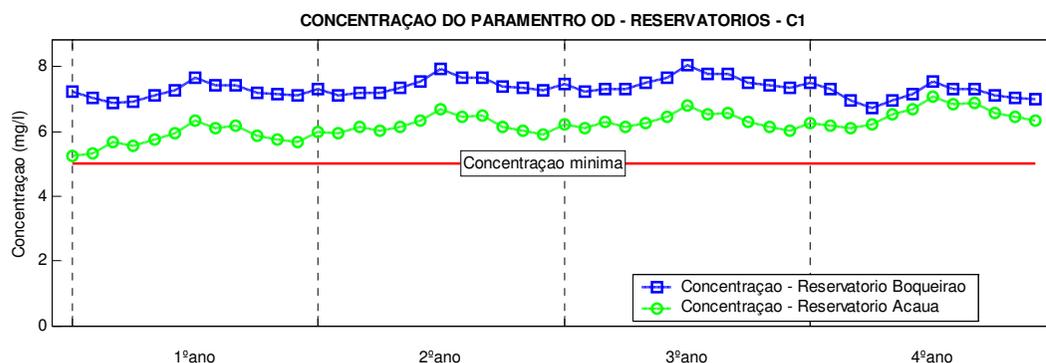


Figura 6.11 – Concentração do parâmetro OD para os reservatórios do sistema no cenário 1.

Na Figura 6.12 encontram-se os valores da concentração do parâmetro OD para os nós do sistema. Observa-se que o nó 1 apresenta valores da concentração abaixo da concentração mínima permitida, sendo que na maioria dos casos com valor igual a zero. Isso se deve ao fato de que, nesses períodos, o reservatório Boqueirão não liberou água no rio, sendo a única

afluência ao nó proveniente do esgoto doméstico da cidade de Boqueirão. No nó 2 devido as concentrações do parâmetro OD das afluências os valores da concentração do parâmetro no nó está sempre acima da concentração mínima permitida.

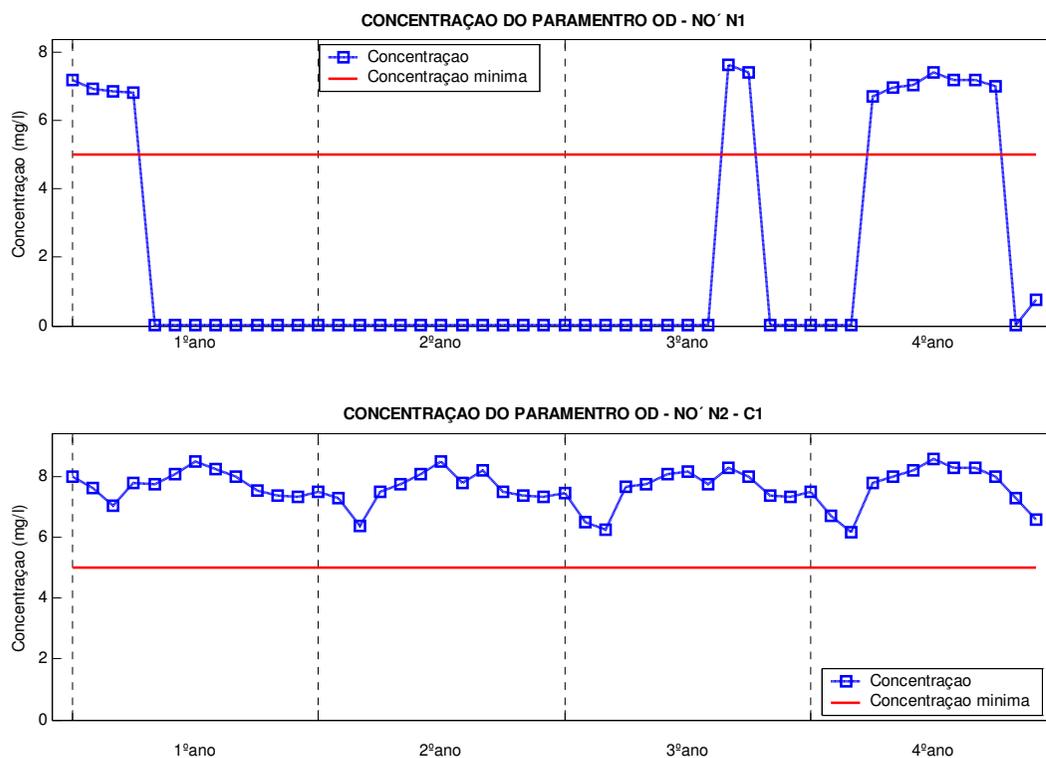


Figura 6.12 – Concentração do parâmetro OD para os nós do sistema no cenário 1.

Os índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro OD para o nó 1 podem ser observado na Tabela 6.6. Observa-se que a garantia de atendimento da concentração permitida do parâmetro OD no nó 1 é de apenas 27% com chance de sair de um estado de falha de apenas 9%. A magnitude esperada das falhas é igual a 100% do valor permitido, ou seja, quando houve falha no atendimento espera-se que a magnitude seja total.

Tabela 6.6 – Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro OD para o nó 1 no cenário 1.

Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
0.27	0.09	1.00

6.2. CENÁRIO 2

Neste cenário é realizada a otimização dos recursos hídricos do sistema considerando as concentrações dos parâmetros de qualidade de água, porém a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada na área irrigada tem maior prioridade do que a minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema.

Observa-se que as demandas estabelecidas para o abastecimento urbano através das adutoras nos reservatórios, por ser a 1ª prioridade de atendimento do sistema, foram atendidas nesse cenário sem apresentarem falhas ao longo dos 4 anos de operação como ocorrido no cenário 1.

Devido a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da área irrigada ser a 2ª prioridade de atendimento, não houve, também, mudança nas áreas alocadas para as culturas agrícolas na área irrigada com relação ao cenário 1, resultando, assim, nos mesmos valores de receita líquida, mão-de-obra e consumo hídrico do cenário 1 ao longo dos 4 anos estudados.

Entretanto, houve um maior volume liberado pelo reservatório Boqueirão (cerca de 1,6 m³/s, em média) nesse cenário (Figura 6.13) por causa da consideração dos parâmetros de qualidade de água, o que causou uma melhora significativa nos valores da concentração dos parâmetros DBO (Figura 6.14) e OD (Figura 6.15) nos nós sistema.

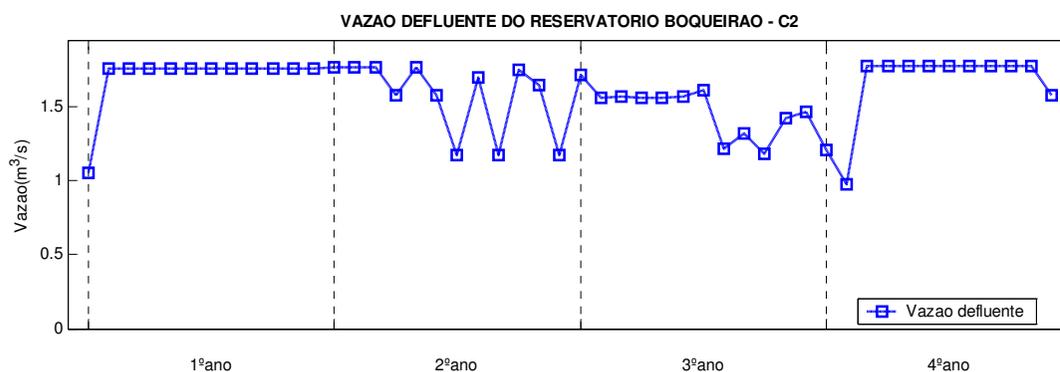


Figura 6.13 – Vazões defluentes do reservatório Boqueirão no cenário 2.

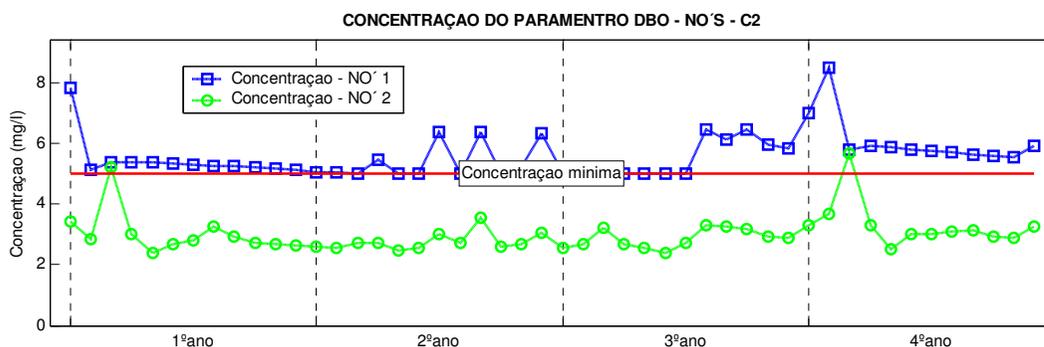


Figura 6.14 – Concentração do parâmetro DBO para os nós do sistema no cenário 2.

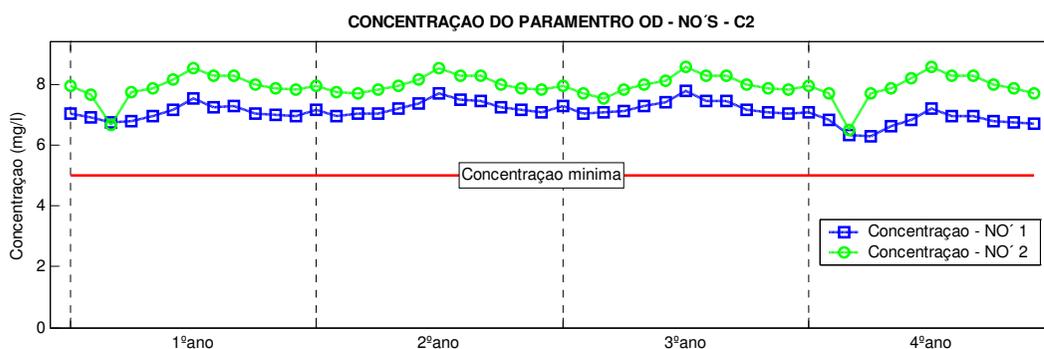


Figura 6.15 – Concentração do parâmetro OD para os nós do sistema no cenário 2.

No entanto, a concentração do parâmetro DBO no nó 1 ainda apresenta muitos valores acima da concentração permitida. Isso se deve ao fato de que, nesse cenário, o atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO nos reservatórios e nós do sistema tem menor prioridade do que a maximização da receita líquida e da mão de obra oriunda da atividade agrícola no perímetro irrigado. Assim, a disponibilidade hídrica do sistema, depois de suprir as demandas de abastecimento urbano, foi utilizada para atender as demandas hídricas do perímetro irrigado, não havendo, deste modo, disponibilidade hídrica suficiente para a diluição da concentração do parâmetro DBO no nó 1. No nó 2, novamente, devido ao processo de autodepuração ao longo do curso do rio e a mistura no nó, as concentrações apresentam valores menores, com apenas dois valores acima da concentração permitida. Com relação ao parâmetro OD os valores da concentração do parâmetro nos nós está sempre acima da concentração mínima permitida devido a concentração do parâmetro na vazão defluente do reservatório Boqueirão para o nó 1, e nas afluições para o nó 2.

Os índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO nos nós 1 e 2 dos cenários estudados podem ser observados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO para os nó 1 e 2 no cenário 2.

Nó	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
1	0,21	0,13	0,16
2	0,96	1,00	0,09

Houve uma melhora significativa dos índices de desempenho, devido a consideração dos parâmetros de qualidade no sistema que obrigou reservatório Boqueirão a liberar água como visto pela Figura 6.13, principalmente no nó 2 onde a garantia de atendimento da demanda de concentração máxima do parâmetro DBO é de 96%, ou seja, em 96% dos casos não ocorrerá falhas; com probabilidade de sair de um estado de falha de 100%; e vulnerabilidade de 9%, ou seja, a magnitude da falha será, em média de 9% do valor permitido podendo a chegar a um valor de 15%. Entretanto, o nó 1 ainda apresenta baixo índices de confiabilidade e de resiliência e alto índice de vulnerabilidade, porém com valores melhores do que no cenário 1.

Os valores da concentração do parâmetro DBO e OD dos reservatórios do sistema podem ser observados na Figura 6.16. Observa-se que não há diferença significativa nos valores da concentração dos parâmetros DBO e OD com relação ao cenário 1.

A Figura 6.17 mostra o comportamento do volume de água dos reservatórios neste cenário. Tem-se que a partir do mês de agosto do 1º ano volume de água do reservatório Acauã ficou praticamente igual a sua capacidade de armazenamento. Isso se deve a vazão defluente do reservatório Boqueirão (Figura 6.13) que aumentou em torno de 13% a vazão afluenta ao reservatório Acauã (Figura 6.18). Observa-se que os volumes de água armazenada no reservatório Boqueirão são menores comparada com os volumes do cenário 1 devido ao incremento da demanda hídrica para a diluição do parâmetro DBO, sendo o menor volume 68,1 hm³ (17% da capacidade de armazenamento do reservatório), valor este próximo ao volume morto considerado. Os volumes finais dos reservatórios, neste cenário, foram iguais ou maiores aos volumes iniciais propostos, garantindo assim a sustentabilidade hídrica das demandas.

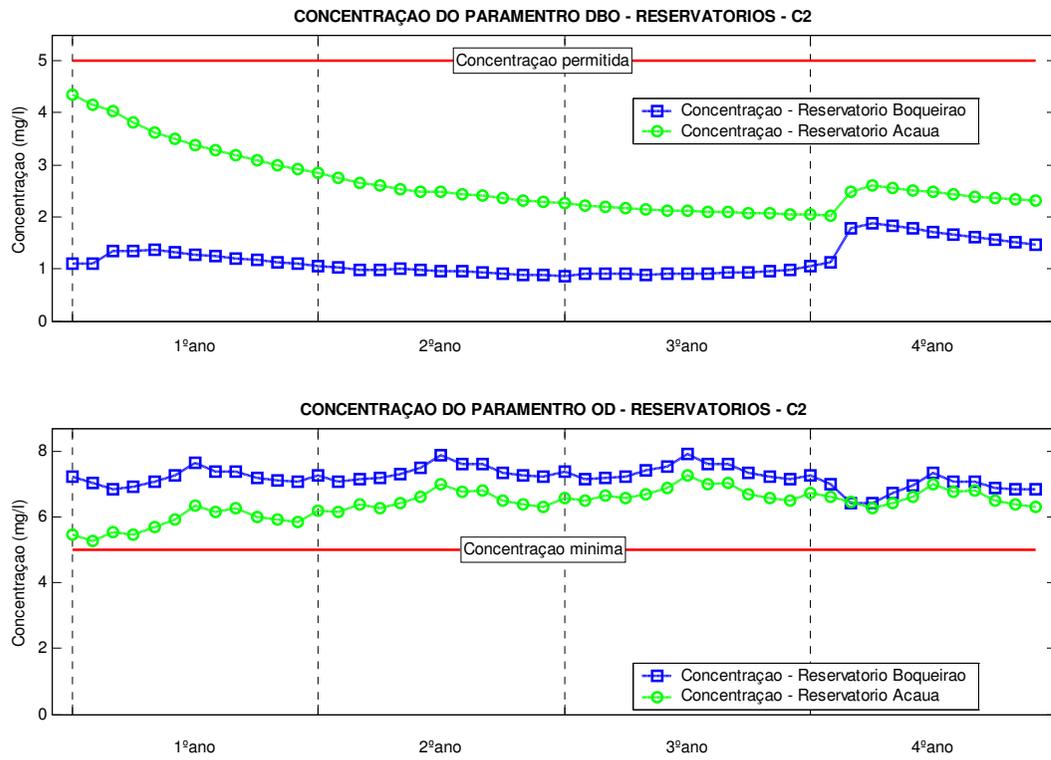


Figura 6.16 – Concentração do parâmetro DBO e OD para os reservatórios do sistema no cenário 2.

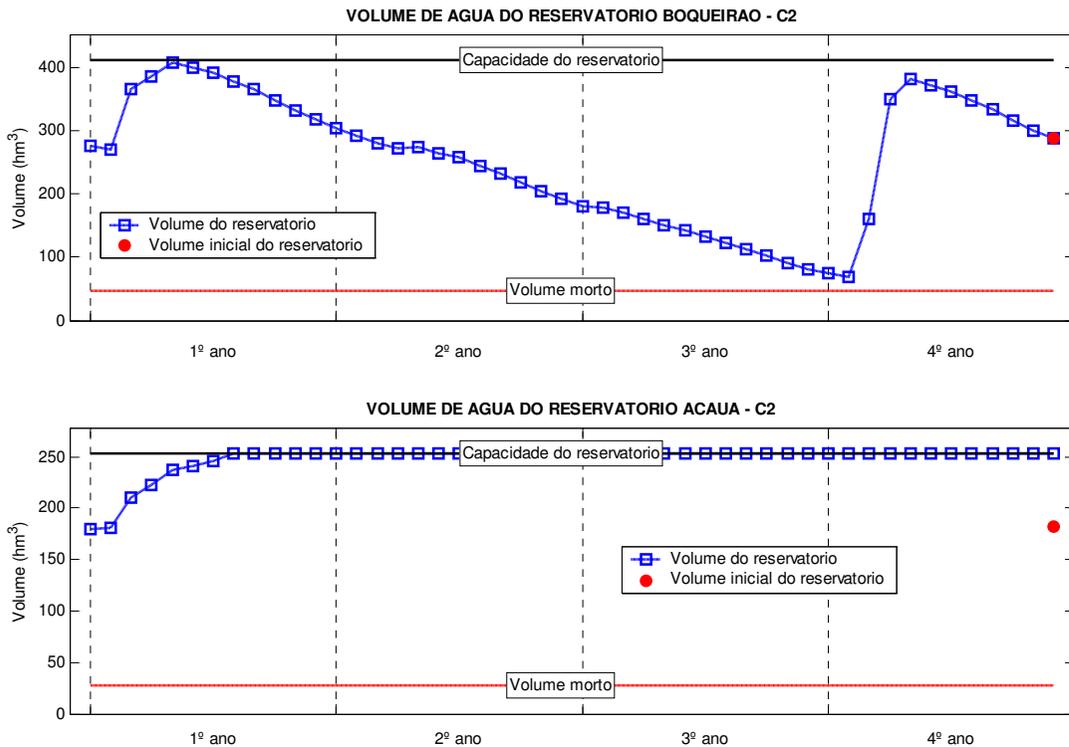


Figura 6.17 – Volume de água dos reservatórios estudados no cenário 2.

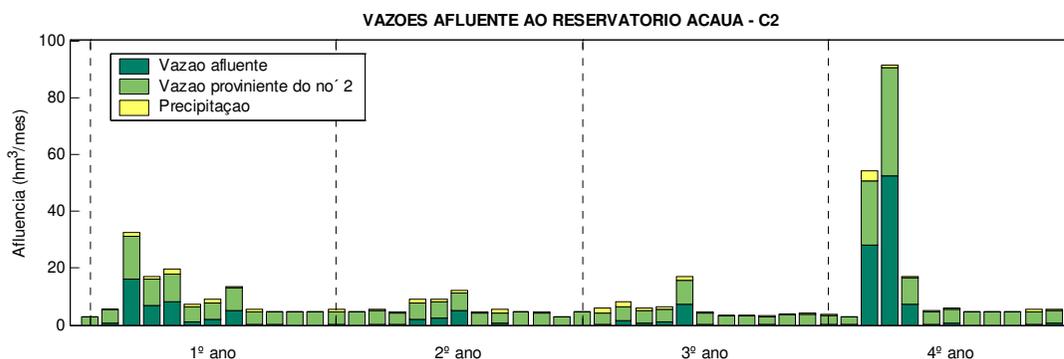


Figura 6.18 – Afluência ao reservatório Acauã no cenário 2.

Na Tabela 6.8 encontram-se os valores os volume evaporados médios mensais dos reservatórios no cenário 2. Observa-se um comportamento similar ao ocorrido no cenário 1. Entretanto, há um aumento 8% no volume evaporado no reservatório Acauã, devido ao aumento da área do espelho d'água do reservatório e uma redução de 13% no reservatório Boqueirão, devido a diminuição espelho d'água do reservatório.

Tabela 6.8 – Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 2

Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Boqueirão	4,4	3,9	4,0	4,5	4,5	3,4	3,4	3,9	4,3	5,5	5,1	4,9	4,3
Acauã	1,9	1,7	1,4	1,3	1,6	1,0	1,1	1,5	1,7	2,1	2,1	2,3	1,6

Os vertimentos neste cenário (Figura 6.19) ocorreram apenas no reservatório Acauã em todos os anos devido ao incremento na vazão afluente ao reservatório proveniente da vazão defluente do reservatório Boqueirão. O vertimento médio foi de 1,69 m³/s.

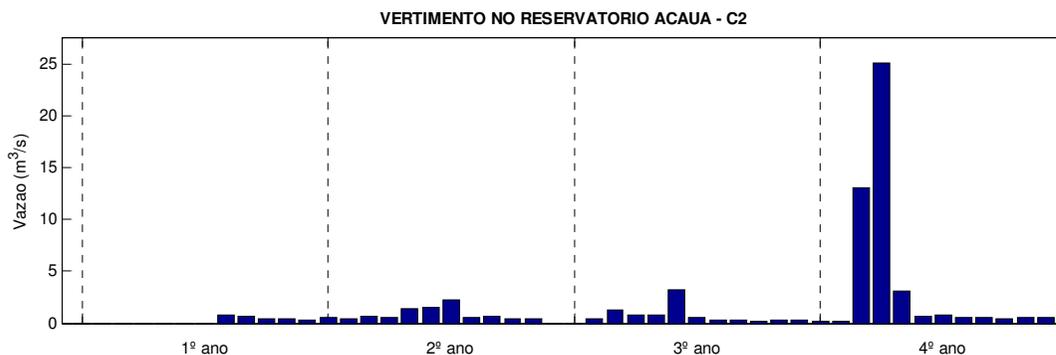


Figura 6.19 – Vertimento no reservatório Acauã no cenário 2.

A Figura 6.20 apresenta a vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 2. Percebem-se falhas no atendimento do requerimento da demanda defluente mínima em alguns meses, devido a maior prioridade de atendimento das concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade.

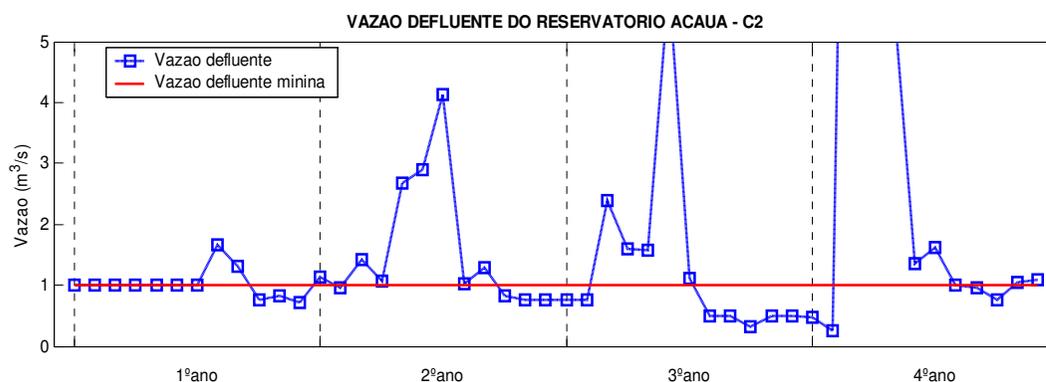


Figura 6.20 – Vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 2.

Os índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã (Tabela 6.9) indicam que a garantia de atendimento da demanda nesse cenário é de apenas 60%, com 26% de chance de sair de um estado de falha, caso ocorra uma falha, sendo a magnitude esperada da falha de 32% do valor demandado.

Tabela 6.9 – Índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã no cenário 2.

Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
0,60	0,26	0,32

6.3. CENÁRIO 3

Neste cenário é realizada a otimização dos recursos hídricos do sistema considerando as concentrações dos parâmetros de qualidade de água, porém a minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema tem maior prioridade do que a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada na área irrigada.

Tem-se que as demandas estabelecidas para o abastecimento urbano através das adutoras nos reservatórios, por ser a 1ª prioridade de atendimento do sistema, foram atendidas

nesse cenário sem apresentarem falhas ao longo dos 4 anos de operação como ocorrido no cenário 1.

Houve um aumento no volume liberado pelo reservatório Boqueirão (cerca de 18%) nesse cenário em relação ao cenário 2 (Figura 6.21) por causa da maior prioridade de atendimento dos valores das concentrações dos parâmetros de qualidade de água em relação a agricultura irrigada, o que melhorou significativamente os valores da concentração dos parâmetros DBO (Figura 6.22) nos nós sistema.

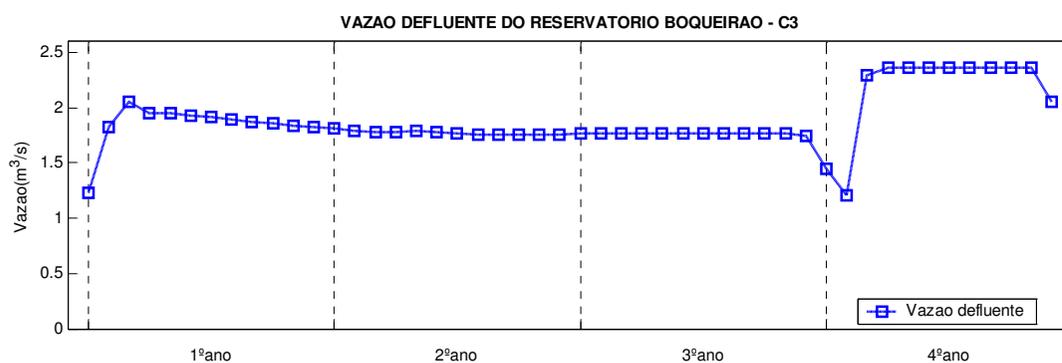


Figura 6.21 – Vazões defluente do reservatório Boqueirão no cenário 3.

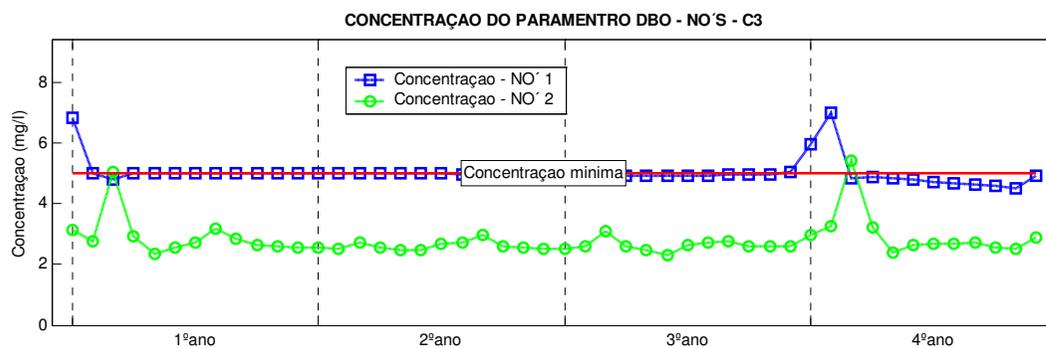


Figura 6.22 – Concentração do parâmetro DBO para os nós do sistema no cenário 3.

Os índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO nos nós 1 e 2 dos cenários estudados podem ser observados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Índices de desempenho do atendimento da concentração permitida do parâmetro DBO para os nó 1 e 2 no cenário 3.

Nó	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
1	0,92	0,50	0,25
2	0,96	1,00	0,05

Devido a maior prioridade de atendimento das concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade de água em relação as demandas do perímetro irrigado, observa-se que os índices de desempenho foram bem melhores, em comparação com o cenário 2. A garantia de atendimento dessa demanda nos dois nós é maior que 90%. A chance de sair de um estado de falha é de 50% para o nó 1 e 100% para o nó 2. A magnitude das falhas será, em média, de 25% para o nó 1 e de 5% para o nó 2.

Com relação ao parâmetro OD (Figura 6.23), como ocorrido no cenário 2, os valores da concentração do parâmetro nos nós está sempre acima da concentração mínima permitida devido a concentração do parâmetro na vazão defluente do reservatório Boqueirão para o nó 1, e nas afluições para o nó 2.

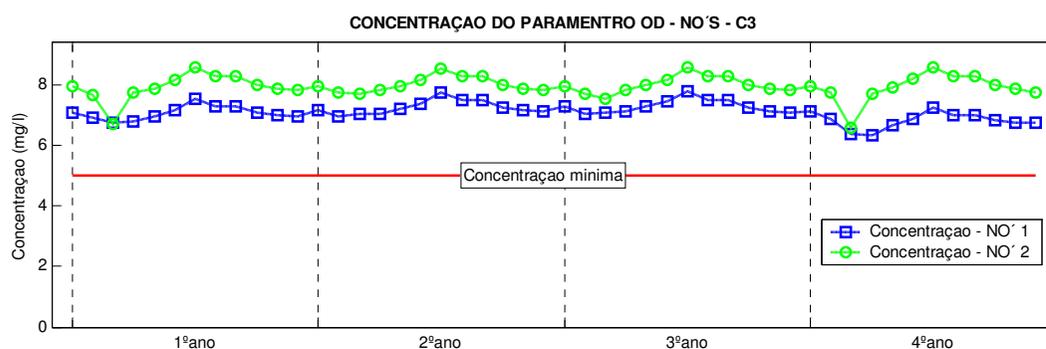


Figura 6.23 – Concentração do parâmetro OD para os nós do sistema no cenário 3.

Os valores da concentração do parâmetro DBO e OD dos reservatórios do sistema podem ser observados nas Figuras 6.24. Não se verifica mudança significativa nos valores da concentração desses parâmetros com relação aos cenários 1 e 2.

A área mensal utilizada na área irrigada no cenário 3 pode ser observada na Figura 6.25. Houve uma mudança expressiva na área alocada no perímetro irrigado com relação aos cenários 1 e 3. Observa-se uma menor área alocada das culturas agrícolas, devido à maior prioridade de atendimento dos valores das concentrações dos parâmetros de qualidade de água, sendo que as culturas agrícolas foram cultivadas unicamente na safra. A área utilizada anualmente na área irrigada corresponde a apenas 7% da área máxima considerada. Devido à menor área alocada, as vazões aduzidas para o perímetro são bem inferiores em comparação com os outros cenários, sendo os valores complementares a precipitação efetiva no período.

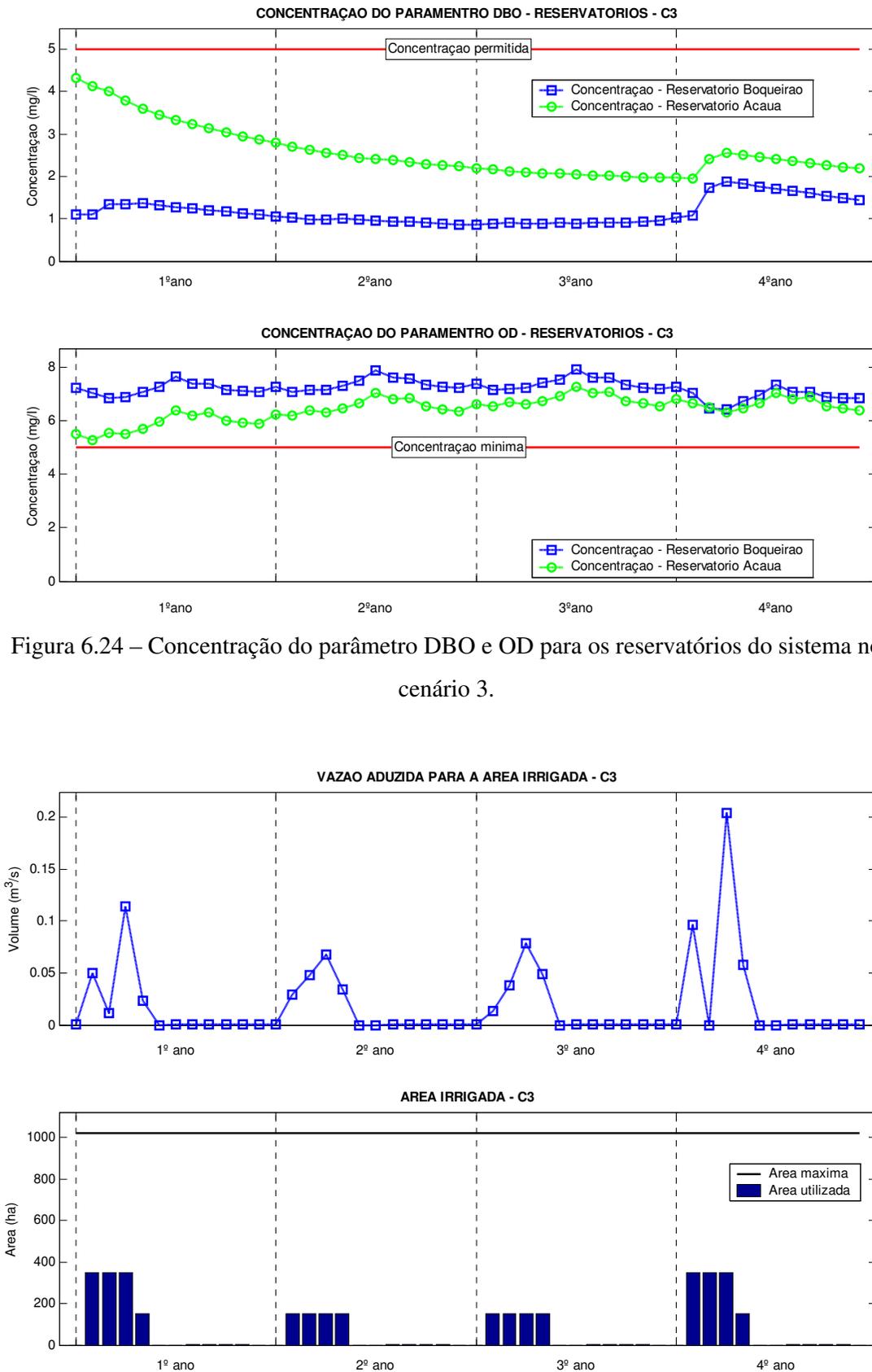


Figura 6.24 – Concentração do parâmetro DBO e OD para os reservatórios do sistema no cenário 3.

Figura 6.25 – Área utilizada e vazão aduzida para a área irrigada no cenário 3.

As únicas culturas agrícolas cultivadas nesse cenário foram a tomate, cultivada em todos os anos, o alface e o repolho na safra. Na Tabela 6.11 encontram-se os valores anuais das áreas cultivadas e suas respectivas receitas líquidas, mão-de-obra e consumo hídrico para a área irrigada no cenário estudado. Tem-se que houve uma redução de 56 % da receita líquida e de 80% da mão de obra comparada com os valores do cenário 1.

Tabela 6.11 – Valores anuais da área cultivada, receita líquida auferida, mão-de-obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 3.

Insumos	ano	Culturas Agrícolas			Total
		Tomate (s)	Repolho (s)	Alface (s)	
Área (ha)	1º ano	150	100	100	350
	2º ano	150	0	0	150
	3º ano	150	0	0	150
	4º ano	150	100	100	350
Receita Líquida (R\$)	1º ano	12.118.212,1	1.696.103,4	5.540.945,1	19.355.260,7
	2º ano	12.106.679,4	0,0	0,0	12.106.679,4
	3º ano	12.106.767,9	0,0	0,0	12.106.767,9
	4º ano	12.108.445,1	1.692.614,9	5.540.188,9	19.341.248,9
Mão de obra (diárias)	1º ano	55050	14200	19600	88850
	2º ano	55050	0	0	55050
	3º ano	55050	0	0	55050
	4º ano	55050	14200	19600	88850
Consumo hídrico (m³/s)	1º ano	0,09	0,04	0,07	0,20
	2º ano	0,18	0,0	0,0	0,18
	3º ano	0,18	0,0	0,0	0,18
	4º ano	0,17	0,07	0,12	0,36

A Figura 6.26 mostra o comportamento do volume de água dos reservatórios neste cenário. Observa-se não haver mudança significativa no comportamento do volume de água dos reservatórios em relação ao cenário 2.

Na Tabela 6.12 encontram-se os valores dos volumes evaporados médios mensais dos reservatórios no cenário 3. Observa-se um comportamento similar ao ocorrido no cenário 2.

Assim como ocorrido no cenário 2, os vertimentos neste cenário (Figura 6.27) ocorreram apenas no reservatório Acauã, porém um pouco maior (2 m³/s, em média) devido ao aumento da vazão defluente do reservatório Boqueirão.

A Figura 6.28 apresenta a vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 3. Houve uma diminuição na quantidade de falhas neste cenário em comparação ao cenário 2, o que melhorou os índices de desempenho do atendimento desta demanda (Tabela 6.13).

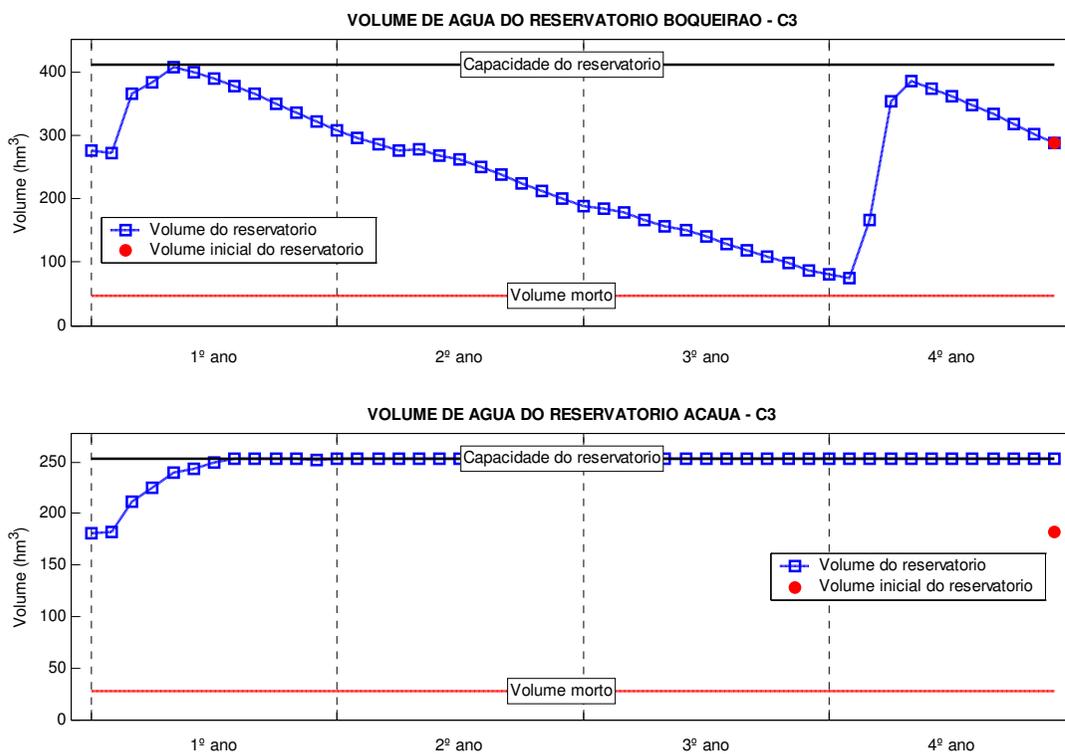


Figura 6.26 – Volume de água dos reservatórios estudados no cenário 3.

Tabela 6.12 – Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 3.

Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Boqueirão	4,5	4,0	4,1	4,6	4,5	3,5	3,4	3,9	4,3	5,5	5,2	5,0	4,4
Acauã	1,9	1,7	1,4	1,3	1,6	1,0	1,1	1,5	1,7	2,1	2,1	2,3	1,6

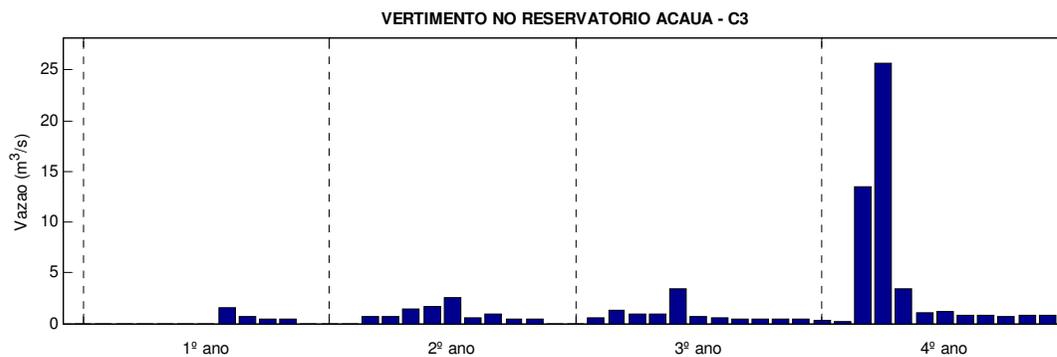


Figura 6.27 – Vertimento no reservatório Acauã no cenário 3.

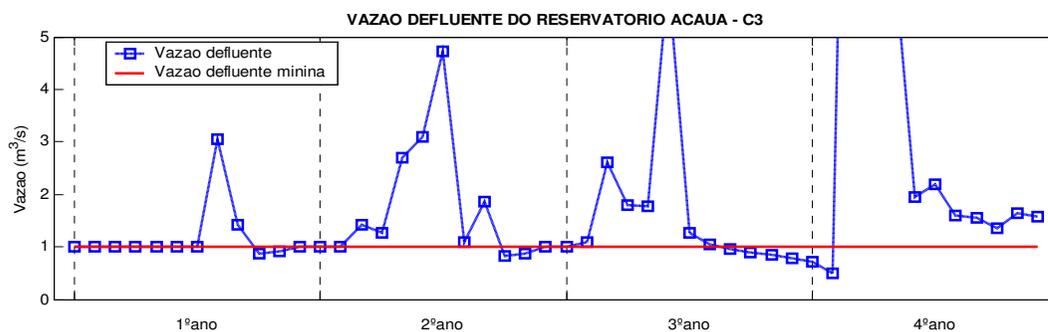


Figura 6.28 – Vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 3.

Tabela 6.13 – Índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão defluente mínima do reservatório Acauã no cenário 3.

Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade
0,79	0,30	0,18

6.4. CENÁRIO 4

Neste cenário a minimização do déficit do atendimento das concentrações dos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema continua tendo maior prioridade do que a maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada na área irrigada, entretanto é implantado um sistema de tratamento de esgoto nas cidades consideradas.

As demandas estabelecidas para o abastecimento urbano através das adutoras nos reservatórios, por ser a 1ª prioridade de atendimento do sistema, foram atendidas nesse cenário sem apresentarem falhas ao longo dos 4 anos de operação como ocorrido nos outros cenários.

Tem-se que a implantação do sistema de tratamento de esgoto nas cidades consideradas no estudo, diminuiu consideravelmente os valores da concentração do parâmetro DBO lançado no sistema, gerando uma menor demanda de água para diluir o parâmetro DBO no nó 1, o que resultou em um menor volume liberado (1,2 m³/s, em média) pelo reservatório Boqueirão (Figura 6.29) em comparação com o cenário 3.

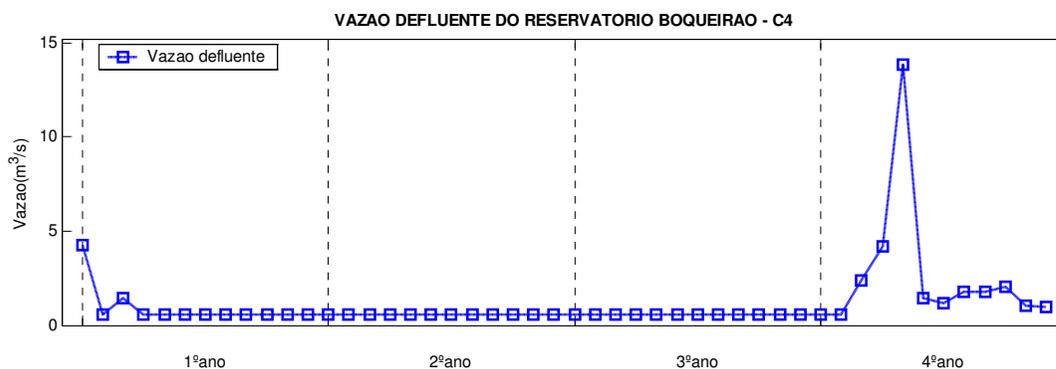


Figura 6.29 – Vazões defluente do reservatório Boqueirão no cenário 4.

Deste modo, tem-se que os valores da concentração do parâmetro DBO nos nós 1 e 2 estão abaixo da concentração máxima permitida (Figura 6.30), não havendo falha no atendimento dessa demanda. Com relação ao parâmetro OD (Figura 6.30), como ocorrido nos cenários 2 e 3, os valores da concentração do parâmetro nos nós está sempre acima da concentração mínima permitida devido a concentração do parâmetro na vazão defluente do reservatório Boqueirão para o nó 1 e nas afluições para o nó 2.

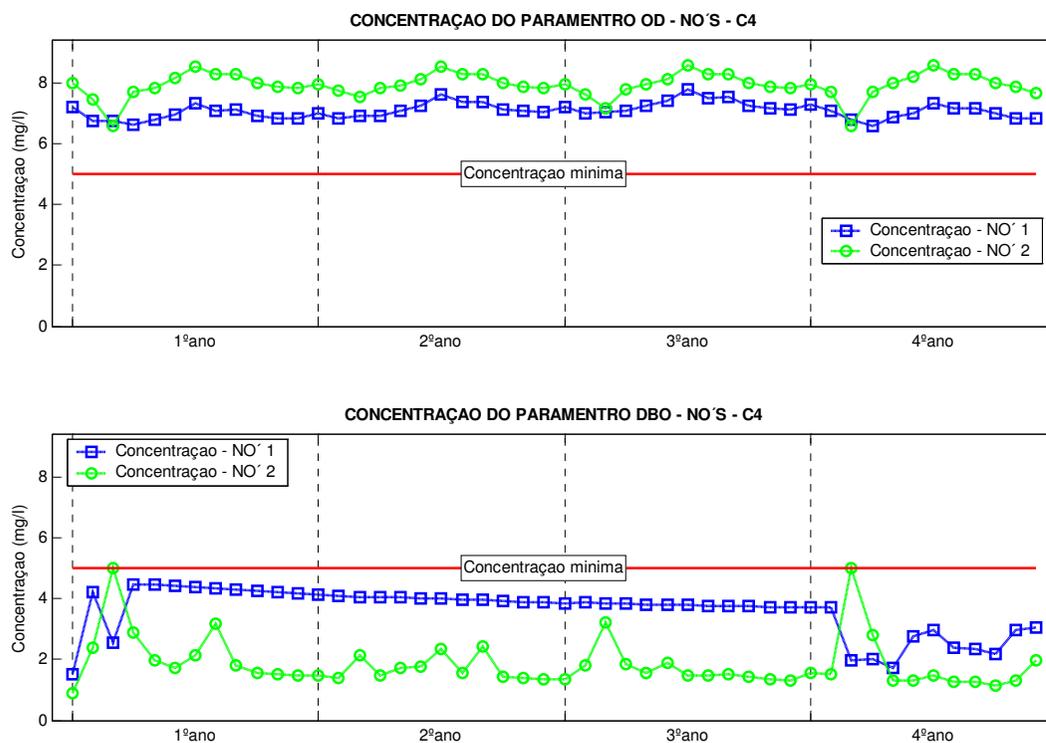


Figura 6.30 – Concentração do parâmetro DBO e OD para os nós do sistema no cenário 4.

Os valores da concentração do parâmetro DBO e OD dos reservatórios do sistema podem ser observados nas Figura 6.31. Não se verifica mudança significativa nos valores da concentração desses parâmetros com relação aos cenários anteriores.

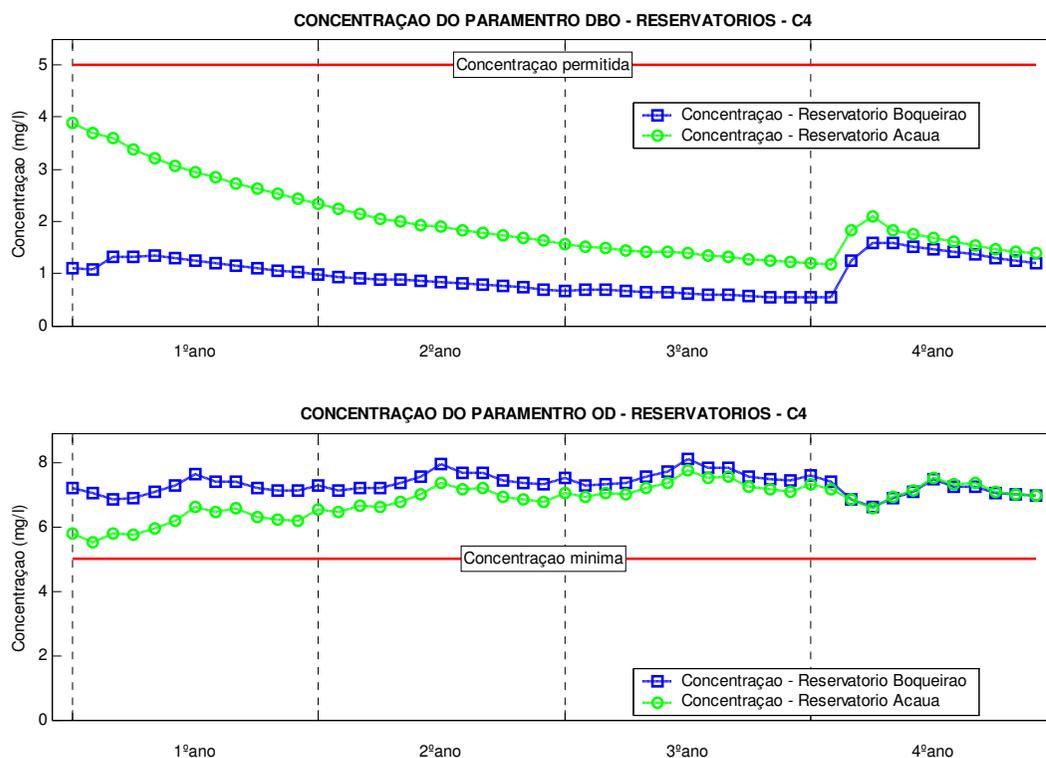


Figura 6.31 – Concentração do parâmetro DBO e OD para os reservatórios do sistema no cenário 4.

Tem-se que, devido à diminuição da demanda de água utilizada para diluir o parâmetro DBO nos nós do sistema, a disponibilidade hídrica no reservatório Boqueirão foi suficiente para atender as demandas hídricas da área irrigada, o que resultou nas mesmas áreas alocadas para as culturas agrícolas do cenário 1, obtendo, assim, os mesmos valores de receita líquida, mão-de-obra e consumo hídrico do cenário 1 ao longo dos 4 anos estudados.

A Figura 6.32 mostra o comportamento do volume de água dos reservatórios neste cenário. Observa-se um maior volume de água armazenado no reservatório Boqueirão em relação aos cenários 2 e 3. No reservatório Acaua houve uma redução no seu volume de água armazenado devido à diminuição da vazão defluente do reservatório Boqueirão, atingindo a capacidade de armazenamento apenas no 4º ano. Os volumes finais dos reservatórios, neste cenário, foram maiores aos volumes iniciais propostos, garantindo assim a sustentabilidade hídrica das demandas.

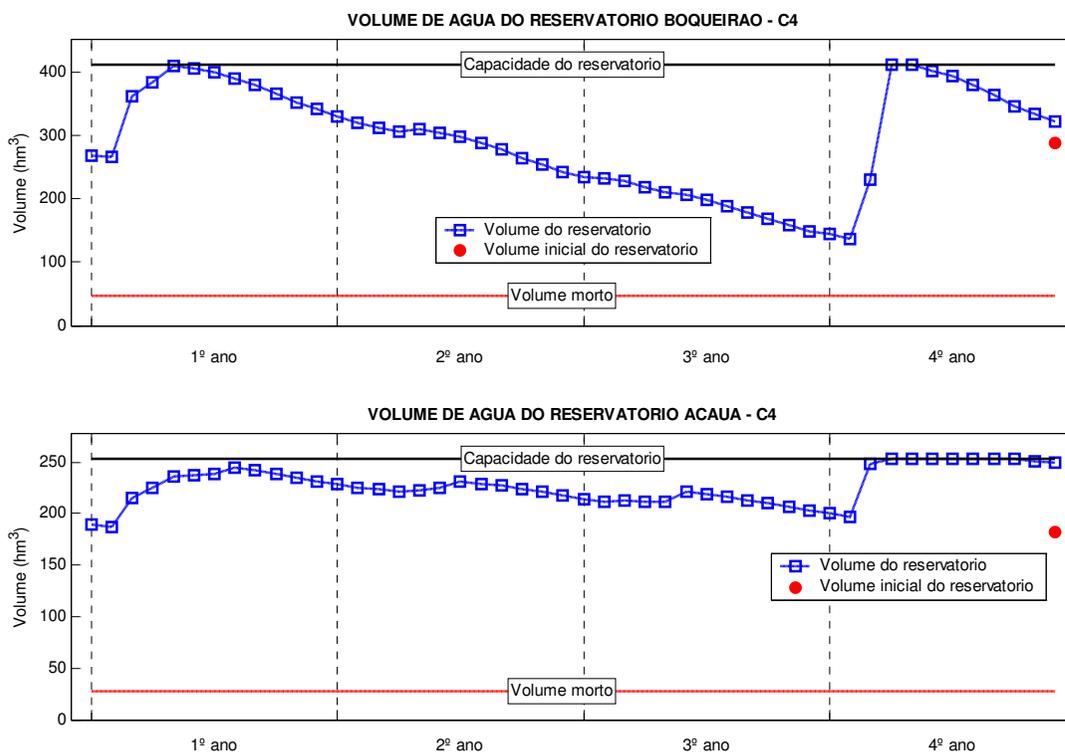


Figura 6.32 – Volume de água dos reservatórios estudados no cenário 4.

Observa-se que o comportamento dos volume evaporados médios mensais dos reservatórios nesse cenário 4 (Tabela 6.14) é similar ao ocorrido no cenário 1.

Tabela 6.14 – Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 4.

Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Boqueirão	5,0	4,5	4,6	5,0	4,9	3,8	3,8	4,3	4,8	6,1	5,8	5,6	4,8
Acauã	1,8	1,6	1,3	1,3	1,5	1,0	1,0	1,4	1,6	2,0	2,0	2,1	1,6

Os vertimentos neste cenário (Figura 6.33) ocorreram apenas no 4º ano (como ocorrido no cenário 1), principalmente nos meses de abril e maio, período que apresentou as maiores afluências ao reservatório. A média dos vertimentos foi de 7,7 m³/s no reservatório Boqueirão e 5,6 m³/s no reservatório Acauã.

A Figura 6.34 apresenta a vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 4. Percebe-se falha no atendimento da vazão defluente mínima apenas no mês de janeiro do primeiro ano, como ocorrido no cenário 1, resultando nos mesmos índices de desempenho do cenário 1.

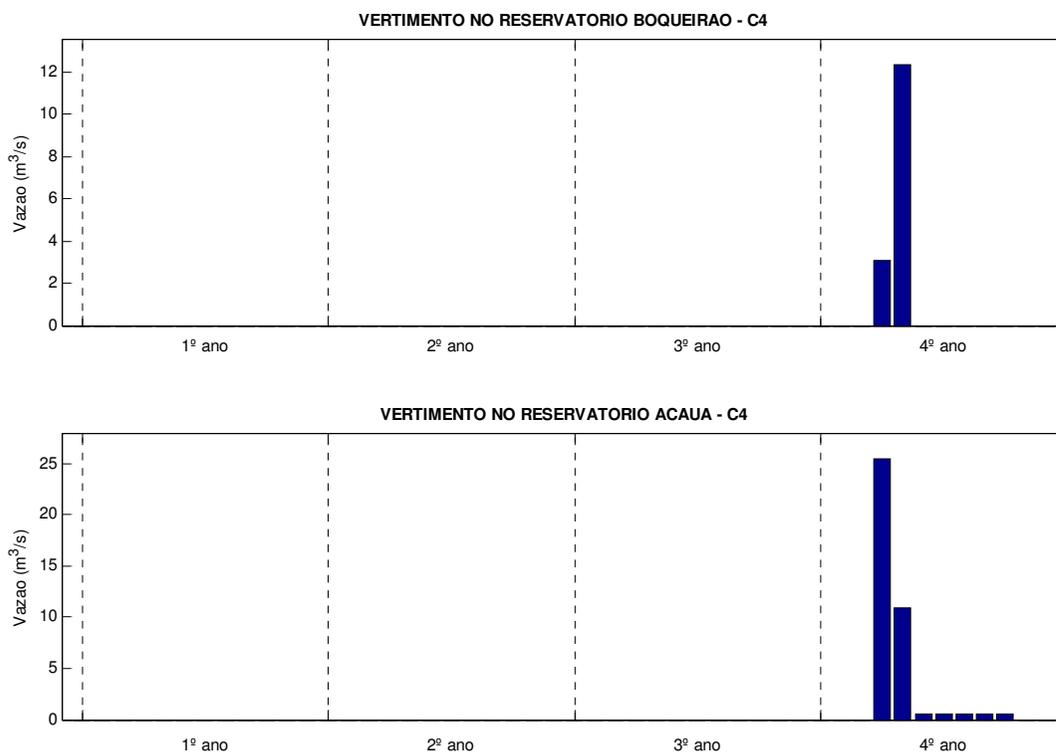


Figura 6.33 – Vertimento nos reservatórios no cenário 4.

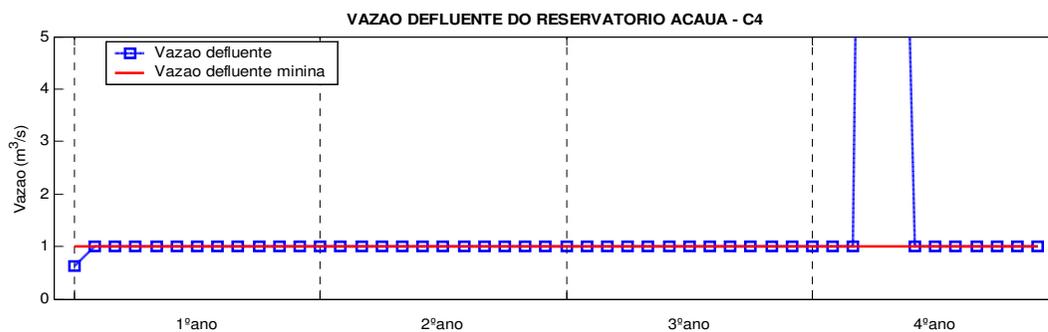


Figura 6.34 – Vazão defluente do reservatório Acauã no cenário 4.

6.5. VERIFICAÇÃO DAS LINEARIZAÇÕES DO MODELO

O erro relativo dos valores dos parâmetros de qualidade de água DBO e OD nos reservatórios e nós do sistema determinadas pelas Equações 4.51, 4.52, 4.67, 4.68 e 4.69 linearizadas através do Método de Programação por Aproximações nos cenários 2, 3 e 4 podem ser visualizados nos Apêndices C, D, E, F, G e H.

As Tabelas 6.15 e 6.16 apresentam os valores médios e máximos do erro relativo dos parâmetros de qualidade de água DBO e OD, respectivamente, nos reservatórios, nós e nos trechos de rio considerados no sistema.

Tabelas 6.15 - Valores médios e máximos do erro relativo dos parâmetros de qualidade de água DBO nos reservatórios e nós do sistema.

	Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	médio	máximo	médio	máximo	médio	máximo
Balanco de massa						
Res. Boqueirão	0,08	0,24	0,08	0,23	0,05	0,13
Res. Acauã	0,02	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02
Nó 1	0,03	0,09	0,02	0,05	0,02	0,05
Nó 2	0,01	0,04	0,01	0,03	0,01	0,03
Autodepuração						
Trecho 1	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02	0,05
Trecho 2	0,02	0,06	0,01	0,03	0,01	0,03

Tabelas 6.16 - Valores médios e máximos do erro relativo dos parâmetros de qualidade de água OD nos reservatórios e nós do sistema.

	Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	médio	máximo	médio	máximo	médio	máximo
Balanco de massa						
Res. Boqueirão	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,02
Res. Acauã	0,01	0,07	0,01	0,07	0,00	0,04
Nó 1	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,02
Nó 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Autodepuração						
Trecho 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Trecho 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Observa-se que os maiores erros relativos ocorrem na linearização da equação do balanço de massa do parâmetro DBO. Sendo que o maior erro relativo médio equivalente a 8% tendo 24% como valor máximo. Esse erro relativo máximo corresponde ao valor 1,1219 mg/l do parâmetro DBO no reservatório Boqueirão determinada pela Equação 4.68 através do Método de Programação por Aproximações no cenário 2, sendo que o valor determinado sem a linearização é de 1,0885 mg/l, sendo, na mesma ordem de grandeza.

Os erros relativos médios e máximos da determinação do parâmetro OD são menores que 7%.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. SOBRE O MODELO

Com base na metodologia e resultados apresentados, conclui-se que:

- O modelo tem capacidade de realizar análises multiobjetivo, pois os melhores valores das funções objetivo se encontram nos cenários onde os mesmos tem maior prioridade de atendimento, atendendo todas as restrições físicas, ambientais, econômicas, sociais e legais inerentes dos sistemas de recursos hídricos.
- O modelo tem a habilidade de analisar o desempenho de vários tipos de usos de água (atendimento as demandas d'águas, agricultura irrigada, volume metas, concentrações dos parâmetros de qualidade de água, perenização de rios) integrando e analisando simultaneamente os diversos componentes dos sistema de recursos hídricos (reservatórios, perímetros ou áreas irrigadas, rios, tomadas d'águas).
- A metodologia proposta para a implementação das não-linearidades dos componentes do sistema, representadas nas funções objetivo e nas equações de restrições do problema, permitiu o uso da PL, com todas as suas vantagens, e uma melhor representação matemática dos processos (balanço e transporte de massa, vazão de descarga de fundo máxima) e componentes (curva cota-área-volume) dos sistemas de recursos hídricos

O tempo de processamento e o número de iterações para a obtenção de uma solução ótima foi considerado satisfatório para resolver um problemas com 3.813 variáveis de decisão e 834 equações de restrições de igualdade e 146 equações de restrições de desigualdade, considerado 4 anos de operação.

Os resultados obtidos para a operação do sistema (balanço hídrico nos reservatório e nós do sistema, quantidade de água alocada para atendimento das demandas e das área irrigadas, área ótimas alocadas para os perímetros ou áreas irrigadas com as respectivas receitas líquidas e mão de obra e, concentrações dos parâmetros de qualidade de água DBO e OD nos reservatório e nós do sistema) podem servir como regras operacionais para a alocação da água entre os múltiplos usuários do sistema atendendo as demandas, os objetivos e as restrições físicas estabelecidas.

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

7.2. SOBRE O SISTEMA ESTUDADO

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

A atividade agrícola pode ser desenvolvida no reservatório Boqueirão sem comprometer a demanda de abastecimento urbano das cidades (cenário 2), desde que seja realizado um estudo de quais culturas agrícolas devem ser cultivadas e em qual época do ano. Tal estudo deve considerar os diversos interesses dos agentes envolvidos, a disponibilidade de terra, a aptidão do solo e dos agricultores com determinada cultura agrícola e a variabilidade hidroclimática ao longo do tempo.

A completa utilização da área do perímetro irrigado nas margens do reservatório Boqueirão ficará comprometida caso a consideração do atendimento das concentrações permitidas dos parâmetros de qualidade de água tenha maior prioridade do que a receita líquida e a geração de empregos oriunda do perímetro irrigado (cenário 3). A implantação de um sistema de tratamento de esgoto nas cidades consideradas (cenário 4) acarretará na maximização da área utilizada no perímetro irrigado e, conseqüentemente, da receita líquida e da mão de obra empregada.

Fica evidente que o reservatório Acauã não utiliza toda a sua disponibilidade hídrica (o volume de água do reservatório é maior que 65% em todos os cenários), podendo utilizá-la para o cultivo de culturas agrícolas perenes e/ou sazonais e a prática da piscicultura intensiva e/ou extensiva.

7.3. RECOMENDAÇÕES

O modelo aqui desenvolvido tem grande potencial para ser utilizado no planejamento de sistemas de recursos hídricos podendo ser utilizado em escala diária ou semanal, dependendo da estrutura física do problema. Entretanto, para a consideração de menores escalas de tempo é necessário incorporar ao modelo a propagação das vazões liberadas pelos reservatórios.

A metodologia proposta para a implementação das não-linearidades do balanço de massa dos parâmetros de qualidade de água se mostrou satisfatória, sendo possível a incorporação de outros parâmetros de qualidade de água, como o fósforo total (orgânico e inorgânico), nitrogênio total (amônia, nitrito, nitrato), coliformes termotolerantes, entre outros; e de outras fontes poluidoras, tanto pontuais como difusas, ao modelo.

A prática do uso da piscicultura em reservatórios é bastante comum no Nordeste do Brasil. Assim, o estudo do retorno financeiro e da geração de emprego oriunda de práticas da piscicultura desenvolvida a nível extensivo, nos quais não são promovidas modificações no ambiente aquático, e a nível intensivo, com a consideração de outros parâmetros de qualidade de água, pode ser facilmente incorporado ao modelo.

Uma outra inovação interessante aos modelos de otimização de sistema de recursos hídricos pode ser a consideração da interligação entre dois reservatórios por meio de condutos livres e/ou forçados.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA - AESA. **Plano Estadual dos Recursos Hídricos. Relatório Final**. João Pessoa. 2010. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>. Data da consulta: 12 fev. 2010a.

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA - AESA. **Bacia Hidrografia do Rio Paraíba**. João Pessoa. 2010. Figura. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/comites/paraiba/imagens/mapap.jpg>>. Data da consulta: 15 mar. 2010b.

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA - AESA. **Plano Estadual dos Recursos Hídricos: Resumo executivo & atlas**. João Pessoa. 2010. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/perh.html>>. Data da consulta: 15 fev. 2010c.

AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. Resolução nº 687, de 03 de Dezembro de 2004. Disponível em: <http://www.piranhasacu.cbh.gov.br/Documentos/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20ANA_687-2004Marco%20Regulat%C3%B3rio.pdf>. Data da consulta: 23 mar. 2008.

AHMED, J. A.; SARMA, A. K. Genetic Algorithm for Optimal Operating Policy of a Multipurpose Reservoir. **Water Resources Management**, n. 19, p. 145–161. 2005.

ALBUQUERQUE, A. S. O., FARIAS, S. R. A., CURTI, R. C., CURTI, W. F. Avaliação do Potencial de Atendimento de uma Área Passível de Irrigação de 10 000 ha pelo Reservatório de Jataúba - PE. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Curitiba, 2003. CD-ROM.

ALBANO, G. D. **Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático de Qualidade de Água em Represas (CE-QUAL-R1) – Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacarei – Sistema Cantareira**. 2004. 266 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004

ALENCAR, V. C. **Análises multiobjetivo, baseada em programação linear, e comparativas para agriculturas de manejo convencional e orgânico**. 2009. 374 f. Tese

(Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

ALMEIDA, M. A.; CURI, R. C.; CURI, W. F. Estimativa de Variações no Desempenho Otimizado de um Sistema Hídrico para o Semi-árido Paraibano para Diferentes Cenários Climáticos, Fontes Hídricas e Funções Objetivo. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju, 2001. CD-ROM.

AMIR, I.; FISHER, F. M. Analyzing Agricultural Demand for Water with an Optimizing Model. **Agricultural Systems**, n. 61, p. 45–56. 1999.

ANDRADE, P. R. G. S.. **Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo para usos múltiplos na bacia do rio Capibaribe-PE**. 2006. 227 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

ARAGÃO, T. G. **Transposição das Águas do Rio São Francisco para a Bacia do Rio Paraíba: Uma Avaliação da Sinergia e Sustentabilidade Hídrica Utilizando o Modelo de Rede de Fluxo Acquanet**. 2008. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, 2008.

ARRUDA, P. C. **Comunidade de Fitoplantônica e Condicionantes Limnológicos no Diagnóstico da Eutrofização e Capacidade de Suporte do Reservatório de Acauã, Paraíba-Brasil**. 2009. 78 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba e Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2009.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L.; FILHO, K. Z. Modelos de Simulação e de Redes de Fluxo. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2002, p.164-237.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; PORTO, M. Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da água: Metodologia e Estudo de Caso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 21-51. 1998.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: DEAg/ CCT/UFPB. 1999. 153p.(Estudos FAO irrigação e drenagem, 29 revisado 1)

BANCO DO NORDESTE S/A. **Manual de Orçamentos Agropecuários**. Campina Grande – PB. 2006.

BARBOSA, D. L. **A Exploração de um Sistema de Reservatórios: Uma Análise Otimizada dos Usos e Objetivos Múltiplos na Bacia do Rio Capibaribe-PE**. 2008. 258 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

BARBOSA, P. S. F. Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2002, p. 97-163.

BARTH, F. T. Fundamentos para a Gestão dos Recursos Hídricos. In: **Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. São Paulo: NOBEL/ABRH. 1987, p. 1-91. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1).

BESSA, M. R.; MOROSOWSKI FILHO, M.; FAVORETO, R. S.; SALMAZO, C. T. Otimização da Operação em Longo Prazo das Usinas de Foz do Areia e Segredo na Bacia do Rio Iguaçu. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Curitiba, 2003. CD-ROM.

BRAGA, B.; GOBETTI, L. Análise Multiobjetivo. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2002, p. 361-420.

BRAGA, B. P. F. Técnicas de Otimização e Simulação Aplicadas em Sistemas De Recursos Hídricos. In: **Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. São Paulo: NOBEL/ABRH. 1997, p. 427-518.

BRAVO, J. M., COLLISCHONN, W., PILAR, J. V. Otimização da Operação de Reservatórios: Estado-da-Arte. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa, 2005. CD-ROM.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas (1961 – 1990)**. Brasília, 1992. 84 p.

BRITES, A. P. Z. **Enquadramento dos Corpos de Água Através de Metas Progressivas: Probabilidade de Ocorrência e Custos de Despoluição Hídrica**. 2010. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BROWN, L. C., BARNWELL, T. O. Jr. **The Enhanced Stream Water Quality Model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Computer Program Documentation and User Manual.** Athens: United States Environmental Protection Agency. 1987. 189p.

CARVALHO, D. F.; SOARES, A. A.; RIBEIRO, C. A. A.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. Otimização do Uso da Água no Perímetro Irrigado do Gorutuba, Utilizando-se a Técnica da Programação Linear. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 203-209, 2000.

CELESTE, A. B.; BARBOSA, R. L.; CURI, R. C.; CURI, W. F. Regras Operacionais Ótimas de Reservatórios para Irrigação em Condições de Escassez Hídrica. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, 2007. CD-ROM.

CELESTE, A. B. **Determinação e Análise de Indicadores de Desempenho e de Sustentabilidade de Seis Açudes na Bacia do Rio Piancó-PB e de Suas Potenciais Demandas.** 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, 2006.

CIRILO, J. A. Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2002, p. 305-359.

COHON, J. L.; MARKS, D. H. A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques. **Water Resources Research**, v. 11, n. 2. p. 208-220. 1975.

CONSOLI, S.; MATARAZZO, B.; PAPPALARDO, N. Operating Rules of an Irrigation Purposes Reservoir Using Multi-Objective Optimization. **Water Resources Management**, v. 22, p. 551-564. 2008.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A. Análise de Alterações na Receita Líquida de um Perímetro Irrigado no Semi-árido sob Condições de Variações Hídricas e Econômicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 3, p. 39-53. 2004.

CURI, W. F e CURI, R. C. CISDERGO – Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Optimal Operation. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju, 2001^a. CD-ROM.

CURI, W. F.; CURI, R. C. ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju, 2001b. CD-ROM.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas**. São Paulo, 2005. 116 p.

DIAZ, G. E.; BROWN, T. C.; SVEINSSON, O. **Aquarius: A Modeling System for River Basin Water Allocation**. General Technical Report RM-GTR-299-revised, Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 172 p. 2000

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop Water Requirements**. Rome. 1992. 144 p.(FAO, Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J. e KASSAM, A. H. **Efeito da Água no Rendimento das Culturas**. Campina Grande: Editora Universitária – UFPB, 2000. (FAO: Irrigação e Drenagem, v. 33)

EMPASA - EMPRESA PARAIBANA DE ABASTECIMENTO E SERVIÇOS AGRÍCOLAS. Disponível em: <<http://www.empasa.pb.gov.br/cotacoes.php>>. Data da consulta: 20 dez. 2009.

ENERGISA PARAÍBA - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S/A. Disponível em: <<http://www.paraiba.energisa.com.br/Default.aspx?tabid=1118>>. Data da consulta: 15 mai. 2009.

FARIAS, E. E. V. **Distribuição da Água do Projeto de Integração do Rio São Francisco no Estado da Paraíba - Eixo Leste: Análise De Perdas**. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, 2009.

FARIAS, S. R. A. **Operação Integrada dos Reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo**. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, 2004.

FIRMINO, M. B. M. **META-F: Um Modelo de Otimização Quali-Quantitativo para Operação de Sistemas de Recursos Hídricos e Poluição Fluvial**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

GOMES, H. P. **Engenharia de Irrigação Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento**. 3. ed. Campina Grande: Editora Universitária – UFPB, 1999, 412 p.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 14-20, 1982.

HIDROWEB - SISTEMA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Data da consulta: 05 jun. 2010.

HSU, N.-S.; CHENG, W.-C.; CHENG, W.-M.; WEI, C.-C.; YEH, W. W.-G. Optimization and Capacity Expansion of a Water Distribution System. **Advances in Water Resources**, v. 31, p. 776-786, 2008

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>>. Data da consulta: 18 jul. 2009.

KARAMOUZ, M.; HOUCK, M. H.; DELLEUR, J. W. Optimization and Simulation of Multiple Reservoir Systems. **Journal Water Resource Planning & Management**, v. 118, n. 1, p. 78-81. 1992.

LABADIE, J. W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-Of-The-Art Review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130. n. 2, p. 93-11. 2004.

LABADIE, J.W., PINEDA, A. M., BODE, D. A. **A Network Analysis of Raw Water Supplies Under Complex Water Rights and Exchanges**: Documentation For Program MODSIM3. Colorado Water Resources Institute. Fort Collins, Colorado, EUA. 1984.

LANNA, A. E. Introdução. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2002, p. 16-41.

LANNA, A. E. **Nota de Aula**: Cap. 5. Tópicos Avançados em PL: Método Simplex Revisado, Análise Pós-Ótimo e Artifícios de Linearização. Disciplina: Análise de Sistêmica de Recursos Hídricos. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da UFRGS, p. 75-87. 1998.

LANNA, A. E. Gestão de Recursos Hídricos. In: TUCCI, E. (Org.) **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: ABRH/EDUSP, 1993. p. 727-804.

LARENTIS, D. G., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Simulação da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Rio Taquari-Antas, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n. 3, p.5-22. 2008

LARENTIS, D. G. Modelagem Matemática da Qualidade da Água em Grandes Bacias: Sistema Taquari-ANTAS-RS. 2004. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LIMA, C. A. G. Análise e Sugestões para Diretrizes de Uso das Disponibilidades Hídricas Superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó, Localizada no Estado da Paraíba. 2004. 274 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L. Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n. 3, p.5-22. 2005.

LIMA, H. V. C.; LANNA, A. E. L. Operação Ótima de Sistemas de Reservatórios: Aplicação ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Aracaju. 2001. CD-ROM.

LINS, R. P. **Limnologia da Barragem de Acauã e Codeterminantes Socioeconômicos do seu Entorno**: Uma Nova Interação do Limnólogo com sua Unidade de Estudo. 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba e Universidade Estadual da Paraíba, João Pessoa, 2006.

MELO, D. M; CIRILO, J. A. Utilização do Modelo de Otimização Aquarius na Alocação de Água no Semi-Árido Paraibano. **Anais da II conferencia Internacional sobre Água em Regiões Áridas e Semi-Áridas**, Gravatá, 2007. CD-ROM.

MELO, D. J.; CURI, R. C.; CURI, W. F.; SANTOS, R. B. Avaliação do Potencial Econômico da Piscicultura Extensiva Utilizando um Modelo de Otimização em Cinco Reservatórios do Semi-Árido Paraibano. **Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Gravatá, 2006. CD-ROM.

MELO, A. B. **Estudo da otimização do uso dos recursos hídricos dos açudes Bruscas, Cachoeira dos Alves, Saco de Nova Olinda, Canoas e Queimadas no rio Piancó**. 2004. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, 2004.

MOUSAVI, S. J.; MOGHADDAM, K. S.; SEIFI, A. Application of an Interior-Point Algorithm for Optimization of a Large-Scale Reservoir System. **Water Resources Management**, v. 18, p. 519-540. 2004.

MUJUMDAR, P. P.; RAMESH, T. S. V. Real-Time Reservoir Operation for Irrigation. **Water Resource Research**, v. 33, n. 5, p. 1157-1164. 1997.

MUNEVAR, A., CHUNG, F. I., Modeling California's water resource systems with CALSIM. **Proc. 26th Annual Water Resources Planning and Management Conf.**, E. Wilson, ASCE, Tempe, AZ., 1999.

NUNES, D. G. **Modelagem da Autodepuração e Qualidade da Água do Rio Turvo Sujo**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O.; LEITÃO, T. H. V. Estimativa da Evaporação e Análise de Uso do Coeficiente (kp) do Tanque “Classe A” nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 73-83. 2005.

OLIVEIRA, M. B. A.; CURI, R. C.; CURI, W. F. Otimização da Receita no Perímetro Irrigado de Sousa-PB via Programação Linear. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 21, n. 3, p. 227-235, 2001.

OLIVEIRA, J. A.; LANNA, A. E. L. Otimização de um Sistema de Reservatórios Atendendo a Múltiplos Usos no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2, n.2, p. 123-141. 1997.

PEDREIRA, G. C. **Estudo da otimização do uso dos recursos hídricos do reservatório Poço Redondo e determinação de indicadores de desempenho do reservatório e do perímetro irrigado**. 2005. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

PERERA, B. J. C., CODNER, G. P. Reservoir Targets for Urban Water Supply Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 122, n. 4, p. 270-279. 1996.

ROBERTO, A. N. **Modelos de Rede de Fluxo Para Alocação da Água Entre Múltiplos Usos em uma Bacia Hidrográfica**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ROBERTO, A. N. e PORTO, R. L. L. O Sistema MODSIMLS: Um Modelo de Rede de Fluxo para Simulação De Bacias Hidrográficas. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Aracaju. 2001. CD-ROM.

ROBERTO, A. N. e PORTO, R. L. L. Alocação da Água Entre Múltiplos em uma Bacia Hidrográfica. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte. 1999. CD-ROM

ROS, D. A.; BARROS, M. Estratégias Operacionais de Sistemas Hidroenergeticos: Impactos de Diferentes Objetivos. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Curitiba. 2003. CD-ROM

SALMAN, A. Z.; AL-KARABLIEH, E. K.; FISHER, F. M. () An Inter-Seasonal Agricultural Water Allocation System (SAWAS). **Agricultural Systems**, v. 68, p. 233–252, 2001

SANTOS, V. S. **Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos**. 2007, 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SANTOS, V. S.; VIEIRA, A. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Regras Operacionais Ótimas e Integradas para dois Reservatórios, em Série, e um Perímetro Irrigado no Semi-Árido Paraibano. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, 2007a. CD-ROM.

SANTOS, V. S.; VIEIRA, A. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Planejamento Ótimo e Integrado da Operação de dois Reservatórios, em Série, e um Perímetro Irrigado no Semi-Árido Paraibano. **Anais da II Conferência Internacional sobre Águas em Regiões Áridas e Semi-Áridas**, Gravataá, 2007b. (CD-ROM).

SCHARDONG, A. **Aplicação de Técnicas de Programação Linear e Extensões para Otimização da Alocação de Água em Sistemas de Recursos Hídricos, Utilizando Métodos de Pontos Interiores**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SERRANO, P. R. G.; CURI, W. F.; CURI, R. C. ORNAP na Otimização d Receita de Três Perímetros Irrigados Abastecidos por Dois Reservatórios Conectados em Série. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 22-32. 2002.

SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. **Hidráulica Fluvial**. 2. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 2007. 305 P.

SILVA, C. A. B. **Estudo da Otimização do Uso dos Recursos Hídricos dos Açudes Santa Inês, Condado, Serra Vermelha I, Piranhas, Vídeo, Vazante e Poço Redondo na Bacia**

do Rio Piancó. 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

SIMONOVIC, S. P. Reservoir System Analysis: Closing Gap between Theory and Practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, n. 3, p. 262-280. 1992.

SOUZA, R. S. **Simulação Hidrodinâmica da Qualidade da Água. Estudo de Caso: ajuste do Modelo CE-QUAL-W3 à Sub-Bacia do Arroio Demétrio, Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí/RS.** 2006. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SUDENE - SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado da Paraíba:** Série pluviométrica 5. Recife. 1990.

SUDEMA - SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em: <<http://www.sudema.pb.gov.br/artigo.php?id=31052007024108>>. Data da consulta: 20 out. 2010.

SUDHA, V.; VENUGOPAL K.; AMBUJA, N. K. Reservoir Operation Management through Optimization and Deficit Irrigation. **Irrigation Drainage System**, v. 22, p. 93-102. 2008.

TEEGAVARAPU, R. S. V.; SIMONOVIC, S. P. Optimal Operation of Water Resource Systems: Trade-Offs Between Modeling and Practical Solutions. In: Marino, M. A.; Simonovic, S. P. **Integrated Water Resources Management.** Iahs Publish, n. 272, p. 257-263. 2001.

TEIXEIRA, C. A., PORTO, R. L. L. Avaliação da Qualidade da Água e Autodepuração dos Rios da Bacia do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 16, p. 20-31. 2008.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.

VIANNA, W. P. Jr.; LANNA, A. E. L. Simulação e otimização de um sistema de reservatórios: bacia do rio Curu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, p. 63-83. 2002.

VIEIRA, Z. M. C. L. **Metodologia de análise de conflitos na implantação de medidas de gestão da demanda de água.** 2008. 255 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

VIEIRA, A. S.; SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C. A Multiobjective Linear Programming Model for Agricultural Crop Areas Allocation: Case Study. **Anais da International Conference Of Agricultural Engineering e do XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Foz do Iguaçu, 2008. CD-ROM.

VIEIRA, A. S. **Um Modelo de Simulação Via Programação Linear Sequencial, para Sistema de Recursos Hídricos**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

VIEIRA, A. S.; SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Análise da Eficiência da Regra de Operação Integrada de Reservatórios e Perímetros Irrigados no Semi-Árido Brasileiro. **Anais da II Conferência Internacional sobre Águas em Regiões Áridas e Semi-Áridas**. Gravatá. 2007. CD-ROM.

VIEIRA, V. P. P. B. Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semi-árido Nordeste. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 91-107. 1996.

VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 588 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. 243 p.

WURBS, R. A. Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models. **Technical Report n. 282**. Texas Water Resources Institute. 2005

WURBS, R. A. Reservoir-System Simulation and Optimization Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 4, p. 455-472. 1993.

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

YOUNG, G. K., Jr. Finding Reservoir Operating Rules. **Journal Water Resource Planning & Management**, v. 93, n. 4, p. 297-321. 1967

APÊNDICE A

Estimativa populacional das cidades atendidas pelas adutoras do sistema

Cidades	População (habitantes)			
	ano 1	ano 2	ano 3	ano 4
Boqueirão	11.432	11.462	11.491	11.520
Cabaceiras	2.229	2.282	2.337	2.393
Boa Vista	3.642	3.813	3.993	4.184
Soledade	10.291	10.486	10.681	10.876
Seridó	3.236	3.337	3.441	3.549
Olivedos	1.672	1.694	1.715	1.737
Juazeirinho	9.027	9.182	9.336	9.491
Cubati	4.664	4.727	4.790	4.853
Pedra Lavrada	3.071	3.128	3.186	3.243
Campina grande	381.300	386.030	390.760	395.490
Queimadas	21.821	22.351	22.881	23.412
Caturité	1.114	1.157	1.202	1.249
Pocinhos	9.423	9.647	9.881	10.126
Barra de Santana	793	810	826	842
Riacho de Santo Antonio	1.086	1.117	1.149	1.183
Barra de São Miguel	2.550	2.603	2.656	2.709
Alcantil	2.421	2.542	2.668	2.797
Itatuba	5.874	5.968	6.062	6.156
Fagundes	5.911	6.009	6.107	6.205
Ingá	12.279	12.450	12.621	12.792
Juarez Tavorá	6.217	6.313	6.409	6.505
Mogeiro	5.664	5.768	5.872	5.976
Riachão do Bacamarte	2.946	2.998	3.051	3.103
Gado Bravo	819	824	830	835
Aroeiras	9.532	9.898	10.278	10.673
Itabaiana	20.276	20.301	20.327	20.351
Juripiranga	10.196	10.323	10.450	10.577
Salgado de S. Felix	5.629	5.735	5.841	5.946
Pilar	7.888	7.979	8.070	8.162
São Miguel de Taipu	3.128	3.153	3.178	3.203
Total	566.130	574.086	582.088	590.139

APÊNDICE B

Demandas das adutoras do sistema

Sistema adutor	Demanda (l/s)			
	ano 1	ano 2	ano 3	ano 4
Boqueirão	1152,25	1168,00	1183,80	1199,65
Cariri	128,36	130,62	132,91	135,25
TOTAL	1280,61	1298,61	1316,71	1334,90
Acauã – ramal norte	90,03	91,45	92,87	94,30
Acauã – ramal leste	23,96	24,82	25,71	26,64
Acauã – ramal oeste	109,07	109,93	110,80	111,67
TOTAL	223,05	226,20	229,39	232,60

APÊNDICE C

Erro relativo do valor da DBO no cenário 2.

Balanço de massa			Autodepuração		
Res. Boqueirão	Nó 1	Nó 2	Res. Acauã	Trecho 1	Trecho 2
0,0009	0,0001	0,0001	0,0154	0,0001	0,0001
0,0060	0,0287	0,0155	0,0139	0,0145	0,0075
0,0273	0,0066	0,0010	0,0084	0,0066	0,0010
0,0294	0,0036	0,0025	0,0091	0,0051	0,0032
0,0309	0,1184	0,0001	0,0091	0,0575	0,0100
0,0315	0,0857	0,0347	0,0082	0,0501	0,0287
0,0322	0,0860	0,0299	0,0072	0,0534	0,0189
0,0328	0,0030	0,0027	0,0060	0,0048	0,0037
0,0335	0,0980	0,0557	0,0044	0,0508	0,0261
0,0343	0,0076	0,0069	0,0033	0,0076	0,0071
0,0351	0,0075	0,0068	0,0022	0,0075	0,0068
0,0361	0,0543	0,0328	0,0010	0,0284	0,0307
0,0373	0,0354	0,0192	0,0006	0,0158	0,0161
0,0387	0,0005	0,0024	0,0020	0,0036	0,0090
0,0402	0,0868	0,0503	0,0035	0,0477	0,0384
0,0426	0,0689	0,0361	0,0053	0,0318	0,0243
0,0472	0,0957	0,0186	0,0071	0,0462	0,0189
0,0488	0,0519	0,0098	0,0083	0,0283	0,0164
0,0509	0,0931	0,0069	0,0104	0,0502	0,0096
0,0527	0,0001	0,0023	0,0119	0,0036	0,0110
0,0548	0,0903	0,0388	0,0139	0,0460	0,0204
0,0572	0,0151	0,0071	0,0153	0,0047	0,0176
0,0601	0,0188	0,0092	0,0166	0,0065	0,0197
0,0634	0,0087	0,0026	0,0180	0,0004	0,0163
0,0674	0,0683	0,0418	0,0195	0,0362	0,0405
0,0767	0,0468	0,0255	0,0209	0,0212	0,0327
0,0831	0,0854	0,0309	0,0234	0,0366	0,0210
0,0877	0,0842	0,0306	0,0253	0,0361	0,0278
0,0930	0,0832	0,0262	0,0271	0,0373	0,0270
0,1010	0,0832	0,0033	0,0276	0,0384	0,0127
0,1072	0,0826	0,0468	0,0296	0,0411	0,0300
0,1146	0,0430	0,0245	0,0310	0,0198	0,0358
0,1235	0,0422	0,0236	0,0323	0,0188	0,0375
0,1348	0,0412	0,0210	0,0335	0,0155	0,0433
0,1493	0,0399	0,0191	0,0346	0,0131	0,0479
0,1679	0,0020	0,0060	0,0360	0,0102	0,0341
0,1983	0,0219	0,0201	0,0378	0,0244	0,0240
0,2264	0,0189	0,0180	0,0397	0,0227	0,0232
0,1543	0,0428	0,0044	0,0446	0,0428	0,0044
0,0767	0,1445	0,0023	0,0352	0,0589	0,0029
0,0688	0,1438	0,0038	0,0351	0,0633	0,0186
0,0691	0,0419	0,0190	0,0364	0,0145	0,0281
0,0695	0,1372	0,0630	0,0378	0,0691	0,0368
0,0699	0,0045	0,0079	0,0385	0,0103	0,0222
0,0703	0,0069	0,0095	0,0392	0,0117	0,0212
0,0708	0,0070	0,0006	0,0399	0,0038	0,0262
0,0715	0,0179	0,0164	0,0407	0,0182	0,0169
0,0721	0,0534	0,0283	0,0412	0,0229	0,0372

APÊNDICE D

Erro relativo do valor da OD no cenário 2.

Balço de massa			Autodepuraço		
Res. Boqueirã	Nó 1	Nó 2	Res. Acauã	Trecho 1	Trecho 2
0,0001	0,0001	0,0000	0,0090	0,0000	0,0000
0,0009	0,0005	0,0005	0,0091	0,0001	0,0000
0,0066	0,0066	0,0000	0,0027	0,0000	0,0000
0,0049	0,0050	0,0000	0,0046	0,0000	0,0000
0,0053	0,0039	0,0004	0,0043	0,0002	0,0000
0,0047	0,0025	0,0002	0,0044	0,0001	0,0000
0,0047	0,0025	0,0002	0,0036	0,0001	0,0001
0,0046	0,0047	0,0000	0,0026	0,0000	0,0000
0,0046	0,0034	0,0003	0,0022	0,0002	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0015	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0009	0,0000	0,0000
0,0045	0,0029	0,0000	0,0003	0,0001	0,0000
0,0045	0,0039	0,0002	0,0004	0,0001	0,0000
0,0045	0,0043	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000
0,0046	0,0022	0,0019	0,0015	0,0001	0,0000
0,0049	0,0039	0,0002	0,0022	0,0002	0,0000
0,0059	0,0046	0,0005	0,0030	0,0002	0,0000
0,0055	0,0038	0,0001	0,0034	0,0001	0,0000
0,0058	0,0046	0,0002	0,0044	0,0002	0,0000
0,0058	0,0055	0,0000	0,0045	0,0000	0,0000
0,0059	0,0047	0,0002	0,0052	0,0002	0,0000
0,0060	0,0054	0,0000	0,0055	0,0001	0,0000
0,0061	0,0055	0,0000	0,0058	0,0001	0,0000
0,0063	0,0058	0,0000	0,0062	0,0001	0,0000
0,0066	0,0046	0,0001	0,0065	0,0001	0,0000
0,0082	0,0066	0,0007	0,0069	0,0001	0,0000
0,0087	0,0075	0,0023	0,0077	0,0002	0,0000
0,0088	0,0076	0,0004	0,0081	0,0002	0,0000
0,0093	0,0081	0,0005	0,0087	0,0002	0,0000
0,0106	0,0093	0,0002	0,0091	0,0002	0,0000
0,0110	0,0098	0,0003	0,0094	0,0002	0,0000
0,0117	0,0100	0,0000	0,0096	0,0001	0,0000
0,0126	0,0109	0,0000	0,0100	0,0001	0,0000
0,0136	0,0120	0,0000	0,0101	0,0001	0,0000
0,0151	0,0134	0,0000	0,0103	0,0001	0,0000
0,0171	0,0165	0,0000	0,0106	0,0001	0,0000
0,0223	0,0222	0,0000	0,0110	0,0000	0,0000
0,0256	0,0254	0,0001	0,0114	0,0000	0,0000
0,0452	0,0452	0,0000	0,0174	0,0000	0,0000
0,0233	0,0212	0,0000	0,0156	0,0003	0,0000
0,0151	0,0133	0,0006	0,0132	0,0003	0,0000
0,0139	0,0130	0,0002	0,0130	0,0002	0,0000
0,0137	0,0120	0,0004	0,0135	0,0003	0,0001
0,0132	0,0130	0,0001	0,0135	0,0001	0,0000
0,0129	0,0127	0,0000	0,0136	0,0001	0,0000
0,0125	0,0119	0,0000	0,0134	0,0001	0,0000
0,0121	0,0121	0,0000	0,0133	0,0000	0,0000
0,0118	0,0098	0,0015	0,0133	0,0001	0,0000

APÊNDICE E

Erro relativo do valor da DBO no cenário 3.

Balço de massa			Autodepuraço		
Res. Boqueirão	Nó 1	Nó 2	Res. Acauã	Trecho 1	Trecho 2
0,0009	0,0001	0,0001	0,0185	0,0001	0,0001
0,0060	0,0013	0,0010	0,0175	0,0013	0,0010
0,0274	0,0072	0,0012	0,0115	0,0072	0,0012
0,0295	0,0078	0,0036	0,0123	0,0078	0,0036
0,0310	0,0084	0,0045	0,0127	0,0084	0,0045
0,0317	0,0083	0,0070	0,0120	0,0083	0,0070
0,0323	0,0083	0,0063	0,0109	0,0083	0,0063
0,0329	0,0083	0,0042	0,0097	0,0083	0,0042
0,0336	0,0082	0,0075	0,0086	0,0082	0,0075
0,0344	0,0082	0,0075	0,0074	0,0082	0,0075
0,0353	0,0082	0,0075	0,0062	0,0082	0,0075
0,0363	0,0082	0,0075	0,0050	0,0082	0,0075
0,0374	0,0082	0,0075	0,0035	0,0082	0,0075
0,0388	0,0083	0,0076	0,0021	0,0083	0,0076
0,0402	0,0084	0,0068	0,0004	0,0084	0,0068
0,0426	0,0088	0,0079	0,0011	0,0088	0,0079
0,0471	0,0099	0,0076	0,0027	0,0099	0,0076
0,0487	0,0101	0,0074	0,0040	0,0101	0,0074
0,0508	0,0104	0,0060	0,0061	0,0104	0,0060
0,0526	0,0106	0,0097	0,0078	0,0106	0,0097
0,0547	0,0108	0,0084	0,0095	0,0108	0,0084
0,0570	0,0111	0,0101	0,0111	0,0111	0,0101
0,0597	0,0114	0,0103	0,0127	0,0114	0,0103
0,0628	0,0118	0,0107	0,0143	0,0118	0,0107
0,0666	0,0123	0,0111	0,0160	0,0123	0,0111
0,0753	0,0143	0,0121	0,0177	0,0143	0,0121
0,0812	0,0155	0,0098	0,0199	0,0155	0,0098
0,0856	0,0161	0,0130	0,0215	0,0161	0,0130
0,0905	0,0169	0,0141	0,0231	0,0169	0,0141
0,0982	0,0186	0,0101	0,0236	0,0186	0,0101
0,1044	0,0197	0,0179	0,0254	0,0197	0,0179
0,1116	0,0211	0,0192	0,0269	0,0211	0,0192
0,1201	0,0227	0,0207	0,0285	0,0227	0,0207
0,1303	0,0247	0,0223	0,0300	0,0247	0,0223
0,1429	0,0272	0,0247	0,0314	0,0272	0,0247
0,1585	0,0284	0,0257	0,0329	0,0284	0,0257
0,1838	0,0290	0,0251	0,0348	0,0290	0,0251
0,2072	0,0284	0,0243	0,0368	0,0284	0,0243
0,1492	0,0487	0,0056	0,0434	0,0487	0,0056
0,0759	0,0277	0,0035	0,0343	0,0277	0,0035
0,0683	0,0247	0,0149	0,0334	0,0247	0,0149
0,0686	0,0244	0,0225	0,0339	0,0244	0,0225
0,0689	0,0241	0,0216	0,0344	0,0241	0,0216
0,0693	0,0239	0,0222	0,0350	0,0239	0,0222
0,0698	0,0233	0,0216	0,0356	0,0233	0,0216
0,0704	0,0218	0,0201	0,0363	0,0218	0,0201
0,0710	0,0214	0,0195	0,0370	0,0214	0,0195
0,0716	0,0210	0,0167	0,0377	0,0210	0,0167

APÊNDICE F

Erro relativo do valor da OD no cenário 3.

Balço de massa				Autodepuraço	
Res. Boqueirão	Nó 1	Nó 2	Res. Acauã	Trecho 1	Trecho 2
0,0001	0,0001	0,0000	0,0060	0,0000	0,0000
0,0009	0,0009	0,0000	0,0114	0,0000	0,0000
0,0066	0,0066	0,0000	0,0045	0,0000	0,0000
0,0049	0,0049	0,0000	0,0063	0,0000	0,0000
0,0053	0,0053	0,0000	0,0061	0,0000	0,0000
0,0048	0,0048	0,0000	0,0063	0,0000	0,0000
0,0048	0,0048	0,0000	0,0055	0,0000	0,0000
0,0047	0,0047	0,0000	0,0044	0,0000	0,0000
0,0046	0,0046	0,0000	0,0041	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0033	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0027	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0020	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0014	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0007	0,0000	0,0000
0,0046	0,0046	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0049	0,0049	0,0000	0,0005	0,0000	0,0000
0,0058	0,0058	0,0000	0,0012	0,0000	0,0000
0,0055	0,0055	0,0000	0,0017	0,0000	0,0000
0,0058	0,0058	0,0000	0,0026	0,0000	0,0000
0,0058	0,0058	0,0000	0,0028	0,0000	0,0000
0,0059	0,0059	0,0000	0,0034	0,0000	0,0000
0,0059	0,0059	0,0000	0,0038	0,0000	0,0000
0,0061	0,0061	0,0000	0,0042	0,0000	0,0000
0,0063	0,0063	0,0000	0,0046	0,0000	0,0000
0,0065	0,0065	0,0000	0,0050	0,0000	0,0000
0,0080	0,0080	0,0000	0,0055	0,0000	0,0000
0,0085	0,0085	0,0000	0,0061	0,0000	0,0000
0,0086	0,0086	0,0000	0,0065	0,0000	0,0000
0,0090	0,0090	0,0000	0,0069	0,0000	0,0000
0,0102	0,0102	0,0000	0,0074	0,0000	0,0000
0,0107	0,0107	0,0000	0,0075	0,0000	0,0000
0,0113	0,0113	0,0000	0,0078	0,0000	0,0000
0,0121	0,0121	0,0000	0,0082	0,0000	0,0000
0,0131	0,0131	0,0000	0,0084	0,0000	0,0000
0,0143	0,0143	0,0000	0,0086	0,0000	0,0000
0,0160	0,0160	0,0000	0,0089	0,0000	0,0000
0,0203	0,0203	0,0000	0,0094	0,0000	0,0000
0,0230	0,0230	0,0000	0,0098	0,0000	0,0000
0,0427	0,0427	0,0000	0,0161	0,0001	0,0000
0,0229	0,0229	0,0000	0,0148	0,0000	0,0000
0,0149	0,0149	0,0000	0,0120	0,0000	0,0000
0,0137	0,0137	0,0000	0,0116	0,0000	0,0000
0,0135	0,0135	0,0000	0,0117	0,0000	0,0000
0,0131	0,0131	0,0000	0,0116	0,0000	0,0000
0,0128	0,0128	0,0000	0,0115	0,0000	0,0000
0,0123	0,0123	0,0000	0,0114	0,0000	0,0000
0,0120	0,0120	0,0000	0,0113	0,0000	0,0000
0,0117	0,0117	0,0000	0,0113	0,0000	0,0000

APÊNDICE G

Erro relativo do valor da DBO no cenário 4.

Balço de massa			Autodepuraço		
Res. Boqueirão	Nó 1	Nó 2	Res. Acauã	Trecho 1	Trecho 2
0,0002	0,0002	0,0002	0,0582	0,0002	0,0002
0,0041	0,0010	0,0005	0,0578	0,0010	0,0005
0,0269	0,0140	0,0009	0,0467	0,0140	0,0009
0,0288	0,0081	0,0011	0,0465	0,0081	0,0011
0,0302	0,0086	0,0015	0,0458	0,0086	0,0015
0,0304	0,0085	0,0049	0,0455	0,0085	0,0049
0,0306	0,0084	0,0035	0,0448	0,0084	0,0035
0,0308	0,0082	0,0013	0,0429	0,0082	0,0013
0,0309	0,0081	0,0066	0,0424	0,0081	0,0066
0,0311	0,0079	0,0068	0,0419	0,0079	0,0068
0,0314	0,0078	0,0069	0,0414	0,0078	0,0069
0,0316	0,0076	0,0067	0,0408	0,0076	0,0067
0,0319	0,0075	0,0064	0,0401	0,0075	0,0064
0,0323	0,0074	0,0065	0,0394	0,0074	0,0065
0,0327	0,0073	0,0037	0,0382	0,0073	0,0037
0,0341	0,0075	0,0061	0,0373	0,0075	0,0061
0,0382	0,0085	0,0036	0,0356	0,0085	0,0036
0,0386	0,0084	0,0033	0,0342	0,0084	0,0033
0,0395	0,0085	0,0019	0,0304	0,0085	0,0019
0,0399	0,0084	0,0074	0,0295	0,0084	0,0074
0,0404	0,0083	0,0038	0,0279	0,0083	0,0038
0,0409	0,0082	0,0072	0,0269	0,0082	0,0072
0,0415	0,0081	0,0071	0,0259	0,0081	0,0071
0,0422	0,0080	0,0070	0,0248	0,0080	0,0070
0,0432	0,0080	0,0070	0,0235	0,0080	0,0070
0,0501	0,0094	0,0059	0,0220	0,0094	0,0059
0,0536	0,0100	0,0025	0,0183	0,0100	0,0025
0,0546	0,0099	0,0051	0,0164	0,0099	0,0051
0,0556	0,0099	0,0058	0,0144	0,0099	0,0058
0,0596	0,0105	0,0019	0,0102	0,0105	0,0019
0,0608	0,0105	0,0091	0,0089	0,0105	0,0091
0,0622	0,0105	0,0093	0,0075	0,0105	0,0093
0,0637	0,0106	0,0093	0,0061	0,0106	0,0093
0,0656	0,0106	0,0089	0,0047	0,0106	0,0089
0,0678	0,0107	0,0093	0,0031	0,0107	0,0093
0,0703	0,0109	0,0094	0,0015	0,0109	0,0094
0,0820	0,0129	0,0094	0,0004	0,0129	0,0094
0,0893	0,0139	0,0102	0,0023	0,0139	0,0102
0,1235	0,0770	0,0044	0,0360	0,0770	0,0044
0,0751	0,0237	0,0005	0,0345	0,0237	0,0005
0,0686	0,0631	0,0515	0,0248	0,0631	0,0515
0,0686	0,0368	0,0340	0,0244	0,0368	0,0340
0,0687	0,0328	0,0266	0,0243	0,0328	0,0266
0,0688	0,0397	0,0378	0,0236	0,0397	0,0378
0,0689	0,0396	0,0376	0,0230	0,0396	0,0376
0,0690	0,0409	0,0389	0,0221	0,0409	0,0389
0,0692	0,0274	0,0244	0,0224	0,0274	0,0243
0,0693	0,0252	0,0134	0,0228	0,0252	0,0134

APÊNDICE H

Erro relativo do valor da OD no cenário 4.

Balço de massa			Autodepuraço		
Res. Boqueirão	Nó 1	Nó 2	Res. Acauã	Trecho 1	Trecho 2
0,0000	0,0000	0,0000	0,0291	0,0000	0,0000
0,0007	0,0007	0,0000	0,0353	0,0000	0,0000
0,0066	0,0066	0,0000	0,0246	0,0000	0,0000
0,0048	0,0048	0,0000	0,0245	0,0000	0,0000
0,0051	0,0051	0,0000	0,0226	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0222	0,0000	0,0000
0,0044	0,0044	0,0000	0,0211	0,0000	0,0000
0,0042	0,0042	0,0000	0,0188	0,0000	0,0000
0,0041	0,0041	0,0000	0,0182	0,0000	0,0000
0,0039	0,0039	0,0000	0,0170	0,0000	0,0000
0,0038	0,0038	0,0000	0,0159	0,0000	0,0000
0,0036	0,0036	0,0000	0,0149	0,0000	0,0000
0,0035	0,0035	0,0000	0,0139	0,0000	0,0000
0,0035	0,0035	0,0000	0,0130	0,0000	0,0000
0,0034	0,0034	0,0000	0,0121	0,0000	0,0000
0,0035	0,0035	0,0000	0,0114	0,0000	0,0000
0,0043	0,0043	0,0000	0,0104	0,0000	0,0000
0,0039	0,0039	0,0000	0,0096	0,0000	0,0000
0,0040	0,0040	0,0000	0,0083	0,0000	0,0000
0,0038	0,0038	0,0000	0,0080	0,0000	0,0000
0,0037	0,0037	0,0000	0,0073	0,0000	0,0000
0,0036	0,0036	0,0000	0,0068	0,0000	0,0000
0,0035	0,0035	0,0000	0,0062	0,0000	0,0000
0,0035	0,0035	0,0000	0,0057	0,0000	0,0000
0,0034	0,0034	0,0000	0,0052	0,0000	0,0000
0,0043	0,0043	0,0000	0,0047	0,0000	0,0000
0,0044	0,0044	0,0000	0,0037	0,0000	0,0000
0,0042	0,0042	0,0000	0,0033	0,0000	0,0000
0,0042	0,0042	0,0000	0,0028	0,0000	0,0000
0,0046	0,0046	0,0000	0,0016	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0017	0,0000	0,0000
0,0045	0,0045	0,0000	0,0014	0,0000	0,0000
0,0044	0,0044	0,0000	0,0011	0,0000	0,0000
0,0044	0,0044	0,0000	0,0008	0,0000	0,0000
0,0044	0,0044	0,0000	0,0005	0,0000	0,0000
0,0044	0,0044	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000
0,0055	0,0055	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000
0,0058	0,0058	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000
0,0233	0,0233	0,0000	0,0104	0,0000	0,0000
0,0178	0,0178	0,0000	0,0119	0,0000	0,0000
0,0128	0,0128	0,0001	0,0067	0,0001	0,0001
0,0117	0,0117	0,0000	0,0057	0,0000	0,0000
0,0115	0,0115	0,0000	0,0056	0,0000	0,0000
0,0110	0,0110	0,0000	0,0051	0,0000	0,0000
0,0106	0,0106	0,0000	0,0048	0,0000	0,0000
0,0101	0,0101	0,0000	0,0043	0,0000	0,0000
0,0097	0,0097	0,0000	0,0042	0,0000	0,0000
0,0094	0,0094	0,0000	0,0041	0,0000	0,0000