



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

ALEX PINHEIRO FEITOSA

OTIMIZAÇÃO DO USO DAS ÁGUAS DA BARRAGEM SANTA CRUZ-RN

Natal, 2013

ALEX PINHEIRO FEITOSA

OTIMIZAÇÃO DO USO DAS ÁGUAS DA BARRAGEM SANTA CRUZ-RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. João Abner Guimarães Júnior

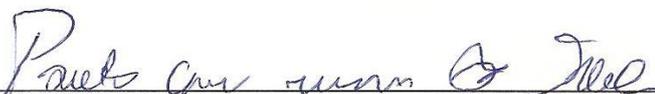
Natal, 2013

ALEX PINHEIRO FEITOSA

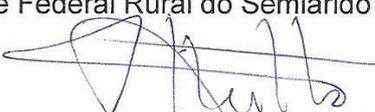
OTIMIZAÇÃO DO USO DAS ÁGUAS DA BARRAGEM SANTA CRUZ-RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

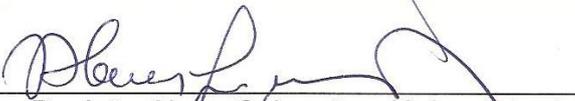
BANCA EXAMINADORA



Dr. Paulo Cesar Moura da Silva – Examinador Externo
Universidade Federal Rural do Semiárido – UFRSA



Dr. Antonio Marozzi Riguetto - Examinador Interno
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN



Dr. João Abner Guimarães Júnior- Orientador
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN



Dra. Adélena Gonsalves Maia - Co-orientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Natal, 2013

À minha mãe, Maria das Graças Pinheiro Feitosa, que sempre procurou passar os corretos ensinamentos da vida com vistas à formação de um ser humano melhor bem como proporcionar uma educação de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela doce presença em todos os momentos da minha vida.

A concretização deste trabalho apenas foi possível graças à contribuição de algumas instituições e pessoas, às quais expresso meus sinceros agradecimentos:

- Aos meus Familiares;
- Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária PPgES;
- Aos Professores Arthur Mattos, Antonio Marozzi Riguetto e Paulo Cesar Moura da Silva;
- A minha co-orientadora Profa. Dra. Adelena Gonçalves Maia;
- Ao grande Amigo Moises Andrade que sempre me ajudou e foi bastante prestativo;
- Aos amigos Hélio, Herison, Neuciano, Eduardo, Jose Francisco, Salatiel Venancio;
- Às secretarias do LARHISA, Leonor, Carina, Lucymara; e
- A Luciana da Silva pelo apoio que sempre prestou durante minha passagem pelo mestrado.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS..... | 4 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 4 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1 PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS | 5 |
| 3.2 O PROCESSO DE OUTORGA DE USO DA ÁGUA NO BRASIL | 8 |
| 3.2.1 CÓDIGO DAS ÁGUAS | 8 |
| 3.2.2 A LEI 9433/97 | 8 |
| 3.3 LEGISLAÇÃO ESTADUAL..... | 11 |
| 3.3.1 A OUTORGA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE | 11 |
| 3.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO | 14 |
| 3.5 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO | 16 |
| 4.MATERIAL E METODOS | 17 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 17 |
| 4.1.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA SANTA CRUZ | 17 |
| 4.1.2 CLIMA..... | 21 |
| 4.1.3 SOLOS | 22 |
| 4.2 PERFIL DOS MUNICÍPIOS UTILIZADORES DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BARRAGEM SANTA CRUZ | 25 |
| 4.2.1 APODI | 25 |
| 4.2.2 CARAÚBAS | 26 |
| 4.2.3 PAU DOS FERROS..... | 26 |
| 4.2.4 MOSSORÓ..... | 27 |
| 4.3 IDENTIFICAÇÃO DOS USOS..... | 28 |
| 4.3.1 PROJETO DE IRRIGAÇÃO SANTA CRUZ..... | 29 |
| 4.3.2 SISTEMA ADUTOR DO ALTO OESTE | 30 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.3.3 | ESTAÇÃO DE PISCICULTURA DE APODI | 31 |
| 4.3.4 | ADUTORA SANTA CRUZ MOSSORÓ..... | 31 |
| 4.4 | APLICAÇÃO DO SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO (SSD) | 32 |
| 4.4.1 | O SSD AQUANET | 32 |
| 4.4.2 | ETAPAS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS PELO ACQUANET | 36 |
| 4.4.2.1 | DESENHO DA REDE DE FLUXO | 36 |
| 4.4.2.2 | DEFINIÇÕES GERAIS..... | 37 |
| 4.4.2.3 | MÓDULO SECUNDÁRIO NO ACQUANET..... | 38 |
| 4.4.2.4 | MÓDULO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA..... | 39 |
| 4.4.2.5 | TIPOS DE SIMULAÇÃO..... | 39 |
| 4.4.2.6 | OPÇÕES DE CÁLCULO | 40 |
| 4.4.2.7 | OS DADOS DE ENTRADA/EDIÇÃO REQUERIDO PELO MODELO | 41 |
| 4.4.2.8 | A EFETUAÇÃO DO CÁLCULO E OBTENÇÃO DOS RESULTADOS | 42 |
| 4.4.2.9 | RESULTADOS | 42 |
| 4.4.3 | ÍNDICES DE CONFIABILIDADE, RESILIÊNCIA E VULNERABILIDADE..... | 44 |
| 4.5 | DADOS UTILIZADOS DURANTE A SIMULAÇÃO..... | 46 |
| 4.5 | ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS | 47 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 50 |
| 5.1 | SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS..... | 50 |
| 6. | CONCLUSÕES..... | 58 |
| 7. | RECOMENDAÇÕES | 59 |
| 8. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: | 60 |
| | ANEXO A – O ALGORITMO OUT-OF-KILTER (OOK) | 67 |
| A.1 | FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO OUT-OF-KILTER (OOK)..... | 67 |
| A.1.1 | FASE PRIMAL DO OOK | 69 |
| A.1.2 | FASE DUAL DO OOK | 69 |

| | |
|---|----|
| A.2EXEMPODE APLICAÇÃO DO ALGORITMO OUT-OF-KILTER..... | 70 |
|---|----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura1: Mapa de localização da Barragem Santa Cruz dentro Bacia Hidrográfica do rio Apodi/Mossoró..... | 19 |
| Figura 2: Mapa dos Municípios inseridos na SubBacia Hidrográfica Santa Cruz..... | 20 |
| Figura 3: Curva de regularização do reservatório Santa Cruz. (Fonte: Ministério da Integração Nacional)..... | 20 |
| Figura 4: Barragem de Santa Cruz Vertendo..... | 21 |
| Figura 5: Detalhe do Vertedouro da Barragem Santa Cruz Apodi-RN..... | 21 |
| Figura 6: Classes de solos presentes na BH Santa Cruz. (Fonte: CPRM e Autor)..... | 23 |
| Figura 7:Projetos previstos de utilização das águas da Barragem Santa Cruz Apodi-RN. (Fonte: SEMARH) | 27 |
| Figura 8:Elementos da Rede de Fluxo..... | 34 |
| Figura 9: Tela principal do módulo base e exemplo de traçado de uma rede...36 | |
| Figura 10: - Botões para construção/edição do traçado..... | 36 |
| Figura 11: Tela de Definições Gerais..... | 37 |
| Figura 12:Tela para entrada/edição de dados de um reservatório..... | 41 |
| Figura 13: Tela para escolha dos resultados da simulação contínua..... | 43 |
| Figura 14:Sistema de rede de fluxo do reservatório | 49 |
| Figura 15:Demanda total requerida pelo sistema..... | 50 |
| Figura 16 :Análise do Índice de Confiabilidade para os Cenários 8, 9 e 10..... | 51 |
| Figura 17: Análise da Vulnerabilidade Cenário 10 | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Projeções de Demandas..... | 07 |
| Tabela 2: Abordagem da outorga de uso da água pela Lei 9.433..... | 10 |
| Tabela 3: Algumas considerações apresentadas no Decreto nº 13.283..... | 12 |
| Tabela 4: Resumo das classes de solos da Bacia Santa Cruz..... | 24 |
| Tabela 5: Dados da produção agrícola do município de Apodi-RN..... | 25 |
| Tabela 6: Demandas identificadas atualmente e previstas para implementação no futuro..... | 36 |
| Tabela 7: Resumo dos esquemas de prioridades para os cenários de alocação de águas..... | 37 |
| Tabela 8: Confiabilidade dos pontos de demandar nos cenários..... | 38 |
| Tabela 9: Resiliência dos pontos de demandas nos cenários..... | 41 |
| Tabela 10: Vulnerabilidade dos pontos de demandas nos cenários..... | 42 |

RESUMO

Feitosa, A.P. Otimização do uso das águas da barragem santa cruz-rn. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2013. 88p. Dissertação de Mestrado.

A região do semiárido potiguar apresenta um quadro discrepante, é uma região com um dos maiores índices de açudagem do mundo. Porém a política de construção de açudes para atenuar o problema da escassez de água não resolve, haja vista que estes não têm demonstrado capacidade de assegurar o abastecimento humano prioritário nos períodos de grande estiagem. Este trabalho tem como objetivo apresentar a simulação da operação do reservatório Santa Cruz, de acordo com os usos múltiplos e limitada disponibilidade de recursos hídricos do reservatório, a partir da simulação da operação do mesmo, com aplicação de técnicas de apoio à tomada de decisão e conseqüentemente a avaliação do desempenho das alternativas de uso da água. O reservatório de Santa Cruz, o segundo maior reservatório do RN com capacidade de armazenamento de aproximadamente 600 milhões de metros cúbicos, localizado cerca de 20 km da sede do município de Apodi no RN, foi concebido como forma de promover o desenvolvimento econômico da região bem como o abastecimento de água de municípios próximos. As técnicas utilizadas são o modelo de simulação de rede de fluxo ACQUANET, em que foram simulados os cenários criados de acordo com os usos existentes bem como os futuros, e também o conjunto de indicadores de desempenho. Os resultados mostraram que o reservatório tem a capacidade de atendimento até $3,83\text{m}^3/\text{s}$ de vazão requerida pelos usos existentes, sem que haja o comprometimento dos mesmos. Entretanto, foi observado também que se todas as demandas futuras entrarem em operação, isso vai acarretar falhas no sistema, dessa forma comprometendo e limitando os usos de menor prioridade, visto que os mesmos não terão sua demanda total satisfeitos.

Palavras-chave: otimização, semiárido, gestão, indicadores de desempenho.

ABSTRACT

The semiarid potiguar presents a quite discrepant. It is a region with one of the highest rates of artificial lake the world, but the policy of building dams to mitigate the problem of water scarcity does not solve, given that they have not demonstrated the ability to ensure supply human priority during periods of great drought and fail to solve the widespread demand existent in the semiarid. This work aims to present the optimal allocation of water, according to multiple uses and limited availability of water resources in the reservoir, from the simulation of the operation of the same, with the application of techniques to support decision making and performance evaluation alternatives for water use. The reservoir of Santa Cruz, the second largest reservoir of RN with storage capacity of approximately 600 million cubic meters, located about 20 km from the town of Apodi in RN, was conceived as a way to promote economic development in the region as well as the water supply of nearby towns. The techniques used are the simulation model of network flow ACQUANET and also the set of performance indicators. The results showed that the container has the capacity to serve up to $3,83\text{m}^3/\text{s}$ flow required by existing uses, without any compromising the same. However, it was also observed that all anticipated future demands are implemented it will generate failures in meeting some uses.

Keywords: optimization, semiarid, management, performance indicators.

1. INTRODUÇÃO

Em meio à seca, o semiárido brasileiro possui algumas áreas naturais com características especiais, formadas por rios perenizados, solos profundos agricultáveis, de natureza sedimentar ou cristalina, relevo plano ou suavemente ondulado, onde a agricultura irrigada é praticada em alta escala.

A irrigação, nessas condições, é uma atividade que requer grandes investimentos públicos e privados, estimulados pelos governos federal e estadual da Região, que propagam os inúmeros benefícios financeiros e o grande número de empregos diretos e indiretos por ela gerados, trazendo ainda, como consequência a diminuição do êxodo rural.

Porém, o atendimento às altas demandas de água requeridas por essa atividade gera conflitos com o uso da água para consumo humano, que se acentuam nos períodos de estiagem.

Essa região, uma das mais povoadas do mundo, apresenta-se naturalmente, com um regime de chuvas caracterizado por grande variabilidade espacial e temporal e alta frequência de ocorrências de secas prolongadas plurianuais.

Nesse contexto, tendo em vista as necessidades de segurança hídrica para o abastecimento humano, os gestores de recursos hídricos são obrigados a preservar as águas armazenadas nos reservatórios, mantendo os espelhos de água, dentro do possível, nas maiores elevações, promovendo assim grandes perdas por evaporação durante as estiagens e conseqüentemente restringindo bastante os diversos usos múltiplos com fins econômicos (RIGHETTO; GUIMARÃES JÚNIOR, 2003).

Nesse sentido, a Lei das Águas (Lei 9.433/97), apesar de estabelecer a prioridade do consumo humano em condições de escassez, orienta que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas.

Fato esse que se observa, cada vez mais atualmente, nos estudos para operação de sistemas de reservatórios no Brasil, onde o enfoque do aproveitamento múltiplo das águas prevalece, ou seja, sistemas de exploração e controle de recursos hídricos estão voltados para a satisfação das

necessidades humanas e das demandas vinculadas às atividades econômicas e sociais (BRANDÃO; BARROS, 2006).

Nesse contexto, pode-se destacar a problemática da gestão dos recursos hídricos na bacia do Rio Apodi-Mossoró, a segunda mais importante bacia do Estado do Rio Grande do Norte, onde se destaca a otimização do uso das águas da barragem de Santa Cruz na região do município de Apodi, podendo incluir diversos usos conflitantes tais como: abastecimento humano a partir de grandes adutoras com alcance regional, irrigação, piscicultura, usos relacionados com lazer e a recreação da população e o controle de cheia.

A região do semiárido potiguar apresenta um quadro bastante discrepante. É uma região com um dos maiores índices de açudagem do mundo, porém a política de construção de açudes para atenuar o problema da escassez de água não resolve, haja vista que estes não têm demonstrado capacidade de assegurar o abastecimento humano prioritário nos períodos de grande estiagem e não conseguem resolver a demanda difusa existente no semiárido. Além disso, essa política torna-se mais ineficiente devido principalmente à falta de gestão.

Dessa forma, na tentativa de enfrentar essa problemática que envolve oferta e demanda de água, o Plano Estadual de Recursos Hídricos contemplou o planejamento de ações por bacia hidrográfica, considerando os volumes úteis anuais necessários por fonte hídrica para o horizonte 2020. No âmbito das ações planejadas, os maiores investimentos são previstos para a construção de poços, açudagem e perenização (PEDMO, 2007).

O reservatório de Santa Cruz, o segundo maior reservatório do RN com capacidade de armazenamento de aproximadamente 600 milhões de metros cúbicos, localizado cerca de 20kmda sede do município de Apodi no RN, foi concebido como forma de promover o desenvolvimento econômico da região bem como o abastecimento de água de municípios próximos, com vistas, principalmente, a resolver os graves problemas enfrentados pela população no que diz respeito à escassez de água, visto que o aumento da demanda se deu em decorrência de mudanças na estrutura socioeconômica, que delinearam um

perfil demográfico atual predominantemente urbano na região semiárida como um todo.

Recentemente, os Governos Estadual e Federal, por meio da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do RN (SEMARH) e o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), vêm desenvolvendo grandes projetos com sustentabilidade hídrica na barragem de Santa Cruz, que em conjunto, poderão gerar demandas superiores à capacidade de atendimento da barragem de Santa Cruz, onde se sobressaem dois grandes sistemas adutores para o abastecimento de grande parte da população da bacia do Rio Apodi e o maior projeto de irrigação do Estado a ser implantado na Região da Chapada do Apodi, um altiplano que se desenvolve ao longo da margem esquerda do Rio Apodi, com cotas 80 m a 100 m acima do leito do rio.

Entretanto, por entender que o projeto proposto pelo DNOCS encontra-se em oposição à história de desenvolvimento da região do Apodi, no Rio Grande do Norte, entidades, sindicatos e movimentos sociais vêm promovendo uma grande mobilização contra a implantação do Projeto de Irrigação da Chapada do Apodi, defendendo a construção de um projeto alternativo que incorpore e potencializa as experiências bem sucedidas de agricultura agroecológicas familiar na Região e que integre as atividades econômicas do Vale e da Chapada do Apodi. Além disso, sabe-se que a água não será suficiente para atender a todas as demandas existentes, podendo gerar assim conflitos entre os seus usuários.

Diante desse cenário de conflito pelo uso da água, torna-se necessária a busca de ferramentas com vistas à promoção do desenvolvimento sustentável da região, aumentando os benefícios econômicos bem como se adequando as restrições operacionais e ambientais.

Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa é apresentar a simulação da operação do reservatório Santa Cruz de acordo com os múltiplos usos e limitada disponibilidade de recursos hídricos no, com aplicação de técnicas de apoio à tomada de decisão e avaliação do desempenho das alternativas de uso da água. As técnicas utilizadas são o modelo de simulação de rede de fluxo ACQUANET e também o conjunto de indicadores de desempenho.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a alocação ótima de água, de acordo com os múltiplos usos e limitada disponibilidade de recursos hídricos da Barragem de Santa Cruz para subsidiar a gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró na seção barragem de Santa Cruz;
- Identificar e quantificar os diversos usos de água na barragem de Santa Cruz; e
- Simular a operação do reservatório com aplicação de técnicas de apoio à tomada de decisão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

No desenvolvimento das sociedades humanas, os recursos hídricos desempenham um papel fundamental, não só do ponto de vista econômico, mas também ambiental. É dentro deste contexto de desenvolvimento sócio-econômico-ambiental que o planejamento e a gestão integrada de recursos hídricos devem ser discutidos e analisados(BRAGA, et al, 1998).

No Brasil os recursos hídricos estão distribuídos regionalmente da seguinte maneira: 70% para a região Norte, 15% para a Centro-Oeste, 12% para as regiões Sul e Sudeste, que apresentam o maior consumo de água, e apenas, 3% para a Nordeste. Essa região, além da carência de recursos hídricos, tem sua situação agravada por um regime pluviométrico irregular e pela baixa permeabilidade do terreno cristalino(BORSOI; TORRES, 2007).

Por isso, o Brasil deve promover uma gestão eficiente dos seus recursos hídricos, não só para preservar e garantir o acesso à suas reservas e corpos hídricos nos diversos pontos do território brasileiro para as gerações atuais, mas também para garantir às gerações futuras ao menos as mesmas condições de acesso.

É imprescindível para tanto o conhecimento das necessidades dos diversos usuários, da capacidade de oferta e da velocidade de renovação das fontes naturais. São informações essenciais para a promulgação dos marcos de regulação e a definição, em seguida, da capacidade de suporte (ou retirada) de cada bacia hidrográfica.

Dessa forma a gestão de recursos hídricos, através da bacia hidrográfica, tem papel fundamental na gestão ambiental porque a água é um indicador que se presta a modelagens de simulação.

O planejamento do uso das águas dos mananciais existentes pode proporcionar um melhor aproveitamento, controle e conservação de suas águas, porém, o grande desafio deste planejamento está em ser capaz de atender as demandas dos múltiplos usos de forma integrada e otimizada para todo o sistema (SANTOS, et al.2011).

Assim, no procedimento de planejar o uso dos recursos hídricos, deve-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.

Sendo que, um dos pontos mais discutidos em planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é como decidir e formalizar critérios que orientarão a decisão de uma melhor alternativa.

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

De acordo com Cabrera (1997), para que se consigam bons resultados em planejamento de recursos hídricos deve-se conciliar: uma boa ação política, um conhecimento adequado de ferramentas de engenharia e uma coordenação entre ambas às atuações.

Vieira (2003) identificou e agrupou os problemas relacionados à gestão integrada dos recursos hídricos na Região Semiárida, nos seguintes temas:

- Segurança de obras hidráulicas;
- Integração vertical do planejamento;
- Articulação interinstitucional;
- Uso da água como bem econômico;
- Controle hidro ambiental de bacias;
- Capacitação institucional e tecnológica;
- Participação da sociedade;
- Outorga e domínio das águas;
- Alerta para eventos extremos; e
- Gerenciamento de risco.

Na região onde o reservatório Santa Cruz está implantado, foi elaborado o Plano Estadual de Desenvolvimento do Médio Oeste do RN no ano de 2007

(PEDMO), nesse documento entre os diversos temas abordados foi contemplado também a parte dos recursos hídricos da região, no qual alguns desses problemas anteriormente descritos foram identificados. O mesmo foi dividido em 2 volumes, o primeiro que faz um diagnóstico completo e o segundo que traz propostas de projetos para dar subsídios aos gestores no planejamento e gerenciamento dos RH da região.

Outro documento de referencia para a gestão dos RH da região é o Plano Estadual de Recursos Hídricos, que projetou, a partir de estudos realizados visando diagnosticar qualitativa e quantitativamente as deficiências hídricas para o ano 2000, 2010 e 2020, o nível de atendimento às demandas por bacia hidrográfica. No referido documento, os déficits foram identificados sob a forma de demandas provenientes das populações urbanas (DHUC) e rurais (DHR), demanda de dessedentação animal (DA), demanda de irrigação (DIR) e demanda industrial (DI) (PEDMO, 2007).

De acordo com o PEDMO (2007), tomando como referência os números relativos a 1996 e as projeções para 2010 e 2020, o cotejamento de dados permite a observância de alguns aspectos importantes como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Projeções de Demandas

| Demanda | Período | |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| | 1996-2010 (%) | 1996-2020 (%) |
| Abastecimento humano Urbano | 27,24 | 39,16 |
| Abastecimento humano Rural | -22,71 | -37,38 |
| Abastecimento Animal | 0,97 | 0,97 |
| Irrigação | 123,00 | 240,00 |

Fonte: PEDMO, (2007)

No que se refere à demanda requerida para o consumo da população urbana, vislumbra-se um crescimento de acordo com a Tabela 1. A demanda humana rural revela-se decrescente tanto, sinalizando para a manutenção do padrão de redução deste contingente populacional. O abastecimento animal mostra certa estabilidade, para ambos os períodos analisados. Evidenciando

um significativo diferencial em relação às outras demandas, a proveniente da irrigação aponta para o maior crescimento nos períodos em análises.

Nesse sentido, o planejamento e o gerenciamento integrado devem proporcionar uma visão abrangente de planejamento incluindo políticas públicas, tecnológicas e de educação, com o intuito de promover um processo de longo prazo com participação de usuários, autoridades cientistas e do público em geral além das organizações e instituições públicas e privadas (NASCIMENTO, et. al. 2008).

3.2 O PROCESSO DE OUTORGA DE USO DA ÁGUA NO BRASIL

3.2.1 CÓDIGO DAS ÁGUAS

A primeira lei sobre gestão de recursos hídricos no país, o Código de Águas, de 1934 (Decreto nº 24.643), priorizava a utilização dos rios brasileiros para a produção de energia elétrica, não valorizando os demais usos possíveis para a água, como o abastecimento público. Ele é, ainda, a base legal da legislação brasileira sobre a gestão das águas, exceto nos assuntos tratados pela Constituição Federal de 1988 e pela Lei nº 9.433/97, da Política Nacional de Recursos Hídricos (MEDEIROS, 2000).

O Código de Águas, em seu artigo 34, estabelece que: “É assegurado o uso gratuito de qualquer corrente ou nascente de água, para as primeiras necessidades da vida [...]”. Em seu artigo 43, estabelece: “As águas públicas não podem ser derivadas para as aplicações da agricultura, da indústria e da higiene, sem a existência de concessão administrativa, no caso de utilidade pública e, não se verificando esta, de autorização administrativa, que será dispensada, todavia, na hipótese de derivações insignificantes”.

3.2.2 A LEI 9433/97

A Lei Federal nº 9.433/97 constitui-se num marco histórico para a implementação de um sistema de gerenciamento das águas no País e está pautada por um modelo institucional descentralizado, voltado para a

participação da sociedade civil, por meio dos Comitês de Bacias Hidrográficas e de seus respectivos Conselhos de Recursos Hídricos (Buarque, et al, 2003).

A Política Nacional dos Recursos Hídricos 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 dos Recursos Hídricos;
- VI – a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

São instrumentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos essenciais à gestão adequada dos recursos hídricos:

- I – os Planos de recursos hídricos;
- II – o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;
- III – a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos;
- IV – a cobrança pelo uso dos recursos hídricos;
- V – o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Tais instrumentos devem ser utilizados em conjunto dentro de uma visão integrada dos recursos em uma bacia hidrográfica, considerada a unidade territorial de gerenciamento, com o objetivo de assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; de promover a utilização racional dos recursos hídricos assim como propiciar instrumentos para a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos (Silva, 1998).

Um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos é “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões adequados aos respectivos usos” (Brasil, 1997). Como um dos

instrumentos dessa Política, está definido na lei 9.433/97a outorga de direito de uso de recursos hídricos.

O regime de outorga definido por esta lei tem como objetivos “assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água” (Brasil, 1997). A referida lei prevê que as prioridades de usos dos recursos hídricos para outorga devam ser definidas nos planos de bacias hidrográficas, os quais, em última análise, serviriam de base para orientar o gerenciamento dos recursos hídricos, de forma que se possa realizar a sua exploração baseada na sustentabilidade (Ramos, 2005). A Tabela 2, a seguir, expõe as principais considerações apresentadas pela Lei 9.433 sobre a outorga de uso da água.

Tabela 2- Abordagem da outorga de uso da água pela Lei 9.433.

| Artigo 12 | |
|------------------------------------|--|
| Usos sujeitos a outorga | I – derivação ou captação de parcela de água existente em um corpo de água para consumo final, incluindo abastecimento público, ou insumo de processo produtivo; |
| | II – extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo; |
| | III – lançamento em corpos d’água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com fim de sua diluição, transporte ou disposição final; |
| | IV – aproveitamento de potenciais hidrelétricos; |
| Usos independentes de outorga | I – o uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural; |
| | II – derivações, captações e lançamentos considerados insignificantes; |
| | III – acumulações de volumes de água considerados insignificantes. |
| Artigo 13 | |
| Condiciona- mento da outorga | A outorga estará condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e deverá respeitar a classe em que o corpo de água estiver enquadrado e a manutenção de condições adequadas ao transporte aquaviário, quando necessário. |
| | A outorga de uso dos recursos hídricos deverá preservar o uso múltiplo destes. |
| Competência | A outorga efetivar-se-á por ato de autoridade competente do |

| | |
|---------------|---|
| para outorgar | Poder Executivo Federal, dos Estados ou do Distrito Federal. O poder Executivo Federal poderá delegar aos Estados e ao Distrito Federal, competência para conceder outorga de direito de uso de recursos hídricos de domínio da União. |
|---------------|---|

Artigo 15

| | |
|---|--|
| Circunstâncias que levam à suspensão de outorga | I – não cumprimento do outorgado dos termos de outorga; |
| | II – ausência de uso por três anos consecutivos; |
| | III – necessidade premente de água para atender as situações de calamidade, incluindo as decorrentes de condições climáticas adversas; |
| | IV – necessidade de se prevenir ou reverter grave degradação ambiental; |

Continuação da Tabela 1

| | |
|--|--|
| | V – necessidade de se atender os usos prioritários, de interesse coletivo, para os quais não se dispunha de fontes alternativas; |
| | VI – necessidade de serem mantidas as características de navegabilidade do corpo de água. |

Artigo 16

| | |
|--------------------|--|
| Duração da outorga | Toda outorga de direito de uso de recurso hídrico far-se-á por prazo não excedente a trinta e cinco anos, renovável. |
|--------------------|--|

Artigo 18

| | |
|---------------------|---|
| Alienação das águas | A outorga não implica a alienação de uso parcial das águas, que são inalienáveis, mas o simples direito de seu uso. |
|---------------------|---|

Fonte: Rodrigues, 2007

3.3 LEGISLAÇÃO ESTADUAL

3.3.1 A OUTORGA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

A política de recursos hídricos do Estado do Rio Grande do Norte está instituída na Lei nº 6.908, de 01 de julho de 1997, regulamentada pelo Decreto nº 13.283, de 22 de março de 1997 legalizando a outorga e licenças de direito de uso dos recursos hídricos na esfera de suas bacias estaduais.

Os instrumentos de gerenciamento estão definidos na referida Lei utilizada na implementação da gestão dos recursos hídricos: I – Plano Estadual de Recursos Hídricos; II – Fundo Estadual de Recursos Hídricos; III – Outorga

do direito de uso dos recursos hídricos e o licenciamento de obras hídricas; e IV-Cobrança pelo uso da água.

A Tabela 3, a seguir, descreve algumas considerações apresentadas pelo Decreto nº 13.283 sobre outorga de uso da água.

Tabela 3- Algumas considerações apresentadas no Decreto nº 13.283

| Artigo 6º | |
|-------------------------------|--|
| Usos que dependem de outorga | <p>I. Derivação ou captação de parcela de água existentes em um corpo d'água, para consumo final ou para insumo de processo produtivo;</p> <p style="text-align: center;">Continuação da Tabela 2</p> <p>II. Lançamento em um corpo d'água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;</p> <p>III. Qualquer outro tipo de uso que altere o regime, a quantidade e/ou a qualidade da água</p> |
| Artigo 7º | |
| Usos independentes de outorga | <p>I-É dispensável a outorga para captação de água subterrânea, cuja vazão de exploração recomendada não exceda de 1.000 l/h (mil litros por hora).</p> |
| Artigo 8º | |
| Não concessão da Outorga | <p>I. lançamento na água de resíduos sólidos, radioativos, metais pesados e outros resíduos tóxicos perigosos, assim definidos pela legislação pertinente;</p> <p>II. lançamento de contaminantes nas águas subterrâneas.</p> |

Artigo 9º

Prioridade de uso
para outorga

I. abastecimento de água para consumo humano em residências, hospitais, estabelecimentos de ensino, quartéis, presídios, e outros estabelecimentos coletivos semelhantes;

II. abastecimento de água para consumo humano em entidades públicas ou privadas;

III. abastecimento de água para fins de dessedentação animal;

IV. abastecimento de água para fins de produção rural, compreendendo irrigação, pecuária, piscicultura, e outros;

V. abastecimento de água para fins de produção industrial, comercial e de prestação de serviços;

VI. outros usos definidos pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CONERH.

Artigo 19º

Suspensão da outorga

I. Necessidade premente de água para atender a situações de calamidade, inclusive as decorrentes de condições climáticas consideradas críticas independentemente da decretação de estado de calamidade pública;

II. Necessidade de se prevenir ou reverter grave degradação ambiental;

| | | |
|---------------------------------------|--|--|
| | III. necessidade de se atender a usos prioritários, de interesse coletivo, para os quais não se disponha de outras alternativas. | |
| Artigo 20º | | |
| Possibilidades de extinção da outorga | I. ausência de uso por três anos consecutivos; | |
| | II. renúncia, de forma expressa ou tácita; | |
| | Continuação da Tabela 2 | |
| | III. inadimplemento de condições legais, regulamentares ou contratuais; | |
| | IV. caducidade | |
| | V. uso prejudicial da água inclusive poluição e salinização; | |
| | VI. dissolução, insolvência ou encampação do usuário, pessoa jurídica; | |
| VII. morte do usuário, pessoa física. | | |

Fonte: SEMARH

O processo de outorga de direito de uso das águas é de responsabilidade da Secretaria de Estado Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH), através da Coordenadoria de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), a mesma deverá ser solicitada junto à SEMARH, com a prévia apresentação de documentos relacionados em formulário padrão disponível no sítio da secretaria.

3.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO

A simulação tem como principal característica a flexibilidade, sendo esta considerada uma das principais vantagens, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição

matemática mais detalhada devido ao requerimento de se resolver um sistema de equações associado a um instante de tempo de cada vez. Por isso, a simulação é considerada míope, ou seja, as decisões são baseadas no estado das variáveis no presente, sem levar em consideração o que ocorre no futuro(SANTOS, 2007).

Dessa forma, apesar de não ser otimizante proporciona meios para o tratamento detalhado do comportamento de sistemas, podendo-se avaliá-lo com maior precisão e prever a sua resposta quando algumas variáveis são modificadas (MAUAD et al, 2003).

O planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas da região Nordeste do Brasil requerem informações sobre potencialidade e disponibilidade em pontos específicos da bacia hidrográfica onde existem açudes, pontos de captação ou outros interesses. A geração dessas informações deve ser feita utilizando um modelo de transformação da chuva em vazão (SILANS et al, 2000).

A disponibilidade atual de poucas séries históricas de longa duração de deflúvios naturais tem motivado o emprego generalizado desses modelos para a geração de séries de dados sintéticos das vazões afluentes dos principais rios da Região (RIGHETTO et al, 2002).

De acordo com Azevedo et al. (1997), os modelos de simulação matemática, em recursos hídricos, tem hoje aplicação irrestrita em diversas áreas, como na quantificação dos processos do ciclo hidrológico, na análise de qualidade das águas em rios, reservatórios e nos aquíferos subterrâneos, nos processos hidráulicos do escoamento da água em rios, mares e subsolo e nos modelos ambientais e meteorológicos.

Segundo Barth (1987)apud Santos (2007), a grande aplicação dos modelos de simulação em recursos hídricos tem sido na área do dimensionamento e operação de reservatórios múltiplos. Notadamente quando se deseja levar em conta a aleatoriedade das sequências de vazões afluentes e eventuais correlações cruzadas entre postos em uma bacia, o enfoque mais utilizado, na prática, tem sido a simulação.

Os modelos de simulação proporcionam a resposta de um sistema a um grupo de informações de entrada, que incluem regras de decisão, permitindo

ao decisor examinar as consequências de diversos cenários de um sistema existente ou de um sistema em projeto(SILANS et al, 2000).

3.5 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO

Em um cenário de escassez de recursos, surgem conflitos de interesse e, conseqüentemente, disputas pelo seu uso, que tornam o sistema de recursos hídricos ainda mais complexo e difícil de ser administrado. As decisões devem considerar aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, que variam no tempo e no espaço, influenciando as condições de ocorrência e uso da água.

De acordo com Brigadão (2006), a metodologia genericamente conhecida por Sistemas de Suporte a Decisões (SSD) ou Sistemas de Apoio a Decisões (SAD) é uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões, baseada na intensa utilização de bases de dados e modelos matemáticos e, também, na facilidade com que propicia o diálogo entre o usuário e o computador. Essa metodologia vem sendo aplicada, com sucesso, em diversos campos da atividade humana em que o problema da decisão é muito complexo, como é o caso do gerenciamento e do planejamento de sistemas de recursos hídricos.

Nandalal e Simonovic (2002) entendem que um sistema de suporte a decisões é visto como uma ferramenta com a função de analisar o gerenciamento e o desenvolvimento de alternativas em projetos de recursos hídricos. Isso torna o processo de tomada de decisão mais transparente e eficiente, o que irá ajudar na redução de futuros conflitos entre os agentes.

Afirmam, também, que uma definição aceitável para sistema de suporte à decisão, no contexto do gerenciamento de recursos hídricos é: “Um Sistema de Suporte a Decisão permite ao tomador de decisão combinar julgamento pessoal com dados de saída do computador, numa interface usuário-máquina, que resultem em informações significativas que auxiliem num processo de tomada de decisão. Tais sistemas são capazes de auxiliar na solução de todos os problemas (estruturados, semiestruturados e não-estruturados) usando toda a informação disponível. (...) Eles são parte integrante da abordagem de identificação e solução do problema”.

Em geral, os problemas relacionados com recursos hídricos são classificados como de gerenciamento e planejamento. O gerenciamento trata das questões relacionadas ao equilíbrio entre demanda e disponibilidade de água, da mediação dos conflitos pelos múltiplos usos da água e de seus aspectos administrativos e legais. O planejamento trata da busca de alternativas para satisfazer o suprimento futuro de água, assim como do desenvolvimento de métodos que tornem a alocação dos recursos hídricos mais eficiente, considerando as limitações impostas pelo ambiente (LABSID, 2004).

Dessa forma, os Sistemas de Suporte a Decisões são sistemas computacionais que têm por objetivo ajudar indivíduos que tomam decisões na solução de problemas não-estruturados(ou parcialmente estruturados). Problemas não estruturados são aqueles para os quais não existem soluções a partir de algoritmos bem definidos, o que ocasiona não serem facilmente tratáveis por computador. Em consequência, a solução desses problemas exige uma estreita interação entre homem e máquina, fato que constitui uma das principais características dos SSD (ROBERTO et al., 1997).

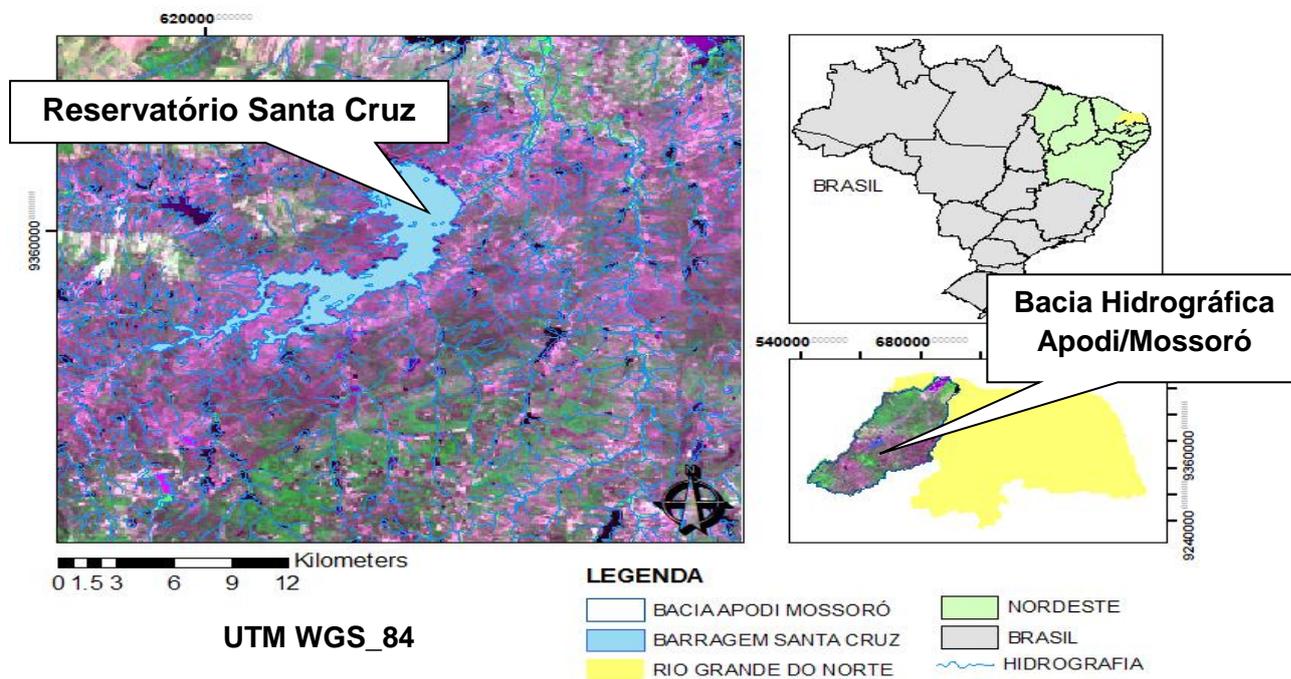
4.MATERIAL E METODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA SANTA CRUZ

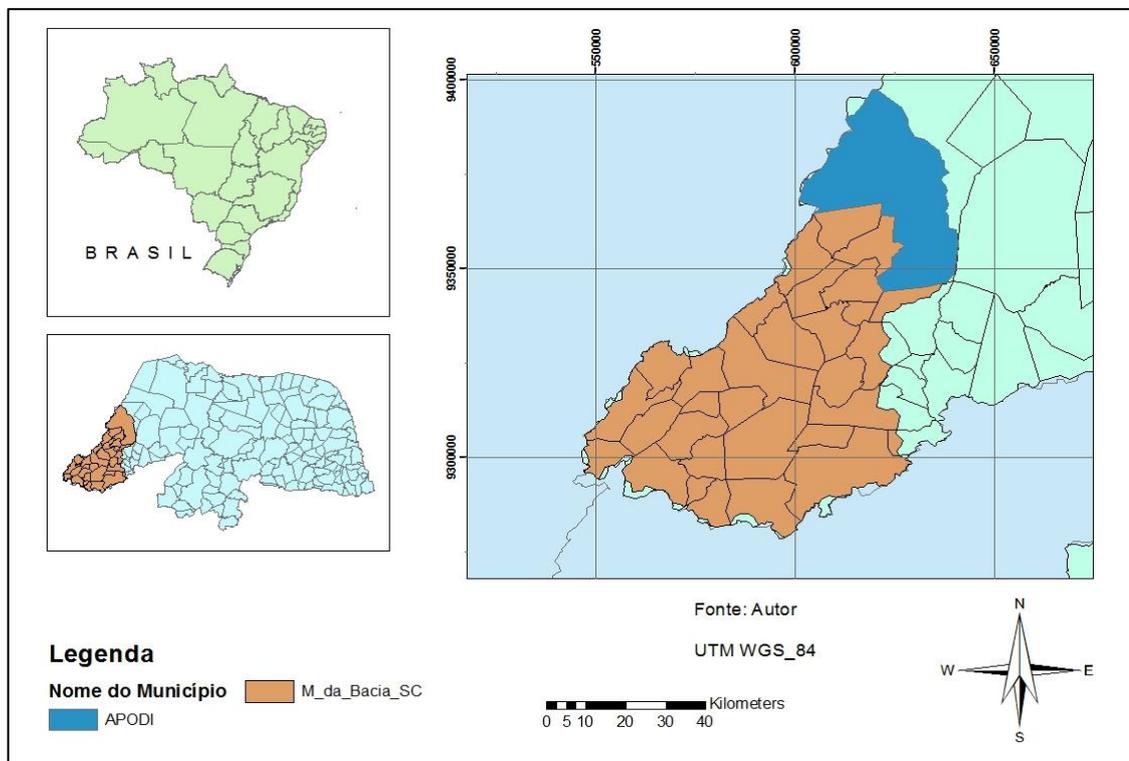
O presente foi desenvolvido no reservatório de Santa Cruz que está inserido na Bacia Hidrográfica do rio Apodi/Mossoró seção da Barragem de Santa Cruz ocupando 4.264 km²e distante cerca de 20km do município de Apodi-RN, abrangendo cerca de 32 dos 62 municípios da mesorregião Oeste Potiguar conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Localização da Barragem Santa Cruz.



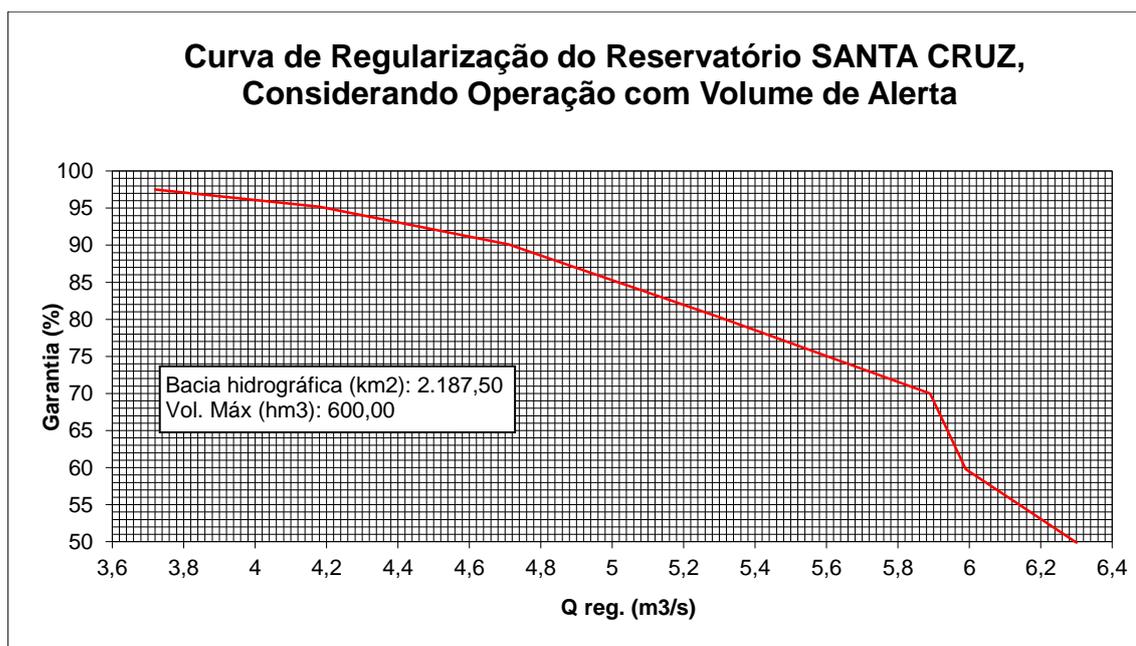
A Figura 2 apresenta delimitação da Bacia Hidrográfica do Santa Cruz bem com os municípios que estão inseridos na mesma, com destaque para aquele no qual o reservatório se encontra. Com volume de acumulação de aproximadamente 600 hm³. Com uma vazão regularizada com garantia de 95% igual a $Q_{95} = 3,95 \text{ m}^3/\text{s}$ de acordo com a curva da vazão regularizada como apresenta a Figura 3.

Figura 2: Mapa dos Municípios inseridos na Bacia Hidrográfica do rio Apodi/Mossró seção da Barragem de Santa Cruz



Fonte: Autor

Figura 3: Curva de regularização do reservatório Santa Cruz



Fonte: Ministério da Integração Nacional

O Reservatório Santa Cruz teve suas obras iniciadas no ano de 1999 e foi inaugurado em 2002, dois anos antes do prazo anteriormente estipulado que era em 2004, nesse mesmo ano também foi observada a 1 vez que a barragem veio a sangrar como mostra a Figura 4, é formado pelo barramento do Rio Apodi no ponto de coordenadas geográficas dadas por Latitude $5^{\circ} 45'S$ e Longitude $37^{\circ} 47'W$, com sangrador do tipo vertedouro central Figura 5, com 460 m de largura, a tomada d'água é composta por uma galeria torre de montante com 48,0 m de tubulação com diâmetro de 10.000 mm (SERMARH, 2003).

Figura 4 : Barragem de Santa Cruz Vertendo



Fonte: <http://pindobanoticia.blogspot.com.br/2013/02/leia-apodi-barragem-de-santa-cruz-esta.html>

Figura 5: Detalhe do Vertedouro da Barragem Santa Cruz Apodi-RN



Fonte: <http://carnaubanoticias.blogspot.com.br/2012/06/semarh-participa-da-expofruit.html>

4.1.2 CLIMA

A região conta com a estação climatológica de Apodi operada pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) que fornece os indicadores climáticos. O clima é típico do Semiárido Nordeste e enquadra-se no tipo BSh'W de Köppen. A evapotranspiração é maior do que a precipitação.

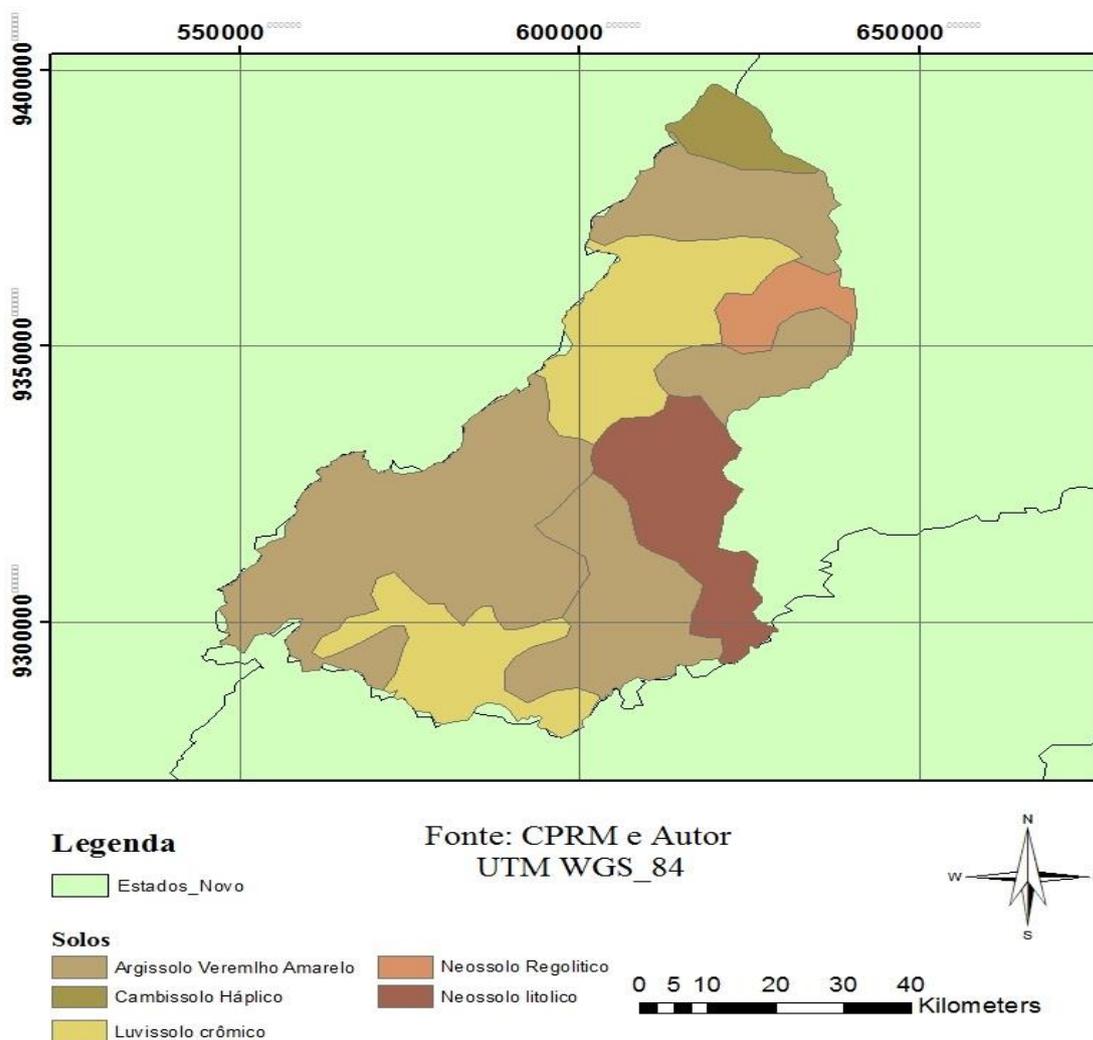
- **Pluviometria** - na bacia do rio Apodi existem duas zonas distintas: uma coincidente com as maiores altitudes, nas cabeceiras dos rios, com pluviosidade abaixo de 700 mm, no médio e baixo curso do rio, com clima semiárido. Em Apodi a média anual é de 717 mm de chuva e o período mais chuvoso vai de fevereiro a maio (quatro meses) onde estão concentrados 80% das chuvas anuais.

- **Temperatura** – a temperatura média anual é de 28°C, com média das máximas de 36°C em outubro e novembro e média das mínimas de 20°C no mês de agosto.
- **Insolação** - o valor médio mensal gira em torno de 252 horas, tendo o período de agosto a dezembro o de maior incidência.
- **Umidade Relativa e Ventos** - a umidade média anual é de 68% e os ventos dominantes são provenientes do quadrante SE, com velocidade média anual de 1,5m/s (5,4km/h), apresentando a média máxima mensal em dezembro, com 2,5m/s (9,0km/h).

4.1.3 SOLOS

A avaliação da distribuição dos solos predominantes na bacia do Rio Apodi-Mossoró seção da Barragem de Santa Cruz orientam-se nos vários estudos de solos existentes em escalas diversas, já realizados no Rio Grande do Norte como mostra a Figura 6.

Figura 6: Classes de solos presentes na BHRio Apodi-Mossoró seção Barragem de Santa Cruz



Na avaliação de terras da bacia Apodi-Mossoró seção Barragem de Santa Cruz, observa-se a ocorrência de cinco classes de solos, listadas em ordem de abrangência: Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, Cambissolo Eutrófico, Cambissolo Eutrófico, Rendzina, Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, Vertissolo, Solonchak Sódico, Solonetz Solodizado, Regossolo Eutrófico, Solos Aluviais Eutróficos, Planossolo Solódico.

- **Argissolo Vermelho-Amarelo:** unidade caracterizada por solos com saturação de bases superior a 50%, argila de atividade alta (ta) e apresentando plintita no horizonte B. Esta última característica é indicadora de condições de drenagem moderada a imperfeita.

- **CambissoloHáplico:** solos que em um nível categórico mais baixo foram subdivididos em função da espessura do solum.
- **Luvissolo Crômico:** Esses solos são derivados de siltitos, argilitos, ardósias e calcários do Grupo Bambuí. São solos com argila de atividade alta, praticamente neutros, com soma de bases alta e hipereutróficos, apresentando como principais limitações ao uso agrícola o relevo ondulado e a rochosidade.
- **NeossolosRegolíticos:** Solos com contato lítico a uma profundidade maior que 50cm e horizonte A sobrejacente a horizonte C ou Cr, admitindo horizonteBi com menos de 10cm de espessura.
- **NeossolosLitólicos:** Solos com horizonte A ou hístico, assentes diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com 90% (por volume) ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2mm (cascalhos, calhaus e matacões), que apresentam um contato lítico típico ou fragmentário dentro de 50cm da superfície do solo. Admite um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico.

A distribuição dos solos da Bacia Santa Cruz, bem como seu percentual e quantitativo, podem ser observados na Tabela 4 (PERH, 1998).

Tabela 4- Resumo das classes de solos da Bacia Santa Cruz

| Classes de Solo | Área | |
|----------------------------|-----------------|--------------|
| | Km ² | % |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1480,1 | 32,7 |
| CambissoloHáplico | 2,4 | 0,1 |
| Luvissolo Crômico | 1319,4 | 29,2 |
| NeossolosRegolíticos | 943,2 | 20,8 |
| NeossolosLitólicos | 774,6 | 17,2 |
| Total | | 100,0 |

4.2 PERFIL DOS MUNICÍPIOS UTILIZADORES DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BARRAGEM SANTA CRUZ

4.2.1 APODI

O município de Apodi localiza-se na mesorregião do Oeste Potiguar. De acordo com o censo realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) no ano 2010, sua população é de 34.808 habitantes. Área territorial de 1.602 km².

O município é dividido em 04 regiões geográficas com características bem diferentes baseadas nos tipos de solo: areia, chapada, pedra e vale. A Tabela 5 apresenta os dados da produção agrícola do município

Tabela 5 - Dados da produção agrícola do município de Apodi-RN

| Lavoura | Quantidade produzida (ton.) | Valor da produção (R\$ mil) | Área plantada (ha.) | Área colhida (ha.) | Rendimento médio (kg/ha.) |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|
| Algodão herbáceo (em caroço) | 2400 | 1680 | 4000 | 4000 | 600 |
| Arroz (em casca) | 2844 | 1991 | 800 | 800 | 3555 |
| Banana | 1295 | 453 | 70 | 70 | 18500 |
| Cana-de-açúcar | 300 | 60 | 12 | 12 | 25000 |
| Coco-da-baía | 86000 | 30 | 20 | 20 | 4300 |
| Feijão (em grão) | 1401 | 1009 | 4400 | 3080 | 454 |
| Limão | 10 | 3 | 1 | 1 | 10000 |
| Mamão | 600 | 108 | 10 | 10 | 60000 |
| Manga | 600 | 240 | 50 | 50 | 12000 |
| Milho (em grão) | 3000 | 1200 | 4000 | 4000 | 750 |

Fonte: IBGE (2006).

O município também pode ser considerado como o que mais irá se beneficiar com os recursos hídricos disponíveis no reservatório, por ser o que está localizado mais próximo do mesmo e com isso poderter demandas não

somente com fins de abastecimento (humano e animal) como também para atividades econômicas que possibilitam a geração de renda para a população.

4.2.2 CARAÚBAS

O distrito Caraúbas foi criado pela Lei nº 250, de 23 de março de 1852 e elevado à freguesia pela Lei 408, de 1 de setembro de 1858. Em 5 de março de 1868, através da Lei 601, Caraúbas desmembrou-se de Apodi e tornou-se município do Rio Grande do Norte. Tem localização geográfica latitude: 5° 47' S longitude: 37° 33' Oeste ocupando uma área de 1.095,00 km², equivalente a 2,06% da superfície estadual IDEMA, (2008).

O município possui atividade agrícola semelhante ao de Apodi acrescentando-se as culturas mamona, fumo, melancia e tomate IDEMA (2008).

O município utiliza os Recursos Hídricos da Barragem de Santa Cruz apenas como forma de complementar o abastecimento humano, pois pela distância se torna inviável economicamente sua utilização com finalidade das atividades econômicas, sendo estas abastecidas pelos açudes públicos Apanha Peixe, Santo Antônio de Caraúbas e Saboia.

4.2.3 PAU DOS FERROS

O município Pau dos Ferros localiza-se na mesorregião do Oeste Potiguar localizando-se a uma distância de quatrocentos quilômetros a oeste da capital do estado, Natal. Ocupa uma área de 259,960 km², sendo que 1,9024 km² estão em perímetro urbano IDEMA (2008).

A agricultura é o setor menos relevante da economia de Pau dos Ferros. De todo o PIB da cidade, R\$ 6,4 milhões (ou cerca de 4% do total) é o valor adicionado bruto da agropecuária. Segundo o IBGE em 2006 o município possuía um rebanho de 11.974 bovinos, 290 equinos, 2.109 suínos, 1.900 caprinos, 3.345 ovinos, e 20.210 aves, entre estas 3.420 galinhas e 16.790 galos, frangos e pintinhos. Em 2009 a cidade produziu 1.742 milhões de litros de leite de 3.030 vacas.

Foram produzidos 3.370 quilos de mel-de-abelha. Na lavoura temporária são produzidos principalmente o milho (480 toneladas), o feijão (288 toneladas) e a cana-de-açúcar (125 toneladas).

4.2.4 MOSSORÓ

O município de Mossoró localiza-se na mesorregião do Oeste Potiguar, está distante cerca de 280 km a noroeste da capital do estado Natal. Ocupa uma área de 2 110,207 km² (o maior município do estado em área), sendo que 11,5834 km² estão em perímetro urbano IDEMA (2008).

Localizada entre Natal e Fortaleza, às quais é ligada pela BR-304, Mossoró é uma das principais cidades do interior nordestino, e atualmente vive um intenso crescimento econômico e de infraestrutura, considerada uma das cidades de médio porte brasileiras mais atraentes para investimentos no país. O município é o maior produtor em terra, de petróleo no país, como também de sal marinho. Agricultura irrigada, voltada em grande parte para a exportação, também possui relevância na economia do estado, tendo um dos maiores PIB per capita da região IDEMA (2008).

Com o crescente aumento da população municipal a cada ano que se passa, o sistema de abastecimento humano não está conseguindo dar suporte de forma satisfatória a toda população, chegando a ter casos de determinados bairros onde os moradores necessitam acordar durante a madrugada para garantir o armazenamento de água.

Nesse sentido, faz-se necessário uma complementação do fornecimento de água para o município, haja vista o sistema adutor por meio de poços profundos já não está conseguindo atender a demanda, ademais estudos da SEMARH demonstraram que se a exploração do arenito açu, principal fonte hídrica subterrânea da região, continuar nas mesmas proporções sua vida útil será até o ano de 2014.

A implantação da adutora Santa Cruz Mossoró proporcionará uma economia no que diz respeito a:

- Preservação do lençol subterrâneo;
- Redução de custos de manutenção;
- Redução de custos de energia elétrica; e

- O melhor controle de distribuição, consumo e qualidade da água.

Observa-se também que o uso como forma de abastecimento humano será o único contemplado para Mossoró, onde as atividades econômicas tem suas fontes hídricas principalmente oriundas de poços.

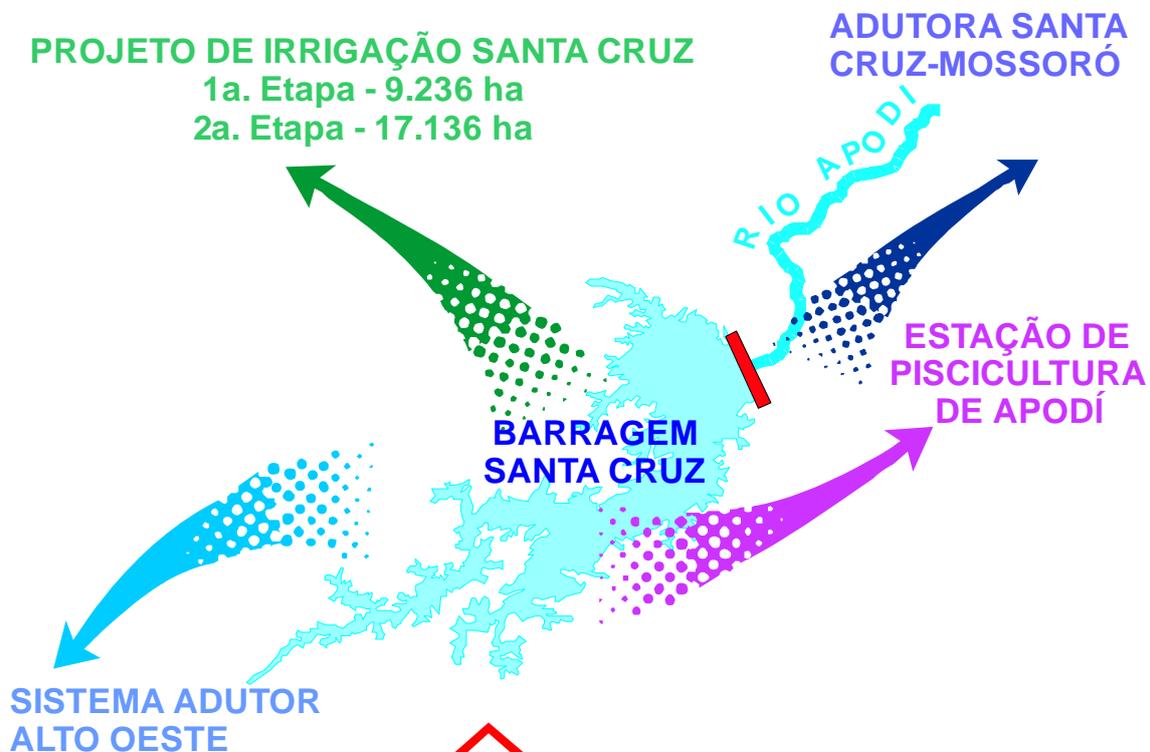
4.3 IDENTIFICAÇÃO DOS USOS

As informações aqui apresentadas, em sua maior parte, foram extraídas do trabalho de consultoria técnica prestado à Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do RN (SEMARH), realizado pela VBA consultores SEMARH (2007), onde a mesma realizou um estudo de viabilidade para o aproveitamento dos aluviões a jusante da Barragem.

Atualmente estão sendo desenvolvidos os seguintes projetos de utilização das águas da barragem de Apodi, como apresentado na Figura 7:

1. Sistema Adutor Alto Oeste
2. Adutora Santa Cruz – Mossoró
3. Projeto de Irrigação Santa Cruz
4. Estação de Piscicultura de Apodi

Figura 7: Projetos previstos de utilização das águas da Barragem Santa Cruz Apodi-RN



Fonte: SEMARH

4.3.1 PROJETO DE IRRIGAÇÃO SANTA CRUZ

A área a ser ocupada com o Projeto de Irrigação Santa Cruz está localizada nos municípios de Felipe Guerra e Apodi, no curso médio do rio Apodi. Estará totalmente assente sobre o embasamento sedimentar, representado pelo planalto denominado Chapada do Apodi, apresentando relevo plano a suave ondulado, com um total de 26.372 ha de terras aptas para irrigação.

O projeto será abastecido com água proveniente da barragem de Santa Cruz do Apodi, sendo que a segunda etapa somente poderá ser implantada após a efetivação da transposição das águas do rio São Francisco. As obras foram dimensionadas de forma modular segundo as etapas, possibilitando a divisão dos investimentos previstos. A captação será feita através de uma

estação de bombeamento principal localizada no rio Apodi com vazão de $6\text{m}^3/\text{s}$.

4.3.2 SISTEMA ADUTOR DO ALTO OESTE

O Sistema Adutor Alto Oeste tem como objetivo principal dotar a região do Oeste Potiguar de um sistema integrado de abastecimento de água, com capacidade para atender às populações das sedes municipais, de distritos e dos povoados localizados ao longo do seu eixo.

Para tanto, a água será captada na barragem de Santa Cruz do Apodi e será submetida a tratamento completo numa Estação de Tratamento de Água - ETA.

O projeto abrange os sistemas de captação, tratamento e adução a todas as localidades, incluindo uma adutora principal e adutoras secundárias, que perfazem quase 300 km de tubulações, estações elevatórias, caixas de transição, levando a água até os reservatórios de distribuição de cada localidade. Os sistemas de distribuição, propriamente ditos, ficarão a cargo da CAERN ou das Prefeituras Municipais nos casos de serviços autônomos.

Para o atendimento dos pequenos núcleos urbanos localizados ao longo das adutoras, sem características de adensamento habitacional, foram projetados chafarizes, bem como derivações para alimentar pequenas redes de distribuição em substituição a mananciais insuficientes e com água sem garantia de potabilidade.

O Sistema Adutor Alto Oeste foi projetado com capacidade para atender o abastecimento de água de 24 cidades como Pau dos Ferros, Marcelino Vieira, Jose da Penha bem como dois distritos e 64 comunidades rurais, bem como um matadouro / frigorífico com uma vazão de $0,27\text{m}^3/\text{s}$ para o atendimento de todas as demandas.

4.3.3 ESTAÇÃO DE PISCICULTURA DE APODI

A Estação de Piscicultura de Apodi situa-se logo à jusante da Barragem de Santa Cruz, no município de Apodi.

Os objetivos da Estação de Piscicultura de Apodi são: produção e distribuição de alevinos de espécies de desova total, tais como tambaqui, curimatã comum, curimatã pacu; produção e distribuição de alevinos de carpa comum; produção de alevinos não revertidos da tilápia do Nilo, linhagem cinza; e produção e distribuição de alevinos machos sexualmente revertidos da tilápia do Nilo, linhagem tailandesa.

Os alevinos serão comercializados para povoamento de rios, açudes e outros reservatórios e estocagem em viveiros e tanques-rede. A meta é produzir, por ano, 4.000.000 de alevinos, sendo 2.000.000 de espécies de desova total e carpa comum e 2.000.000 de machos revertidos da tilápia do Nilo e 12.000.000 de pós-larvas das espécies criadas, para repasse às unidades de alevinagem ou venda aos piscicultores.

A Estação de Piscicultura de Apodi foi projetada a jusante da Barragem de Santa Cruz, em um terreno com área de 32.108 m². A Estação é composta pelos seguintes equipamentos de produção: Viveiros e Tanques; Escritório Administrativo; Depósito de Ração e Material de Pesca; Laboratório; Galpão de Reversão Sexual; Centro de Estudos; e Guarita.

Além disso, a Estação oferecerá acomodações para os técnicos, funcionários e visitantes: Casa de Técnico de Nível Superior; Casa de Técnico de Nível Médio; Alojamento para Visitantes; e Seis Casas para Operários.

4.3.4 ADUTORA SANTA CRUZ MOSSORÓ

O Sistema Adutor Santa Cruz - Mossoró está ao nível de anteprojeto. Prevê-se a captação na tomada d'água da barragem Santa Cruz, no local onde será também a captação para o Projeto Sistema Adutor Alto Oeste. Terá também uma Estação Elevatória de água Bruta do tipo Booster e uma Estação

de Tratamento de Água - ETA em terreno vizinho da ETA do Sistema Adutor Alto Oeste.

A adutora principal terá a 93 km de extensão da barragem até Mossoró passando por Apodi e Governador Dix-Sept-Rosado, terá também uma sub-adutora de 7 km de extensão para abastecer a cidade de Felipe Guerra.

O Sistema Adutor Santa Cruz – Mossoró irá também abastecer Governador Dix-Sept -Rosado e Felipe Guerra, além de outras comunidades localizadas ao longo de seu trajeto, possui uma vazão de início de plano de 0,285m³/s chegando até 0,39m³/s no final do plano.

4.4 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO (SSD)

A estratégia metodológica adotada consta de três etapas: **i) elaboração de cenários**-entender, analisar e descrever o comportamento de um problema, construindo alternativas possíveis, conforme o objetivo a que se quer chegar; **ii) simulação dos cenários** - devido à complexidade em analisar esses cenários, recorre-se à aplicação computacional; e, **iii) avaliação do desempenho do sistema** - avaliar cenários quanto à eficiência dos resultados, utilizando indicadores de desempenho.

4.4.1 O SSD AQUANET

O ACQUANET é um sistema de suporte à decisão, composto de um banco de dados para armazenar as informações da rede de fluxo, uma base de modelos e uma interface de comunicação com o usuário (Porto et al., 2003). O sistema foi originado de um modelo de rede de fluxo denominado Modsim (Labadie, 1988) e o ModsimLS (Roberto & Porto, 2001), uma versão atualizada do primeiro.

O ACQUANET mistura características dos modelos de simulação e otimização e pode incorporar as características estocásticas das vazões de entrada (Porto & Azevedo, 1997). Assim, a maior parte das configurações e estruturas operacionais das bacias hidrográficas pode ser representada por

meio da especificação de dados de entrada apropriados (Roberto & Porto, 1999).

Atualmente, o sistema adota o intervalo de análise mensal e, além de ser um instrumento de gerenciamento, também pode ser usado para o planejamento, para a análise do impacto de propostas alternativas para a implantação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos; e também pode servir no processo de seleção inicial de alternativas com base na análise econômica, em um nível simplificado, por meio da inclusão direta de dados de custos e benefícios, em lugar da especificação relativa de prioridades.

O modelo AQCUNET é um sistema de suporte a decisão de fácil comunicação e que se utiliza de dados de entrada acessíveis aos usuários, como: curva cota *vs.* área *vs.* volume do reservatório, vazões naturais, taxas de evaporação, demandas do sistema (Maia, 2006).

De acordo com ALBANO (2004), a cada iteração, o algoritmo *Out-of-Kilter*, resolve a seguinte equação matemática (função-objetivo):

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} * Q_{ij}$$

onde: Q_{ij} = vazão média entre o nó i e nó j no intervalo de tempo considerado; C_{ij} = custo unitário associado com a vazão Q_{ij} representando prioridade operacional para alocação de água (fator de ponderação). O modelo deverá atender às seguintes restrições:

$$\text{Equilíbrio de Massa: } \sum_{i \in I_j} Q_{ij} - \sum_{K \in O_j} Q_{jk} = 0$$

onde: I_j = conjunto de nós cujos arcos terminam em j ;

O_j = conjunto de nós cujos arcos iniciam no nó j .

$$\text{Vazão mínima: } Q_{ij} \geq L_{ij}$$

onde: L_{ij} = vazão mínima nos arcos (i,j)

$$\text{Vazão máxima: } Q_{ij} \leq U_{ij}$$

onde: U_{ij} = vazão máxima nos arcos (i,j)

Cada arco ou elo da rede de fluxo é definido por três parâmetros cuja configuração é: $[L_{ij}, U_{ij}, C_{ij}]$, onde: i e j são nós da rede; L_{ij} é o limite mínimo ou

inferior do elo (i,j); U_{ij} é o limite máximo ou superior do elo (i,j) e C_{ij} representa o custo ou peso entre os nós i e j.

O modelo resolve as seguintes iterações ao longo de cada intervalo de tempo:

- assunção de valores iniciais de C_{ij} , L_{ij} , U_{ij} resolvendo a rede;
- atualização de C_{ij} , L_{ij} , U_{ij} com base nas Vazões Q_{ij} ;
- nova resolução da rede com a atualização dos parâmetros obtendo-se novas Q_{ij} ;
- repetição do procedimento de sucessivas vazões Q_{ij} estimadas nos intervalos subsequentes, até que haja convergência dentro de uma tolerância previamente estabelecida pelo usuário.

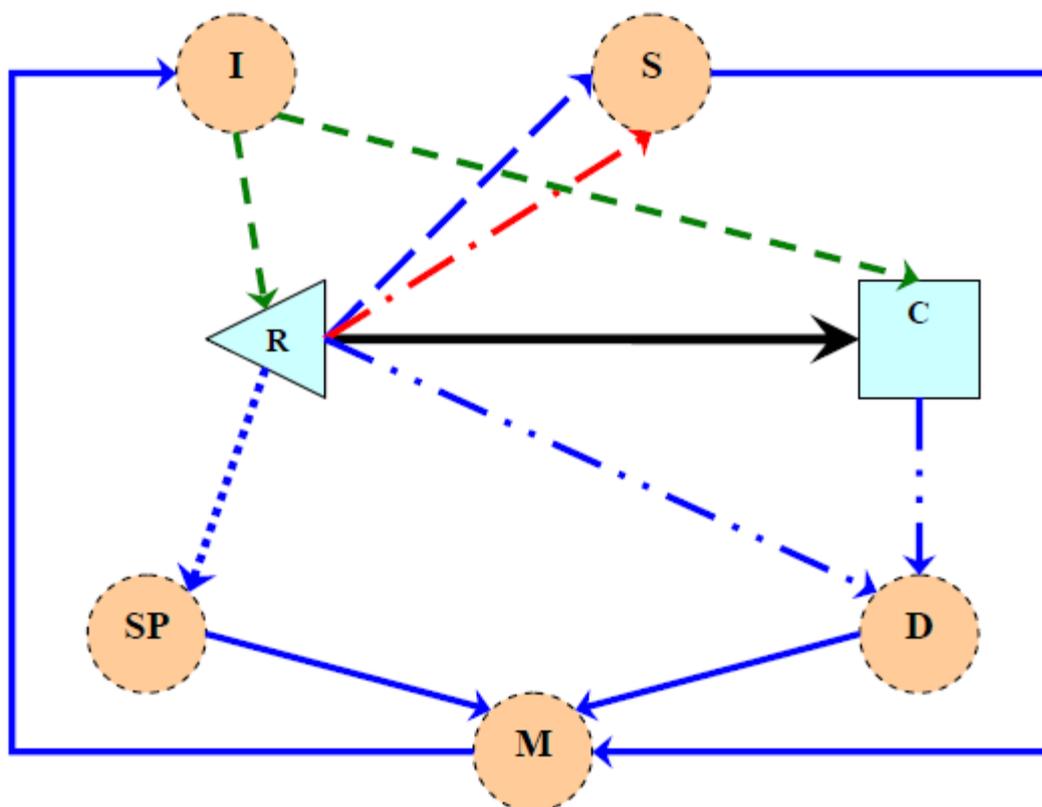
Para uma dada rede definida pelo usuário (figura 8) contendo, por exemplo, um nó de represa (R), um nó de demanda (C) e um elo de ligação entre os nós 1 e 2, o modelo constrói automaticamente um nó artificial de vazão afluente e de volume inicial (I), um nó artificial de volume a ser transportado para o período subsequente (S), um nó artificial de vertimento (SP), um nó artificial de demandas (D) e um nó artificial de balanço de massa (M), além dos elos artificiais conectando os elementos reais e artificiais citados (Albano, 2004).

Os elementos da rede de fluxo desenhada (figura 8) deverão ter como definição as vazões naturais reais (ou geradas artificialmente) de entrada em qualquer nó real criado pelo usuário. Para os nós de passagem o modelo cria um único nó artificial (I) que se interliga com os reais por elos artificiais. Os limites inferior e superior dos elos serão iguais se os nós de entrada forem nós de passagem $[I_j, I_j, 0]$. Os limites inferior e superior serão iguais, porém somados a um valor de armazenamento, se os nós de entrada representarem represas $[I_j+S_j, I_j+S_j, 0]$ (Albano, 2004).

Para cada represa real o modelo cria um único nó artificial (S) para armazenamento interligando-o à represas por dois arcos sendo que um representa o “arco de volume meta”, cujo limite mínimo $[S_i \text{ Min}]$ e limite máximo $[T_i]$ são definidos previamente pelo usuário, e outro é um “arco artificial” usado para volumes superiores ao volume meta com limite mínimo $[0]$ e máximo

[SiMáx-Ti]; o modelo cria um único nó artificial (SP) para vertimentos, interligando-o à represa por um terceiro elo (figura 8).

Figura 8: Elementos da Rede de Fluxo



Fonte: Albano, 2004.

Legenda:

Nó Artificial SP = Vertimento - SPILL

Nó Artificial I = Origem dos Influxos (volume inicial e vazão afluyente)

Nó Artificial S = Armazenamento - STORAGE (volume a ser transportado para o mês subsequente)

Nó Artificial D = Demanda

Nó Artificial M = Balanço de Massa

Nó Real R = Represa

Nó Real C = Demanda de Consumo ou Passagem

-  = Elo Real entre os nós reais
-  = Elo Artificial de Balanço de Massa
-  = Elo Artificial de Volume Final
-  = Elo Artificial de Volume Meta
-  = Elo Artificial de Vazão Vertimento
-  = Elo Artificial de Demanda

No anexo A é descrito com detalhes o algoritmo utilizado pelo AQUANET, bem como um exemplo de aplicação do mesmo.

4.4.2 ETAPAS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS PELO ACQUANET

4.4.2.1 DESENHO DA REDE DE FLUXO

O passo inicial para resolver o problema através do AcquaNet consiste na elaboração da rede de fluxo, ou seja, o desenho da topologia da bacia em estudo no modelo matemático. Esse desenho pode ser feito de maneira simples, utilizando apenas o mouse e uma série de ícones que representam os elementos de uma bacia hidrográfica, que são: reservatórios, canais, nós de passagem, demandas hídricas, etc.

O módulo base do Acquanet é responsável pela criação/edição do traçado, leitura e salvagem dos projetos em estudo, definição do módulo atualmente ativo e também pela integração e comunicação entre os diferentes módulos.

A Figura 9 ilustra a tela principal do módulo base do SSD AcquaNet, e a Figura 10, os botões de construção e edição do traçado da rede, a ser feita na tela principal do módulo base. Estas ferramentas permitem ao usuário montar redes com grande número de reservatórios, demandas, nós de passagem e arcos, representando o problema em estudo e estão localizados em seu canto superior esquerdo. Os botões são utilizados, observando-os da esquerda para a direita, para criar nó de passagem, criar reservatório, criar demanda, criar arco, apagar elementos, mover elementos e marcar/desmarcar elementos.

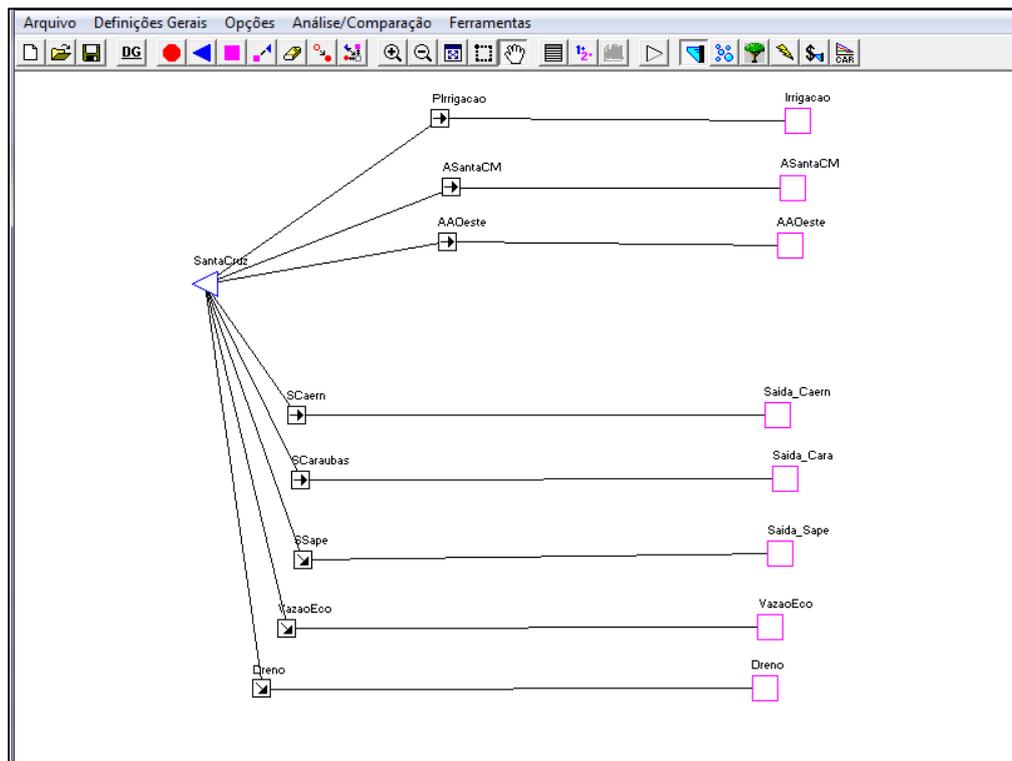


Figura 9: Tela principal do módulo base e exemplo de traçado de uma rede



Figura 10 - Botões para construção/edição do traçado

4.4.2.2 DEFINIÇÕES GERAIS

Ao iniciar uma simulação, deve-se fornecer ao modelo diversas informações que servirão de base para a entrada de dados, o cálculo e a obtenção e a apresentação dos resultados. No modelo existe uma tela de definições gerais, localizado também na tela principal do módulo base, Figura 8, na qual são escolhidos o tipo de simulação, a opção de cálculo e os valores relacionados com essas opções. A Figura 10 mostra a tela de definições gerais.

Figura 11– Tela de Definições Gerais

4.4.2.3 MÓDULO SECUNDÁRIO NO ACQUANET

O Acquanet constitui-se de um módulo base e de cinco módulos secundários escolhidos em função do objetivo do estudo. São eles: a) módulo de alocação de água, b) de avaliação da qualidade de água, c) de alocação de água para irrigação, d) de produção de energia elétrica, e e) de valores econômicos de decisões de alocação.

O módulo base é responsável pelo traçado, leitura, salvção dos projetos, comunicação entre os diferentes módulos secundários e definição do módulo secundário ativo.

Os módulos secundários utilizam um algoritmo de rede de fluxo para a solução dos problemas e funcionam de forma independente. O sistema dispõe de um banco de dados que armazena os dados de entrada dos modelos, assim como os resultados gerados por eles. Esse banco é parte fundamental em todo o processo de comunicação entre o módulo base e os outros módulos.

Será detalhado o módulo de alocação de água, já que todas as simulações para resolução do problema, objeto da dissertação, são realizadas utilizando apenas esse módulo secundário.

4.4.2.4 MÓDULO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA

O módulo de alocação constitui um modelo de rede de fluxo de caráter geral e adaptável a diversos tipos de problemas. Assim, a maior parte das configurações e estruturas operacionais das bacias hidrográficas pode ser representada por meio da especificação de dados de entrada apropriados.

O módulo de alocação fornece subsídios para gerar planos operacionais a fim de satisfazer metas, prioridades e limitações específicas. Pode, também, ser utilizado para avaliar compensações entre usos conflitantes durante períodos de disponibilidade deficiente de água. Além de ser um instrumento de gerenciamento, o módulo de alocação pode ser utilizado no planejamento e na análise do impacto de propostas alternativas para implantação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos.

4.4.2.5 TIPOS DE SIMULAÇÃO

Assim como o modelo ModsimP32, o Acquanet pode efetuar os cálculos de maneira sequencial no tempo (Simulação contínua) ou estatisticamente (Planejamento Tático).

- **SIMULAÇÃO CONTÍNUA**

Na Simulação Contínua, o valor mais importante é o número total de anos de simulação (chamado aqui de NT). O usuário deve fornecer séries de vazões afluentes mensais com duração igual a NT. O modelo irá efetuar os cálculos continuamente, para todos os anos existentes. Ao final do cálculo, os resultados serão fornecidos mensalmente para todos os anos. A simulação é dita contínua porque o modelo executa os cálculos da seguinte maneira:

- a) no primeiro ano, o modelo parte com os volumes iniciais dos reservatórios fornecidos pelo usuário e efetua os cálculos até o final deste ano;
- b) no segundo ano parte-se com volumes iniciais iguais aos volumes finais do ano anterior;
- c) o procedimento é repetido até o ano NT;
- d) os resultados da simulação são fornecidos de forma contínua, do primeiro ao último ano.

Quando as séries de vazões são relativamente longas, percebe-se que os volumes iniciais dos reservatórios passam a ter pequena influência nos resultados. Assim, este tipo de simulação é recomendado para se obter uma ideia inicial do comportamento do sistema em estudo, das prioridades a serem adotadas, etc.. A Simulação contínua é a opção recomendada quando se pretende ter uma ideia do comportamento do sistema ao longo do tempo.

- **PLANEJAMENTO TÁTICO**

No Planejamento Tático o usuário deve fornecer, além do número total de anos de simulação (NT), o número de anos do horizonte de simulação (NH). O horizonte de simulação é o número de anos durante os quais se pretende estudar o comportamento do sistema em análise. Neste tipo de simulação, o Acquanet efetua os cálculos da seguinte maneira:

a) partindo, no primeiro ano, com os volumes iniciais dos reservatórios fornecidos pelo usuário, o modelo efetua os cálculos sequencialmente para NH anos da série de vazões;

b) na segunda rodada o procedimento acima é repetido partindo-se novamente com os volumes iniciais fornecidos pelo usuário. Os cálculos são efetuados para NH anos, mas partindo do segundo ano da série de vazões;

c) o procedimento acima é repetido até que seja efetuado o cálculo partindo-se do ano $NT - NH + 1$ da série de vazões;

d) os resultados fornecidos são valores estatísticos para todos os meses do horizonte de simulação.

Esta opção de cálculo é a mais recomendada quando o objetivo é fazer o planejamento e/ou a operação de sistemas de reservatórios.

4.4.2.6 OPÇÕES DE CÁLCULO

As duas opções de cálculo existentes no Acquanet são: Estados Hidrológicos e Calibração. As diferenças entre estas duas opções estão na entrada de dados e na maneira como o modelo irá efetuar os cálculos. Na opção Estados Hidrológicos o modelo considera o estado hidrológico (quantidade de água armazenada nos reservatórios) para determinar qual o valor de demanda, de volume meta e as prioridades que serão utilizadas no cálculo de cada um dos meses. No Acquanet o usuário pode utilizar até sete

estados hidrológicos, fornecendo valores diferentes das grandezas citadas para cada um dos estados. Quando a opção selecionada for Calibração, o modelo efetua os cálculos com os valores fornecidos sem considerar o estado atual do sistema.

4.4.2.7 OS DADOS DE ENTRADA/EDIÇÃO REQUERIDO PELO MODELO

Para inserir os dados de entrada em qualquer elemento da rede, basta clicar com o botão dois do mouse sobre ele. Irá surgir uma tela com todos os dados necessários ao elemento escolhido.

A edição de dados se divide em: edição de dados do reservatório, do link e das demandas. Na edição de dados do reservatório como mostra a Figura 11, o modelo necessitadas séries de vazões afluentes ao sistema, as características físicas do reservatório (volumes inicial, máximo e mínimo, volume meta, curvas cota x área x volume prioridades) e taxas de evaporação.

Os links são elos que ligam oferta hídrica à demanda hídrica, ou seja, são trechos de rios, canais, dutos e etc.. Em sua entrada de dados, o modelo solicita a capacidade máxima de água e características do link como: coeficiente de perdas, capacidade mínima e custos. Por fim, tem-se a edição de dados das demandas, como: valores, prioridades de atendimento, e nós de retorno, quando existente.

Figura 12– Tela para entrada/edição de dados de um reservatório

| Cota (m) | Área (km²) | Volume (Mm³) |
|----------|------------|--------------|
| 54,800 | 0,000 | 0,000 |
| 55,000 | 0,320 | 0,032 |
| 56,000 | 0,380 | 0,362 |
| 57,000 | 0,800 | 0,972 |
| 58,000 | 0,960 | 1,852 |
| 59,000 | 1,380 | 3,022 |
| 60,000 | 1,520 | 4,472 |
| 65,000 | 3,040 | 15,872 |
| 70,000 | 7,740 | 42,822 |
| 75,000 | 12,644 | 93,782 |
| 80,000 | 15,431 | 162,404 |
| 85,000 | 19,343 | 249,339 |
| 90,000 | 22,818 | 354,741 |
| 95,000 | 29,312 | 485,066 |
| 98,500 | 34,134 | 599,712 |
| 100,000 | 36,200 | 648,846 |
| 102,000 | 38,955 | 697,980 |
| 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Fonte: SEMARH

4.4.2.8 A EFETUAÇÃO DO CÁLCULO E OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

Para o módulo de alocação efetuar os cálculos, basta clicar no menu "Calcular". Ao fazer isto, o módulo de alocação iniciará os cálculos, apresentando uma tela que indica o andamento do processo. Ao final dos cálculos, o módulo de alocação está pronto para apresentar os resultados. Para acessar os resultados, que vêm em forma de planilhas ou gráficos, basta clicar no menu "Resultados".

4.4.2.9 RESULTADOS

Os resultados da Simulação Contínua são escolhidos através da tela mostrada na Figura13, na qual o usuário define os elementos e os resultados que deseja visualizar. Isto torna o processo mais eficiente, já que somente os resultados escolhidos pelo usuário serão lidos do banco de dados. Os

resultados são apresentados em forma de planilhas e ferramentas gráficas que permite meditar diversas propriedades do gráfico e efetuar “zoom” em qualquer parte do gráfico. Os resultados apresentados pelo Acquanet são:

- Resultados para os reservatórios

Volume final: o volume armazenado nos reservatórios em função da garantia (em porcentagem) fornecida pelo usuário;

Probabilidade do volume final: a probabilidade do volume armazenado nos reservatórios ser maior ou igual a um valor de volume (em porcentagem) fornecido pelo usuário (simulação contínua/planejamento tático).

- Resultados para as demandas

Falhas no mês: a probabilidade de ocorrerem falhas ao longo dos meses do horizonte de simulação (planejamento tático);

Falhas consecutivas (2 ou mais meses): a probabilidade de ocorrerem falhas durante 2 ou mais meses consecutivos, ao longo dos meses do horizonte de simulação (planejamento tático);

Déficits: os déficits no atendimento das demandas em função da probabilidade de ocorrência (em porcentagem) fornecida pelo usuário (simulação contínua ou planejamento tático);

Vazões fornecidas (valores mensais): as vazões fornecidas às demandas em função da garantia (em porcentagem) fornecida pelo usuário (simulação contínua/planejamento tático);

Vazões fornecidas (valores médios anuais): as vazões médias anuais fornecidas às demandas em função da garantia (em porcentagem) fornecida pelo usuário (simulação contínua/planejamento tático);

Valores obtidos: todos os valores obtidos durante a realização dos cálculos (simulação contínua/planejamento tático).

- Resultados dos links

Vazões ótimas: as vazões ótimas nos links em função da garantia (em porcentagem) fornecida pelo usuário (simulação contínua/planejamento tático);

Valores obtidos: durante a realização dos cálculos (simulação contínua/planejamento tático).

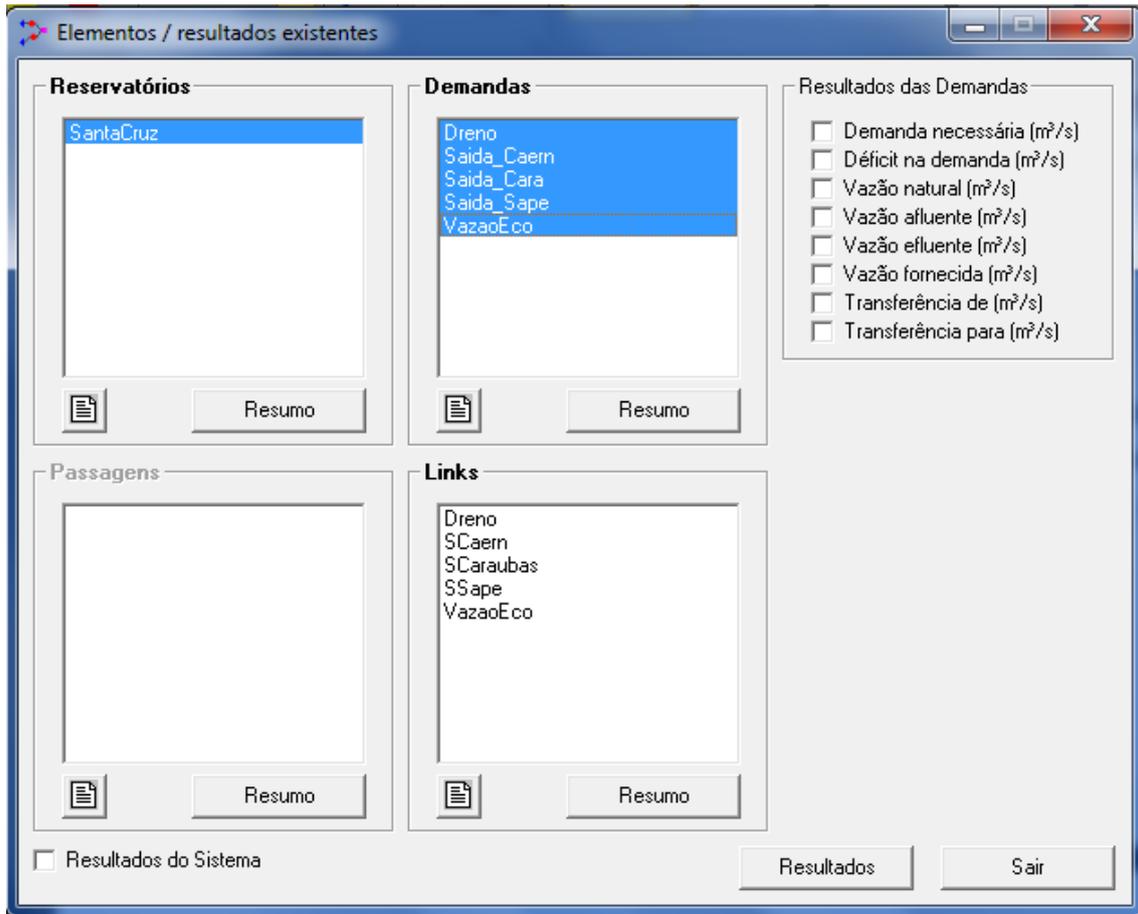


Figura 13– Tela para escolha dos resultados da simulação contínua

4.4.3 ÍNDICES DE CONFIABILIDADE, RESILIÊNCIA E VULNERABILIDADE

Segundo Srinivasan et al (1999) apud Celeste (2006), as falhas em operação de sistemas de reservatório de abastecimento de água são frequentemente inevitáveis durante períodos hidrológicos críticos. As falhas que caracterizam cada sistema podem ser representadas pelos indicadores de desempenhos: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Esses três indicadores de desempenho, juntos, podem ser aplicados para caracterizar o “risco” para operação e planejamento de reservatório.

Labadie (2004) estabeleceu que as funções objetivo usadas nos modelos de otimização de sistemas de reservatórios deveriam incorporar medidas de desempenho tais como eficiência (maximizar o bem-estar atual e futuro), sobrevivência (assegurando que o bem-estar futuro excederá os níveis

de subsistência mínimos) e sustentabilidade. Esta última medida pode ser considerada igual a uma soma ponderada da: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade dos vários critérios que contribuam ao bem-estar do homem (econômico, ambiental ou ecológico).

Esses índices foram propostos por Hashimoto et al. (1982) e fornecem formas de avaliar os efeitos das regras de operação e auxilia na avaliação de futuros projetos a serem implantados (Vianna e Lanna, 2002). Onde os mesmos são descritos a seguir:

O índice de confiabilidade ou garantia é definido como a capacidade do sistema satisfazer os objetivos físicos sem a ocorrência de falhas. Segundo Hashimoto et al. (1982) o índice de confiabilidade é a probabilidade de que nenhuma falha ocorra dentro de um período de tempo fixo, podendo ser o tempo de planejamento estipulado. Os autores salientam ainda que a confiabilidade não apresenta as consequências prováveis de uma falha.

Quanto maior for o número de valores na zona insatisfatória, menor é o índice de confiabilidade do sistema.

$$\text{Confiabilidade}(\%) = \left(1 - \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de valores simulados na zona insatisfatória}}{\text{n}^{\circ} \text{ de períodos simulados}} \right) * 100(1)$$

O índice de resiliência permite medir a capacidade do sistema de se recuperar de uma situação não satisfatória em que se encontra. De acordo com Hashimoto et al. (1982) o índice de resiliência deve descrever como um sistema conseguiu recuperar-se de uma falha (voltando à zona satisfatória), uma vez que ela ocorreu. Se estas falhas forem eventos prolongados e a recuperação do sistema for lento, poderá haver implicações sérias para o sistema analisado. É desejável que o sistema em estudo recupere-se e volte ao estado satisfatório o mais rápido possível. Quanto maior for o número de vezes que um valor na zona insatisfatória foi seguido de um valor na zona satisfatória, maior é a capacidade do sistema de se recuperar, ou seja, maior é o índice de resiliência(MAY, 2004).

$$Resiliencia(\%) = \left(\frac{\text{n}^\circ \text{ de valores simulados na zona insatisfatória}}{\text{foi seguido de um valor na zona satisfatória}} \right) * 100 \quad (2)$$

O índice de vulnerabilidade mede a dimensão da falha de um dado objetivo e é obtido pela diferença entre o objetivo e o nível atingido. Hashimoto et al. (1982) descreve índice de vulnerabilidade como sendo uma consulta ao valor provável de uma falha, se a mesma ocorrer. Mesmo quando a probabilidade da falha é pequena, deve-se ter a precaução de recompensar as consequências das possíveis falhas.

Para May (2004), sua utilidade está no fato de que, não havendo sistemas totalmente seguros, é importante que em caso de ocorrência de falhas os prejuízos sejam os menores possíveis. A vulnerabilidade de um sistema pode ser representada pela curva de permanência da variável de resposta do sistema ou pelo índice apresentado o seguir:

$$Vulnerabilidade = \sum_{j \in F} s_j e_j \quad (3)$$

Consideram-se os valores discretos da variável de desempenho x_1, \dots, x_n , onde $x_j \in F$, sendo F o grupo de valores insatisfatório, onde ocorre falha do sistema. Os valores de s_j representam a severidade da falha, são valores numéricos da diferença entre x_j e o valor satisfatório e e_j é a probabilidade de ocorrência de x_j .

4.5 DADOS UTILIZADOS DURANTE A SIMULAÇÃO

Para a execução da simulação no ACQUANET primeiramente é necessário programar o mesmo como descrito anteriormente com os dados referentes às características do reservatório, bem como o tipo de simulação a ser executada e as vazões atinentes do rio principal onde o reservatório esta inserido, e por fim as demandas atuais e/ou futuras que existirem e suas respectivas prioridades de atendimento. Deve-se também definir o período do estudo no qual será realizada a análise dos resultados.

Foi realizada uma consulta junto a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), com vistas à obtenção de todos os dados necessários e sua posterior aplicação no ACQUANET. Os dados

referentes às características físicas do reservatório foram extraídos no sítio do mesmo órgão citado anteriormente.

Entretanto devido à atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos ainda está em curso durante o desenvolvimento da pesquisa, não foi possível a utilização dos dados das vazões atuais.

Na tentativa da obtenção das mesmas foi proposta a utilização do MODHISA que é um modelo de transformação chuva-vazão onde adequação desse modelo foi verificada pela equipe de pesquisadores do LARHISA-Laboratório de Recursos Hídricos da UFRN, ao aplicá-lo na geração de dados de vazões afluentes ao açude Cruzeta/RN visando simular a operação desse açude (RIGHETTO et.al, 2002); por RIGHETTO et. al (2003), mas devido a necessidade da calibração dos parâmetros do mesmo sua utilização tornou-se inviável, sendo então utilizados os valores que estavam disponíveis, ou seja, do PERH de 1998.

4.5 ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS

Os cenários foram construídos para situação atual e futura. As demandas permaneceram constantes durante todo o ano não sofrendo variações percentuais nas vazões alocadas. Como nem todas as demandas se encontram implementadas os valores de algumas correspondem as de projeto.

A Tabela 6 apresenta as demandas identificadas atualmente bem como as previstas para serem implementadas no reservatório, e inclui as vazões mínima ou ecológica que deverão escoar para jusante, que neste caso foi considerada com o valor de $1\text{m}^3/\text{s}$.

Tabela 6- Demandas identificadas atualmente e previstas para implementação no futuro.

| Demandas | Vazão (m³/s) |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Demandas Atuais | |
| Abastecimento humano (Apodi) | 0.18 |
| Abastecimento humano (Caraúbas) | 0.10 |
| Piscicultura | 0.10 |
| Vazão ecológica | 1.00 |
| 2. Demandas Futuras | |
| Abastecimento humano (Mossoró) | 0.39 |
| Abastecimento humano (P. dos Ferros) | 0.27 |
| Irrigação 1 ⁽¹⁾ | 2.18 |
| Irrigação 2 ⁽²⁾ | 4.00 |
| Irrigação 3 ⁽²⁾ | 6.00 |

Nota:(1): Valor da vazão outorgada pela SEMARH.

(2): Valores máximos de vazões de acordo com a expansão dos projetos.

Os cenários foram criados a partir dos mesmos critérios adotados por Aragão (2008) e Faria et al. (2004), em que os autores utilizaram a seguinte estratégia na elaboração dos cenários: a ordem escolhida impõe o requerimento de atendimento às demandas na ordem decrescente de prioridades no sentido a atender primeiramente as demandas de abastecimento humano e regularização de vazão. Essa hierarquia de prioridades retrata a situação atual, onde, após atendimentos às demandas hídricas de abastecimento, a água do reservatório passará a atender as demandas com fins econômicos.

Além dos critérios anteriormente descritos, para as demandas das atividades econômicas a prioridade adotada levou em consideração a importância de cada atividade para a região em estudo, já para as diferenças entre as prioridades nas demandas de abastecimento humano, tal fato pode ser explicado pela presença ou ausência de uma fonte alternativa de atendimento, proporcionando assim uma maior segurança para os municípios onde a única fonte de abastecimento é a Barragem de Santa Cruz.

Os números apresentados na Tabela 7 correspondem à prioridade no atendimento, onde quanto menor o seu valor, maior será a prioridade em atender a essa demanda.

Tabela 7: Resumo dos esquemas de prioridades para os cenários de alocação de águas

| Demandas | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1. Demandas atuais | | | | | | | | | | |
| Abastecimento humano (Apodi) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Abastecimento humano (Caraúbas) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Piscicultura | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Vazão ecológica | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Dreno | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| 2. Demandas futuras | | | | | | | | | | |
| Abastecimento humano (Mossoró) | - | 15 | - | - | 15 | 15 | - | 15 | 15 | 15 |
| Abastecimento humano (P. dos Ferros) | - | - | 20 | - | 20 | - | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Irrigação 1 | - | - | - | 25 | - | 25 | 25 | 25 | - | - |
| Irrigação 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 25 | - |
| Irrigação 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 25 |

Para os valores atribuídos das prioridades de abastecimento humano (tabela 7), o município de Apodi teve uma maior prioridade de atendimento em relação aos demais, visto que, o reservatório ser a principal fonte no atendimento da referida demanda, já a diferença entre os demais municípios justifica-se pelo fato do quantitativo no atendimento bem como a população atendida. A demanda vazão ecológica recebeu também um valor de prioridade alto devido a sua finalidade em manter a perenidade do rio a jusante da barragem pois um comprometimento da mesma geraria impactos aos usuários ao longo do percurso do rio.

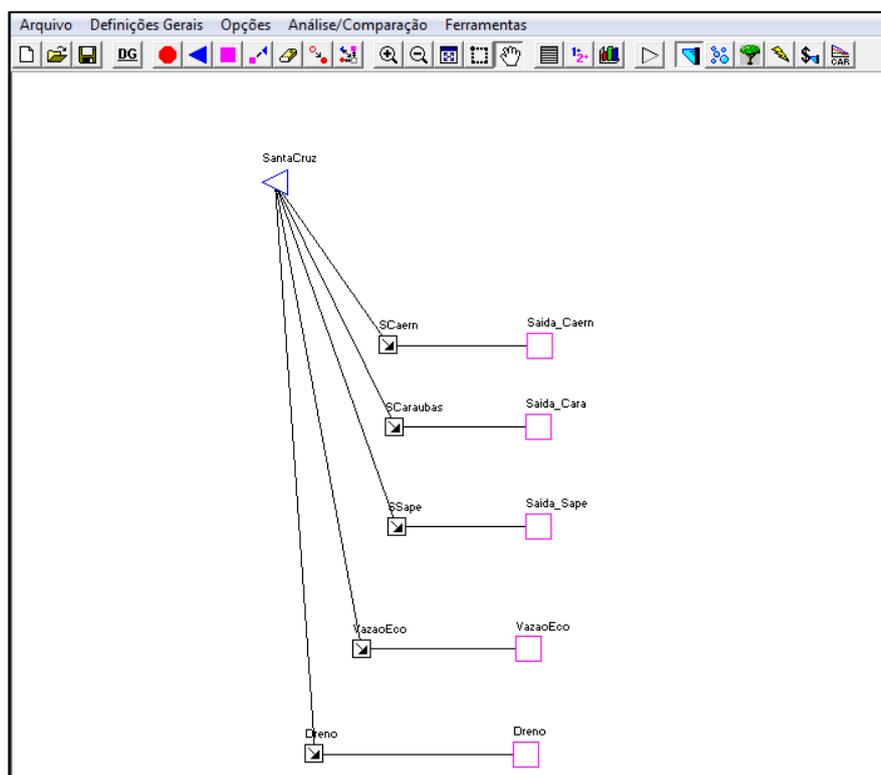
Em relação às demandas com fins econômicos, a irrigação recebeu uma maior prioridade em relação à piscicultura em decorrência da mesma ser uma atividade bem mais desenvolvida bem como praticada na região do reservatório.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

Para a aplicação do modelo de rede de fluxo escolhido, ACQUANET, foi elaborado um sistema de rede de fluxo de acordo com cada cenário, um exemplo pode ser visualizado na Figura14, onde é representada uma rede composta de 6 nós e 5 links e inseridos todos os dados de entrada. Foram analisados 636 meses (53 anos), .

Figura 14: Sistema de rede de fluxo do reservatório



A Tabela 8 apresenta os resultados da confiabilidade do sistema em função das demandas existentes, a partir dos diferentes usos considerados. Onde quanto mais próximo de 100% mais confiável será o sistema.

Entretanto, tal índice não leva em consideração os atendimentos parciais da demanda, ou seja, para o seu cálculo só é válido o atendimento integral da demanda.

Tabela 8: Confiabilidade (%) das demandas nos cenários simulados.

| Demandas | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Abastecimento humano Apodi | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 97.3 |
| Abastecimento humano Caraúbas | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99.8 | 99.8 | 96.2 |
| Piscicultura | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| Abastecimento humano Pau dos Ferros | - | - | 100 | - | 100 | - | 100 | 99.5 | 99.5 | 95.8 |
| Abastecimento humano Mossoró | - | 100 | - | - | 100 | 100 | - | 99.8 | 99.8 | 95.9 |
| Irrigação* | - | - | - | 100 | - | 100 | 100 | 99.5 | 95 | 0.0 |
| Vazão Ecológica | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99.8 | 99.8 | 96.4 |

Observa-se que dos cenários 1 ao 7 não houve falha no atendimento das demandas, portanto o sistema mostra-se confiável mesmo com a implementação de até 2 demandas adicionais sem o comprometimento no abastecimento das já existentes. No cenário 8 observa-se que o reservatório não tem a capacidade de atender todas as demandas futuras sem que ocorra pelo menos uma falha ao longo do tempo. Do cenário 8 ao cenário 9, houve um aumento apenas da demanda para irrigação, o que representou um incremento de 1,82 m³/s (43%) da demanda total requerida pelo sistema (Figura 14). Por conta disto no cenário 9 observou-se que as demandas irrigação e piscicultura apresentaram uma redução de confiabilidade do sistema (Figura 15), tal fato é explicado devido as prioridades adotadas durante a simulação, visto que, as mesmas não serem consideradas como usos prioritários.

Figura 15: Demanda total requerida pelo sistema

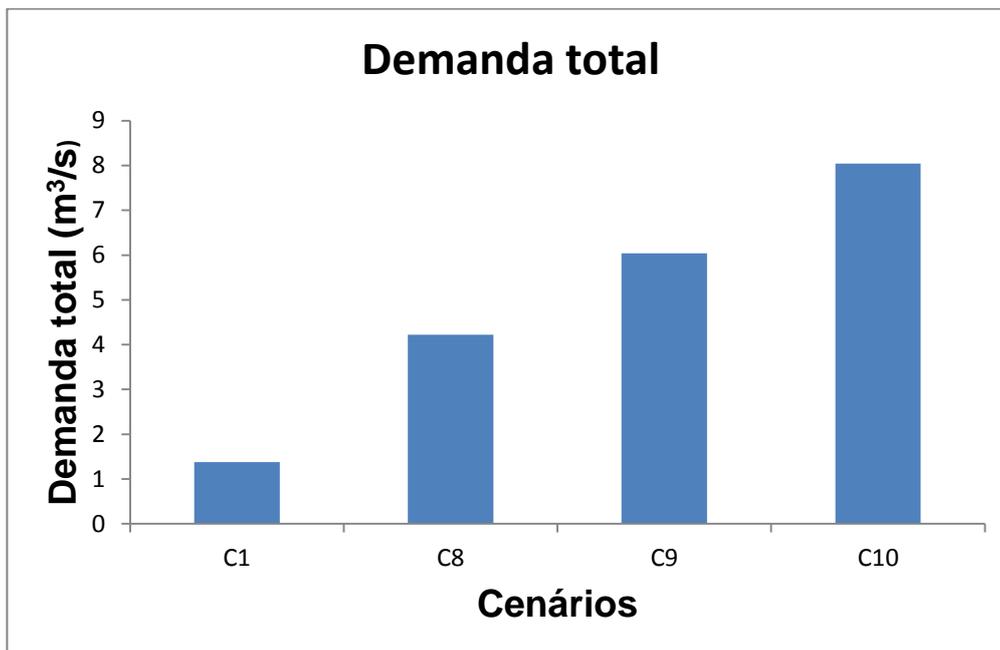
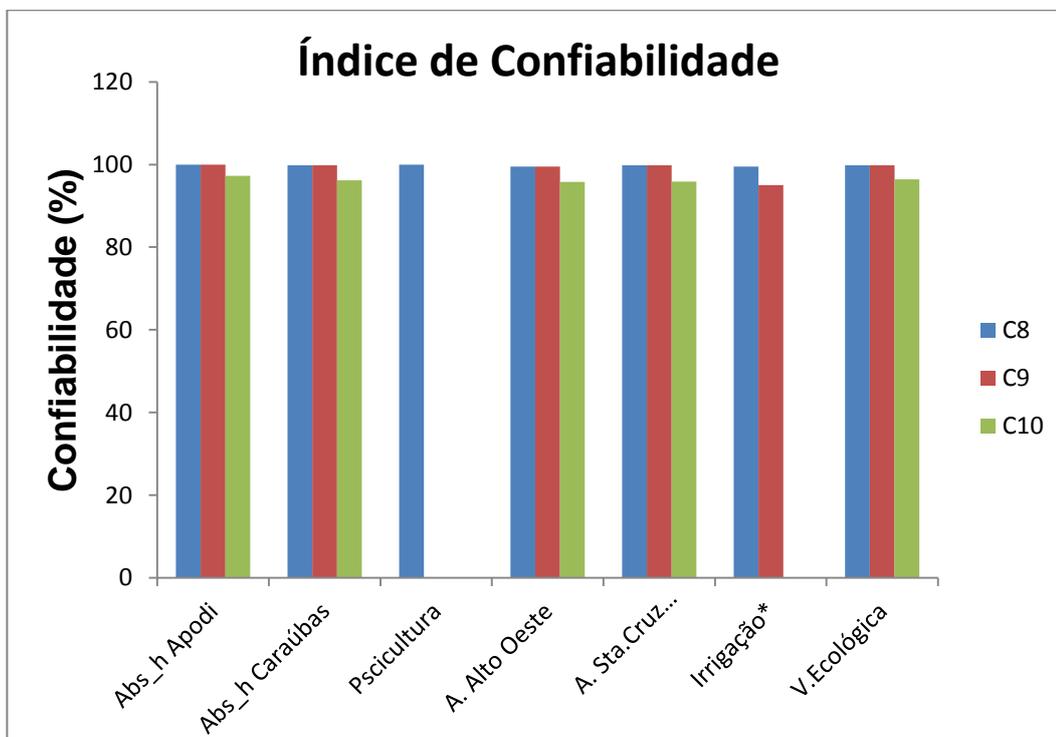


Figura 16: Análise do Índice de Confiabilidade para os Cenários 8, 9 e 10



Já no cenário 10 em nenhum dos casos o reservatório conseguiu atender toda a vazão requerida durante todo o período, e com as situações mais graves observadas para as demandas de irrigação e Piscicultura, onde não se verificou nenhum atendimento a demanda total requerida por elas, por conta de ter sido adotado o maior valor de prioridade. Vale observar que a demanda que teve menor queda na confiabilidade foi a demanda de abastecimento de Apodi, isto por conta da mesma apresentar um menor valor de prioridade.

Nos casos das demandas abastecimento humano Pau dos Ferros e Mossoró, a primeira teve uma pequena redução no valor da confiabilidade (tabela 6), apesar de ter sido adotada para a mesma um maior valor de prioridade, este fato é explicado por conta do algoritmo de otimização utilizado pelo ACQUANET:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} * Q_{ij}, (4)$$

que minimiza o os produtos das vazões pelos custos,

$$C = -1000 + P * 10 (5)$$

sendo assim o menor valor da demanda da adutora de alto oeste (0,27 m³/s) foi mais significativo do que o seu maior custo para o melhor atendimento das suas demandas.

Para avaliar a capacidade de recuperação do sistema, fez-se uma análise do índice de resiliência, definido pela Eq. 2. A partir dessa equação, foi atribuído valor 1 todas as vezes que ocorreu o atendimento (uma falha no atendimento) da demanda no mês *i*, seguido de uma falha (um atendimento plena da demanda) no mês *i* + 1. Fez-se o somatório de todos os valores obtidos com esta última análise dividindo o resultado pelo número de vezes em que o sistema falhou, determinando-se o índice de resiliência.

Os resultados dos indicadores de resiliência são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resiliência dos pontos de demandas nos cenários (%)

| Demandas | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Abastecimento humano Apodi | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29.4 |
| Abastecimento humano Caraúbas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 29.1 |
| Piscicultura | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.3 | 33.3 | 0 |
| Abastecimento humano Pau dos Ferros | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.3 | 33.3 | 25.9 |
| Abastecimento humano Mossoró | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 26.9 |
| Irrigação | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.3 | 20 | 0 |
| Vazão Ecológica | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 29.1 |

Como a resiliência mede a capacidade em que o sistema se recupera, observa-se que para os cenários de 1 a 7 seu valor foi nulo, visto que não houve em nenhum dos casos falha no atendimento da demanda, conseqüentemente não acarretando na possibilidade da recuperação do mesmo.

Nos cenários 8 e 9 o sistema apresentou uma excelente capacidade de recuperação para as demandas vazão ecológica, Abastecimento humano Caraúbas e Abastecimento humano Mossoró, o mesmo não se verificando nas demais demandas bem como no cenário 10, em que foi observado nas demandas piscicultura e irrigação a não capacidade de recuperação em consequência do não atendimento das demandas referidas no período do estudo.

Para analisar o quanto vulnerável é o sistema, fez-se uma análise do índice de vulnerabilidade, definido pela Eq. 3. O índice de vulnerabilidade mede a dimensão da falha de um dado objetivo e é obtida pela diferença entre o objetivo e o nível atingido. A Tabela 10 mostra os valores do índice de vulnerabilidade encontrados.

Tabela 10: Vulnerabilidade dos pontos de demandas nos cenários (m³/s)

| Demandas | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Abastecimento humano Apodi | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Abastecimento humano Caraúbas | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Piscicultura | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 |
| Abastecimento humano Pau dos Ferros | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Abastecimento humano Mossoró | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| Irrigação | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.19 | 2.19 |
| Vazão Ecológica | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 |

A vulnerabilidade mede a gravidade das consequências pelo comprometimento das falhas do sistema. Pela tabela, é possível identificar que os cenários de 1 a 7 apresentaram a melhor situação, visto que não foi identificado vulnerabilidade do sistema nesses cenários.

Observa-se que no cenário 8 apenas a demanda de irrigação apresentou uma pequena vulnerabilidade, já no cenário 9 pode-se visualizar que a mesma teve um aumento em seu valor, entretanto a situação mais grave ocorre no cenário 10 para a referida demanda, visto que pelo resultado encontrado poderá haver o comprometimento de parte da produção em virtude do déficit no atendimento, em relação as outras demandas pode-se inferir que apesar de apresentarem valores de vulnerabilidade, os mesmos são considerados insignificantes.

Tabela 11: Vulnerabilidade dos pontos de demandas nos cenários (%)

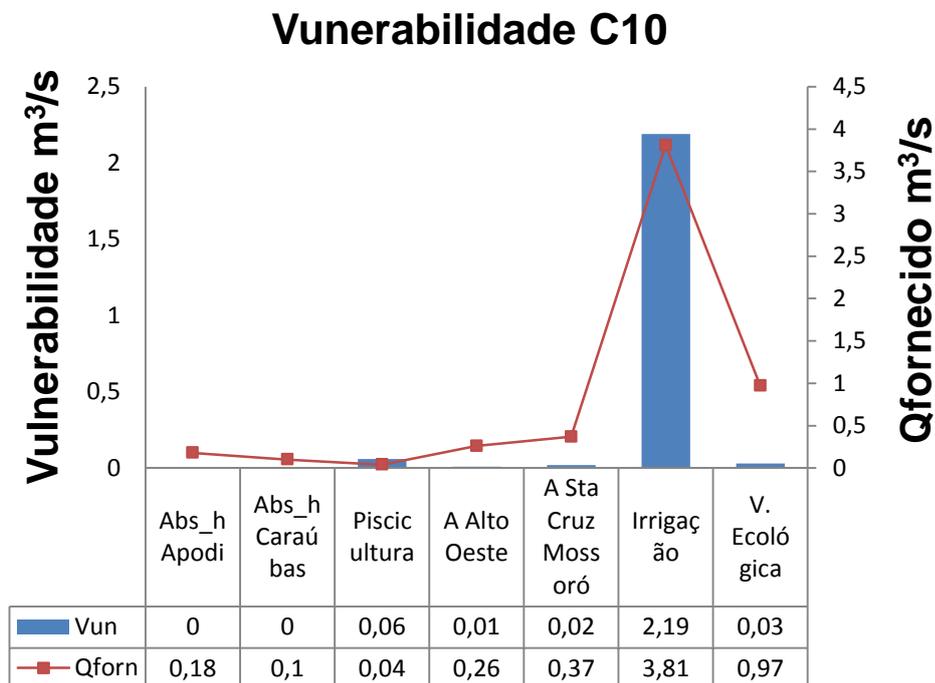
| Demandas | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Abastecimento humano Apodi | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Abastecimento humano Caraúbas | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Piscicultura | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 60 |
| Abastecimento humano Pau dos Ferros | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.7 |
| Abastecimento humano Mossoró | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.1 |
| Irrigação | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.4 | 4.8 | 36.5 |
| Vazão Ecológica | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3 |

A Tabela 11 apresenta o índice de vulnerabilidade em termos percentuais, sendo que para a análise da mesma, adotou-se a metodologia proposta por Faria et al. (2004) , em que os autores atribuíram uma tolerância de vulnerabilidade no atendimento da demanda de 20%.

Dessa forma, observa-se que para as demandas que ficaram fora do limite da tolerância adotada foram irrigação onde seu comprometimento no atendimento foi de 36,5% e piscicultura com valor de 60%.

Em relação às outras demandas que sofreram com a vulnerabilidade do sistema observa-se que os resultados obtidos foram insignificantes, devido aos seus valores ficarem abaixo da tolerância adotada na pesquisa.

Figura 17: Análise da Vulnerabilidade Cenário 10



A Figura 17 apresenta uma análise individual do cenário 10, onde são comparados os valores da vulnerabilidade e a vazão fornecida pelo sistema, os valores apresentados indicam que a implantação das referidas demandas da forma que se apresentam, poderão inibir a capacidade de produção, visto que haverá uma necessidade de adequação devido o não atendimento da vazão prevista em projeto.

6. CONCLUSÕES

- Neste trabalho, foi discutida a questão da alocação da água para diferentes usos que se configura como componente fundamental da gestão e aproveitamento dos recursos hídricos, sendo a operação eficiente dos reservatórios de fundamental importância para o atendimento das necessidades hídricas.

- Observa-se que a metodologia proposta, no presente trabalho, com aplicação de um modelo de simulação/otimização ACQUANET, onde os valores da prioridade adotada, bem como as vazões requeridas durante a simulação, são relevantes, ou seja: para um mesmo estudo os resultados podem ser diferentes a depender da prioridade e vazões adotadas. No entanto, a escolha final englobará diversos fatores, tais como os aspectos econômicos, políticos, sociais e ambientais.

- O reservatório Santa cruz apresentou capacidade de atendimento para as demandas do cenário 1 ao cenário 7, representando um acréscimo na demanda total de 86%, sem que haja nenhum tipo de comprometimento no atendimento total das mesmas.

- A demanda irrigação no cenário 10 foi responsável pelos valores significativos de vulnerabilidade para as demandas piscicultura e abastecimento humano Mossoró, visto que, houve um comprometimento no atendimento de 60% e 50% respectivamente.

7. RECOMENDAÇÕES

Os valores obtidos das vazões regularizadas da barragem de Santa Cruz associadas às garantias se assemelham aos resultados encontrados no PERH para bacia do rio Apodi/Mossoró na barragem Santa Cruz, os quais, divergem dos estudos hidrológicos realizados no projeto de transposição do Rio São Francisco que apresentam vazões significativamente menores para as mesmas garantias. Dessa forma, tendo em vista a indisponibilidade dos dados básicos gerados nos estudos do projeto da transposição, é importante salientar a necessidade de aplicação e calibração de um modelo hidrológico mais sofisticado para à obtenção de uma serie de vazões sintéticas mais confiáveis do que os obtidos no PERH para a bacia do rio Apodi/Mossoró.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALBANO, Gustavo Doratioto. **Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático de Qualidade de Água em Represas (CE-QUAL-R1) Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira.** 2004. 230 f. Dissertação (Mestre) - Usp, São Paulo, 2004.

ARAGÃO, Talita Gabrielle. **Transposição das águas do rio são francisco para a bacia do rio paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo acquanet.** 2008. 139 f. Dissertação (Mestre) - UFCG, Campina Grande, 2008.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L.; FILHO, K. Z. (1997). *Modelos de Simulação e de Redes de Fluxo.* In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 1ª Edição. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS : ABRH. p.165-225.

BARBOSA, P. S. F. (1997) *Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos.* In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 1ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p. 97-161.

BORSOI, Zilda Maria Ferrão; TORRES, Solange Domingo Alencar. **A POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL.** Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev806.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2012.

BRAGA, Benedito; BARBOSA, Paulo Sérgio Franco; NAKAYAMA, Paulo Takashi. SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO EM RECURSOS HÍDRICOS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre-rs, v. 3, n. 3, p.73-95, 01 jul. 1998. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/publicacoes_art.php>. Acesso em: 10 nov. 2011.

BRANDÃO, João Luiz Boccia; BARROS, Mario Thadeu Leme de. SFPLUS: Modelo para Avaliação do Desempenho de Sistemas de Reservatórios com Usos Múltiplos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre-rs, v. 11, n. 3, p.43-53, 01 jul. 2006Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/publicacoes_art.php>.Acesso em: 10 nov. 2011.

BRASIL (1997). **Lei nº 9.433. Política Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria dos Recursos Hídricos**, Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Agropecuário. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/>>Acesso em: 15 Mar. 2013.

BRIGADÃO, E. N. **Integração de Análise Econômica e Financeira a Sistemas de Apoio a Decisão de Outorga e Cobrança de Recursos Hídricos**. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, 2006, Cuiabá, MT. Anais... Cuiabá: ABRH, 2006. CD Rom.

BROOKE, Anthony; KENDRIK, David; Meeraus, Alexander.**GAMS – Sistema Geral de Modelagem Algébrica**. São Paulo, Edgard BlucherLtda, 1997.

BUARQUE, D. C.; PEDROSA, V. A.; CARVALHO, G. S. e FREIRE, C. C. (2003). **Critérios de demandas hídricas para a outorga de uso da água: setor sucro-alcooleiro**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba - PR.

CABRERA, E. (1997), **Uso Eficiente del Agua. DirectricesHerramientas** (Efficient Use Rationale On Water. Guidelinesand Tools), EURO water, Valencia, Espanha.

CELESTE, A. B. (2006). **Determinação e análise de indicadores de desempenho e de sustentabilidade de seis açudes na bacia do rio Piancó-PB e de suas ponteciais demandas**.110p.Dissertação de Mestrado, curso de Pós-

graduação em engenharia Civil e ambiental, área deconcentração: Recursos Hídricos, UFCG, Campina Grande-PB, p. 119.

CONSÓRCIO-CNEC-SOGREAH (1975). ***Aproveitamento Hidro-Agrícolas dos Açudes de Itans, Sabugi, Cruzeta e Pau dos Ferros-RN.*** Ministério do Interior-Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Volume 2.

FARIA, A. S. ; MEDEIROS, Yvonilde Dantas Pinto ; SRDJEVIC, Bojan . ***Aplicação de Técnicas Computacionais para Tomada de Decisão no Processo de Alocação de Água na Bacia do Rio Paraguaçu - Bahia.*** In: VII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE,, 2004, São Luis/MA. Anais do VII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2004. v. 1. p. 262.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (2007). ***Plano Regional de Desenvolvimento Sustentável do Médio Oeste: Diagnóstico Preliminar,*** Secretaria de Estado do Planejamento e das Finanças e Secretaria Extraordinária para Assuntos Institucionais; Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura, Natal, Brasil.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (2007). ***Estudo de Viabilidade, Projeto Básico e Plano de Ação Imediata para o Aproveitamento Hidroagrícola das Aluviões à Jusante da Barragem Santa Cruz,*** Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do RN; VBA Consultores, Natal, Brasil.

HASHIMOTO, T. ***Reliability, Resiliency, and Vulnerability criteria for water resource system performance evaluation.***vol. 18.Internacional Institute for Applied SystemsAnalyses, Laxenburg.Áustria, 1982.14-18 p.

LABADIE, J. W. (2004). Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-Of-The-Art Review. ***Journal of Water Resources Planning and Management.*** v. 130. n. 2, p. 93-111.

Labadie, J. W. MODSIM: River basin network flow model for conjunctive stream-aquifer management. Fort Collins: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1988. 55p.

LABSID (2004)“**Sistema de Suporte a Decisões Aplicado à Gestão e Planejamento de Recursos Hídricos**”. Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

LOUCKS, Daniel P.; STAKHIV, Eugene Z.; MARTIN, Lynn R..SUSTAINABLEWATER RESOURCES MANAGEMENT.**Journal Of Water Resources Planning And Management**, New York, v. 126, n. 2, p.43-47, 01 mar. 2000.

MAIA, Adelena Gonçalves. **As Consequências do Assoreamento na Operação de Reservatórios Formados por Barragens**. 2006. 271 f. Tese (Doutor) - Usp, São Carlos, 2006.

MAUAD, F.F.; ALBERTIN, L.L.; CORRÊA FILHO, C. R. R.; BARBOSA, A. R. A.; OLIVEIRA, H. R..(2003). *Avaliação de Conflitos de Usos Múltiplos de Água em Sistemas de Recursos Hídricos: o Estado da Arte*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-PR.

MAY, S. **ESTUDO DA VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA PARA CONSUMO NÃO POTÁVEL EM EDIFICAÇÕES**. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) –Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

MEDEIROS, M. J. (2000). **Avaliação da vazão referencial como critério de outorga dos direitos de usos das águas na bacia do rio Paraopeba**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO (2004). **Consolidação dos Estudos Ambientais do PISF**, Consórcio Ecology Brasil, 2004.

MOURA, E.M (2007). **AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E DA DEMANDA HÍDRICA NO TRECHO DO RIO PIRANHAS-AÇU ENTRE OS AÇUDES COREMAS-MÃE D'ÁGUA E ARMANDO RIBEIRO GONÇALVES**.Dissertação de Mestrado, à Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN.

Nandalal, K. D. W.,Simonovic, S. P. (2002). **“State-of-the-Art Report on Systems Analysis Methods for Resolution of Conflicts in Water Resources Management”**.DivisionofWater Science, UNESCO.

NASCIMENTO, WaldenizeManoelina do; VILLAÇA, Maria Garcia. BACIAS HIDROGRÁFICAS: PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO. **Revista Eletrônica da Associação Dos Geógrafos Brasileiros**, Tres Lagoas, n. 7, p.102-107, 05 maio 2008. Disponível em: <http://www.cptl.ufms.br/revista-geo/Art507_W.Nascimento_M.Vila%E7a.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2012.

Porto, R. L. L.; Roberto, A. N.; Schardong, A.; Mélo Júnior, A.V. **Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos**. In: Silva, R. C. V. Métodos numéricos em recursoshídricos. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap.2, p.93-240.

Porto, R. L. L.; Azevedo, L. G. T.**Sistemas de suporte a decisões de recursos hídricos**. In: Porto, R. L. L. Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídrico. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1997. cap.2, p.43-95.

RIGHETTO, AntonioMarozzi;GUIMARÃES JÚNIOR, J. A.;MELO, J. M. B. G. (2002). **Aplicação do Modelo MODHISA para Geração de Vazões Médias Mensais em Rios do Semiárido Nordeste**. In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió-AL.

RIGHETTO, AntonioMarozzi; GUIMARÃES JÚNIOR, João Abner. Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte para Avaliação do Desempenho de Sistemas de Reservatórios com Usos Múltiplos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre-rs, v. 8, n. 2, p.19-29, 01 jul. 2003. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/publicacoes_art.php>. Acesso em: 30 out. 2011.

RODRIGUES, A. C. L. (2007). **Nova Proposta de Operação de Outorga em Sistemas de Reservatórios – Estudo de Caso: Bacia Hidrográfica do Rio Piancó**. Tese de Doutorado. 294p. Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande – PB.

Roberto, A. N., Porto, R. L. L., Zahed, K. F. (1997). **Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Cheias em Bacias Complexas**. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ABRH)*, Vitória, Brasil.

Roberto, A. N.; Porto, R. L. L. **Alocação da água entre múltiplos usos em uma Bacia Hidrográfica**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13, 1999, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABRH, 1999. CD Rom.

Roberto, A. N.; Porto, R. L. L. **O sistema ModsimLS: Um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14, 2001, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2001. CD Rom.

ROBERTO, A. N. **Modelos de Rede de Fluxo Para Alocação da Água Entre Múltiplos Usos em Uma Bacia Hidrográfica**. Junho, 2002. 105 p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTOS, Valterlin da Silva et al. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre-rs, v. 16, n. 4, p.49-60, 01 out. 2011. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/publicacoes_art.php>. Acesso em: 10 fev. 2012.

SANTOS, Valterlin Da Silva. **Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos**. 2007. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Ufcp, Campina Grande-pb, 2007. Cap. 3.

SILVA, T.C. DA (1998). **Legislação Federal e Estadual sobre Recursos Hídricos temas correlatos**. Curso sobre engenharia de irrigação e gestão de recursos hídricos, UFPB.

SILANS, A. M. B. P.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B.(2000). ***Aplicação do Modelo Hidrológico Distribuído AÇUMOD à Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe-Estado da Paraíba.*** Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH. Vol5, n. 3, jul/set.

VIANNA, W.P.,Jr.; LANNA, A.E.L.(2002). ***Simulação e otimização de um sistema de reservatórios: bacia do rio Curu.***Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 7(3), pp 63-83.

VIEIRA, Vicente P. P. B.. Desafios da Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Semiárido. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre-rs, v. 8, n. 2, p.7-17, 01 abr. 2003. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/publicacoes_art.php>. Acesso em: 15 fev. 2012.

ANEXO A – O ALGORITMO OUT-OF-KILTER (OOK)

A.1 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO OUT-OF-KILTER (OOK)

O algoritmo tem como objetivo minimizar a seguinte equação matemática (função-objetivo):

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} * Q_{ij} \quad (A1)$$

com as seguintes restrições:

$$\sum_{i \in I_j} Q_{ij} - \sum_{k \in O_j} Q_{jk} = 0 \quad (A2)$$

$$Q_{ij} \leq U_{ij} \quad (A3)$$

$$Q_{ij} \geq L_{ij} \quad (A4)$$

onde:

I_j = conjunto de nós cujos arcos terminam em j ;

O_j = conjunto de nós cujos arcos iniciam no nó j .

C_{ij} = custo do transporte de uma unidade de fluxo através do arco (i,j)

Q_{ij} = quantidade de fluxo que passa pelo arco (i,j)

U_{ij} = capacidade máxima no arco (i,j)

L_{ij} = capacidade mínima no arco (i,j)

O problema é dividido em duas fases: Primal e Dual

Em cada nó é associada uma variável dual W_i na equação de conservação de massa, eq.(A.2), uma variável dual V_{ij} com cada limite mínimo na eq.(A.4) e uma variável H_{ij} com cada limite máximo na eq.(A.3). Com isto, tem-se o problema dual da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m L_{ij} * V_{ij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m U_{ij} * H_{ij} \quad (A5)$$

sujeita a:

$$W_i - W_j + V_{ij} - H_{ij} = C_{ij}, j = 1, \dots, m \quad (A6)$$

$$H_{ij}, V_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, \dots, m \quad (A7)$$

$$-\infty \leq W_i \leq +\infty \quad i = 1, \dots, m \quad (A8)$$

Rearrmando-se os termos da eq.(A.6) tem-se:

$$V_{ij} - H_{ij} = C_{ij} - W_i + W_j$$

onde: $C_{ij} - W_i + W_j$ é o custo líquido do arco (i,j), o que leva em consideração o custo de transporte e o custo dos nós terminais que compõem o arco.

O lucro líquido do arco (i,j) é então representado por:

$$dC_{ij} = -(V_{ij} - H_{ij}) \quad (A10)$$

$$\therefore dC_{ij} = W_i - W_j - C_{ij} \quad (A11)$$

Aplicando-se as condições de relaxamento tem-se o seguinte critério de otimização:

$$dC_{ij} < 0 \Rightarrow Q_{ij} = L_{ij} \quad (A12)$$

$$dC_{ij} > 0 \Rightarrow Q_{ij} = U_{ij} \quad (A13)$$

$$dC_{ij} = 0 \Rightarrow L_{ij} \leq Q_{ij} \leq U_{ij} \quad (A14)$$

A eq.(A.12) representa a condição de lucro líquido negativo no arco (i,j) no qual o fluxo deve ser o menor possível; a eq.(A.13) representa a condição de lucro líquido positivo o que significa que o fluxo deve ser o maior possível. A eq.(A.14) representa lucro líquido no arco(i,j) igual a zero, o que significa que os limites mínimo e máximo de fluxo não devam ser violados.

As eq.(A.12), eq.(A.13) e eq.(A.14) representam o Estado de Kilter e, portanto, o fluxo no respectivo arco (i,j). Se o fluxo no arco (i,j) violar qualquer uma dessas condições diz-se que o mesmo está *Fora-de-Kilter (Out-Of-Kilter)* e caso contrário, ou seja, se as condições de otimização forem obedecidas, diz-se que o arco está *Em-Kilter (In-Kilter)*. Ao longo da alternância entre a fase primal (variando valores para Q_{ij}) e a fase dual (variando os valores para W_i), o algoritmo procura satisfazer as condições de otimização até que todos os arcos de uma rede de fluxo estejam *Em-Kilter* (Roberto, 2002).

Na condição inicial do algoritmo OOK inicia-se com os fluxos na rede iguais a zero. Em cada arco (i,j) são calculados o lucro líquido e , e, os respectivos, Número de Kilter e Estado de Kilter. Se todos os arcos estiverem In-Kilter, então uma solução ótima foi encontrada. Caso contrário, passa-se para a fase Primal.

A.1.1 FASE PRIMAL DO OOK

Verifica-se qual arco (p,q) esteja Fora-de-Kilter. Com base na rede de fluxo original é construída uma rede de fluxo temporária onde serão variados os valores de fluxo. A rede temporária deverá ser construída tentando-se incluir o arco (p,q) Fora-de-Kilter formando um novo circuito (Roberto, 2002). Determina-se então a menor variação de fluxos (Δ) dentre todas as possíveis variações dos arcos desse circuito, cujos novos fluxos serão dados então por:

$$Q_{ij} = Q_{ij} + \Delta \quad (A15)$$

Reinicia-se a fase primal e se não existir nenhum circuito contendo o arco (p,q) passa-se para a fase dual.

A.1.2 FASE DUAL DO OOK

Nesta fase determina-se um conjunto de nós X que podem ser alcançados a partir do nó q ao longo de uma trajetória de rede temporária e o conjunto de nós Y que não pertençam a X .

Deve-se então calcular a seguinte equação:

$$\theta = \text{Mínimo}\{|dC_{ij}|, \infty\}, (i, j) \in (S1 \cup S2) \quad (A16)$$

onde:

$$S1 = \{(i, j) : i \in X, j \in Y, dC_{ij} < 0, Q_{ij} \leq U_{ij}\} \quad (A17)$$

$$S2 = \{(i, j) : i \in Y, j \in X, dC_{ij} > 0, Q_{ij} \geq l_{ij}\} \quad (A18)$$

Com o resultado da eq.(A.16), alteram-se os valores de W_i e de dC_{ij} , conforme equações abaixo, retornando à fase primal:

$$W_i = W_i + \theta \text{ se } i \in X \quad (\text{A19})$$

$$W_i = W_i \text{ se } i \in Y \quad (\text{A20})$$

$$d_{Cij} = d_{Cij} \text{ se } (i, j) \in (X, X) \cup (Y, Y) \quad (\text{A21})$$

$$d_{Cij} = d_{Cij} + \theta \text{ se } (i, j) \in (X, Y) \quad (\text{A22})$$

$$d_{Cij} = d_{Cij} - \theta \text{ se } (i, j) \in (Y, X) \quad (\text{A23})$$

Se $\theta = \infty$ então o processo deve ser interrompido porque não existe solução viável.

A.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO OUT-OF-KILTER

A seguir tem-se uma rede de fluxo, apresentada por Roberto (2002), sendo seu procedimento esmiuçado para exemplificar seu funcionamento.

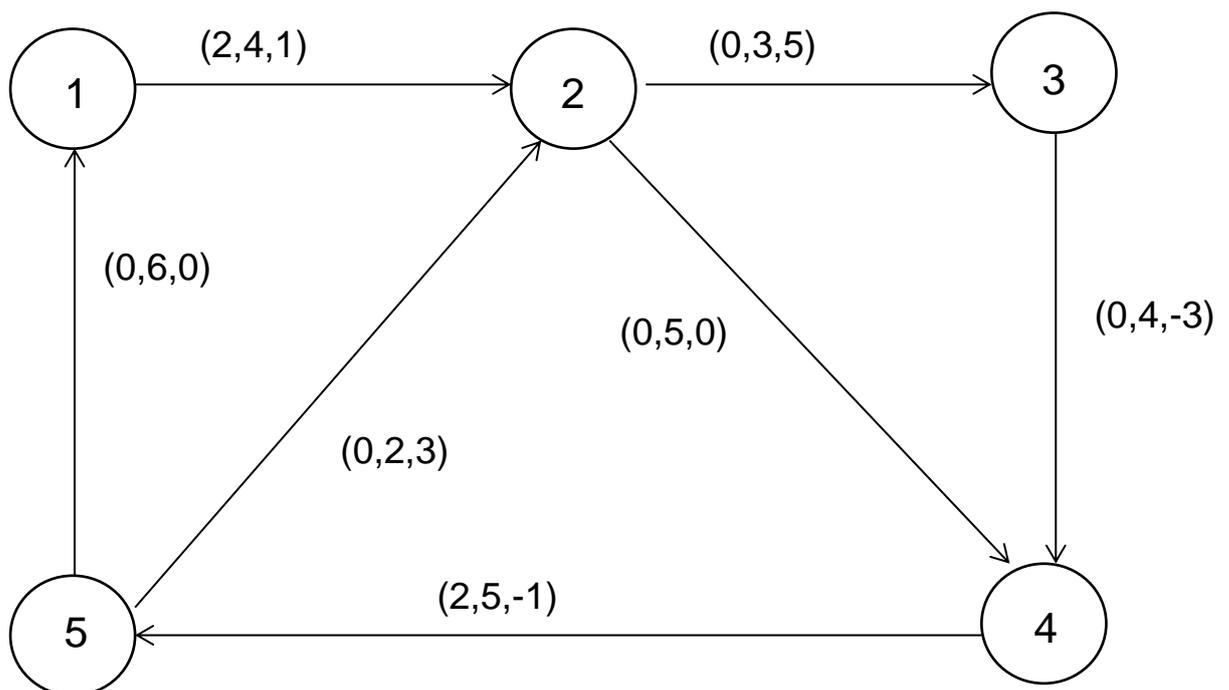


Figura A.1 - Rede de Fluxo em situação inicial

Para os arcos da rede acima descrita na figura A.1, adotou-se a notação (L_{ij}, U_{ij}, C_{ij}) onde:

i e j = nó inicial (i) e nó final (j) de um arco

L_{ij} = capacidade mínima no arco (i, j)

U_{ij} = capacidade máxima no arco (i,j)

C_{ij} = custo unitário do arco (i,j)

Para início dos cálculos adota-se $Q_{ij} = 0$ em todos os arcos e a variável dual $W_i = 0$ em todos os nós. O próximo passo é calcular o lucro líquido dC_{ij} em cada arco e os respectivos Estado de Kilter e Número de Kilter (ou KilterNumber - KN), cujos resultados estão representados na figura A.2.

Lembrando que a equação do lucro líquido dC_{ij} de cada arco é dado pela eq.(A.11), tem-se os seguintes valores para a rede apresentada:

$$dC_{1,2} = 0 - 0 - 1 \Rightarrow dC_{1,2} = -1$$

$$dC_{2,3} = 0 - 0 - 5 \Rightarrow dC_{2,3} = -5$$

$$dC_{3,4} = 0 - 0 - (-3) \Rightarrow dC_{3,4} = 3$$

$$dC_{4,5} = 0 - 0 - (-1) \Rightarrow dC_{4,5} = 1$$

$$dC_{5,1} = 0 - 0 - 0 \Rightarrow dC_{5,1} = 0$$

$$dC_{5,2} = 0 - 0 - 3 \Rightarrow dC_{5,2} = -3$$

$$dC_{2,4} = 0 - 0 - 0 \Rightarrow dC_{2,4} = 0$$

Lembrando que nesta fase inicial, tem-se:

$Q_{1,2} = Q_{2,3} = Q_{3,4} = Q_{4,5} = Q_{5,1} = Q_{5,2} = Q_{2,4} = 0$ (ZERO), os Estados de Kilter e Números de Kilter (KN) são calculados conforme a Tabela A.1 da seguinte forma:

$$Q_{1,2} < I_{1,2} \text{ onde } I_{1,2} = 2 \Rightarrow KN = |0 - 2| = 2; dC_{1,2} = -1 \therefore dC_{1,2} < 0 \Rightarrow \text{OOK}$$

$$Q_{2,3} = I_{2,3} \text{ onde } I_{2,3} = 0 \Rightarrow KN = 0; dC_{2,3} = -5 \therefore dC_{2,3} < 0 \Rightarrow \text{IK}$$

$$Q_{3,4} = I_{3,4} \text{ onde } U_{3,4} = 4 \Rightarrow KN = |0 - 4| = 4; dC_{3,4} = 3 \therefore dC_{3,4} > 0 \Rightarrow \text{OOK}$$

$$Q_{4,5} < I_{4,5} \text{ onde } U_{4,5} = 5 \Rightarrow KN = |0 - 5| = 5; dC_{4,5} = 1 \therefore dC_{4,5} > 0 \Rightarrow \text{OOK}$$

$$Q_{5,1} = I_{5,1} \text{ onde } I_{5,1} = 0 \Rightarrow KN = 0; dC_{5,1} = 0 \therefore dC_{5,1} = 0 \Rightarrow \text{IK}$$

$$Q_{5,2} = I_{5,2} \text{ onde } I_{5,2} = 0 \Rightarrow KN = 0; dC_{5,2} = -3 \therefore dC_{5,2} < 0 \Rightarrow \text{IK}$$

$$Q_{2,4} = I_{2,4} \text{ onde } I_{2,4} = 0 \Rightarrow KN = 0; dC_{2,4} = 0 \therefore dC_{2,4} = 0 \Rightarrow \text{IK}$$

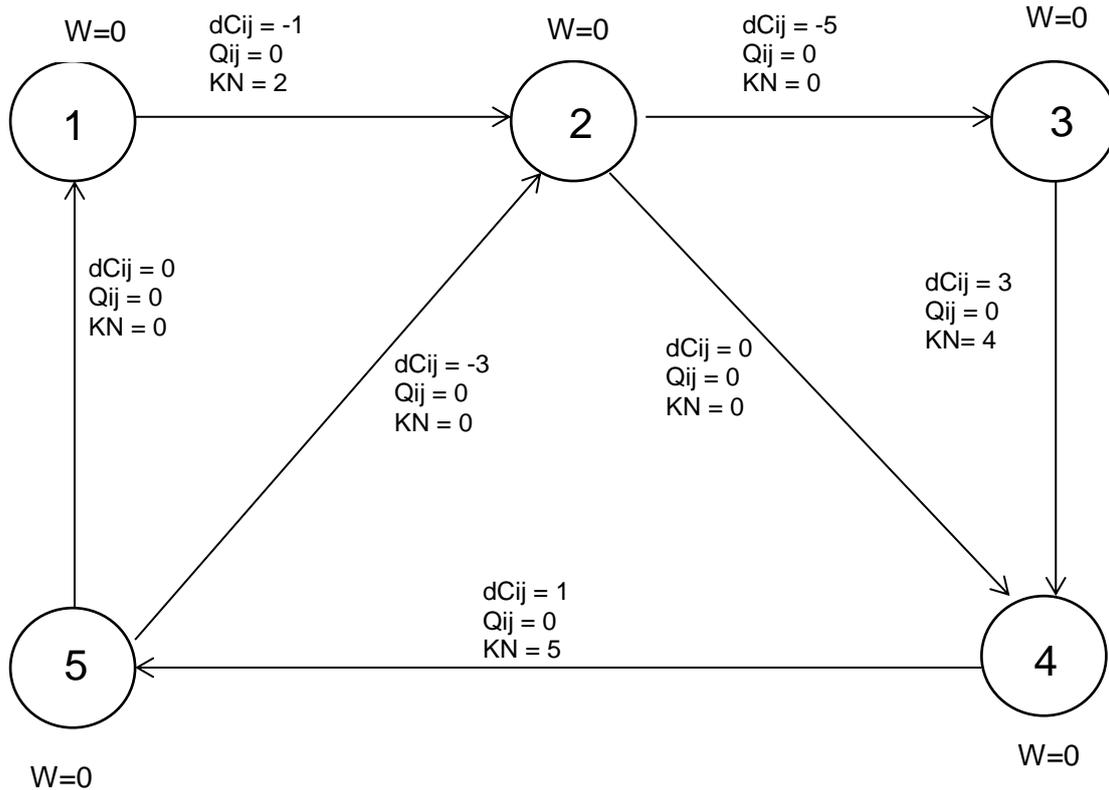


Figura A.2 : Rede de Fluxo da Fase Primal (Situação 1)

Da figura A.2 nota-se que os arcos (1,2), (3,4) e (4,5) estão Out-of-Kilter (OOK). A partir desta rede real construiu-se uma rede temporária, representada na figura A.3, contendo o nó $(p, q) = (1, 2)$. O circuito da rede temporária é então definido por $C = \{(1, 2), (2, 4), (4, 5), (5,1)\}$ e Δ , que é a menor variação (diminuição ou incremento) de fluxo, dentre todas as possíveis variações de fluxo dos arcos da rede temporária, necessária para se colocar um determinado arco In-Kilter. Como nesta rede todas as vazões estão zeradas, Δ é calculado da seguinte forma:

$$\left. \begin{array}{l}
 \Delta_{1,2} \text{ para } (1, 2) \text{ ficar In Kilter: } dC_{1,2} < 0 \therefore Q_{1,2} \text{ deve ser igual a } L_{1,2} \Rightarrow \Delta_{1,2} = 2 \\
 \Delta_{2,4} \text{ para } (2, 4) \text{ ficar In Kilter: } dC_{2,4} = 0 \therefore 0 \leq Q_{2,4} \leq 5 \text{ (situações 2, 3 e 4)} \Rightarrow \Delta_{2,4} = \\
 \Delta_{4,5} \text{ para } (4, 5) \text{ ficar In Kilter: } dC_{4,5} > 0 \therefore Q_{4,5} \text{ deve ser igual a } U_{4,5} \Rightarrow \Delta_{4,5} = 5 \\
 \Delta_{5,1} \text{ para } (5, 1) \text{ ficar In Kilter: } dC_{5,1} = 0 \therefore 0 \leq Q_{5,1} \leq 6 \text{ (situações 2, 3 e 4)} \Rightarrow \Delta_{5,1} = \\
 \Delta_{3,4} \text{ para } (3, 4) \text{ ficar In Kilter: } dC_{3,4} > 0 \therefore Q_{3,4} \text{ deve ser igual a } U_{3,4} \Rightarrow \Delta_{3,4} = 4
 \end{array} \right\} \Delta = 2$$

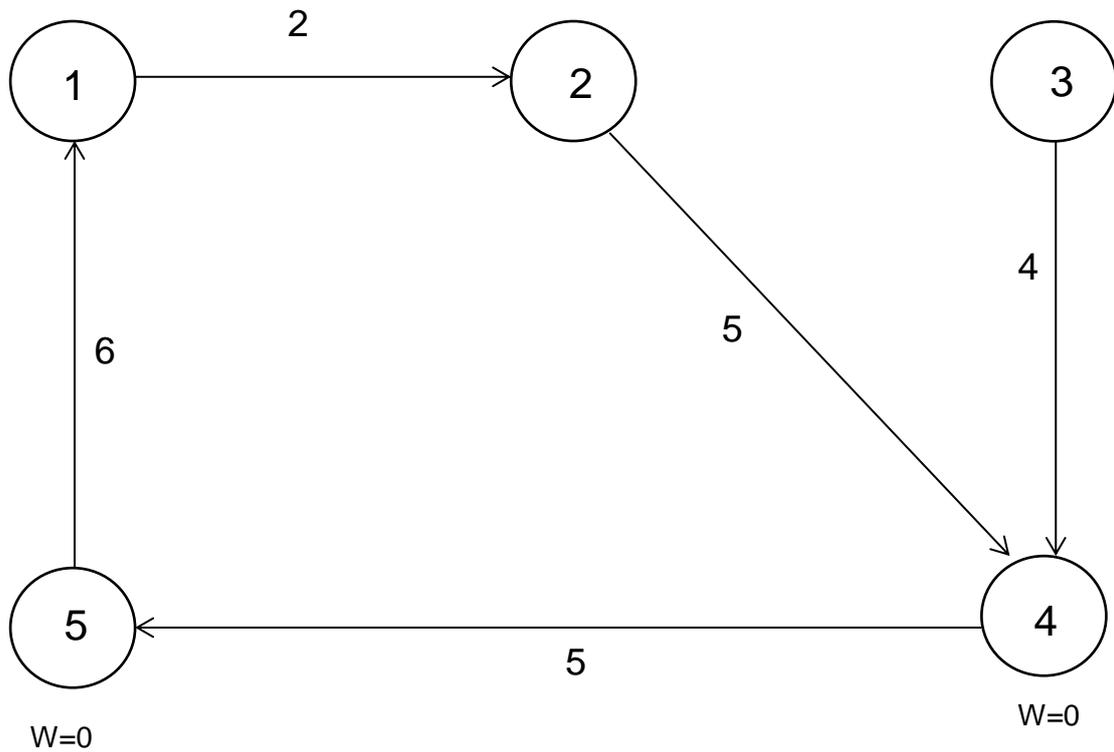


Figura A.3 :Rede de fluxo temporária da fase primal (situação 1)

Os novos valores de Q_{ij} serão dados por $Q_{ij} = Q_{ij} + \Delta$. Reconstruiu-se a rede e reiniciou-se a fase primal conforme figura A.4.

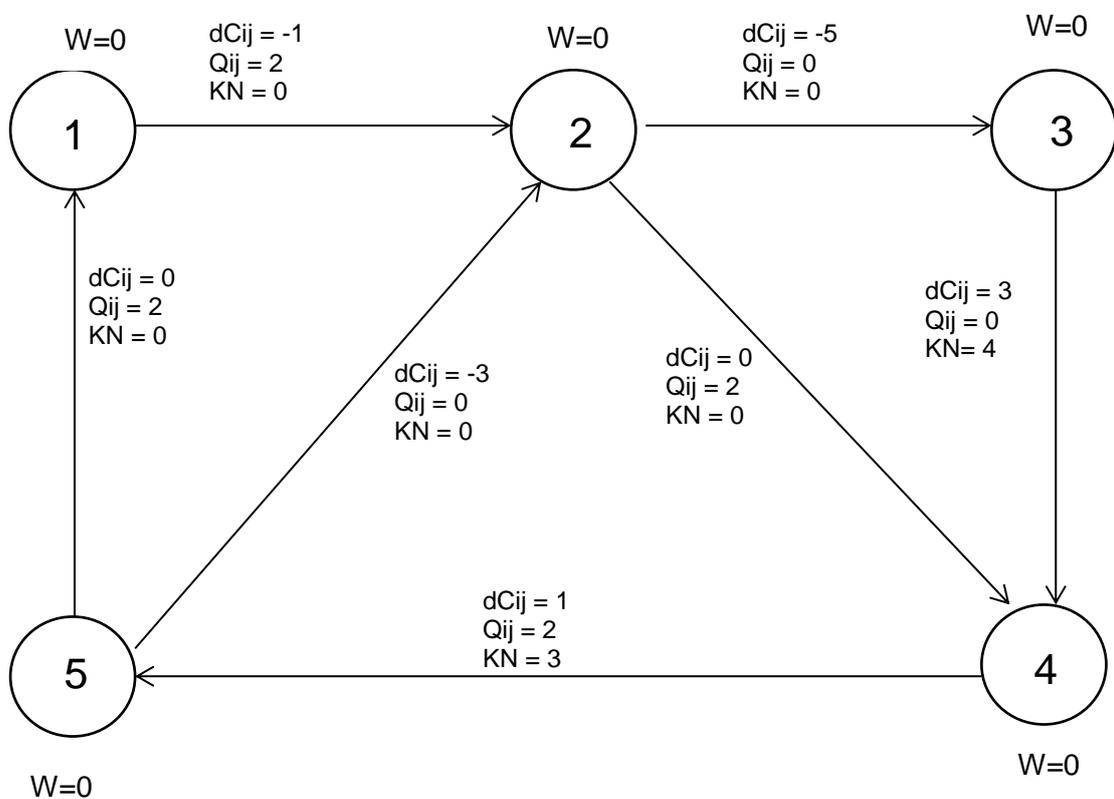


Figura A.4 :Rede de fluxo na fase primal (situação 2)

Na figura A.4 nota-se que os arcos (3, 4) e (4, 5) ainda estão Out-of-Kilter. Construiu-se então uma nova rede temporária representada pela figura A.5 onde os valores em cada arco referem-se à Δ (redução e/ou incremento) para o link ficar In-Kilter. Entretanto, a nova rede não fecha um circuito. Neste caso o próximo passo é a fase dual onde poderão ser alterados os valores de W_i .

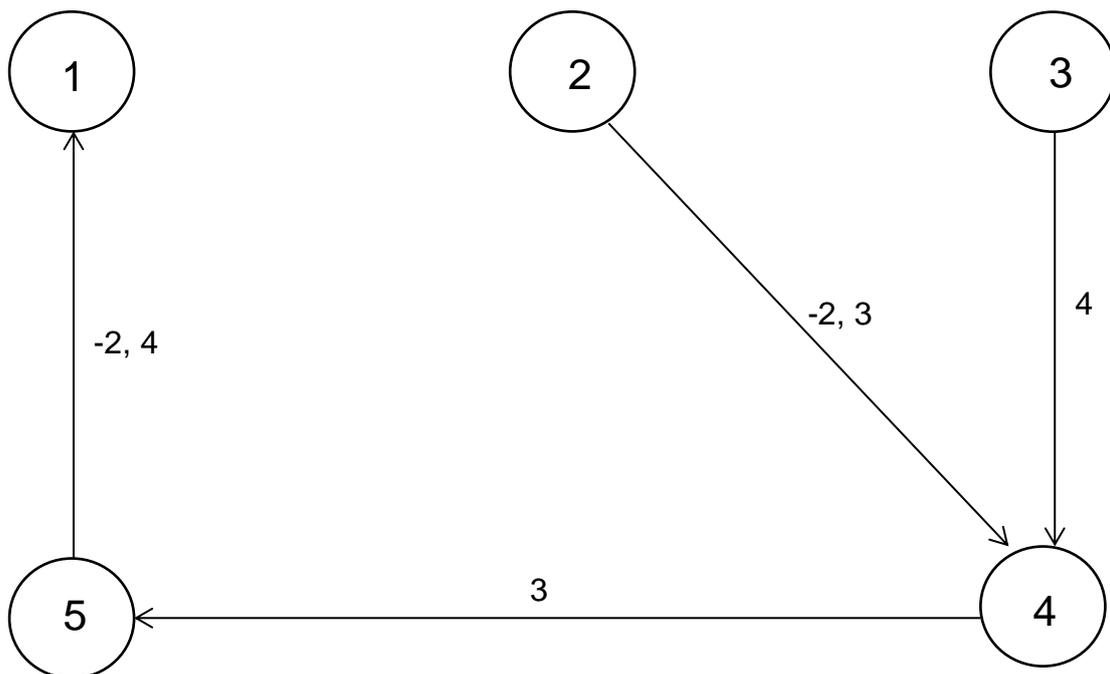


Figura A.5 - Rede de fluxo temporária na fase primal (situação 2)

Nesta rede adotou-se $(p, q) = (3, 4)$, obtendo-se os seguintes valores:

$$X = \{1, 2, 4, 5\} \text{ e } Y = \{3\}$$

$$S1 = \{(2, 3)\} \text{ e } S2 = \{(3, 4)\}$$

$$\theta = \text{Mínimo} \{|dC_{2,3}|, |dC_{3,4}|\} = \text{Mínimo} \{|-5|, |3|\} \therefore \theta = 3$$

Com o valor de $\theta = 3$ foram alterados os valores de W_i conforme equações eq.(A.19), eq.(A.20) e de dC_{ij} conforme equações eq.(A.21), eq.(A.22) e eq.(A.23) voltando-se à fase primal, da seguinte forma:

$$W1 = W1 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W1 = 3$$

$$W2 = W2 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W2 = 3$$

$$W3 = W3 \Rightarrow W3 = 0$$

$$W4 = W4 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W4 = 3$$

$$W5 = W5 + \theta = 0 + 3 \Rightarrow W5 = 3$$

$dC_{1,2} = dC_{1,2} = -1 \therefore dC_{1,2} < 0$ onde $Q_{1,2} = I_{1,2} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$
 $dC_{2,3} = dC_{2,3} + \theta = -5 + 3 = -2 \therefore dC_{2,3} < 0$ onde $Q_{2,3} = I_{2,3} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$
 $dC_{3,4} = dC_{3,4} - \theta = 3 - 3 = 0 \therefore dC_{3,4} = 0$ onde $Q_{3,4} = I_{3,4} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$
 $dC_{4,5} = dC_{4,5} = 1 \therefore dC_{4,5} > 0$; $Q_{4,5} = I_{4,5}$; $U_{4,5} = 5 \Rightarrow KN = |2 - 5| = 3 \Rightarrow OOK$
 $dC_{5,1} = dC_{5,1} = 0 \therefore dC_{5,1} = 0$ onde $I_{5,1} < Q_{5,1} < U_{5,1} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$
 $dC_{5,2} = dC_{5,2} = -3 \therefore dC_{5,2} < 0$ onde $Q_{5,2} = I_{5,2} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$
 $dC_{2,4} = dC_{2,4} = 0 \therefore dC_{2,4} = 0$ onde $Q_{2,4} = I_{2,4} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$

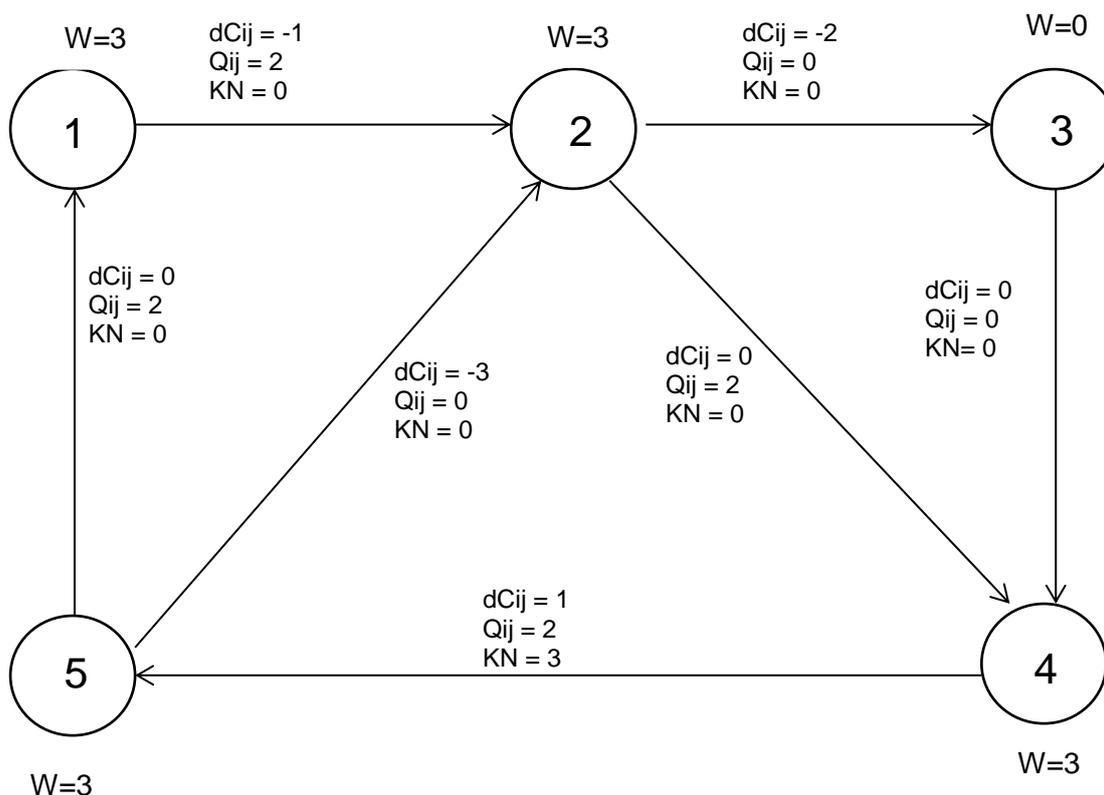


Figura A.6 :Rede de fluxo na fase primal (situação 3)

Os resultados estão representados na figura A.6. Nessa mesma figura A.6, entretanto, nota-se que o arco (4, 5) ainda está Fora-de-Kilter o que demanda a construção de uma nova redetemporária representada na figura A.7. Da figura A.7 nota-se que não é possível fechar um circuito, encerrando a fase primal iniciando a fase dual. Na rede temporária adotou-se $(p, q) = (4, 5)$ obtendo-se os seguintes valores:

$$X = \{1, 5\}; Y = \{2, 3, 4\}; S1 = \{(1, 2), (5, 2)\} \text{ e } S2 = \{(4, 5)\}$$

$$\theta = \text{Mínimo } \{|dC_{1,2}|, |dC_{5,2}|, |dC_{4,5}|\} = \text{Mínimo } \{|-1|, |-3|, |1|\} \therefore \theta = 1$$

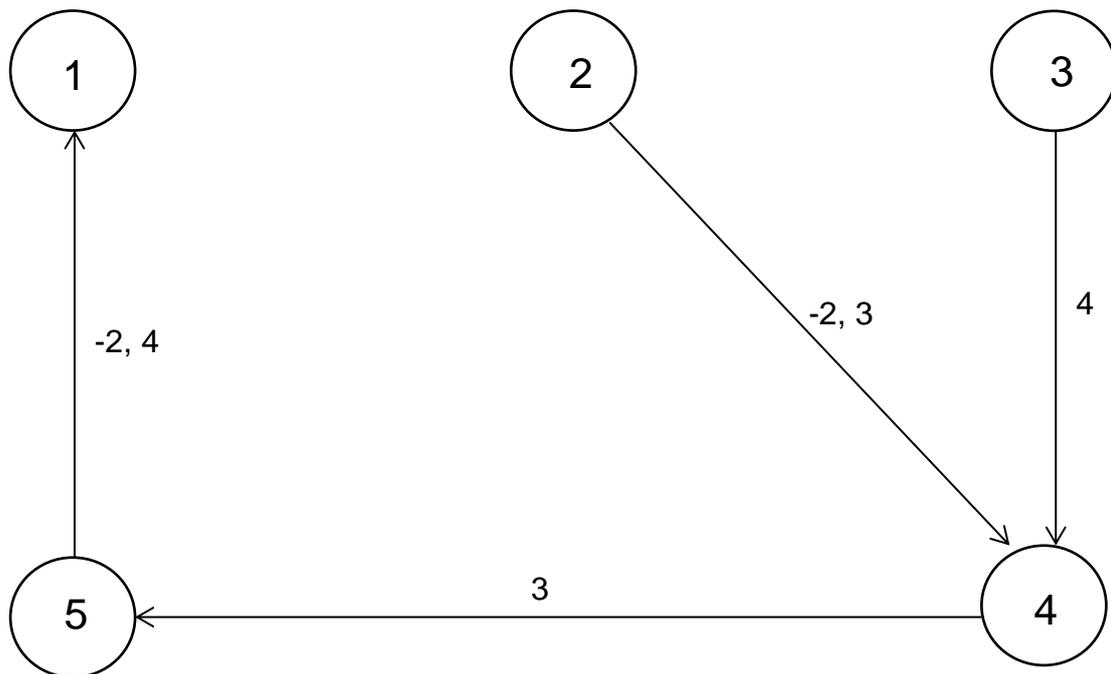


Figura A.7 :Rede de Fluxo temporária na fase primal (situação 3)

Com o valor de $\theta = 1$ foram novamente alterados os valores de W_i conforme equações eq.(A.19), eq.(A.20) e de dC_{ij} conforme equações eq.(A.21), eq.(A.22) e eq.(A.23) voltando-se à fase primal, a seguir descrito e cujo resultado das modificações e a nova rede da fase primal estão representados na figura A.8:

$$W1 = W1 + \theta = 3 + 1 \Rightarrow W1 = 4$$

$$W2 = W2 \Rightarrow W2 = 3$$

$$W3 = W3 \Rightarrow W3 = 0$$

$$W4 = W4 \Rightarrow W4 = 3$$

$$W5 = W5 + \theta = 3 + 1 \Rightarrow W5 = 4$$

$$dC_{1,2} = dC_{1,2} + \theta = -1 + 1 = 0 \therefore dC_{1,2} = 0 \text{ onde } Q_{1,2} = I_{1,2} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{2,3} = dC_{2,3} = -2 \therefore dC_{2,3} < 0 \text{ onde } Q_{2,3} = I_{2,3} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{3,4} = dC_{3,4} = 0 \therefore dC_{3,4} = 0 \text{ onde } Q_{3,4} = I_{3,4} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{4,5} = dC_{4,5} - \theta = 1 - 1 = 0 \therefore dC_{4,5} = 0 \text{ onde } Q_{4,5} = I_{4,5} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{5,1} = dC_{5,1} = 0 \therefore dC_{5,1} = 0 \text{ onde } I_{5,1} < Q_{5,1} < U_{5,1} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{5,2} = dC_{5,2} + \theta = -3 + 1 = -2 \therefore dC_{5,2} < 0 \text{ onde } Q_{5,2} = I_{5,2} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$$

$$dC_{2,4} = dC_{2,4} = 0 \therefore dC_{2,4} = 0 \text{ onde } I_{2,4} < Q_{2,4} < U_{2,4} \Rightarrow KN = 0 \Rightarrow IK$$

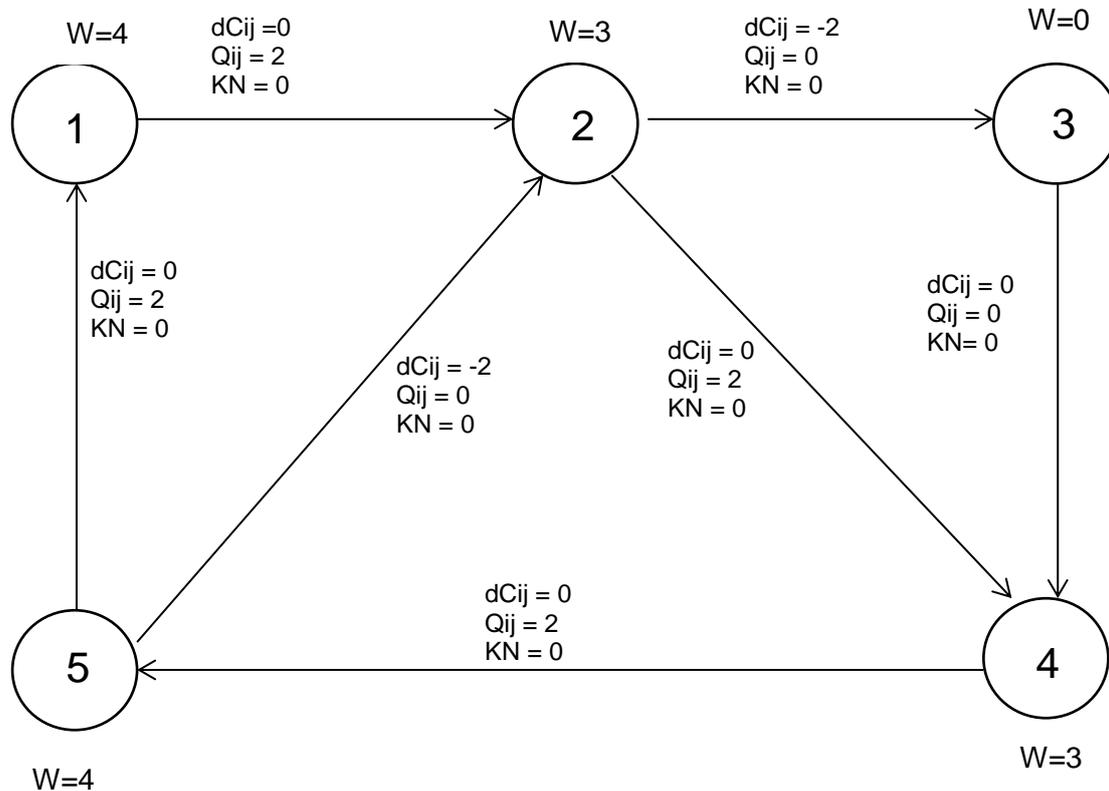


Figura A.8 :Rede de fluxo na fase primal (situação 4 final com solução ótima obtida)

Na rede apresentada na figura A.8 nota-se que todos os arcos estão Em-Kilter, concluindo-se que uma solução ótima foi encontrada e o algoritmo foi encerrado, isto é, os valores de Q_{ij} ótimos foram definidos.