

Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DO EIXO LESTE NO ESTADO DA
PARAÍBA ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

DAVID SILVA LÚCIO OLIVEIRA

Campina Grande
Data: 2013

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DO EIXO LESTE NO ESTADO DA
PARAÍBA ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

David Silva Lúcio Oliveira

Campina Grande
2013

David Silva Lúcio Oliveira

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DO EIXO LESTE NO ESTADO DA PARAÍBA ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, área de concentração Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi

Co-orientador: Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos

Campina Grande

2013





FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

O48a Oliveira, David Silva Lúcio
Análise de alternativas para o uso das águas do projeto de integração do Rio São Francisco do eixo leste no estado da Paraíba através de um modelo de otimização multiobjetivo / David Silva Lúcio Oliveira. – Campina Grande, 2013.

127 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi, Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos".

Referências.

1. Recursos Hídricos - Rio São Francisco. 2. Rio São Francisco - Transposição. 3. Rio Paraíba. 4. Otimização. 5. Programação linear. I. Curi, Wilson Fadlo. II. Santos, Vatterlin da Silva. III. Título.

CDU 556.18(043)

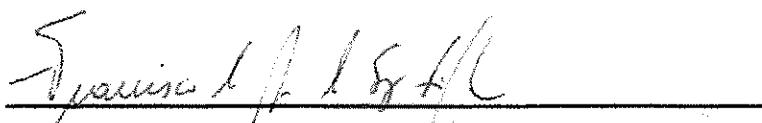
David Silva Lúcio Oliveira

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DO EIXO LESTE NO ESTADO DA PARAÍBA ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, área de concentração Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.


Dr. Wilson Fadlo Curi
Orientador (UAF/UFCG)


Dr. Valterlin da Silva Santos
Coorientador (UACC/UFCG)


Dr. Francisco de Assis de Souza Filho
Examinador Externo (DEHA/UFC)


Dr. Camilo Allyson Simões de Farias
Examinador Interno (UACTA/UFCG)

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais, Ueliton Brito de Oliveira e Jacira Silva Lúcio Oliveira, que dedicaram parte de sua vida para me educar, sempre colocando os estudos em primeiro lugar e mostrando o valor e importância de cada coisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e por ter colocado pais tão dedicados e amorosos em meu caminho. Também, por me ensinar através dos Seus ensinamentos a ser um homem melhor e conseguir ter fé;

Aos meus Pais, Ueliton e Jacira, por terem conseguido despertar em mim o interesse do aprender, e por mostrar diversas vezes os meus erros, corrigindo-os quando possível. Tudo que sou e conquistei até hoje devo a eles;

A minha namorada, Polyanna Dantas Limeira de Queiroz, pelo seu apoio e conselhos nos diversos momentos da minha vida. Também, por ser uma pessoa maravilhosa e me fazer feliz desde o primeiro momento que entrou em minha vida;

A família da minha namorada por serem verdadeiros amigos e me apoiarem na decisão de fazer o mestrado. Em especial, a Maria Germana, que ajudou no engrandecimento deste trabalho;

Pela amizade do Pe. Fabiano Cruz que viajou comigo aos açudes deste estudo, ajudando a melhorar o conhecimento sobre a área estudada, possibilitando uma visualização da situação atual;

Aos professores Dr. Wilson Fadlo Curi e Dr. Valterlin da Silva Santos, pela paciência e ensinamentos;

Aos amigos do mestrado, em especial Caio César e Viviane Lucena, por serem grandes amigos e colaborarem no meu aprendizado em sala de aula;

Ao CNPq que apoiou financeiramente meus estudos, e a todos que, de forma direta e indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A escassez de água em regiões semiáridas como o nordeste brasileiro limita o crescimento socioeconômico da região. Uma das soluções para resolver parte desse problema é o Projeto de Integração do Rio São Francisco. No Estado da Paraíba, a bacia hidrográfica do Rio Paraíba irá receber a água exógena através do Eixo Leste do projeto, garantindo uma oferta contínua de água. Diante da importância do projeto de integração e da implantação de um gerenciamento adequado, este trabalho tem como objetivo analisar duas propostas de uso das águas da bacia do Rio Paraíba após a transposição com enfoque nos açudes Poções, Camalaú, Epitácio Pessoa e Argemiro de Figueiredo, que encontram-se no trecho que receberá a água transposta. Para análise dessas propostas criou-se quatro cenários, distinguindo-os na prioridade de atendimento das demandas e nos critérios de operação do sistema. Tais cenários foram avaliados através de um modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear, para um período de 10 anos, objetivando avaliar o desempenho dos diversos usos da água, o comportamento dos reservatórios e fazer uma estimativa do valor gasto com energia elétrica provida pela adução da água para o abastecimento nos cenários estudados. Os resultados obtidos demonstram que as demandas de abastecimento urbano foram atendidas plenamente em todos os cenários. Tem-se que as demandas de irrigação sofreram forte influência da vazão exigida pelo canal de integração Acauã-Araçagi, não sendo atendida em dois cenários estudados. Conclui-se também, que a vazão máxima estimada para o canal de integração Acauã-Araçagi não é sustentável, e os menores custos estimados foram obtidos com a alternativa proposta pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, sendo assim, considerada a melhor alternativa para todos os objetivos.

PALAVRAS-CHAVE: Transposição. Rio Paraíba. Otimização. Programação Linear.

ABSTRACT

Water scarcity in semiarid regions such as the northeastern Brazil limits the socioeconomic growth of the region. One of the solutions to solve part of this problem is the Integration Project of the São Francisco River. In the State of Paraíba, the watershed of the Paraíba River will receive exogenous water through the East Axis project, ensuring a continuous supply of water. Given the importance of the integration and implementation of proper management, this paper aims to examine two proposals for use of the waters Paraíba River Basin after transposition focusing on Poções, Camalaú, Epitácio Pessoa and Argemiro de Figueiredo dams, while lie in the passage that receives water transposed. For analysis of these proposals it was created four scenarios, distinguishing them in priority of service demands and criteria for system operation. Such scenarios were assessed using a multi-objective optimization model based on linear programming for a period of 10 years, in order to evaluate the performance of the various uses of water, the reservoir behavior and to estimate the amount spent on electricity provided by adduction water supply for the scenarios studied. The results show that the demands of urban water supply have been met in all scenarios. The irrigation demands were strongly influenced by flow required for channel integration Acauã-Araçagi, not being met in two scenarios studied. We also conclude that the maximum flow estimated for channel integration Acauã-Araçagi is not sustainable, and lower cost estimates were obtained with the alternative proposed by the Executive Agency for Water Management in the State of Paraíba, therefore, considered best alternative for all purposes.

KEYWORDS: Transposition. Paraíba River. Optimization. Linear Programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.....	30
Figura 2. Eixos do PISF.....	34
Figura 3. Trechos do PISF.....	34
Figura 4. Intervenções Hidráulicas do PISF.....	35
Figura 5. Percurso do PISF trecho V.....	36
Figura 6. Sistema adaptado de condução de água do Eixo Leste.....	37
Figura 7. Sistema adutor estudado.....	45
Figura 8. Traçado da adutora para o cenário 1.....	48
Figura 9. Traçado proposto no cenário 2.....	50
Figura 10. Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba.....	52
Figura 11. Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, em destaque à localização dos reservatórios estudados.....	56
Figura 12. Reservatório Poções.....	57
Figura 13. Reservatório Camalaú.....	58
Figura 14. Reservatório Epitácio Pessoa.....	59
Figura 15. Reservatório Acauã.....	60
Figura 16. Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.....	64
Figura 17. Fluxograma do modelo de otimização.....	68
Figura 18. Exemplo fictício de descarga em reservatório.....	70
Figura 19. Diagrama representando os componentes do reservatório.....	79
Figura 20. Atendimento das demandas de abastecimento urbano no cenário 1.....	87
Figura 21. Atendimento ao canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 1.....	88
Figura 22. Volume dos reservatórios.....	89
Figura 23. Afluência aos reservatórios no Cenário 1.....	90
Figura 24. Vertimento dos reservatórios para o cenário 1.....	93
Figura 25. Áreas irrigadas no entorno dos reservatórios Poções e Boqueirão no cenário 1.....	94

Figura 26. Vazões aduzidas para as áreas irrigadas no cenário 1	95
Figura 27. Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada do reservatório de Poções no cenário 1	97
Figura 28. Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada do reservatório de Boqueirão no cenário 1	98
Figura 29. Atendimento das demandas de abastecimento urbano no cenário 2	100
Figura 30. Atendimento do canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 2.....	101
Figura 31. Volume vertido nos reservatórios no cenário 2.....	102
Figura 32. Atendimento da demanda ao canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 3	104
Figura 33. Vazão afluente ao reservatório Acauã no cenário 3	104
Figura 34. Vertimento dos reservatório no cenário 3	105
Figura 35. Atendimento ao canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 4.....	106
Figura 36. Vertimento nos reservatórios no cenário 4.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados resumidos dos Eixos do PISF.....	37
Tabela 2. Valores da simulação de cobrança do MI em 2010	39
Tabela 3. Valores da simulação de cobrança do MI em 2025	39
Tabela 4. As novas adutoras e os municípios beneficiados.....	44
Tabela 5. As adutoras existentes e suas expansões, e os municípios beneficiados.	44
Tabela 6. Critérios de estimativa de consumo adotados pela CAGEPA.....	80
Tabela 7. Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc) no perímetro irrigado próximo ao reservatório Poções	81
Tabela 8. Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc) no perímetro irrigado próximo ao reservatório Boqueirão.....	81
Tabela 9. Dados característicos das culturas	82
Tabela 10. Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas agrícolas.....	82
Tabela 11. Postos pluviométricos utilizados	83
Tabela 12. Precipitação média mensal dos reservatórios.....	83
Tabela 13. Dados de evaporação média mensal dos reservatórios.....	84
Tabela 14. Média mensal dos valores da vazão afluyente nos reservatórios do sistema.....	84
Tabela 15. Dados dos reservatórios estudados.....	85
Tabela 16. Características físicas do tubo de descarga de fundo dos reservatórios	85
Tabela 17. Comprimento dos eixos, quantidade de municípios beneficiados, vazão total e altitudes das cidades no traçado.....	86
Tabela 18. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi	88
Tabela 19. Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 1.....	91
Tabela 20. Índices dos reservatórios	93
Tabela 21. Valores médios anuais da área cultivada do açude Poções, receita líquida auferida, mão de obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1.....	95

Tabela 22. Valores médios anuais da área cultivada do açude Boqueirão, receita líquida auferida, mão de obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1	96
Tabela 23. Indicadores de desempenho das áreas irrigadas.....	99
Tabela 24. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 2.....	101
Tabela 25. Índices dos reservatórios no cenário 2.....	102
Tabela 26. Indicadores de desempenho das áreas irrigadas no cenário 2.....	103
Tabela 27. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 3.....	104
Tabela 28. Índices de eficiência e indicadores de sustentabilidade no cenário 3 ...	106
Tabela 29. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 4.....	107
Tabela 30. Índices de eficiência e indicadores de sustentabilidade no cenário 4 ...	108

LISTA DE ABREVIÇÕES

ANA – Agência Nacional de Águas
AESA – Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba
CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba
CISDERGO – Cropping and Irrigation System Design with Optimal Reservoir and Groundwater Operation
CUI – Capacidade de Uso das Instalações
CONF – Confiabilidade
DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DTDQ – Demandas nas tomadas de água
EMPASA – Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas
ETA – Estação de Tratamento de Água
FRA – Fornecimento Relativo de Água
FRI – Fornecimento Relativo à Irrigação
FMA – Fornecimento Médio de Água
PISF – Projeto de Integração do Rio São Francisco
PL – Programação Linear
PD – Programação Dinâmica
PNL – Programação Não Linear
IAP – Índice de ativação da potencialidade
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IOCS – Inspetoria de Obras Contra as Secas
IUD – Índice de utilização da disponibilidade
IUP – Índice de utilização da potencialidade
MI – Ministério da Integração Nacional
MO – Mão de obra da agricultura irrigada
ORNAP – Optimal Reservoir Network Analysis Program
PB – Paraíba

PE – Pernambuco

PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos

RES – Resiliência ou Elasticidade

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RGC – Razão Global de Consumo

RL – Receita líquida da agricultura irrigada

SUST – Sustentabilidade

TDR – Termo de Referência

VER – Vazão efluente nos reservatórios

VMR – Volume meta do reservatório

VUL – Vulnerabilidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. Geral	17
2.2. Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Planejamento e Gerenciamento em Sistemas de Recursos Hídricos	18
3.2. Otimização	20
3.2.1. Programação Linear	21
3.2.2. Programação Dinâmica	22
3.2.3. Programação Não Linear	23
3.3. Otimização Multiobjetivo	24
3.3.1. Modelos de Otimização	26
3.4. Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas Do Nordeste Setentrional	28
3.4.1. Histórico da Transposição	28
3.4.2. Objetivos Gerais do PSIF	30
3.4.3. Principais Características do Empreendimento	33
3.4.4. Eixo Leste	35
3.4.5. Cobrança da Água da Transposição	37
4. METODOLOGIA DA PESQUISA	40
4.1. Propostas da AESA para uso da água na Bacia do Rio Paraíba após a Integração do Eixo Leste do PISF	40
4.2. Cenários Estudados	46
4.2.1. Cenário I	47
4.2.2. Cenário II	49
4.2.3. Cenário III e IV	51
4.3. Área de Estudo	51
4.3.1. Sub-Bacia do Rio Taperoá	53
4.3.2. Região do Alto Curso do Rio Paraíba	54

4.3.3.	Região do Médio Curso do Rio Paraíba	55
4.3.4.	Região do Baixo Curso do Rio Paraíba	55
4.4.	Reservatórios Estudados	56
4.4.1.	Reservatório Poções.....	57
4.4.2.	Reservatório Camalaú	57
4.4.3.	Reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão)	58
4.4.4.	Açude Argemiro de Figueiredo (Acauã).....	60
4.5.	Modelo de Otimização Quantitativo	61
4.5.1.	Função Objetivo.....	62
4.5.2.	Função Multiobjetivo.....	63
4.5.3.	Equações de Restrições	63
4.5.4.	Processo Iterativo de Otimização e Análise de Convergência.....	66
4.6.	Indicadores do Sistema.....	69
4.6.1.	Indicadores de Desempenho	69
4.6.3.	Índices de Eficiência Associado aos Reservatórios.....	74
4.6.4.	Indicadores de Desempenho das Áreas Irrigadas	76
5.	DADOS DO SISTEMA	79
5.1.	Demandas.....	80
5.1.1.	Abastecimento Urbano	80
5.1.2.	Demandas de Irrigação.....	80
5.1.3.	Precipitação	83
5.1.4.	Evaporação e Evapotranspiração.....	83
5.1.5.	Vazões Afluentes.....	84
5.1.6.	Dados Estruturais dos Reservatórios Estudados.....	84
5.1.7.	Custos para o Abastecimento Urbano	85
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
6.1.	Cenário I.....	87
6.2.	Cenário II.....	100
6.3.	Cenário III.....	103
6.4.	Cenário IV	106
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
	ANEXOS.....	119

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são indispensáveis para a sobrevivência do homem, pois além de constituem cerca de dois terços do corpo humano, o seu uso múltiplo contribui para o desenvolvimento da sociedade (LIBÂNIO, 2008). Logo, é extremamente importante e necessário que haja uma gestão desse recurso para garantir a minimização de perdas e a beneficiação máxima da população, observando também a preservação ambiental, seja em regiões com ou sem vulnerabilidade para a escassez hídrica.

O Estado da Paraíba, por ser localizado numa região com clima semiárido e precipitações que ocorrem de forma irregular com grande variabilidade tanto temporal como espacial, apresenta poucos rios perenes, evidenciando a necessidade de uma gestão eficaz dos recursos hídricos do Estado. Uma das primeiras iniciativas para combater a escassez de água nas regiões semiáridas dos Estados do Nordeste foi a construção de açudes, alternativa que cresceu paulatinamente. Inicialmente a serventia dos açudes era apenas para abastecimento e dessedentação de animais, mas, posteriormente, com a construção de grandes barragens, o seu uso passou a ser mais diversificado.

Os grandes açudes tornaram-se foco dos estudos para a gestão dos recursos hídricos juntamente com a bacia hidrográfica onde ele está inserido. Contudo, a gestão da maioria dos açudes importa numa operação que mantenham o maior volume armazenado possível, priorizando o abastecimento e limitando os demais usos, atitude normalmente justificada pelas incertezas climáticas. Essa medida aumenta as perdas por evaporação e vertimento, conseqüentemente aumentando os conflitos com maior intensidade nas épocas de estiagem (ARAGÃO, 2008).

Uma região precisa apresentar garantia hídrica, para que haja um desenvolvimento econômico. Apenas a construção de açudes não traria essa garantia. Como uma das soluções para os problemas hídricos do Nordeste, o Governo Federal iniciou o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) com vistas a gerar uma oferta hídrica contínua, garantindo um maior desenvolvimento da região. A transposição dessa água, por garantir o abastecimento urbano,

possibilitará operar os reservatórios com volumes menores, reduzindo suas perdas e aumentando a disponibilidade hídrica de forma sinérgica (ARAGÃO, 2008). No entanto, não existe apenas essa possibilidade para melhorar o aproveitamento dessa água, sendo necessário proceder outros estudos que sirvam como base para uma melhor gestão desse recurso.

Este trabalho apresenta uma análise otimizada da proposta de uso da água exógena transposta pelo Eixo Leste do PISF para a Bacia do Rio Paraíba elaborada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). Para tanto, criou-se quatro cenários, distinguindo-os na prioridade de atendimento das demandas e nos critérios de operação do sistema. Tais cenários foram avaliados através de um modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear, para um período de 10 anos, objetivando avaliar o desempenho dos diversos usos da água, o comportamento dos reservatórios e fazer uma estimativa do valor gasto com energia elétrica provida pela adução da água para o abastecimento nos cenários estudados.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O objetivo do trabalho consiste em analisar as propostas de uso da água nos reservatórios receptores da vazão de água exógena transposta pelo Eixo Leste do PISF, inseridos na bacia hidrográfica do rio Paraíba, a partir de diferentes cenários operacionais, por meio de um modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear.

2.2. ESPECÍFICOS

- Realizar modificação na proposta da AESA, gerando uma segunda alternativa para o transporte da água, objetivando analisar os custos com energia na adução de água para o abastecimento urbano nas duas alternativas;
- 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;
- Analisar o desempenho dos vários tipos de usos da água;
- Avaliar o desempenho dos reservatórios para cada cenário estudado através de índices de eficiência;
- Analisar sobre os resultados obtidos para cada cenário e propor critérios para operação ótima do sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Planejamento e gerenciamento em sistemas de recursos hídricos são geralmente motivados pela percepção de que existem problemas para resolver e oportunidades para obter maiores benefícios do uso da água e dos recursos terrestres relacionados a ela. É inevitável que, em muitos casos, a suposta melhor alternativa para a gestão da água evite ou minimize a geração de conflitos. Portanto, é necessário um estudo cuidadoso e de investigação, analisando os usos múltiplos, bem como a participação de todos os interessados, na busca da melhor decisão para o melhor plano de gestão dos recursos hídricos (LOUCKS; BEEK, 2005).

O gerenciamento de recursos hídricos envolve sistemas complexos, sendo necessária a aplicação de atividades de caráter analítico e criativo em três segmentos: uso, controle e proteção. Essas atividades se dividem em Política de Águas (responsável pela regularização ou modificação dos segmentos), Plano de Uso, Controle ou Proteção das Águas (estudos que envolvem os segmentos através da coordenação, compatibilização, articulação e/ou projetos de intervenções), e o Gerenciamento das Águas (conjunto de ações que regula os segmentos e avalia a conformidade da situação corrente com os princípios doutrinários da Política das Águas) (SETTI et al., 2000).

A realização de estudos em sistemas de recursos hídricos envolve um sistema inter-relacionado de natureza interdisciplinar que necessita de uma análise científica, podendo ser definida como uma ciência da qual usa métodos para definir os vários sistemas, distingui-los do meio ambiente, representá-los e otimizar sua estrutura e comportamento (SANTOS, 2007).

Com os modelos hidrológicos, aliados ao uso de técnicas de otimização e simulação através de metodologias matemáticas e computacionais, é possível fazer

uma representação do comportamento do sistema (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993, 2005; LABADIE, 2004).

De acordo com Lanna (2002), o maior propósito 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, sendo, muitas vezes, realizado através de modelos que usam essas técnicas.

O planejamento e gerenciamento de recursos hídricos baseiam-se na busca de soluções para problemas reais, seja atual ou num futuro próximo, envolvendo, dois tipos de usos: os conflitantes, como é o caso do uso para abastecimento urbano e irrigação; e os complementares, dos quais uns geram recursos para outros, como é o caso de geração hidrelétrica e controle de enchentes. Surge então o questionamento de como escolher e formalizar os critérios para seleção de melhores alternativas.

A modelagem de sistemas hídricos é um método de caráter científico, que serve de apoio à decisão na escolha de uma melhor alternativa. A modelagem associada à gestão de sistema de recursos hídricos, segundo Wurbs (2005) objetiva:

- Minimizar danos causados pelas enchentes e inundações;
- Minimizar os riscos e consequências da escassez de água, seja no aspecto quantitativo ou qualitativo;
- Melhorar e avaliar a capacidade de armazenamento e atender aos usos múltiplos;
- Otimizar o uso dos recursos hídricos – consuntivo e não consuntivo;
- Gerir os recursos ambientais;
- Formular estratégias operacionais mensais, anuais, sazonais ou por estação.

Assim sendo, com toda problemática envolvida, os modelos matemáticos computacionais são uma ferramenta importante de uso contínuo e indispensável para realização de estudos hidrológicos nas diferentes fases do seu planejamento e gerenciamento, sempre buscando o aproveitamento máximo de cada sistema através da busca da melhor alternativa. Com as necessidades impostas naturalmente e o avanço das técnicas de modelagens e da computação, há a possibilidade de criar programas de maior complexidade, tendo resultados rápidos e

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DO EIXO LESTE NO ESTADO DA
PARAÍBA ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

David Silva Lúcio Oliveira

Campina Grande
2013



David Silva Lúcio Oliveira

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DO EIXO LESTE NO ESTADO DA
PARAÍBA ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

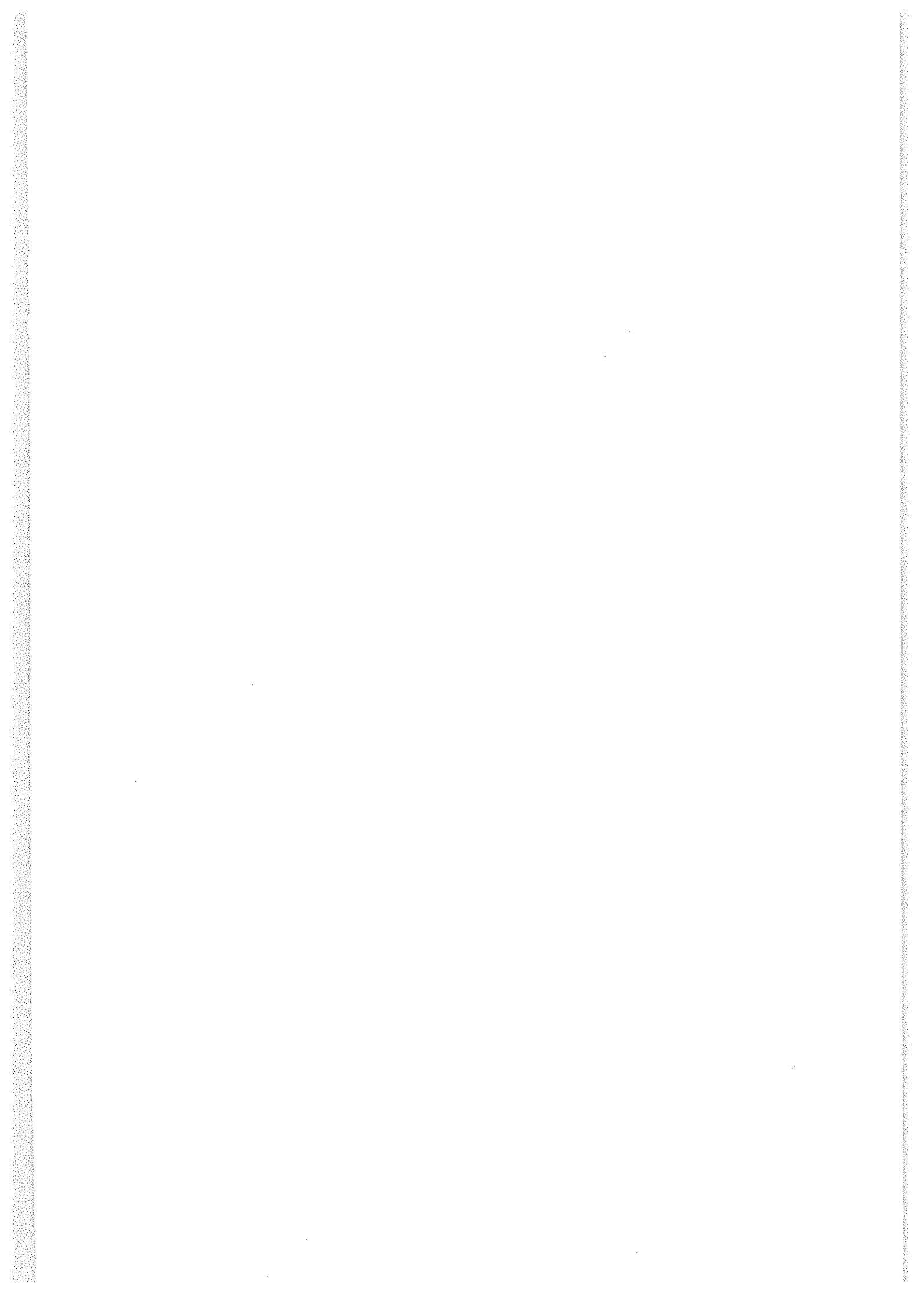
Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, área de concentração Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi

Co-orientador: Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos

Campina Grande

2013



Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais, Ueliton Brito de Oliveira e Jacira Silva Lúcio Oliveira, que dedicaram parte de sua vida para me educar, sempre colocando os estudos em primeiro lugar e mostrando o valor e importância de cada coisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e por ter colocado pais tão dedicados e amorosos em meu caminho. Também, por me ensinar através dos Seus ensinamentos a ser um homem melhor e conseguir ter fé;

Aos meus Pais, Ueliton e Jacira, por terem conseguido despertar em mim o interesse do aprender, e por mostrar diversas vezes os meus erros, corrigindo-os quando possível. Tudo que sou e conquistei até hoje devo a eles;

A minha namorada, Polyanna Dantas Limeira de Queiroz, pelo seu apoio e conselhos nos diversos momentos da minha vida. Também, por ser uma pessoa maravilhosa e me fazer feliz desde o primeiro momento que entrou em minha vida;

A família da minha namorada por serem verdadeiros amigos e me apoiarem na decisão de fazer o mestrado. Em especial, a Maria Germana, que ajudou no engrandecimento deste trabalho;

Pela amizade do Pe. Fabiano Cruz que viajou comigo aos açudes deste estudo, ajudando a melhorar o conhecimento sobre a área estudada, possibilitando uma visualização da situação atual;

Aos professores Dr. Wilson Fadlo Curi e Dr. Valterlin da Silva Santos, pela paciência e ensinamentos;

Aos amigos do mestrado, em especial Caio César e Viviane Lucena, por serem grandes amigos e colaborarem no meu aprendizado em sala de aula;

Ao CNPq que apoiou financeiramente meus estudos, e a todos que, de forma direta e indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A escassez de água em regiões semiáridas como o nordeste brasileiro limita o crescimento socioeconômico da região. Uma das soluções para resolver parte desse problema é o Projeto de Integração do Rio São Francisco. No Estado da Paraíba, a bacia hidrográfica do Rio Paraíba irá receber a água exógena através do Eixo Leste do projeto, garantindo uma oferta contínua de água. Diante da importância do projeto de integração e da implantação de um gerenciamento adequado, este trabalho tem como objetivo analisar duas propostas de uso das águas da bacia do Rio Paraíba após a transposição com enfoque nos açudes Poções, Camalaú, Epitácio Pessoa e Argemiro de Figueiredo, que encontram-se no trecho que receberá a água transposta. Para análise dessas propostas criou-se quatro cenários, distinguindo-os na prioridade de atendimento das demandas e nos critérios de operação do sistema. Tais cenários foram avaliados através de um modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear, para um período de 10 anos, objetivando avaliar o desempenho dos diversos usos da água, o comportamento dos reservatórios e fazer uma estimativa do valor gasto com energia elétrica provida pela adução da água para o abastecimento nos cenários estudados. Os resultados obtidos demonstram que as demandas de abastecimento urbano foram atendidas plenamente em todos os cenários. Tem-se que as demandas de irrigação sofreram forte influência da vazão exigida pelo canal de integração Acauã-Araçagi, não sendo atendida em dois cenários estudados. Conclui-se também, que a vazão máxima estimada para o canal de integração Acauã-Araçagi não é sustentável, e os menores custos estimados foram obtidos com a alternativa proposta pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, sendo assim, considerada a melhor alternativa para todos os objetivos.

PALAVRAS-CHAVE: Transposição. Rio Paraíba. Otimização. Programação Linear.

ABSTRACT

Water scarcity in semiarid regions such as the northeastern Brazil limits the socioeconomic growth of the region. One of the solutions to solve part of this problem is the Integration Project of the São Francisco River. In the State of Paraíba, the watershed of the Paraíba River will receive exogenous water through the East Axis project, ensuring a continuous supply of water. Given the importance of the integration and implementation of proper management, this paper aims to examine two proposals for use of the waters Paraíba River Basin after transposition focusing on Poções, Camalaú, Epitácio Pessoa and Argemiro de Figueiredo dams, while lie in the passage that receives water transposed. For analysis of these proposals it was created four scenarios, distinguishing them in priority of service demands and criteria for system operation. Such scenarios were assessed using a multi-objective optimization model based on linear programming for a period of 10 years, in order to evaluate the performance of the various uses of water, the reservoir behavior and to estimate the amount spent on electricity provided by adduction water supply for the scenarios studied. The results show that the demands of urban water supply have been met in all scenarios. The irrigation demands were strongly influenced by flow required for channel integration Acauã-Araçagi, not being met in two scenarios studied. We also conclude that the maximum flow estimated for channel integration Acauã-Araçagi is not sustainable, and lower cost estimates were obtained with the alternative proposed by the Executive Agency for Water Management in the State of Paraíba, therefore, considered best alternative for all purposes.

KEYWORDS: Transposition. Paraíba River. Optimization. Linear Programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.....	30
Figura 2. Eixos do PISF	34
Figura 3. Trechos do PISF.....	34
Figura 4. Intervenções Hidráulicas do PISF.....	35
Figura 5. Percurso do PISF trecho V.....	36
Figura 6. Sistema adaptado de condução de água do Eixo Leste.....	37
Figura 7. Sistema adutor estudado.....	45
Figura 8. Traçado da adutora para o cenário 1.....	48
Figura 9. Traçado proposto no cenário 2.....	50
Figura 10. Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba.....	52
Figura 11. Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, em destaque à localização dos reservatórios estudados.....	56
Figura 12. Reservatório Poções.....	57
Figura 13. Reservatório Camalaú.....	58
Figura 14. Reservatório Epitácio Pessoa.....	59
Figura 15. Reservatório Acauã.....	60
Figura 16. Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.....	64
Figura 17. Fluxograma do modelo de otimização.....	68
Figura 18. Exemplo fictício de descarga em reservatório.....	70
Figura 19. Diagrama representando os componentes do reservatório.....	79
Figura 20. Atendimento das demandas de abastecimento urbano no cenário 1.....	87
Figura 21. Atendimento ao canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 1.....	88
Figura 22. Volume dos reservatórios.....	89
Figura 23. Afluência aos reservatórios no Cenário 1.....	90
Figura 24. Vertimento dos reservatórios para o cenário 1.....	93
Figura 25. Áreas irrigadas no entorno dos reservatórios Poções e Boqueirão no cenário 1.....	94

Figura 26. Vazões aduzidas para as áreas irrigadas no cenário 1	95
Figura 27. Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada do reservatório de Poções no cenário 1	97
Figura 28. Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada do reservatório de Boqueirão no cenário 1	98
Figura 29. Atendimento das demandas de abastecimento urbano no cenário 2	100
Figura 30. Atendimento do canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 2.....	101
Figura 31. Volume vertido nos reservatórios no cenário 2	102
Figura 32. Atendimento da demanda ao canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 3	104
Figura 33. Vazão afluente ao reservatório Acauã no cenário 3	104
Figura 34. Vertimento dos reservatório no cenário 3	105
Figura 35. Atendimento ao canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 4.....	106
Figura 36. Vertimento nos reservatórios no cenário 4.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados resumidos dos Eixos do PISF.....	37
Tabela 2. Valores da simulação de cobrança do MI em 2010	39
Tabela 3. Valores da simulação de cobrança do MI em 2025	39
Tabela 4. As novas adutoras e os municípios beneficiados.....	44
Tabela 5. As adutoras existentes e suas expansões, e os municípios beneficiados.....	44
Tabela 6. Critérios de estimativa de consumo adotados pela CAGEPA.....	80
Tabela 7. Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc) no perímetro irrigado próximo ao reservatório Poções	81
Tabela 8. Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc) no perímetro irrigado próximo ao reservatório Boqueirão.....	81
Tabela 9. Dados característicos das culturas	82
Tabela 10. Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas agrícolas.....	82
Tabela 11. Postos pluviométricos utilizados	83
Tabela 12. Precipitação média mensal dos reservatórios.....	83
Tabela 13. Dados de evaporação média mensal dos reservatórios.....	84
Tabela 14. Média mensal dos valores da vazão afluyente nos reservatórios do sistema.....	84
Tabela 15. Dados dos reservatórios estudados.....	85
Tabela 16. Características físicas do tubo de descarga de fundo dos reservatórios	85
Tabela 17. Comprimento dos eixos, quantidade de municípios beneficiados, vazão total e altitudes das cidades no traçado.....	86
Tabela 18. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi	88
Tabela 19. Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 1.....	91
Tabela 20. Índices dos reservatórios	93
Tabela 21. Valores médios anuais da área cultivada do açude Poções, receita líquida auferida, mão de obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1	95

Tabela 22. Valores médios anuais da área cultivada do açude Boqueirão, receita líquida auferida, mão de obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1	96
Tabela 23. Indicadores de desempenho das áreas irrigadas.....	99
Tabela 24. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 2.....	101
Tabela 25. Índices dos reservatórios no cenário 2.....	102
Tabela 26. Indicadores de desempenho das áreas irrigadas no cenário 2.....	103
Tabela 27. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 3.....	104
Tabela 28. Índices de eficiência e indicadores de sustentabilidade no cenário 3 ...	106
Tabela 29. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 4.....	107
Tabela 30. Índices de eficiência e indicadores de sustentabilidade no cenário 4 ...	108

LISTA DE ABREVIÇÕES

- ANA – Agência Nacional de Águas
AESA – Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba
CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba
CISDERGO – Cropping and Irrigation System Design with Optimal Reservoir and Groundwater Operation
CUI – Capacidade de Uso das Instalações
CONF – Confiabilidade
DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DTDQ – Demandas nas tomadas de água
EMPASA – Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas
ETA – Estação de Tratamento de Água
FRA – Fornecimento Relativo de Água
FRI – Fornecimento Relativo à Irrigação
FMA – Fornecimento Médio de Água
PISF – Projeto de Integração do Rio São Francisco
PL – Programação Linear
PD – Programação Dinâmica
PNL – Programação Não Linear
IAP – Índice de ativação da potencialidade
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IOCS – Inspetoria de Obras Contra as Secas
IUD – Índice de utilização da disponibilidade
IUP – Índice de utilização da potencialidade
MI – Ministério da Integração Nacional
MO – Mão de obra da agricultura irrigada
ORNAP – Optimal Reservoir Network Analysis Program
PB – Paraíba

PE – Pernambuco

PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos

RES – Resiliência ou Elasticidade

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RGC – Razão Global de Consumo

RL – Receita líquida da agricultura irrigada

SUST – Sustentabilidade

TDR – Termo de Referência

VER – Vazão efluente nos reservatórios

VMR – Volume meta do reservatório

VUL – Vulnerabilidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. Geral	17
2.2. Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Planejamento e Gerenciamento em Sistemas de Recursos Hídricos	18
3.2. Otimização	20
3.2.1. Programação Linear	21
3.2.2. Programação Dinâmica	22
3.2.3. Programação Não Linear	23
3.3. Otimização Multiobjetivo	24
3.3.1. Modelos de Otimização	26
3.4. Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas Do Nordeste Setentrional	28
3.4.1. Histórico da Transposição	28
3.4.2. Objetivos Gerais do PSIF	30
3.4.3. Principais Características do Empreendimento	33
3.4.4. Eixo Leste	35
3.4.5. Cobrança da Água da Transposição	37
4. METODOLOGIA DA PESQUISA	40
4.1. Propostas da AESA para uso da água na Bacia do Rio Paraíba após a Integração do Eixo Leste do PISF	40
4.2. Cenários Estudados	46
4.2.1. Cenário I	47
4.2.2. Cenário II	49
4.2.3. Cenário III e IV	51
4.3. Área de Estudo	51
4.3.1. Sub-Bacia do Rio Taperoá	53
4.3.2. Região do Alto Curso do Rio Paraíba	54

4.3.3.	Região do Médio Curso do Rio Paraíba	55
4.3.4.	Região do Baixo Curso do Rio Paraíba	55
4.4.	Reservatórios Estudados	56
4.4.1.	Reservatório Poções.....	57
4.4.2.	Reservatório Camalaú	57
4.4.3.	Reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão)	58
4.4.4.	Açude Argemiro de Figueiredo (Acauã).....	60
4.5.	Modelo de Otimização Quantitativo	61
4.5.1.	Função Objetivo.....	62
4.5.2.	Função Multiobjetivo	63
4.5.3.	Equações de Restrições	63
4.5.4.	Processo Iterativo de Otimização e Análise de Convergência.....	66
4.6.	Indicadores do Sistema.....	69
4.6.1.	Indicadores de Desempenho	69
4.6.3.	Índices de Eficiência Associado aos Reservatórios	74
4.6.4.	Indicadores de Desempenho das Áreas Irrigadas	76
5.	DADOS DO SISTEMA	79
5.1.	Demandas.....	80
5.1.1.	Abastecimento Urbano	80
5.1.2.	Demandas de Irrigação.....	80
5.1.3.	Precipitação	83
5.1.4.	Evaporação e Evapotranspiração	83
5.1.5.	Vazões Afluentes	84
5.1.6.	Dados Estruturais dos Reservatórios Estudados	84
5.1.7.	Custos para o Abastecimento Urbano	85
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
6.1.	Cenário I.....	87
6.2.	Cenário II.....	100
6.3.	Cenário III.....	103
6.4.	Cenário IV	106
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
	ANEXOS	119

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são indispensáveis para a sobrevivência do homem, pois além de constituem cerca de dois terços do corpo humano, o seu uso múltiplo contribui para o desenvolvimento da sociedade (LIBÂNIO, 2008). Logo, é extremamente importante e necessário que haja uma gestão desse recurso para garantir a minimização de perdas e a beneficiação máxima da população, observando também a preservação ambiental, seja em regiões com ou sem vulnerabilidade para a escassez hídrica.

O Estado da Paraíba, por ser localizado numa região com clima semiárido e precipitações que ocorrem de forma irregular com grande variabilidade tanto temporal como espacial, apresenta poucos rios perenes, evidenciando a necessidade de uma gestão eficaz dos recursos hídricos do Estado. Uma das primeiras iniciativas para combater a escassez de água nas regiões semiáridas dos Estados do Nordeste foi a construção de açudes, alternativa que cresceu paulatinamente. Inicialmente a serventia dos açudes era apenas para abastecimento e dessedentação de animais, mas, posteriormente, com a construção de grandes barragens, o seu uso passou a ser mais diversificado.

Os grandes açudes tornaram-se foco dos estudos para a gestão dos recursos hídricos juntamente com a bacia hidrográfica onde ele está inserido. Contudo, a gestão da maioria dos açudes importa numa operação que mantenham o maior volume armazenado possível, priorizando o abastecimento e limitando os demais usos, atitude normalmente justificada pelas incertezas climáticas. Essa medida aumenta as perdas por evaporação e vertimento, conseqüentemente aumentando os conflitos com maior intensidade nas épocas de estiagem (ARAGÃO, 2008).

Uma região precisa apresentar garantia hídrica, para que haja um desenvolvimento econômico. Apenas a construção de açudes não traria essa garantia. Como uma das soluções para os problemas hídricos do Nordeste, o Governo Federal iniciou o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) com vistas a gerar uma oferta hídrica contínua, garantindo um maior desenvolvimento da região. A transposição dessa água, por garantir o abastecimento urbano,

possibilitará operar os reservatórios com volumes menores, reduzindo suas perdas e aumentando a disponibilidade hídrica de forma sinérgica (ARAGÃO, 2008). No entanto, não existe apenas essa possibilidade para melhorar o aproveitamento dessa água, sendo necessário proceder outros estudos que sirvam como base para uma melhor gestão desse recurso.

Este trabalho apresenta uma análise otimizada da proposta de uso da água exógena transposta pelo Eixo Leste do PISF para a Bacia do Rio Paraíba elaborada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). Para tanto, criou-se quatro cenários, distinguindo-os na prioridade de atendimento das demandas e nos critérios de operação do sistema. Tais cenários foram avaliados através de um modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear, para um período de 10 anos, objetivando avaliar o desempenho dos diversos usos da água, o comportamento dos reservatórios e fazer uma estimativa do valor gasto com energia elétrica provida pela adução da água para o abastecimento nos cenários estudados.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O objetivo do trabalho consiste em analisar as propostas de uso da água nos reservatórios receptores da vazão de água exógena transposta pelo Eixo Leste do PISF, inseridos na bacia hidrográfica do rio Paraíba, a partir de diferentes cenários operacionais, por meio de um modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear.

2.2. ESPECÍFICOS

- Realizar modificação na proposta da AESA, gerando uma segunda alternativa para o transporte da água, objetivando analisar os custos com energia na adução de água para o abastecimento urbano nas duas alternativas;
- 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;
- Analisar o desempenho dos vários tipos de usos da água;
- Avaliar o desempenho dos reservatórios para cada cenário estudado através de índices de eficiência;
- Analisar sobre os resultados obtidos para cada cenário e propor critérios para operação ótima do sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Planejamento e gerenciamento em sistemas de recursos hídricos são geralmente motivados pela percepção de que existem problemas para resolver e oportunidades para obter maiores benefícios do uso da água e dos recursos terrestres relacionados a ela. É inevitável que, em muitos casos, a suposta melhor alternativa para a gestão da água evite ou minimize a geração de conflitos. Portanto, é necessário um estudo cuidadoso e de investigação, analisando os usos múltiplos, bem como a participação de todos os interessados, na busca da melhor decisão para o melhor plano de gestão dos recursos hídricos (LOUCKS; BEEK, 2005).

O gerenciamento de recursos hídricos envolve sistemas complexos, sendo necessária a aplicação de atividades de caráter analítico e criativo em três segmentos: uso, controle e proteção. Essas atividades se dividem em Política de Águas (responsável pela regularização ou modificação dos segmentos), Plano de Uso, Controle ou Proteção das Águas (estudos que envolvem os segmentos através da coordenação, compatibilização, articulação e/ou projetos de intervenções), e o Gerenciamento das Águas (conjunto de ações que regula os segmentos e avalia a conformidade da situação corrente com os princípios doutrinários da Política das Águas) (SETTI et al., 2000).

A realização de estudos em sistemas de recursos hídricos envolve um sistema inter-relacionado de natureza interdisciplinar que necessita de uma análise científica, podendo ser definida como uma ciência da qual usa métodos para definir os vários sistemas, distingui-los do meio ambiente, representá-los e otimizar sua estrutura e comportamento (SANTOS, 2007).

Com os modelos hidrológicos, aliados ao uso de técnicas de otimização e simulação através de metodologias matemáticas e computacionais, é possível fazer

uma representação do comportamento do sistema (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993, 2005; LABADIE, 2004).

De acordo com Lanna (2002), o maior propósito 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, sendo, muitas vezes, realizado através de modelos que usam essas técnicas.

O planejamento e gerenciamento de recursos hídricos baseiam-se na busca de soluções para problemas reais, seja atual ou num futuro próximo, envolvendo, dois tipos de usos: os conflitantes, como é o caso do uso para abastecimento urbano e irrigação; e os complementares, dos quais uns geram recursos para outros, como é o caso de geração hidrelétrica e controle de enchentes. Surge então o questionamento de como escolher e formalizar os critérios para seleção de melhores alternativas.

A modelagem de sistemas hídricos é um método de caráter científico, que serve de apoio à decisão na escolha de uma melhor alternativa. A modelagem associada à gestão de sistema de recursos hídricos, segundo Wurbs (2005) objetiva:

- Minimizar danos causados pelas enchentes e inundações;
- Minimizar os riscos e consequências da escassez de água, seja no aspecto quantitativo ou qualitativo;
- Melhorar e avaliar a capacidade de armazenamento e atender aos usos múltiplos;
- Otimizar o uso dos recursos hídricos – consuntivo e não consuntivo;
- Gerir os recursos ambientais;
- Formular estratégias operacionais mensais, anuais, sazonais ou por estação.

Assim sendo, com toda problemática envolvida, os modelos matemáticos computacionais são uma ferramenta importante de uso contínuo e indispensável para realização de estudos hidrológicos nas diferentes fases do seu planejamento e gerenciamento, sempre buscando o aproveitamento máximo de cada sistema através da busca da melhor alternativa. Com as necessidades impostas naturalmente e o avanço das técnicas de modelagens e da computação, há a possibilidade de criar programas de maior complexidade, tendo resultados rápidos e

de ótima representação do sistema tornando-os mais fáceis e acessíveis para os hidrólogos.

3.2. OTIMIZAÇÃO

O desenvolvimento e a adoção de técnicas de otimização no planejamento e gerenciamento de sistemas complexos de recursos hídricos foi apontada há três décadas como um dos mais importantes avanços no campo da engenharia de recursos hídricos (YEH, 1985).

No planejamento de recursos hídricos existem inúmeras alternativas viáveis para decisão ótima, mas os processos de busca para alcançar essa decisão através de modelos de simulação era difícil. 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 uma decisão ótima.

Os modelos de otimização são formulados para encontrar valores para as variáveis de decisão que maximizem ou minimizem a função objetivo, sujeita a restrições. A função objetivo e as restrições são representadas por expressões matemáticas em função das variáveis de decisão. As restrições podem descrever leis físicas, socioeconômicas, políticas operacionais, obrigações contratuais, limitações técnicas, etc.. Estas determinam a região viável das variáveis de decisão (SANTOS, 2012).

Os modelos de otimização levam em consideração algum tipo de programação matemática, sendo a classificação básica das técnicas de otimização:

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

3.2.1. PROGRAMAÇÃO LINEAR

A programação linear (PL) é uma técnica de otimização das mais desenvolvidas e uma das mais aplicadas em recursos hídricos, representada através de um sistema com relações lineares entre as variáveis no que diz respeito às restrições e às funções objetivo.

Algumas vantagens da programação linear são apontadas por Yeh (1985), Labadie (2004) e Wurbs (2005) tendo as seguintes considerações:

- A habilidade para se ajustar e resolver problemas de grandes dimensões e com variados níveis de complexidade;
- A possibilidade de atingir valores ótimos globais;
- A não necessidade de uma política inicial de operação dos reservatórios;
- Teoria da dualidade bem desenvolvida para a análise de sensibilidade;
- A existência de pacotes de software computacionais genéricos disponíveis para resolução de problemas.

Entretanto, uma das desvantagens da maioria dos problemas de recursos hídricos são as restrições na aplicação desta técnica, pois há a exigência da linearidade das funções (BARBOSA, 2002). Logo, utiliza-se de um artifício matemático para que seja possível fazer uso da programação linear, que é a linearização das funções de processos não lineares realizada através de várias técnicas, como a expansões por séries de Taylor de primeira ordem e esquemas iterativos.

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, e o Método Primal-dual, para a resolução de problemas de grande escala (SANTOS, 2012).

Vários trabalhos aplicaram a PL de diversas formas, como o trabalho de Santos et. al. (2010). Ele fez uma análise otimizada com técnicas de programação lineares do desempenho de um pequeno açude no semiárido paraibano, a fim de

minimizar perdas hídricas do sistema e maximizar o atendimento das demandas. O trabalho de Barros (2010), também otimizou, com técnicas de programação linear, os múltiplos usos em pequenos açudes na bacia de Sumé, no Estado da Paraíba. Também em outros trabalhos como os de Righetto e Guimarães Filho (2003), Dantas Neto (1994), Curi e Curi (2001), Curi et al. (2005), Celeste (2006), Getirana et al. (2007), Schardong (2006), Alencar (2009), Vieira et. al. (2010) encontram-se aplicações da PL.

3.2.2. PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

A programação dinâmica (PD), ou o processo de decisão de múltiplo estágio, tem uma grande aceitação no planejamento da operação de reservatórios porque, nestes modelos, a tomada de decisão assume uma natureza sequencial (MATO E MELLO, 1999).

A principal característica da PD é subdividir o problema inicial em um conjunto de problemas mais simples, em vez de tentar resolver o problema complexo diretamente. Cada problema simples é membro de uma classe de problemas similares e não um problema isolado para o estágio e estado iniciais. Logo, representa o problema inicial em um conjunto de problemas similares (GALVÃO, 1999).

A grande vantagem da PD é poder traduzir em sua formulação problemas de natureza estocástica e não lineares, que caracterizam um grande número de sistemas de recursos hídricos. Também, podem decompor problemas altamente complexos, com grande número de variáveis, em série de subproblemas que serão resolvidos recursivamente (BRAGA, 1998).

Contudo, a grande desvantagem dos modelos de programação dinâmica é a dimensionalidade dos problemas, chamada por "praga" ou "maldição" do dimensionamento, decorrente da qual o tempo computacional cresce exponencialmente com o número de variáveis do estado (dimensão do vetor-estado) (LOUCKS, 1981; YEH, 1985; LABADIE, 2004).

Como tentativa de superar esse problema, têm surgido diversas variantes da PD, entre elas temos: Programação Dinâmica Incremental (PDI), Programação

Dinâmica Incremental com Aproximações Sucessivas (PDIAS) e Programação Dinâmica Diferencial Discreta (PDDD) (BRAGA, 1998).

Aplicação de programação dinâmica e de suas variantes na operação de reservatórios podem ser encontradas em trabalhos como os de Barros (2002), Lima e Lanna (2001), Mélló Jr. e Matos (1999), Dias et al. (2009) entre outros.

3.2.3. PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

A programação não linear (PNL), quando comparada com a PL e PD, em alguns casos, apresenta desvantagens. Como o tempo de resolução computacional dos modelos é longo, requer maior tempo de processamento, exigindo uma grande capacidade de armazenamento de dados que são gerados nesse período. Além disso, Lima e Lanna (2005) relatam a PNL ao contrário dos modelos de PD, não apresentam a facilidade de incorporação da natureza estocástica das variáveis hidrológicas.

A PNL pode, entretanto, oferecer uma formulação matemática mais geral, não necessitando de simplificações comparando com outros métodos de otimização. A PNL também pode analisar sistemas de recursos hídricos com funções objetivo não separáveis e restrições não lineares. Logo, uma vez elaborado o modelo matemático que descreve o sistema a otimizar, em geral, aumenta-se a precisão nos resultados a serem alcançados (ALBUQUERQUE, 2007; LIMA e LANNA, 2005; CIRILO, 1997; SIMONOVIC, 1992).

Como desvantagem, destaca-se a incerteza de que, em muitos casos, a solução ótima obtida não é a melhor dentre todas as soluções ótimas no espaço viável, dado à não linearidade da natureza dos problemas (SANTOS, 2007).

O modelo de otimização ORNAP (Optimal Reservoir Network Analysis Program), desenvolvido por Curi e Curi (2001), é baseado em programação não linear, que trabalha a nível mensal. O processo de otimização foi resolvido numericamente através de programação não linear, contemplando uma função objetivo para a maximização da receita líquida anual advinda da agricultura irrigada, avaliando-se, também, o retorno financeiro da piscicultura extensiva nos reservatórios. Todos os requerimentos de ordem legal, socioeconômicos e de

sustentabilidade hídrica, além das restrições físicas e condições climáticas, foram considerados no modelo. Foi utilizado, acoplado a modelos de otimização de áreas irrigadas e usos de água para piscicultura, o controle de cheias e o abastecimento urbano, com resultados bastante satisfatórios, quando aplicado a esta classe de problemas.

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

3.3. OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais, culturais, entre outros são considerados simultaneamente no processo de tomada de decisão no setor de recursos hídricos. Decisões com múltiplos objetivos e decisores geram conflitos de interesse entre grupos com visões distintas acerca das metas a serem adotadas no planejamento e gestão dos recursos hídricos. A análise multiobjetiva apresenta conceitos para o tratamento e quantificação dos processos de tomada de decisão com múltiplos objetivos (FRANCATO, 2012; SANTOS, 2012).

Logo, quando os objetivos são conflitantes, o problema encontrará a melhor solução de compromisso com grau de satisfação dos objetivos em função da escolha do decisor, ou seja, não existe um ótimo global, mas um conjunto de ótimos que satisfazem de formas diferentes os distintos objetivos envolvidos na análise.

Dependendo da natureza do problema e da maneira que são utilizadas as preferências dos decisores, os métodos para análise multiobjetiva podem ser classificados em Cohon (1978):

- técnicas para a geração de soluções não dominadas;
- técnica com articulação prévia das preferências;
- técnicas com articulação progressiva das preferências.

Uma técnica não dominante realiza seus estudos sem conhecimento *a priori* das preferências do decisor, trabalhando estritamente com a realidade física do problema. Os analistas através de técnicas geram o conjunto de soluções não

dominadas considerando um vetor de funções objetivas. Uma solução não dominada ou não inferior é definida como uma solução multiobjetivo que não pode ser melhorada em um objetivo, sem tornar pior um ou mais objetivos (BRAGA; GOBETTI, 2002).

No que diz respeito às técnicas que utilizam uma articulação antecipada das preferências, o decisor fornece informações sobre sua predileção a uma análise, antes que o problema seja efetivamente resolvido, ou seja, o decisor opina a respeito das trocas possíveis entre os objetivos e 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 (FRANCATO, 2012).

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, caso seja negativo, o problema é modificado e resolvido novamente. Logo, esses métodos requerem grande envolvimento do decisor no processo de solução, sendo que a característica principal dos métodos desse grupo é um algoritmo geral de aproximação.

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;
- c) Os algoritmos genéticos multiobjetivos.

O método das ponderações produz o conjunto de soluções não dominadas tanto no espaço das decisões como no espaço dos objetivos. Esse método apresenta simples formulação, mas precisa de uma unidade comum entre os diferentes objetivos. Contudo, para conseguir retirar o melhor desse método utilizam-se fatores implícitos cujos valores, muitas vezes, são difíceis de justificar. Já o método das restrições também gera o conjunto de soluções não dominadas, apresenta bons resultados e não precisa de uma unidade comum nos diferentes objetivos. Entretanto, acima de três objetivos, a carga computacional para geração de soluções torna-se elevada e sua aplicação é praticamente inviável (SANTOS, 2009, 2012).

Por enquanto, os algoritmos genéticos multiobjetivos superam ambos os inconvenientes dos dois métodos anteriores ao não precisar dessas transformações, já que trabalham com os valores das funções objetivo em suas verdadeiras unidades e não se vê prejudicando seu desempenho pelo incremento do número de funções objetivo (BRAVO et al., 2005).

Os algoritmos genéticos apresentam várias vantagens, tais como: o funcionamento com parâmetros contínuos e discretos, a otimização de um grande número de variáveis, a não necessidade de profundos conhecimentos matemáticos e a facilidade de implementação, dentre outros. Contudo, não são eficientes para muitos problemas (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Porém, as desvantagens de se utilizar algoritmos genéticos estão na dificuldade de levar em conta explicitamente as restrições (principalmente as desigualdades), de manter soluções viáveis na população (LABADIE, 2004) e alto requerimento de tempo computacional para obter as soluções.

3.3.1. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

A seguir estão descritos três modelos de otimização quantitativos aplicados em sistema de recursos hídricos. São eles: ORNAP, CISDERGO e SANTOS.

O modelo ORNAP (CURI; CURI 2001) 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, já o intervalo de tempo deve ser 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 o 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.

O modelo CISDERGO (CURI; CURI 2001a) é um modelo de otimização baseado em programação linear sequencial, 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 motor 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.

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 de 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 Artifício de Linearização por Segmentos e da Programação Linear Sequencial. A função objetivo é uma escalarização das múltiplas funções objetivas 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).

No trabalho de Alencar (2009), o modelo de otimização multiobjetivo baseado em programação linear destinou-se a otimizar os múltiplos usos de um sistema de reservatórios, com a implantação ou melhoramento da operação de um ou mais perímetros irrigados. A área cultivada foi analisada, através do modelo, comparando o cultivo empregando o manejo convencional (com agrotóxicos e adubação química) com o manejo orgânico de produção no âmbito da agricultura familiar, em áreas de tamanhos equivalentes.

Já o modelo de otimização multiobjetivo desenvolvido por Santos (2012), também baseado em programação linear, possibilita a otimização quali-quantitativa, para o planejamento integrado em sistemas de recursos hídricos. Possibilitando a análise do desempenho de vários tipos de usos da água, inclusive as concentrações dos parâmetros de qualidade de água DBO e OD nos reservatórios e nós do sistema estudado.

3.4. PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO COM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO NORDESTE SETENTRIONAL

Neste tópico, será analisado o eixo leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) baseando-se em aspectos executivos do sistema. O estudo concentra-se na Bacia do Rio Paraíba após o recebimento da água exógena proveniente desse eixo.

3.4.1. HISTÓRICO DA TRANSPOSIÇÃO

De acordo com Castro (2011), o primeiro relato da ideia de transposição do Rio São Francisco foi apresentada ao imperador Dom Pedro II em 1847 pelo deputado e engenheiro cearense Marcos de Macedo. Após esse primeiro relato histórico, podemos citar outras abordagens do mesmo assunto pelo Barão de

Capanema em 1856 que chefiava a comissão científica da época, por Tristão Franklin Alencar em 1886, pela Inspetoria de Obras contra as Secas (IOCS) em 1909, pela Inspetoria Federal de Obras contra as Secas em 1919, no Governo de Getúlio Vargas em 1981, através do Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS) criado em seu governo. Nos mandatos de Itamar Franco e Fernando Henrique Cardoso também foram elaborados estudos e modificações em projetos existentes, mas todos foram arquivados como os anteriores.

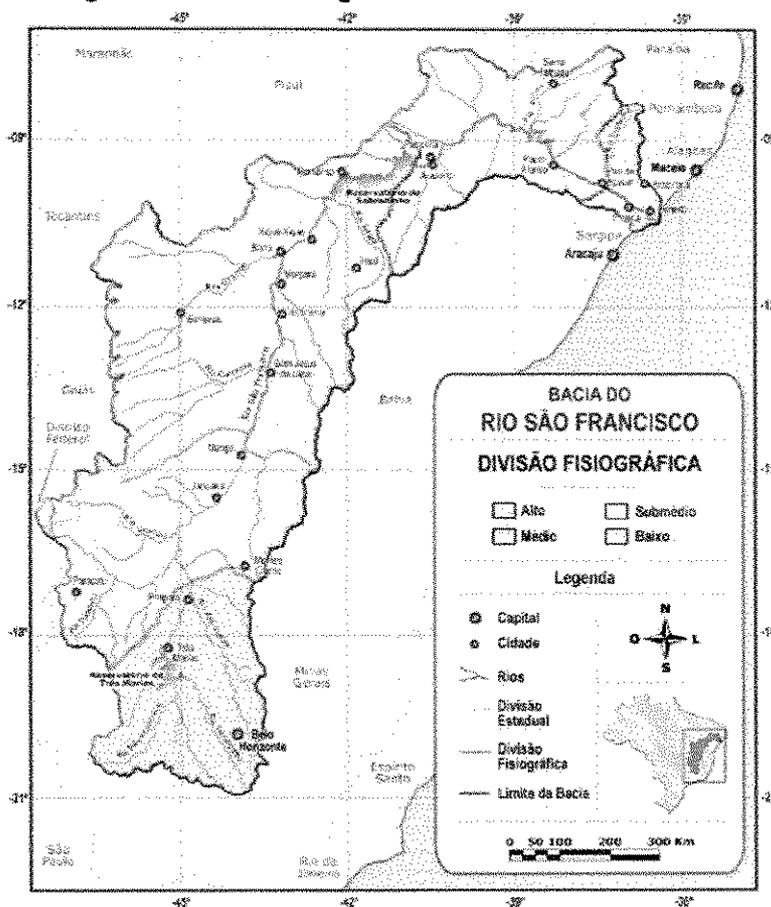
No governo de Luís Inácio Lula da Silva, já em seu primeiro mandato, entre 2003 e 2006, reapareceu o debate sobre a transposição como uma possível solução para amenizar os problemas da seca em parte do Semiárido do Nordeste. Esta ideia absorvida pelo governo, incumbiu Ciro Gomes ao cargo de ministro da Integração Nacional para executar a obra.

Atualmente o projeto está em execução e é um empreendimento do governo federal, sob a responsabilidade do Ministério da Integração. Tal projeto tem como objetivo principal assegurar a oferta de água, em 2025, a cerca de 12 milhões de habitantes de pequenas, médias e grandes cidades da região semiárida dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte (CASTRO, 2011).

Trabalhos realizados, em 1994, estimavam que a transferência média da vazão regularizada do Rio São Francisco pelo Reservatório de Sobradinho era de 7,5%. Já no Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), publicado em 2004, foi mostrado que estudos técnicos mais elaborados e precisos, estimaram uma média de 3,5%. Essa porcentagem atual equivale a uma média de 42,4 m³/s (2,3%) destinados às bacias do Ceará, do Paraíba e do Rio Grande do Norte; e mais 21,1 m³/s (1,2%) destinados ao Estado de Pernambuco, totalizando 63,5 m³/s. O novo projeto relata que a vazão total retirada tem um variação de 0 até 127 m³/s, isto é, o volume a ser transposto não será fixo e dependerá da necessidade e situação das bacias receptoras e do reservatório de Sobradinho.

A Figura 1 ilustra a Bacia do Rio São Francisco, onde tem-se o maior rio perene de água doce da região Nordeste e o mais próximo do Semiárido Nordestino, com cerca de 2800 km. Corta cinco estados e é chamado de "rio da integração nacional" pela sua ligação do Sudeste ao Nordeste, da sua nascente em Minas Gerais até seu deságue na divisa entre Sergipe e Alagoas, respectivamente.

Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.



Fonte: ANA/GEP/PNUMA/OEA, 2003.

3.4.2. OBJETIVOS GERAIS DO PSIF

O principal objetivo do Projeto de Integração do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional é derivar pequena parcela do potencial hídrico de que dispõe para vários rios intermitentes e açudes, assegurando a oferta hídrica para a população. A região Nordeste apresenta uma adversidade climática, utilizando-se, após várias décadas, de ações emergenciais como a execução de cisternas, e a construção de reservatórios que sucumbem em períodos de escassez prolongada, pois não conseguem atingir os pontos centrais do problema. Essa situação gera poucas alternativas para o desenvolvimento social e econômico da região, ficando estagnada no subdesenvolvimento.

Logo, o PISF apresenta três objetivos básicos (BRASIL, 2004):

- Aumentar a oferta de água, com garantia de atendimento ao Semiárido;
- Fornecer água de forma complementar para açudes existentes na região, viabilizando uma melhor gestão da água;
- Reduzir as diferenças regionais causadas pela oferta desigual da água entre bacias e populações.

A água transposta da vazão regularizada da barragem de Sobradinho deve beneficiar as seguintes bacias hidrográficas:

- Do rio Jaguaribe, no Ceará;
- Do rio Piranhas-Açu, na Paraíba e Rio Grande do Norte;
- Do rio Apodi, no Rio Grande do Norte;
- Do rio Paraíba, na Paraíba;
- Dos rios Moxotó, Terra Nova e Brígida, em Pernambuco, na bacia do rio São Francisco.

Para garantir que esses objetivos sejam alcançados, outras iniciativas estão associadas à transposição como a exploração de águas subterrâneas com a perfuração de poços, a implantação de cisternas, e a açudagem, além de alternativas como a própria revitalização do Rio São Francisco. A integração com o rio São Francisco e essas soluções locais não competem entre si; pelo contrário, complementam-se de forma a transformar o limitado quadro de desenvolvimento vivido por essa parcela de brasileiros (BRASIL, 2004).

De acordo com Marengo (2009) apud Castro (2011), a região Nordeste caracteriza-se naturalmente como de alto potencial para evaporação da água em função da enorme disponibilidade de energia solar e altas temperaturas.

Além disso, devido à variabilidade climática da região, a maioria dos açudes do Nordeste Setentrional opera acumulando o máximo da água no período chuvoso, visando garantir o abastecimento nos períodos de estiagem. Mas essa situação provoca o mau aproveitamento do recurso e uma maior perda de água por vertimento e evaporação. No Relatório de Impacto Ambiental do PISF, é relatado através de estudos que 90 açudes da região nordeste demonstraram que cerca de 75% da água armazenada é perdida assim e o restante, apenas 25%, consegue ser aproveitada para abastecimento humano e atividades produtivas (BRASIL, 2004).

Contudo, essas perdas são necessárias para que seja possível assegurar que a água seja usada para abastecimento urbano, caso ocorra estiagem prolongada, mas essa atitude limita o uso da água para outras demandas como irrigação e atividades industriais. Diante do perigo de colapso do recurso, as companhias de água adotam a política de racionamento. Essa incerteza no abastecimento afasta os investidores, gerando prejuízos econômicos e sociais, que dificultam o crescimento e desenvolvimento da região.

Com o projeto de integração, haverá uma garantia de disponibilidade hídrica de uma fonte permanente, o rio São Francisco, não sendo mais necessário que os açudes trabalhem com cotas elevadas. A redução do nível de operação dos reservatórios acarretará uma diminuição das perdas por evaporação e vertimento, representando um ganho de água na região, que aumenta a disponibilidade hídrica e impulsiona à agricultura irrigada e a economia, tal processo denomina-se sinergia hídrica (FARIAS, 2009).

No Relatório Síntese de Viabilidade Técnico-Econômico e Ambiental (BRASIL, 2000) a sinergia é tratada em três níveis diferentes, em que os efeitos proporcionados pelos recursos hídricos das bacias receptoras se manifestam da seguinte maneira:

- a) A primeira sinergia é alcançada através do ganho de água oriunda das próprias bacias receptoras, que deixa de ser evaporada ou sangrada nos grandes açudes, podendo ser operados sem o receio de que falte água no futuro;
- b) A segunda sinergia hídrica é alcançada através da melhoria de qualidade da água dos açudes, renovando-as com maior frequência e reduzindo assim a salinidade;
- c) A terceira sinergia traduz-se por ser um indutor da outorga e cobrança pela água bruta nas bacias beneficiárias. Na medida em que a parcela dessa água terá que ser paga pelos beneficiários, para garantir a sustentabilidade operacional do projeto, os usuários tendem a reduzir os desperdícios e utilizar melhores tecnologias.

Neste trabalho foi estudado como melhor alocar a água para os seus diversos usos, visando a menor perda de água e maior benefício econômico. Uma temática

bastante discutida, quando se trata da Transposição do Rio São Francisco, que originou diversos estudos envolveu a sinergia, e outros temas associados a ela. Podemos citar, pois, os trabalhos de Aragão (2008) e Farias (2009).

Os dois trabalhos, o de Aragão (2008) e Farias (2009), usaram o AquacNet, modelo matemático de simulação baseado em rede de fluxo, para fazerem seus estudos sobre o PISF no Eixo Leste no Estado da Paraíba, utilizando 4 reservatórios do Alto e Médio Cursos do Rio Paraíba.

No estudo de Aragão (2008), obteve-se a quantificação da sinergia no sistema e a utilização de indicadores de sustentabilidade. Nele foi concluído que o ganho de sinergia com a transposição proporcionou uma garantia de 100% para os múltiplos usos, podendo ter uma flexibilidade na demanda de água.

Farias (2009) relata em seu estudo novas possibilidades de transporte da água no Estado da Paraíba, diferentemente da proposta do Ministério da Integração Nacional, da qual a água seria transportada através do leito natural do Rio Paraíba. Foi possível então concluir que a adução de uma parcela de água por adutora aumentaria o ganho de sinergia e aumentando a demanda para o abastecimento, proporcionaria um melhor aproveitamento da água beneficiando mais cidades do Estado.

Para que seja possível entender um pouco mais sobre o PISF, é necessário elucidar algumas características do empreendimento. O tópico a seguir irá fazer essa explicação de forma sucinta.

3.4.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO

O Projeto de Transposição é constituído por estações de bombeamento, canais, pequenos reservatórios, usinas hidrelétricas para auto suprimento e outras estruturas para condução de água, desde o rio São Francisco até os diversos pontos de entrega nos Estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte.

O PISF é formado por dois grandes eixos independentes, Eixo Norte e Eixo Leste. Essas divisões bem como os respectivos pontos de captação se localizam no Rio São Francisco, entre a barragem de Sobradinho e a de Itaparica, que podem ser observados na Figura 2.

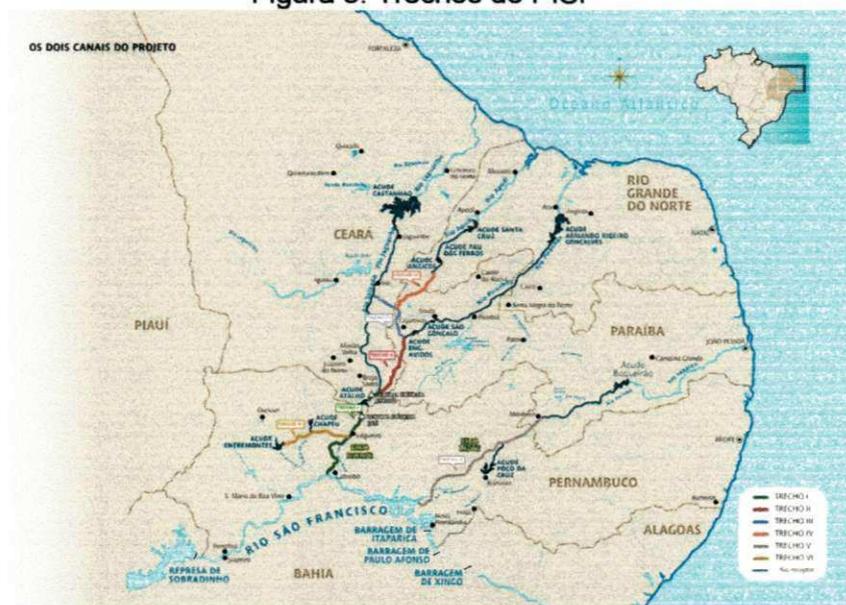
Figura 2. Eixos do PISF



Fonte: BRASIL, 2004.

Os dois Eixos foram divididos em seis trechos, o Eixo Norte ficou com os trechos I, II, III, IV, VI e o Eixo Leste ficou com o trecho V. A maior parte do percurso das águas, nos trechos em que não seguem os leitos naturais existentes, realiza-se em canais, algo como 82% do total. Dependendo da topografia, são escavados no terreno natural, construídos em aterro compactado ou ainda têm uma seção mista, a meia encosta, de escavação e aterro, à semelhança de construção de rodovias. A Figura 3 ilustra a divisão dos trechos e mostra seu traçado (BRASIL, 2000).

Figura 3. Trechos do PISF



Fonte: BRASIL, 2004.

De acordo com o Ministério da Integração Nacional, a travessia de talvegues e vales é realizada através de aquedutos, cuja extensão totaliza cerca de 5 km ou 0,7% do percurso. A travessia de relevos elevados e serras é realizada por meio de túneis, cuja extensão soma 37 km ou 5% do percurso. As passagens por reservatórios, já existentes ou novos, necessários à operação do Sistema de Transposição, perfazem uma extensão de cerca de 85 km ou 12% do percurso total (relatório síntese). Na Figura 4, são ilustradas todas as intervenções hidráulicas para transposição do Rio São Francisco de forma sintetizada.



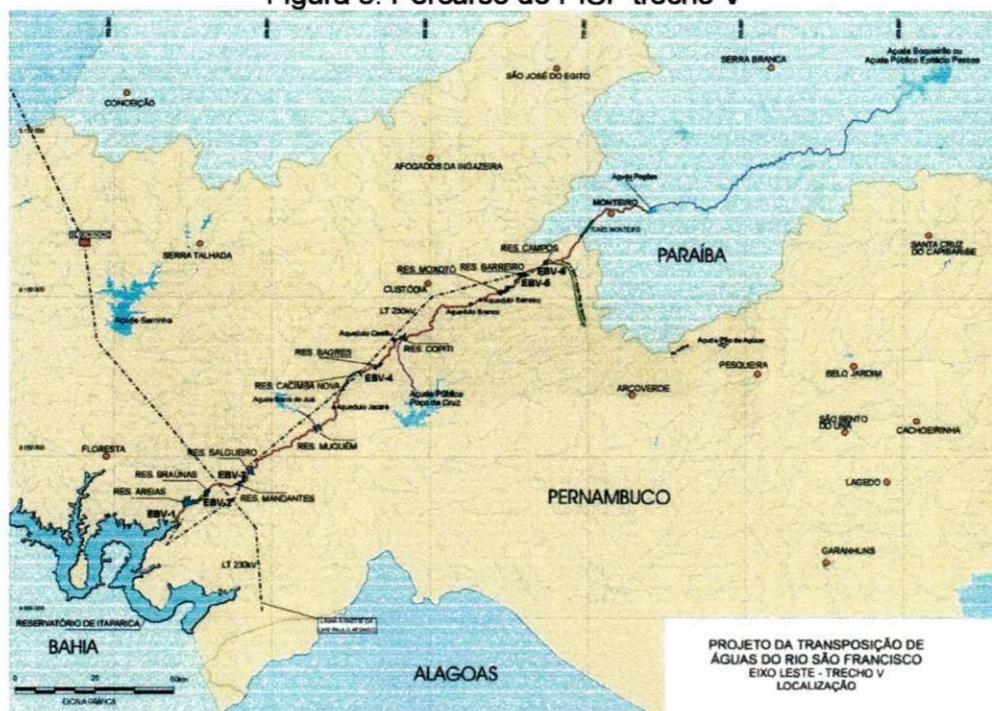
Fonte: BRASIL, 2004.

3.4.4. EIXO LESTE

O Eixo Leste, que terá sua captação no lago da barragem de Itaparica, no município de Floresta – PE, se desenvolverá por um caminhamento de 220 km até o rio Paraíba – PB, após deixar parte da vazão transferida nas bacias do Pajeú, do Moxotó e da região Agreste de Pernambuco, como pode ser visto na Figura 5. Para o atendimento das demandas da região Agreste de Pernambuco, o projeto prevê a construção de um ramal de 70 km que interligará o Eixo Leste à bacia do rio Ipojuca. Previsto para uma capacidade máxima de 28 m³/s, o Eixo Leste funcionará com uma

vazão contínua de 10 m³/s, disponibilizados para consumo humano (CASTRO, 2011).

Figura 5. Percurso do PISF trecho V

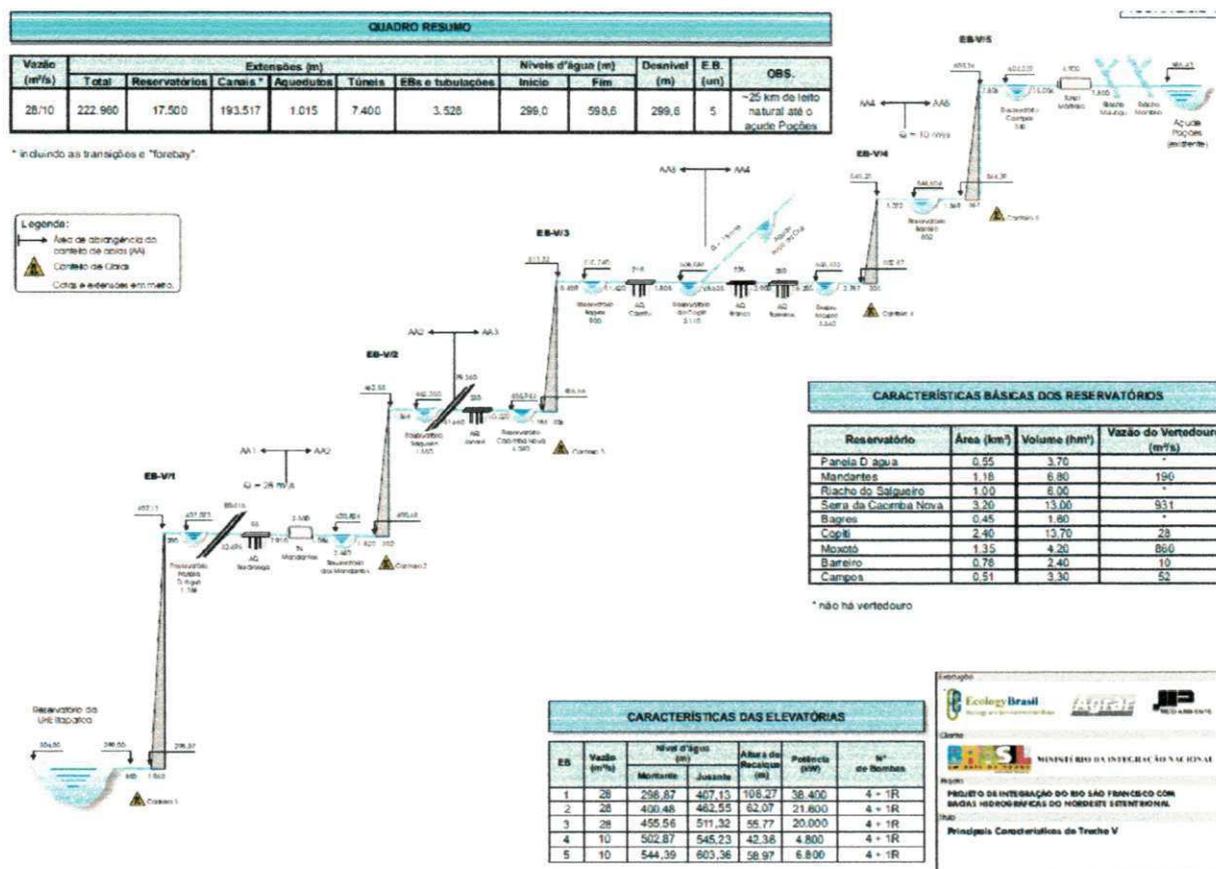


Fonte: ANA (apud Farias, 2009)

Formado apenas pelo trecho V do PISF, o eixo leste, possui 5 estações de bombeamento para vencer o desnível de aproximadamente 300 m entre a tomada d'água e o espigão que divide os Estados da Paraíba e Pernambuco, sendo o maior desnível de todo o PISF (BRASIL, 2000).

Esse eixo levará água para o açude Poço da Cruz (PE) e para o rio Paraíba, que é responsável pela manutenção dos níveis do açude Poções, Camalaú, Epitácio Pessoa (Boqueirão), e Argemiro de Figueiredo (Acauã). A Figura 6 ilustra todo o sistema de condução de água que será composto por cinco estações de bombeamento, cinco aquedutos, dois túneis e nove reservatórios de pequeno porte (BRASIL, 2004).

Figura 6. Sistema adaptado de condução de água do Eixo Leste



Fonte: IBAMA, 2004.

Logo, podemos resumir os dados do projeto destacados até agora na seguinte tabela:

Tabela 1. Dados resumidos dos Eixos do PISF.

Eixo	Trecho	Vazão Máxima	Vazão Média	Vazão contínua de funcionamento	Local de Captação	Extensão dos Canais	Desnível
Leste	V	28 m³/s	18,3 m³/s	10 m³/s	Barragem de Itaparica/PE	220 km	304 m

3.4.5. COBRANÇA DA ÁGUA DA TRANSPOSIÇÃO

Para que fosse comprovada a viabilidade financeira da obra da transposição, foi necessário que o MI fizesse um estudo com base nos mecanismos e valores de cobrança pela prestação dos serviços de adução de água bruta propostos nos estudos apresentados.

Com relação aos mecanismos, são propostos: a cobrança pelo serviço de adução de água bruta e o estabelecimento de garantias para a Entidade Operacional Federal do PISF.

Para cobrança pelo serviço de adução de água bruta, podemos citar a tarifa de demanda, consumo e os valores acrescidos da cobrança pelo uso da água prevista pela Lei 9.433 de 1997. A primeira tarifa é devida aos custos operacionais fixos: manutenção das instalações, obras e equipamentos; operação e administração; demanda de energia elétrica referente à potência instalada das estações de bombeamento; seguros, impostos e taxas de caráter fixo; programas ambientais; e taxa de administração da Entidade Operadora Federal. Já a tarifa de consumo é proveniente dos custos operacionais variáveis do consumo de energia elétrica para bombeamento de água; encargos tributários respectivos; taxa de administração da Entidade Operadora Federal; e demais gastos necessários para a prestação do serviço.

Já para os valores de cobrança da água, o MI realizou os estudos fazendo uma simulação com vazão firme contratada de 26,4 m³/s e uma vazão consumida equivalente à contratada. Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados os valores de cobrança para os cenários de 2010 e 2035, resultantes da simulação do Ministério da Integração Nacional (BRASIL, 2000).

Segundo as simulações de cobrança realizadas pelo MI, o valor médio da cobrança pela adução de água bruta no Eixo Norte, baseado no valor de energia de 2005, será de R\$ 0,095, em 2010, e R\$ 0,151, em 2025. Já no Eixo Leste será de R\$ 0,144, em 2010, e R\$ 0,237, em 2025. Ressalta-se que o maior valor observado em 2025 é devido, principalmente, a um incremento dos custos operacionais fixos em face da conclusão da estrutura física do PISF, o que aumenta os custos de operação e manutenção (ANA, 2005, p 49).

Esses valores poderão variar em função das políticas tarifárias adotadas pelas entidades operadoras estaduais e companhias de saneamento, bem como pelo aumento do número de usuários, atraídos pela oferta de água com maior garantia.

Por fim, os valores de cobrança reais serão calculados anualmente, sendo considerados os custos operacionais do PISF e das vazões efetivamente contratadas e deverão ser fixados pela entidade reguladora.

Tabela 2. Valores da simulação de cobrança do MI em 2010

Estados	Vazões (m³/s)		Custos (R\$/ano)			Valores de Cobrança (R\$/m³)
	Bombeadas	Disponibilizadas	Fixo	Variável	Total	
CE	11,41	8,91	10.346.994	16.535.438	26.882.432	0,096
PB	1,28	1,00	1.160.475	1.855.547	3.016.022	0,096
PE	0,76	0,59	731.984	764.135	1.496.119	0,080
RN	2,95	2,30	2.498.046	4.273.376	6.771.422	0,093
Eixo Norte	16,40	12,80	14.737.499	23.428.496	38.165.995	0,095
PB	4,67	4,20	7.330.402	12.095.018	19.425.420	0,147
PE	5,33	4,80	8.264.191	13.051.880	21.316.071	0,141
Eixo Leste	10,00	9,00	15.594.593	25.146.898	40.741.491	0,144
CE	11,41	8,91	10.346.994	16.535.438	26.882.432	0,096
PB	5,95	5,20	8.490.877	13.950.565	22.441.442	0,140
PE	6,09	5,39	8.996.175	13.816.015	22.812.190	0,137
RN	2,95	2,30	2.498.046	4.273.376	6.771.422	0,093
Total PISF	26,40	21,80	30.332.092	48.575.394	78.907.486	0,120

Fonte: BRASIL, 2000.

Tabela 3. Valores da simulação de cobrança do MI em 2025

Estados	Vazões (m³/s)		Custos (R\$/ano)			Valores de Cobrança (R\$/m³)
	Bombeadas	Disponibilizadas	Fixo	Variável	Total	
CE	11,41	8,91	24.585.375	16.534.580	41.119.955	0,146
PB	1,28	1,00	2.494.978	1.854.550	4.349.528	0,138
PE	0,76	0,59	3.314.769	471.938	3.786.707	0,204
RN	2,95	2,30	7.150.078	4.275.673	11.425.751	0,158
Eixo Norte	16,40	12,80	37.545.200	23.136.741	60.681.941	0,151
PB	4,67	4,20	15.292.782	12.095.018	27.387.800	0,207
PE	5,33	4,80	18.581.968	20.447.950	39.029.918	0,258
Eixo Leste	10,00	9,00	33.874.750	32.542.968	66.417.718	0,237
CE	11,41	8,91	24.585.375	16.534.580	41.119.955	0,146
PB	5,95	5,20	17.787.760	13.949.568	31.737.328	0,198
PE	6,09	5,39	21.896.737	20.919.888	42.816.625	0,253
RN	2,95	2,30	7.150.078	4.275.673	11.425.751	0,158
Total PISF	26,40	21,80	71.419.950	55.679.709	127.099.659	0,196

Fonte: BRASIL, 2000.

4. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia apresentada neste trabalho tem como finalidade analisar o uso dos recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba após a chegada da vazão exógena do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), no Estado da Paraíba, através do Eixo Leste, para prover o estudo da alocação ótima dos recursos naturais existentes.

Foram analisadas duas propostas, com dois cenários cada. Logo, foram definidos quatro cenários com a água sendo transportada tanto pelo leito natural do rio como por adutoras, apresentando alternativas de traçado para as mesmas, políticas de operação e prioridades de atendimento das demandas, sendo os mesmos detalhados nos itens a seguir.

4.1. PROPOSTAS DA AESA PARA USO DA ÁGUA NA BACIA DO RIO PARAÍBA APÓS A INTEGRAÇÃO DO EIXO LESTE DO PISF

A primeira proposta ou proposta base foi elaborada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) e a segunda proposta é uma modificação da primeira. Na proposta de base foram consideradas as demandas hídricas atuais e futuras na área deste estudo, que contempla o abastecimento urbano de 101 municípios através de adutoras nos reservatórios e captação direta no leito do rio; irrigação de uma área de 1376 hectares – sendo 1020 hectares localizados nas margens do reservatório Epitácio Pessoa e 356 hectares localizados no perímetro irrigado próximo ao reservatório Poções – e a perenização do rio Monteiro, a jusante do reservatório Poções, e do rio Paraíba, que continuará perenizado a jusante do reservatório de Acauã.

O abastecimento urbano das 101 cidades é realizado através dos sistemas adutores projetados pela AESA e outros já construídos pelo Estado. São: o Eixo Principal que deriva três outros eixos (Eixo Serra de Teixeira, Eixo Seridó, e Eixo do

Brejo) em pontos diferentes de seu traçado, partindo das proximidades do açude de Poções; das adutoras Boqueirão e Cariri, construídas, e que partem no reservatório Epitácio Pessoa; das adutoras Acauã – ramal norte, Acauã – ramal leste e Acauã – ramal oeste no reservatório Argemiro de Figueiredo; e também, considerada neste estudo, a adutora projetada do reservatório de Camalaú.

Uma descrição dos Eixos propostos pela AESA encontra-se nos Termos de Referência (TDR) para Contratação de Consultoria para a elaboração de Estudos Técnicos Preliminares, de Viabilidade e Projeto Básico para a Integração do Eixo Leste do Projeto São Francisco com Bacias do Estado da Paraíba (2007), podendo ser descritos da seguinte maneira:

Eixo Principal: partirá da Central de Tratamento de Água (ETA central), a ser localizada nas proximidades do açude Poções (entrada do Eixo Leste do Projeto de Integração do São Francisco), no município de Monteiro, alcançando a BR-412 e passando pelos municípios de Sumé Serra Branca, São João do cariri, Boa Vista e São José da Mata. Margeando a PB- 115, o eixo passará pelas cidades de Puxinanã e Montadas, até Esperança. A partir daí, margeando a BR-104 alcançará o ponto final, na cidade de Remígio, totalizando uma extensão aproximada de 199,7 Km.

Deste Eixo, partirão 2 (dois) Ramais:

- **Ramal Campina Grande:** partirá da localidade de São José da Mata, no entroncamento da BR-230 com a PB-115 e seguirá margeando a BR-230 até a cidade de Campina Grande, com extensão aproximada de 5,0 Km;
- **Ramal Reforço à Adutora do Congo:** partirá da BR-412, na altura da cidade de Sumé até a Estação de Tratamento de Água (ETA) do sistema, com extensão aproximada de 0,5 Km.

Eixo Serra de Teixeira: é uma derivação do Eixo Principal e partirá da BR-412, na altura da cidade de Sumé, pela PB-210, passando pelo município de São José dos Cordeiros até a cidade de Taperoá. Daí, margeando a PB-238, passará pelas cidades de Desterro, seguirá até o entroncamento desta com a BR-110 e seguirá margeando esta até o entroncamento PB-306. Continuará margeando a PB-306, passando pela cidade de Maturéia até alcançar a cidade de Imaculada. A extensão aproximada deste eixo será de 148,1 Km.

Deste Eixo, partirão 3 (três) Ramais:

- **Ramal Cacimbas:** partirá da cidade de Desterro, margeando a PB-246 até a cidade de Cacimbas, com extensão aproximada de 12,6 Km;
- **Ramal Teixeira:** partirá do entroncamento da PB-238 com a BR-110, margeando a BR-110 até a cidade de Teixeira, com extensão aproximada de 2,0 Km;
- **Ramal Mãe D'Água:** partirá da PB-306, a aproximadamente 5 km após a cidade de Maturéia até a cidade de Mãe D'Água, com extensão aproximada de 11 Km .

Eixo Seridó: partirá do município de Remígio, margeando a BR-104, passando pela cidade de Barra de Santa Rosa, até o entroncamento desta com a PB137. Daí, seguirá margeando a PB-137, até a cidade de Picuí, com extensão aproximada de 86,2 Km.

Deste Eixo, partirão 6 (seis) Ramais:

- **Ramal Algodão de Jandaíra:** partirá do entroncamento da BR-104 e PB-127, de onde seguirá margeando a PB-127 até a cidade de Algodão de Jandaíra, com extensão aproximada de 11 Km;
- **Ramal Frei Martinho:** partirá da cidade de Picuí, margeando a PB-177 até a cidade de Frei Martinho, com extensão aproximada de 20,4 Km;
- **Ramal Nova Palmeira:** partirá da cidade de Picuí, margeando a PB-151, passando pela cidade de Santa Luzia de Picuí até a cidade de Nova Palmeira, com extensão aproximada de 21,7 Km;
- **Ramal Cuité/Nova Floresta:** partirá do entroncamento da BR-104 com a PB-137, seguindo margeando a BR-104, passando pelas localidades de Jacu e Buenos Aires e indo até a Estação Elevatório de Água Bruta na cidade de Cuité, com extensão aproximada de 15,7 Km;
- **Ramal Baraúna:** partirá do entroncamento da PB-137 com a PB-169 até a cidade de Baraúna, com extensão aproximada de 5,7 Km;
- **Ramal Reforço a Adutora do Cariri:** partirá do entroncamento da BR-104 com a PB-167, passará pela cidade de Sossego até a cidade de Cubati, com extensão aproximada de 42,3 Km. Através da interligação com o sistema

adutor do Cariri, atenderá as cidades de Pedra Lavrada, Seridó, Cubati e Olivedos.

Eixo do Brejo: partirá da cidade de Remígio, margeando a PB-105, passando pela cidade de Arara, de onde seguirá margeando a PB-085, até a cidade de Serraria, com uma extensão aproximada de 32 Km.

Deste Eixo, partirão 2 (dois) Ramais:

- **Ramal Canafístula II:** partirá do entroncamento da PB-085 com a PB-093, margeando a PB-093 até o entroncamento da PB-093 com a PB-105, de onde seguirá margeando a PB-105 até a ETA de Solânea, com extensão aproximada de 10 Km;
- **Ramal Pirpirituba:** partirá da cidade de Serraria, margeando a PB-085 até a cidade de Pirpirituba, com extensão aproximada de 23 Km.

O PISF contemplará a Região do Baixo Curso do Rio Paraíba, através do Canal de Integração Acauã-Araçagi, atualmente em fase de construção, planejado para transportar uma vazão máxima de 10 m³/s. O referido canal terá como suporte hídrico parte da vazão aduzida do Eixo Leste via reservatório Acauã e terá como objetivo suprir as demandas de abastecimento humano e o déficit hídrico das atividades produtivas da região da vertente litorâneas do Estado: irrigação, piscicultura, carcinicultura, etc., ampliando, assim, o contingente de pessoas beneficiadas pelo projeto.

As cidades beneficiadas pela proposta da AESA para o Eixo Leste do PISF estão localizadas do litoral ao sertão paraibano. Os municípios beneficiados estão distribuídos de acordo com o alcance de cada adutora, onde apenas as cidades Caraúbas e São Domingos do Cariri não são abastecidas por adutoras, pois se encontram próximas ao leito natural do Rio Paraíba. O atendimento das cidades por cada adutora pode ser visualizado nas tabelas a seguir.

Tabela 4. As novas adutoras e os municípios beneficiados.

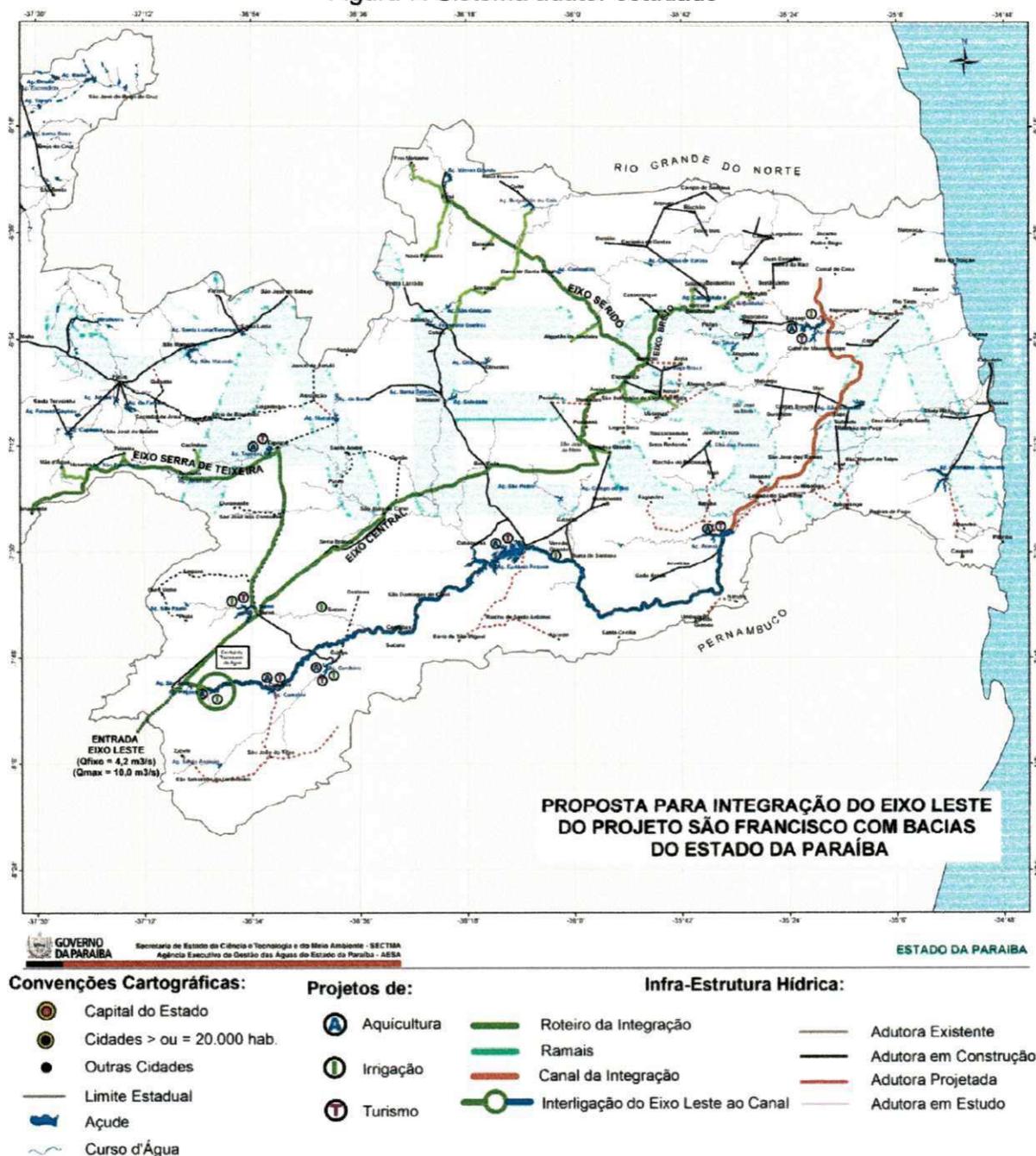
Adutoras	Municípios
Eixo Principal	Puxinanã, Montadas, Areial, Esperança, Lagoa Seca, Alagoa Nova, São Sebastião de Lagoa de Roça, Alagoa Grande, Areia, Matinhas, Remígio
Eixo Brejo	Arara, Casserengue, Araruna, Bananeiras, Cacimba de Dentro, Damião, Serrania, Solânea, Tacima (Campo de Santana), Dona Inês, Riachão, Borborema, Pirpirituba, Belém, Sertãozinho, Duas Estradas, Serra da Raiz, Caiçara, Lagoa de Dentro, Logradouro
Eixo Seridó	Algodão de Jandaíra, Barra de Santa Rosa, Sossêgo, Baraúna, Cuité, Nova Floresta, Frei Martinho, Nova Palmeira, Picuí
Eixo Serra de Teixeira	Cacimbas, Desterro, Imaculada, Mãe d'Água, Maturéia, Taperoá, Teixeira

Tabela 5. As adutoras existentes e suas expansões, e os municípios beneficiados.

Adutoras	Municípios
Boqueirão	Alcantil, Barra de Santana, Barra de São Miguel, Campina Grande, Caturité, Pocinhos, Queimadas, Riacho de Santo Antônio, Boa Vista, Boqueirão, Cabaceiras, Juazeirinho, Cubati, Olivedos, Pedra Lavrada, Seridó, Soledade, Tenório
Acauã	Aroeiras, Gado Bravo, Itabaiana, Juripiranga, Pilar, Salgado de São Félix, Riachão do Poço, São Miguel de Taipu, Fagundes, Itatuba, Ingá, Juarez Távora, Mogeiro, Riachão do Bacamarte
Congo	Monteiro, Congo, Sumé, Amparo, Coxixola, Livramento, Ouro Velho, Prata, Gurjão, Parari, Santo André, São João do Cariri, São José dos Cordeiros, Serra Branca, Sucuru, Pio X
Camalaú	Zabelê, São Sebastião do Umbuzeiro, São João do Tigre, Camalaú

A Figura 7 ilustra todo o sistema estudado, destacando o traçado das adutoras existentes, das que estão em construção e das projetadas, além do canal de Integração e o traçado via leito natural que a água exógena do rio São Francisco irá percorrer.

Figura 7. Sistema adutor estudado



Fonte: PARAÍBA, 2007.

4.2. CENÁRIOS ESTUDADOS

Para análise do sistema em estudo, levou-se em consideração o incremento da vazão exógena do projeto de integração do rio São Francisco na bacia do rio Paraíba, através do eixo Leste. Foram propostos quatro cenários baseados nos Termos de Referência (TDR) para Contratação de Consultoria para a elaboração de Estudos Técnicos Preliminares, de Viabilidade e Projeto Básico para a Integração do Eixo Leste do Projeto São Francisco com Bacias do Estado da Paraíba disponibilizado pela AESA (2007).

Nesse TDR proposto pela AESA, foi projetada uma alternativa de transporte da água exógena do rio São Francisco via adutora e leito natural do rio, partindo do reservatório Poções em Monteiro. O projeto tem como principais demandas o abastecimento, a irrigação e a perenização do rio Paraíba para garantir uma vazão contínua também no Canal da Integração Acauã-Araçagi.

De acordo com a Lei nº 9.433 de 1997, foi imposto que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas e que em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais. Portanto, em todos os cenários, o abastecimento terá a maior prioridade nos cálculos do modelo.

Nos cenários propostos neste estudo, será otimizado todo o sistema que contempla a transposição do PISF para a bacia do rio Paraíba, juntamente com a proposta da AESA. Além disso, será realizada uma nova alternativa, visando analisar o desempenho do projeto a fim de comparar os custos das alternativas para o transporte da água exógena no Estado.

Sendo assim, foi considerado para a operação do sistema, 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;

4.2.1. CENÁRIO I

Foi considerado o sistema proposto pela AESA para o transporte da água exógena proveniente do Rio São Francisco via eixo leste do projeto com vazão fixada em 4,2 m³/s, e de acordo com a ANA (2005), podendo-se atingir o valor máximo de 9,61 m³/s, dependendo das condições hídricas da barragem de Sobradinho. Parte dessa água será transportada através de adutoras e o restante pelo leito natural do Rio Paraíba. Esse sistema pode ser observado na Figura 8.

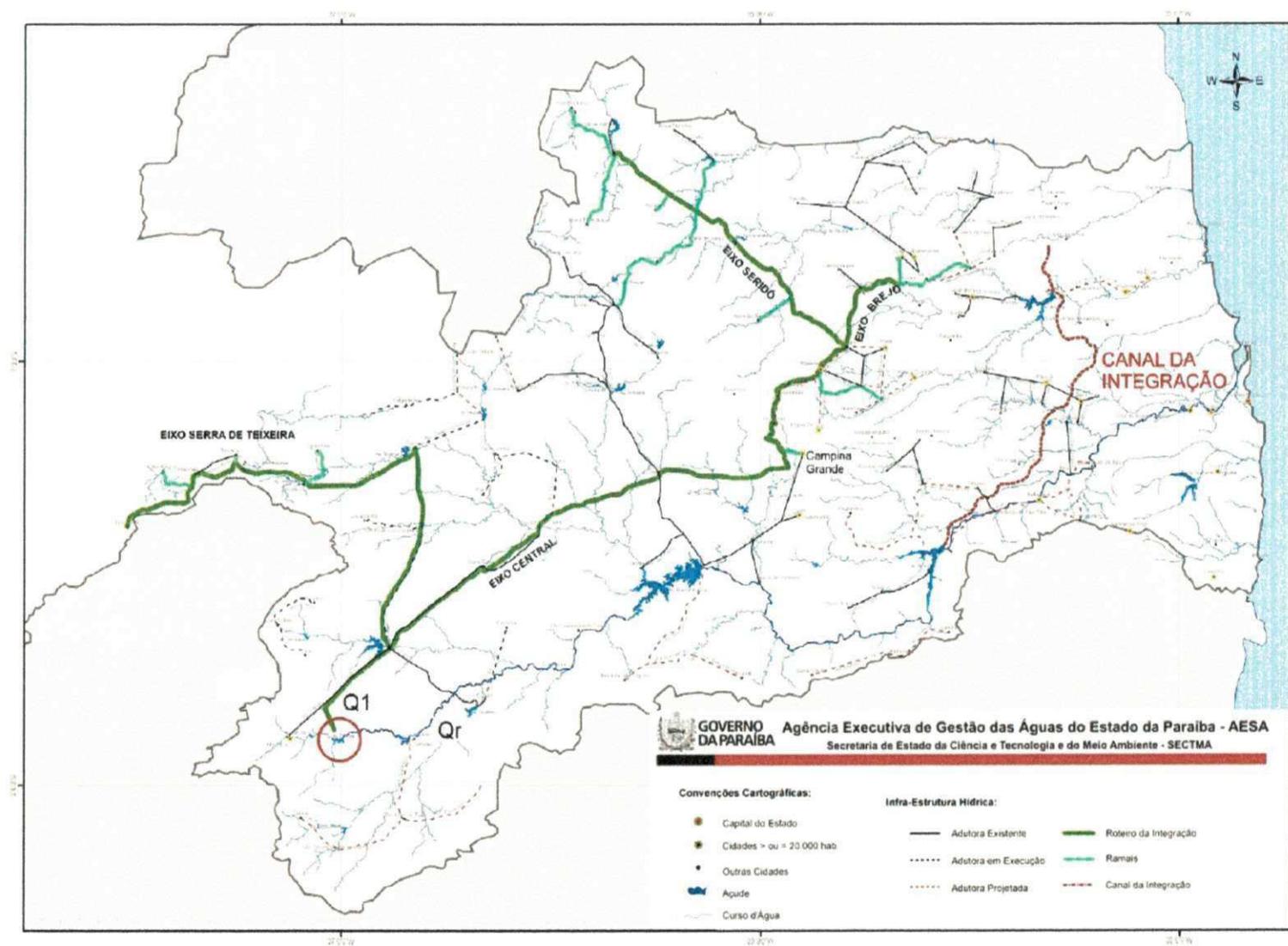
A transferência de águas para o Estado da Paraíba pelo Projeto São Francisco, segundo a proposta feita pela AESA, por intermédio do Eixo Leste, inicialmente beneficiará 67 (sessenta e sete) municípios, com a garantia de abastecimento de água para as populações urbanas e rurais. Com a junção dos sistemas Adutores do Congo, Boqueirão, Acauã, e de Camalaú (adutora projetada, mas não construída) irá beneficiar no total 101 municípios.

Nesse sistema, a água chegará a montante da cidade de Monteiro e uma parte será aduzida através da adutora principal com vazão de 2,0 m³/s, distribuindo-se nos Eixos da Serra de Teixeira, Brejo e Seridó. Esses eixos, além de realizar uma nova distribuição de água, irá fazer reforço a algumas adutoras existentes.

Para que seja possível um melhor entendimento do sistema, os trechos dos rios foram numerados entre os reservatórios de acordo com sua sequência, no qual temos: o trecho 1, percurso do rio que interliga o reservatório Poções ao reservatório Camalaú; o trecho 2 que liga o reservatório Camalaú ao reservatório Eptácio Pessoa (Boqueirão) e o trecho 3, ligando o reservatório de Boqueirão ao reservatório Argemiro de Figueiredo (Acauã).

Logo, nesse cenário será analisado o comportamento desse sistema através da otimização dos recursos hídricos com todas as demandas existentes, sendo a ordem de prioridade o abastecimento, a irrigação e, por fim, a vazão ao canal de integração Acauã-Araçagi. Além disso, também será avaliado o custo para adução da água para abastecimento nas adutoras propostas pela AESA.

Figura 8. Traçado da adutora para o cenário 1



Fonte: AESA (apud Farias, 2009)

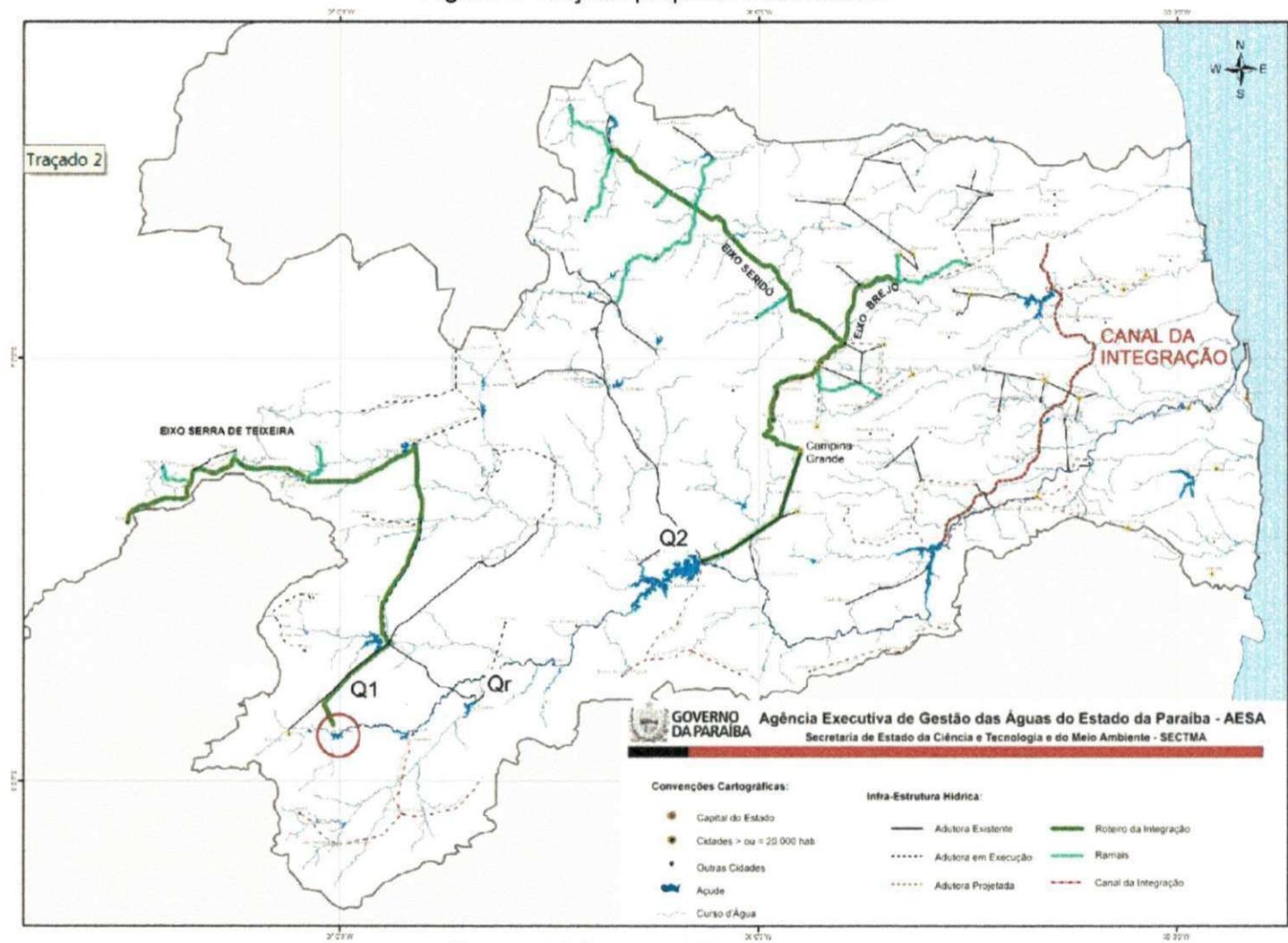
4.2.2. CENÁRIO II

O sistema proposto pela AESA foi modificado de forma a não existir o transporte da água através do eixo principal com início na cidade de Monteiro, pois o eixo principal partirá da cidade de Campina Grande, sendo os outros eixos do projeto mantidos. Logo, o eixo principal só terá duas derivações: o Eixo Seridó e Brejo, e o eixo Serra de Teixeira que irá partir do reservatório Poções. O ramal de reforço à adutora do Congo irá derivar da adutora Serra de Teixeira, os demais ramais não terão modificações.

Nesse cenário, a modificação proposta não diminui a quantidade de cidades a serem atendidas, como pode ser visto na Figura 9. A proposta da AESA para o traçado da adutora Eixo Principal, representada no cenário anterior visa à diminuição da perda de água por transporte via leito natural do rio e, caso seja realizada a modificação no sistema, todos os municípios continuarão sendo atendidos.

Portanto, esse cenário apresenta as mesmas prioridades do Cenário I e analisa primordialmente a relação custo-benefício através do custo de energia pela adução da água para abastecimento, além de realizar a otimização do sistema modificado. Finalmente, é realizado um comparativo com o Cenário I e II.

Figura 9. Traçado proposto no cenário 2



Fonte: AESA (apud Farias, 2009)

4.2.3. CENÁRIO III e IV

Esses cenários apresentam às mesmas propostas dos cenários I e II, respectivamente. Contudo, nesses cenários, há a mudança nas prioridades de atendimento as demandas, onde temos que o atendimento da vazão estipulada para o Canal de Integração Acauã-Araçagi terá maior prioridade que a maximização da receita líquida e da mão de obra oriunda da agricultura irrigada nos perímetros irrigados estudados.

4.3. ÁREA DE ESTUDO

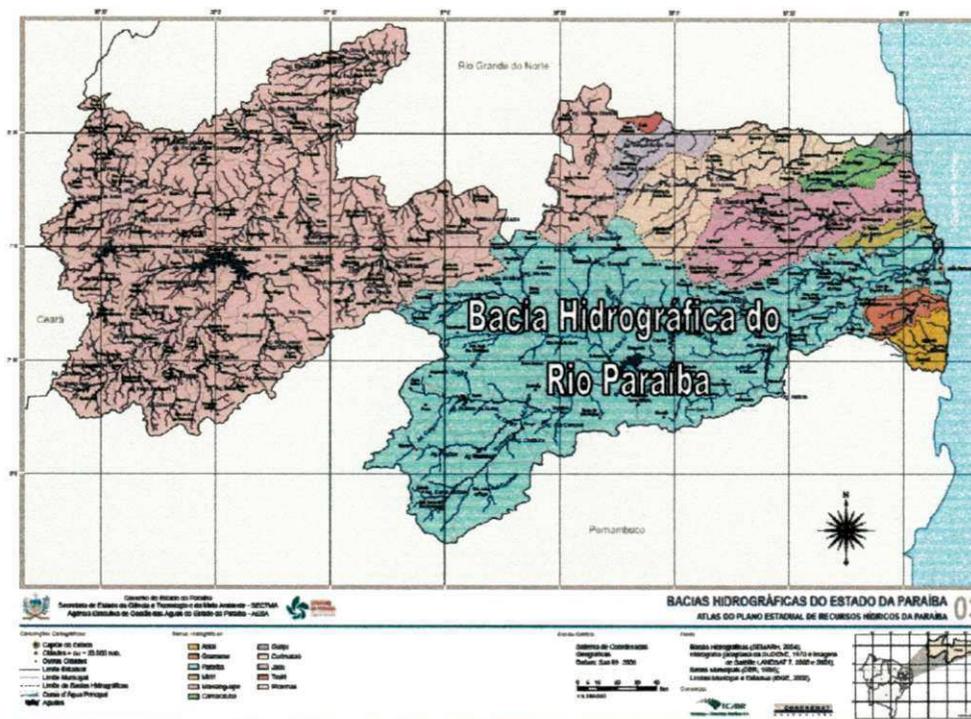
As informações relevantes às características da área de estudo descritas nesse trabalho são oriundas do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (2006), do qual foi destacado nesse item a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba suas regiões e sub-bacia.

O Estado da Paraíba possui uma extensão territorial de 56.439,84 km², correspondendo a 3,63% da área da região Nordeste. Limita-se ao norte com o Estado do Rio Grande do Norte; a leste, com o oceano Atlântico; a oeste, com o Estado do Ceará; e ao sul, com o Estado de Pernambuco. Seu território é dividido em 11 bacias hidrográficas: bacia do rio Paraíba; bacia do rio Abiaí; bacia do rio Gramame; bacia do rio Miriri; bacia do rio Mamanguape; bacia do rio Camaratuba; bacia do rio Guaju; bacia do rio Piranhas; bacia do rio Curimataú; bacia do rio Jacu; e bacia do rio Trairi (PARAÍBA, 2006).

A bacia hidrográfica estudada neste trabalho foi a do Rio Paraíba, que apresenta uma área de 20.071,83 km², compreendida entre as latitudes 6°51'47"S e 8°18'12"S e longitude 34°47'37"O e 37°21'22"O. Em razão de sua grande extensão geográfica e das diversidades climáticas e físicas, a bacia do Rio Paraíba foi dividida em uma sub-bacia do Rio Taperoá e em três regiões: o alto Paraíba, médio Paraíba, e baixo Paraíba. A Figura 10 ilustra as bacias hidrográficas do Estado da Paraíba, onde está nomeada a Bacia do Rio Paraíba. É a maior bacia hidrográfica de domínio

estadual, já que sua área abrange aproximadamente 35,6%, de todo o território estadual. Sua área engloba 71 municípios que abrigam uma população de 1.866.521 habitantes, sendo 52% da população do Estado.

Figura 10. Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba.



Fonte: PARAÍBA, 2006.

Podem ser destacadas algumas características da Bacia do Rio Paraíba (ARAGÃO, 2008):

- Regime pluviométrico mensal e anual irregular, com a concentração das precipitações em poucos meses do ano (fevereiro a julho) e ainda com ocorrência de anos muito secos e outros muito chuvosos. A precipitação média da região é em torno de 350 a 1800 mm, aumentando no sentido oeste para leste;
- A bacia na sua parte Oeste é caracterizada como semiárido quente, com precipitações médias anuais em torno de 400 mm. Na sua parte leste, o clima é do tipo semiúmido, com temperaturas médias mínimas e máximas, respectivamente, variando entre 18 a 22°C e 28 a 31°C;
- Quanto à evaporação anual, os dados obtidos a partir de tanque classe A, variam entre 2.200 a 3.000 mm, aumentando no sentido do litoral ao sertão;

- d) A umidade relativa do ar compreende-se entre 60% a 75%, observando-se que os valores máximos ocorrem, geralmente, no mês de junho, e os mínimos no mês de dezembro;
- e) A insolação nesta região apresenta variações nos valores médios mensais de janeiro a julho, cuja duração efetiva do dia é de 7 a 8 horas diárias, e de agosto a dezembro, da ordem de 8 a 9 horas diárias;
- f) Cursos d'água intermitentes, com exceção da Região do Baixo Curso do Rio Paraíba;
- g) O relevo da região caracteriza-se por se apresentar de ondulado, forte ondulado a montanhoso;
- h) Com relação à geologia, a região da bacia do Rio Paraíba apresenta uma predominância do cristalino sobre os terrenos sedimentares, com ocorrência de rochas vulcânicas e plutônicas de idades diversas, com exceção da Região do Baixo Curso do rio Paraíba.

4.3.1. SUB-BACIA DO RIO TAPEROÁ

Seu principal rio é o Taperoá, caracterizado por seu regime intermitente. Nasce na Serra do Teixeira e desemboca no rio Paraíba, no Açude de Boqueirão (reservatório Epitácio Pessoa). Drena uma área aproximada de 5.661,45 km² e apresenta clima semiárido quente, cujas temperaturas variam entre 18 a 22 °C a mínima, e a máxima entre 28 e 31 °C. A precipitação média anual oscila entre 400 e 600 mm e se concentra no período de dois a quatro meses. Esta bacia recebe contribuição dos rios São José dos Cordeiros, Floriano, Soledade, Boa Vista e Riacho dos Canudos.

A vegetação predominante nesta sub-bacia é a caatinga hiperxerófila, hipoxerófila, floresta caducifólia e subcaducifólia. As áreas desmatadas e utilizadas para a agricultura são, em geral, ocupadas pelas culturas de palma forrageira, agave e algodão, além de milho e feijão.

4.3.2. REGIÃO DO ALTO CURSO DO RIO PARAÍBA

Localizada no Planalto da Borborema na sua parte sudoeste, a região do alto curso do Rio Paraíba encontra-se em altitudes superiores a 600 m ao nível do mar. O rio principal dessa região é o rio Paraíba, nascendo na confluência dos rios Sucurú e do Meio no município de Sumé, localizados na margem esquerda. Também recebe contribuições dos rios Monteiro e Umbuzeiro, pela margem direita. Essa região hidrográfica drena aproximadamente 6.717,39 km².

O relevo dessa região caracteriza-se por ser fortemente ondulado, e, em algumas áreas, há ocorrência de relevo montanhoso. Seu clima é definido como semiárido quente, apresentando temperaturas mínimas entre 18 e 22 °C, e máximas entre 28 e 31 °C. Os períodos de estiagem podem ser prolongados chegando até 10 meses.

O regime pluviométrico, geralmente, são nos meses de fevereiro, março, abril e maio, com uma média anual de 300 a 600 mm, mas podendo atingir marcas de 800 mm em anos muito chuvosos. Contudo, a evaporação na região, medida em tanque classe A, varia entre 2500 e 3000 mm anuais, com uma insolação de 7 a 8 horas diárias de janeiro a julho, e de 8 a 9 horas diárias de agosto a dezembro.

Nesta região de vegetação natural predominante do tipo caatinga, encontram-se os cinco principais açudes públicos da bacia do rio Paraíba, sendo: o açude Epitácio Pessoa, o segundo maior do estado com capacidade de 411 milhões de m³, localizado em Boqueirão; o açude Poções, com capacidade de 29,86 milhões de m³ e o açude Cordeiro, com capacidade de 69,96 milhões de m³, localizados em Monteiro; o açude Camalaú, com capacidade de 46,43 milhões de m³, localizado em Camalú; e o açude Sumé, com capacidade de 44,86 milhões de m³, situado na cidade de mesmo nome. Apenas os reservatórios Cordeiro e Sumé não estão previstos para receber águas do PISF.

Os solos predominantes na bacia do Alto Curso do rio Paraíba - PB são do tipo Bruno não cálcico, que cobrem todo o cristalino existente na área da bacia. Este tipo de solo caracteriza-se por ser pouco espesso, pedregoso e com permeabilidade moderada. Nas áreas desmatadas e utilizadas na agricultura predominam as culturas de palma forrageira, agave e algodão, além de milho e feijão.

4.3.3. REGIÃO DO MÉDIO CURSO DO RIO PARAÍBA

Localizada ao sul do Planalto da Borborema no Estado da Paraíba, a região do médio curso do Rio Paraíba encontra-se limitada pela região do Alto Curso do rio Paraíba a oeste, e pela Região do Baixo Curso do rio Paraíba a leste, sendo drenada pelo Médio Curso do rio Paraíba. Essa região drena aproximadamente 3.760,65 km² e recebe contribuições de cursos d'água dos rios Ingá, São Pedro e Catolé, além do riacho Bodocongó.

A climatologia da região é classificada como semiárido quente, com precipitação média anual variando entre 600 e 1.100 mm, com valores decrescentes de leste para oeste. A evaporação medida em tanque classe A para essa região varia em torno de 1.600 e 3.000 mm. Nesta região está situado o segundo maior reservatório da bacia do Rio Paraíba e o terceiro maior reservatório estadual, o Argemiro de Figueiredo também conhecido como Acauã.

A vegetação natural dominante é do tipo caatingas hiperxerófila, hipoxerófila, floresta caducifólia e subcaducifólia. As áreas desmatadas e utilizadas para a agricultura são, em geral, ocupadas pelas culturas de palma forrageira, agave e algodão, além de milho e feijão.

4.3.4. REGIÃO DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA

Situada na parte litorânea do estado da Paraíba, a região do baixo curso do Rio Paraíba é drenada pelo Baixo Curso do rio Paraíba, desaguando no Oceano Atlântico na Cidade de Cabedelo e tendo como principal afluente o rio Paraibinha. Esta região drena uma área de 3.925,41 km².

Seu clima é classificado como úmido, com temperaturas que variam entre 20 e 24 °C a mínima, e a máxima atinge de 28 a 32 °C. Sua precipitação média anual varia entre 1.200 e 1.700 mm, com valores decrescentes da região do litoral ao interior, onde as maiores concentrações precipitadas ocorrem na área costeira.

A vegetação natural que dominava a área era constituída da Mata Atlântica e ecossistemas associados, ou seja, manguezais, campos de várzeas e formações

mistas dos tabuleiros, cerrados e restingas. No entanto, ao longo do processo de colonização e ocupação das terras, quase toda a vegetação natural foi sendo indiscriminadamente retirada e substituída pelas culturas de cana-de-açúcar, abacaxi, mandioca, entre outras de caráter intensivo e extensivo. Atualmente restam somente alguns pequenos trechos da mata atlântica e de seus ecossistemas.

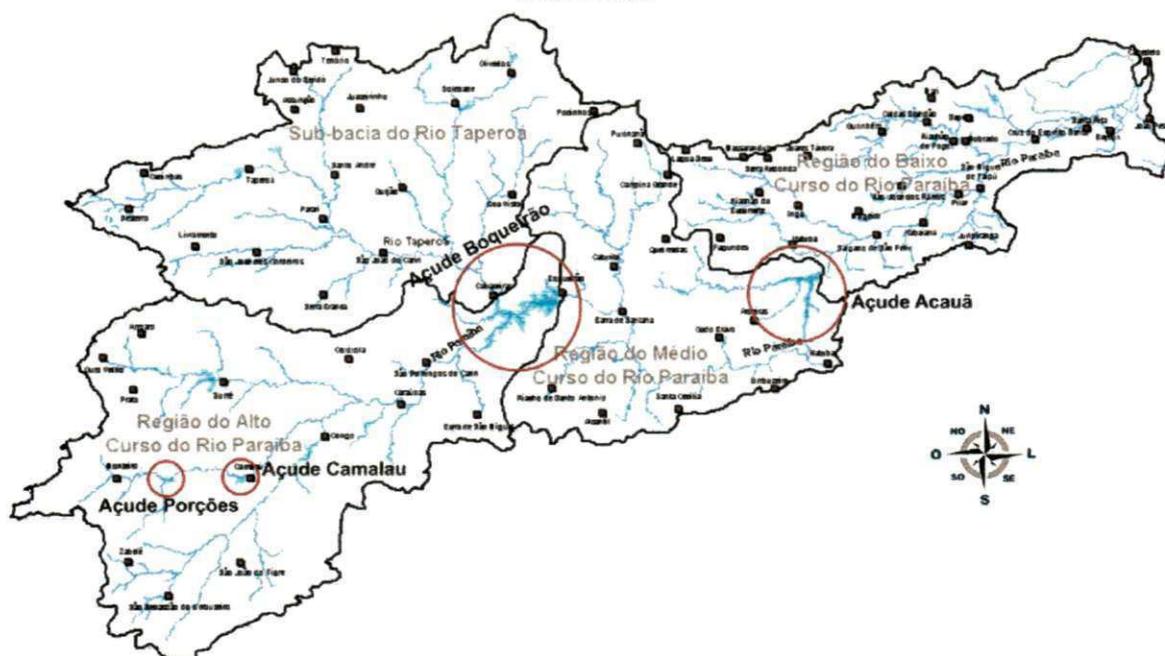
4.4. RESERVATÓRIOS ESTUDADOS

Os reservatórios utilizados para realização desta pesquisa serão os que estão previstos para receber a água do PISF do seu eixo leste. São eles:

- Poções (região do alto Paraíba);
- Camalaú (região do alto Paraíba);
- Epitácio Pessoa, conhecido como Boqueirão (região do alto Paraíba);
- Argemiro de Figueiredo, conhecido como Acauã (região do médio Paraíba).

A Figura 11 mostra, a seguir, as sub-bacias do rio Paraíba e, em destaque, os reservatórios que foram otimizados no estudo.

Figura 11. Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, em destaque à localização dos reservatórios estudados



Fonte: ARAGÃO, 2008

Através do Plano Estadual de Recursos Hídricos (AESAs apud FARIAS, 2009), algumas características podem ser descritas, resumidamente, para um melhor entendimento do sistema estudado, como pode ser observado nos subitens a seguir.

4.4.1. RESERVATÓRIO POÇÕES

O açude Poções (Figura 12) está situado no município de Monteiro, a uma latitude $7^{\circ}55'S$ e a uma longitude $37^{\circ}12'W$, possuindo capacidade máxima de aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos. Foi projetado com a finalidade de irrigação e abastecimento da cidade de Monteiro.

Figura 12. Reservatório Poções



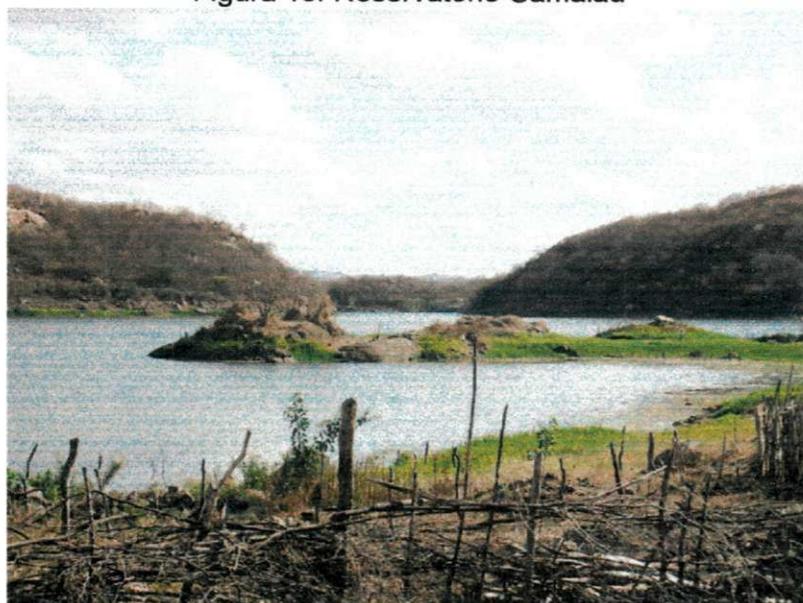
Fonte: Própria.

4.4.2. RESERVATÓRIO CAMALAUÍ

O reservatório Camalaú (Figura 13) está situado no alto curso do Rio Paraíba, localizado no município de Camalaú, sendo ele responsável, atualmente, pelo abastecimento da cidade. Tem uma capacidade de acumulação de aproximadamente 46 Hm^3 , e suas águas são utilizadas também para irrigação,

piscicultura extensiva e atividades de lazer e turismo. Segundo Vieira (2008), a piscicultura beneficia 21 pescadores e tem instalado 60 tanques-rede (o limite máximo é de 178).

Figura 13. Reservatório Camalaú



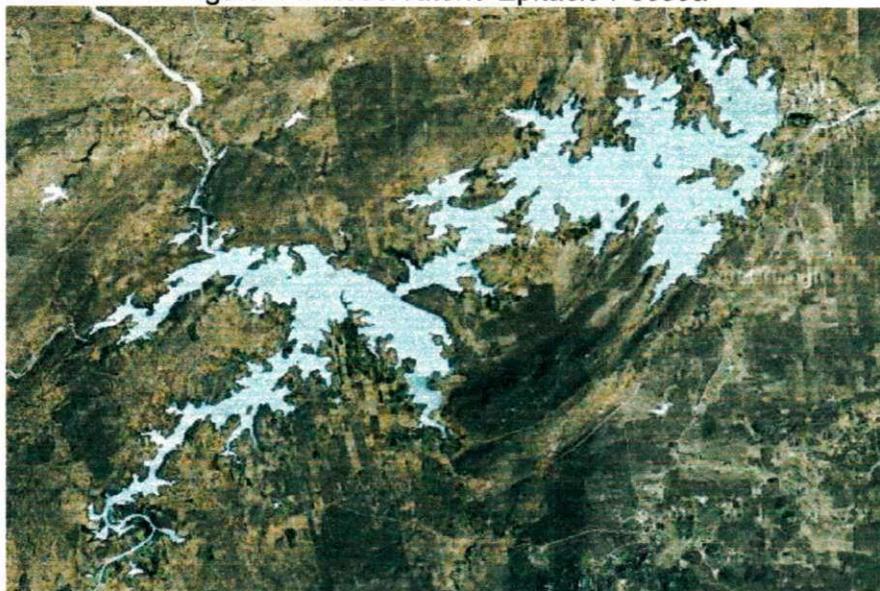
Fonte: Própria.

4.4.3. RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA (BOQUEIRÃO)

O açude Boqueirão (Figura 14) construído em quatro anos pelo DNOCS (Departamento de Obras Contra a Seca), está localizado nos municípios de Boqueirão, Barra de São Miguel e Cabaceiras, geograficamente situado no centro de uma região cercada por uma cordilheira fragmentada, a 420 m de altitude. Apresenta uma grande importância socioeconômica na região, principalmente pela cidade de Campina Grande, distante 45 km e abastecida pelo açude, que também abastece outras localidades no comportamento da Borborema.

Sua capacidade de armazenamento inicial era de 536 milhões de m³, mas sua capacidade de acumulação vem diminuindo ao longo do tempo devido ao assoreamento de sua bacia hidráulica. Hoje seu volume é aproximadamente de 411 milhões de m³ (PARAÍBA, 2006). A bacia de contribuição tem uma área de 12.410 km² e a sua respectiva área inundada é de aproximadamente 39,623 km².

Figura 14. Reservatório Epitácio Pessoa



Fonte: Google Maps.

O reservatório Epiácio Pessoa tem dois sistemas adutores que atende 27 municípios: o sistema adutor de Boqueirão, com 60 km de extensão, e o sistema adutor do Cariri, com 160 km de extensão. Além do abastecimento urbano, atividade presente até hoje, o açude, originalmente, tinha seu uso previsto para perenização do rio Paraíba, geração de energia elétrica, irrigação e piscicultura, além de favorecer atividades de lazer e turismo. As únicas atividades extras implantadas foram piscicultura e o turismo, em pequena escala, e também irrigação, nas margens do açude, que não foram considerados no projeto.

Porém, durante uma estiagem prolongada, de 1997-1999, foi necessário realizar racionamento da distribuição de água, iniciado no segundo semestre de 1998, que durou até os primeiros meses de 2000, além de suspender a prática de irrigação através de medida judicial que gerou conflitos.

A partir de 2004, devido às chuvas muito acima da média, no mês de janeiro, o açude verteu e as atividades de irrigação foram reestabelecidas. A última vez que a água no reservatório verteu foi no ano de 1989, voltando a ocorrer em 2005, 2006, 2008, 2009 e 2011.

4.4.4. AÇUDE ARGEMIRO DE FIGUEIREDO (ACAUÃ)

O reservatório Acauã (Figura 15) está localizado no município de Natuba, é o único açude deste estudo que se encontra na região do Médio Curso do rio Paraíba. Ativo desde 2002, quando concluiu sua construção, tem capacidade máxima de 253 milhões de m³, tornando-se o terceiro maior reservatório do Estado. Sua finalidade é o abastecimento urbano das cidades de sua abrangência, tendo três sistemas adutores: Acauã – ramal norte, leste e oeste; a prática de piscicultura intensiva com cerca de 15 tanques-redes, em média, colocadas de forma permanente; 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 15. Reservatório Acauã.



Fonte: SANTOS, 2012

4.5. MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVO

Várias metodologias de otimização aplicadas na análise de sistemas de reservatório podem ser mostradas na revisão bibliográfica deste trabalho. Diversos fatores influenciam na escolha da metodologia a ser adotada, como: a configuração do sistema, os tipos de uso dos recursos hídricos, o estágio de aplicação (diagnóstico e planejamento) e os cenários. Destacam-se, pois, diversas metodologias que podem gerar resultados de qualidade idêntica, o próprio autor da pesquisa faz a escolha baseada na experiência e/ou nos seus objetivos.

O modelo de otimização multiobjetivo utilizado neste estudo é baseado também em programação linear e foi desenvolvido por Santos (2011), utilizando o Toolbox Optimization do software MATLAB 6.5 com o Método do Ponto Interior para a busca da solução ótima. Para tanto, linearizações apropriadas das não linearidades intrínsecas aos processos de cada um de seus componentes tiveram que ser pesquisadas e implementadas através do uso combinado do Artificio de Linearização por Segmentos (Lanna, 1998) e da Programação Linear Sequencial (Barbosa, 2002).

Neste trabalho, o modelo de otimização tem como objetivo principal prover um estudo da operação integrada do sistema de reservatórios e do atendimento às demandas do sistema com foco na alocação ótima dos recursos hídricos, entre os múltiplos usos via uma análise multiobjetivo.

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

A operação do reservatório e dos nós é fundamentada na equação do balanço hídrico destes elementos naturais, mesmo quando se faz uso de demandas fixas e variáveis. A demanda hídrica de um perímetro irrigado é determinada com base na necessidade suplementar líquida de irrigação, estabelecida através do

balanço hídrico, no solo, para as culturas selecionadas, estando a área a ser plantada limitada pelos demais usos do reservatório. O modelo também leva em consideração os diferentes tipos de sistemas de irrigação e suas necessidades de altura manométrica, as áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura, os custos de água e de produção, os aspectos econômicos e a combinação ou variação nas fontes de bombeamento e a quantidade de água captada (SANTOS, 2007).

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

4.5.1. FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo especificada permite a medida do desempenho do modelo e está sujeita às inúmeras restrições, representadas por equações de natureza linear e não linear que traduzem as limitações físicas dos reservatórios, perímetros irrigados e equipamentos hidráulicos, limitações hidrológicas, legais, econômicas e sociais, inerentes aos sistemas de usos múltiplos. Nesta pesquisa, o modelo representa por equações o seguinte:

- Demandas nas tomadas de água (*DTDQ*): permitem a captação de água nos reservatórios do sistema para atender determinados requerimentos de consumo.
- Vazão efluente nos reservatórios (*VER*): permite a regularização da vazão nos cursos d'água à jusante dos mesmos.
- Volume meta do reservatório (*VMR*): destina-se 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. Um critério operacional atribuído aos reservatórios é que o volume final no último ano seja igual ou maior ao volume inicial do reservatório em estudo.

Receita líquida da agricultura irrigada (*RL*): entendida como o resultado da diferença entre a renda bruta total auferida com a venda da safra agrícola e os respectivos custos de produção envolvidos, gerada pela escolha apropriada das áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura prevista nos

perímetros irrigados. Para tanto, leva-se em consideração os dados disponibilizados pelo Banco do Nordeste S/A (2006) que são: a renda bruta, obtida com a venda da produção agrícola, os custos de produção anual, o custo da água para irrigação e o custo de bombeamento da água. A função objetivo do modelo maximiza a receita líquida sujeita às restrições de disponibilidade de água, área a ser irrigada, capacidade de bombeamento.

- Mão de obra da agricultura irrigada (*MO*): oriunda da atividade agrícola nas unidades de produção ou nos perímetros irrigados é outra função objetivo sujeito às mesmas restrições agronômicas.

4.5.2. FUNÇÃO MULTIOBJETIVO

Como dito anteriormente, o modelo permite efetuar uma análise multiobjetivo através do Método das Ponderações, sendo cada função objetivo normalizada (SANTOS, 2011). Logo, a função objetivo do modelo é dada pela Equação 1.

$$\min fo = \omega_1 * DTDQ + \omega_2 * VER + \omega_3 * VMR - \omega_4 * RL - \omega_5 * MO \quad (1)$$

Onde:

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

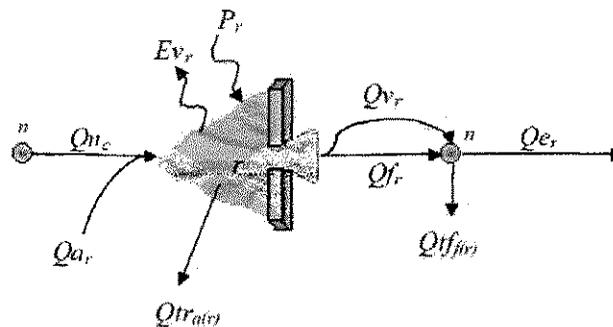
4.5.3. EQUAÇÕES DE RESTRIÇÕES

As equações de restrições estão relacionadas à operação dos reservatórios e aos critérios operacionais e agronômicos.

Operação dos reservatórios

Os reservatórios podem ser conectados a outros elementos do sistema, a montante, a um nó do sistema onde recebe vazões afluentes, e a jusante, o descarregador de fundo, vertedouros e tomadas de água, através de nós (Figura 16). A vazão em cada um destes elementos depende de seus parâmetros hidráulicos e do nível de água dos reservatórios.

Figura 16. Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.



Fonte: Santos, 2012.

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

$$VR_r(t) = VR_r(t-1) + Qa_r(t) - \sum_{\alpha(r)} Qtr_{\alpha(r)}(t) - Qf_r(t) - Qv_r(t) + P_r(t) - Ev_r(t) + Qn_c(t) \quad (2)$$

Onde:

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

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

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

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

$Qa_r(t)$ – vazão afluente ao reservatório r durante o mês t ,
 $a(r)$ – índice que representa a a -ésima tomada d'água do reservatório r ,
 $f(r)$ – índice que representa a f -ésima tomada d'água de fundo do reservatório r ,
 $Qtr_{a(r)}(t)$ – a -ésima vazão de tomada d'água do reservatório r no mês t ,
 $Qtf_{f(r)}(t)$ – f -ésima vazão de tomada d'água de fundo do reservatório r no mês t ,
 $Qf_r(t)$ – vazão de descarga de fundo do reservatório r durante o mês t ,
 $Qv_r(t)$ – volume vertido do reservatório r durante o mês t ,
 $P_r(t)$ – volume precipitado no reservatório r durante o mês t ,
 $Ev_r(t)$ – volume evaporado no reservatório r durante o mês t ,
 $Qn_c(t)$ – vazão de entrada no reservatório r oriundo de contribuições da c -ésima calha (trecho) do rio à montante do reservatório r no mês t .

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

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

Crítérios Operacionais e Agronômicos

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

Outros Componentes do Sistema

Dentre os componentes do sistema hídrico estão as calhas dos rios, cujas vazões podem estar limitadas por valores inferiores, indicando requerimentos de

regularizações e de vazões ecológicas para saneamento do rio, ou superiores, para o controle de cheias, que podem ser descritas matematicamente por:

$$Q_{nmin_c}(t) \leq Q_{n_c}(t) \leq Q_{nmax_c}(t) \quad (3)$$

Onde,

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

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

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

De acordo com Aragão (2008), as perdas em trânsito entre o açude Poções, seguindo pelo rio Paraíba, até o reservatório Boqueirão são de aproximadamente 14%, e entre o reservatório Boqueirão e Acauã as perdas são de cerca de 22%.

4.5.4. PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA

O modelo utiliza um procedimento iterativo do uso da PL, denominado Programação Linear Sequencial (ou Sucessiva). Os trechos segmentados do volume do reservatório ($Vr_{mr(t)}$) são ajustados em cada iteração de modo a resultarem em um volume de água armazenado de forma correta (SANTOS, 2007).

Logo, na primeira otimização ($l = 1$), os valores de cada trecho segmentado podem estar corretos, indicando assim a solução ótima do problema. Porém, quando isso não ocorre, para uma boa aceitação dos resultados, além da verificação dos valores dos trechos segmentados, são analisados os valores calculados para a função objetivo f_o , sendo avaliado através do erro relativo ($erro_{f_o}$), dado por:

$$erro_{f_o} = \left| \frac{f_{o_l} - f_{o_{l-1}}}{f_{o_l}} \right| \leq tol \quad (4)$$

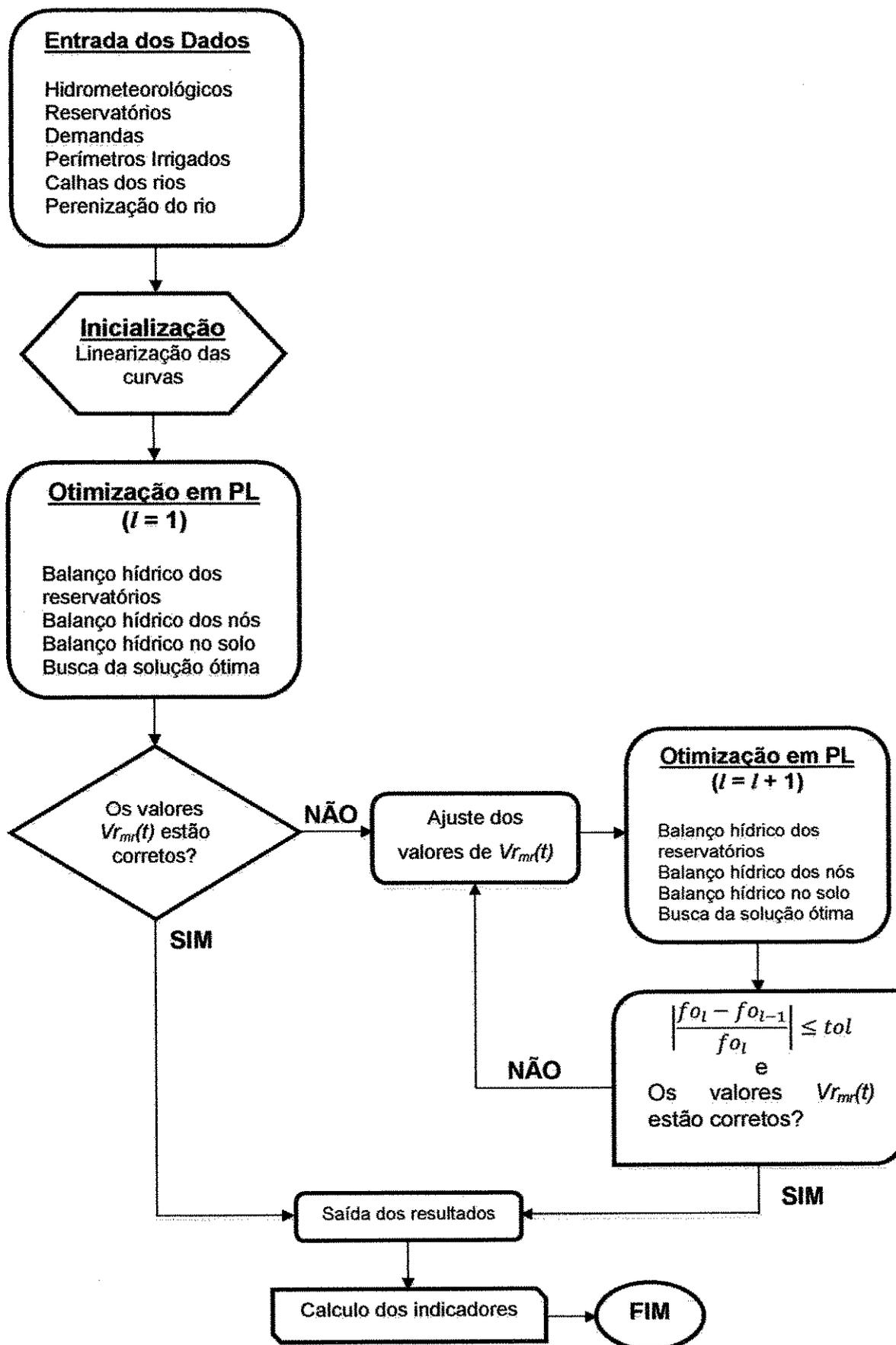
Onde:

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

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

O fluxograma geral do modelo está apresentado na Figura 17. É importante ressaltar que as saídas do modelo, que possibilitam extensivas análises de desempenho do sistema hídrico em estudo, são os valores mensais para volumes, cotas e áreas de espelho d'água, vazões mensais de afluxos, de descargas e de sangria por reservatório; vazões mensais nas tomadas d'água e nas calhas do rio; vazões mensais para irrigação por perímetro, áreas irrigadas e mão de obra alocadas por cultura e por perímetro, além da receita líquida anual auferida por cultura em cada perímetro.

Figura 17. Fluxograma do modelo de otimização



4.6. INDICADORES DO SISTEMA

Indicadores são medidas da condição, processos, reação ou comportamento que fornecem confiável resumo de sistemas complexos, nos quais apresentam as seguintes funções: resumir, sintetizar, agregar e simplificar as informações relativas a um problema, servindo de parâmetro comparativo entre várias hipóteses, ações, condições ou tendências. Se forem conhecidas as relações entre os indicadores e o padrão de respostas dos sistemas, pode permitir a previsão de futuras condições (DPIE, 1995; e FARIAS, 2009). Este trabalho utiliza indicadores em seus resultados para expressar a relação das demandas hídricas e os diversos cenários da Transposição do Rio São Francisco no Eixo Leste do projeto, situada na Bacia do Rio Paraíba.

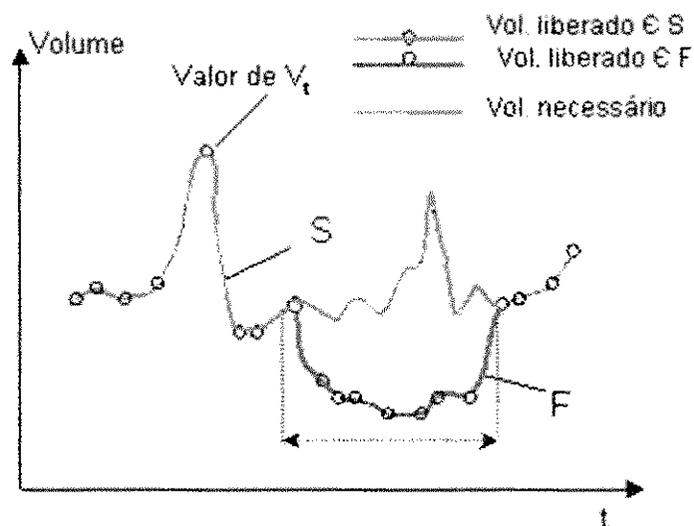
4.6.1. INDICADORES DE DESEMPENHO

Em sistemas de recursos hídricos com reservatórios, é possível que ocorra falhas no atendimento das demandas, e é inevitável a ocorrência de falhas nos períodos prolongados de estiagem. As falhas de cada sistema podem ser caracterizadas através de três indicadores de desempenho, estabelecido por Hashimoto et. al. (1982). São eles: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

Logo, é possível o analista prever, através desses indicadores cenários futuros, podendo identificar "riscos" de operação e planejamento com o reservatório (CELESTE, 2006). A seguir, será discutido cada um dos indicadores de desempenho proposto por Hashimoto et. al. (1982).

Na Figura 18, temos a situação do funcionamento de um reservatório, em que V_t são os possíveis valores do volume liberado do reservatório no tempo t , podendo estar contido em dois conjuntos: S , o conjunto de todos os valores satisfatórios, ou seja, quando o volume liberado do reservatório é igual ao volume necessário para atender à demanda e F , o conjunto de todos os valores insatisfatórios, que ocorre quando o volume liberado é menor do que o volume necessário para atender à demanda. De tal modo, tem-se a seguinte ilustração:

Figura 18. Exemplo fictício de descarga em reservatório



Fonte: CELESTE, 2006

Confiabilidade

A confiabilidade (*conf*) é a probabilidade de todas as demandas serem atendidas sem falha, ou seja, é a porcentagem de tempo em que todas as demandas foram atendidas.

$$conf = \text{prob}\{V_t \in S\} = \frac{N_s}{N} \quad (5)$$

Onde:

N_s é o número de sucessos no período de tempo simulado N .

Resiliência ou Elasticidade

A resiliência (*res*) serve para avaliar a média de quão rapidamente o sistema retorna de um estado de falha para um estado satisfatório de atendimento à demanda. A resiliência do reservatório é a probabilidade de ocorrer um estado satisfatório no período $t+1$ dado um valor insatisfatório no período t .

$$res = \text{Prob}\{V_{t+1} \in S / V_t \in F\} \quad (6)$$

Ou, res = número de vezes que o reservatório sai de uma falha dividido pelo número total de falhas.

Em alguns casos, é preferível um sistema que tenha muitas falhas, mas que se recupere rapidamente, do que outro que tenha poucas falhas e que se recupere lentamente.

Vulnerabilidade

A vulnerabilidade (vul) indica quão severa é a magnitude das falhas que o sistema está sujeito, caso ela tenha ocorrido. Ela pode ser definida como a média do percentual de déficits hídricos de todos os valores do conjunto F (CELESTE, 2006). Matematicamente, temos:

$$vul = \frac{1}{nf} \sum_t \left| \frac{V_t - V_d}{V_d} \right| \quad (7)$$

Onde:

nf é o número de eventos de falha e V_d é a demanda necessária no tempo t .

Sustentabilidade

Loucks (2000), ainda propôs um índice de sustentabilidade geral ($Sust$) definido por:

$$sust = conf * res * (1 - vul) \quad (8)$$

Déficit máximo ($def_{m\acute{a}x}$)

A análise do déficit máximo representa o valor mínimo de atendimento de uma demanda hídrica nos reservatórios estudados.

$$def_{m\acute{a}x} = \frac{V_{inicial} - V_{final}}{V_{inicial}} \quad (9)$$

4.6.2. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

A potencialidade hídrica de uma bacia hidrográfica é o volume total que pode se encontrar disponível, seja superficial ou subterrâneo, obtida pela soma dos afluxos mais a precipitação direta. Com a intervenção do homem para extração dos recursos hídricos para suas atividades, parte da água é explorada e se torna disponível para suas atividades, criando uma disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica. Logo, essa disponibilidade hídrica não depende apenas de fatores naturais, mas de variações como localidade, quantidade, qualidade, nível tecnológico, tipo de uso, aspectos econômicos e ambientais.

Indicadores de sustentabilidade foram criados, portanto, para estabelecer a relação entre potencialidade e disponibilidade hídrica, que serão discutidas a seguir e foram utilizadas neste trabalho para analisar todos os cenários, observando seu desempenho no sistema de acordo com esses indicadores.

Indicadores de ativação da potencialidade – IAP

Definido como a razão entre a disponibilidade e a potencialidade, logo:

$$IAP = \frac{\text{Disponibilidade}}{\text{Potencialidade}} \quad (10)$$

Vieira (1996) escreve que esse índice deve se sempre inferior a 0,8, embora este valor, mesmo nas bacias mais exploradas, do ponto de vista dos recursos hídricos, como a do Rio Jaguaribe (IAP = 0,5) no Ceará, esteja bastante inferior a 0,8. Bacias hidrográficas com um IAP inferior a 0,6 apresentam possibilidades de aumento da disponibilidade no seu espaço geográfico. Bacias hidrográficas com um IAP superior a 0,6 e nas quais as demandas apresentam-se reprimidas por insuficiência de disponibilidade podem ser supridas através de aportes advindos de transposições de água a partir de outras bacias.

Indicadores de utilização da disponibilidade – IUD

O IUD é definido como a razão entre a demanda e a disponibilidade. Os valores de IUD superiores à unidade constituem uma preocupação em termos de alocação da água, pois nos anos menos favorecidos em termos de pluviometria, a pressão por disponibilidades para usos consuntivos, advinda de interesses econômicos e políticos, será certamente geradora de conflitos de uso.

$$IUD = \frac{\text{Demanda}}{\text{Disponibilidade}} \quad (11)$$

Indicadores de utilização da potencialidade – IUP

A razão entre demanda e potencialidade é obtida também com o produto de IAP e IUD.

$$IUP = \frac{\text{Demanda}}{\text{Potencialidade}} = \frac{IAP}{IUD} \quad (12)$$

Para os indicadores associados aos reservatórios a potencialidade é obtida pela soma dos afluxos mais a precipitação direta; a disponibilidade é igual à soma dos afluxos mais o volume de água presente no reservatório e a precipitação direta menos a evaporação e vertimentos, e as demandas são os usos consuntivos (tomadas d'água para abastecimento humano e irrigação) (BARBOSA, 2008).

Considerando o sistema integrado de reservatórios, todos os afluxos que entram no sistema mais as precipitações diretas sobre reservatórios é a potencialidade. A disponibilidade é a potencialidade menos perdas em trânsito, evaporações nos reservatórios e vazões no leito do rio a jusante do sistema. As demandas são todos os usos consuntivos (abastecimento humano e irrigação).

4.6.3. ÍNDICES DE EFICIÊNCIA ASSOCIADO AOS RESERVATÓRIOS

Os índices de eficiências associados aos reservatórios são utilizados para comparar cenários de demanda hídrica sob diferentes formas de transporte d'água. Através deles, visa-se determinar quais cenários obtiveram menores perdas no sistema, sejam elas por vertimento, por evaporação ou, em trânsito, por infiltração, e ainda avaliar os rendimentos hídricos de cada cenário.

A seguir são apresentados alguns indicadores de eficiência associados à operação de reservatórios propostos por Curi e Curi (2004). Tais indicadores são baseados na equação do balanço hídrico do mesmo.

η_{Vr} – Relação entre a variabilidade volumétrica do reservatório e o volume afluente anual, isto é, a vazão afluente anual e a precipitação no reservatório. Esse índice demonstra a variabilidade inter ou intra-anual do volume do reservatório.

$$\eta_{Vr} = \frac{(Vr_{final} - Vr_{inicial})}{\sum Q_{at} + \sum P_t} \quad (13)$$

Onde:

$Vr_{inicial}$ e Vr_{final} são os volumes iniciais e finais dos reservatórios respectivamente. Q_{at} e P_t são respectivamente os volumes mensais afluentes e precipitado no reservatório.

Na expressão se os valores resultarem em negativos, indica depleção do reservatório (e.g.: anos de seca) e valores positivos, o acúmulo, isto é, ganho de água no reservatório.

η_E – Relação entre a evaporação anual (E_t) (superfície líquida da Represa) e a vazão afluente anual:

$$\eta_E = \frac{\sum E_t}{\sum Q_{at} + \sum P_t} \quad (14)$$

O valor dessa relação estabelece a eficiência quanto a armazenagem da água, podendo indicar que o reservatório tenha baixa profundidade e grande área do espelho líquido. Esse índice geralmente é usado para estabelecer quão rápida a água tenha que ser usada para minorar as perdas evaporativas. Quando encontrados altos valores, podem indicar que os reservatórios são incapazes de prover regularização interanual, no Nordeste, os índices são de 5% até valores próximos de 30%.

η_p – Relação entre a precipitação direta sobre a bacia hidráulica do reservatório (superfície do reservatório) e a volume de contribuição anual:

$$\eta_p = \frac{\sum P_t}{(\sum Q_{at} + \sum P_t)} \quad (15)$$

Esse índice pode indicar que o reservatório tenha baixa profundidade e grande área do espelho líquido. Logo, podemos concluir que altos valores desse índice indicam que a bacia de contribuição é pequena.

η_v – Relação entre o volume vertimento anual (Q_{vt}) (sangria do reservatório) e a vazão afluente anual:

$$\eta_v = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{vt}}{(\sum Q_{at} + \sum P_t)} \quad (16)$$

Onde: N é o número total de períodos e i é o índice de tempo.

Essa relação estabelece a eficiência quanto à capacidade volumétrica da represa e armazenagem da água, indicando o quanto o reservatório desperdiça da água afluente. Os altos valores desse índice podem indicar que os reservatórios são para geração de energia em rios perenes ou são represas pequenas, incapazes de prover regularização interanual. Na região Nordeste, esses índices apresentam valores baixos.

η_e – Relação entre a água usada anual (descarregadores, tomadas d'água) e a vazão afluente anual (RENDIMENTO HÍDRICO):

$$\eta_e = \frac{\sum Q_{et}}{(\sum Q_{at} + \sum P_t)}$$

Essa relação representa a eficiência quanto ao uso da água. Quando tem valores altos indica que existem poucos desperdícios, enquanto índices com valores médios na faixa de 25% são típicos da região Nordeste.

Uma relação entre todos os índices citados pode criar diversos cenários, como os de demanda e hidroclimáticos. No primeiro tipo de cenário pode associar uma ou várias demandas com parâmetros (e.g.: evaporação) e compará-los. Nos cenários hidroclimáticos (seco, médio e chuvoso) é possível avaliar a eficiência de várias atividades relacionadas à represa (e.g.: controle de cheias, e prevenção de secas). Essa relação pode ser expressa por:

$$\eta_{VR} + \eta_E + \eta_V + \eta_e - \eta_P = 100\% \quad (18)$$

4.6.4. INDICADORES DE DESEMPENHO DAS ÁREAS IRRIGADAS

Os indicadores de desempenho das áreas irrigadas usados nesta pesquisa foram desenvolvidos por Levine (1982) e podem ser encontrados no trabalho de Celeste (2006). São eles:

FRA – Fornecimento Relativo de Água

Este indicador relaciona o suprimento total de água, ou seja, volume fornecido através da irrigação (V_f) mais precipitação efetiva (P_e) dividido pela demanda hídrica das culturas (ETP). Ele determina o percentual de água disponível utilizada para atender a necessidade da cultura;

$$FRA = \frac{(V_f + P_e)}{ETP} \quad (19)$$

Onde:

V_f é o volume fornecido na área irrigada (m^3);

P_e é a precipitação efetiva (m^3);

ETP é a evapotranspiração potencial das culturas (m^3).

FRI – Fornecimento Relativo à Irrigação

É o volume fornecido através da irrigação (V_f) dividida pela demanda hídrica das culturas (ETP) subtraídas da precipitação efetiva (P_e). Indica qual percentual de água gasta para atender a necessidade líquida de água na cultura.

$$FRI = \frac{V_f}{(ETP - P_e)} \quad (20)$$

RGC – Razão Global de Consumo

Este indicador está intimamente relacionado com o manejo da água e com o nível tecnológico da infraestrutura de irrigação do projeto (eficiência na aplicação da água). O volume de água fornecido ao projeto é determinado como uma função do uso consuntivo das culturas. Em outras palavras, a água fornecida poderia, adequadamente, alcançar as necessidades das culturas no projeto. Como a precipitação pode suprir as necessidades da cultura, em parte ou completamente, é preciso descontá-la da ETP (evapotranspiração), fornecendo, assim, uma estimativa mais realista do requerimento de água na área irrigada (Brito et al., 1998). A razão global (projeto) de consumo quantifica a fração da irrigação evapotranspirada pelas culturas no balanço hídrico da área irrigada, definida como:

$$RGC = \frac{ETP - P_e}{V_f} \quad (21)$$

FMA – Fornecimento Médio de Água

Segundo Brito et al. (1998) apud Celeste (2006), a definição em termos de volume por hectare, dá uma indicação sobre a quantidade de água que está sendo utilizada para produzir um hectare de área cultivada. A partir da década de 1970, Svendsen e Vermillion (1994) apud Celeste (2006) observaram que o fornecimento médio de água nas tomadas das parcelas diminuiu consideravelmente no Projeto da Bacia Columbia. Essa observação coincide com o período de maior expansão da área sob irrigação por aspersão.

Portanto, essa diminuição pode estar relacionada com a mudança para uma tecnologia de aplicação de água mais eficiente, ou seja, do sistema de irrigação por superfície para sistemas de aspersão;

$$FMA = \frac{V_f}{\text{Área Irrigada}} \quad (22)$$

CUI – Capacidade de Uso das Instalações

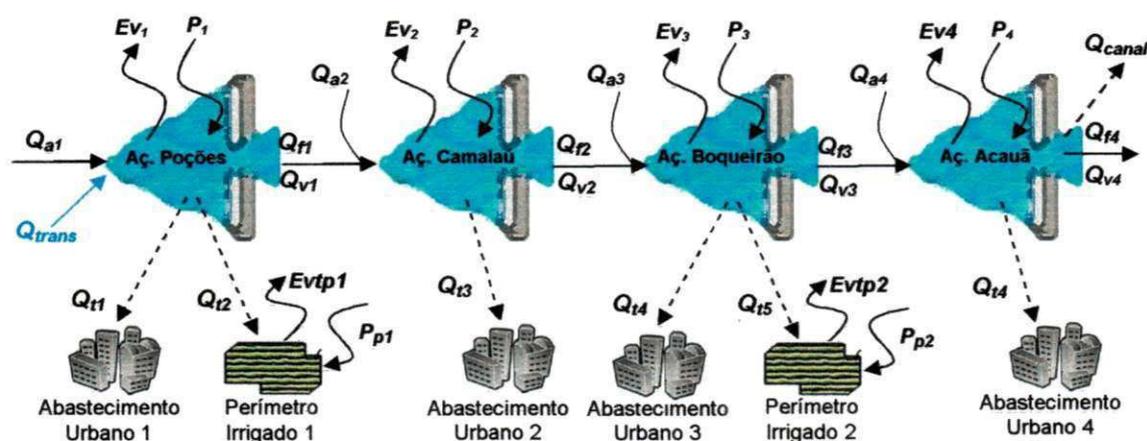
Este índice relaciona o percentual de área irrigada pela área do perímetro.

$$CUI = \frac{\text{Área Irrigada}}{\text{Área total do perímetro}} \quad (23)$$

5. DADOS DO SISTEMA

As demandas hídricas consideradas na área de estudo dizem respeito ao abastecimento urbano de 101 cidades através de adutoras nos reservatórios, e irrigação de uma área de 1376 hectares nas margens dos reservatórios Poções e Epitácio Pessoa, além da perenização do rio Paraíba. No esquema abaixo (Figura 19), é possível representar o sistema e suas demandas, destacando os quatro reservatórios estudados.

Figura 19. Diagrama representando os componentes dos reservatórios



— Trecho do rio

----- Adutora



Reservatório

onde: Q_{trans} = vazão de transposição; Q_a = vazão afluente ao reservatório; Q_t = vazão de tomada d'água; Q_{canal} = vazão demandada para o canal de integração Acauã-Araçagi; E_v = volume evaporado no reservatório; P = volume precipitado no reservatório; Q_f = vazão por descarga de fundo; Q_v = vazão vertida; P_p = precipitação no perímetro irrigado; E_{vtp} = evapotranspiração no perímetro irrigado.

5.1. DEMANDAS

5.1.1. ABASTECIMENTO URBANO

Para determinar a vazão máxima das adutoras para o abastecimento urbano, foi necessário fazer alguns estudos como a previsão de população e a estimativa de consumo. Neste trabalho, o horizonte de projeto é de 10 anos, e a estimativa da população foi calculada com base nos dados dos censos de 1996, 2000, 2007 e 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Os valores da população das cidades para o horizonte de estudo encontram-se no Anexo 9, sendo utilizado um software, LAB Fit (SILVA et. al., 2004), para tratamento de dados experimentais para estimar esses valores.

A estimativa de consumo per capita acrescida das perdas no sistema de abastecimento foi feita utilizando os critérios adotados pela CAGEPA, que considera essas perdas na ordem de 40%. A Tabela 6 mostra os critérios de estimativa de consumo *per capita* em função da população do município, valendo salientar que, quanto maior a população do município, maior o consumo unitário. No Anexo 8 encontra-se a demanda da população para cada cidade beneficiada pelo sistema.

Tabela 6. Critérios de estimativa de consumo adotados pela CAGEPA

Nº de habitantes (P)	Consumo l/(hab.dia)	
	Per capita	Per capita +40% de perdas
P ≤ 50.000	120,00	168,00
50.000 > P ≥ 150.000	150,00	210,00
P > 150.000	200,00	280,00

5.1.2. DEMANDAS DE IRRIGAÇÃO

As demandas hídricas de irrigação foram estabelecidas realizando um plano de cultivo das culturas agrícolas cultivadas nos município de Monteiro e Boqueirão, cujas informações foram obtidas através da Associação de Agricultores de cada localidade. Também foram considerados estudos realizados de viabilidade na

aptidão agrícola de cada cultura em cada região, e os sistemas de irrigação já implantados.

As culturas agrícolas previstas para serem cultivadas na safra e entressafra são: tomate, pimentão, feijão, repolho, alface, cebola, milho, mamão, banana, limão, goiaba e coco. Os planos de cultivo e seus respectivos coeficientes de cultivo (kc) (SANTOS, 2012) para os dois perímetros irrigados são mostrados nas Tabelas 7 e 8. Para as culturas perenes os valores são os da fase de produção.

Tabela 7. Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc) no perímetro irrigado próximo ao reservatório Poções

Culturas	Meses do ano hidrológico											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Feijão		0,70	1,10	0,90				0,70	1,10	0,90		
Tomate / Tomate Ind.		0,50	0,75	1,15	0,80			0,50	0,75	1,15	0,80	
Pimentão		0,30	0,40	1,10	0,30			0,30	0,40	1,10	0,30	
Milho		0,30	1,20	0,50				0,30	1,20	0,50		
Perenes												
Banana	0,70	0,70	0,70	0,90	0,90	0,90	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Coco	0,60	0,60	0,60	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

Tabela 8. Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc) no perímetro irrigado próximo ao reservatório Boqueirão

Culturas	Meses do ano hidrológico											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Tomate		0,50	0,75	1,15	0,80			0,50	0,75	1,15	0,80	
Pimentão		0,30	0,40	1,10	0,30			0,30	0,40	1,10	0,30	
Feijão		0,70	1,10	0,90				0,70	1,10	0,90		
Repolho		0,40	0,60	0,33				0,40	0,60	0,33		
Alface		0,25	0,35	0,20				0,25	0,35	0,20		
Cebola		0,20	0,45	0,20	0,10			0,20	0,45	0,20	0,10	
Perenes												
Banana	0,70	0,70	0,70	0,90	0,90	0,90	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Goiaba	0,45	0,45	0,45	0,70	0,70	0,70	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70	0,70
Mamão	0,40	0,40	0,40	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90
Limão	0,65	0,65	0,65	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65

Na Tabela 9 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 do 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 para o ano de 2011.

Tabela 9. Dados característicos das culturas

Culturas	Prod (kg/ha/ano)	Prc (R\$/kg)	Cprod (R\$/ha/ano)	Hdc (diárias/ha/ano)	Sistema de Irrigação
SAZONAIS					
Tomate (s)	45000	1,49	13040	367	Gotejamento
Pimentão (s)	15000	1,07	7564	192	Gotejamento
Feijão (s)	1800	4,20	2679.61	61	Sulco
Repolho (s)	25000	0.70	5407.41	142	Gotejamento
Alface (s)	27750	0.63	6946.52	196	Sulco
Cebola (s)	15000	1.23	6519	211	Gotejamento
Milho (s)	8000	0,39	1772.5	55	Sulco
Tomate (es)	45000	1,79	13040	367	Gotejamento
Milho (es)	8000	0,59	1772.5	55	Sulco
Pimentão (es)	15000	1,28	7564	192	Gotejamento
Feijão (es)	1800	5.04	2679.61	61	Sulco
Repolho (es)	25000	0.84	5407.41	142	Gotejamento
Alface (es)	27750	0.76	6946.52	196	Sulco
Cebola (es)	15000	1.48	6519	211	Gotejamento
PERENES					
Mamão	15000	1.05	6033.02	164	Microaspersão
Banana	40000	0.91	5669	160	Microaspersão
Limão	30000	0.56	4711.02	88	Microaspersão
Goiaba	18000	1.12	4276	95	Microaspersão
Coco	4000	1.09	4037	76	Microaspersão

Legenda: (s) safra; (es) entressafra

Os dados referentes ao sistema de irrigação (Tabela 10), sua eficiência de distribuição (E_{sis}) e requerimento de pressão (H) estão de acordo com Doorenbos e Kassam (2000) e Gomes (1999). A eficiência de aplicação (E_{ap}) segue a disposta na Resolução nº 687 da Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2004).

Tabela 10. Dados do sistema de irrigação aplicado para as culturas agrícolas

Sistema de Irrigação	E_{sis}	E_{ap}	H(mca)
Microaspersão	0,90	0,85	15
Gotejamento	0,90	0,90	10
Sulco	0,90	0,50	0

5.1.3. PRECIPITAÇÃO

Os dados de precipitação foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas através do site <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Os postos pluviométricos utilizados na aquisição dos dados de precipitação direta nos reservatórios e da precipitação efetiva nos perímetros irrigados estão na Tabela 11. Os perímetros irrigados considerados estão nas proximidades dos reservatórios Poções e Boqueirão, logo os valores do volume precipitado são do mesmo posto.

Tabela 11. Postos pluviométricos utilizados

Reservatório	Código do Posto
Poções	737014
Camalaú	736021
Boqueirão	736023
Acauã	735029

A média mensal dos valores da precipitação nos postos pluviométricos pode ser observada na Tabela 12.

Tabela 12. Precipitação média mensal dos reservatórios

Reservatório	Precipitação média mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	52,8	90,7	147,2	121,1	54,8	35,3	30,7	22,4	3,6	8,7	3,3	17,5
Camalaú	69,7	68,9	129,8	131,5	84,2	50,8	43,8	24,4	12,7	13,2	19,3	24,4
Boqueirão	30,0	37,0	66,6	90,0	38,3	50,3	60,8	23,9	8,0	1,7	4,7	19,0
Acauã	52,6	63,5	91,4	114,3	79,6	131,6	141,4	57,7	25,8	14,0	12,7	15,0

5.1.4. EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Os valores de evaporação nos reservatórios foram disponibilizados pela AESA (apud FARIAS, 2009). A evapotranspiração potencial das culturas agrícolas é obtida pela multiplicação da lâmina de evaporação pelo coeficiente de cultivo da

cultura agrícola. Os dados de evaporação média mensal de cada reservatório podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13. Dados de evaporação média mensal dos reservatórios

Reservatório	Evaporação média mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273
Camalaú	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273
Boqueirão	192	155	195	163	178	130	109	143	166	237	212	228
Acauã	147	132	108	88	102	65	73	105	126	154	151	165

5.1.5. VAZÕES AFLUENTES

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios do sistema são valores simulados, com extensão de 59 anos (1933 a 1991), e foram fornecidos pela AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. A série escolhida para o estudo tem um período de 10 anos, e seus valores estão apresentados no Anexo 5.

A média mensal dos valores da vazão afluente nos reservatórios do sistema pode ser observada na Tabela 14.

Tabela 14. Média mensal dos valores da vazão afluente nos reservatórios do sistema

Reservatório	Vazão média mensal (m ³ /s)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	0,52	0,60	2,90	4,71	4,34	2,30	0,81	0,13	0,04	0,03	0,00	0,03
Camalaú	0,24	0,44	1,16	1,96	2,54	1,44	0,45	0,05	0,03	0,01	0,03	0,19
Boqueirão	0,87	0,77	2,78	13,01	13,56	2,63	1,75	0,18	0,02	0,03	0,00	0,32
Acauã	1,05	0,67	0,75	3,32	4,06	3,84	8,58	6,63	0,38	0,00	0,00	0,02

5.1.6. DADOS ESTRUTURAIS DOS RESERVATÓRIOS ESTUDADOS

Os dados de curvas cota x área x volume dos reservatórios em estudo foram disponibilizados pela AESA (apud FARIAS, 2009), e podem ser encontrados nos Anexos de 1 a 4. A Tabela 15 dispõe a capacidade máxima de armazenamento

(volume máximo), o volume mínimo dos reservatórios, e o volume morto – considerado como sendo 11% da capacidade de armazenamento.

Tabela 15. Dados dos reservatórios estudados

Reservatório	Volume (hm ³)			Classificação (C)*
	Máximo	Morto	Mínimo	
Poções	29,86	2,65	0,58	Médio
Camalaú	46,44	4,50	1,59	Médio
Boqueirão	411,68	45,93	28,24	Grande
Acauã	253,14	27,50	2,03	Grande

*Classificação por capacidade máxima (C) dos Açudes segundo o Decreto Estadual 19.258/97; Micro: $C < 0,5 \text{ hm}^3$; Pequeno: $0,5 \text{ hm}^3 < C < 7,5 \text{ hm}^3$; Médio: $7,5 \text{ hm}^3 < C < 75,0 \text{ hm}^3$; Grande: $C > 75,0 \text{ hm}^3$.

A Tabela 16 apresenta os dados do coeficiente de vazão de descarga de fundo (C_f), diâmetro da seção transversal (D_f), da cota de jusante da geratriz inferior (H_{fs}) e da cota de entrada (H_{fe}) do tubo de descarga de fundo de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 16. Características físicas do tubo de descarga de fundo dos reservatórios

Reservatório	C_f	D_f	H_{fs}	H_{fe}
Poções	0,60	0,50	39	39
Camalaú	0,60	0,50	317	317
Boqueirão	0,60	0,75	361	361
Acauã	0,60	2,00	108	108

5.1.7. CUSTOS PARA O ABASTECIMENTO URBANO

Os custos para realizar o abastecimento urbano das cidades beneficiadas pelo PISF, leva em conta não só os custos de implantação, mas também os custos de operação e manutenção. Neste estudo, iremos considerar que as adutoras já estão todas implementadas e que serão analisados apenas os custos de operação de adução da água. Diante disto, realizou-se um comparativo entre as alternativas propostas, analisando a melhor.

Logo, foi realizada uma estimativa de custo, utilizando para o cálculo da adução da água o valor gasto no consumo de energia de bombeamento, para um determinado intervalo de tempo, baseado na seguinte fórmula (GOMES, 2009):

$$C_{energia} = \frac{9,81 Q H}{\eta} N_b \rho \quad (23)$$

Onde:

Q = vazão requerida pelo projeto, em m^3/s ;

H = altura manométrica de bombeamento, em metros de coluna de água, obtida pela cota de cada cidade que o sistema adutor atinge;

N_b = número de horas de bombeamento, em um determinado intervalo de tempo, em horas;

ρ = custo unitário da energia, em R\$/kWh;

η = rendimento global do conjunto elevatório, em decimais, resultante do produto entre o rendimento do motor e o da bomba.

Os custos foram estimados de forma simplificada, não sendo custos reais do projeto de adução, pois são desconsideradas as perdas totais do sistema adutor. Os valores considerados para o custo unitário foi de R\$ 0,12/kWh, com um funcionamento de 20h por dia e rendimento de 75%. As vazões requeridas pelo projeto considerou cada proposta estudada e considerou a vazão total de projeto.

Já a altura manométrica utilizada para o cálculo da estimativa de custo com o bombeamento de água para o abastecimento urbano, levou em consideração a altitude das cidades que se encontram no traçado dos Eixos Central, Serra de Teixeira, Seridó e Brejo. Na tabela 17 são relacionados os Eixos proposto pelo projeto da AESA com o comprimento dos eixos, a quantidade de municípios beneficiados por cada eixo e as altitudes das cidades.

Tabela 17. Comprimento dos eixos, quantidade de municípios beneficiados, vazão total e altitudes das cidades no traçado.

Eixos	Comprimento (km)	Municípios Beneficiados	Altitude dos Municípios (m)						
			A	B	C	D	E	F	G
Central	199,7	77	599	532	493	657	713	631	593
			A	B	H	I	J	K	L
Serra de Teixeira	155,1	7	599	532	527	532	591	815	763
			G	M	N				
Brejo	85,8	12	593	457	439				
			G	O	P	Q			
Seridó	29,2	20	593	467	533	623			

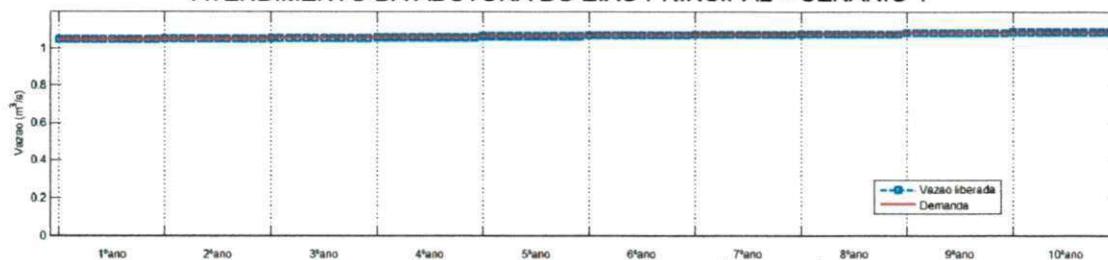
Legenda: A – Monteiro; B – Sumé; C – Boa Vista; D – Puxinanã; E – Montadas; F – Esperança; G – Remígio; H – São José dos Cordeiros; I – Taperoá; J – Desterro; K – Maturéia; L – Imaculada; M – Barra de Santa Rosa; N – Picuí; O – Arara; P – Serraria Borborema; Q – Solânea.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

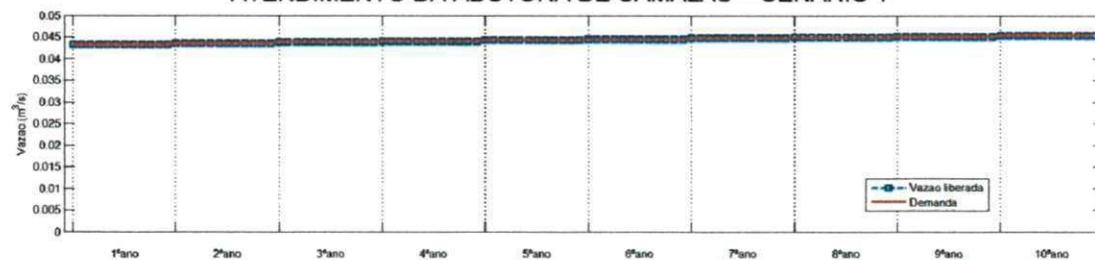
6.1. CENÁRIO I

O atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano através de adutoras que saem dos reservatórios é ilustrado na Figura 20. Observa-se que as demandas de abastecimento urbano foram atendidas sem apresentar falhas ao longo dos 10 anos de operação mensal (2013 – 2022).

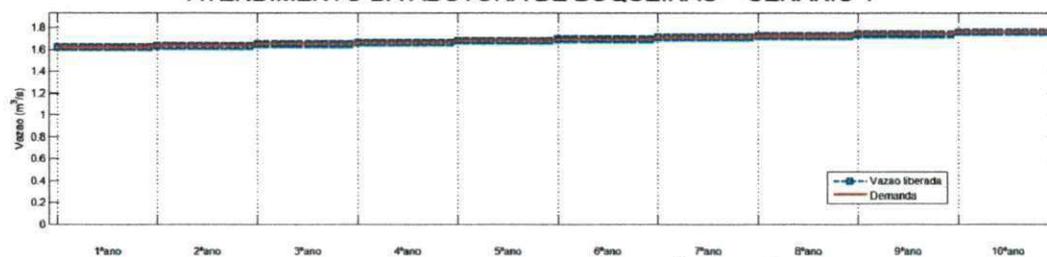
Figura 20. Atendimento das demandas de abastecimento urbano no cenário 1
ATENDIMENTO DA ADUTORA DO EIXO PRINCIPAL – CENÁRIO 1



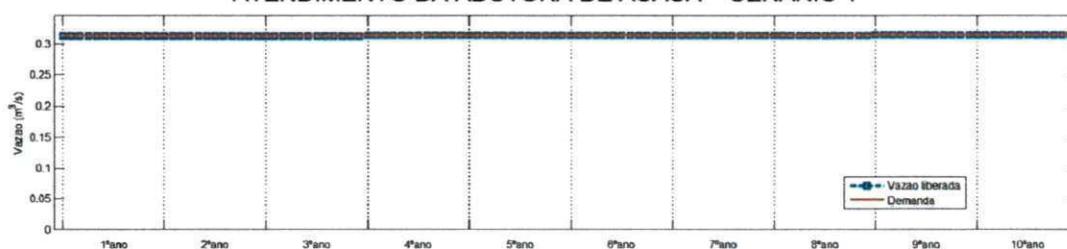
ATENDIMENTO DA ADUTORA DE CAMALAÚ – CENÁRIO 1



ATENDIMENTO DA ADUTORA DE BOQUEIRÃO – CENÁRIO 1

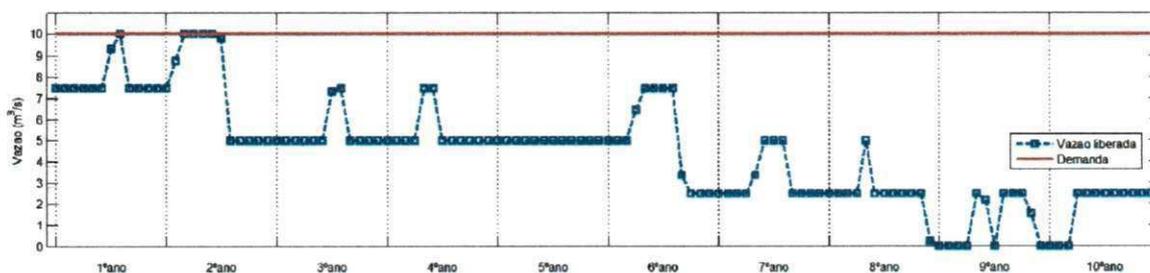


ATENDIMENTO DA ADUTORA DE ACAUÃ – CENÁRIO 1



A demanda estimada do Canal de Integração Acauã-Araçagi, ilustrada na Figura 21, mostra que o atendimento da vazão máxima, $10 \text{ m}^3/\text{s}$, do canal só foi possível em cinco meses dos dois primeiros anos.

Figura 21. Atendimento ao canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 1



Os índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão do canal de integração, para garantir uma vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 17), indicam que a confiabilidade de atendimento da demanda é de 4,2% com uma probabilidade de 2,6% para recuperar-se de uma falha, equivalente a um tempo de aproximadamente 4 meses. Caso ocorra uma falha, o índice de vulnerabilidade indica que a magnitude esperada da falha é de 56,5% do valor demandado para o canal. Também apresenta uma insustentabilidade hídrica na sua vazão, visto que há um declínio na vazão desde o início do estudo, chegando a ser nula nos últimos anos.

Tabela 18. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi

<i>conf</i>	<i>res</i>	<i>vul</i>	<i>def_{max}</i>	<i>sust</i>
0,042	0,026	0,565	1,000	0,0005

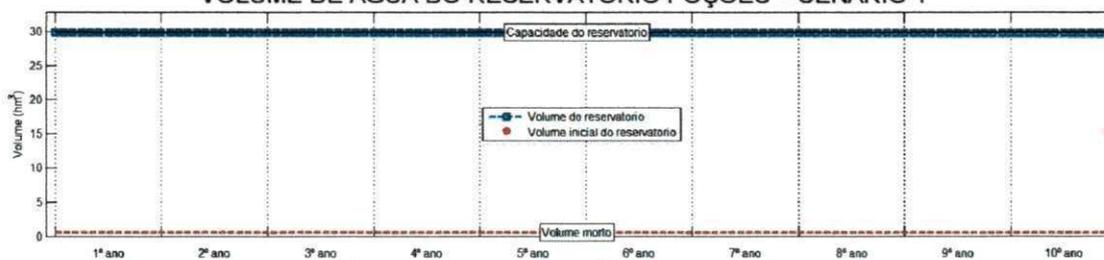
Na Figura 22 são apresentados os volumes mensais dos reservatórios no cenário 1. Observa-se que o volume de água nos reservatórios Poções e Camalaú permanecem sempre com seu volume máximo. Apenas no começo do primeiro ano que o reservatório de Camalaú não iniciou em seu volume máximo, devido sua condição inicial que provocou um acúmulo de água nos três primeiros meses até atingir o volume máximo.

Contudo, os volumes mensais do reservatório Boqueirão apresentam comportamento característico, que diminuem entre agosto a janeiro (meses com menores vazões afluentes), aumentando na estação chuvosa (entre abril a maio).

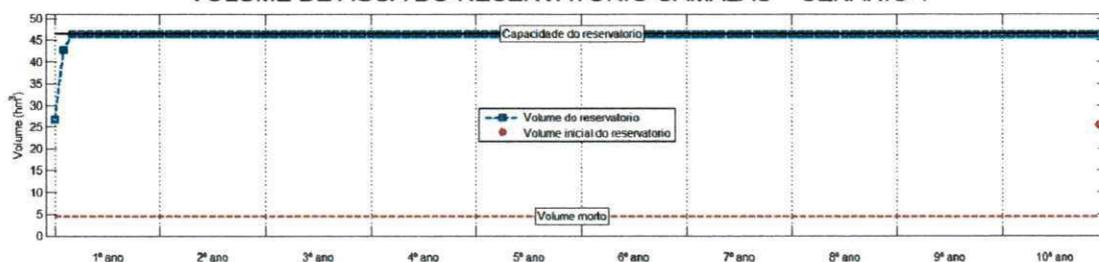
Os volumes mensais do reservatório Acauã apresentam comportamento similar ao do reservatório Boqueirão nos primeiros 6 anos, em seguida os volumes mensais do reservatório apresentam valores acima de 90% das suas capacidades.

No período estudado o volume médio anual dos dois últimos reservatórios permaneceu acima de 57% das suas capacidades, o menor volume estimado no açude Boqueirão foi de 244 hm³ (cerca de 59% da capacidade de acumulação do reservatório) e 145 hm³ no açude Acauã (cerca de 56% da capacidade de acumulação do reservatório). Isso se deve à vazão exógena do Rio São Francisco que garantiu uma vazão afluyente no trecho a montante do reservatório Boqueirão, mesmo com suas perdas em trânsito. Outro fator que contribuiu para manter esses volumes foi garantir que no final do último ano o volume nos reservatórios seja maior ou igual ao volume inicial dos mesmos.

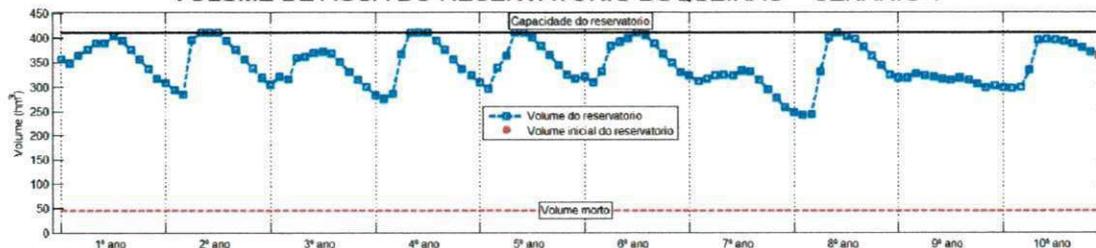
Figura 22. Volume dos reservatórios
VOLUME DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO POÇÕES – CENÁRIO 1



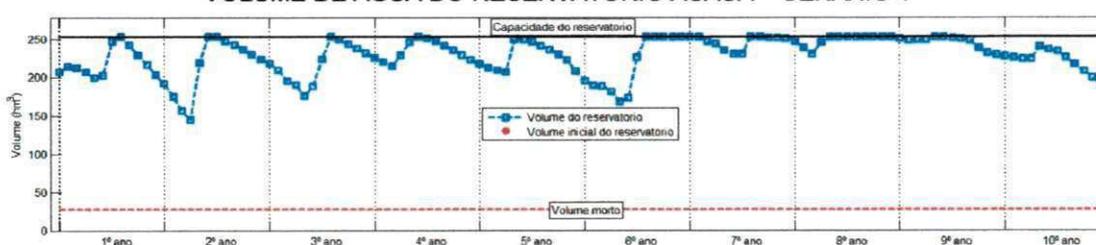
VOLUME DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO CAMALAU – CENÁRIO 1



VOLUME DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO BOQUEIRÃO – CENÁRIO 1

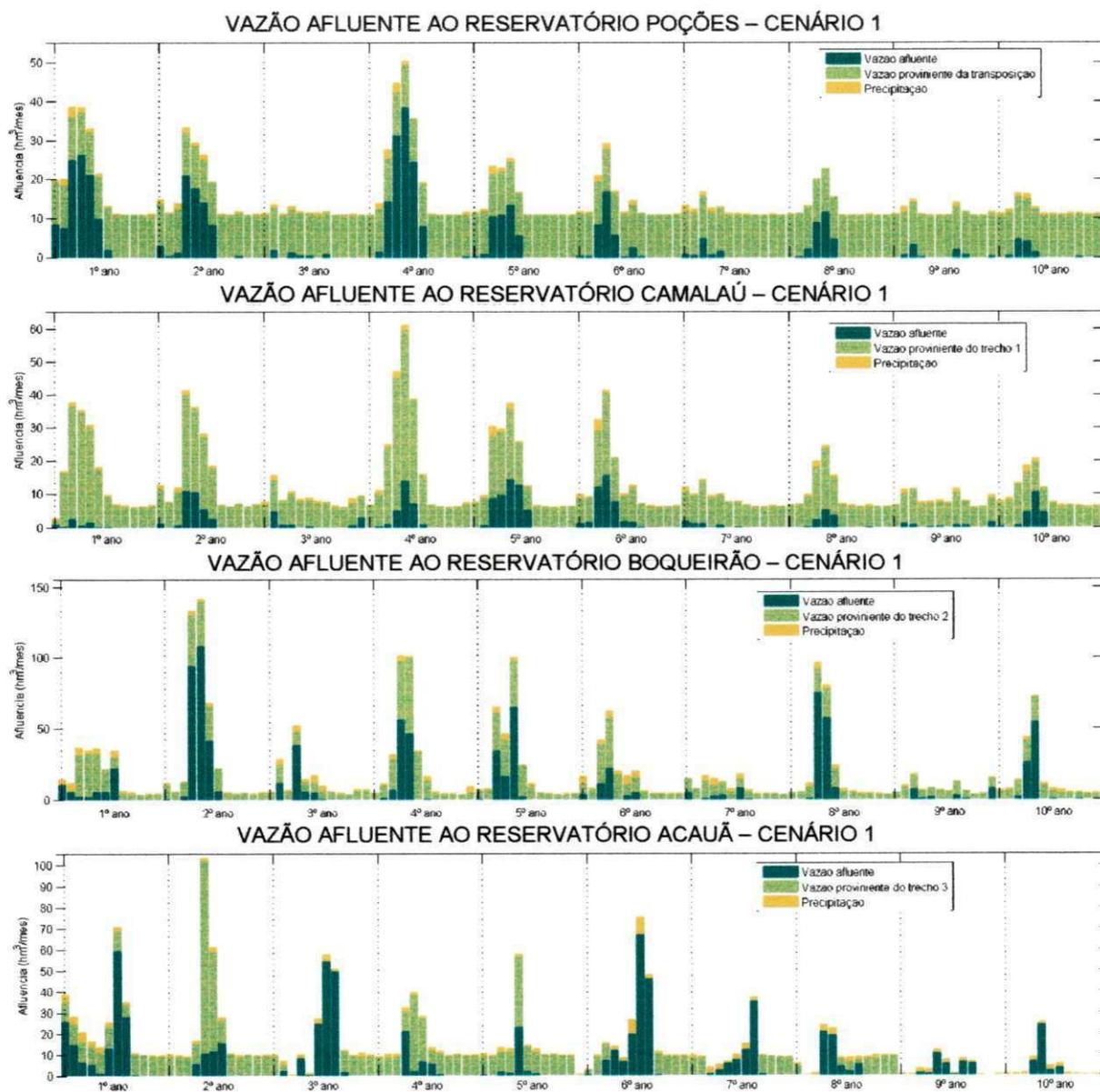


VOLUME DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO ACAUÃ – CENÁRIO 1



Contudo, observa-se que nos reservatórios de Boqueirão e Acauã os picos na elevação dos volumes todos os anos apenas são possíveis pelas afluições aos reservatórios e, em períodos de estiagem, os reservatórios mantêm seu volume acima de 50% por causa dessas contribuições. A variação da afluição a montante dos reservatórios pode ser vista na Figura 23, que mostra as vazões afluentes, e a precipitação nos reservatórios.

Figura 23. Afluição aos reservatórios no Cenário 1



A precipitação direta nos reservatórios apresenta uma contribuição média de 5,1% em toda afluência nos quatro reservatórios, tendo menor influência no reservatório Poções, cerca de 2,5% (0,15 m³/s), e maior influência no reservatório Acauã, com aproximadamente 7,5% (0,40 m³/s) de contribuição.

A maior contribuição volumétrica proveniente da vazão exógena é no açude Poções com 4,20 m³/s, pois é o primeiro açude que receberá as águas da transposição na bacia do Rio Paraíba. Com relação à contribuição proveniente dos trechos para os demais reservatórios, a maior percentagem foi no açude de Camalaú, com aproximadamente 81,9% (4,0 m³/s), pois o percurso do trecho 1 é o menor entre todos e a contribuição da vazão afluente a montante do reservatório Camalaú gera uma vazão média mensal de 0,71 m³/s, que representa aproximadamente 14,9% de toda a contribuição da afluência do reservatório. Portanto, a vazão proveniente do trecho 1 (Figura 19) derivada da vazão exógena do rio São Francisco torna-se o maior contribuinte do volume no açude Camalaú.

Na Tabela 18 encontram-se os valores dos volumes evaporados médios mensais dos reservatórios no cenário 1. Os maiores volumes evaporados ocorrem entre os meses de outubro a dezembro. Entre todos os reservatórios, Boqueirão apresentou o maior volume evaporado devido à maior área do espelho d'água. Nota-se que o volume evaporado nos reservatórios é superior ao volume precipitado dos mesmos, pois os períodos chuvosos são menores que os de estiagem.

Tabela 19. 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
Poções	1,38	1,10	0,94	0,80	0,83	0,90	1,05	1,31	1,41	1,61	1,65	1,69
Camalaú	1,39	1,10	0,96	0,82	0,84	0,92	1,07	1,33	1,43	1,64	1,68	1,72
Boqueirão	4,93	4,04	4,97	4,94	6,01	4,48	3,57	4,37	4,58	6,58	5,81	6,11
Acauã	1,84	1,68	1,32	1,22	1,50	0,96	1,05	1,46	1,62	2,03	2,00	2,15

A Tabela 19 apresenta alguns indicadores de sustentabilidade e índices de eficiência, associados aos reservatórios estudados e a seu comportamento no cenário 1. Os valores desses indicadores podem ser interpretados da seguinte forma:

- O indicador IAP mostra que os reservatórios Poções e Camalaú, apresentam potencial para ampliar suas demandas. O reservatório Boqueirão ainda pode ampliar suas demandas em aproximadamente 13%. Já no reservatório

Acauã, há uma limitação para o aumento nas demandas, visto que a vazão requerida pelo canal de integração sobrecarrega o reservatório. Contudo, para que seja possível a ampliação na demanda em qualquer reservatório é necessário realizar novo estudo para observar como influenciaria o sistema estudado;

- O IUD mostra que os reservatórios estão com boa alocação de água, mas é preciso uma maior atenção para o reservatório de Acauã, a fim de que as demandas que são exigidas não gerem futuros conflitos;
- O IUP indica que apenas as demandas no reservatório Acauã estão próximas ao limite da potencialidade do açude, não podendo ter grande crescimento nas demandas, mostrando que a construção do Canal Acauã-Araçagi com uma vazão prevista de 10 m³/s impõe ao sistema uma grande demanda, que poderá provocar conflitos, mesmo com as águas da transposição;
- Apenas os açudes Poções e Camalaú apresentam uma variabilidade interanual do seu volume, pois não iniciaram em seu volume máximo e permanecendo cheios após a transposição, e os outros reservatórios apresentaram comportamento característico na variação de seu volume em épocas de estiagem;
- A eficiência quanto ao armazenamento dos reservatórios é menor no açude de Boqueirão, pois apresenta um grande espelho de água, contribuindo para um maior volume evaporado. Logo, mesmo com a água sendo bem utilizada, principalmente devido a demanda do canal de integração, a água deve ser usada mais rapidamente no açude de Boqueirão, seguido de Acauã, Camalaú, e Poções, para evitar perdas por evaporação;
- É possível analisar que a influência da precipitação direta nos reservatórios vai aumentando na direção do açude Acauã, fato esse que é possível comprovar pela diminuição das vazões afluentes aos reservatórios;
- Os reservatórios Poções e Camalaú são reservatórios pequenos e ao receberem grandes vazões provenientes da transposição, além de suprir suas demandas ocorre liberação demasiada de água por vertimento e descarga de fundo perenizando os rios ajusantes, que são os rios Monteiro e Paraíba. Já os reservatórios Boqueirão e Acauã são incapazes de prover regularização interanual, pois os volumes demandados nos dois açudes são elevados e por

apresentarem uma capacidade de armazenamento maior dificulta a liberação de água por vertimento;

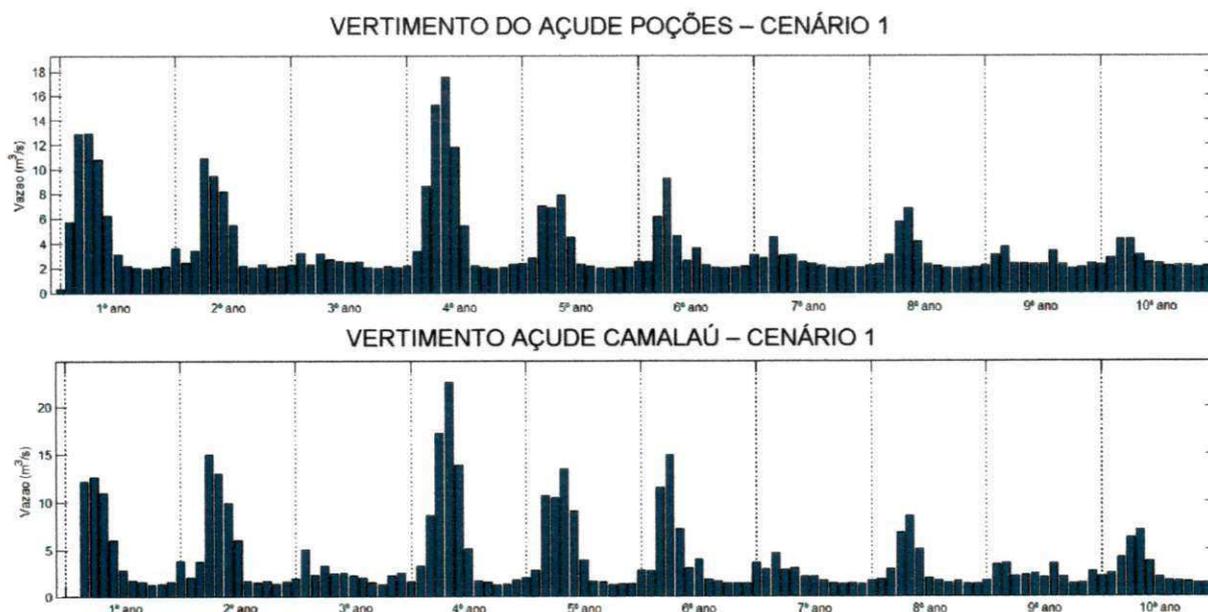
- O menor desperdício de água ocorre no reservatório Acauã, pois as demandas, principalmente para perenização do canal de integração, fazem com que seja aproveitado, consideravelmente, o volume de água. Já, nos reservatórios Poções e Camalaú o extravasamento de água é demasiado, visto que grande parte da água é vertida e não aproveitada nesses açudes.

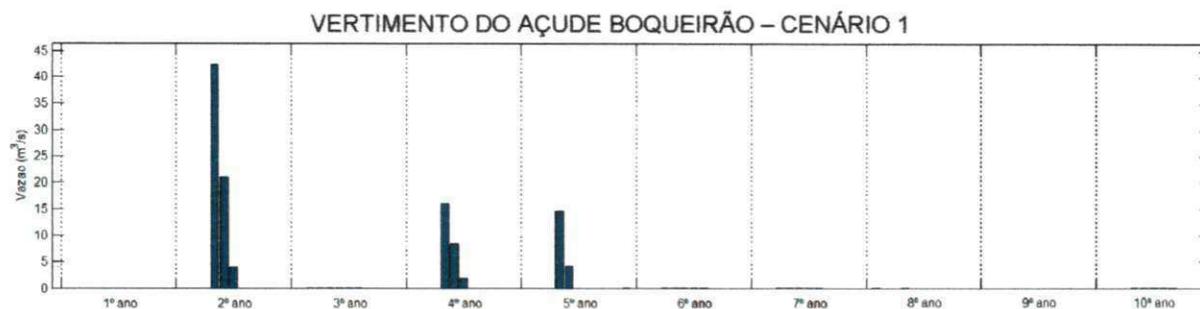
Tabela 20. Índices dos reservatórios

Reservatório	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_V	η_e
Poções	0,306	0,890	0,272	0,008	0,083	0,026	0,637	0,272
Camalaú	0,153	0,682	0,104	0,014	0,098	0,035	0,784	0,104
Boqueirão	0,671	0,900	0,604	0,000	0,267	0,067	0,129	0,604
Acauã	0,964	0,923	0,890	0,000	0,110	0,074	0,000	0,890

Os vertimentos dos reservatórios neste cenário (Figura 24) ocorrem durante todo o ano para os açudes Poções e Camalaú. Já no açude Boqueirão só ocorrem no 2º, 4º e 5º anos, principalmente nos meses de maio a julho, época que recebeu maior vazão afluyente ocasionada pelo início do período chuvoso. Contudo, não ocorreu vertimento no açude Acauã, devido à diminuição da vazão proveniente do trecho 3 e da vazão afluyente do reservatório, além de apresentar uma demanda que requer grande vazão.

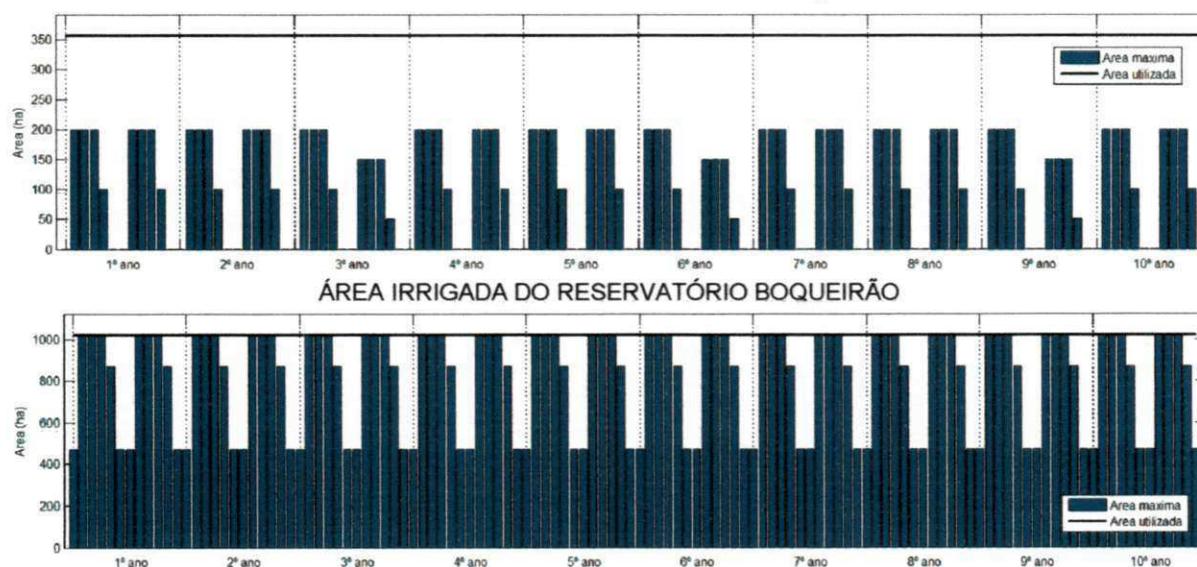
Figura 24. Vertimento dos reservatórios para o cenário 1





As áreas irrigadas mensais utilizadas nas áreas disponíveis para plantação no entorno dos dois reservatórios no cenário 1 pode ser observada na Figura 25. A média mensal da área irrigada utilizada próximo ao reservatório Poções corresponde aproximadamente 32,8% da área máxima disponível (116,7ha), atingindo valor máximo de 200 ha nos meses entre fevereiro e abril, na safra, e nos meses entre agosto e outubro, na entressafra. Já a média mensal da área irrigada próxima a Boqueirão é de aproximadamente 48,3% da área máxima (811,7ha), atingindo o valor máximo de 1020 ha no mesmo período do perímetro irrigado próximo ao reservatório Poções.

Figura 25. Áreas irrigadas no entorno dos reservatórios Poções e Boqueirão no cenário 1



A Figura 26 mostra que as vazões mensais destinadas ao suprimento hídrico da área irrigada é variável ao longo do tempo, um comportamento típico com os menores valores na estação chuvosa e maiores em época de estiagem. Sendo as vazões máximas mensais demandadas para a área irrigada próxima ao reservatório Poções de 0,16 m³/s e próximo a Boqueirão de 0,74 m³/s, e vazões médias mensais

de 0,13 m³/s no açude Poções e de 0,31 m³/s no reservatório Boqueirão nos 10 anos estudados. Também, é possível observar que em diversas vezes a vazão de irrigação para a área irrigada próximo ao reservatório Poções é zero, uma vez que é um período chuvoso ou não existiu alocação de culturas em determinado mês.

Figura 26. Vazões aduzidas para as áreas irrigadas no cenário 1



Nas Tabelas 20 e 21, 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 as áreas irrigadas no cenário 1.

Tabela 21. Valores médios anuais da área cultivada do açude Poções, receita líquida auferida, mão de obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1

Cultura	Área (ha/mês)	Receita Líquida (R\$/ano)	Mão de obra (diárias/ano)	Vazão (m ³ /ha/ano)
Tomate (s)	50	2.696.697,10	11850	277,6
Pimentão (s)	50	422.162,55	6650	155,9
Feijão (s)	50	243.548,96	2250	627,3
Milho (s)	50	65.021,76	2750	228,9
Tomate (es)	50	1.886.740,45	8295	944,9
Pimentão (es)	50	626.027,92	6650	975,9
Feijão (es)	50	5.545.306,06	2250	2737,9
Milho (es)	50	398.972,22	2750	1065,9
Banana	0	0,00	0	0,0
Coco	0	0,00	0	0,0
TOTAL		11.884.477,00	43445	

Legenda: (s) safra; (es) entressafra.

Tabela 22. Valores médios anuais da área cultivada do açude Boqueirão, receita líquida auferida, mão de obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1

Cultura	Área (ha/mês)	Receita Líquida (R\$/ano)	Mão de obra (diárias/ano)	Vazão (m ³ /ha/ano)
Tomate (s)	150	7.070.362,93	35550	617,6
Pimentão (s)	150	1.019.302,92	19950	312,5
Feijão (s)	0	0,00	0	0,0
Repolho (s)	100	1.028.882,67	10700	261,5
Alface (s)	50	439.206,88	8800	239,5
Cebola (s)	100	1.005.042,56	11900	129,8
Tomate (es)	150	10.083.211,18	35550	1053,1
Pimentão (es)	150	1.716.728,98	19950	697,5
Feijão (es)	0	0,00	0	0,0
Repolho (es)	100	1.549.462,40	10700	476,7
Alface (es)	50	706.798,24	8800	501,1
Cebola (es)	100	1.560.280,53	11900	285,3
Mamão	0	0,00	0	0,0
Banana	470	13.673.841,47	75200	1361,1
Limão	0	0,00	0	0,0
Goiaba	0	0,00	0	0,0
Coco	0	0,00	0	0,0
TOTAL		39.853.120,76	249000	

As maiores áreas irrigadas foram para as culturas sazonais no entorno dos dois açudes, sendo a área máxima plantada por mês para essas culturas de 200 ha no entorno do açude Poções e 550 ha no entorno de Boqueirão. Quanto ao consumo total de água para as demandas de abastecimento e irrigação do sistema estudado, as áreas irrigadas de Poções e Boqueirão consumiram aproximadamente 10,15% de toda a água, sendo dessa parcela 89,3% para a área irrigada de Boqueirão e 10,7% para área irrigada de Poções.

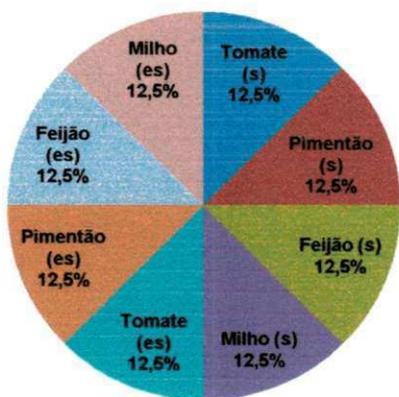
As culturas sazonais são responsáveis por toda receita oriunda de toda atividade agrícola no perímetro do açude Poções. Já no perímetro próximo ao reservatório Boqueirão 65,7% da receita líquida é oriunda das culturas sazonais.

Nas tabelas 20 e 21 observa-se que não foi possível o plantio de culturas perenes na área irrigada próximo ao reservatório Poções, pois, em outras simulações realizadas, as mesmas gerariam prejuízo.

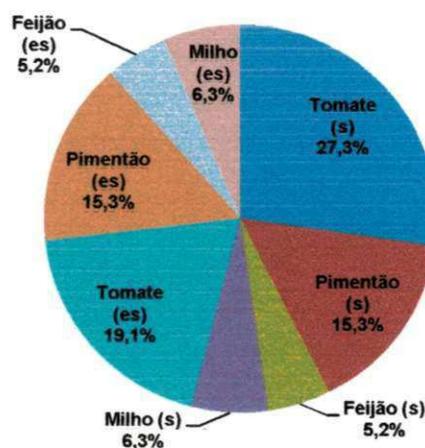
As Figuras 27 e 28 apresentam o percentual correspondente de cada cultura agrícola com relação a área utilizada para irrigação, a geração da receita líquida, a mão de obra e o consumo hídrico. As áreas irrigadas próximas ao açude de Poções apresentaram ser do mesmo tamanho, sendo a cultura de feijão da entressafra a que gerou maior receita líquida cerca de 46,7% do total arrecadado, e teve a menor quantidade de mão de obra juntamente com a cultura de feijão na safra. Entretanto, a cultura do feijão apresentou maior consumo hídrico 35,1% de toda vazão destinada à área irrigada. Esta dinâmica de alocação de áreas caracteriza seu aspecto multiobjetivo.

Figura 27. Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada do reservatório de Poções no cenário 1

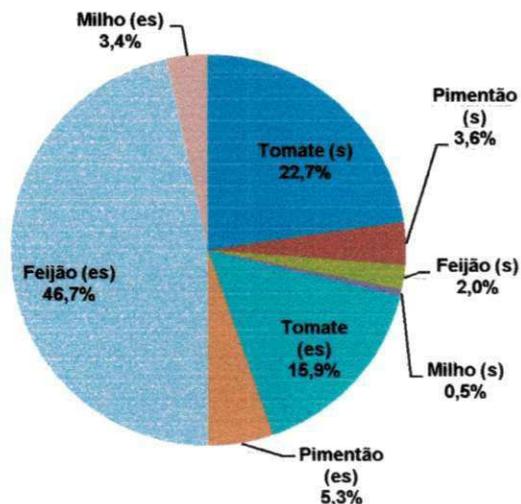
a) Área



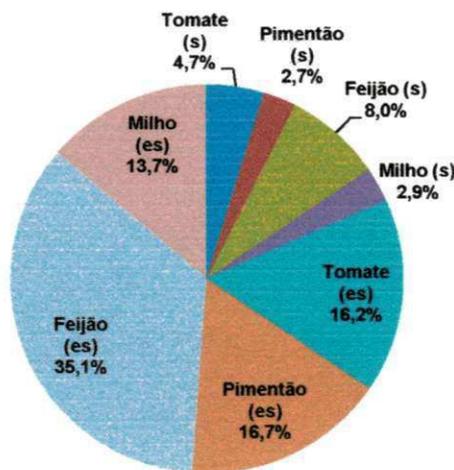
b) Mão de obra



c) Receita Líquida



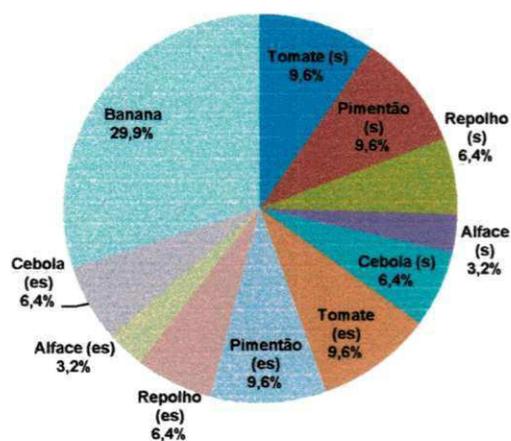
d) Consumo Hídrico



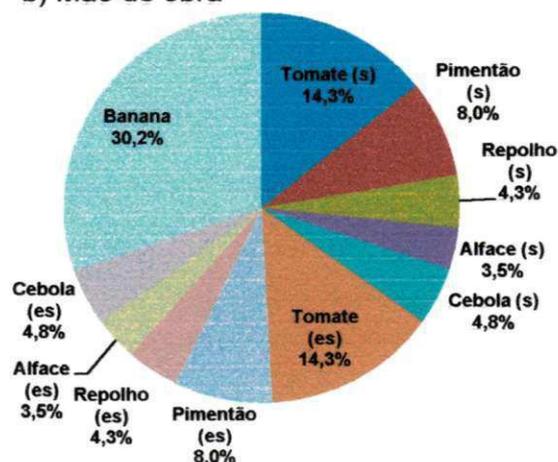
Na Figura 28 é possível analisar que a banana apresenta a maior área irrigada próximo ao reservatório Boqueirão ocupando 46,7% de toda a área, consome 78,5% de toda vazão demandada e emprega de 30,2% de toda mão de obra. Também, pode observar que a cultura com a segunda maior área irrigada no entorno dos dois reservatórios é a do tomate, seja na safra ou entressafra, pois foi considerado na otimização do sistema uma maior prioridade para a receita líquida e alocação da área máxima permitida.

Figura 28. Percentual da: a) área, b) receita líquida, c) mão de obra, d) consumo hídrico, de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada do reservatório de Boqueirão no cenário 1

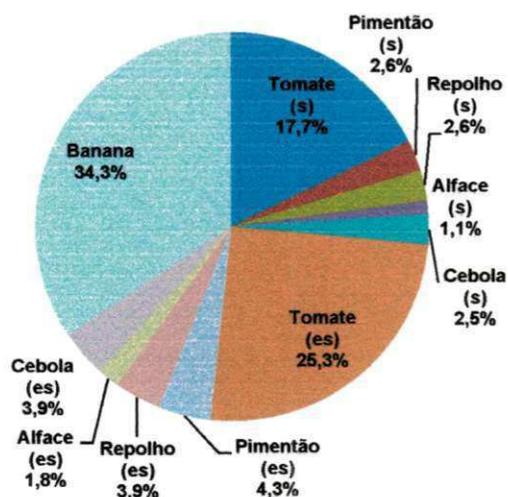
a) Área



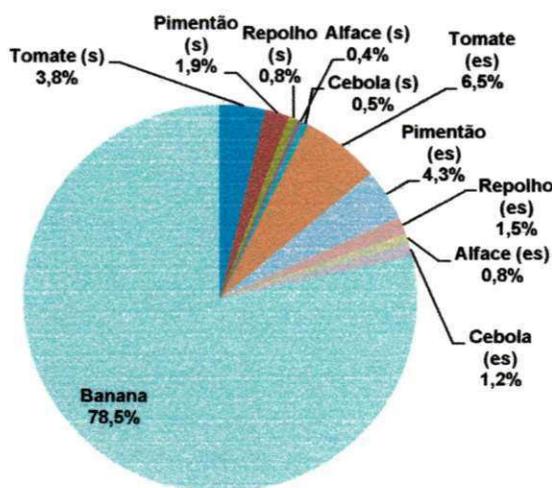
b) Mão de obra



d) Receita Líquida



d) Consumo Hídrico



Alguns indicadores de desempenho das áreas irrigadas nesse cenário estudado são apresentados na Tabela 22. Seus valores demonstram que as áreas irrigadas no entorno de Boqueirão apresentou uma eficiência melhor, mas não muito

relevante. Essa afirmação pode ser melhor interpretada através de uma análise de cada indicador a seguir:

- O Fornecimento Relativo de Água (FRA) indica que é necessária uma quantidade maior de água (vazão e precipitação) nas áreas irrigadas próximas ao reservatório de Boqueirão para atender a demanda hídrica da planta (ETp);
- O Fornecimento Relativo à Irrigação (FRI) indica que para atender a demanda hídrica suplementar das culturas é necessário um fornecimento de 54% a mais de água (vazão), no perímetro próximo ao açude Boqueirão, e um fornecimento 51% a mais, em Poções;
- A razão global (projeto) de consumo (RGC) indica que em Poções há um maior aproveitamento da água da irrigação para atender a necessidade líquida suplementar da planta. Contudo, há uma diferença pequena entre esta área irrigada e a do reservatório Boqueirão, embora as tecnologias sejam iguais para cada tipo de cultura.
- O Fornecimento Médio de Água (FMA) indica que está sendo usado mais água em Boqueirão para o plantio de 1 hectare, pois existe uma relação da variedade de culturas e a existência do cultivo de cultura perene no perímetro de Boqueirão ressalta essa diferença;
- A Capacidade de Uso das Instalações (CUI) indica que existiu um melhor aproveitamento na área irrigada do açude de Boqueirão, sendo aproveitado aproximadamente 80% da área disponível para plantio, significando um bom indicativo para a região semiárida. Contudo, a área irrigada do reservatório Poções pode apresentar um melhor aproveitamento se aumentar a área irrigada para as culturas sazonais e retirar as culturas perenes do planejamento de plantio.

Tabela 23. Indicadores de desempenho das áreas irrigadas

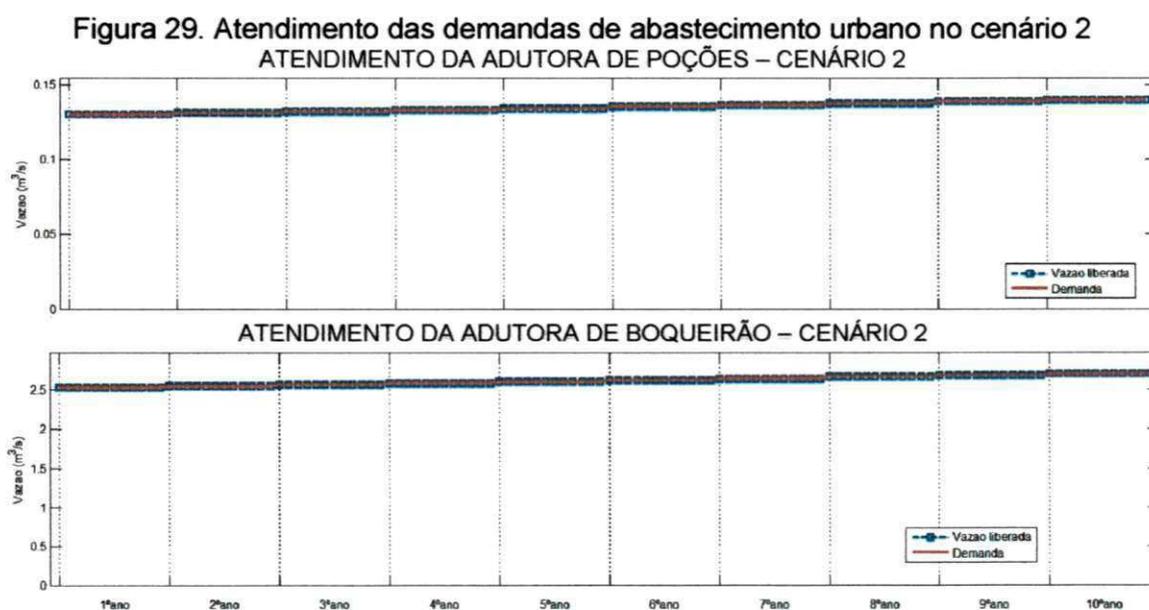
Áreas Irrigadas	Indicadores				
	FRA	FRI	RGC	FMA	CUI
Poções	1,35	1,51	0,66	0,12	0,31
Boqueirão	1,41	1,54	0,65	0,33	0,80

Sobre o custo anual de energia na adução de água para atender a demanda de abastecimento urbano foi estimado um valor de R\$ 5.890.598,00. Já o custo de energia na adução para a transposição da água do São Francisco da barragem de Itaparica até o reservatório Poções é de aproximadamente R\$ 19.425.420,00. Portanto, temos que a estimativa do custo total em adução de água por ano é de R\$ 25.316.018,00.

6.2. CENÁRIO II

Neste cenário foi realizada a otimização dos recursos hídricos do sistema considerando a segunda alternativa para o traçado das adutoras, além de ser mantida a prioridade para a irrigação e o canal de integração. Logo, é feito um comparativo entre os cenários 1 e 2, analisando se a mudança no traçado das adutoras de abastecimento provoca alguma influência relevante no sistema.

Observa-se que as demandas estabelecidas para o abastecimento urbano através das adutoras foram atendidas nos reservatórios sem apresentarem falhas durante os 10 anos de operação como ocorrido no cenário 1, por ser a 1ª prioridade de atendimento do sistema. A mudança no sistema mostrou que a vazão aduzida no açude de Poções diminuiu em 88% e no reservatório de Boqueirão a vazão aumentou em 54%, como pode ser visto na Figura 29. O abastecimento urbano nos reservatórios de Camalaú e Acauã não sofreram mudanças.



No entanto, o atendimento a demanda do canal de integração não apresentou grandes mudanças no comportamento da vazão, quando comparado com o cenário 1, como pode ser visto na Figura 30 e na Tabela 23, através dos índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do canal, que permaneceu análoga aos índices do cenário anterior.

Figura 30. Atendimento do canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 2

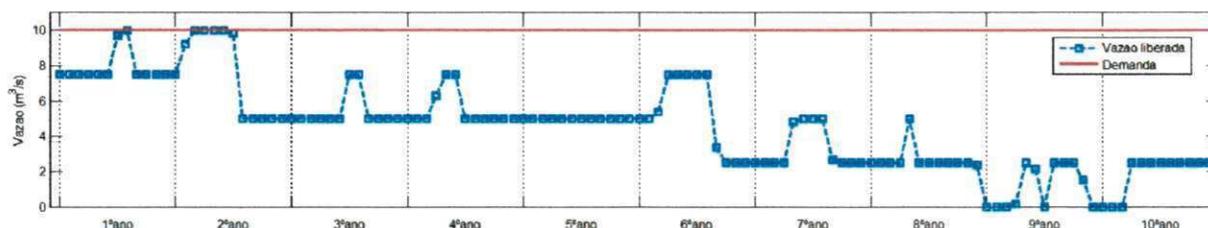
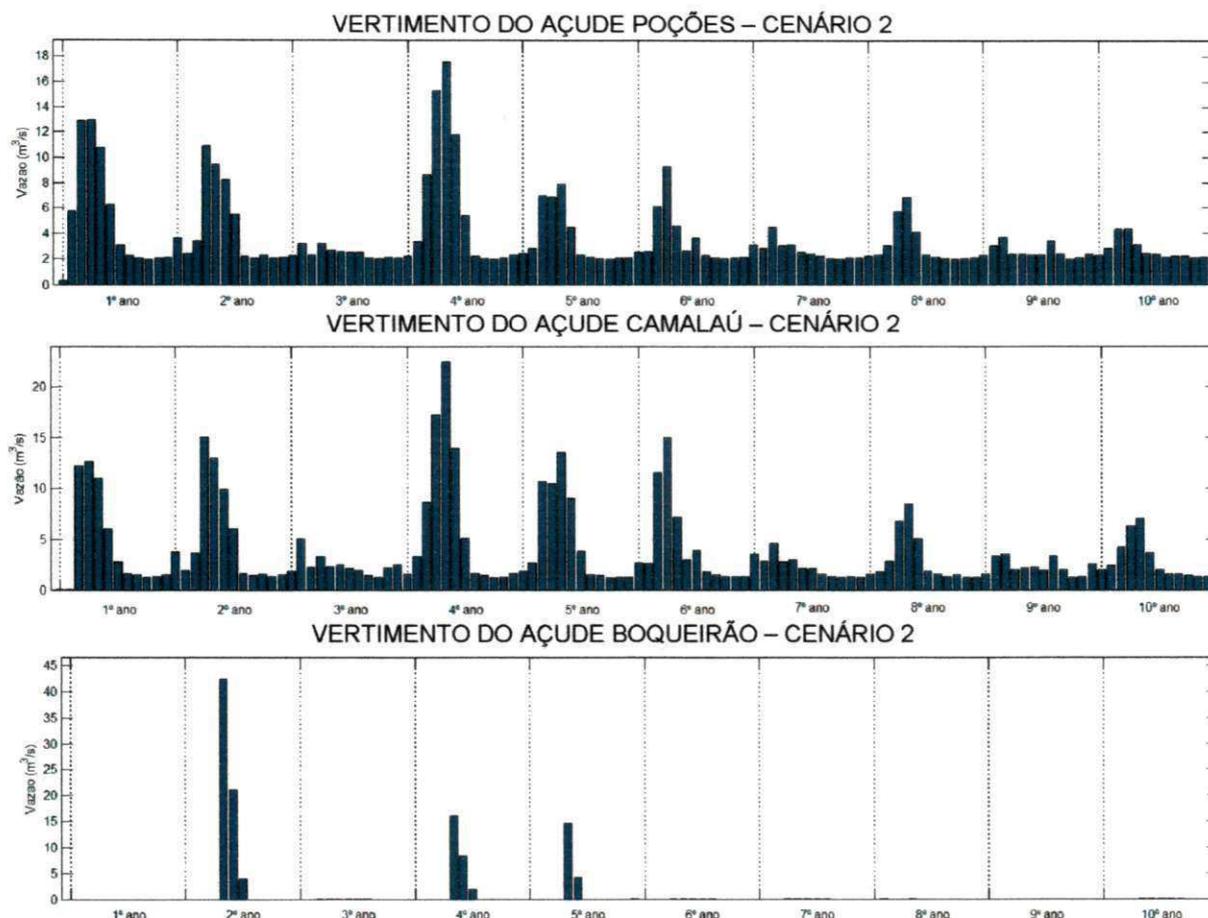


Tabela 24. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 2

conf	res	vul	defmax	sust
0,042	0,026	0,565	1,000	0,0005

Como o volume aduzido para o abastecimento urbano realizado através do açude Poções diminuiu, conseqüentemente o volume vertido (Figura 31) aumentou em média 20% e o volume da descarga de fundo em 3%. No reservatório de Camalaú, o vertimento também teve um aumento médio em 19% e o volume da descarga de fundo em 5%. Isso provocou uma maior vazão afluente nos trechos 1 e 2, um acréscimo de aproximadamente 18% em cada trecho. Mas, no reservatório Boqueirão houve uma diminuição no vertimento e na descarga de fundo de 4% e 2%, respectivamente, visto que o volume aduzido para o abastecimento urbano aumentou para atender as demandas do Eixo Brejo e Seridó. O reservatório Acauã não apresentou vertimento neste cenário estudado.

Figura 31. Volume vertido nos reservatórios no cenário 2



Neste cenário, os índices de eficiência e de sustentabilidade dos reservatórios (Tabela 24) apresentaram valores próximos aos do cenário 1, mas no reservatório Poções podemos observar que apresentaram diferenças significativas de até 16%, provocados pela diminuição da disponibilidade hídrica na vazão aduzida para o abastecimento e no aumento da vazão para o trecho 1. No reservatório Boqueirão é possível observar que o aumento da demanda para o abastecimento urbano aumentou os indicadores de sustentabilidade, mas é importante ressaltar que não chega a situações críticas.

Tabela 25. Índices dos reservatórios no cenário 2

Reservatório	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_V	η_e
Poções	0,15	0,77	0,11	0,01	0,08	0,03	0,80	0,11
Camalaú	0,13	0,69	0,09	0,01	0,08	0,03	0,81	0,09
Boqueirão	0,71	0,91	0,65	0,00	0,24	0,06	0,11	0,65
Acauã	0,96	0,92	0,89	0,00	0,11	0,08	0,00	0,89

Analisando os demais parâmetros como o volume dos reservatórios, as áreas irrigadas e as vazões aduzidas para irrigação, é possível afirmar que não houve mudanças com relação ao cenário 1. Logo, obteve os mesmos valores para receita líquida, mão de obra e consumo hídrico do cenário 1, ao longo dos 4 anos estudados. Isto, se deu devido à diferença entre os dois cenários ser apenas a mudança do traçado da adutora do Eixo Principal, onde a igualdade com relação às áreas irrigadas pode ser vista nos indicadores de desempenho das mesmas (Tabela 25) que permaneceram análogos.

Tabela 26. Indicadores de desempenho das áreas irrigadas no cenário 2

Áreas Irrigadas	Indicadores				
	FRA	FRI	RGC	FMA	CUI
Poções	1,35	1,51	0,66	0,12	0,31
Boqueirão	1,41	1,54	0,65	0,33	0,80

Com relação aos custos neste cenário, temos que o valor pago pela energia gasta na adução da água do rio São Francisco até a bacia do Rio Paraíba é de igual valor ao cenário anterior, sendo de R\$ 19.425.420, e o valor gasto com energia na adução para o abastecimento urbano pelas adutoras dos reservatórios, baseada na mudança do traçado da proposta base elaborada pela AESA é de R\$ 7.188.570. Portanto, o valor gasto na adução de água para o abastecimento urbano no cenário 2 aumenta em R\$ 1.297.972 quando comparado ao cenário 1.

6.3. CENÁRIO III

Neste cenário temos o traçado proposto pela AESA e estudado no cenário 1. No entanto, a prioridade de atendimento torna-se diferente no que diz respeito ao atendimento da vazão do canal de integração e aos perímetros irrigados dos reservatórios Poções e Boqueirão, tendo o primeiro citado maior prioridade do que o segundo.

As demandas de abastecimento urbano são todas atendidas, isso por terem maior prioridade no sistema, não diferenciando dos demais cenários discutidos

anteriormente. Os volumes dos reservatórios continuam análogos aos cenários anteriores.

Contudo, temos uma diferença pequena no atendimento ao canal de integração Acauã-Araçagi (Figura 32) quando relacionado aos cenários anteriores, onde sua vazão média aumenta em apenas $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Mas, essa mudança não representou desempenho satisfatório na vazão do canal como pode ser analisado através dos índices de desempenho do reservatório (Tabela 26). Isso mostra que não existe sustentabilidade na vazão exigida pelo canal de integração, chegando apenas a atingir seu volume máximo em 8 meses durante os 10 anos de estudo e tendo uma redução no volume ao decorrer do período, com déficit máximo de 85%.

Figura 32. Atendimento da demanda ao canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 3

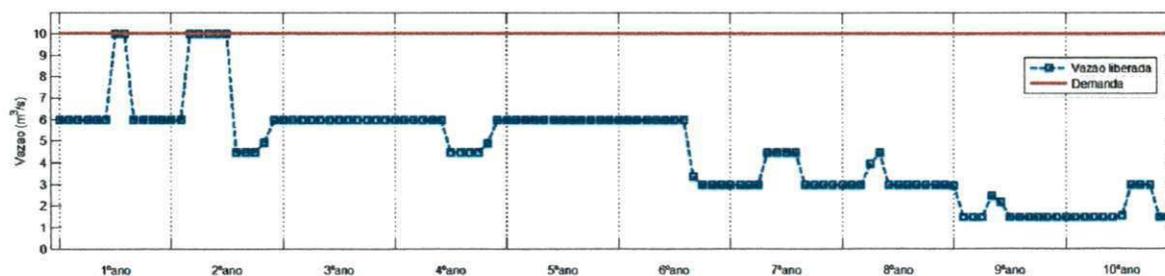
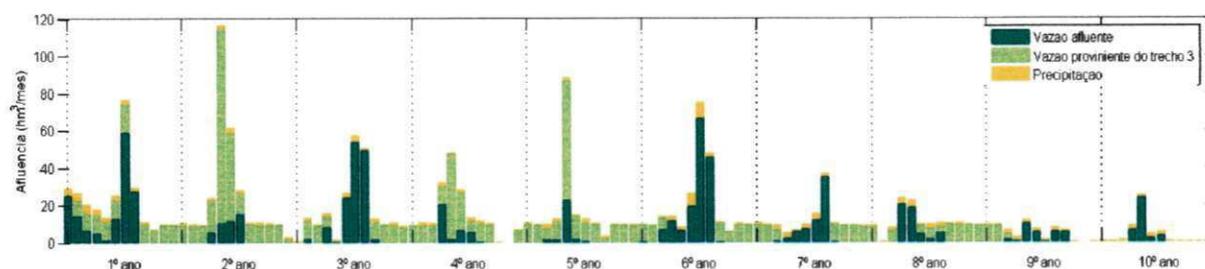


Tabela 27. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 3

conf	res	vul	defmax	sust
0,058	0,027	0,567	0,850	0,001

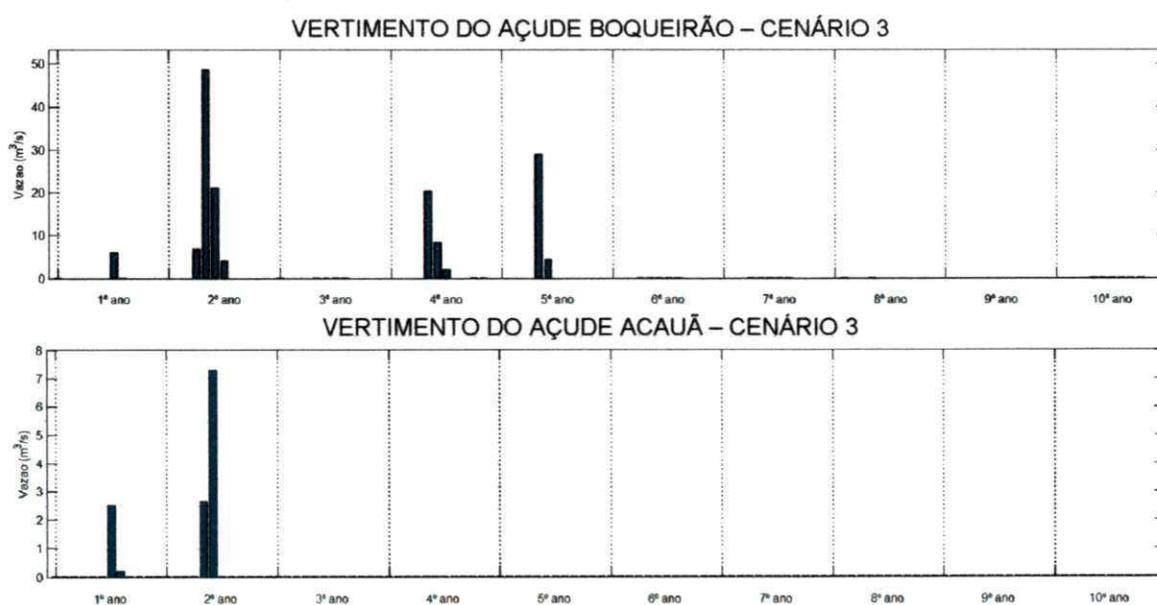
As vazões afluentes nos reservatórios de Poções, Camalaú e Boqueirão não tiveram modificações, tendo apenas a vazão afluente no trecho 3 uma diferença com um aumento de 13%, como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33. Vazão afluente ao reservatório Acauã no cenário 3



Essa vazão proveniente do trecho 3, é devido ao volume vertido no reservatório Boqueirão e o volume da descarga de fundo que aumentaram com relação ao cenário 1, em 36% (1,26 m³/s) e 4% (2,40 m³/s), respectivamente, diferença mínima quando comparamos as médias dos dois cenários. Essa diferença causou o vertimento e a possibilidade de liberar água pelo descarregado de fundo no reservatório Acauã, uma vez que ainda não tinham acontecido esses dois fatos nos cenários anteriores, com uma média de volume vertido de 0,11 m³/s e de 0,09 m³/s do descarregado de fundo para os 10 anos de estudos. A Figura 34 ilustra o vertimento nos reservatórios Boqueirão e Acauã.

Figura 34. Vertimento dos reservatório no cenário 3



Analisando os índices de eficiência e os indicadores de sustentabilidade dos reservatórios (Tabela 27), os mesmos apresentaram valores próximos aos do cenário 1 e 2, indicando novamente que o reservatório Acauã não apresenta sustentabilidade hídrica devido à demanda exigida do canal de integração, mesmo apresentando uma eficiência de 93%. Não é possível, pois, uma expansão da demanda de abastecimento urbano, e nem o atendimento ao canal por longos períodos, já que o volume do canal decresce ao decorrer dos anos estudados.

Tabela 28. Índices de eficiência e indicadores de sustentabilidade no cenário 3

Reservatório	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{Qv}	η_e
Poções	0,30	0,89	0,27	0,01	0,08	0,03	0,64	0,27
Camalaú	0,15	0,68	0,10	0,01	0,10	0,03	0,79	0,10
Boqueirão	0,63	0,89	0,56	0,00	0,27	0,07	0,17	0,56
Acauã	0,95	0,93	0,88	0,00	0,10	0,07	0,02	0,88

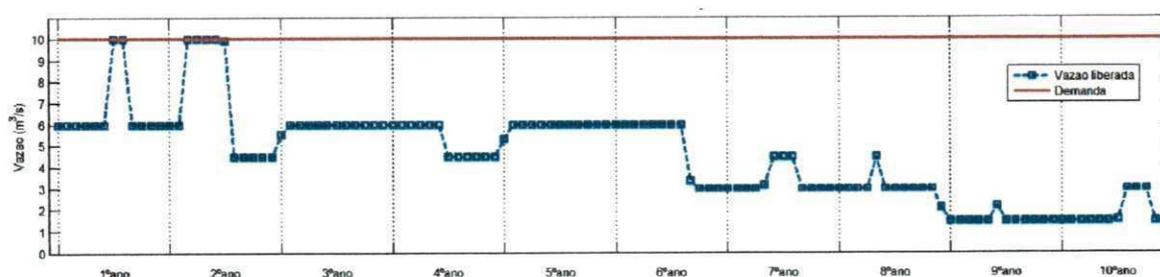
Como a prioridade à vazão do canal de integração Acauã-Araçagi é maior que a demanda para irrigação, não foi possível alocar água para essa atividade. Portanto, os perímetros irrigados neste cenário são inativos.

6.4. CENÁRIO IV

Neste cenário foi possível observar que o sistema estudado apresenta semelhanças em comum aos cenários 2 e 3, pois a proposta de estudo deste cenário é a segunda proposta com uma maior priorização da demanda para o canal de integração Acauã-Araçagi com relação à demanda de irrigação.

As demandas de abastecimento urbano foram todas atendidas igualmente ao cenário 2. Já para a demanda de irrigação, como ocorrido no cenário anterior, não houve alocação de água, visto que a vazão de água para o canal é de 10 m³/s, fazendo com que não fosse demandada água para atender os perímetros irrigados e tentar perenizar o canal Acauã-Araçagi com o volume requerido. Entretanto, a vazão demandada para o canal de integração Acauã-Araçagi (Figura 35) apresentou insustentabilidade como nos cenários anteriores, podendo ser comprovado com os índices de desempenho do canal (Tabela 28).

Figura 35. Atendimento ao canal de integração Acauã-Araçagi no cenário 4



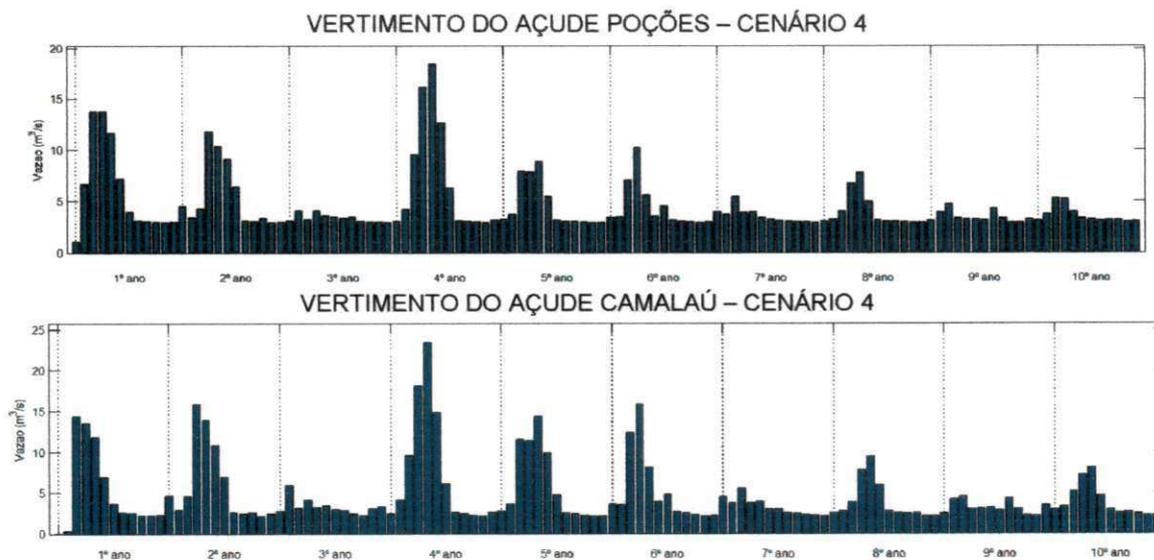
Os índices de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi mostram que existe uma garantia de atendimento de 5% com 2,6% de chance de ocorrer, e seu déficit máximo é de 85%. Podemos afirmar que essa situação assemelha-se ao cenário 3, mas a vazão para o canal diminuiu cerca de 0,09 m³/s devido à vazão aduzida no reservatório Boqueirão ter aumentado, pelo abastecimento urbano e, conseqüentemente, diminuindo a vazão liberada para o trecho 3.

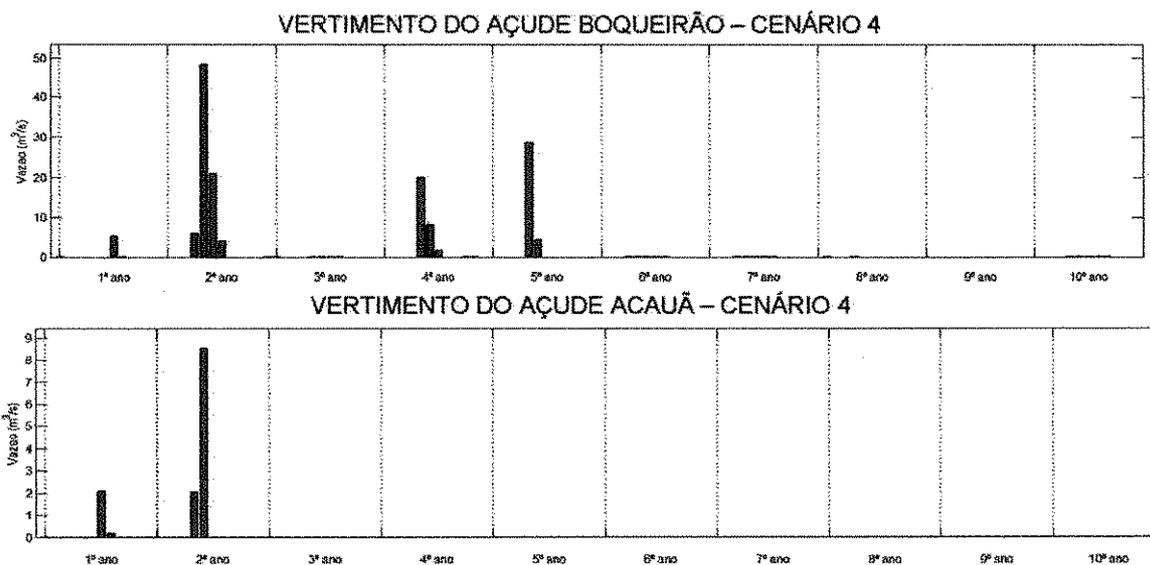
Tabela 29. Índice de desempenho de atendimento da demanda da vazão máxima do Canal de Integração Acauã-Araçagi no cenário 4

conf	res	vul	defmax	sust
0,050	0,026	0,571	0,850	0,001

Os vertimentos neste cenário (Figura 36) tiveram volumes maiores nos reservatórios Poções e Camalaú, com um aumento médio de aproximadamente 0,9 m³/s em ambos. Já nos reservatórios Boqueirão e Acauã, os vertimentos foram semelhantes ao do cenário 3, apresentando diferença apenas no volume de descarga de fundo que diminuiu em média aproximadamente 0,11 m³/s e 0,02 m³/s.

Figura 36. Vertimento nos reservatórios no cenário 4





As vazões afluentes aos reservatórios apresentaram diferenças apenas nas vazões provenientes dos trechos, com um aumento nos trechos 1 e 2 de 22% (0,87 m³/s) e 18% (0,80 m³/s), respectivamente, ocorrendo uma diminuição na vazão no trecho 3 de 4% (0,11 m³/s). Contudo, o comportamento das vazões afluentes, vazões provenientes dos trechos e a precipitação foram análogas ao do cenário 3.

Os índices de eficiência e os indicadores de sustentabilidade (Tabela 29) para os reservatórios apresentam, neste cenário, semelhanças quando comparados aos do cenário 2, visto que não ocorre mudança significativa nos seus valores. Logo, é possível observar que o reservatório Acauã ainda apresenta insustentabilidade, e que é possível aumentar a disponibilidade hídrica nos açudes Poções e Camalaú ou a utilização da água acumulada para geração de energia.

Tabela 30. Índices de eficiência e indicadores de sustentabilidade no cenário 4

Reservatório	IAP	IUD	IUP	η_{VR}	η_E	η_P	η_{qv}	η_e
Poções	0,14	0,76	0,11	0,01	0,08	0,03	0,80	0,11
Camalaú	0,13	0,69	0,09	0,01	0,08	0,03	0,81	0,09
Boqueirão	0,67	0,91	0,61	0,00	0,24	0,06	0,15	0,61
Acauã	0,95	0,92	0,87	0,00	0,11	0,07	0,02	0,87

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema estudado que receberá a água da PISF não apresentou falhas no atendimento das demandas de abastecimento urbano, pois sempre teve maior prioridade em todos os cenários analisados.

A atividade agrícola pode ser desenvolvida nos reservatórios Poções e Boqueirão sem comprometer a demanda de abastecimento urbano das cidades (cenário 1 e 2), podendo ainda haver expansão da área agrícola nos dois perímetros irrigados. Contudo, não é aconselhável realizar plantio das culturas perenes banana e coco na área irrigada do açude Poções, pois as mesmas não são lucrativas, sendo assim, a utilização das áreas destinadas ao plantio de culturas perenes podem ser dedicadas ao plantio de culturas sazonais. Quando a prioridade ao atendimento do canal de integração Acauã-Araçagi é maior, não é possível atender à demanda para irrigação tornando os perímetros irrigados inativos.

Também é possível ser implantado um perímetro irrigado para atividade agrícola próximo ao reservatório Camalaú, pois como existe uma única demanda destinada apenas ao abastecimento urbano de quatro municípios pequenos, o reservatório permanece com um grande potencial hídrico além de ofertar água para outras demandas.

Os reservatórios Poções e Camalaú não utilizam toda a sua disponibilidade hídrica e sua água é vertida e liberada pelo descarregador de fundo. Logo, eles apresentam grande potencialidade em todos os cenários para um uso não consuntivo da água como a piscicultura e carcinocultura extensiva. Sendo assim, uma alternativa viável que certamente contribuirá com o aproveitamento da água não utilizada.

Já o reservatório Boqueirão apresentou comportamento típico durante os quatro cenários em todos os anos de estudo e manteve uma média de volume acima de 59% da sua capacidade, podendo ter um aumento na demanda tanto de abastecimento como de irrigação, mas antes é necessário um novo estudo que avalie o comportamento do sistema caso ocorra à ampliação de uma demanda ou a implementação de uma nova.

O reservatório Acauã também apresentou em todos os cenários um comportamento típico nos primeiros 6 anos estudados, aumentando o volume e chegando próximo ao máximo no final do 6º ano. Mantendo-se, portanto, da mesma forma no 7º, 8º e 9º anos, pois houve a diminuição das vazões afluentes, que provocou o acúmulo de água no reservatório devido a não liberação pela descarga de fundo, garantindo o fornecimento para o abastecimento urbano, caso as vazões afluentes não aumentassem. Observa-se também que nos cenários 3 e 4 ocorreram vertimentos nos dois primeiros anos no açude Acauã devido ao aumento da prioridade a demanda do canal de integração Acauã-Araçagi em detrimento as áreas irrigadas.

Em todos os cenários estudados, a demanda do canal Acauã-Araçagi não apresentou sustentabilidade, pois a vazão máxima exigida ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) é alcançada apenas nos dois primeiros anos após a chegada da água exógena do PISF. Durante os 10 anos estudados, o volume de água demandado para o canal diminuiu progressivamente, chegando a nulo (cenários 1 e 2). Contudo, no estudo realizado é utilizado um critério que determina que o volume final no último ano seja maior ou igual ao volume inicial do reservatório estudado, esse critério influenciou o comportamento tanto do reservatório Acauã como a vazão demandada para o canal de integração Acauã-Araçagi. Logo, podemos afirmar através desse estudo que o canal não apresenta sustentabilidade caso não haja uma operação eficaz nos reservatórios de todo o sistema de forma sincronizada, sendo possível a garantia de uma vazão constante para os reservatórios.

Tais resultados levam a acreditar que a vazão máxima projetada de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ para o canal Acauã-Araçagi não é atendida de maneira satisfatória, caso não ocorram vazões transpostas pelo PISF bem superiores a $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta vazão foi alcançada poucas vezes, apenas no início do estudo e chegando numa vazão máxima de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ do 3º ao 6º ano, da qual poderia ser considerada a vazão máxima do projeto para o canal de integração Acauã-Araçagi.

Com relação à análise dos valores gastos com energia nas duas propostas para aduzir a água do rio São Francisco até a bacia Rio Paraíba e a água dos reservatórios para os 101 municípios, conclui-se que a primeira proposta irá gerar menos gastos, pois, o valor gasto na adução de água para o abastecimento urbano no cenário 2 aumenta em R\$ 1.297.972,00 quando comparado ao cenário 1. Além disso, a alternativa do traçado proposto pela AESA (cenários 1 e 3) causará menos

perdas de água, conseqüentemente, menor prejuízos para os cofres públicos na adução da água do rio São Francisco.

O modelo de otimização adaptado do modelo utilizado na tese de Santos (2012) para esse sistema teve capacidade de realizar análises multiobjetivo, atendendo todas as restrições físicas, ambientais, econômicas, sociais e legais inerentes aos sistemas de recursos hídricos. Também tem a habilidade de analisar o desempenho de vários tipos de usos de água, integrando e analisando, simultaneamente, os diversos componentes do sistema de recursos hídricos. Assim sendo, os resultados obtidos para a operação do sistema podem servir para gerar regras operacionais para a alocação da água entre os múltiplos usuários do sistema, atendendo às demandas, aos objetivos e às restrições físicas estabelecidas.

Alguns critérios propostos para operação ótima do sistema é a utilização máxima das áreas irrigadas próximas aos reservatórios Poções e Boqueirão com as culturas de melhor desempenho nos cenários estudados, e o controle na liberação da água demandada para o canal Acauã-Araçagi tendo como critério a demanda exigida pelos usuários dessa água.

Como recomendação, esta pesquisa também pode ser implementada no Eixo Norte do PISF, ampliando a visão dos gestores e possibilitando uma melhor tomada de decisão. Para continuidade desta pesquisa, é possível adicionar novas demandas ou aumentar as já existentes como análise de uma possível ocorrência desse acontecimento, e fazer uma ampliação nas áreas cultivadas das culturas sazonais no perímetro próximo ao reservatório Poções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. A. **Análises e Métodos de Otimização para Eficiência Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de Abastecimento de Água.** 2007, 113 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- 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.
- ANA (Agência Nacional de Águas). **Nota técnica nº 390/2005/SOC, de 19 de setembro de 2005. Análise do pedido de outorga de direito de uso de recursos hídricos para o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional.** Brasília: ANA. 2005. Disponível em: <<http://ana.gov.br>>.
- ANA/GEP/PNUMA/OEA. **Programa de Ações Estratégica para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira – PAE: Subprojeto 4.5B.** Brasília, DF, 2003. Disponível em: <<http://iwlearn.net/iw-projects/586/reports>>.
- 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, 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- AUSTRALIAN DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES AND ENERGY (DPIE) - (1995). **A Survey of Work on Sustainability Indicators.** DPIE, Disponível em: <http://www.dpie.gov.au/dpie/cpd/survey_a.html>. Acesso em 20 Mar 2012.
- BANCO DO NORDESTE S/A. **Manual de Orçamentos Agropecuários.** Campina Grande – PB. 2006.
- BARBOSA, P. S. F. Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS-ABRH. Porto Alegre, p. 97-163. 2002.
- BARBOSA, D. L. **A exploração de um sistema de reservatórios: uma análise otimizada dos usos e objetivos múltiplos na bacia do Rio Capibaribe-PE.** Tese de Doutorado, Curso Pós-Graduação em Recursos Naturais. - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, p. 257. 2008.

BARROS, S. V. A. **Otimização dos Usos Múltiplos em Pequenos Açudes na Bacia do Açude de Sumé - PB.** 2010, 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BARROS, M. T. L. A Programação Dinâmica Aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos. In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** PORTO, R. L. (org.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 2002.

BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F.; NAKAYAMA, P. T. Sistemas de suporte a decisão em recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 3, nº3: 73-95. 1998.

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.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 de janeiro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em 12 mar 2012.

BRASIL. Resolução nº 687, de 03 de dezembro de 2004. Dispõe sobre o Marco Regulatório para a gestão dos Sistema Curema-Açu e estabelece parâmetros e condições para a emissão de outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos e declaração de uso insignificante. **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 de Dezembro de 2004.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional - Relatório Síntese de Viabilidade Técnicoeconômica e ambiental - Secretaria de Infra-estrutura Hídrica.** 2000.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente do Projeto de integração do rio São Francisco com bacias hidrográficas do nordeste setentrional**, Brasília, Jun. 2004. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/saofrancisco/rima/download.asp>>.

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

BRITO, R. A. L.; SOARES, J. M.; CAVALCANTI, E. B.; BOS, M. G. Irrigation performance assessment for Nilo Coelho Scheme in Northeastern Brazil: A preliminary analysis. In: **AFRO-ASIAN REGIONAL CONFERENCE**, 10, Bali. Proceedings... Bali: ICID. v. II-A, A13.1-7. 1998.

CASTRO, C. N. **Transposição do Rio São Francisco: Análise de Oportunidade do Projeto**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro, Fev 2011.

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, 2001a. CD-ROM.

CURI, W. F.; CURI, R.C. ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program. In: **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Aracaju. CD-ROM. 2001.

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**. vol. 9, n. 3, p. 39-53. 2005.

CURI, W. F.; CURI, R. C. **Introdução a Operação de Represas/Açudes**. Aula ministrada na disciplina de Engenharia de Recursos Hídricos na Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental em 2011. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, mar. 2004. Disponível em: <http://www.rioss.com/geral/downloads.php?subaction=showfull&id=1240395422&archive=&start_from=&ucat=8&> Acessado em: 20 de Novembro de 2011.

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, 2007.

COHON, J.L. **Multiobjective Programming and Planning**. Academic Press. 333 p. London. 1978.

CIRILO, J. A., Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. et al. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**, ABRH, 1ª edição, pp. 305-356, Editora da Universidade – UFRGS, 1997.

DANTAS-NETO, J. **Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água**. 1994. 134f. Tese (Doutorado em Irrigação) - Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP, Botucatu. 1994.

DOORENBOS, J. e KASSAM, A. H. Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Sousa, F. A. V. Damasceno, J. F. de Medeiros. **Efeito da Água no Rendimento das Culturas**. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, v. 33, UFPB, Campina Grande, 2000.

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.

FRANCATO, A. L. **Operação Multiobjetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água**. 2002, 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas. 2002.

GALVÃO, C. O. **Aplicabilidade em Recursos Hídricos da Previsão de Precipitação de Longo Prazo no Nordeste do Brasil**. 1999. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

GALVÃO, C. O., VALENÇA, M. J. S., org. **Sistemas inteligentes: aplicações a Recursos hídricos e ciências ambientais**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade UFRGS: ABRH. 1999.

GETIRANA, A. C. V.; AZEVEDO, J. P. S.; MAGALHÃES, P. C. Conflitos Pelo Uso da Água no Setor Agrícola no Norte Fluminense (I): Propostas de Soluções e Análises através de Programação Linear. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 27-38, 2007.

GOMES, H. P. **Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**. 3ª edição. 277p. Editora Universitária – UFPB, 2009.

GOMES, H. P. **Engenharia de Irrigação Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento**. Editora Universitária – UFPB, Campina Grande-PB, 3ª Edição. 412p. 1999.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, **Water Resource Research**, v.18, n.5, pp14-20. 1982.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Estudo de Impactos Ambientais do Projeto de Integração do Rio São Francisco**. Brasília, 2004. Disponível em: <<http://licenciamento.ibama.gov.br/>>. Acesso em: 04 dez. 2012.

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.

LACERDA, E. G. M. & CARVALHO, A. C. P. L. F. (1999). Introdução aos algoritmos genéticos. In: **Sistemas inteligentes – Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Porto Alegre. Editora da Universidade/UFRGS – ABRH, p.99-150.

LANNA, A. E. Nota de Aula: Cap. 5. **Tópicos Avançados em PL: Método Simplex Revisado, Análise Pós-Ótimo e Artíficos 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. Introdução. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2002.

LANNA, A. E. L.; LIMA, H. Modelos para operação de sistemas de reservatórios: atualização do estado-da-arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n.3, p. 5-22, 2005

LARSON, R. E. **State incremental dynamics programming**. New York: American Elsevier Pub. 1968

LIMA, H. V. C.; LANNA, A. E. L. Operação Ótima de Sistemas de Reservatórios: Aplicação ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Aracaju. CD-ROM. 2001

LEVINE, G. **Relative water supplí: an explanatory variable for irrigation systems**. Ithaca: Cornell University. (Technical Report, 8). 1982.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2. Ed. Campina: Editora Átomo, 2008.

LOUCKS, D. P. Sustainable water resources management. **Water International Resource Association**, v. 25, n. 1 p. 3-10, mar. 2000.

LOUCKS, D. P.; BEEK, E. V. **Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications**. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO, 2005.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D.^a. **Water resource systems planning and analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1981.

MELLO Jr., A V. & MATTOS, L. N. Otimização da operação de um reservatório pela programação dinâmica em um processo de decisão Markoviano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 4, nº3: 5-15. 1999.

PARAÍBA (Estado). Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente – SECTMA; Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA; PROÁGUA Nacional – UEGP/PB. **Termos de Referência (TDR) para Contratação de Consultoria para a elaboração de Estudos Técnicos Preliminares, de Viabilidade e Projeto Básico para a Integração do Eixo Leste do Projeto São Francisco com Bacias do Estado da Paraíba**. João Pessoa, Jul 2007.

PARAÍBA (Estado). Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba. Relatório Parcial da Consolidação de Informações e Regionalização (PERH-PB). Resumo Executivo**. João Pessoa, 2006. Disponível no site <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>.

- 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.
- RIGHETTO, A. M.; FILHO, J. A. G. (2003). Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 8, n. 2 p. 19-29.
- 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.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 49-60, dez. 2011.
- SANTOS, V. S. **Modelo de Otimização Quali-Quantitativo Multiobjetivo para o Planejamento dos Recursos Hídricos Superficiais, com Aplicação à Bacia do Rio Paraíba**. 2012, 170 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- SANTOS, R. B. **Avaliação de intervenções hidráulicas na Bacia do Rio Gramame-PB com o uso das técnicas de Análise Multiobjetivo e Multicriterial**. 2009, 202 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- 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.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2ª ed. – Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.
- SILVA, W. P. et al. "LAB Fit Ajuste de Curvas": Um software em português para tratamento de dados experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 4, p. 419 – 427, nov. 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.
- TUCCI, C. **Modelos Hidrológicos**. Editora da UFRGS, Porto Alegre. 1998.

VIEIRA, A. S. **Um modelo de simulação via programação linear seqüencial, 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.; SILVA, V. S.; CURI, W. F. Escolha das Regras de Operação Racional para Subsistema de Reservatórios no Semiárido Nordestino. **Revista Engenharia Ambiental: pesquisa e tecnologia**. Vol. 7 nº1, jan/mar, Espírito Santo do Pinhal, 2010.

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, V. P. P. B. Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semi-árido Nordestino. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)**, no 1, Vol. 1, p.91-107. 1996.

VIEIRA L. A. A., Vieira, V. P. P. B. Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido Nordestino, **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Rec. Hídricos**, Vol. 2. Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos, Recife, PE, ABRH, 1995.

DIAS, B. H. et al. Programação Dinâmica Estocástica Aplicada ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico Brasileiro através do uso de Processamento Paralelo. **Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Saúde Humana, Saúde Animal e Ecossistema, Bento Gonçalves, RS, 2010.

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.

ANEXOS

ANEXO 1: Tabela de relação cota x área x volume do reservatório Poções

Reservatório	Cota (m)	Área (km ²)	Volume (Mm ³)
POÇÕES	32,00	0,000000	0,000000
	33,00	0,003750	0,001875
	34,00	0,011000	0,009250
	35,00	0,059500	0,044500
	36,00	0,219000	0,183750
	37,00	0,577750	0,582125
	38,00	0,992000	1,367000
	39,00	1,579500	2,652750
	40,00	2,167250	4,526125
	41,00	2,838750	7,029125
	42,00	3,640250	10,268625
	43,00	4,596250	14,388875
	44,00	5,756000	19,563000
	45,00	7,107000	25,994500
	46,00	8,381250	33,728625
47,00	8,615250	42,716875	

ANEXO 2: Tabela de relação cota x área x volume do reservatório Camalaú

Reservatório	Cota (m)	Área (km ²)	Volume (Mm ³)
CAMALAU	305,00	0,02600	0,00000
	306,00	0,07968	0,05284
	307,00	0,13336	0,15936
	308,00	0,18704	0,31956
	309,00	0,24072	0,53344
	310,00	0,29440	0,80100
	311,00	0,32784	1,11212
	312,00	0,36128	1,45668
	313,00	0,39472	1,83468
	314,00	0,42816	2,24612
	315,00	0,46160	2,69100
	316,00	0,90640	3,37500
	317,00	1,35120	4,50380
	318,00	1,79600	6,07740
	319,00	2,24080	8,09580
	320,00	2,68560	10,55900
	321,00	3,36392	13,58376
	322,00	4,04224	17,28684
	323,00	4,72056	21,66824
	324,00	5,39888	26,72796
	325,00	6,07720	32,46600
	326,00	6,98576	38,99748
	327,00	7,89432	46,43752
328,00	8,80288	54,78612	
329,00	9,71144	64,04328	

ANEXO 3: Tabela de relação cota x área x volume do reservatório Boqueirão

Reservatório	Cota (m)	Área (km²)	Volume (Mm³)
BOQUEIRÃO	344,00	0,070593	0,069800
	345,00	0,142867	0,174286
	346,00	0,257180	0,366771
	347,00	0,421869	0,707956
	348,00	0,631536	1,230617
	349,00	0,873903	1,981542
	350,00	1,158564	2,990176
	351,00	1,506467	4,314820
	352,00	1,866251	5,996469
	353,00	2,261179	8,058687
	354,00	2,697741	10,529191
	355,00	3,217443	13,477904
	356,00	3,859121	17,006273
	357,00	4,556783	21,217917
	358,00	5,260937	26,112154
	359,00	6,158316	31,819531
	360,00	7,030425	38,416664
	361,00	8,029009	45,934680
	362,00	8,999597	54,453579
	363,00	10,013408	63,965416
	364,00	11,031533	74,490376
	365,00	12,260463	86,139409
	366,00	13,693060	99,074597
	367,00	15,486319	113,650769
	368,00	17,365964	130,099018
	369,00	19,443185	148,504719
	370,00	21,743159	169,122415
	371,00	24,290550	192,184935
	372,00	26,752308	217,765387
	373,00	29,120116	245,796027
	374,00	31,256425	276,130869
	375,00	33,046998	308,486064
376,00	34,539523	342,495505	
377,00	36,142787	377,846134	
377,55	38,135841	397,990704	
377,90	39,623321	411,686287	

ANEXO 4: Tabela de relação cota x área x volume do reservatório Acauã

Reservatório	Cota (m)	Área (km²)	Volume (Mm³)
ACAUA	90,000	0,14	0,000
	94,000	0,38	2,000
	98,000	0,98	4,800
	100,000	1,41	7,000
	104,000	2,56	14,500
	108,000	4,09	27,500
	112,000	5,96	47,600
	114,000	7,02	60,800
	116,000	8,14	76,100
	118,000	9,34	93,800
	120,000	10,59	114,000
	122,000	11,88	136,600
	124,000	13,2	161,800
	126,000	14,55	189,500
	128,000	15,9	220,100
	130,000	17,25	253,100

ANEXO 5: Série fluviométrica média mensal dos reservatórios (m³/s)

Reservatório	Ano/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Q	
POÇÕES	ANO 1	3,316	2,964	9,650	10,161	8,212	3,829	0,720	0,015	0,000	0,000	0,000	0,010	3,24	
	ANO 2	1,136	0,195	0,546	8,094	6,858	5,416	3,218	0,005	0,000	0,189	0,000	0,012	2,14	
	ANO 3	0,007	0,729	0,000	0,524	0,208	0,220	0,000	0,355	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,17
	ANO 4	0,000	0,621	5,555	12,065	14,828	9,450	3,058	0,066	0,000	0,000	0,000	0,000	0,076	3,81
	ANO 5	0,122	0,371	4,051	4,237	5,205	2,164	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,35
	ANO 6	0,196	0,144	3,289	6,504	2,224	0,106	0,975	0,086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	1,13
	ANO 7	0,387	0,239	1,930	0,342	0,883	0,033	0,642	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,31
	ANO 8	0,029	0,095	0,862	3,488	4,538	1,799	0,000	0,005	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,90
	ANO 9	0,017	0,344	1,308	0,071	0,000	0,000	0,000	0,784	0,319	0,000	0,000	0,000	0,189	0,25
	ANO 10	0,015	0,260	1,822	1,630	0,620	0,005	0,027	0,002	0,051	0,110	0,005	0,027	0,36	
CAMALAU	ANO 1	0,388	0,221	1,020	0,258	0,601	0,115	0,149	0,006	0,003	0,000	0,009	0,028	0,23	
	ANO 2	0,518	0,077	0,288	4,256	4,129	2,126	1,037	0,003	0,000	0,002	0,000	0,037	1,04	
	ANO 3	0,000	1,929	0,400	0,379	0,023	0,244	0,018	0,066	0,002	0,000	0,308	1,187	0,38	
	ANO 4	0,000	0,190	0,440	1,969	5,414	2,857	0,342	0,002	0,000	0,000	0,000	0,028	0,94	
	ANO 5	0,046	0,250	3,370	3,831	5,595	4,936	2,063	0,020	0,002	0,000	0,000	0,000	1,66	
	ANO 6	0,514	0,626	4,753	6,110	3,012	0,667	0,610	0,089	0,009	0,002	0,000	0,000	1,37	
	ANO 7	0,736	0,561	0,537	0,066	0,317	0,017	0,103	0,011	0,000	0,021	0,006	0,000	0,20	
	ANO 8	0,014	0,002	0,132	0,928	2,066	1,400	0,009	0,038	0,000	0,110	0,000	0,000	0,39	
	ANO 9	0,000	0,548	0,327	0,031	0,104	0,221	0,061	0,255	0,316	0,000	0,000	0,652	0,21	
	ANO 10	0,232	0,028	0,368	1,733	4,124	1,794	0,080	0,006	0,003	0,000	0,000	0,000	0,69	
BOQUEIRÃO	ANO 1	4,340	2,340	0,990	0,910	2,360	2,360	8,690	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,833	
	ANO 2	0,250	0,000	1,040	36,570	41,900	16,240	2,520	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	8,214	
	ANO 3	0,000	4,570	0,000	15,070	2,390	2,080	0,280	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,033	
	ANO 4	0,000	0,660	2,790	21,830	18,040	0,130	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	3,650	
	ANO 5	0,360	0,000	13,590	6,430	25,230	0,760	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,864	
	ANO 6	1,650	0,000	4,520	8,640	0,100	1,190	2,080	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,515	
	ANO 7	2,060	0,000	0,960	0,970	1,470	0,020	3,250	0,360	0,000	0,020	0,000	0,000	0,726	
	ANO 8	0,000	0,000	0,510	29,250	22,180	3,300	0,080	0,130	0,000	0,000	0,000	0,000	4,621	
	ANO 9	0,000	0,020	2,950	0,380	0,790	0,130	0,150	1,320	0,230	0,000	0,000	0,000	0,752	
	ANO 10	0,000	0,080	0,810	10,090	21,140	0,080	0,200	0,000	0,000	0,230	0,000	0,000	2,719	
ACAUÃ	ANO 1	9,919	5,696	2,551	2,097	0,581	5,101	22,827	10,840	0,142	0,000	0,000	0,000	4,980	
	ANO 2	0,057	0,000	0,000	2,295	4,223	4,534	6,107	0,014	0,000	0,000	0,000	0,071	1,442	
	ANO 3	0,014	0,935	0,000	3,273	0,255	9,494	20,943	19,214	0,737	0,000	0,028	0,000	4,574	
	ANO 4	0,000	0,014	0,113	8,133	0,850	2,664	2,253	0,269	0,000	0,000	0,000	0,085	1,198	
	ANO 5	0,156	0,014	0,723	0,595	8,913	0,864	0,411	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,973	
	ANO 6	0,213	0,000	2,834	4,676	2,621	7,637	25,845	17,769	0,241	0,000	0,000	0,000	5,153	
	ANO 7	0,099	0,000	0,510	1,034	2,380	3,046	4,818	13,589	0,283	0,000	0,000	0,000	2,147	
	ANO 8	0,000	0,000	0,043	7,977	7,340	1,814	0,893	2,055	0,014	0,000	0,000	0,000	1,678	
	ANO 9	0,000	0,000	0,638	0,496	4,152	2,267	0,227	2,451	2,338	0,000	0,000	0,028	1,050	
	ANO 10	0,028	0,043	0,128	2,579	9,239	0,978	1,502	0,113	0,000	0,028	0,000	0,014	1,221	

ANEXO 6: Série pluviométrica média mensal dos reservatórios (mm)

Reservatório	Anomês	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Q	
POÇÕES	ANO 1	36,60	184,50	319,30	141,10	84,00	45,80	29,80	14,10	0,00	0,00	0,00	14,20	36,60	
	ANO 2	124,20	5,30	183,20	159,10	85,90	159,70	12,60	14,80	0,00	47,80	0,00	18,60	124,20	
	ANO 3	32,30	90,40	8,30	101,20	39,50	0,00	53,20	0,80	0,00	0,00	0,00	13,90	32,30	
	ANO 4	3,10	159,50	281,20	293,40	123,20	13,60	28,20	0,00	0,00	0,00	0,00	56,40	3,10	
	ANO 5	39,70	59,90	226,90	114,30	121,90	14,00	4,50	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	39,70	
	ANO 6	50,80	46,50	187,90	159,50	31,80	56,30	132,10	13,90	0,00	0,00	1,40	0,00	19,00	50,80
	ANO 7	189,40	106,50	105,70	110,20	17,90	34,80	22,70	13,20	0,00	0,00	0,00	8,40	0,00	189,40
	ANO 8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ANO 9	17,90	154,80	62,90	0,00	0,00	0,00	0,00	154,40	0,00	0,00	0,00	0,00	45,70	17,90
	ANO 10	34,10	99,70	96,50	132,60	43,80	28,80	24,20	11,00	11,00	35,70	37,70	11,00	21,40	34,10
CAMALAU	ANO 1	54,90	85,60	127,20	70,90	89,50	75,20	39,40	17,90	32,30	18,60	0,00	26,60	54,90	
	ANO 2	115,80	0,00	182,90	175,80	35,50	76,20	46,40	14,40	10,60	8,60	0,00	39,40	115,80	
	ANO 3	84,80	156,20	21,00	74,40	39,10	64,40	68,70	0,00	11,90	0,00	176,90	12,80	84,80	
	ANO 4	5,20	116,00	69,80	253,80	151,60	11,30	15,00	14,80	4,20	0,00	0,00	41,70	5,20	
	ANO 5	38,00	85,40	313,60	109,60	213,90	52,30	14,50	0,00	9,20	0,00	0,00	0,00	38,00	
	ANO 6	141,80	14,90	412,10	66,40	25,40	73,80	93,70	14,20	27,20	22,70	0,00	0,00	141,80	
	ANO 7	157,90	38,00	51,80	65,20	29,00	25,40	51,20	11,20	0,00	24,20	16,20	0,00	157,90	
	ANO 8	18,20	10,20	66,30	219,70	73,00	41,60	35,20	11,00	0,00	57,60	0,00	0,00	18,20	
	ANO 9	0,00	123,60	12,40	37,70	53,00	75,20	44,50	147,00	23,20	0,00	0,00	0,00	117,30	0,00
	ANO 10	80,10	57,00	41,20	241,40	132,00	10,20	29,40	13,60	8,00	0,00	0,00	0,00	4,30	80,10
BOQUEIRÃO	ANO 1	79,30	151,40	137,10	57,90	89,10	0,00	124,10	31,10	23,30	0,00	0,00	0,00	79,30	
	ANO 2	27,00	0,00	1,00	60,00	28,60	50,20	10,70	11,70	0,40	0,30	0,30	18,10	27,00	
	ANO 3	14,20	113,00	8,30	115,40	32,70	133,10	86,60	12,40	12,40	0,00	0,00	31,80	17,40	14,20
	ANO 4	6,50	13,90	104,60	115,50	34,30	29,70	53,50	24,70	5,30	6,00	0,00	112,00	6,50	
	ANO 5	23,80	4,90	116,40	122,10	54,80	3,60	26,00	4,40	0,50	0,30	0,50	0,20	23,80	
	ANO 6	126,00	27,30	81,40	110,90	51,30	139,90	106,60	28,90	1,10	3,10	4,90	0,20	126,00	
	ANO 7	0,00	0,70	98,30	132,30	22,10	51,50	110,70	35,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	ANO 8	0,00	0,00	62,90	120,00	48,20	59,70	47,90	36,70	20,20	4,70	9,20	0,00	0,00	
	ANO 9	0,00	35,60	36,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,30	0,00	
	ANO 10	23,20	23,00	18,90	65,80	21,60	35,10	42,30	53,90	17,00	2,80	0,00	16,20	23,20	
ACAUÃ	ANO 1	212,50	256,40	271,40	142,40	139,10	125,30	105,90	68,00	46,60	4,10	0,80	5,50	212,50	
	ANO 2	57,10	24,30	9,80	82,60	65,90	129,70	47,30	27,70	32,70	14,30	6,10	27,10	57,10	
	ANO 3	50,30	111,80	25,40	92,80	42,90	142,10	189,20	35,50	47,00	2,80	80,50	34,00	50,30	
	ANO 4	15,80	108,40	72,50	101,10	42,80	56,80	77,60	48,70	5,20	22,20	0,00	10,50	15,80	
	ANO 5	59,40	24,10	139,90	84,60	64,60	32,20	79,10	5,00	17,40	0,00	0,00	28,00	59,40	
	ANO 6	2,00	12,20	64,40	112,80	108,80	480,50	535,60	96,90	40,60	12,60	17,60	2,20	2,00	
	ANO 7	47,20	16,40	142,70	140,70	11,20	114,60	164,80	103,30	0,00	0,00	0,00	0,00	47,20	
	ANO 8	27,80	13,60	58,10	177,20	182,50	30,60	104,60	68,20	23,00	74,50	16,50	0,00	27,80	
	ANO 9	16,40	30,20	88,50	87,70	77,70	93,50	23,10	84,70	21,50	7,20	0,00	20,80	16,40	
	ANO 10	37,40	37,60	41,60	121,30	60,90	110,80	86,40	38,60	23,70	2,60	5,10	21,40	37,40	

ANEXO 7: Evaporação média mensal nos reservatórios (mm)

Reservatório/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273
Camalaú	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273
Boqueirão	192	155	195	163	178	130	109	143	166	237	212	228
Acauã	147	132	108	88	102	65	73	105	126	154	151	165

ANEXO 8: Demanda para o abastecimento urbano do ano de 2013 a 2022 (l/s)

	Municípios	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ADUTORA DE CAMALAU	Zabelê	3,94	3,95	3,95	3,96	3,96	3,96	3,97	3,97	3,98	3,98
	São Sebastião do Umbuzeiro	6,53	6,60	6,66	6,73	6,79	6,85	6,91	6,96	7,01	7,07
	São João do Tigre	8,89	8,92	8,95	8,97	9,00	9,03	9,06	9,08	9,11	9,14
	Camalaú	11,23	11,25	11,26	11,28	11,30	11,32	11,34	11,36	11,38	11,40
TOTAL	30,59	30,71	30,83	30,94	31,05	31,16	31,27	31,38	31,48	31,48	31,58
ADUTORA DO CONGO	Monteiro	61,84	62,45	63,05	63,65	64,25	64,85	65,45	66,05	66,65	67,25
	Congo	9,19	9,20	9,21	9,22	9,23	9,24	9,25	9,26	9,27	9,28
	Sumé	32,21	32,39	32,57	32,75	32,94	33,13	33,32	33,51	33,70	33,90
	Amparo	4,22	4,26	4,30	4,34	4,37	4,41	4,44	4,48	4,51	4,54
	Coxíola	3,66	3,72	3,78	3,84	3,90	3,96	4,01	4,07	4,12	4,18
	Livramento	13,95	13,94	13,93	13,91	13,90	13,89	13,87	13,86	13,84	13,83
	Ouro Velho	5,71	5,72	5,73	5,73	5,74	5,74	5,75	5,75	5,76	5,77
	Prata	7,76	7,84	7,91	7,99	8,07	8,15	8,23	8,32	8,40	8,49
	Gurjão *	6,17	6,22	6,27	6,31	6,36	6,42	6,47	6,52	6,57	6,63
	Parari *	2,49	2,49	2,49	2,49	2,48	2,48	2,48	2,48	2,47	2,47
	Santo André *	5,03	5,00	4,98	4,95	4,92	4,90	4,87	4,84	4,81	4,78
	São João do Cariri *	8,35	8,30	8,26	8,21	8,16	8,11	8,06	8,01	7,96	7,91
	São José dos Cordeiros	7,57	7,54	7,50	7,47	7,43	7,40	7,37	7,33	7,30	7,27
	Serra Branca *	24,64	24,67	24,69	24,71	24,74	24,76	24,79	24,81	24,84	24,86
Sucunú	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	
Pio X	0,64	0,64	0,64	0,64	0,65	0,65	0,65	0,65	0,66	0,66	
TOTAL	193,71	194,64	195,56	196,49	197,42	198,34	199,28	200,21	201,15	202,09	
EIXO SERRA DE TEIXEIRA	Cacimbas	13,44	13,47	13,49	13,52	13,55	13,57	13,60	13,63	13,65	13,68
	Desterro	15,97	16,06	16,15	16,24	16,32	16,40	16,48	16,56	16,64	16,72
	Imaculada	22,95	23,06	23,17	23,28	23,39	23,50	23,61	23,71	23,81	23,91
	Mãe d'Água	7,60	7,61	7,62	7,63	7,64	7,64	7,65	7,66	7,67	7,67
	Maturéia	12,19	12,39	12,58	12,78	12,99	13,19	13,40	13,61	13,83	14,04
	Taperoá	30,07	30,40	30,72	31,06	31,40	31,75	32,11	32,47	32,85	33,23
	Teixeira	28,08	28,37	28,67	28,97	29,27	29,59	29,91	30,24	30,57	30,91
TOTAL	130,32	131,36	132,41	133,48	134,56	135,65	136,75	137,88	139,01	140,16	
LEITO DO RIO	Caraúbas	7,91	8,00	8,09	8,17	8,26	8,35	8,43	8,51	8,60	8,68
	São Domingos do Cariri	4,85	4,89	4,94	4,98	5,03	5,07	5,11	5,15	5,19	5,22
TOTAL	12,76	12,89	13,03	13,16	13,29	13,41	13,54	13,66	13,78	13,90	
ADUTORA DE BOQUEIRÃO	Alcantil	10,51	10,59	10,67	10,75	10,82	10,89	10,96	11,03	11,10	11,17
	Barra de Santana	16,37	16,38	16,40	16,42	16,43	16,45	16,47	16,48	16,50	16,51
	Barra de São Miguel	10,92	10,97	11,02	11,07	11,12	11,17	11,22	11,28	11,33	11,38
	Campina Grande	1277,40	1289,04	1300,87	1312,89	1325,17	1337,85	1350,35	1363,31	1376,50	1389,95
	Caturité	9,12	9,19	9,25	9,32	9,38	9,44	9,50	9,56	9,62	9,68
	Pocinhos	34,13	34,62	35,12	35,63	36,16	36,70	37,26	37,83	38,43	39,04
	Queimadas	82,35	83,34	84,32	85,31	86,29	87,27	88,25	89,22	90,20	91,18
	Riacho de Santo Antônio	3,57	3,68	3,79	3,91	4,04	4,17	4,32	4,47	4,64	4,82
	Boa Vista	12,88	13,18	13,49	13,80	14,12	14,45	14,79	15,13	15,48	15,84
	Boqueirão	31,76	31,79	31,82	31,88	31,89	31,92	31,95	31,98	32,01	32,05
	Cabaceiras	10,27	10,43	10,59	10,76	10,94	11,12	11,30	11,49	11,69	11,90
	Juazeirinho	33,24	33,51	33,78	34,05	34,30	34,55	34,79	35,03	35,26	35,48
	Cubatí	12,81	12,83	12,84	12,85	12,87	12,88	12,89	12,90	12,92	12,93
	Olivados	7,10	7,16	7,21	7,26	7,31	7,37	7,42	7,48	7,53	7,59
	Pedra Lavrada	14,72	14,89	15,08	15,26	15,46	15,65	15,85	16,06	16,27	16,49
	Seridó	20,29	20,46	20,62	20,78	20,93	21,08	21,23	21,37	21,51	21,64
Soledade	27,31	27,55	27,78	28,00	28,21	28,42	28,63	28,82	29,02	29,21	
Tenório	5,69	5,74	5,79	5,84	5,88	5,93	5,97	6,01	6,05	6,09	
TOTAL	1620,47	1635,36	1650,45	1665,75	1681,32	1697,11	1713,16	1729,48	1746,07	1762,95	

Continuação do ANEXO 8

Municípios	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
EIXO CENTRAL										
Punilândia	25,91	26,08	26,25	26,41	26,57	26,72	26,87	27,02	27,16	27,31
Montadas	10,23	10,47	10,72	10,99	11,26	11,55	11,86	12,18	12,52	12,88
Areal	12,57	12,63	12,68	12,73	12,79	12,84	12,90	12,95	13,01	13,07
Esperança	61,68	62,26	62,84	63,44	64,05	64,67	65,30	65,94	66,60	67,27
Lagoa Seca	50,92	51,21	51,49	51,76	52,02	52,28	52,54	52,79	53,04	53,28
Ataíga Nova	37,55	37,74	37,92	38,11	38,28	38,46	38,63	38,80	38,97	39,14
São Sebastião de Lagoa de Roga	22,04	22,19	22,34	22,48	22,63	22,76	22,90	23,03	23,16	23,28
Ataíga Grande	53,36	53,11	52,87	52,63	52,39	52,15	51,91	51,68	51,45	51,23
Arealva	46,26	45,97	45,69	45,40	45,12	44,83	44,55	44,26	43,98	43,69
Matinhas	7,17	7,03	6,90	6,78	6,65	6,54	6,42	6,31	6,21	6,10
Remígio	35,67	36,24	36,84	37,45	38,08	38,74	39,41	40,11	40,84	41,59
TOTAL	363,37	364,93	366,53	368,16	369,82	371,54	373,29	375,09	376,93	378,84
EIXO BREJO										
Arara	25,52	25,73	25,95	26,15	26,36	26,55	26,74	26,93	27,11	27,28
Casserengue	13,96	14,05	14,14	14,23	14,32	14,41	14,49	14,57	14,65	14,73
Aratuna	38,07	38,39	38,71	39,01	39,31	39,60	39,88	40,16	40,43	40,69
Bananeiras	42,32	42,32	42,31	42,31	42,31	42,30	42,30	42,29	42,29	42,28
Cacimba de Dentro	32,70	32,67	32,64	32,60	32,57	32,54	32,51	32,47	32,44	32,41
Damião	10,44	10,67	10,91	11,15	11,38	11,62	11,85	12,09	12,32	12,55
Serraia	11,13	10,93	10,74	10,56	10,38	10,21	10,05	9,89	9,73	9,58
Solânea	50,70	50,21	49,71	49,21	48,70	48,20	47,70	47,20	46,70	46,20
Tacima (Campo de Santana)	18,80	18,78	18,76	18,74	18,72	18,70	18,68	18,67	18,65	18,63
Dona Inês	21,18	21,27	21,36	21,45	21,54	21,63	21,71	21,80	21,88	21,96
Riachão	7,03	7,16	7,28	7,41	7,53	7,66	7,78	7,90	8,03	8,15
Botoeira	10,33	10,41	10,50	10,58	10,66	10,74	10,81	10,89	10,96	11,03
Pirpirituba	20,01	19,99	19,97	19,95	19,93	19,92	19,90	19,88	19,86	19,84
Belaém	33,79	33,90	34,01	34,11	34,22	34,32	34,42	34,52	34,62	34,72
Sertãozinho	9,75	10,04	10,33	10,62	10,90	11,19	11,47	11,76	12,04	12,33
Duas Estradas	6,49	6,39	6,29	6,20	6,10	6,01	5,92	5,84	5,76	5,68
Serra da Raiz	5,91	5,86	5,81	5,76	5,71	5,66	5,61	5,56	5,52	5,47
Caçara	14,23	14,25	14,26	14,28	14,29	14,30	14,32	14,33	14,35	14,36
Lagoa de Dentro	14,26	14,27	14,29	14,30	14,32	14,33	14,35	14,36	14,37	14,39
Logradouro	7,90	7,98	8,05	8,12	8,18	8,25	8,31	8,38	8,44	8,50
TOTAL	394,53	395,28	396,01	396,73	397,43	398,13	398,80	399,47	400,12	400,76
EIXO SERIDÓ										
Algodão de Landeira	4,82	4,86	4,90	4,94	4,98	5,01	5,05	5,08	5,12	5,15
Barra de Santa Rosa	26,83	26,93	27,03	27,13	27,23	27,34	27,44	27,54	27,65	27,75
Soesó	6,48	6,60	6,71	6,82	6,93	7,04	7,15	7,26	7,37	7,49
Barralva	8,95	9,19	9,42	9,65	9,88	10,11	10,34	10,57	10,80	11,03
Cunã	38,86	38,84	38,82	38,80	38,78	38,76	38,74	38,72	38,70	38,68
Nova Floresta	21,08	21,34	21,60	21,86	22,13	22,41	22,70	22,99	23,29	23,60
Frei Martinho	5,78	5,79	5,81	5,82	5,83	5,84	5,86	5,87	5,88	5,89
Nova Palmeira	8,79	8,96	9,14	9,33	9,52	9,73	9,94	10,16	10,39	10,63
Picuí	37,08	37,30	37,51	37,71	37,91	38,11	38,31	38,49	38,68	38,86
TOTAL	158,68	159,80	160,93	162,07	163,21	164,36	165,52	166,70	167,89	169,10
ADUTORA DE ACAUÁ										
Arcoverde	36,83	36,75	36,66	36,58	36,50	36,42	36,34	36,26	36,18	36,10
Gado Bravo	16,02	15,98	15,94	15,91	15,87	15,83	15,80	15,76	15,73	15,69
Itabalana	46,82	46,62	46,41	46,22	46,02	45,82	45,63	45,44	45,25	45,06
Juripiranga	20,12	20,19	20,26	20,33	20,40	20,47	20,54	20,61	20,68	20,75
Pilar	22,69	22,86	23,03	23,19	23,35	23,50	23,65	23,80	23,95	24,09
Salgado de São Félix	23,50	23,46	23,42	23,38	23,33	23,29	23,25	23,21	23,17	23,13
Riachão do Poço	7,54	7,47	7,40	7,33	7,26	7,19	7,13	7,06	7,00	6,94
São Miguel de Taipu	14,48	14,79	15,10	15,41	15,71	16,02	16,33	16,63	16,94	17,25
Fagundes	21,90	21,78	21,66	21,54	21,42	21,31	21,19	21,08	20,96	20,85
Itabaíba	20,03	20,15	20,28	20,41	20,55	20,68	20,82	20,96	21,10	21,24
Inglá	35,78	35,89	36,01	36,13	36,25	36,37	36,49	36,61	36,73	36,86
Juarez Távora	14,80	14,86	14,91	14,97	15,02	15,07	15,13	15,19	15,24	15,30
Mogéio	23,60	23,48	23,35	23,22	23,10	22,98	22,86	22,74	22,62	22,50
Riachão do Bacamarte	8,49	8,55	8,60	8,65	8,71	8,76	8,81	8,86	8,91	8,95
TOTAL	312,60	312,82	313,04	313,26	313,49	313,72	313,96	314,20	314,45	314,70

ANEXO 9: Dados dos censos de 1996, 2000, 2007 e 2010 e estimativa populacional e da demanda de abastecimento urbano de 2013 a 2022

ADUTORA DE CAMALAU	Municípios		1996	2000	2007	2010	2013	2014	2016	2018	2019	2020	2021	2022		
	Zabele	São Sebastião do Umbuzeiro	2084	1853	2024	2075	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	2047
			2378	2894	3061	3239	3360	3394	3428	3460	3491	3522	3551	3580	3608	3635
			4168	4481	4578	4396	4570	4585	4600	4615	4630	4644	4658	4672	4686	4699
			5703	5516	5781	5749	5774	5784	5793	5803	5813	5822	5832	5842	5852	5862
			14333	14744	16424	16459	16733	16794	16864	16913	16970	16927	16982	16137	16190	16243
			26471	27687	29980	30844	31805	32116	32426	32736	33045	33353	33662	33970	34277	34584
			4664	4602	4770	4692	4728	4732	4737	4742	4747	4751	4756	4761	4765	4770
			15331	15035	16456	16072	16564	16656	16750	16844	16940	17036	17134	17232	17332	17433
			1598	1886	2007	2088	2170	2190	2211	2230	2249	2268	2286	2303	2320	2336
			1230	1422	1705	1771	1863	1914	1945	1975	2005	2034	2063	2092	2120	2147
			7113	7605	7105	7164	7177	7170	7162	7155	7148	7141	7134	7127	7120	7113
			2916	2823	2974	2926	2939	2942	2945	2948	2950	2953	2956	2959	2962	2965
			3454	3425	3696	3854	3992	4031	4070	4110	4151	4192	4235	4278	4322	4367
			2887	2789	2985	3159	3172	3197	3222	3248	3273	3300	3326	3354	3381	3409
			1243	1437	1245	1256	1283	1282	1280	1279	1278	1276	1275	1274	1273	1271
			2789	2800	2641	2638	2587	2573	2560	2546	2532	2518	2503	2489	2475	2460
			4631	4703	4438	4344	4296	4271	4246	4221	4195	4170	4144	4118	4092	4066
			4254	4136	3973	3985	3885	3877	3859	3841	3824	3806	3789	3772	3755	3738
			12539	12275	12413	12971	12672	12685	12697	12710	12723	12735	12748	12761	12773	12786
							132	134	135	136	138	139	141	142	143	145
							327	329	330	331	332	333	335	336	337	338
			91120	92826	96688	97766	99621	100099	100675	101061	101529	102005	102487	102967	103447	103930
			6472	6979	6787	6814	6911	6926	6940	6954	6967	6981	6995	7008	7021	7034
			7105	7701	7929	7991	8215	8261	8306	8350	8394	8436	8477	8518	8558	8597
			10121	11577	11451	11352	11801	11860	11918	11975	12031	12086	12140	12193	12245	12296
			3997	3459	4017	4019	3911	3915	3919	3923	3927	3931	3935	3938	3942	3946
			4819	5032	5785	5939	6271	6371	6472	6575	6679	6784	6891	7000	7110	7222
			13302	13289	14715	14838	15467	15632	15800	15972	16148	16328	16512	16700	16892	17089
			12913	11953	13685	14153	14443	14592	14743	14898	15055	15217	15381	15550	15722	15898
			58729	60000	64369	65208	67020	67567	68098	68646	69200	69762	70331	70907	71491	72083
			3191	3401	3824	3899	4068	4114	4159	4204	4248	4292	4336	4379	4421	4464
			1815	2189	2265	2420	2493	2517	2541	2563	2585	2607	2628	2648	2669	2687
			5006	5590	6099	6319	6561	6631	6700	6767	6834	6899	6963	7027	7089	7150

ADUTORA DO CONGO

EIXO SERRA DE TEIXEIRA

LEITO DO RIO

			1815	2189	2265	2420	2493	2517	2541	2563	2585	2607	2628	2648	2669	2687
			5006	5590	6099	6319	6561	6631	6700	6767	6834	6899	6963	7027	7089	7150

Continuação do ANEXO 9

	Municípios	1996	2000	2007	2010	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
EIXO CENTRAL	Puxinanã	11343	11981	12881	12929	13326	13413	13498	13581	13662	13742	13819	13895	13970	14043
	Montadas	3884	3969	4558	4990	5262	5385	5514	5650	5792	5941	6099	6265	6440	6625
	Areial	6127	6039	6234	6470	6467	6494	6521	6549	6577	6605	6633	6662	6690	6719
	Esperança	27604	28166	29801	31095	31722	32017	32318	32625	32938	33257	33582	33913	34251	34596
	Lagoa Seca	22982	24154	24937	25911	26189	26335	26478	26617	26754	26889	27020	27150	27276	27401
	Alagoa Nova	16466	18575	19163	19686	19309	19407	19503	19597	19689	19780	19869	19956	20042	20127
	São Sebastião de Lagoa de Roça	9605	10026	10908	11041	11335	11413	11489	11563	11636	11706	11776	11843	11909	11974
	Alagoa Grande	30004	29169	27448	28482	27442	27315	27190	27065	26942	26820	26699	26580	26462	26345
	Areia	25849	26131	24992	23937	23789	23643	23497	23350	23204	23057	22910	22763	22616	22469
	Matinhas	6035	4086	4178	4316	3688	3618	3550	3485	3422	3361	3303	3246	3192	3140
	Remígio	14695	14914	16748	17562	18345	18639	18944	19259	19584	19921	20269	20630	21004	21391
TOTAL	174594	177210	181848	186339	188876	187679	188503	189340	190199	191079	191978	192902	193852	194830	
EIXO BREJO	Arara	10220	11530	12356	12853	13123	13235	13345	13451	13554	13654	13752	13848	13941	14031
	Casserengue	6028	6568	6762	7058	7180	7228	7274	7320	7365	7408	7451	7493	7534	7574
	Araruna	15496	16605	19191	18886	19577	19744	19906	20064	20217	20366	20511	20653	20791	20926
	Bananeiras	21817	21810	21670	21854	21766	21763	21761	21759	21757	21754	21752	21750	21748	21745
	Cacimba de Dentro	17249	16817	17108	16755	16818	16801	16784	16768	16751	16735	16718	16701	16685	16668
	Damião	3321	3645	4807	4900	5368	5489	5611	5732	5853	5974	6095	6216	6336	6457
	Serraria	8718	6678	6602	6238	5722	5621	5524	5430	5339	5251	5166	5084	5005	4928
	Solânea	29542	30658	27346	26689	26076	25820	25563	25306	25048	24791	24533	24275	24017	23758
	Tacima (Campo de Santana)	9848	9388	9549	10263	9666	9657	9647	9638	9628	9619	9609	9600	9590	9581
	Dona Inês	9833	10227	10832	10517	10890	10938	10985	11031	11077	11122	11166	11209	11252	11294
	Riachão	2449	2793	3405	3274	3616	3680	3745	3809	3873	3937	4001	4065	4129	4193
	Borborema	4152	4730	5009	5111	5312	5356	5399	5441	5482	5522	5560	5598	5635	5671
	Pirpirituba	10823	10198	10232	10319	10293	10283	10272	10262	10252	10242	10232	10222	10212	10201
	Belém	16254	16605	17173	17083	17380	17435	17490	17544	17597	17650	17702	17753	17804	17854
	Sertãozinho	2186	3444	4213	4395	5016	5164	5312	5459	5606	5753	5900	6047	6193	6339
	Duas Estradas	4857	3818	3748	3640	3340	3287	3236	3186	3138	3092	3046	3003	2960	2919
	Serra da Raiz	3624	3436	3130	3204	3042	3015	2988	2962	2936	2911	2886	2861	2837	2814
	Caçara	7138	7325	7314	7220	7320	7327	7334	7342	7349	7356	7364	7371	7378	7386
	Lagoa de Dentro	7339	7086	7258	7370	7334	7341	7349	7356	7363	7371	7378	7385	7392	7400
Logradouro	3117	3389	3816	3942	4064	4102	4139	4175	4209	4243	4276	4308	4339	4369	
TOTAL	194011	198750	201521	201371	202902	203286	203663	204034	204395	204750	205098	205441	205778	206106	

Continuação do ANEXO 9

	Municípios	1996	2000	2007	2010	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
EIXO SERIDÓ	Algodão de Jandaira	1906	2209	2342	2366	2477	2499	2519	2539	2559	2578	2596	2615	2632	2649
	Barra de Santa Rosa	13165	13127	12848	14160	13799	13850	13902	13954	14006	14059	14112	14165	14219	14273
	Sossêgo	2333	2598	2965	3173	3335	3392	3450	3507	3564	3622	3679	3736	3793	3850
	Baraúna	2455	3169	3864	4222	4604	4724	4843	4962	5081	5200	5318	5437	5555	5673
	Cuité	20257	19946	20197	19950	19986	19976	19968	19956	19946	19936	19925	19915	19905	19895
	Nova Floresta	9032	9421	10032	10533	10843	10973	11106	11243	11382	11526	11672	11823	11978	12137
	Frei Martinho	2812	2923	2935	2933	2972	2979	2986	2993	2999	3006	3012	3019	3025	3031
	Nova Palmeira	3474	3573	3934	4365	4520	4609	4702	4798	4898	5003	5112	5225	5345	5469
	Picuí	16291	17896	18716	18226	19072	19182	19290	19396	19499	19600	19700	19797	19893	19987
TOTAL	71725	74862	77833	79928	81609	82184	82763	83348	83934	84529	85126	85731	86344	86964	
ADUTORIA DE ACAUÁ	Aroeiras	19701	19520	19174	19089	18941	18898	18856	18814	18773	18731	18690	18649	18608	18567
	Gado Bravo	8577	8521	8236	8376	8237	8218	8199	8181	8162	8144	8125	8107	8089	8071
	Itabaiana	26248	25207	24752	24483	24079	23974	23870	23768	23666	23566	23466	23367	23269	23172
	Juripiranga	9949	9647	10240	10240	10346	10382	10417	10453	10489	10525	10561	10598	10635	10672
	Pilar	9571	10274	11301	11191	11670	11758	11844	11927	12009	12088	12165	12241	12315	12387
	Salgado de São Félix	12675	12046	12526	11976	12087	12065	12044	12022	12000	11979	11958	11936	11915	11894
	Riachão do Poço	5127	3694	4239	4164	3879	3841	3804	3768	3733	3698	3665	3631	3599	3567
	São Miguel de Taipu	4172	6086	6568	6696	7447	7606	7765	7923	8082	8240	8397	8555	8712	8870
	Fagundes	12623	11892	11830	11409	11265	11202	11140	11078	11017	10957	10897	10839	10781	10723
	Itatuba	9417	9374	9841	10201	10299	10365	10431	10499	10568	10637	10707	10778	10851	10924
	Ingá	17538	17473	18168	18180	18400	18460	18521	18582	18643	18705	18767	18829	18892	18956
	Juarez Távora	7279	7081	7618	7459	7614	7641	7669	7696	7724	7753	7781	7810	7838	7867
	Mogeirol	13332	13231	12305	12490	12139	12073	12008	11943	11880	11817	11755	11693	11633	11573
	Riachão do Bacamarte	3697	3948	4172	4264	4366	4395	4424	4451	4478	4504	4530	4555	4580	4604
TOTAL	169906	167994	160970	160218	160768	160878	160991	161105	161224	161344	161464	161588	161717	161847	