

UFCG / BIBLIOTECA

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS AGROINDUSTRIAIS**

CRISTIANE QUEIROZ REIS

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS
ENGENHEIRO ÁVIDOS E SÃO GONÇALO - PB**

**Pombal - PB
2014.**

CRISTIANE QUEIROZ REIS

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS
ENGENHEIRO ÁVIDOS E SÃO GONÇALO - PB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Agroindustriais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Sistemas Agroindustriais.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
Ciência e Tecnologia em Sistemas Agroindustriais.**

**LINHA DE PESQUISA:
Gestão e Tecnologia Ambiental em Sistemas Agroindustriais.**

ORIENTADORES: Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias
Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos

Pombal - PB
Fevereiro de 2014

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA SETORIAL
CAMPUS POMBAL/CCTA/UFCG**

DIS
R375a

Reis, Cristiane Queiroz.

Avaliação da sustentabilidade hídrica dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São
Gonçalo - PB/ Cristiane Queiroz Reis. - Pombal, 2014.

73fls.

Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) - Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2014.

"Orientação: Prof.º Pós-Dr.º Camilo Allyson Simões de Farias".

"Co-orientação: Prof.º Dr.º Valterlin da Silva Santos".

Referências.

1. Recursos Hídricos. 2. Reservatórios Hídricos - Sustentabilidade. I. Farias,
Camilo Allyson Simões de. II. Santos, Valterlin da Silva. III. Título.

UFCG/CCTA

CDU 628.17

CRISTIANE QUEIROZ REIS

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS
ENGENHEIRO ÁVIDOS E SÃO GONÇALO - PB**

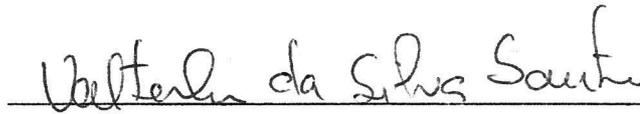
Aprovada em 28 de fevereiro de 2014.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr Camilo Allyson Simões de Farias (UFCG/CCTA)

Orientador



Prof. Dr Valterlin da Silva Santos (UFCG/CCJS)

Orientador



Prof.^a Dr.^a Rosinete Batista dos Santos (UFCG/CCTA)

Examinador Interno



Prof.^a Dr.^a Aline Costa Ferreira (CEDAC)

Examinador Externo

DEDICATÓRIA

*Às minhas filhas, Isabella e Lorena, ao meu esposo,
Adriano e aos meus pais, Francisco e Dijanilce
dedico-lhes esta conquista.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a **Deus**, por me dar a vida, saúde e oportunidades de aprimorar meus conhecimentos, e não me deixado fraquejar nas horas difíceis dando-me coragem e força para acreditar que tudo na vida é possível, basta ter fé e força de vontade.

Às minhas filhas, **Isabella e Lorena** e ao meu esposo, **Adriano**, pelo amor e compreensão pelas ausências e não ter podido me dedicar tanto o quanto eles merecem, principalmente, nesta etapa de conclusão do curso.

Aos meus pais, **Francisco e Dijanilce**, e meus irmãos, **Wendel, Welington e João Carlos**, pelo amor, apoio e incentivo em mais uma etapa da minha vida.

Aos meus orientadores, os professores, **Camilo Allyson e Valterlin**, pela orientação, paciência, dedicação e disposição em colaborar durante todo o trabalho.

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

Aos meus amigos do coração, **Vitória, Allan, Walnara e Adriana Lima**, pela amizade, paciência e disposição em ajudar-me na elaboração do trabalho e pelos momentos agradáveis compartilhados.

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

RESUMO

Os problemas decorrentes da escassez hídrica poderiam ser minimizados se houvesse um melhor aproveitamento das águas dos reservatórios existentes acompanhado de uma avaliação dos desempenhos dos mesmos por meio de indicadores de sustentabilidade bem definidos. Este trabalho tem como objetivo analisar a sustentabilidade hídrica do sistema de reservatórios composto pelos açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo quanto aos seus múltiplos usos e identificar os problemas relativos ao uso inadequado de suas águas. Esse sistema de reservatórios está localizado no semiárido paraibano, uma região em que a escassez hídrica prejudica e limita o desenvolvimento econômico e social, além de ser fonte de conflitos entre os diversos usuários da água. Os principais usos desses reservatórios são atendimento da demanda de duas importantes cidades paraibanas, Sousa e Cajazeiras, e do Perímetro Irrigado de São Gonçalo. A metodologia consistiu em analisar dois cenários operacionais por meio do Sistema de Suporte de Decisão Acquanet. O desempenho de cada cenário foi avaliado com base nos indicadores de sustentabilidade propostos por Hashimoto *et al* (1982). Como resultado, constatou-se que a situação operacional dos reservatórios é crítica, com os atendimentos das diversas demandas comprometidas. Em um segundo cenário, em que se considerou a futura contribuição das águas da transposição do rio São Francisco, observou-se que foi possível garantir o atendimento das demandas de abastecimento urbano e difuso em sua totalidade. Entretanto, averiguou-se que as alocações para as demandas de irrigação ainda apresentariam certa vulnerabilidade.

Palavras-chave: Recursos hídricos; operação de reservatórios; indicadores de sustentabilidade.

ABSTRACT

Water scarcity-related problems could be minimized if there was a better use of existing water reservoirs together with an assessment of their performances by means of well-defined sustainability indicators. This study aims at analyzing the sustainability of the multipurpose system of reservoirs composed by Engenheiro Ávidos Dam and São Gonçalo Dam, and identifying problems related to the inappropriate use of their waters. This system is located in a semiarid land of Paraíba State, Brazil, a region where water scarcity undermines and limits the economic and social development, besides being a source of conflicts between the various water users. The main objectives of the reservoirs are meeting the water demands of two important cities of Paraíba State (Sousa and Cajazeiras), and the Irrigated Perimeter of São Gonçalo. The methodology consisted of analyzing two operating scenarios by using the ACQUANET decision support system. The performance of each scenario was based on the sustainability indicators proposed by Hashimoto et al (1982). As a result, it was found that the operational status of the reservoirs is critical, with the allocation of various demands compromised. In a second scenario, considering the future water transfer from São Francisco river, it was observed that the demands of urban and diffuse supplies were fully attended. The allocations for irrigation requirements, on the other hand, would still be subject to certain levels of vulnerability.

Keywords: Water resources; reservoir operation; sustainability indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução anual do Reservatório Engenheiro Ávidos	14
Figura 2 - Evolução anual do Reservatório São Gonçalo.....	14
Figura 3 - Distribuição da água no Planeta	17
Figura 4 - Distribuição (%) da água por continentes.....	17
Figura 5 - Distribuição dos recursos hídricos por regiões do Brasil.	18
Figura 6 - Região do Alto Curso do Rio Piranhas.....	27
Figura 7 - Fluxograma da metodologia utilizada.....	29
Figura 8 - Layout do sistema estudado.....	30
Figura 9 - Interface do AcquaNet.....	35
Figura 10 - Tela de definições gerais.....	36
Figura 11 - Tabela para entrada e edição de dados dos reservatórios	37
Figura 12 - Tela de elementos dos resultados no modo simulação contínua.	38
Figura 13 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Cajazeiras - PB	42
Figura 14 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Nazarezinho - PB	43
Figura 15 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Sousa - PB e Marizópolis - PB.....	43
Figura 16 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento difuso de São Gonçalo - PB	44
Figura 17 - Cenário 1: Comportamento do volume do Reservatório Engenheiro Ávidos	45
Figura 18 - Cenário 1: Comportamento do volume do Reservatório São Gonçalo.....	45
Figura 19 - Cenário 1: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório de Engenheiro Ávidos	46
Figura 20 - Cenário 1: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório de São Gonçalo.....	46
Figura 21 - Cenário 1: Atendimento às demandas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo - PB	47

Figura 22 - Cenário 2: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Cajazeiras - PB	50
Figura 23 - Cenário 2: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Nazarezinho - PB	51
Figura 24 - Cenário 2: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Sousa - PB e Marizópolis - PB.....	51
Figura 25 - Cenário 2: Atendimento às demandas de abastecimento difuso de São Gonçalo - PB	52
Figura 26 - Cenário 2: Comportamento do volume de água do Reservatório Engenheiro Ávidos.....	53
Figura 27 - Cenário 2: Comportamento do volume de água do Reservatório São Gonçalo. ...	53
Figura 28 - Cenário 2: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório Engenheiro Ávidos	54
Figura 29 - Cenário 2: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório São Gonçalo.....	55
Figura 30 - Cenário 2: Atendimento às demandas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demanda média mensal para o PISG e a irrigação difusa no entorno do reservatório São Gonçalo.....	31
Tabela 2 - Dados de evaporação média mensal do tanque “Classe A” e do coeficiente <i>kt</i>	32
Tabela 3 - Parâmetros Estatísticos do Reservatório Engenheiro Ávidos	32
Tabela 4 - Parâmetros Estatísticos do Reservatório São Gonçalo.....	32
Tabela 5 - Cenário 1: Indicadores de sustentabilidade	47
Tabela 6 - Cenário 1: Média mensal dos vertimentos dos reservatórios.	49
Tabela 7 - Cenário 1: Média mensal de evaporação dos reservatórios	49
Tabela 8 - Cenário 2: Indicadores de Sustentabilidade	56
Tabela 9 - Cenário 2: Média mensal de vertimento dos reservatórios.	57
Tabela 10 - Cenário 2: Média mensal para evaporação dos reservatórios.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
CAGEPA	Companhia de Águas e Esgoto do Estado da Paraíba
Conf.	Confiabilidade
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LABSID	Laboratório de Sistema de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PB	Paraíba
PD	Programação Dinâmica
PDRH	Plano de Desenvolvimento de Recursos Hídricos
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PISG	Perímetro Irrigado de São Gonçalo
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não Linear
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
Res.	Resiliência
SCIENTEC	Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia
SEMARH	Secretaria Extraordinária de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SSD	Sistema de Suporte de Decisão
USP	Universidade de São Paulo
Vul.	Vulnerabilidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Água: Histórico e sua Situação no Planeta, no Brasil e no Semiárido Nordestino	16
2.2	Política Nacional dos Recursos Hídricos	20
2.3	Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos	21
2.3.1	Otimização	22
2.3.2	Simulação	23
2.4	Operações de Reservatórios	24
3	METODOLOGIA	27
3.1	Área de Estudo	27
3.2	Propostas para Operação do Sistema	28
3.3	Dados do Sistema	29
3.3.1	Demandas Hídricas	29
3.3.2	Evaporação	31
3.3.3	Vazões Afluentes	32
3.3.4	Dados dos reservatórios e critérios operacionais	33
3.4	Sistema de Suporte a Decisão - AcquaNet	34
3.5	Indicadores de Sustentabilidade	38
3.5.1	Confiabilidade	39
3.5.2	Resiliência ou Elasticidade	40
3.5.3	Vulnerabilidade	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Cenário 1	42
4.2	Cenário 2	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Na história da humanidade, observa-se que o Homem utilizou dos recursos naturais de forma desordenada nem sempre se preocupando com o seu esgotamento. Com o passar dos anos, as demandas por esses recursos foram crescendo de forma mais rápida que a capacidade de recuperação da própria natureza, provocando assim a escassez e/ou prejudicando a qualidade de determinados recursos. Um exemplo que pode ser citado dessa realidade é o comportamento da humanidade perante os recursos hídricos.

A água possui diversos usos, segundo a Lei 9.433/97, a prioridade absoluta é para o abastecimento humano e dessedentação animal, seguido de abastecimento industrial e irrigação. E como usos secundários, a piscicultura, energia e lazer (FARIAS, 2004).

No entanto, na região semiárida do nordeste brasileiro, atender esses usos é o principal problema, devido à ocorrência de secas periódicas e a intermitência dos escoamentos superficiais. Essa escassez hídrica, em certas épocas, acaba prejudicando e limitando o desenvolvimento econômico e social da região além de ser uma fonte de conflitos (FARIAS, 2009).

Uma das soluções apresentadas para minimizar esse problema foi à construção de reservatórios para armazenamento da água objetivando uso posterior, às custas de elevadas perdas de água por evaporação (FARIAS, 2004).

Observa-se que construir reservatórios por si só não resolve o problema da escassez de água na região, sendo necessária a implementação de políticas operacionais do uso das águas desses reservatórios. Tais operações podem ser avaliadas pelo uso de indicadores que auxiliam na análise do desempenho do sistema hídrico, especialmente em períodos críticos de seca, além de dar melhores condições para o analista prever cenários (CELESTE, 2006).

Dessa forma, este trabalho tem como questão problema: os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, situados na região semiárida do estado da Paraíba, conseguem atender às suas demandas de maneira sustentável?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a sustentabilidade hídrica dos reservatórios Engenheiro Ávida e São Gonçalo quanto ao atendimento dos seus múltiplos usos, considerando a operação conjunta dos reservatórios e o incremento da vazão oriunda da transposição do rio São Francisco.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar os principais usos da água no sistema.
- Propor cenários com vistas à operação do sistema de modo a definir prioridades de atendimento, visando promover o uso eficiente da água.
- Simular os cenários propostos utilizando o modelo AcquaNet.
- Avaliar o comportamento operacional do sistema hídrico com base nos resultados da simulação para cada cenário a partir do uso de indicadores de sustentabilidade.
- Avaliar o comportamento do sistema com o incremento da vazão exógena advinda da transposição do rio São Francisco.

1.2 Justificativa

Os reservatórios Engenheiros Ávidos e São Gonçalo são responsáveis pelo abastecimento de água de duas importantes cidades paraibanas, Cajazeiras e Sousa, além das cidades de Marizópolis, Nazarezinho e dos distritos de Engenheiros Ávidos e São Gonçalo. De acordo com o censo de 2010, essas cidades possuem uma população total de 107.249 habitantes (IBGE, 2010). Os reservatórios também são usados para suprir as demandas hídricas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), que possui uma área total de 3.139 ha, e demandas difusas no entorno dos reservatórios.

A principal atividade econômica e maior consumidora de água da região é a agricultura irrigada. Como consequência dos diversos usos de água existentes e em virtude dos recorrentes episódios de seca, a região apresenta problemas de escassez hídrica (FARIAS, 2004).

De acordo com Freitas (1999) apud FARIAS (2004) em 1998, por determinação judicial, foi proibida a transferência de água do reservatório Engenheiro Ávidos para o reservatório de São Gonçalo, gerando um grande conflito pelo uso da água na região. Essa decisão foi decorrente de ação da Curadoria do Meio Ambiente da cidade de Cajazeiras, ao entender que a transposição colocaria em risco o abastecimento de água da cidade.

Atualmente, o volume de água do Reservatório Engenheiro Ávidos é de 30.319.356 m³, o que representa 11,9% de sua capacidade. Já o Reservatório São Gonçalo está com um volume de água de 7.820.160 m³, o que representa 17,5% de sua capacidade total (AESAs, 2014).

Para uma melhor análise desses reservatórios, tem-se nas Figuras 1 e 2 a evolução do volume de água armazenado nos últimos 10 anos.

Figura 1 - Evolução anual do Reservatório Engenheiro Ávidos



Fonte: AESA, 2014.

Figura 2 - Evolução anual do Reservatório São Gonçalo



Fonte: AESA, 2014

Esses dados demonstram o baixo nível de água em que se encontram os reservatórios, intensificando cada vez mais o problema de escassez hídrica na região.

A seca de 2012-2013 afetou a região e, principalmente, a produção agropastoril devido aos baixos volumes de água dos reservatórios, visto que a pouca água restante tem como prioridade o abastecimento humano e a dessedentação animal, conforme preconiza a Lei n.º 9.433 de 08 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Portanto, deve-se atender esse tipo de consumo antes de qualquer outro, inclusive o da irrigação, ficando as demais atividades, que dependem (deste) desse recurso prejudicadas pela falta.

Este estudo contribui para mostrar que esses reservatórios são de fundamental importância para o semiárido paraibano, sobretudo no que se refere aos aspectos econômicos e ao desenvolvimento da região, e que se faz necessária a garantia do nível mínimo de água para o consumo humano.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Água: Histórico e sua Situação no Planeta, no Brasil e no Semiárido Nordeste

Estima-se que a relação do homem com os corpos d'água existem há pelo menos dez mil anos, advinda da sua relação com a agricultura, em substituição a caça, que era a principal fonte de sustento dos povos da antiguidade. A partir daquela relação, deu-se início as primeiras culturas e a criação dos rebanhos.

Como consequência, reuniu-se progressivamente ao nomadismo, que caracterizava as primeiras comunidades, e a busca por fontes de abastecimento dos primeiros povoados às margens dos cursos d'água, provavelmente na região da Mesopotâmia (Iraque). A partir daí delineou-se clara identificação dos primeiros povoados, e posteriormente das primeiras cidades, com o curso d'água que margeia, muitas vezes emprestando-lhes o próprio nome. Consolidaram-se associações de, por exemplo, Viena e Budapeste ao Danúbio, Londres ao Tâmis, Paris ao Sena, Roma ao Tibre, entre outras tantas (LIBÂNIO, 2010, p. 16-17).

Assim, a posse de água, desde a antiguidade, já representava um instrumento de poder, onde na Mesopotâmia, há pelo menos quatro mil a.C. já se praticava o controle dos rios como forma de dominação dos povos que habitavam os setores hidrográficos de jusante (REBOUÇAS, 2006).

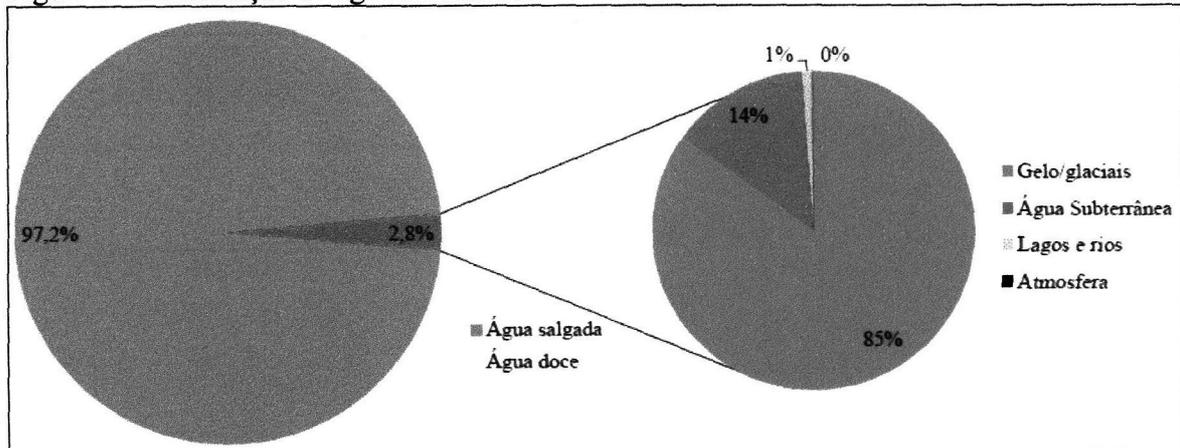
Portanto, a história da água na Terra tem relação direta com o crescimento populacional, o grau de urbanização e aos seus múltiplos usos, que afetam a quantidade e a qualidade.

Os usos da água geram conflitos em razão da sua multiplicidade e suas finalidades diversas, as quais demandam diferentes quantidades e qualidades. A água para abastecimento público, hidroeleticidade, agricultura, transporte, recreação e turismo, disposição de resíduos, indústria, todos esses usos são conflitantes e tem gerado tensões, em muitos casos resolvidas nos tribunais, e também produzindo muitos problemas legais (TUNDISI; TUNDISI, 2011, p.24).

Embora exista muita água no planeta, ou seja, 2/3 da superfície da Terra, onde o maior volume, 97,20%, está nos oceanos na qualidade de água salgada, sendo, portanto, inadequadas para o consumo humano e animal, bem como para o desenvolvimento de atividades agrícolas, e apenas 2,80% é de água doce, como pode ser observado na Figura 3. Do total de água doce, cerca de 2,38% está concentrada nas regiões polares. Outros 0,39% equivalem às águas subterrâneas, armazenadas no subsolo, o que dificulta a sua utilização, 0,001% está presente

na atmosfera; e somente 0,029 % do volume de água estão disponível efetivamente em rios e lagos superficiais para as diversas atividades humanas (VICTORINO, 2007).

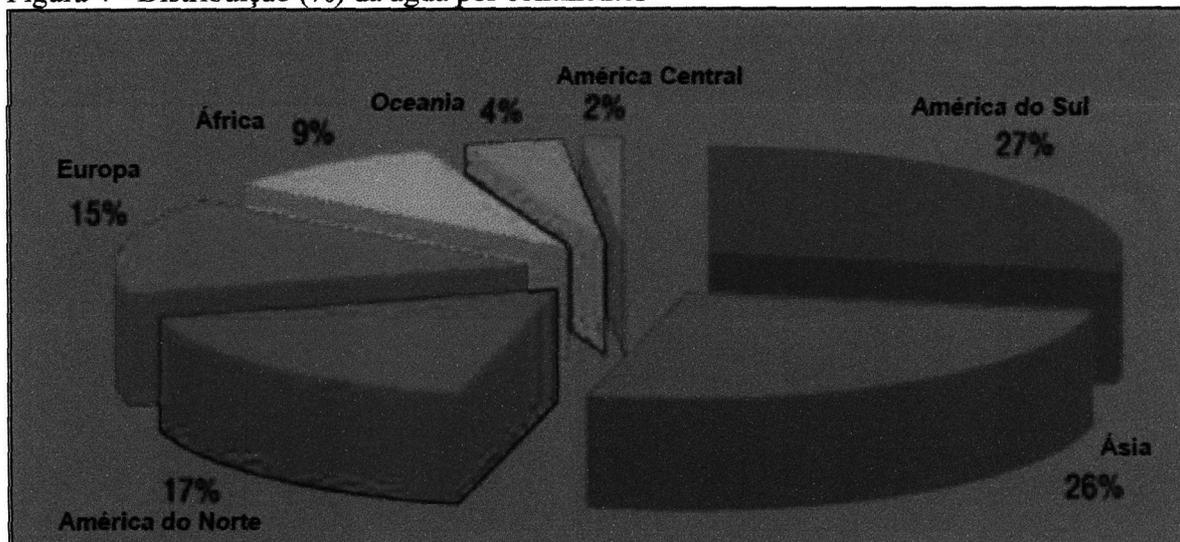
Figura 3 - Distribuição da água no Planeta



Fonte: Adaptado de VICTORINO, 2007, p. 16.

A má distribuição de água no Planeta reflete-se também em má distribuição nos continentes e, conseqüentemente, nas Américas, desencadeando, através dessa realidade, os problemas de abastecimento no mundo, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Distribuição (%) da água por continentes



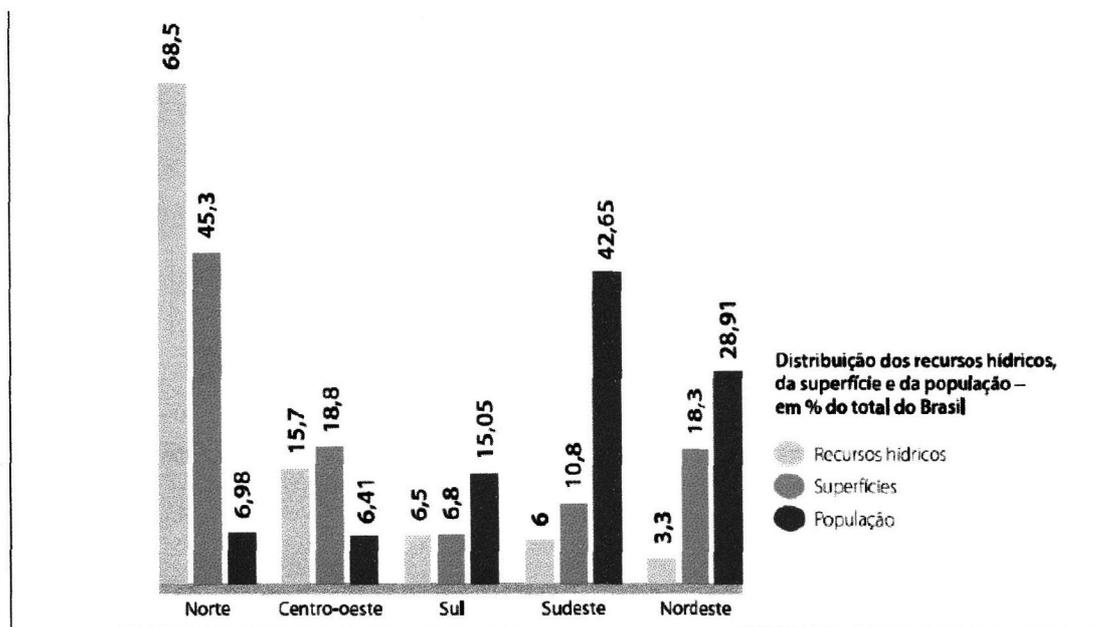
Fonte: Curi; Santos, 2008, p.4.

O Brasil com 28% das disponibilidades hídricas das Américas é um país privilegiado por possuir uma das maiores reservas de água doce do planeta, o rio Amazonas, que é considerado o maior em extensão e volume (RIBEIRO, 2003).

Em contraponto a essa realidade, o Brasil tem diversos problemas de abastecimento decorrentes, principalmente, de uma expansão desordenada dos processos de urbanização e industrialização, verificada a partir da década de 1950, aliadas essencialmente, a um crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas, em níveis nunca imaginados (REBOUÇAS, 2006), decorrentes também dos seus diversos usos como: abastecimento público em áreas urbanas, irrigação, uso industrial, navegação, pesca e piscicultura, agricultura, hidroeletricidade, abastecimento em áreas rurais, turismo e recreação (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011).

O Brasil, em decorrência de suas dimensões continentais, possui características hidrológicas, geológicas e climáticas muito variadas, fato que se verifica na distribuição da água e na forma de uso, em todo o território, de forma desproporcional, conforme se pode observar na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição dos recursos hídricos por regiões do Brasil.



Fonte: MMA, 2005; p.29.

Verifica-se na Figura 5 que na Região Norte, onde se encontra a Amazônia, a população é de menos de 7% do país, e os recursos hídricos disponíveis nessa região representam cerca de aproximadamente 70% do total disponível no Brasil. Por outro lado, a Região Nordeste, que abriga quase 29% da população, possui apenas 3,3% de toda a água doce do país (BRITO; SILVA; PORTO, 2007).

Os dados apresentados só vêm a demonstrar a problemática da água, e o Brasil é um país que não foge deste contexto, enfrentando diversos problemas decorrentes da falta e do mau uso desse recurso em todo o território.

Logo, quando se trata de sustentabilidade hídrica, é necessário reportar-se, primeiramente, ao conceito de desenvolvimento sustentável, que foi introduzido pelo relatório “Nosso Futuro Comum”, criado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, publicado em 1987. Este relatório refere-se à utilização dos recursos naturais de forma ordenada, sem que se possa comprometer a sua utilização pelas gerações futuras, ou seja, que as futuras gerações tenham o direito e possam usufruir dos mesmos recursos que temos hoje, assim precisamos garantir a sua existência.

Assim, a sustentabilidade hídrica de um reservatório consiste em gerenciar esse recurso de forma que não sejam limitadas as suas disponibilidades para as futuras gerações.

O Nordeste brasileiro, mais especificamente o semiárido, é uma região que compreende 1.135 municípios distribuídos nos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e Minas Gerais, ocupando uma área de 980.133,079 km², onde vivem 22.598.318 habitantes, que representam aproximadamente 12% da população do Brasil (IBGE, 2010). Essa região possui características peculiares em relação ao restante do país, com uma grande variabilidade de chuvas de um ano para outro, as quais se concentram basicamente nos meses de fevereiro a maio, diminuindo a disponibilidade hídrica na região (CIRILO; MONTENEGRO; CAMPOS, 2010).

Mesmo com todos os problemas relacionados à questão hídrica, a região do semiárido:

Apresenta ótimas condições para o desenvolvimento da agricultura, tendo em vista a disponibilidade de energia solar, o que permite excelente crescimento vegetativo durante o ano todo, e baixa umidade relativa na atmosfera, que limita o desenvolvimento, especificamente das doenças das plantas. Essa região é limitada pela falta de água nos momentos necessários às atividades agrícolas e com uma regularização certa que permitam investimentos mais seguros para agroindústria (SALITI; LEMOS; SALITI, 2010, p. 37).

Neste contexto, a sustentabilidade hídrica do semiárido nordestino poderia ser obtida se tivesse uma manutenção contínua de um uso racional da água, em quantidade e qualidade, favorecendo a sua oferta e elevando os níveis de garantia e a demanda social para os seus múltiplos usos (VIEIRA, 2002).

Uma das soluções encontradas para resolver o déficit de água da região é o transporte de água de outras bacias hidrográficas. No caso do semiárido nordestino, espera-se que esse problema seja resolvido com a transposição das águas do rio São Francisco.

2.2 Política Nacional dos Recursos Hídricos

Em 1988, foi promulgada a Constituição Federal do Brasil, que abriu as portas no país para a elaboração de uma legislação específica sobre os recursos hídricos, que também teve o apoio das constituições estaduais de 1989, quando ocorreu a institucionalização de sistemas estaduais de gerenciamento (VIEIRA; GONDIM FILHO, 2010).

Apesar da Constituição de 1988 prever a instituição de Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, a lei correspondente, a ser contemplada por outra (Projeto de Lei nº 1.616/00) e regulamentada por decreto, somente foi editada em 1997, isto é, após nove anos (POMPEU; 2006, p. 678).

Em 08 de janeiro de 1997, foi promulgada a Lei n.º 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e que se trata do reordenamento das ações relativas à gestão dos recursos hídricos no Brasil e do principal instrumento para a atualização dos Planos de Recursos Hídricos em nível estadual, regional ou em bacias hidrográficas (ANA, 2009). A PNRH permite a definição de uma agenda que identifica ações de gestão, planos, projetos, obras e investimentos com uma clara apresentação de prioridades para cada região ou bacia hidrográfica. A lei também criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

A Lei n.º 9.433 baseia-se nos seguintes fundamentos:

- I - a água é um bem de domínio público;
- II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (BRASIL, 1997).

Os objetivos da PNRH são:

- I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;
- III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (BRASIL, 1997).

Assim, a União deve articular-se com os Estados, tendo em vista que o gerenciamento dos recursos hídricos é de interesse comum (BRASIL, 1997).

2.3 Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos

Em planejamento de sistemas de recursos hídricos, uma das questões mais discutidas está relacionada à escolha da melhor alternativa de operação do sistema, ou seja, como escolher e formalizar critérios que orientarão essa escolha. Neste contexto, Santos (2007, p.6) acrescenta que:

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

Na busca de respostas para os problemas de planejamento e gestão dos recursos hídricos, utilizam-se como alternativas os modelos em sistemas de recursos hídricos que são comumente feitos por meio de aplicação de elaboradas metodologias matemáticas e computacionais, que incluem técnicas de otimização e simulação (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993; WURBS, 2005; LABADIE, 2004).

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos abordando as técnicas de otimização e simulação para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, dentre eles destaca-se os trabalhos de Yeh (1985), Simonovic (1992) e Wurbs (1993), que apresentam revisões sobre a modelagem da operação dos sistemas de reservatórios com ênfase em aplicações práticas desses modelos.

Para Lanna (1997) e Lanna (2002), os dois os grandes propósitos da análise de sistemas de recursos hídricos são: simular o comportamento da realidade que eles representam e otimizar os processos decisórios que atuam sobre a realidade. Lima & Lanna (2005) ressaltam que a escolha da metodologia dependerá das particularidades do sistema em análise.

2.3.1 Otimização

Otimização é um conjunto de técnicas que tem como objetivo encontrar um conjunto de valores para as variáveis de decisão que maximizem ou minimizem a função objetiva, respeitando as restrições impostas ao sistema. Sua principal vantagem é a geração de soluções ótimas, de forma simultânea, com resultados que respeitam as restrições atribuídas (FARIAS, 2009).

Os principais métodos de otimização aplicados em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos são: Programação Linear (PL), Programação Dinâmica (PD) e Programação Não Linear (PNL).

PL é uma técnica de modelo de otimização amplamente utilizada na operação de reservatórios e tem a finalidade de resolver um tipo de problema especial, em que os objetivos e restrições são funções lineares das variáveis de decisão. Mesmo quando as funções não são lineares, a PL tem sido utilizada com o auxílio de processos de linearização de funções (CELESTE, 2006).

De acordo com Lima (2004), a maior limitação da PL encontra-se na necessidade de haver relações lineares entre as variáveis, condição não atendida na maioria dos problemas em recursos hídricos. Farias (2009) identificou diversas ferramentas computacionais onde problemas de PL podem ser implementados e resolvidos, como o SOLVER do EXCEL, MATLAB, entre outras.

Aplicações da técnica de PL podem ser encontradas nos trabalhos de Loucks et al. (1981); Braga (1987); Mohan & Raipure (1992); Crawley & Dandy (1993); Francato & Barbosa (1996); Feiring et al. (1998); Srinivasan et al. (1999); Mousavi & Ramamurthy (2000); Santos (2007), entre outros.

A **Programação Dinâmica (PD)** é aplicada especialmente em problemas sequenciais de decisão de múltiplos estágios, nos quais o tomador de decisão se depara com o mesmo tipo de problema em vários estágios. A PD se aproveita dessa característica para decompor um

problema amplo em vários subproblemas menores de um estágio compartilhado. A PD pode manipular funções não-lineares, não-convexas e descontínuas, porém existe uma limitação, se a mesma for utilizada em sistemas de múltiplos reservatórios, a chamada “praga da dimensionalidade”. A “praga da dimensionalidade” consiste no aumento do tempo computacional, que cresce exponencialmente com o número de variáveis de estado. (YEH, 1985)

Outras aplicações de PD, especialmente na operação de reservatórios, podem ser verificadas nos trabalhos de Karamouz et al.(1992); Drouin et al. (1996); Mighalland et al. (1997); Lima & Lanna (2001); entre outros.

A **Programação Não-Linear** (PNL) é uma técnica de otimização que com o advento da tecnologia computacional e o desenvolvimento de novos algoritmos de programação vem contornando os problemas de processamento e armazenamento computacional que era lento e exigia uma alta capacidade (Yeh, 1985). Essa técnica não possui a mesma popularidade da PL e PD em análise de sistemas de recursos hídricos.

A PNL possui como grande vantagem a sua abrangência, oferecendo uma formulação matemática mais geral, não necessitando de simplificações. Como desvantagens, está a incerteza de que em muitos casos a solução ótima obtida poderá não ser global devido a não-linearidade dos problemas e da já citada necessidade de um grande tempo de processamento na busca da solução ótima (CIRILO, 1997).

Outros trabalhos no âmbito de PNL podem ser vistos em Yeh (1985); Simonovic (1992); Wurbs (1993); Wurbs (2005); Labadie (2004); Lima & Lanna (2005) entre outros.

2.3.2 Simulação

A simulação é caracterizada como uma representação matemática de um sistema físico com a finalidade de estudar e prever o comportamento dentro de certo conjunto de condições iniciais, ou seja, é uma técnica de modelagem usada para aproximar o comportamento espacial e/ou temporal de um sistema, representando as principais características por meio de equações matemáticas (SANTOS, 2011).

A principal vantagem da técnica de simulação é a flexibilidade, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática mais

detalhada e realista, devido ao requerimento para se resolver um sistema de equações associado a um instante de tempo de cada vez (SANTOS, 2011).

O modelo de rede de fluxo AcquaNet é uma versão aprimorada do modelo MODSIM, que utiliza-se de técnicas de simulação. Com ele podem-se montar redes com um grande número de reservatórios, demandas, trechos de canais, rios e adutoras, e para cada trecho pode-se atribuir um percentual de perdas em trânsito (USP, 2002).

Celeste (2006) utilizou o AcquaNet para verificar o comportamento, em longo prazo, de seis reservatório localizados na bacia do rio Piancó na Paraíba.

Aragão (2008) aplicou o AcquaNet na avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica da transposição das águas do rio São Francisco na bacia do rio Paraíba, no Estado da Paraíba e concluiu que o maior ganho sinérgico ocorreu quando a transposição das águas do São Francisco foi realizada por adutoras.

Collischonn e Lopes (2008) utilizaram o AcquaNet para determinar o efeito da açudagem a montante sobre a disponibilidade hídrica do açude Epitácio Pessoa (PB). Os resultados obtidos mostraram que o conjunto de reservatórios a montante acarreta uma diminuição de 20% na vazão regularizada.

Farias (2009) empregou o modelo de rede de fluxos AcquaNet na bacia hidrográfica do rio Paraíba, com o incremento da vazão exógena de 4,2 m³/s do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), para simular uma série de 59 anos, considerando seis cenários. Em todos os cenários, devido ao incremento de vazão do PISF, não ocorreram falhas no atendimento às demandas do sistema.

Os modelos de simulação são largamente utilizados em todo o mundo no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos em sistemas de múltiplos reservatórios, visto a facilidade de trabalhar com a estipulação de cenários, sem a necessidade de muitas simplificações na construção, o que não acontece com os modelos de otimização.

2.4 Operações de Reservatórios

Na natureza, a água ocorre de forma variável no espaço e no tempo. Neste contexto, os reservatórios são construídos com o objetivo de atenuar essa variabilidade e regularizar o comportamento temporal e espacial das vazões. Assim, a construção e operação de

reservatórios têm como princípio fundamental o aumento de reservas nos períodos de excesso hídrico para posterior uso nos períodos de escassez (FARIAS, 2004).

Nos processos de expansão e operação dos sistemas de reservatórios, para que se evitem conflitos gerados pela deficiência no atendimento às demandas dos usuários, é necessário que se leve em conta todos os usos decorrentes que serão beneficiados pelo sistema. Portanto, é fundamental avaliar a sua potencialidade e promover a determinação de regras operativas de liberação de água para atender as demandas, com um grau de confiabilidade desejado (ARAGÃO, 2008).

Sendo assim, Celeste *et al.*, (2005, p. 2) afirmam que:

Garantir a sustentabilidade de reservatórios sujeitos a múltiplos usos em vista das incertezas hidrológicas tornou-se uma grande preocupação nas últimas décadas por causa do aumento nas demandas e do decréscimo na disponibilidade de água. O gerenciamento adequado desses sistemas tem um papel fundamental não apenas para a alocação justa da água no presente, mas também para o não comprometimento do atendimento às demandas futuras.

Neste entendimento, é imprescindível que exista uma operação eficiente de reservatórios no semiárido nordestino, principalmente, devido às características climáticas e ambientais da região, como a escassez dos recursos hídricos decorrente da irregularidade das precipitações e das altas taxas de evaporação.

Desde muitos anos, discute-se na região a possibilidade de transposição das águas do rio São Francisco para suprir parte das necessidades dos usuários pela água no nordeste brasileiro, gerando uma oferta hídrica exógena, firme e capaz de diminuir a escassez desse recurso, pois a construção por si só de reservatórios não é suficiente para suprir a escassez desse recurso na região (ARAGÃO, 2008).

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos que já foram desenvolvidos tratando da operação de reservatórios, dentre eles o de Labadie (2004) apresenta uma revisão sobre modelos para operação ótima de sistemas de reservatórios, assim como a inclusão dos mesmos em sistemas de suporte a decisão (SSD).

Lima & Lanna (2005) e Wurbs (2005) tratam o estado da arte sobre modelos para operação dos sistemas de reservatórios, com foco nos modelos baseados nas técnicas de simulação e otimização, e de modelos conjuntos de simulação-otimização.

Celeste (2006) investigou o planejamento e operação de reservatórios, individualmente, utilizando técnicas de otimização e simulação com o objetivo de verificar o

uso potencial dos recursos hídricos para irrigação, e com essa prática calcular alguns indicadores que contemplem a sustentabilidade desses sistemas.

Santos (2007), em seu trabalho, desenvolveu um modelo de otimização para o estudo da operação integrada dos sistemas de reservatórios e perímetros irrigados, além de outros usos da água, objetivando a alocação ótima dos recursos hídricos entre os múltiplos usos e o estabelecimento de políticas operacionais via uma análise multiobjetiva.

Aragão (2008) procurou dar uma visão geral do projeto de transposição das águas do rio São Francisco, utilizando para análise do sistema estudado simulações com o modelo matemático AcquaNet, que é baseado em redes de fluxo. Nesse estudo, foram realizadas simulações para distintos cenários de política de operação em um sistema de quatro reservatórios localizados nas sub-bacias do Alto e Médio Cursos do Rio Paraíba, a fim de quantificar a sinergia hídrica proveniente do sistema.

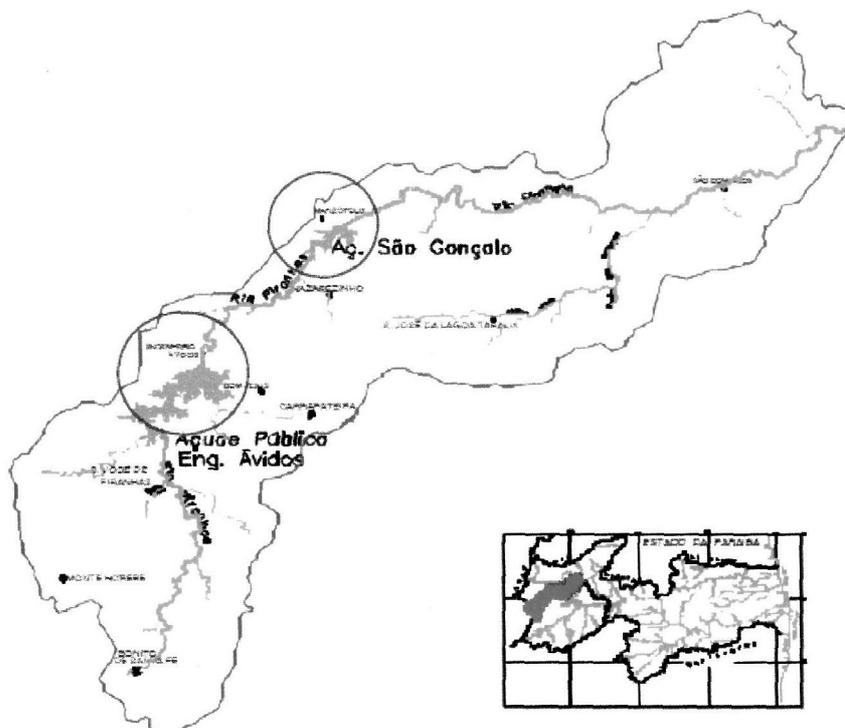
Santos (2011), em seu trabalho, apresenta um modelo de otimização multiobjetivo quali-quantitativo, baseado em programação linear, para o planejamento e operação integrada de sistemas de reservatórios e perímetros ou áreas irrigadas, visando estabelecer a alocação ótima dos recursos naturais existentes e políticas operacionais ótimas em bacias hidrográficas.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

A área de estudo consiste nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, situados na Região do Alto Curso do Rio Piranhas. Eles estão localizados no sudoeste do estado da Paraíba, entre as latitudes 6°50' e 7°25' Sul e entre as longitudes 38°10' e 38°40' Oeste, perfazendo uma área total de 1.219 km². Na Figura 6 encontra-se a localização da Região do Alto Curso do Rio Piranhas e dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo.

Figura 6 - Região do Alto Curso do Rio Piranhas



Fonte: SCIENTEC, PDRH/PB, 1997.

A construção da barragem Engenheiro Ávidos foi iniciada em 1932 pelo engenheiro Moacir Ávidos e concluída em 1936 pelo engenheiro Sílvio Aderme. Esse açude está localizado no município de Cajazeiras, estado da Paraíba, e tem como finalidade o abastecimento público das cidades de Cajazeiras e Nazarezinho; dos distritos Engenheiro Ávidos e Gravatá; e ainda a regularização da vazão do rio Piranhas.

O reservatório de São Gonçalo foi construído em 1936 e está localizado no município de Sousa, tem a finalidade de abastecer as cidades de Sousa e Marizópolis, além do distrito de São Gonçalo; sendo também responsável pelo suprimento das demandas hídricas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG).

3.2 Propostas para Operação do Sistema

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram idealizados e propostos os seguintes cenários operacionais:

Cenário 1: Operação conjunta do sistema com permissão de transferência de água entre os reservatórios (operação atual).

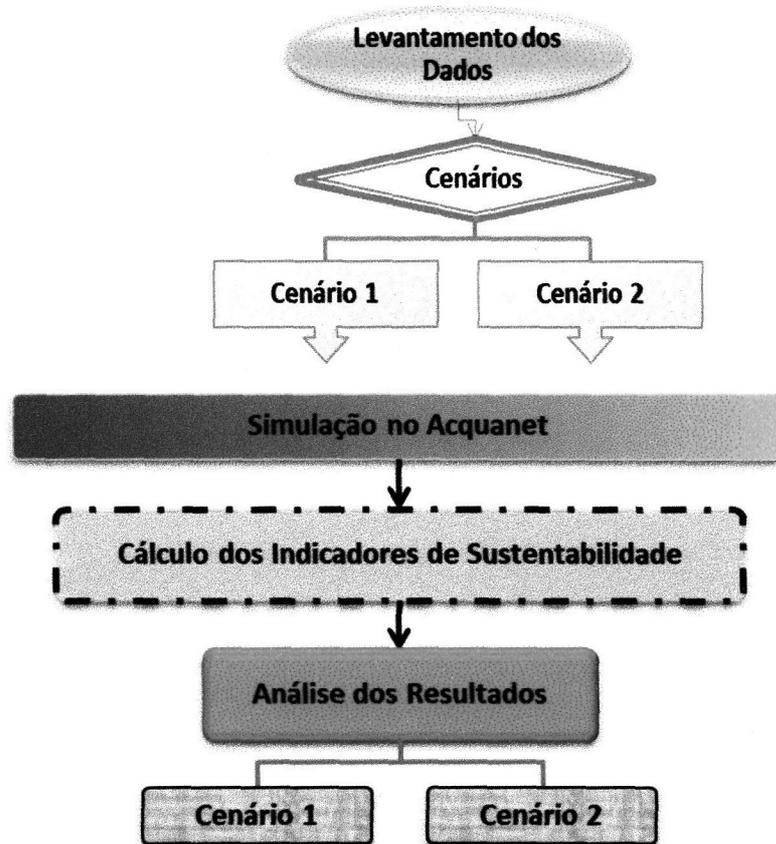
Cenário 2: Operação conjunta do sistema considerando o incremento da vazão exógena no reservatório Engenheiro Ávidos advinda da transposição do rio São Francisco.

O presente trabalho apresenta uma metodologia em que se utilizou o modelo AcquaNet para simulação dos cenários propostos. Esse modelo foi utilizado para verificar se os reservatórios, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, atendem ou não as suas demandas, pois esse processo de análise permite, de modo simples e detalhado, representar sistemas de reservatórios e suas respectivas demandas.

Foram também calculados indicadores de sustentabilidade para auxiliar nas avaliações do atendimento das demandas hídricas em cada cenário proposto. Neste estudo, os indicadores utilizados foram os propostos por Hashimoto *et al.* (1982).

O primeiro passo desta pesquisa consistiu em fazer um levantamento dos dados e, em seguida, a definição dos cenários que foram utilizados para a simulação no AcquaNet. Depois da aquisição das informações, as operações dos sistemas foram simuladas e, de posse dos resultados, foi possível efetuar a análise prévia das possíveis falhas do atendimento às demandas, para cada cenário, durante o período simulado. Com as falhas ocorridas, foram verificadas suas quantidades e frequências de ocorrências, assim como quantificados os déficits hídricos totais para o período simulado. Após essa prática, foram calculados para cada cenário os indicadores de sustentabilidade proposto por Hashimoto *et al.* (1982), que são: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. A Figura 7 apresenta um fluxograma com as etapas metodológicas executadas neste trabalho.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia utilizada



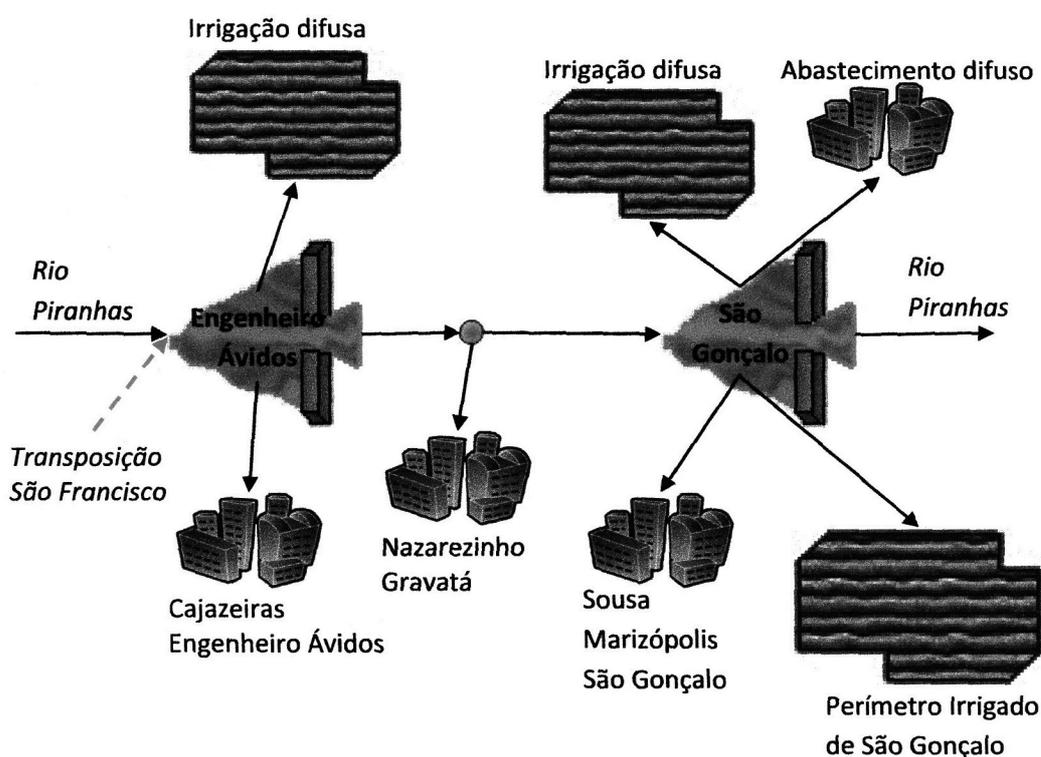
Fonte: Elaboração própria.

3.3 Dados do Sistema

3.3.1 Demandas Hídricas

A Figura 9 apresenta um layout do sistema estudado com as principais demandas a serem supridas pelos reservatórios de Engenheiro Ávidos e São Gonçalo.

Figura 8 - Layout do sistema estudado.



Fonte: Adaptado de Santos *et al.*, 2008.

De acordo com o DNOCS, a demanda hídrica para a finalidade de abastecimento urbano de Sousa e Marizópolis captada pela Estação de Tratamento de Águas da CAGEPA, em média, por dia, no reservatório São Gonçalo é da ordem de 22,5 mil m³ (0,26 m³/s). Em recente visita realizada pelos técnicos da Agência Nacional de Águas (ANA), constatou-se que a vazão destinada aos referidos núcleos urbanos era de 24,7 mil m³/dia (0,286 m³/s). Por sua vez, a outorga emitida pela ANA para a adutora é de cerca 13,8 mil m³/dia, ou seja, 0,16 m³/s (ANA, 2013). Deste modo, será considerado este valor para o abastecimento urbano de Sousa, Marizópolis e São Gonçalo.

A demanda para o abastecimento difuso considerada neste trabalho foi estimada pelos técnicos da ANA. O abastecimento difuso diz respeito a algumas pequenas comunidades que existem próximas à área do açude e que se utilizam da água para consumo humano e animal. A demanda média para finalidade foi estimada pelos técnicos da ANA em 0,002 m³/s (ANA, 2013).

A CAGEPA está outorgada a captar no açude Engenheiro Ávidos, para abastecer o município de Cajazeiras e o distrito de Engenheiro Ávidos, uma vazão de 456,98 m³/h (ou seja, 126,94 L/s) durante 24 h/dia, perfazendo um volume máximo mensal de 339.993,12 m³.

Os resultados da medição realizada pelos técnicos da ANA indicam o valor de 0,1748 m³/s ou 174 L/s. Portanto, em um dia, são captados aproximadamente 15.102 m³ de água. No regime normal de operação, é feito o tratamento de 200 L/s, podendo esse valor chegar até a 240 L/s. Os técnicos da ANA sugeriram reduzir gradualmente a vazão de abastecimento de Cajazeiras e do Povoado de Engenheiro Ávidos de 174 L/s (vazão medida pela ANA) de forma a adequá-la à vazão outorgada pela ANA (130 L/s), sendo este último valor considerado neste estudo.

Os abastecimentos do município de Nazarezinho e o distrito de Gravatá, atualmente, são captados no leito do rio Piranhas e a vazão aduzida para essas duas localidades, medida pela ANA, é de 12 L/s, sendo 6 L/s para cada localidade.

A demanda para irrigação difusa no entorno do reservatório Engenheiro Ávidos foi considerada como sendo igual a 0,1 m³/s, segundo informações dos técnicos do Departamento Nacional de Obras Contra Seca. Para o Perímetro Irrigado de São Gonçalo e a irrigação difusa no entorno do reservatório São Gonçalo, considerou-se uma demanda média mensal variável, conforme está representado na Tabela 1. Esta demanda foi proposta pelos técnicos da ANA em estudo recente realizado no Perímetro Irrigado (ANA, 2013).

Tabela 1 - Demanda média mensal para o PISG e a irrigação difusa no entorno do reservatório São Gonçalo.

Meses	Irrigação difusa (m ³ /s)	PISG (m ³ /s)
Janeiro	0,07	1,30
Fevereiro	0,03	0,54
Março	0,02	0,35
Abril	0,02	0,43
Maiο	0,06	1,11
Junho	0,07	1,27
Julho	0,08	1,51
Agosto	0,10	1,78
Setembro	0,11	2,00
Outubro	0,11	2,05
Novembro	0,12	2,14
Dezembro	0,10	1,87

Fonte: ANA, 2013.

3.3.2 Evaporação

Os dados de evaporação dos reservatórios foram obtidos a partir de dados observados do tanque, “Classe A”, da Estação Climatológica de São Gonçalo. Os valores mensais do

coeficiente de tanque *kt* foram estimados por Oliveira *et al.* (2005) para a região do sertão paraibano, mas precisamente na cidade de Patos. Os dados de evaporação média mensal e do coeficiente *kt* podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de evaporação média mensal do tanque “Classe A” e do coeficiente *kt*.

Posto Climatológico	Evaporação média mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Gonçalo ¹	300,7	213,9	195,5	170,0	183,1	176	216,4	274,8	315,1	344,7	333,9	332,5
<i>Kt</i> ²	0,77	0,79	0,78	0,92	0,93	0,91	0,80	0,81	0,77	0,78	0,76	0,76

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

3.3.3 Vazões Afluentes

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, utilizados neste trabalho foram obtidos junto ao Banco de Dados da Secretaria Extraordinária de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - SEMARH, atualmente, SECTMA (Secretária de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente). A série histórica contém os valores das vazões afluentes do período de 1933 a 1989, considerando, portanto, um total de 57 anos, conforme dados apresentados nos Anexos A e B.

Os parâmetros estatísticos dos Reservatórios de Engenheiro Ávidos e de São Gonçalo podem ser observados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, a seguir.

Tabela 3 - Parâmetros Estatísticos do Reservatório Engenheiro Ávidos

Parâmetros Estatísticos do Reservatório de Engenheiro Ávidos													
Meses	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Media
Med	0,30	2,27	9,82	14,91	7,47	2,40	0,36	0,01	0,00	0,01	0,02	0,13	3,14
S	0,46	5,59	13,99	13,89	6,54	2,31	0,67	0,03	0,01	0,07	0,07	0,29	2,74
CV	1,52	2,46	1,42	0,93	0,87	0,96	1,85	3,64	3,91	5,25	2,86	2,16	0,87

Med = média S = desvio padrão CV = coeficiente de variação

Fonte: PDRH/PB (SCIENTEC, 1997)

Tabela 4 - Parâmetros Estatísticos do Reservatório São Gonçalo

Parâmetros Estatísticos do Reservatório São Gonçalo													
Meses	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Media
Med	0,12	0,84	3,88	5,06	2,42	0,84	0,16	0,01	0,00	0,01	0,02	0,04	1,12
S	0,17	1,79	4,97	4,92	2,05	0,82	0,32	0,02	0,01	0,06	0,04	0,08	0,94
CV	1,44	2,13	1,28	0,97	0,84	0,98	2,08	3,60	6,08	5,81	2,23	1,88	0,84

Med = média S = desvio padrão CV = coeficiente de variação

Fonte: PDRH/PB (SCIENTEC, 1997)

3.3.4 Dados dos reservatórios e critérios operacionais

O Reservatório de Engenheiro Ávidos, como já foi apresentado, possui uma capacidade máxima de 255.000.000 m³ e um volume mínimo de 27.970.000 m³. O volume inicial utilizado foi de 88.280.000 m³, que corresponde à média do volume inicial do mês de janeiro dos últimos 19 anos. O resumo dos principais dados referentes ao Reservatório, Engenheiro Ávidos, encontram-se no Anexo C.

O volume máximo do reservatório de São Gonçalo é de 44.600.000 m³ e o volume mínimo, ou volume morto, é de 2.980.000 m³. O volume inicial utilizado corresponde à média dos volumes do mês de janeiro para os últimos 19 anos, que foi de 18.440.000 m³. Um resumo dos principais dados referentes ao Reservatório, São Gonçalo, encontram-se no Anexo D.

Os dados referentes às curvas cota-área-volume dos dois reservatórios estudados foram obtidos do Cadastro de Açudes do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Piranhas e Piancó (PDRH/PB, 1997). As tabelas contendo esses dados encontra-se disponível nos Anexos E e F.

Os demais critérios operacionais utilizados para os dois reservatórios devem observar os seguintes pressupostos:

- O período de simulação utilizado é de 57 anos, ou seja, 684 meses.
- As prioridades de atendimento das demandas foram: *primeiro* – abastecimento humano dos núcleos urbanos e difuso no entorno dos reservatórios; *segundo* – agricultura irrigada.
- O volume meta do reservatório para todos os meses da série equivale à capacidade máxima do mesmo.
- As capacidades das tomadas d'água foram consideradas iguais as suas respectivas demandas.
- As perdas em trânsito entre os reservatórios foram consideradas de cerca de 22%, conforme recomendações de Aragão (2008).
- Segundo informações da AESA (2013) a vazão firme advinda da Transposição do rio São Francisco para o reservatório Engenheiro Ávidos é de 1 m³/s.

3.4 Sistema de Suporte a Decisão - AcquaNet

Para o estudo desse método foi utilizado o Sistema de Suporte a Decisão AcquaNet, que é um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas que permite ao usuário montar redes com um grande número de reservatórios, com suas respectivas demandas e trechos de canais, representando o problema em estudo de forma bastante detalhada (USP, 2002).

O sistema AcquaNet foi desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisão da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LabSid/USP) em 2002. O AcquaNet é bem semelhante ao modelo MODSIMP32, que é um modelo de rede de fluxo desenvolvido na Colorado State University sob a liderança do Prof. John Labadie. Os modelos diferem quando se considera o funcionamento, o armazenamento, a leitura de dados e os resultados. O MODSIMP32 funciona com arquivos próprios e é completamente responsável pela criação e atualização desses arquivos. Já o AcquaNet armazena todos os dados e resultados em bancos de dados no formato do Microsoft Access, aproveita a estrutura e a funcionalidade possibilitada pela utilização de arquivos nesse formato (USP, 2002).

Uma das principais características do AcquaNet é o fato dele incorporar automaticamente uma série de funções que são comuns na simulação das bacias hidrográficas sem que o usuário tenha que se preocupar em programá-las. Entre as funções que o AcquaNet incorpora, as mais importantes são:

- usuários podem colocar quantos nós de demanda forem necessários para levar em conta as demandas na bacia (consuntivas ou não). O modelo atenderá a estas demandas de acordo com um valor de prioridade atribuída pelo usuário, que pode variar de 1 a 99 (o valor 1 é a maior prioridade);
- A operação do reservatório é feita utilizando o conceito de volume meta ou nível meta, ao qual se atribui uma prioridade. Dessa forma, sempre que o volume armazenado for menor que o volume-meta, o reservatório guardará água desde que as outras prioridades da rede sejam menores.
- As perdas por evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo (CELESTE, 2006, p. 47).

O modelo desenvolvido pelo LabSid/USP (2002, p. 3) funciona da seguinte maneira:

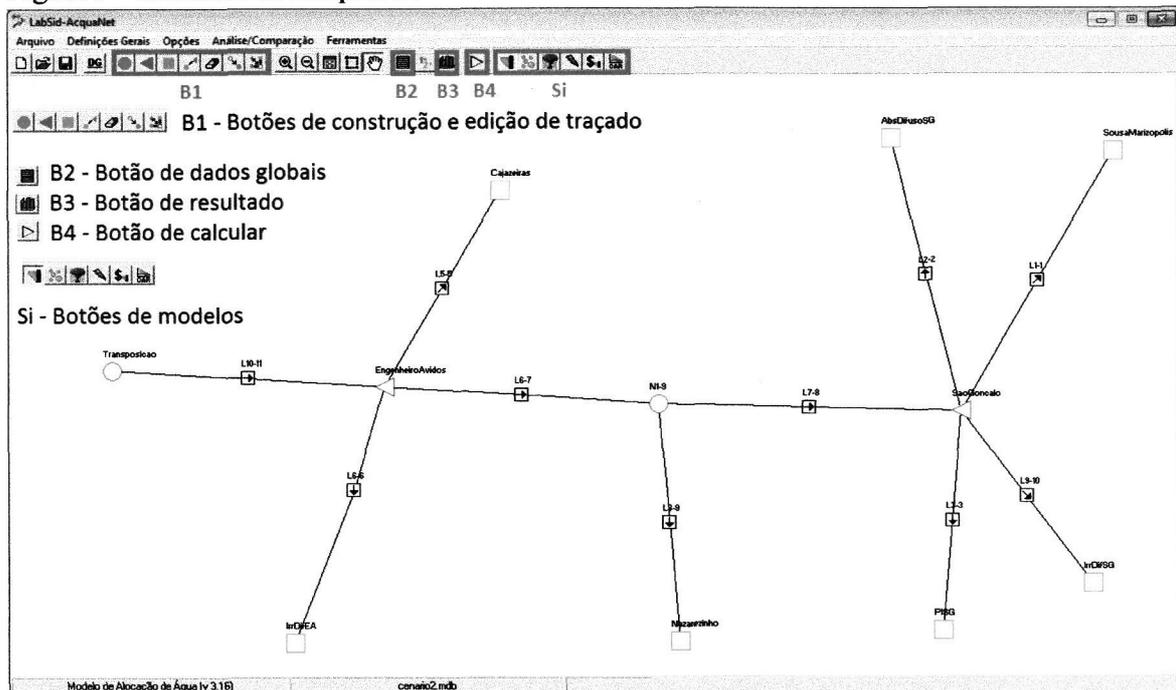
- durante a utilização do AcquaNet, todas as ações feitas pelo usuário são imediatamente armazenadas em um banco de dados temporário, que existe somente durante a utilização do modelo;
- ao iniciar o modelo, o usuário pode começar um novo projeto ou abrir um projeto previamente gravado;
- se for iniciado um novo projeto, um novo banco de dados temporário será criado;

- quando o usuário abre um projeto existente, o **AcquaNet** cria imediatamente uma cópia deste projeto, que passa a ser o banco de dados temporário;
- no banco de dados temporário são armazenadas todas as informações fornecidas pelo usuário (traçado e dados de entrada).

Desta forma, no AcquaNet é possível representar bacias hidrográficas completas por meio de arcos (elos) e nós. Os arcos representam os elementos mais dinâmicos da bacia, onde ocorrem os fluxos propriamente ditos (rios, canais, dutos, etc.) e correspondem às ligações entre os nós, como reservatórios, poços ou demandas (FARIAS, 2009).

O traçado do sistema no AcquaNet é feito através de botões de criação e edição, de forma bem flexível, dando possibilidade ao usuário para alterar o traçado do sistema a qualquer momento. Na Figura 9 é possível visualizar a interface do AcquaNet com um exemplo do sistema que foi utilizado.

Figura 9 - Interface do AcquaNet



Fonte: Elaboração própria.

Antes de iniciar a simulação, o usuário deve fornecer ao modelo algumas informações que servirão de base para a entrada de dados propriamente dita. Na opção “definições gerais” é possível escolher o tipo de simulação, as opções de cálculo e os valores relacionados com a

realidade. Essas definições podem ser alteradas a qualquer momento da simulação. Na Figura 10 está mostrada a tela de definições gerais. No modelo feito neste trabalho, foram utilizadas as opções de simulação contínua, que é uma opção recomendada quando se pretende ter uma ideia do comportamento do sistema ao longo do tempo, pois os seus resultados serão fornecidos de forma contínua do primeiro ao último ano, e com a opção de cálculo calibração, no qual o sistema efetua os cálculos com os valores fornecidos sem considerar o estado atual do conjunto de elementos.

Figura 10 - Tela de definições gerais

Definições Gerais

Dados gerais

Nome do Projeto: Tolerância dos volumes (%):
Observações: Tolerância das demandas (%):
Mês inicial da simulação:

Tipo de Simulação

Simulação Contínua
 Planejamento Tático

Opção de Cálculo

Estados Hidrológicos
 Calibração

Simulação Contínua

Número total de anos de simulação:
Ano inicial de simulação (ex: 1970):

Utilizar Anos Típicos

Fonte: Elaboração própria.

Para entrar com um dado novo ou editar um valor existente, basta clicar com o botão direito do mouse em qualquer elemento da rede. Após essa prática, irá surgir uma tela com todos os dados necessários ao elemento escolhido. O usuário pode editar os dados a qualquer momento. Inclusive há uma opção em que todos os dados dos elementos existentes na tela podem ser alterados de uma só vez. Para desenvolver com exatidão basta teclar o botão B2 e o quadro aparece, conforme destacado na Figura 11.

Figura 11 - Tabela para entrada e edição de dados dos reservatórios

Cota (m)	Área (km²)	Volume (Mm³)
0,000	0,000	0,000
300,000	4,440	23,275
301,000	5,040	27,968
302,000	5,695	33,265
303,000	6,413	39,232
304,000	7,198	45,943
305,000	8,060	53,483
306,000	9,006	61,940
307,000	10,045	71,410
308,000	11,186	81,999
309,000	12,439	93,819
310,000	13,814	106,989
311,000	15,323	121,637
312,000	16,977	137,896
313,000	18,790	155,911
314,000	20,773	175,830
315,000	22,940	197,810
316,000	25,306	222,016
317,000	27,885	248,621
318,000	30,693	277,804

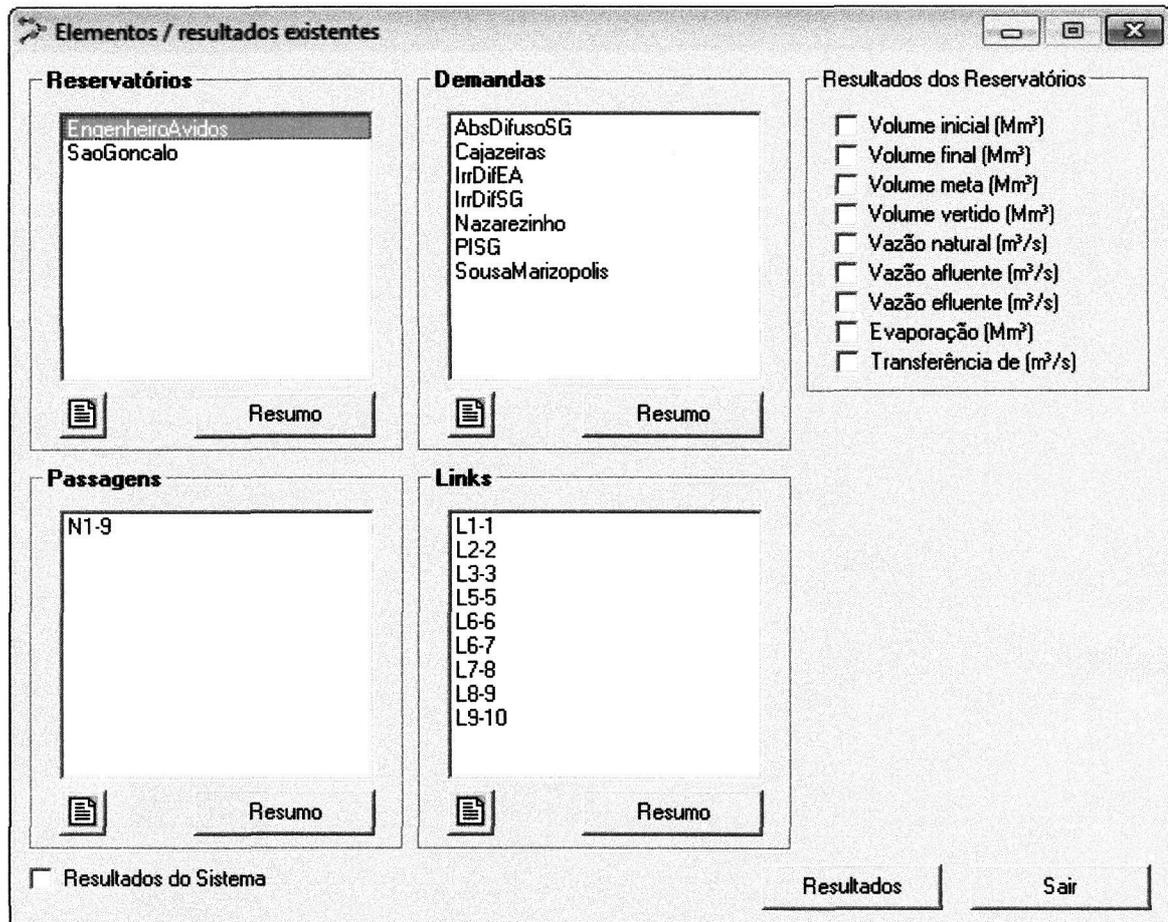
Fonte: Elaboração própria.

Para o modelo AcquaNet, no que diz respeito ao processo de efetuar os cálculos, basta clicar no botão “calcular”, que aparece definido como B4 na Figura 9. Após essa ação, o usuário é informado sobre o andamento do processo. Terminado os cálculos, os resultados estarão disponíveis em forma de planilhas ou gráficos, conforme a necessidade do usuário. Os resultados apresentados nas planilhas podem ser facilmente copiados e colados para outros programas, como por exemplo, o Microsoft Excel.

Para ter acesso aos resultados, o usuário deve clicar no menu “resultados”, que corresponde ao botão B3, conforme Figura 9. Os resultados são apresentados em uma tela a partir da qual o usuário poderá definir os elementos e produtos da operação que ele deseja visualizar. Esse ato torna o sistema mais eficiente já que o banco de dados só vai processar os elementos de informação escolhidos para serem visualizados. No modo simulação contínua, os resultados podem ser visualizados individualmente ou como sistema (todos os elementos de um mesmo tipo são mostrados como se fosse um único). Para esse efeito, basta ativar a opção “resultados do sistema”, logo os dados finais são exibidos pelos seguintes elementos:

reservatórios, demandas, passagens (nós de passagens) e *links*. Para cada elemento, tem um grupo de resultados disponíveis e para acessá-los basta marcar/desmarcar as opções de resultados, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Tela de elementos dos resultados no modo simulação contínua.



Fonte: Elaboração própria

3.5 Indicadores de Sustentabilidade

A origem do termo “indicador” vem do latim, da palavra “indicare”, que significa apontar, estimar, descobrir. Para Farias (2009), os indicadores servem de parâmetros comparativos entre várias ações, hipóteses e condições ou tendências, possuindo, desta forma, as funções de resumir, juntar e simplificar as informações referentes a um problema, podendo também prever prováveis impactos que uma ação ou decisão podem provocar.

De acordo com Van Bellen (2006), os indicadores podem ser quantitativos ou qualitativos e são utilizados para simplificar informações sobre fenômenos complexos, tentando torná-los mais compreensíveis e, com essa realidade, melhorar o processo de comunicação. Tem como principal objetivo agregar e quantificar informações de modo que sua significância fique mais aparente.

Segundo Tunstall (1994) *apud* Van Bellen (2006, p. 43), as principais funções dos indicadores são:

- avaliação de condições e tendências;
- comparação entre lugares e situações;
- avaliação de condições e tendências em relação às metas e aos objetivos;
- prover informações de advertência e antecipar futuras condições e tendências.

Neste contexto, os indicadores de sustentabilidade aparecem como ferramentas capazes de auxiliar no monitoramento da operacionalização do desenvolvimento sustentável, apresentando informações sobre o estado das dimensões ambientais, econômicas, culturais, institucionais e outras (CARVALHO *et al.*, 2011).

Durante os períodos de seca, o aparecimento de falhas na operação dos sistemas de reservatórios do abastecimento de água é, frequentemente, inevitável. As falhas características de cada sistema podem ser representadas por meio de indicadores de sustentabilidade, tais como os propostos por Hashimoto *et al.* (1982): confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

Esses indicadores são capazes de medir o desempenho de um sistema, principalmente em períodos de seca, e auxilia na avaliação de futuros projetos a serem implantados, dando melhores condições para o analista prever cenários futuros (PAIXÃO *et al.*, 2003).

3.5.1 Confiabilidade

A operação do reservatório se encontra estável quando a oferta hídrica é maior ou igual à demanda do sistema. Quando a oferta cai para níveis menores do que a demanda, é dito que o sistema entrou em colapso ou falha. Assim, confiabilidade é a probabilidade da operação do sistema estar em estado satisfatório, ou seja, a confiabilidade é a probabilidade de todas as demandas serem atendidas sem falhas (PAIXÃO *et al.*, 2003).

A confiabilidade (*conf*) mede a probabilidade da série temporal permanecer em estado satisfatório S durante o horizonte de operação, ou seja, a percentagem do tempo em que o

sistema funciona sem falhas (CELESTE *et al.*, 2005). Então, a Equação (1) a ser utilizada para o cálculo da confiabilidade pode ser expressa como:

$$conf = prob\{X_t \in S\} = prob\{X_1 \geq X_0\} = 1 - \frac{NF}{NT} \quad (1)$$

Onde o desempenho do sistema ao longo do tempo determinado pela série temporal X_t , $t = 1, \dots, NT$, e que um valor limite X_0 seja especificado, separando os valores satisfatórios dos insatisfatórios, de modo que uma falha ocorra quando $X_t < X_0$. S representa o estado satisfatório, e NF o número total de intervalos de tempo no qual $X_t < X_0$.

3.5.2 Resiliência ou Elasticidade

Dado que o sistema hídrico se encontra em falha (atendimento menor que a demanda), é interessante para o analista saber por quanto tempo o sistema se comportará dessa maneira. Assim, a resiliência é a medida em escala de tempo da capacidade do sistema em retornar ao estado satisfatório, uma vez que a falha ocorre. Um sistema muito resiliente consegue voltar o mais cedo possível ao estado normal de operação, enquanto que um sistema pouco resiliente se caracteriza por um evento prolongado e de recuperação lenta (PAIXÃO *et al.*, 2003).

Assim, a resiliência serve para avaliar a média de quão rapidamente o sistema retorna de um estado de falha para um estado satisfatório de atendimento a demanda (ARAGÃO, 2008).

Segundo Farias (2009), em alguns casos, é preferível um sistema que tenha muitas falhas, mas que se recupere rapidamente, do que um que tenha poucas falhas e que se recupere lentamente.

Dessa forma, a resiliência (*res*) também pode ser definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em estado insatisfatório (CELESTE *et al.*, 2005). Então, a Equação (2) será utilizada para o cálculo da resiliência pode ser definida como:

$$\begin{aligned} res &= \frac{1}{E\{d\}} = \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M dj \right]^{-1}; \text{ para } M > 0 \\ res &= 1; \text{ para } M = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Onde d_j é a duração, s_j e o volume de déficit e dem_j e o volume total demandado no j -ésimo evento de falhas, com $j=1, \dots, M$, onde M é o número de eventos insatisfatórios.

3.5.3 Vulnerabilidade

A vulnerabilidade (vul) mede a magnitude das falhas a que o sistema está sujeito, caso ela tenha ocorrido (FARIAS, 2009).

Mesmo que um sistema se encontre em estado insatisfatório por um determinado período de tempo, este quadro não demonstra quais as consequências que a falha pode estar ocasionando. Portanto, para este estudo, toma-se a vulnerabilidade como sendo a quantidade hídrica em termos de volume que o sistema deixa de ofertar para suprir as necessidades exigidas, uma vez que ocorram falhas de abastecimento. Assim, quanto maior o déficit hídrico, mais vulnerável será o sistema (PAIXÃO *et al.*, 2003, p. 7). A Equação (3) define o indicador vulnerabilidade.

$$vul = E\{s\} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{S_j}{dem_j} \quad (3)$$

Onde: S_j o volume do deficit e dem_j o volume total demandado no j -ésimo evento de falhas, com $j=1, \dots, M$, onde M é o número de eventos insatisfatórios.

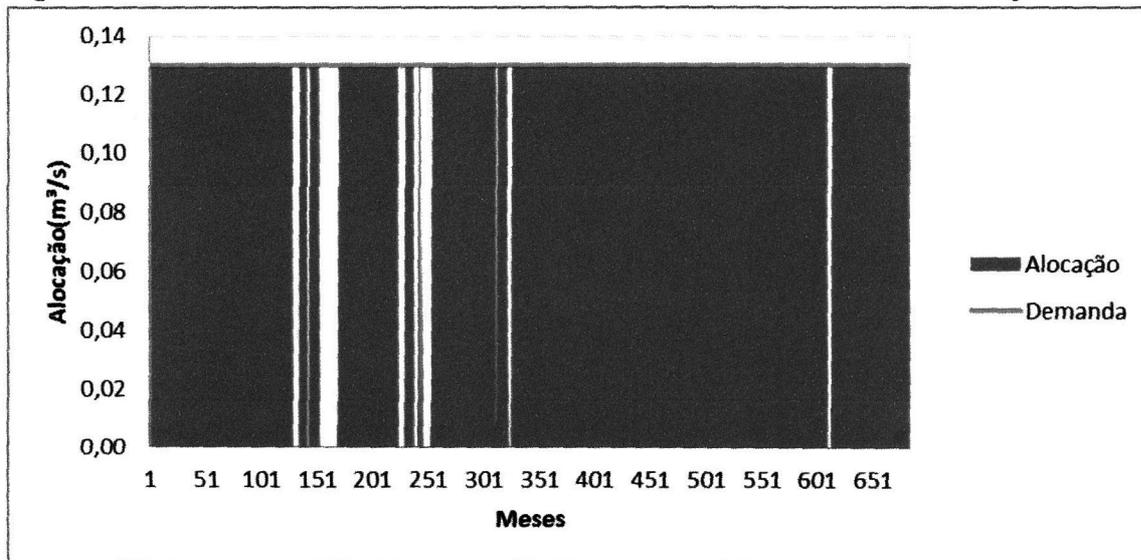
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cenário 1

Esse cenário representa a situação atual do sistema, no qual as demandas são atendidas de acordo com a disponibilidade de água, ou seja, caso haja água suficiente no reservatório, todas as demandas serão atendidas na sua totalidade.

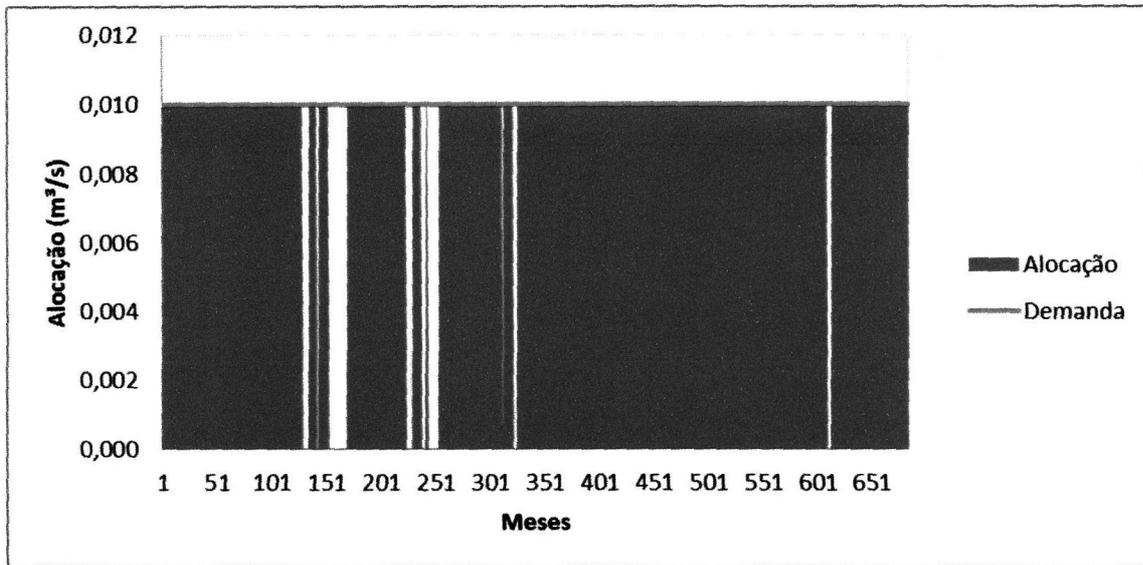
Com relação aos resultados apresentados para as demandas de abastecimento urbano das cidades de Cajazeiras, Nazarezinho, Sousa e Marizópolis e para abastecimento difuso de São Gonçalo, foram estabelecidas as maiores prioridades de atendimento, nas quais foram verificadas algumas falhas no atendimento dessas demandas, conforme se pode visualizar nas Figuras 13, 14, 15 e 16 respectivamente.

Figura 13 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Cajazeiras - PB



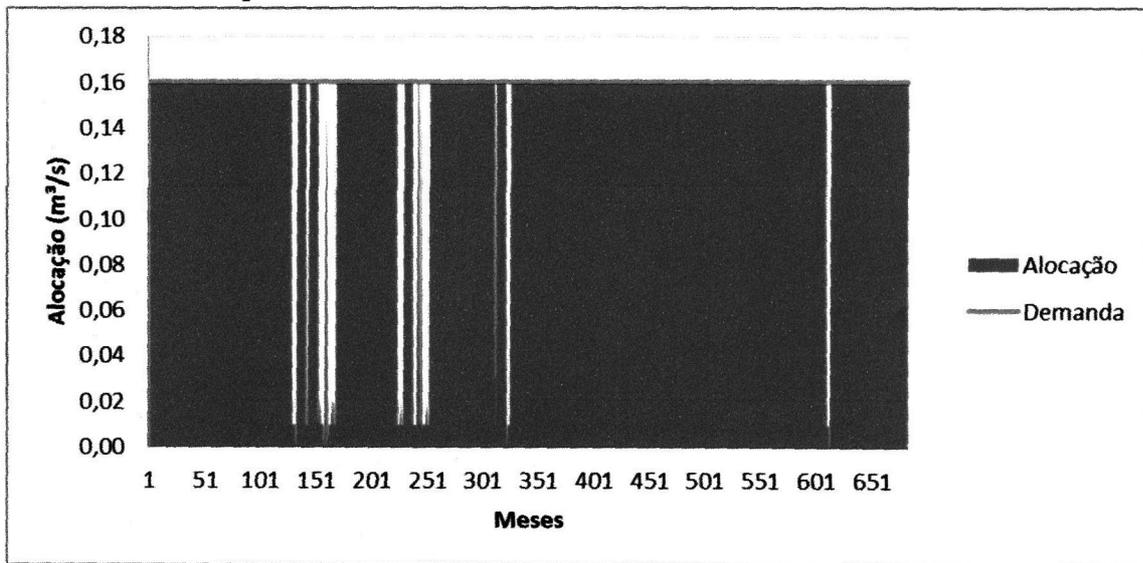
Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Nazarezinho - PB



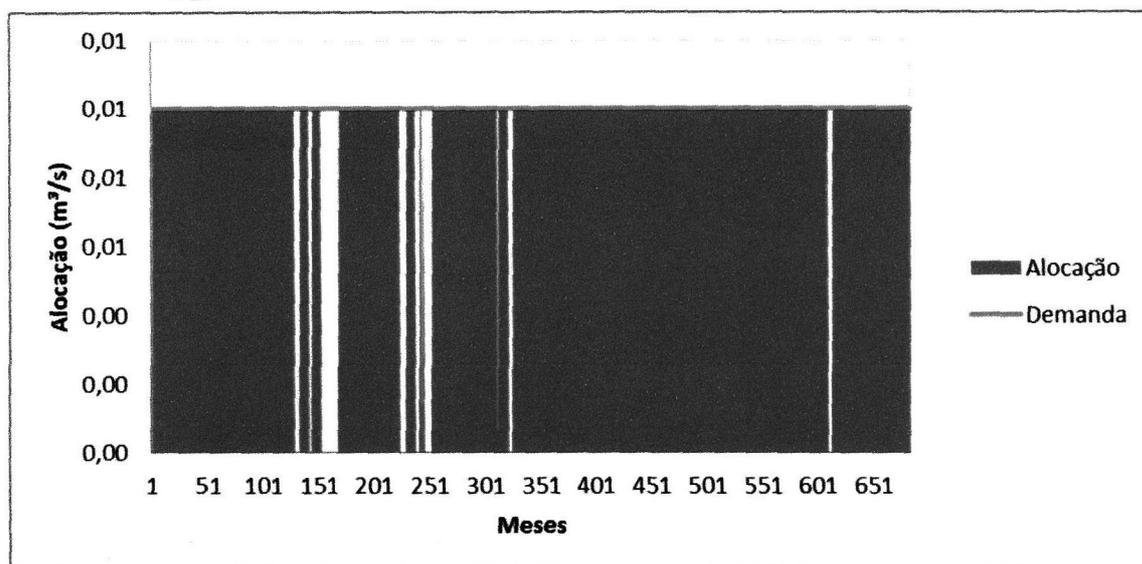
Fonte: Elaboração própria.

Figura 15 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Sousa - PB e Marizópolis - PB



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 - Cenário 1: Atendimento às demandas de abastecimento difuso de São Gonçalo - PB



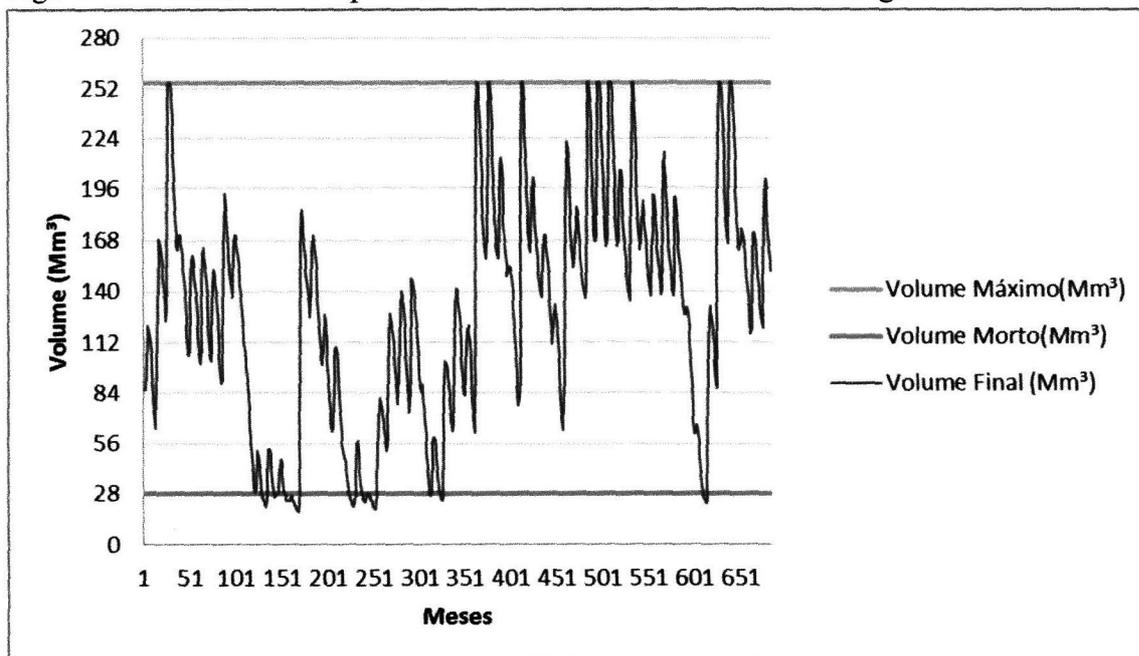
Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se que as falhas no atendimento a essas demandas ocorreram em 54 meses para as cidades de Cajazeiras - PB (em 50 desses meses, nada foi fornecido) e Nazarezinho - PB (54 meses sem abastecimento) e em 51 meses para as cidades de Sousa e Marizópolis (em 6 meses desses, nada foi fornecido) e para o abastecimento difuso de São Gonçalo (51 meses desses nada foi fornecido), ou seja, nesse período, as demandas deixaram de ser atendidas, em sua grande maioria, na totalidade.

As falhas verificadas nas demandas urbanas para o Cenário 1 ocorrem no mesmo período, fato esse devido ao esvaziamento dos reservatórios, conforme apresentado nas Figuras 17 e 18.

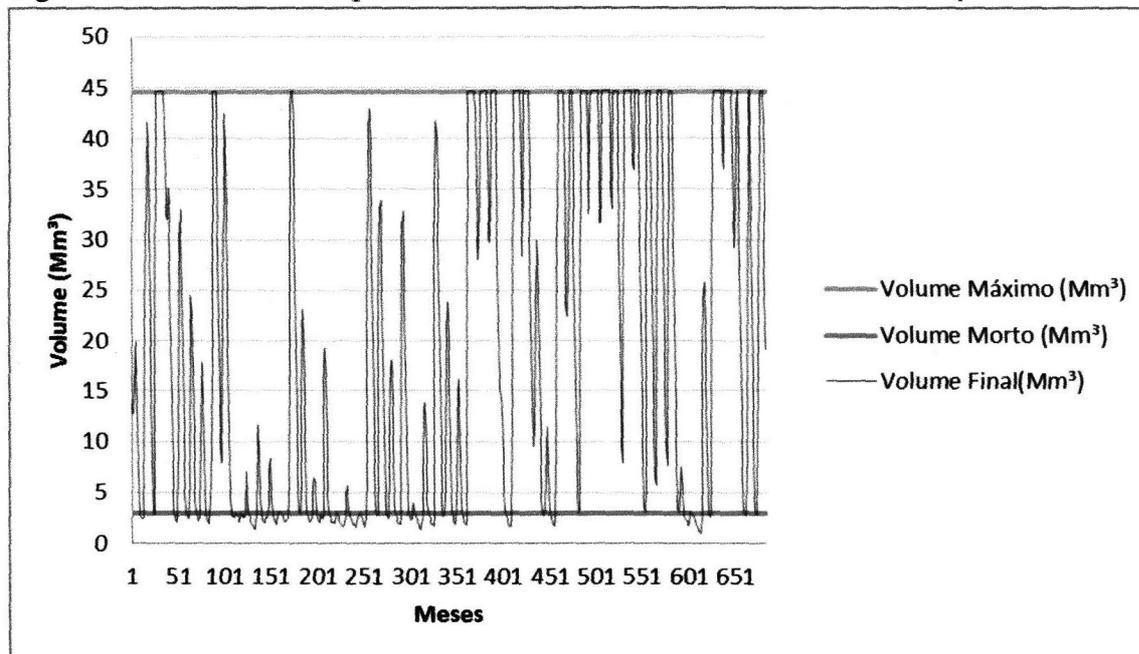
Os reservatórios de Engenheiro Ávidos e de São Gonçalo apresentam uma grande oscilação entre os volumes máximos e volumes mínimos, sendo que o reservatório de São Gonçalo atingiu mais vezes esses extremos, por apresentar um menor volume, estando sujeito a maiores oscilações.

Figura 17 - Cenário 1: Comportamento do volume do Reservatório Engenheiro Ávidos



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 - Cenário 1: Comportamento do volume do Reservatório São Gonçalo

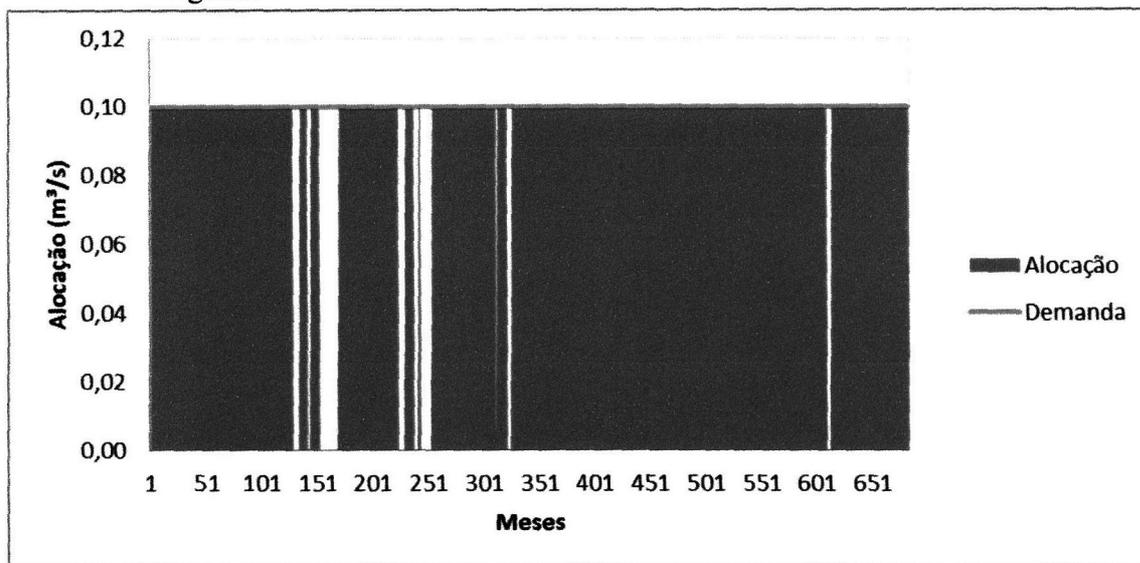


Fonte: Elaboração própria.

No que se refere as demandas para irrigação difusa do reservatório de Engenheiro Ávidos, estas deixaram de ser atendidas em 55 meses, de falha total, para as quais nada foi liberado para atender essa demanda, já no reservatório de São Gonçalo, as falhas foram

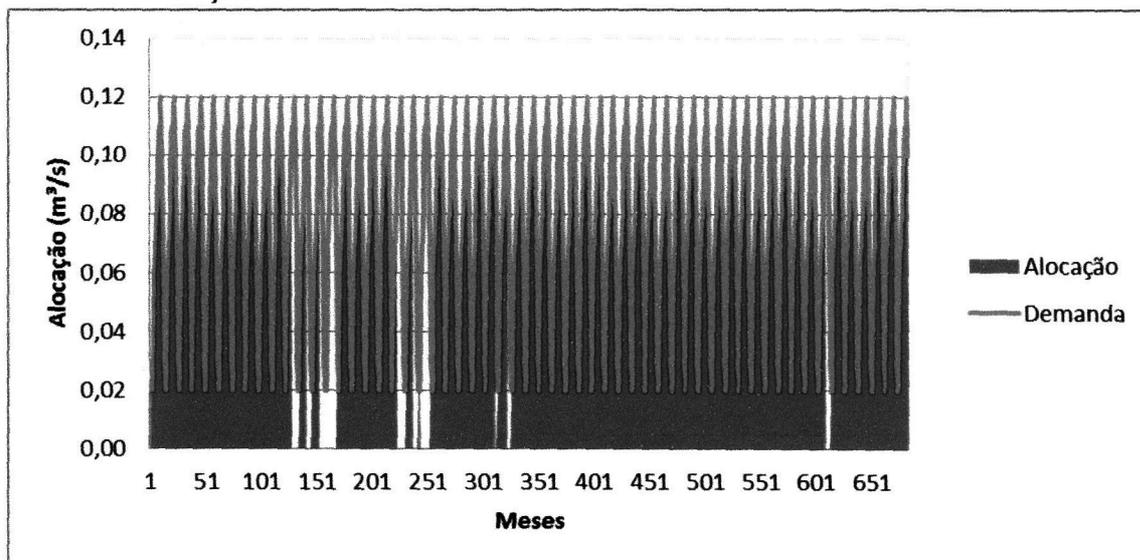
verificadas em 61 meses, tanto para atendimento à irrigação difusa (61 meses de falha total), quanto para a irrigação no Perímetro Irrigado de São Gonçalo (51 meses de falhas total), conforme pode-se observar nas Figuras 19, 20 e 21 respectivamente.

Figura 19 - Cenário 1: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório de Engenheiro Ávidos



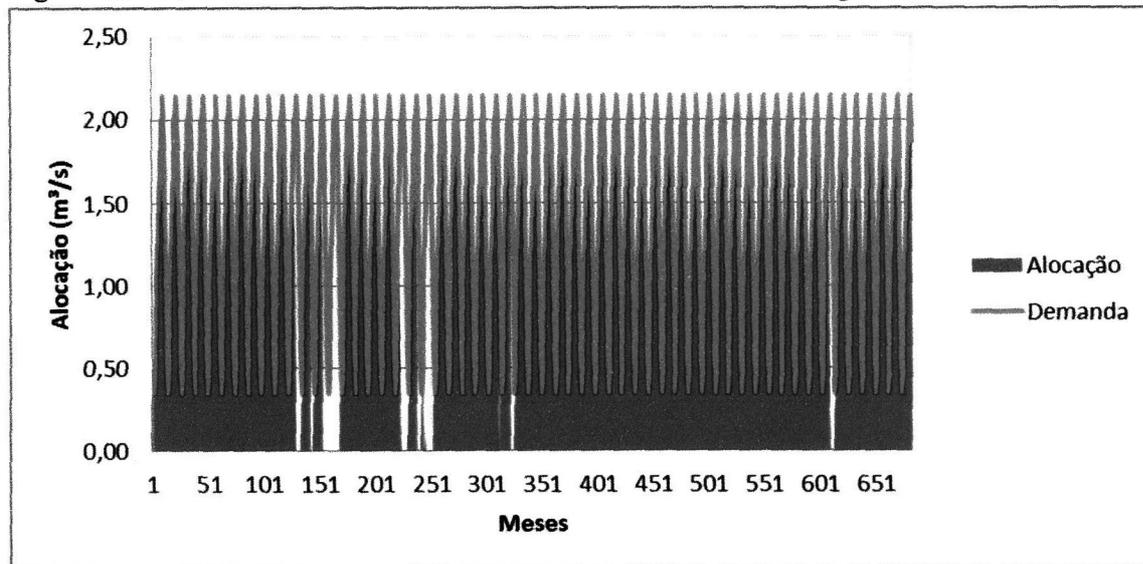
Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 - Cenário 1: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório de São Gonçalo



Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 - Cenário 1: Atendimento às demandas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo - PB



Fonte: Elaboração própria.

Os indicadores de sustentabilidade utilizados para auxiliarem na análise do desempenho e medir a performance do sistema hídrico, especialmente em períodos críticos de seca, e dar melhores condições de se prever cenários de operação para o sistema foram: Confiabilidade, Resiliência e Vulnerabilidade, propostos por Hashimoto *et al.*(1982). Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Cenário 1: Indicadores de sustentabilidade

Cenário 1				
Demandas	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade Máxima
Cajazeiras	92,1%	16,7%	98,5%	100,0%
Nazarezinho	92,1%	16,7%	100,0%	100,0%
Sousa e Marizópolis	92,5%	19,6%	92,0%	96,9%
Abastecimento Difuso de São Gonçalo	92,5%	19,6%	100,0%	100,0%
Irrigação Difusa Engenheiro Ávidos	92,0%	16,4%	100,0%	100,0%
Irrigação Difusa São Gonçalo	90,9%	14,5%	98,8%	100,0%
PISG	91,1%	14,8%	89,9%	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

No Cenário 1, no que se refere ao atendimento às demandas do sistema, todas apresentaram uma boa confiabilidade, acima de 90%, demonstrando que o sistema possui uma grande capacidade de atender as demandas sem que ocorram falhas, ou seja, em mais de 90% do tempo o sistema consegue atender as demandas.

A resiliência no atendimento às demandas do sistema variou de 14,5% a 19,6%, isto é, o sistema apresenta baixa capacidade de se recuperar após ocorrer uma falha. Valores de resiliência abaixo de 20% indicam que, caso ocorra uma falha, o sistema só se recuperará, em média, depois de 5 meses, ou seja, o sistema tem baixa capacidade de se recuperar quando ocorre uma falha.

Com relação à vulnerabilidade do sistema, pode-se verificar que ela variou, de acordo com a demanda, de 89,90% a 100%, conforme apresentado na Tabela 5. Essa realidade demonstra que quando a falha ocorre, ela é de grande magnitude e para algumas demandas chega a 100%, ou seja, nada é fornecido para o abastecimento.

Assim, verificou-se que mesmo o sistema sendo considerado confiável em 90% do seu tempo, os baixos índices de resiliência e altos índices de vulnerabilidade mostram o quão grave podem ser as situações de falhas.

Os volumes evaporados e/ou vertidos dos reservatórios são fatores relevantes que também devem ser observados, pois representam perdas significativas, e, portanto, devem ser analisados, pois valores muito altos significam que os reservatórios não conseguem promover regularização interanual.

As Tabelas 6 e 7 mostram as médias mensais dos volumes vertidos e evaporados dos reservatórios estudados no período de análise.

Tabela 6 - Cenário 1: Média mensal dos vertimentos dos reservatórios.

Meses	Volume Vertido (m ³ /s)	
	Reservatório de Engenheiro Ávido	Reservatório de São Gonçalo
Janeiro	0	0
Fevereiro	0	0
Março	0,51	0,48
Abril	2,96	1,52
Maió	1,91	0,63
Junho	0,46	0,05
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	0	0
Novembro	0	0
Dezembro	0	0
Média	0,49	0,22

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 - Cenário 1: Média mensal de evaporação dos reservatórios

Meses	Evaporação (×10 ⁶ m ³)	
	Reservatório de Engenheiro Ávido	Reservatório de São Gonçalo
Janeiro	3,92	0,60
Fevereiro	2,74	0,42
Março	2,74	0,51
Abril	2,78	0,65
Maió	3,32	0,84
Junho	3,27	0,82
Julho	3,95	0,95
Agosto	4,82	1,11
Setembro	5,23	1,13
Outubro	5,39	1,08
Novembro	4,91	0,91
Dezembro	4,60	0,78
Média	3,97	0,82

Fonte: Elaboração própria.

Os valores mostram que os vertimentos nos reservatórios estudados ocorreram no período de março a junho, sendo os maiores valores verificados no mês de abril. A média anual é de cerca de 0,49 m³/s para Engenheiro Ávidos e 0,22 m³/s para São Gonçalo.

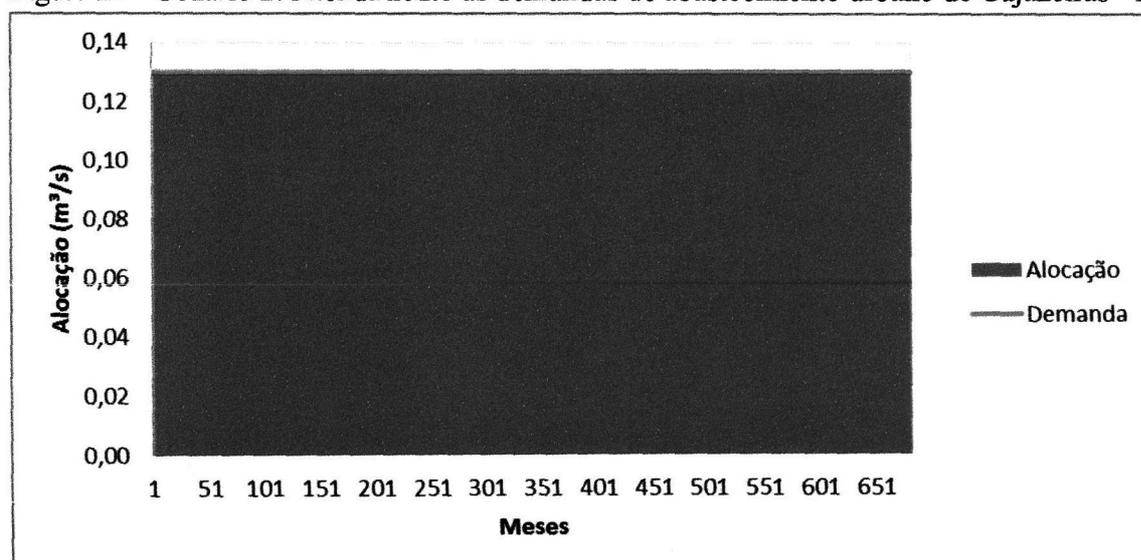
Com relação aos valores evaporados, observa-se que os reservatórios estudados apresentam os maiores valores para os meses de maio a dezembro, período considerado na região como estação seca, sendo a média anual de 3,97 ×10⁶ m³ e 0,82 ×10⁶ m³, respectivamente.

4.2 Cenário 2

Esse cenário representa a situação atual do sistema com o incremento da vazão de 1 m³/s advinda com a transposição do rio São Francisco.

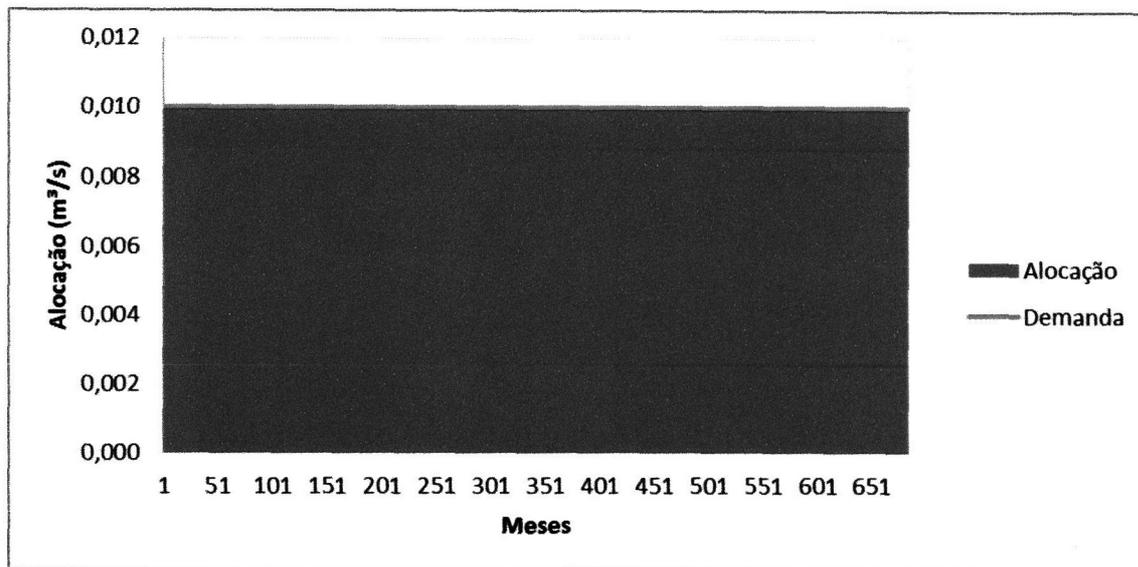
Nesse cenário, foram estabelecidas as maiores prioridades de atendimento para as demandas de abastecimento urbano das cidades de Cajazeiras, Nazarezinho, Sousa e Marizópolis e para abastecimento difuso de São Gonçalo, onde não foram verificadas falhas no atendimento dessas demandas, conforme se pode visualizar nas Figuras 22, 23, 24 e 25.

Figura 22 - Cenário 2: Atendimento às demandas de abastecimento urbano de Cajazeiras - PB



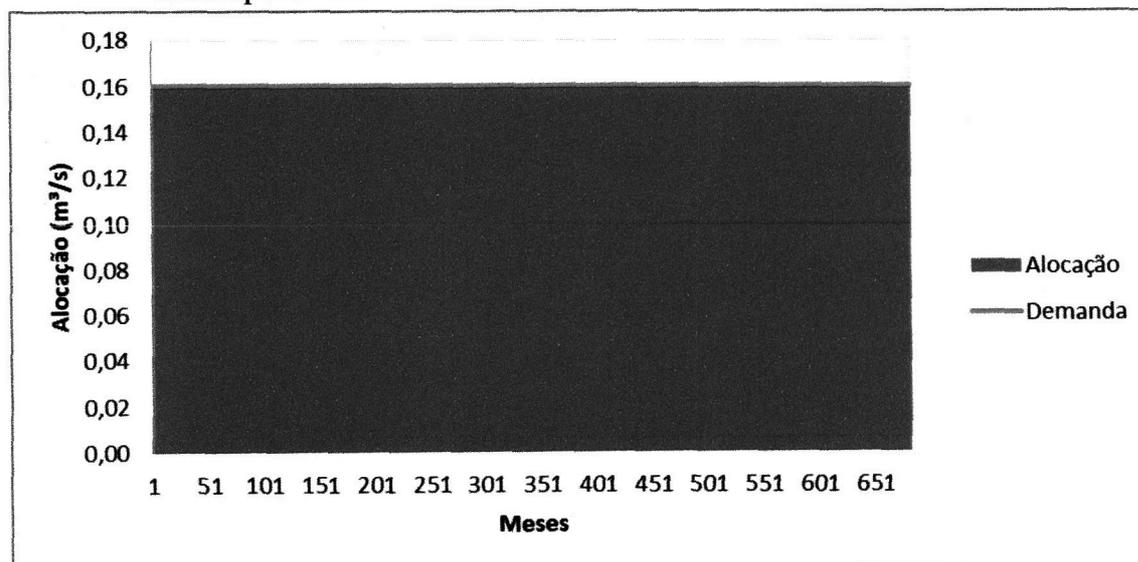
Fonte: Elaboração própria.

Figura 23 - Cenário 2: Atendimento às demanda de abastecimento urbano de Nazarezinho - PB



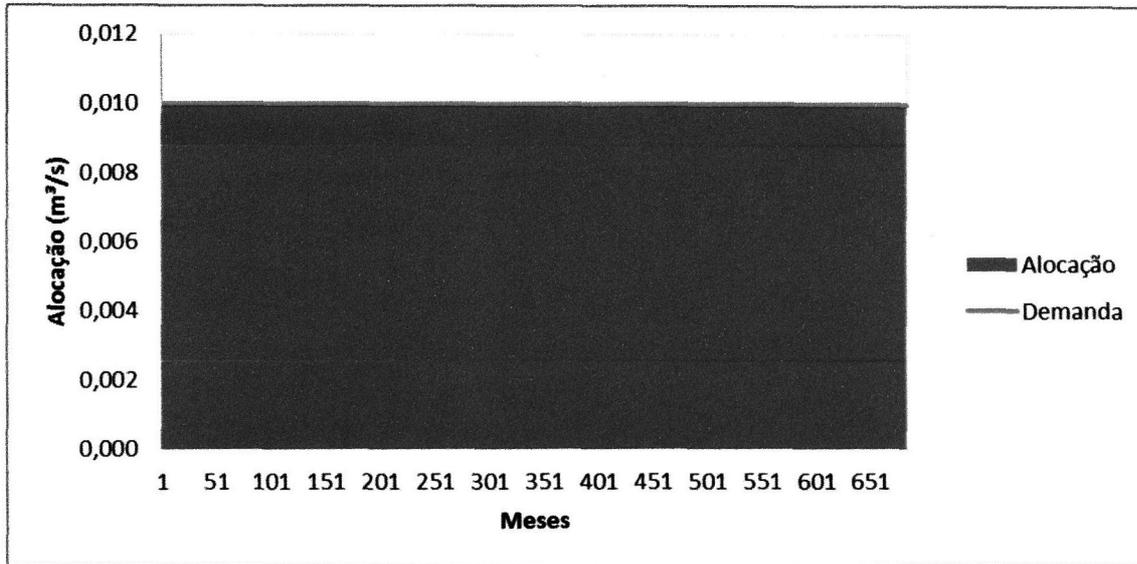
Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 - Cenário 2: Atendimento às demanda de abastecimento urbano de Sousa - PB e Marizópolis - PB



Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 - Cenário 2: Atendimento às demandas de abastecimento difuso de São Gonçalo - PB

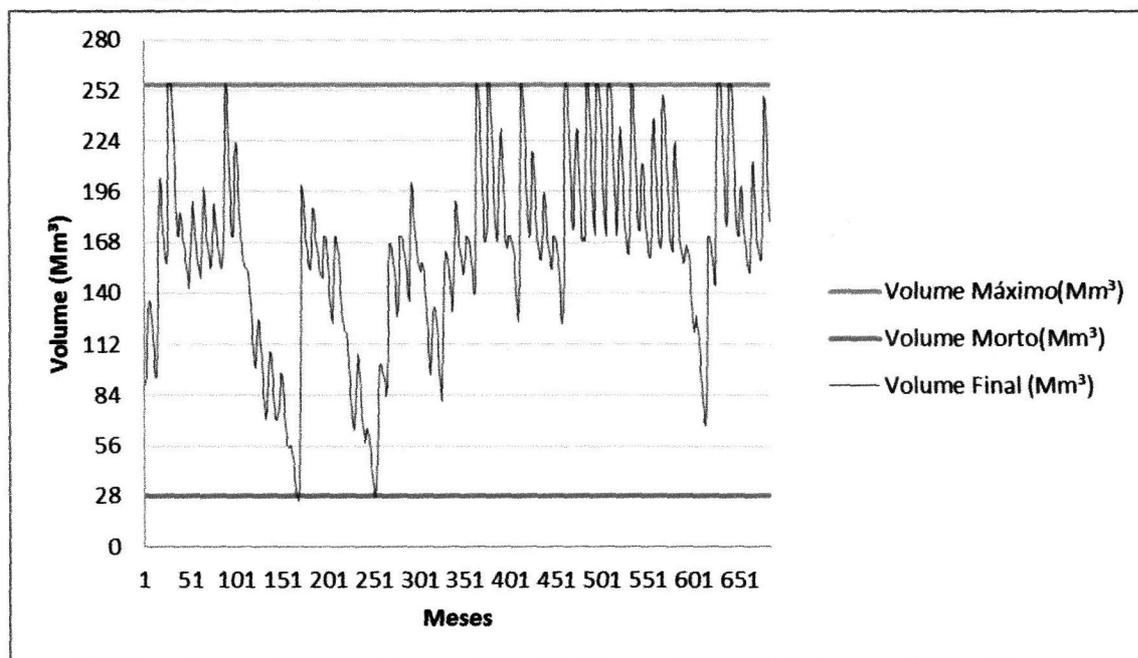


Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que as demandas para abastecimento urbano e abastecimento difuso do sistema estudado serão atendidas em sua totalidade com o incremento da vazão advinda da transposição das águas do rio São Francisco.

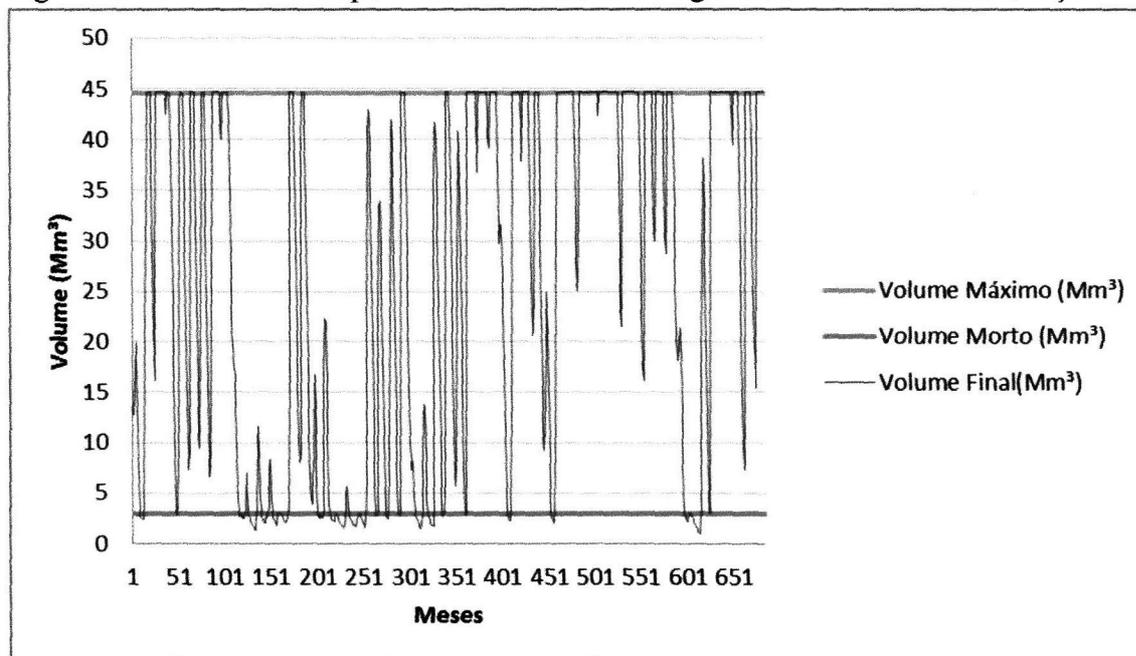
Os volumes de águas dos reservatórios estudados podem ser visualizados nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Cenário 2: Comportamento do volume de água do Reservatório Engenheiro Ávidos



Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 - Cenário 2: Comportamento do volume de água do Reservatório São Gonçalo.

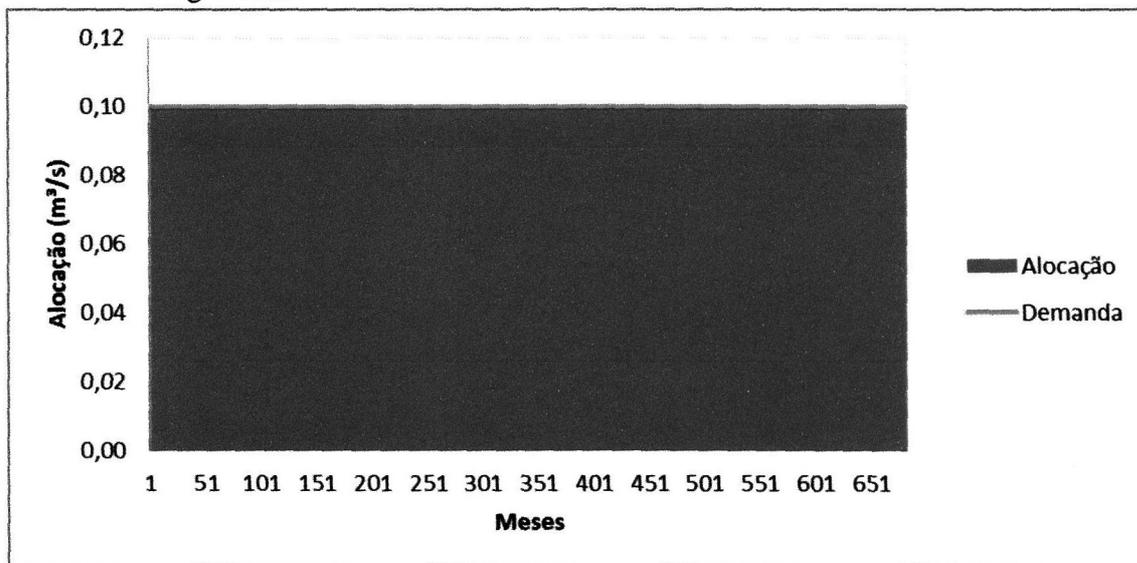


Fonte: Elaboração própria.

Em relação ao volume de águas dos reservatórios estudados, observa-se que o reservatório Engenheiro Ávidos permanece a maioria dos meses acima da média de sua capacidade, chegando a atingir a sua capacidade mínima, em apenas 5 meses, durante o período analisado. Já o reservatório São Gonçalo, por ser um reservatório de menor porte, apresenta oscilações mais frequentes entre os volumes máximos e mínimos.

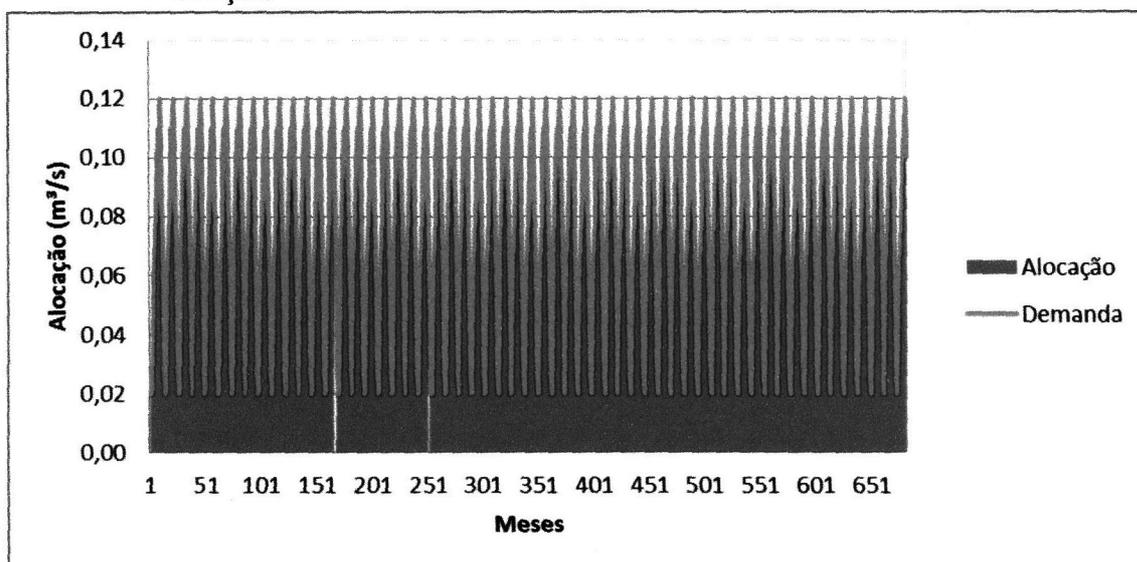
As demandas para irrigação difusa do reservatório Engenheiro Ávidos são atendidas em 100%, ou seja, todos os meses, sem falhas. Já para irrigação difusa e o PISG, dos 684 meses estudados, o reservatório São Gonçalo não continha água suficiente para atender às demandas, em apenas 5 meses, mostrando que ocorreram melhorias no atendimento dessas demandas em comparação com o Cenário 1, conforme verifica-se nas Figuras 28, 29 e 30 respectivamente.

Figura 28 - Cenário 2: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório Engenheiro Ávidos



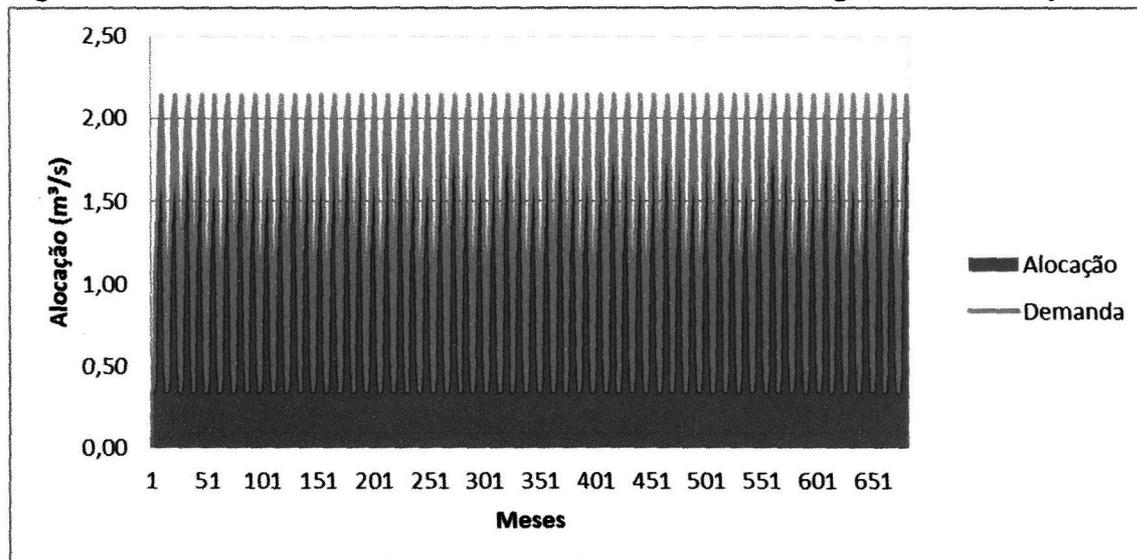
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Cenário 2: Atendimento às demandas de irrigação difusa do Reservatório São Gonçalo



Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 - Cenário 2: Atendimento às demandas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados dos indicadores de sustentabilidade obtidos para o Cenário 2 estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Cenário 2: Indicadores de Sustentabilidade

CENÁRIO 2				
Demandas (m³/s)	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade Máxima
Cajazeiras	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Nazarezinho	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Sousa e Marizópolis	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Abastecimento Difuso de São Gonçalo	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Irrigação Difusa Engenheiro Ávidos	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Irrigação Difusa São Gonçalo	99,3%	40,0%	100,0%	100,0%
PISG	93,3%	40,0%	43,6%	60,9%

Fonte: Elaboração própria.

Com as águas da transposição, observou-se que não ocorreram falhas no atendimento das demandas para abastecimento urbano e difuso, ou seja, o sistema atingiu 100% de confiabilidade. Na prática, se não existem falhas, a resiliência é de 100% e a vulnerabilidade é zero.

Com relação às demandas para a irrigação, no reservatório Engenheiro Ávidos, a confiabilidade também foi de 100%, pois nenhum mês ficou sem ter essa demanda atendida. Já para o reservatório de São Gonçalo, percebe-se que o indicador de confiabilidade também aumentou em relação ao Cenário 1, sendo agora de 99,3% e 93,9%, para as demandas de irrigação difusa e do PISG, respectivamente. Essas demandas também apresentam uma resiliência muito maior nesse cenário, de 14,5% e 14,8% para 40%. A vulnerabilidade, no caso de ocorrência de falhas, diminuiu praticamente pela metade para o PISG em relação ao cenário anterior, de 89,9% para 43,6%.

As médias dos valores para o volume vertido e volume evaporados para os reservatórios estudados podem ser visualizados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Cenário 2: Média mensal de vertimento dos reservatórios.

Meses	Volume Vertido (m ³ /s)	
	Reservatório de Engenheiro Ávidos	Reservatório de São Gonçalo
Janeiro	0	0
Fevereiro	0	0
Março	1,64	1,18
Abril	3,84	1,89
Maio	2,78	0,85
Junho	0,73	0,06
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	0	0
Novembro	0	0
Dezembro	0	0
Média	0,75	0,33

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10 - Cenário 2: Média mensal para evaporação dos reservatórios.

Meses	Evaporação (×10 ⁶ m ³)	
	Reservatório de Engenheiro Ávido	Reservatório de São Gonçalo
Janeiro	5,04	0,93
Fevereiro	3,56	0,64
Março	3,48	0,69
Abril	3,38	0,79
Maio	3,94	0,99
Junho	3,87	0,96
Julho	4,69	1,15
Agosto	5,78	1,40
Setembro	6,34	1,50
Outubro	6,63	1,50
Novembro	6,11	1,32
Dezembro	5,83	1,17
Média	4,89	1,09

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar esses valores, é possível observar que as médias do volume vertido dos Reservatórios, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, apresentaram um aumento de 0,26 m³/s e 0,11 m³/s, respectivamente. Já para a média dos volumes evaporados, o aumento foi de 0,92 ×10⁶ m³ para o Reservatório Engenheiro Ávidos e 0,27 ×10⁶ m³ para o Reservatório São Gonçalo.

Comparando os resultados dos dois cenários, houve incrementos no Cenário 2, tanto no volume evaporado quanto no volume vertido nos reservatórios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, apresentou-se um estudo de dois cenários de operação integrada das disponibilidades e usos dos recursos hídricos da Região do Alto Curso do Rio Piranhas, no estado da Paraíba, representados pelos reservatórios, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo.

Na forma atual de operação do sistema, constituído neste trabalho pelo Cenário 1, os resultados apresentam falhas no atendimento de todas as suas demandas (abastecimento urbano, abastecimento difuso e irrigação), não sendo considerado dessa forma, o cenário ideal para operacionalização do sistema. Constatou-se que a operação do sistema, considerando o Cenário 1, mostrou-se com boa confiabilidade, acima de 90%, mas com uma baixa resiliência e uma alta vulnerabilidade, ou seja, o sistema atende, na maioria do tempo, a sua demanda de forma satisfatória, mas quando a falha ocorre, ela é de grande magnitude e de recuperação lenta.

Já no Cenário 2, foi analisada a influência da transposição das águas do rio São Francisco no desempenho do sistema. A partir dos resultados obtidos, averiguou-se que com a transposição pode-se garantir o atendimento das demanda de abastecimento urbano e difuso em sua totalidade, porém o abastecimento para a irrigação ainda apresenta falhas, demonstrando que essa demanda já ultrapassou o seu limite na região, e com essa observação, percebe-se que não é viável o seu aumento mesmo com a transposição.

A transposição das águas do rio São Francisco resultaria, para o sistema em questão, grandes benefícios econômicos e sociais, reduzindo, consideravelmente, os problemas gerados pela seca, comuns na região semiárida do Nordeste brasileiro.

Considerando a confiabilidade, o Cenário 2 é o que apresenta o melhor resultado, visto que todas as demandas do sistema são 100% confiáveis, com exceção das demandas de irrigação difusa e do PISG do Reservatório São Gonçalo, que foram de 99,3% e 93,9%, respectivamente. Já para a resiliência, o Cenário 2 também apresentou melhor resultado em todas as demandas, com 100%, exceto na demanda para irrigação difusa de São Gonçalo que foi de 40%. Considerando os resultados de vulnerabilidade, constata-se que as falhas, quando ocorrem, possuem magnitudes menores no Cenário 2.

O Cenário 2 apresentou nos volumes vertidos e evaporados um aumento, o que resultou numa maior perda por evaporação em relação ao cenário 1.

Desta forma, observa-se que os resultados obtidos nos dois cenários analisados e levando-se em consideração o atendimento das demandas do sistema, pode-se apontar que o cenário 2 é o que apresenta os melhores resultados. Assim, a vazão de 1 m³/s advinda da transposição do rio São Francisco garante o atendimento de 100% das demandas prioritárias (abastecimento urbano e difuso), e apresenta também um atendimento mais sustentável em termos de demanda para irrigação, já que demonstra uma confiabilidade maior do que no Cenário 1.

REFERÊNCIAS

AESA. **Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba**. 2014. Disponível em: <<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/volumesAcudes.do?metodo=preparaUltimosVolumesPorMunicipio>>. Acesso em: 13 jan. 2014.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório da Campanha de Medição de Vazão e Cadastramento de Usuários de Recursos Hídricos nos Reservatórios de Eng. Ávidos e São Gonçalo. Bacia do rio Piranhas Açu**. 2013. Relatório Nº 16/2013/GEFIU/SFI-ANA. Documento: 00000.020545/2013-65

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, área de concentração: Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

BRAGA, B. P. F. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: BARTH, F.T. *et al.* **Modelos de gerenciamentos de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel/ABRH, 1987. vol. 1, p. 427 - 518. (coleção ABRH de recursos hídricos).

BRASIL. Lei n. 9. 433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/19433.htm> Acesso em: 02 mai. 2013.

BRITO, L.T. de L.; SILVA, A. de S.; PORTO, E. R. Disponibilidade de Água e a Gestão dos Recursos Hídricos. BRITO, L.T. de L.; MOURA, M.S.B. de.; GAMA, G.F.B. In: **Potencialidades da Água de Chuva no Semiárido Brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. p.15-32.

CARVALHO, J. R. M. de; CÂNDIDO, G. A.; CURI, W. F.; CARVALHO, E. K. M. de A. Proposta e Validação de Indicadores de Sustentabilidade Hidroambientais para bacias hidrográficas: Estudo de Caso na sub-bacia do rio Piranhas, PB. In: **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. Niterói, 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. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

CELESTE, A.B.; SUZUKI, K.; SANTOS, V.da S. Análise de Indicadores de Sustentabilidade para reservatórios operados por regras derivadas de otimização estocástica implícita. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa, 2005.

CIRILO, J. A. Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos, in: PORTO, R. L.L. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: Editora Universidade/UFGRS/ ABRH, 1997.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; CAMPOS, J. N. B. A Questão da Água no Semiárido Brasileiro. BICUDO, C.E. de M.; TUNDISI, J.G.; SCHEUENSTUHL, M.C.B. (Org.). In: **Águas do Brasil, Análises Estratégicas**. 1 ed. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010, v. 1. p. 81-91.

COLLISCHONN, B.; LOPES, A. V. Efeito da açudagem a montante sobre a disponibilidade hídrica do açude Epitácio Pessoa (PB). In: **IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Salvador, 2008.

CRAWLEY, P.D., DANDY, G.C. Optimal operation of multiple-reservoir system. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v.119, n.1, p.1-17, 1993.

CURI, Wilson Fadlo; SANTOS, Valterlin da Silva. A bacia hidrográfica e o planejamento de recursos hídricos. In: **Água, Solo e Educação Ambiental**. João Tertuliano Nepomuceno Agra; José Otávio Aguiar. (Org.). 1 ed. Campina Grande: EDUFPG, 2008, v. 1, p. 169-178

DROUIN, N. et al. Piecewise Affine Approximations for the Control of a One-Reservoir Hydroelectric System. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], vol. 89, p.53-69, 1996.

FARIAS, E.E.V. de. **Distribuição da água do projeto de integração do rio São Francisco no Estado da Paraíba – eixo leste: análise de perdas**. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

FARIAS, S. R. A. **Operação Integrada dos Reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo**. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

FEIRING, B. R. et al. A Stochastic Programming Model for Water Resource Planning. **Mathematical and Computer Modelling**, [S.L.], vol. 27, n. 3 p. 1-7, 1998.

FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F. Programação Ótima da Operação Energética de Sistemas Hidroelétricos. In: **XVII Congresso Latino-Americano de Hidráulica**, Guayaquil, Equador, 1996.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resources Research**. [S.L.], v. 18, n. 1, p. 14-20, 1982.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?>> Acesso em: 10 dez. 2012.

KARAMOUZ, M., VASILIAKIS, H.V. Bayesianstochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts. **Water Resources Research**, Washington, v.28, n.5, p.1221-1232, 1992.

LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v.130, n. 2, p. 93-111, 2004.

LANNA, A. E. MODHAC – **Modelo hidrológico Auto Calibrável**. (versão DOS 1997). PH – UFRGS. Porto Alegre, 1997.

LANNA, A.E. Introdução. In: Porto, R. L.L. org. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. 2. Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/Associação Brasileira de Recursos hídricos, cap. 1 p. 15-41, 2002.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3 ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.

LIMA, C. A. G. **Análise e Sugestões para Diretrizes de Uso das Disponibilidades Hídricas Superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó, Localizada no Estado da Paraíba**. 2004. 274 f. Tese (Doutorado Temática em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L. Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v.10, n. 3, p.5-22, 2005.

LIMA, C. V. H; LANNA, L. E . A. Operação “ótima” de Sistemas de Reservatórios – Aplicação ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Aracaju, 2001.

LOUCKS, D. P; STENDIGER, J. R; HAIT, D. A. **Water Resources Planning Systems Planing and Analysis**. New Jersey, Prentince Hall, 1981.

MMA, Ministério do Meio Ambiente; MEC, Ministério da Educação; IDEC, Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor. **Manual de Educação para o Consumo Sustentável**. Brasília: Consumers International/ MMA/ MEC/IDEC, 2005.

MICHALLAND, B, et al. Bi-Objective Dynamic Programming for Trading Off Hydropower and Irrigation. **Applied Mathematics and Computation**, [S.L.], vol. 88, p. 53-76, 1997.

MOHAN, S.; RAIPURE, D. M. Multiobjective Analysis of Multireservoir System. **Journal of Water resources Planning and Management**, [S.L.], v. 118, p. 356-370, July/August, 1992.

MOUSAVI, H.; RAMAMURTHY, A. S. Optimal Design of Multi-Reservoir Systems for Water Supply. **Advances in Water Resources**, [S.L.], vol. 23, pp. 613-624, 2000.

PAIXÃO, M. P.; STUDART, T. M. de C.; CAMPOS, J. N. B.C.; CARVALHO, R. M. de. Aplicação de indicadores de performance na avaliação de sistemas hídricos: um estudo de caso. **XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Curitiba, 2003.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O.; LEITÃO, T. H. V. (2005). “Estimativa da Evaporação e Análise de Uso do Coeficiente (kp) do Tanque “Classe A” nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** (10-4), pp. 73-83.

POMPEU, C.T. Águas doces no direito brasileiro. REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. In: **Água doce no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. 3. Ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. p. 677- 718.

REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. 3. Ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.

REBOUÇAS, A. da C. **Água doce no mundo e no Brasil**. REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. In: **Água doce no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. 3. Ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. p. 1 – 34.

RIBEIRO, W. C. **Água Doce: Conflitos e Segurança Ambiental**. In: **Uso e Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil: desafios teóricos e político-institucionais**. São Carlos: Rima, 2003. p. 71-77.

SALETI, E.; LEMOS, H.M. de.; SALETI, E. **Água e o Desenvolvimento sustentável**. REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. In: **Água doce no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. 3. Ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. p. 37- 62.

SANTOS, V. da S. **Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SANTOS, V. da S. **Modelo de Otimização Quali-Quantitativo Multiobjetivo para o Planejamento dos Recursos Hídricos Superficiais, com aplicação à Bacia do Rio Paraíba**. 2011. 170 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SANTOS, V. da S.; VIEIRA, A.S.; CURI, W.F., CURI, R.C. **Otimização Multiobjetivo Plurianual e Integrada dos Recursos Hídricos dos Reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Semi-Árido Paraibano**. In: **IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Salvador, 2008.

SCIENTEC. Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba: Bacias do Rio Piancó e do Alto Piranhas**. Governo do Estado da Paraíba; Secretaria do Planejamento, SEPLAN. João Pessoa, 1997.

SIMONOVIC, S.P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v.118, n. 3, p.262-280, 1992.

SRINIVASAN, K., NEELAKANTAN, T.R.; NARAYAN P.S., NAGARAJUKUMAR, C. Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 125, n.5, p. 298-301, Set/Out, 1999.

TC/BR-CONCREMAT. **Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo & Atlas / Governo do Estado da Paraíba; Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, SECTMA; Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA**. Brasília, DF, 2006.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, Takato. **Recursos Hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

USP – Universidade de São Paulo. **AcquaNet – Modelo para Alocação de Água em Sistemas Complexos de Recursos Hídricos: Manual do usuário**. LABSID – Laboratório de Sistemas

de Suporte a Decisões. São Paulo, 2002. Disponível em:< <http://www.labsid.com.br/arquivos.php?id=126>>. Acesso em 02 jul. 2013.

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de Sustentabilidade: Uma Análise Comparativa**. 2 ed. Rio de Janeiro: FGV, 2006.

VIEIRA, V. P. P. B., Sustentabilidade do semiárido Brasileiro: Desafios e Perspectivas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L], v.7, n.4, pp.105-112, 2002.

VIEIRA, V.P.P.B.; GODIM FILHO, J.G.C. Água doce no semi-árido. REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. In: **Água doce no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. 3. Ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. p. 481- 505.

VICTORINO, C. J. A. **Planeta água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

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 Management**, New York, v. 119, n.1 p. 91-107, 1993.

YEH, W.W.G. Reservoir Management and Operation Models: A state-of-art review. **Water Resources Research**, Washington. v. 21, n. 12, p.1797-1818, 1985.

ANEXOS

ANEXO A - Vazões afluentes da Sub-bacia do Açude Engenheiro Ávidos.

VAZÕES MÉDIAS MENSAIS (m ³ /s)													
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Media
1933	0,686	1,585	0,844	6,997	7,845	1,897	0,000	0,000	0,000	0,000	0,077	0,058	1,666
1934	0,106	1,242	15,609	13,623	9,544	6,106	0,865	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	3,928
1935	0,056	4,654	47,503	32,341	12,527	5,728	0,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	8,649
1936	0,035	1,181	4,749	3,377	0,781	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,844
1937	0,014	1,546	6,916	9,745	7,405	2,395	0,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,339
1938	0,081	0,023	4,067	15,186	7,972	2,708	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,504
1939	0,035	1,721	8,753	9,868	4,376	0,338	0,000	0,000	0,000	0,022	0,011	0,022	2,095
1940	1,393	2,128	11,521	22,848	12,549	5,572	0,661	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,723
1941	0,000	1,141	10,216	8,134	3,908	0,360	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,000	1,982
1942	0,000	0,093	0,120	0,124	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,502	0,007	0,131	0,081
1943	0,042	0,167	1,611	6,695	2,695	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,040	0,940
1944	0,004	0,004	1,928	6,303	5,393	0,890	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,538	1,255
1945	1,485	1,168	1,164	1,963	4,366	2,544	0,018	0,000	0,000	0,004	0,000	0,004	1,060
1946	0,303	0,541	0,197	0,494	1,164	0,087	0,014	0,004	0,000	0,000	0,081	0,051	0,245
1947	0,172	2,734	20,313	38,139	6,804	1,185	0,000	0,000	0,000	0,000	0,193	0,193	5,811
1948	0,060	0,004	5,006	11,646	7,479	1,850	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,193	2,186
1949	0,000	0,405	0,183	4,860	5,020	4,282	0,278	0,000	0,000	0,000	0,310	1,305	1,387
1950	0,373	0,027	1,960	10,726	7,887	1,770	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,091	1,904
1951	0,232	0,031	0,004	0,611	0,953	0,018	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,080	0,161
1952	0,018	1,117	2,783	6,731	4,971	1,581	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,353	1,463
1953	0,000	0,078	2,920	1,134	0,088	0,662	0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,004	0,410
1954	0,366	2,535	4,999	7,680	7,243	4,652	0,556	0,000	0,000	0,000	0,028	0,164	2,352
1955	0,394	2,633	10,638	14,899	5,284	0,592	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,200	2,887
1956	0,000	3,429	6,864	10,515	7,532	1,763	0,042	0,000	0,000	0,000	0,004	0,033	2,515
1957	0,116	0,000	4,281	21,176	6,276	0,865	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,058	2,731
1958	0,021	0,191	0,366	2,435	0,113	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,264
1959	0,186	1,566	6,990	5,801	1,365	0,033	0,000	0,007	0,000	0,000	0,004	0,000	1,329
1960	0,042	0,023	14,230	13,103	4,696	0,538	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,719
1961	0,521	3,478	9,062	15,720	6,484	1,236	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	3,042
1962	0,067	1,760	3,989	8,247	4,879	2,115	0,091	0,000	0,000	0,004	0,000	0,087	1,770
1963	0,106	1,998	68,850	9,370	5,171	0,571	0,018	0,000	0,000	0,000	0,011	0,131	7,185
1964	0,225	1,989	7,159	41,457	11,370	6,532	1,435	0,000	0,004	0,000	0,014	0,000	5,849
1965	0,067	0,004	0,862	11,864	9,562	5,147	1,407	0,018	0,004	0,044	0,000	0,000	2,415
1966	0,025	3,236	2,343	1,101	0,869	0,131	0,004	0,000	0,007	0,000	0,000	0,058	0,648
1967	0,095	3,011	6,301	49,032	33,597	5,303	0,443	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	8,150
1968	0,225	0,782	5,080	9,138	6,213	1,868	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,022	1,946
1969	0,060	0,830	3,029	8,520	6,132	3,457	0,623	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	1,888
1970	0,366	0,113	5,168	4,056	2,818	0,011	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,015	1,047
1971	0,2463	3,0456	8,9814	38,1533	11,5776	6,3280	1,6007	0,0036	0,0000	0,0036	0,0000	0,0000	5,828
1972	0,897	3,613	7,236	9,138	6,396	1,908	0,007	0,007	0,000	0,000	0,000	0,854	2,505
1973	2,100	0,175	4,197	40,683	14,846	5,245	1,235	0,080	0,004	0,000	0,000	0,018	5,715
1974	1,087	7,657	61,417	57,919	10,631	3,566	0,204	0,000	0,000	0,007	0,014	0,025	11,877
1975	0,59	4,18	29,35	25,98	15,93	5,07	2,24	0,14	0,00	0,00	0,00	0,01	6,957

(Continua...)

ANEXO A - Vazões afluentes da Sub-bacia do Açude Engenheiro Ávidos.

1976	0,01	4,72	11,99	9,05	3,82	0,15	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	2,482
1977	0,08	0,36	6,28	20,99	26,49	6,71	2,85	0,03	0,00	0,00	0,00	0,49	5,357
1978	0,09	1,28	7,30	5,04	5,40	2,70	0,16	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,842
1979	0,43	1,96	11,70	18,64	8,74	3,11	0,04	0,00	0,02	0,00	0,04	0,00	3,724
1980	0,208	3,079	26,934	4,794	0,496	0,004	0,014	0,000	0,000	0,004	0,398	0,000	2,994
1981	0,127	0,284	4,732	18,820	2,952	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,062	2,250
1982	0,106	0,031	1,379	2,221	1,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	0,049	0,000	0,484
1983	0,144	2,329	0,450	2,948	0,299	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,514
1984	0,099	0,120	4,609	28,692	8,492	3,998	0,137	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	3,846
1985	1,928	42,031	25,635	52,441	22,174	5,834	1,428	0,000	0,000	0,000	0,000	1,367	12,736
1986	0,471	4,078	32,256	24,869	14,561	5,648	0,978	0,007	0,000	0,015	0,053	0,000	6,911
1987	0,179	0,954	3,324	8,930	5,266	0,672	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,611
1988	0,088	0,350	2,959	21,067	13,013	2,799	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,178	3,373
1989	0,408	0,167	0,704	13,710	19,672	8,080	2,290	0,000	0,049	0,033	0,000	0,607	3,810

Fonte: SCIENTEC, 1997.

ANEXO B - Vazões afluentes da Sub-bacia do Açude de São Gonçalo.

VAZÕES MÉDIAS MENSAIS (m ³ /s)													
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Media
1933	0,269	0,605	0,552	2,225	2,851	0,968	0,011	0,000	0,000	0,000	0,081	0,038	0,633
1934	0,117	0,490	7,946	4,583	5,181	2,153	0,494	0,000	0,000	0,000	0,008	0,085	1,755
1935	0,017	6,078	12,305	12,572	4,159	3,275	1,371	0,072	0,000	0,000	0,000	0,000	3,321
1936	0,033	0,392	0,783	0,502	0,021	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,145
1937	0,001	0,595	2,467	9,594	2,625	0,921	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,353
1938	0,009	0,156	1,444	7,228	2,724	0,990	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,047
1939	0,010	0,235	3,586	3,204	1,989	0,325	0,003	0,000	0,002	0,008	0,003	0,012	0,782
1940	0,951	1,351	2,510	3,247	4,887	2,637	0,822	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	1,367
1941	0,005	0,323	6,380	3,502	2,037	0,331	0,001	0,000	0,000	0,000	0,057	0,001	1,053
1942	0,000	0,096	0,010	0,671	0,312	0,000	0,000	0,000	0,000	0,481	0,009	0,150	0,144
1943	0,029	0,070	0,614	2,278	1,078	0,045	0,001	0,000	0,000	0,000	0,014	0,030	0,346
1944	0,023	0,002	1,137	3,086	2,434	0,789	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,092	0,631
1945	0,270	0,092	0,594	1,019	2,585	2,160	0,370	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,592
1946	0,051	0,575	0,072	0,174	0,217	0,039	0,019	0,040	0,000	0,000	0,149	0,171	0,126
1947	0,137	1,516	6,232	10,009	2,238	0,347	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	0,037	1,721
1948	0,009	0,061	1,224	4,310	2,514	0,660	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,093	0,740
1949	0,003	0,191	0,436	1,740	1,720	1,462	0,131	0,017	0,000	0,000	0,069	0,406	0,515
1950	0,009	0,018	0,632	6,151	2,441	0,470	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,810
1951	0,091	0,047	0,006	0,214	0,495	0,000	0,000	0,000	0,000	0,037	0,000	0,105	0,083
1952	0,032	0,166	0,720	1,420	1,727	0,673	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,139	0,407
1953	0,003	0,009	0,344	0,106	0,111	0,494	0,053	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,093
1954	0,385	2,217	6,378	8,759	2,497	0,830	0,009	0,000	0,000	0,000	0,011	0,090	1,765
1955	0,058	0,552	8,128	4,998	1,932	0,269	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,018	1,330
1956	0,015	2,505	2,621	2,961	1,832	0,217	0,031	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,849
1957	0,107	0,005	1,155	11,661	2,228	0,340	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	1,292
1958	0,000	0,108	0,358	1,100	0,054	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,135
1959	0,283	0,768	2,709	2,796	1,153	0,184	0,019	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,660
1960	0,079	0,015	13,646	3,188	1,353	0,231	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,543
1961	0,237	1,534	1,203	6,745	2,444	0,573	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1,062
1962	0,006	0,232	1,332	4,838	2,044	0,665	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048	0,766
1963	0,055	0,349	18,926	3,129	2,150	0,384	0,007	0,000	0,000	0,001	0,009	0,018	2,086
1964	0,026	0,497	0,733	1,493	2,022	1,466	0,161	0,004	0,015	0,000	0,000	0,001	0,535
1965	0,118	0,180	0,630	15,015	4,383	1,507	0,625	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	1,872
1966	0,001	0,678	0,558	0,026	0,079	0,229	0,006	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,132
1967	0,085	1,345	4,334	12,646	9,353	1,754	0,159	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	2,473
1968	0,032	0,042	11,526	2,998	1,830	0,339	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	1,398
1969	0,195	0,763	1,951	5,805	2,218	0,976	0,070	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,998
1970	0,207	0,162	2,251	2,320	1,241	0,048	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,520
1971	0,18	3,41	9,87	8,68	3,18	2,47	1,20	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	2,418
1972	0,213	0,615	1,970	1,874	1,363	0,326	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,272	0,553
1973	0,289	0,023	0,846	16,209	4,007	1,209	0,174	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	1,897
1974	0,089	0,947	5,461	17,444	3,561	1,268	0,093	0,000	0,000	0,000	0,088	0,000	2,413
1975	0,36	1,11	3,29	8,30	4,14	1,35	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,575

(Continua...)

ANEXO B - Vazões afluentes da Sub-bacia do Açude de São Gonçalo.

1976	0,00	0,4679	0,9785	1,1692	0,0652	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0047	0,0069	0,0000	0,224
1977	0,08	0,256	19,405	7,614	4,279	1,467	0,146	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	2,781
1978	0,19	0,942	2,372	0,839	0,726	0,071	0,006	0,005	0,000	0,005	0,001	0,000	0,430
1979	0,04	0,57	1,28	2,49	1,91	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,564
1980	0,121	0,649	15,563	1,661	0,274	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	1,524
1981	0,056	0,199	11,631	4,892	0,924	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,105	0,018	1,485
1982	0,024	0,018	1,239	0,873	2,347	0,755	0,001	0,000	0,000	0,024	0,111	0,000	0,449
1983	0,010	0,864	0,538	0,236	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,137
1984	0,014	0,005	1,518	6,750	3,813	2,157	0,320	0,000	0,000	0,000	0,021	0,038	1,220
1985	0,632	11,864	12,953	22,592	10,502	2,487	1,333	0,111	0,000	0,000	0,000	0,045	5,210
1986	0,061	0,620	2,082	8,201	4,819	1,472	0,193	0,000	0,001	0,002	0,018	0,000	1,456
1987	0,017	0,187	0,817	0,423	0,001	0,001	0,011	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,123
1988	0,021	0,048	0,665	2,338	4,066	1,297	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,073	0,713
1989	0,396	0,001	0,226	7,508	5,090	2,037	0,578	0,000	0,090	0,014	0,000	0,218	1,347

Fonte: SCIENTEC, 1997.

ANEXO C - Resumo das principais informações sobre o Reservatório Engenheiro Ávidos

AÇUDE ENGENHEIRO ÁVIDOS	
Bacia hidrográfica	Alto Piranhas
Curso barrado	Rio Piranhas
Município	Cajazeiras
Origem da Ficha	DNOCS
Latitude	-
Longitude	-
Latitude (UTM - Km)	9.231,70
Longitude (UTM - Km)	560,30
Volume máximo (m ³)	255.000.000,00
Volume morto (m ³)	27.968.100,00
Barragem	
Altura (m)	45,00
Comprimento (m)	359,40
Material	Terra e enrocamento
Vertedor	
Largura (m)	160,00
Material	
Tipo	Corte
Cota da soleira (m)	317,20
Cota mínima (m)	290,00
Cota do Porão (m)	301,00
Outras Informações	
Início de construção	1932
Conclusão de construção	1936
Finalidade	Abastecimento, Irrigação, Piscicultura, Perenização Eletrificação, Turismo
Área bac. hidráulica (ha)	2.845,00
Área bac. hidrográfica (km ²)	935,00

Fonte: SCIENTEC, 1997.

ANEXO D - Resumo das principais informações sobre o Reservatório São Gonçalo

AÇUDE SÃO GONÇALO	
Bacia hidrográfica	Alto Piranhas
Curso barrado	Rio Piranhas
Município	Sousa
Origem da Ficha	DNOCS/CAGEPA
Latitude	6°51'S
Longitude	38°18'W
Latitude (UTM - Km)	9.243,50
Longitude (UTM - Km)	575,75
Volume máximo (m3)	44.600.000,00
Volume morto (m3)	2.982.000,00
Barragem	
Altura (m)	25,30
Comprimento (m)	380,00
Material	Terra
Vertedor	
Largura (m)	230,00
Material	
Tipo	Creager
Cota da soleira (m)	247,00
Cota mínima (m)	226,00
Cota do Porão (m)	234,00
Outras Informações	
Início de construção	1932
Conclusão de construção	1936
Finalidade	Irrigação, Abastecimento
	Perenização, Piscicultura, Turismo
Área bac. hidráulica (ha)	700,00
Área bac. hidrográfica (km2)	315,00

Fonte: SCIENTEC, 1997.

ANEXO E - Dados de Cota x Área x Volume do reservatório Engenheiro Ávidos

Cota(m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
290	560192	160100
291	812942	852800
292	1092616	1891800
293	1399312	3268800
294	1733742	4983500
295	2097230	7042600
296	2491712	9460700
297	2919742	12259800
298	3384483	15469400
299	3889712	19126400
300	4439822	23275200
301	5039816	27968100
302	5695312	33264600
303	6412542	39231600
304	7198359	45943200
305	8060192	53483300
306	9006142	61939700
307	10044883	71410000
308	11185712	81999000
309	12438542	93818600
310	13813897	106988700
311	15322912	121636500
312	16977341	137896400
313	18789549	155911000
314	20772512	175829600
315	22939821	197809700
316	25305683	222016100
317	27884911	248620800
318	30692941	277803800
319	33745816	309752400
320	37060192	344661000

Fonte: SCIENTEC, 1997.

ANEXO F - Dados de Cota x Área x Volume do reservatório de São Gonçalo

Cota(m)	Área (m²)	Volume (m³)
226,00	10.000	-
227	40000	22000
228	86000	96000
229	160000	250000
230	260000	442000
231	420000	780000
232	646000	1348000
233	800000	2050000
234	988000	2982000
235	1150000	4050000
236	1356000	5326000
237	1600000	6900000
238	1922000	8604000
239	2240000	10700000
240	2626000	13152000
241	3000000	15900000
242	3444000	19222000
243	4000000	23200000
244	4716000	27382000
245	5200000	32500000
246	6158000	38256000
247	7000000	44600000
248	7890000	52304000
249	8850000	61000000
250	9896000	70090000

Fonte: SCIENTEC, 1997.