

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**UM MODELO DE SIMULAÇÃO, VIA PROGRAMAÇÃO LINEAR  
SEQUENCIAL, PARA SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ALLAN SARMENTO VIEIRA**

**CAMPINA GRANDE-PB  
FEVEREIRO DE 2007**

ALLAN SARMENTO VIEIRA

**UM MODELO DE SIMULAÇÃO, VIA PROGRAMAÇÃO LINEAR SEQUENCIAL, PARA SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, na área de Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS**

**ORIENTADORES:** ROSIRES CATÃO CURI

WILSON FADLO CURI

**CAMPINA GRANDE-PB  
FEVEREIRO DE 2007**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

V658m    Vieira, Allan Sarmento  
2007        Um modelo de simulação, via programação linear seqüencial, para sistema de recursos hídricos / Allan Sarmento Vieira. — Campina Grande, 2007.  
              101f. il.

              Inclui bibliografia.  
              Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.  
              Orientadores: Rosires Catão Curi e Wilson Fadlo Curi.

1— Recursos Hídricos 2— Simulação 3— Programação Linear 4 — Linearização  
I— Título

CDU 556.18

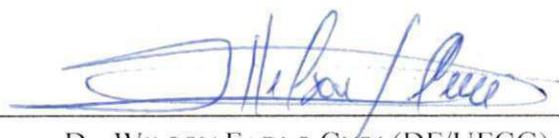
ALLAN SARMENTO VIEIRA

UM MODELO DE SIMULAÇÃO, VIA PROGRAMAÇÃO LINEAR SEQUENCIAL, PARA SISTEMA DE  
RECURSOS HÍDRICOS

APROVADA EM 26 de fevereiro de 2007



Dra. ROSIRES CATÃO CURI (UAEC/UFCG)  
ORIENTADORA



Dr. WILSON FADLO CURI (DF/UFCG)  
ORIENTADOR



Dr. Arthur Mattos (UFRN)  
EXAMINADOR EXTERNO



Dr. Alcigeimes Batista Celeste (UFCG)  
EXAMINADOR INTERNO

CAMPINA GRANDE-PB  
FEVEREIRO DE 2007

## DEDICATÓRIA

Em especial meus pais, aos professores Wilson e Rosires e a todos os amigos que contribuíram de alguma forma, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço ao senhor Deus, por me dar à vida, saúde e oportunidades de guiar os meus passos, e cada vitória alcançada em minha vida.

A minha mãe e meu pai, meus irmãos, pelo carinho, apoio e incentivo em mais uma etapa da minha vida.

Aos professores Rosires Catão Curi e Wilson Fadlo Curi, pela sábia orientação e disposição em colaborar durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da Área de Recursos Hídricos, pelo conhecimento e atenção que recebi e pelos novos conhecimentos adquiridos.

Aos meus amigos de turma, Valterlin, Mosefran, Graciele, Marcos Jr., Gustavo, Julio.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, Ismael, Haroldo, Vera, Aurezinha, Raul, Valdomiro, Ronaldo e Lindimar.

A Josete, secretária da coordenação do curso, pelo apoio na parte administrativa.

Aos meus grandes amigos, Mosefran e Valterlin pela amizade e apoio que sempre recebi deles.

Ao professor Doutor Arthur Mattos e ao pesquisador Doutor Alcigeimes Batista Celeste por aceitarem o convite de participar da banca de minha defesa.

A CTHIDRO / CNPq, pelo suporte financeiro durante a vigência do curso.

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

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 4.1</b> – Duração e volumes de déficit em período de falhas.....	17
<b>Figura 5.1</b> – Fluxograma de funcionamento do modelo de simulação.....	21
<b>Figura 5.2</b> – Componentes para representação de um determinado sistema.....	22
<b>Figura 5.3</b> – Representação física do balanço de massa em um reservatório $i$ .....	30
<b>Figura 5.4</b> – Representação física do balanço de massa em reservatórios em série.....	31
<b>Figura 5.5</b> – Linearização da curva área x volume de um determinado reservatório $i$ .....	32
<b>Figura 5.6</b> – Linearização da curva área x volume de um reservatório $i$ ponto a ponto.....	33
<b>Figura 5.7</b> – Linearização da curva descarga x volume armazenado no reservatório $i$ .....	36
<b>Figura 5.8</b> – Linearização da curva descarga x volume armazenado ponto a ponto.....	37
<b>Figura 5.9</b> – Esquema do volume meta $S_{meta_i}$ e o volume $SM_i^-(t)$ em um reservatório $i$ .....	39
<b>Figura 5.10</b> – Esquema do volume meta $S_{meta_i}$ e o volume $SM_i^+(t)$ em um reservatório $i$ ....	39
<b>Figura 5.11</b> – Esquema do volume meta $S_{min_i}$ e o volume $SC_i^-(t)$ em um reservatório $i$ .....	40
<b>Figura 5.12</b> – Esquema do volume meta $S_{min_i}$ e o volume $SC_i^+(t)$ em um reservatório $i$ .....	41
<b>Figura 5.13</b> – representação física do nó de passagem $n_c$ .....	42
<b>Figura 5.14</b> – representação física do nó de passagem $n_{cs}$ .....	43
<b>Figura 5.15</b> – Representação física do nó de passagem $n_{ct}$ .....	44
<b>Figura 6.1</b> – Localização da Bacia do Rio Piancó – PB.....	52
<b>Figura 6.2</b> – Layout do sistema com as possíveis variáveis de decisão do modelo.....	53
<b>Figura 7.1</b> – Comportamento do volume armazenado do açude Catolé II no cenário 01.....	65
<b>Figura 7.2</b> – Comportamento do volume vertido do reservatório Catolé II, no cenário 01.....	65
<b>Figuras 7.3</b> – Retiradas pela descarga de fundo no açude Catolé II no cenário 01.....	66
<b>Figuras 7.4</b> – Retiradas para o abastecimento no açude Catolé II no cenário 01.....	66
<b>Figuras 7.5</b> – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Catolé II no cenário 01.	67
<b>Figuras 7.6</b> – Retiradas para irrigação de culturas sazonais no açude Catolé II no cenário 01.....	67

<b>Figura 7.7</b> – Comportamento do volume armazenado do açude Poço Redondo no cenário 01.....	69
<b>Figura 7.8</b> – Comportamento do volume vertido do reservatório Poço Redondo, no cenário 01.....	69
<b>Figura 7.9</b> – Retiradas pela descarga de fundo no açude Poço Redondo no cenário 01.....	70
<b>Figura 7.10</b> – Retiradas para o abastecimento no açude Poço Redondo no cenário 01.....	70
<b>Figura 7.11</b> – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Poço Redondo no cenário 01.....	71
<b>Figura 7.12</b> – Retiradas para irrigação de culturas sazonais no açude Poço Redondo no cenário 01.....	71
<b>Figura 7.13</b> – Comportamento do volume armazenado do açude Catolé II no cenário 02.....	73
<b>Figura 7.14</b> – Comportamento do volume vertido do reservatório Catolé II, no cenário 02....	73
<b>Figura 7.15</b> – Retiradas d’água pela descarga de fundo no açude Catolé II no cenário 02.....	74
<b>Figura 7.16</b> – Retiradas d’água para o abastecimento no açude Catolé II no cenário 02.....	74
<b>Figura 7.17</b> – Retiradas d’água para irrigação de culturas perenes no açude Catolé II no cenário 02.....	75
<b>Figura 7.18</b> – Retiradas d’água para irrigação de culturas sazonais no açude Catolé II no cenário 02.....	75
<b>Figura 7.19</b> – Comportamento do volume armazenado do açude Poço Redondo no cenário 02.....	77
<b>Figura 7.20</b> – Comportamento do volume vertido do açude Poço Redondo, no cenário 02....	77
<b>Figuras 7.21</b> – Retiradas pela descarga de fundo no açude Poço Redondo no cenário 02.....	78
<b>Figura 7.22</b> – Retiradas para o abastecimento no açude Poço Redondo no cenário 02.....	78
<b>Figura 7.23</b> – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Poço Redondo no cenário 02.....	79
<b>Figura 7.24</b> – Retiradas para irrigação de culturas sazonais no açude Poço Redondo no cenário 02.....	79
<b>Figura 7.25</b> – Comportamento do volume armazenado do açude Catolé II no cenário 03.....	81
<b>Figura 7.26</b> – Comportamento do volume vertido do reservatório Catolé II, no cenário 03....	81
<b>Figura 7.27</b> – Retiradas pela descarga de fundo no açude Catolé II no cenário 03.....	82

<b>Figura 7.28</b> – Retiradas para o abastecimento no açude Catolé II no cenário 03.....	82
<b>Figura 7.29</b> – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Catolé II no cenário 03.	83
<b>Figura 7.30</b> – Retiradas para irrigação de culturas sazonais no açude Catolé II no cenário 03.....	83
<b>Figura 7.31</b> – Comportamento do volume armazenado do açude Poço Redondo no cenário 03.....	84
<b>Figura 7.32</b> – Comportamento do volume vertido do açude Poço Redondo, no cenário 03.....	85
<b>Figuras 7.33</b> – Retiradas pela descarga de fundo no açude Poço Redondo no cenário 03.....	85
<b>Figura 7.34</b> – Retiradas para o abastecimento no açude Poço Redondo no cenário 03.....	86
<b>Figura 7.35</b> – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Poço Redondo no cenário 03.....	86
<b>Figura 7.36</b> – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Poço Redondo no cenário 03.....	87

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 5.1</b> – Elementos de entrada considerados no modelo.....	20
<b>Tabela 6.1</b> – Resumo das Classes de capacidade de uso do solo na bacia.....	50
<b>Tabela 6.2</b> – Resumo das Classes de uso do solo na bacia.....	50
<b>Tabela 6.3</b> – Valores das prioridades para cada variável de decisão.....	55
<b>Tabela 6.4</b> – Dados de evaporação média mensal do Tanque classe A.....	56
<b>Tabela 6.5</b> – Distribuição dos coeficientes de cultivos (kc) e plano de cultivo das culturas no ano hidrológico.....	57
<b>Tabela 6.6</b> – Dados do sistema de irrigação aplicado às culturas.....	57
<b>Tabela 6.7</b> – Dados de cota x área x volume dos reservatórios.....	58
<b>Tabela 6.8</b> – Dados dos volumes máximos e mínimos dos reservatórios.....	59
<b>Tabela 6.9</b> – Dados dos volumes iniciais e metas dos reservatórios.....	59
<b>Tabela 6.10</b> – Dados das características físicas dos descarregadores de fundo dos reservatórios.....	60
<b>Tabela 6.11</b> – Dados das características físicas dos vertedouros dos reservatórios.....	60
<b>Tabela 6.12</b> – Limites máximos dos intervalos das vazões residuais do sistema em estudo....	61
<b>Tabela 6.13</b> – Cenário 01 com os dados de demandas máximas e área máxima irrigável para o ano de 2007.....	61
<b>Tabela 6.14</b> – Cenário 02 com os dados de demandas máximas e área máxima irrigável para o ano de 2013.....	62
<b>Tabela 6.15</b> – Cenário 03 com os dados de demandas máximas para os diferentes setores.....	62
<b>Tabela 6.16</b> – Cenário 03 com os dados de áreas ótimas.....	63
<b>Tabela 7.1</b> – Indicadores de desempenho das demandas no açude Catolé II no cenário 01.....	68
<b>Tabela 7.2</b> – Indicadores de desempenho das demandas no açude Poço Redondo no cenário 01.....	72
<b>Tabela 7.3</b> – Indicadores de desempenho das demandas no açude Catolé II no cenário 02.....	76
<b>Tabela 7.4</b> – Indicadores de desempenho das demandas no açude Poço Redondo no cenário 02.....	80
<b>Tabela 7.5</b> – Indicadores de desempenho das demandas no açude Catolé II no cenário 03.....	84

<b>Tabela 7.6</b> – Indicadores de desempenho das demandas no açude Poço Redondo no cenário 03.....	87
---	----

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XII</b>
<b>ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
Introdução .....	1
<b>CAPÍTULO II</b>	
Objetivos	
2.1 Geral.....	4
2.1 Específicos .....	4
<b>CAPÍTULO III</b>	
Justificativas.....	6
<b>CAPÍTULO IV</b>	
Revisão da literatura	
4.1 Simulação.....	9
4.2 Otimização .....	10
4.2.1 Programação Linear .....	11
4.2.2 Programação Não-Linear .....	13
4.2.2 Programação Dinâmica.....	13
4.3 Métodos combinados de simulação e otimização .....	13
4.3 Indicadores de desempenho do sistema .....	16
<b>CAPÍTULO V</b>	
Metodologia	
5.1 Aspectos matemático do modelo	
5.1.1 Níveis de prioridades .....	22
5.1.2 Demandas máximas fixas e variáveis	
5.1.2.1 Abastecimento humano.....	22
5.1.2.2 Irrigação .....	23
5.1.2.3 Indústria .....	26

5.1.2.4 Vazão ecológica .....	26
5.1.2.5 À jusante dos reservatórios .....	26
5.1.2.6 Piscicultura, lazer e energia elétrica.....	26
5.1.3 Características hidro-climáticas .....	26
5.1.4 Função Objetivo .....	27
5.1.5 Dos reservatórios e seus componentes.....	29
5.1.6 Outros componentes do sistema.....	41
5.1.7 Cálculo dos indicadores de desempenho do sistema.....	45
5.1.8 Análise de convergência do modelo de simulação .....	45

## CAPÍTULO VI

### Estudo de caso

6.1 Bacia Hidrográfica do Rio Piancó	
6.1.1 Localização .....	47
6.1.2 Vegetação.....	48
6.1.3 Climatologia.....	48
6.1.4 Pedologia.....	49
6.1.5 Capacidade de uso do solo .....	49
6.1.6 Relevo .....	50
6.1.7 Hidrologia	
6.1.3.1 Superficial .....	51
6.1.3.2 Subterrânea.....	51
6.1.8 Qualidade de água.....	51
6.2 Descrição do subsistema onde foi aplicado o modelo de simulação	
6.2.1 Reservatório Catolé II .....	53
6.2.2 Reservatório Poço Redondo.....	54
6.3 Dados de entrada do subsistema para o modelo de simulação	
6.3.1 Período de simulação .....	54
6.3.2 Prioridades .....	54
6.3.3 Precipitação.....	55
6.3.4 Vazões afluentes aos reservatórios.....	55
6.3.5 Evaporação nos reservatórios.....	56
6.3.6 Abastecimento humano e a pecuária.....	56
6.3.7 Irrigação .....	56
6.3.8 Reservatórios	
6.3.8.1 Relação área x volume .....	58

6.3.8.2 Volumes máximos e mínimo .....	59
6.3.8.3 Volumes iniciais e metas.....	59
6.3.8.4 Descarregadores e vertedouros .....	59
6.3.9 Vazões residuais máximas .....	60
6.4 Definições dos cenários .....	61
<b>CAPÍTULO VII</b>	
Resultados e discussões	
7.1 Cenário 01	
7.1.1 Reservatório Catolé II .....	64
7.1.2 Reservatório Poço Redondo .....	68
7.1.3 Integração dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo .....	72
7.2 Cenário 02	
7.2.1 Reservatório Catolé II .....	72
7.2.2 Reservatório Poço Redondo .....	76
7.2.3 Integração dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo .....	80
7.3 Cenário 03	
7.3.1 Reservatório Catolé II .....	80
7.3.2 Reservatório Poço Redondo .....	84
7.3.3 Integração dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo .....	87
7.4 Convergência do modelo de simulação .....	88
<b>CAPÍTULO VIII</b>	
Conclusões e recomendações	
8.1 Conclusões .....	89
8.2 Recomendações.....	92
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>98</b>

## RESUMO

Neste trabalho, procurou-se desenvolver um modelo de simulação, baseado na aplicação da programação linear seqüencial a cada mês, com o objetivo de promover uma política ótima de operação integrada de reservatórios com vistas a maximizar o atendimento das demandas hídricas dos diferentes usos, segundo critérios de prioridade. As limitações operacionais foram incluídas no modelo através de restrições lineares (balanço hídrico nos nós, volumes metas, volumes mínimos, capacidade dos componentes, etc.) e não-lineares (vazão vertida máxima, vazão descarregada máxima, área da superfície líquida do reservatório, etc.). As não-linearidades foram aproximadas por segmentos lineares e resolvidas num processo iterativo (programação linear seqüencial) até a convergência de uma tolerância desejada para o erro relativo da função objetivo. A demanda hídrica para a agricultura irrigada foi obtida a partir do balanço hídrico no solo. Para avaliar o desempenho do sistema, foi incluído, no modelo, o cálculo de indicadores de desempenho como a confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência.

Visando avaliar o desempenho do modelo proposto foi feita uma análise do comportamento do sistema de reservatórios Catolé II e Poço Redondo, pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Piancó - PB, e suas demandas hídricas de abastecimento humano, irrigação, volumes meta e vazões ecológicas. Foram criados três cenários distintos de demandas para abastecimento e irrigação, mantendo-se os parâmetros hidro-climáticos e operacionais do sistema. A simulação foi realizada para um período de 684 meses. Os resultados obtidos mostraram que as restrições impostas à operação do sistema foram satisfeitas e os índices de desempenho associados ao atendimento das demandas hídricas para os diversos usos foram considerados satisfatórios. A convergência numérica e o tempo computacional foram, também, considerados satisfatórios.

## ABSTRACT

This work is concerned with the development of a simulation model, based on sequential linear programming, which is applied at each monthly time step, to generate optimal operation policies to an integrated system of reservoirs regarding the maximization of different water users' requirements, according to predefined priorities. Operational restrictions were included in the model through mathematical linear (node water balance, target and minimum reservoir storage volumes, hydraulic components capacities, etc.) and nonlinear (spills, maximum reservoir release, reservoir water area, etc.) constraints. Nonlinearities were approximated by linear segments and the results were achieved in an iterative way (sequential linear programming) until desired convergence for the objective function relative error was achieved. Irrigation water demand was obtained from water balance at soil. Performance indexes, such as reliability, resiliency and vulnerability, were included in the model to evaluate the system results performance.

A study of the Catolé II and Poço Redondo reservoirs system, located at the Piancó river basin, and their water demands for human supply, irrigation, target reservoir storage volume and ecological flow was carried out to analyze the performance of the system and the developed model. Three water requirement scenarios for human supply and irrigation, while keeping operational and hydro-climatic parameters constants, were simulated. The simulation time span was 684 months. The obtained results have sh

## **ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho está desenvolvido em oitos capítulos, a saber:

**CAPÍTULO I:** Introdução

**CAPÍTULO II:** Objetivos

**CAPÍTULO III:** Justificativa

**CAPÍTULO IV:** Revisão da literatura

**CAPÍTULO V:** Metodologia

**CAPÍTULO VI:** Estudo de Caso

**CAPÍTULO VII:** Resultados e discussões

**CAPÍTULO VIII:** Conclusão e recomendações

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ANEXOS**

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais importante à vida na terra. Ela, em grandes proporções, pode causar enchentes e destruição, e, em sua escassez, provocar fome e miséria, sendo necessário fazer uso de práticas racionais que visem à minimização destes impactos.

Essas práticas devem estar associadas a idéias sustentáveis, que devem compatibilizar, no espaço e no tempo, o crescimento econômico com a conservação do meio ambiente e a equidade social.

Desde o período colonial, alguns associam a idéia de escassez de água na região semi-árida como sinônimo de baixa produtividade. Entretanto, não faltam exemplos no mundo para demonstrar que a realidade é outra: o que está faltando é a utilização de técnicas adequadas, com políticas que conduzam ao processo de desenvolvimento sustentável.

Os Estados Unidos da América, por exemplo, onde os contrastes físico-climáticos são relativamente muito mais pronunciados do que os nossos e a extensão de terras áridas e semi-áridas são da ordem de 2.615 mil km<sup>2</sup>, possuem um potencial médio *per capita* de água de 9.940 m<sup>3</sup>/ano, enquanto o consumo total médio é em torno de 2.162 m<sup>3</sup>/hab./ano, ou seja, cerca de 22% do valor disponível. Vale ressaltar que o consumo da agricultura, basicamente irrigação no contexto semi-árido, representa 42% do total médio. Contudo, a eficiência no uso da água disponível e a grande produtividade da sua agricultura, fazem dos Estados Unidos da

O processo de desenvolvimento econômico no mundo torna necessária a busca pela água em quantidade e qualidade cada vez maior. Nestas condições, a avaliação do problema da água não pode mais se restringir a um simples balanço, entre a oferta e a demanda.

Na busca de solucionar os complexos problemas no uso dos recursos hídricos, lança-se mão de técnicas e ferramentas capazes de auxiliar no processo de análise, operação, planejamento e tomada de decisão em sistemas de recursos hídricos. Análises são comumente realizadas através de complexas metodologias matemáticas e computacionais, incluindo técnicas de simulação e otimização. Atualmente, já não é mais tão aceitável a utilização, apenas, de um modelo de simulação ou de um modelo clássico de otimização com apenas um objetivo como, por exemplo, a maximização da eficiência econômica. Seguindo as novas tendências no tratamento dos problemas de recursos hídricos, torna-se necessária à realização de uma subdivisão de objetivos mais genéricos em atributos que possam, de alguma forma, ser quantificados, permitindo a consideração de aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais e outros. Os modelos que contemplam este tipo de análise são denominados de modelos multi-objetivos, ou seja, procuram uma solução de compromisso que otimizem, simultaneamente, vários objetivos na tomada de decisão sobre os recursos hídricos. Essas práticas estão, geralmente, associadas ao desenvolvimento sustentável, no qual esse processo procura compatibilizar, no espaço e no tempo, o crescimento econômico, com a conservação do meio ambiente, a qualidade de vida e a equidade social (Yeh, 1985; Simonovic, 1992; Wurbs, 1993-2005).

Os Sistemas de apoio à Decisão, além de proverem uma integração de modelos matemáticos, devem armazenar um grande número de dados e executar rotinas apropriadas de interpretação (processam os dados de entrada), simulação e otimização (descrevem o comportamento físico e operacional do sistema), além de apresentação dos resultados em formato fácil de ser interpretado (Braga et al., 1998). Entretanto, as principais limitações desse tipo de modelo estão na discretização de processos contínuos e na dificuldade de representação matemática de alguns fenômenos físicos que sejam computacionalmente eficientes (tempo de execução e precisão dos resultados). Um dos motivos está no fato que dificilmente algum processo físico pode ser completamente observado e os dados que geram seu modelo matemático certamente envolverão alguns elementos de incerteza, portanto, nenhuma expressão matemática poderá representá-lo com precisão. Por outro lado, ao fazer uso de uma representação matemática mais complexa para descrever um fenômeno, o risco de não representar bem o sistema é minimizado, mas aumenta-se a dificuldade para obter uma solução (aumento dos requerimentos computacionais como memória, devido ao aumento do

requerimento de dados, e a velocidade de processamento, devido ao aumento da quantidade de cálculos numéricos envolvidos em, por exemplo, processos de discretizações e convergência de processos iterativos). Tais fatores podem levar a exceder as disponibilidades de recursos humanos, financeiros e de tempo (Overton e Meadows, 1976).

De modo geral, pode-se dizer que modelos de simulação são mais apropriados para análise da performance de alternativas operacionais de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança. Apesar de não gerarem diretamente uma solução ótima, podem revelar uma solução pelo menos próxima da ótima, quando políticas alternativas são geradas por meio de numerosas rodadas do modelo. Os modelos de otimização aplicam-se aos casos em que interessa saber a alternativa operacional ótima do sistema e são aplicados, preferencialmente, para um pequeno intervalo de tempo (depende do número de equações necessárias para descrever cada estado e da discretização temporal utilizada). Estes modelos utilizam algoritmos para selecionar, sistematicamente, soluções ótimas, procurando satisfazer uma função objetivo e restrições operacionais.

Apesar de se reconhecer que simulação, otimização e métodos associados são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de bases quantitativas para a tomada de decisão, ainda existe uma lacuna entre a pesquisa e a aplicação dessas teorias na prática. Isto se deve às características complexas, dinâmicas e multidisciplinares dos problemas de recursos hídricos e a necessidade de se representar o sistema real em um formato matemático apropriado para as técnicas de otimização (Simonovic, 1992).

Dentro deste contexto, foi desenvolvido um modelo de simulação integrado, aplicando técnicas de otimização a cada período de tempo, destinado a simular o uso da água entre os diferentes setores em um sistema hídrico. Tem-se, como meta, o planejamento e o gerenciamento integrado dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica com vistas à redução de riscos de desabastecimento e, conseqüentemente, a busca da sustentabilidade e a minimização de conflitos.

## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS

#### 2.1 – Geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um modelo de simulação, baseado em programação linear seqüencial e prover um estudo da operação integrada de um sistema hídrico constituído por dois reservatórios, na bacia do rio Piencó, a fim de atender as suas demandas para abastecimento humano, irrigação, volumes meta e vazão ecológica. A função objetivo é baseada em critérios de prioridade de atendimento e as restrições envolvem a satisfação de requerimentos relacionados às limitações físicas e operacionais do sistema. Buscar-se-á identificar e quantificar as disponibilidades hídricas superficiais e os principais usos dos recursos hídricos do sistema, compatibilizar as demandas hídricas de montante e de jusante do sistema entre si e com as disponibilidades hídricas e analisar os indicadores de sustentabilidade do sistema.

#### 2.2 – Específicos

Dentre os objetivos específicos, os seguintes podem ser relacionados:

- Desenvolver um modelo de simulação, baseado em programação linear seqüencial, para alocar, de forma ótima, a disponibilidade hídrica entre as demandas;
- Incluir linearizações das não linearidades inerentes ao sistema, a serem satisfeitas num processo iterativo, a fim de melhor representar o comportamento físico dos componentes;
- O modelo deve contemplar os múltiplos usos (volumes-meta, abastecimento humano, agricultura irrigada e vazão ecológica);
- Incorporar no modelo, a determinação dos requerimentos hídricos para agricultura irrigada, através de um modelo simplificado de balanço hídrico aplicado a nível do solo;
- Contemplar a equidade entre usuários via critérios de prioridade de atendimento na função objetivo do modelo;

- Incluir aspectos multi-objetivos no modelo, tais como as prioridades de atendimento, volumes metas e vazões;
- Identificar as intervenções hídricas no sistema e avaliar suas disponibilidades hídricas;
- Definir prioridades de atendimento que promovam o desenvolvimento sócio-econômico da região e contemple a eficiência do uso da água, principalmente em períodos secos;
- Definir cenários de demandas atuais e crescentes para os diferentes usos;
- Avaliar as respostas hídricas em todos os componentes do sistema, para cada cenário definido;
- Calcular os indicadores de desempenho como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, para cada uso nos reservatórios do sistema, a partir dos cenários de demandas estabelecidos;
- Analisar os riscos de não atendimento às demandas.

## CAPÍTULO III

### JUSTIFICATIVA

A Paraíba tem cerca de 90% do seu território situado na região semi-árida do Nordeste, sobre base eminentemente cristalina, com grande variabilidade temporal e espacial das chuvas, variando entre 300 mm anuais na região do Cariri a 1.600 mm na região litorânea do Estado. Essa diversidade hidro-climática traz sérios problemas relacionados com a questão do gerenciamento das suas disponibilidades para atendimento das demandas das diversas microrregiões do Estado.

A bacia hidrográfica do Rio Piancó está situada no Sertão paraibano, região semi-árida do estado, e é uma das bacias de maior conflito de uso das águas. Nela está inserida a maior reserva hídrica estadual formada por dois reservatórios interligados: Sistema Coremas - Mãe d'Água, com capacidade para acumular 1,4 bilhões de metros cúbicos. Este sistema é formado por dois segmentos: 1- o sistema de reservatórios Coremas - Mãe d'Água, sistema doador de água, formado por 24 reservatórios de montante distribuídos em três grandes tributários; (Piancó, Emas e Aguiar); e 2- trecho formado pelos rios Piancó e Piranhas perenizado pelo sistema Coremas – Mãe d'Água, compreendendo a extensão a jusante dos reservatórios até a divisa entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Este sistema atende a diversos usos, dentre eles: geração de energia; perenização do Rio Piancó, por onde escoam 3,4 m<sup>3</sup>/s, para abastecer algumas demandas do estado do Rio Grande do Norte; previsão de 4 m<sup>3</sup>/s para o perímetro irrigado das Várzeas de Sousa, através do Canal da Redenção, além do sistema adutor de Coremas/Sabugi, que atenderá o abastecimento de 17 municípios, alguns perímetros de irrigação e piscicultura. Os principais projetos públicos de irrigação na bacia do Rio Piancó, além daqueles nas várzeas de Sousa, são: Piancó I (543 ha), Piancó II (1.000ha), Piancó III (1.000 ha); Piancó (Cooperar - 285 ha), Poço Redondo (500 ha), Brusco (500 ha), Cachoeira dos Cegos (758 ha), Jenipapeiro (1.062 ha), Gravatá (943 ha), Juru (Cooperar - 230 ha) e Juru (FNE/BNB - 200 ha). Alguns desses projetos não foram implantados como, por exemplo, o perímetro de Poço Redondo e aqueles que foram encontram-se com apenas uma pequena área efetivamente implantada. Neste trabalho, não foram considerados todos os projetos de irrigação, só aqueles pertencentes ao subsistema de reservatórios Catolé II e Poço Redondo.

O planejamento do uso da água e gerenciamento desse sistema é bastante complexo, principalmente nos dias atuais, quando a disponibilidade hídrica não atende integralmente as

demandas, provocando um aumento nos conflitos de uso. Os reservatórios a montante do sistema Coremas-Mãe d'Água foram construídos com a finalidade principal de atender as demandas de perímetros de irrigação, ou seja, não estavam comprometidos com o abastecimento urbano. Ao longo do tempo, como esses perímetros não foram totalmente implantados, outros usos foram sendo incorporados, principalmente demandas de abastecimento humano. Com isso, aumentaram-se os riscos de não atendimento das demandas de irrigação para as áreas de projeto em razão do aumento e priorização do uso para o abastecimento. Outra questão relacionada à gestão dos recursos hídricos dos reservatórios de montante diz respeito aos perímetros irrigados de jusante, alimentados diretamente pelo rio Piancó, cerca de 2.500 ha, que dependem da liberação de água dos reservatórios situados a montante. Foram investidos, pelo Estado, cerca de 10 milhões de Reais na implantação do perímetro Piancó II e 17 milhões de Reais no perímetro Piancó III. O uso da água dos reservatórios para suprimento das demandas desses perímetros tem sido alvo de constantes conflitos entre os irrigantes e a população abastecida pelos reservatórios, que temem colapsos hídricos nos mesmos causados pelo atendimento das demandas de irrigação. Ressalta-se ainda que alguns reservatórios com finalidades de irrigação, tais como Garra e Canoas, não estão concluídos e que suas conclusões interferirão nas disponibilidades hídricas do sistema Coremas - Mãe d'Água e, conseqüentemente, no atendimento das demandas de jusante.

A zona de maior conflito desse sistema, atualmente, está situada a jusante do sistema Coremas- Mãe d'Água, pois a vazão fornecida pelos reservatórios deverá suprir as demandas de abastecimento de municípios (com captação direta no rio e pela adutora Coremas/Sabugi), irrigação pontual e de perímetro irrigado (no caso, Várzeas de Souza com 5000 ha, onde foram investidos cerca de 51,5 milhões de Reais, incluída a construção de 37 km do Canal da Redenção, responsável pela adução da vazão máxima de 4,0 m<sup>3</sup>/s), piscicultura e a demanda requerida pelo estado do Rio Grande do Norte. Esta última é alvo de constante negociação entre os dois estados vizinhos visto que o estado do Rio Grande do Norte constantemente tem reclamado, através do seu órgão gestor, a regularização da vazão (atualmente em torno de 1,5 m<sup>3</sup>/s, estabelecido pelo Marco Regulatório obtido após um acordo que envolveu a Agência Nacional de Águas - ANA, o Departamento Nacional de Obras contra as Secas - DNOCS, e os órgãos gestores dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte) que é liberada para o referido estado.

Portanto, torna-se evidente a importância da realização de estudos relativos às disponibilidades hídricas e das demandas nos reservatórios localizados a montante do sistema Coremas - Mãe d'Água, que diretamente afetarão a sua disponibilidade hídrica e,

conseqüentemente, seus usos. Por isso, neste estudo, optou-se por fazer uma análise do sistema de reservatórios Catolé II e Poço Redondo e de suas demandas hídricas oriundas de usos como abastecimento humano, agricultura irrigada, vazão ecológica e volumes meta.

## CAPÍTULO IV

### REVISÃO DA LITERATURA

A simulação tem como principal característica a flexibilidade, sendo esta considerada uma das suas principais vantagens, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática mais detalhada devido ao requerimento de se resolver um sistema de equações associado a um instante de tempo de cada vez. Por isso, na simulação as decisões são baseadas no estado das variáveis no presente, sem levar em consideração o que ocorrerá no futuro.

Já as técnicas de otimização buscam identificar a solução que otimize uma determinada função objetivo e que represente matematicamente os objetivos de um sistema a serem melhorados, ordenando-os em relação a sua atratividade. Elas têm, entre suas restrições, a representação do modelo matemático que simula o comportamento do sistema. No entanto, este modelo deverá ser descrito, preferencialmente, por equações mais simples e menos complexas, devido à solução do problema requerer que sejam resolvidos, simultaneamente, todos os sistemas de equações associados a cada intervalo de tempo, num processo iterativo e que aumenta, em muito, os requerimentos de memória e esforço computacional. Isso, porque, no processo decisório da busca da melhor solução, uma mudança na variável de decisão num dado instante afetará todas as variáveis em tempos subsequentes. Apesar das hipóteses simplificadoras necessárias à representação do sistema parecerem ser a principal desvantagem dos métodos de otimização; por, aparentemente, causar um distanciamento entre o modelo e o sistema real; eles tem como vantagem sobre os métodos de simulação a busca da melhor alternativa para o desempenho do sistema, pois a busca de uma solução “otimizada” via métodos de simulação teria que ser feita na base da tentativa e erro.

#### 4.1 – Simulação

A simulação tenta representar um sistema físico e prever seu comportamento sob um determinado conjunto de condições, não apresentando, praticamente, nenhuma exigência quanto à natureza do problema, a não ser a de que ele possa ser formulado matematicamente (Wurbs, 1993).

A maioria dos modelos de simulação, especialmente em casos de dimensionamento de obras hídricas, assume um dado conjunto de vazões históricas para representar a série histórica inteira. Na operação de reservatórios, as liberações são determinadas com base num conjunto pré-estabelecido de influxos e regras (Celeste et al, 2006). Dessa forma, a simulação tanto de procedimento simples como de procedimento complexo não gera, diretamente, políticas ótimas de operação. Mas em compensação permite uma representação bem detalhada e mais realística do sistema. Além disso, possibilita ao tomador de decisão examinar o desempenho do sistema considerando várias entradas e regras de decisão, que podem ser modificadas, até os resultados se aproximem do ótimo.

Braga (1987) afirma que existem dois tipos básicos de modelos de simulação em recursos hídricos. O primeiro diz respeito à simulação dos processos hidrológicos (exemplo: os de transformação de chuva em vazão) e de qualidade da água, onde equações diferenciais e relações empíricas são utilizadas para representação de vários aspectos quantitativos e qualitativos do ciclo hidrológico. O segundo tipo de modelo de simulação é referido aos aspectos de dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos. Modelos de simulação associados com a operação de reservatórios consideram, em regra geral, um cálculo de balanço hídrico entre as afluências, efluências e variações no armazenamento, podendo, ainda, incluir avaliações econômicas de prejuízos decorrentes de enchentes, benefícios de geração de energia hidrelétrica, benefícios de irrigação, pesca e outras características similares.

## **4.2 – Otimização**

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

Não existe, porém, um procedimento de otimização geral que possa resolver eficientemente qualquer tipo de problema. A maioria das técnicas depende da forma e propriedades matemáticas da função objetivo e restrições (Mateus e Luna, 1986; Dahlquist e Bjorck, 1974).

Os modelos de otimização levam em consideração algum tipo de técnica de programação matemática e são classificados em: programação linear; programação dinâmica;

programação não-linear e métodos heurísticos (Algoritmos genéticos, simulated annealing, etc.).

#### **4.2.1 – Programação Linear**

A programação linear é a técnica que mais se desenvolveu e uma das mais aplicadas em gerenciamento de recursos hídricos (Braga, 1987), além de ser considerada por alguns autores como um dos mais importantes avanços científicos da segunda metade do século XX (Barbosa, 1997; Simonovic, 1992).

As aplicações pioneiras da programação linear na área de recursos hídricos remontam à década de 1960, no contexto dos trabalhos do Harvard Water Resources Group, especificamente num problema de gerenciamento de água subterrânea (Barbosa, 1997). A primeira aplicação da programação linear em problemas de operação determinística de reservatório foi feita em 1962, sendo usada para um problema simplificado de um reservatório sem armazenamento extra-anual (Dorfman, citado por Simonovic, 1992). As razões da grande utilização da programação linear, na área de recursos hídricos, estão na flexibilidade de sua adaptação a uma grande variedade de problemas, maior facilidade de entendimento; capacidade de enquadrar problemas de grande porte e disponibilidade de pacotes computacionais para pronta utilização, em nível comercial. Em contrapartida, a principal restrição da aplicação desta técnica é a exigência de linearidade das funções, o que não se verifica em muitos problemas de recursos hídricos (Barbosa, 1997).

A programação linear é usada largamente em problemas de planejamento de atividades na agricultura, na indústria petrolífera, nos transportes, no setor financeiro, no setor hidroelétrico e na área de telecomunicações.

No desenvolvimento desta pesquisa fez-se uso da técnica de programação linear. Embora tenha sido concebida para representar problemas tipicamente lineares, a programação linear vem sendo amplamente utilizada no planejamento e manejo dos recursos hídricos, mesmo para os que possuem processos não-lineares que, nesses casos, são representados matematicamente via artifícios de linearização.

Segundo Yeh (1985) e Labadie (2004) as razões que tornam a programação linear atrativa são:

- converge sempre para um ótimo global;
- abstração de tratar problemas complexos;
- teoria da dualidade bem desenvolvida para análise de sensibilidade;

- códigos computacionais disponíveis.

A forma padrão de um problema de programação linear é dada pela equação 4.1 abaixo:

$$\begin{aligned}
 & \min F'x \\
 & A * x = b \\
 & x \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

onde:

$A$  – é a matriz  $m \times n$  dos coeficientes das restrições;

$x$  – é o vetor  $n$ -dimensional das variáveis de decisão;

$b$  – é o vetor  $m$ -dimensional com os valores dos recursos disponíveis;

$F$  – é o vetor  $n$ -dimensional dos coeficientes da função objetivo.

Para transformar as restrições de desigualdade ( $<$ ,  $\leq$ ,  $>$  e  $\geq$ ) em igualdade ( $=$ ) utilizam-se variáveis de folga ou artificiais, convertendo, assim, a representação do problema original para a forma padrão.

Nos sistemas de recursos hídricos é comum se ter processos descritos por expressões não-lineares. Uma forma de tratar problemas desse tipo é linearizar as funções não-lineares. Estas linearizações podem ser realizadas através da determinação de coeficientes de retas, atualizados seqüencialmente a cada iteração, que são tangentes a um ponto ou secantes obtidas através do conhecimento de dois pontos da função. A escolha da linearização mais apropriada depende da busca ou manutenção da convexidade do problema de programação linear.

Na programação linear seqüencial via método da secante para, por exemplo, a relação área  $\times$  volume, a reta obtida na primeira iteração é resultado de uma relaxação das variáveis da função não-linear correspondente, ou seja, a linearização ocorre com um traçado de uma única reta conectando os pontos (límitrofes) inicial e final da curva.

Para as demais iterações, a linearização pode ser realizada a partir de um ponto tangente ou secante através de dois pontos e para conseguir uma precisão desejável, a análise numérica da convergência do processo é realizada a fim de que o erro relativo seja menor que

uma tolerância especificada pelo usuário. Portanto, a linearização mais apropriada depende da busca ou da manutenção da convexidade do problema de programação linear.

#### **4.2.2 – Programação Não-Linear**

A programação não-linear não goza da mesma popularidade que a programação linear e a programação dinâmica têm na análise de sistemas de recursos hídricos. O fato é explicado em razão de que o processo de otimização ser usualmente lento, requerendo maior tempo de processamento, quando comparado à programação linear, uma vez que a matemática envolvida nos modelos não lineares é muito mais complicada do que nos casos de programação linear (Yeh,1985). O desenvolvimento crescente dos recursos computacionais, embora o artifício da linearização ainda seja bastante utilizado, vem facilitando a aplicação da programação não-linear na prática de solução de problemas de sistemas de recursos hídricos, mas ainda tem-se o problema de garantia de que a solução encontrada seja a ótima global.

#### **4.2.3 – Programação Dinâmica**

Segundo Barros (1997), a programação dinâmica é uma técnica também usada para solucionar problemas em recursos hídricos, que podem ser vistos como processos de decisão sequencial em vários estágios, não significando que “estágio” seja necessariamente um intervalo de tempo, mas pode representar atividades, localidades, etc., sendo melhor entendido como ponto do processo no qual uma decisão deve ser feita.

A vantagem da programação dinâmica é que ela pode ser utilizada num grande número de problemas de programação discreta, não necessitando de muita precisão numérica. Podendo ser utilizada em alguns problemas de recursos hídricos (Barros, 1997)

A desvantagem marcante da programação dinâmica é a chamada praga da dimensionalidade que aparece quando há discretização elevada das variáveis de estado, quando a busca do ótimo em cada estágio exige enormes requerimentos de memória e de tempo de processamento (Bellman, citado por Barros, 1997).

#### **4.3 – Métodos combinados de simulação e otimização**

Nas últimas décadas a combinação entre as técnicas de simulação e otimização ganhou força devido às grandes vantagens que podem ser extraídas desta integração. Segundo

Simonovic (1992), esta abordagem contribui para reduzir ou eliminar a distância entre prática e teoria na análise de sistema de recursos hídricos.

A combinação ou integração de modelos e de programas computacionais para análise de sistemas de recursos hídricos vem sendo feita com sucesso através dos chamados sistemas de suporte a decisão (Cunningham e Amend, 1986; Braga et al., 1998 e Azevedo et al., 1998).

Vários exemplos bem sucedidos com uso combinado destas técnicas foram empregados na resolução de problema de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

O MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo “Danish Hydraulic Institute” (DHI) da Dinamarca, tem como sua potencialidade poder ser executado para análises hidrológicas extensas para sistemas independentes de abastecimento de água, irrigação, produção de energia elétrica e também para sistemas de usos múltiplos via modelos de rede de fluxos (programação linear).

O MODSIM é um modelo de simulação e otimização, também baseado em técnicas de rede de fluxos baseado no algoritmo “Out-of-kilter”, que foi desenvolvido na “Colorado State University” por Labadie et al. (1984). Trata-se essencialmente de um algoritmo de programação linear desenvolvido para a solução de problemas de otimização. Os modelos do MODSIM, atuais e anteriores, comprovaram sua eficácia quando aplicados com sucesso em sistemas complexos de bacias hidrográficas, como a Bacia de Poudre no Colorado (Labadie et al., 1986). MODSimp32 é uma versão atualizada do modelo MODSIM, com uma interface amigável desenvolvida na Escola Politécnica da USP, onde foi testado, documentado e é de

Politécnica da Universidade de São Paulo, e é uma versão modernizada do modelo ModSimP32 (Azevedo e Porto, 1999).

O ACQUANET armazena todos os dados e resultados em Bancos de Dados no formato do Microsoft Access e aproveita a estrutura e a funcionalidade possibilitada pela utilização de arquivos neste formato. As definições gerais de funcionamento, opções de cálculo e tipos de resultados providos pelo modelo ACQUANET estão descritos no “AcquaNet - Modelo para alocação de água em sistemas complexos de recursos hídricos - Manual do Usuário”, publicado pelo LabSid da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2003).

AQUATOLL (Andrew et al., 1996), foi desenvolvido para o planejamento de decisões em bacias hidrográficas complexas, um modelo com um módulo de simulação de bacias, de otimização, de águas subterrâneas e dois módulos de análise de risco.

O WATERWARE, derivado do Eureka EU 487, foi desenvolvido por Jamieson e Fedra (1996) para gerenciamento de bacias hidrográficas. Foi utilizado nas bacias do Rio Tâmisia (Inglaterra), para um ajuste no planejamento do uso das águas subterrâneas e do Rio Lerma (México), cujo objetivo era minimizar o desperdício no sistema de abastecimento, destacando-se o atendimento a irrigação.

Stam et al. (1998) desenvolveram um Sistema de Suporte à Decisão para gerenciamento do reservatório do lago Kaliba, quarto maior lago artificial do mundo, localizado na África. O sistema considera características relevantes do reservatório e outros parâmetros, tais como: o montante de energia elétrica gerada, o armazenamento no reservatório ao longo do ano e o montante de água liberada pelo reservatório.

O WEAP21 (Water Evaluation And Planning System) é um modelo desenvolvido pelo Stockholm Environment Institute (SEI) do Boston Center / USA, destinado ao planejamento integrado de recursos hídricos. Como uma ferramenta de pesquisa, o WEAP simula as demandas e suprimentos de água, afluências e armazenamentos, geração de poluição, tratamento e descargas, operando numa base de tempo mensal. Como uma ferramenta de análises de políticas operacionais, o modelo permite avaliar amplas faixas de opções para o gerenciamento e desenvolvimento de recursos hídricos. Com base no balanço hídrico de água para cada nó e arco (link) do sistema, o modelo permite alocar prioridades de requerimentos, preferências locais de demandas, balanço de massa e outras restrições em diversos cenários de avaliação de disponibilidades hídricas, custos e benefícios, compatibilidades de metas ambientais, sensibilidade e incertezas de variáveis de decisão. As definições gerais de funcionamento, opções de cálculo e tipos de resultados providos pelo modelo WEAP21 estão

descritos no “USER GUIDE for WEAP21”, publicado pelo Stockholm Environment Institute - Boston, Tellus Institute, Boston MA, USA.

O sistema RIVERWARE (Eschenbach et al., 2001) é uma ferramenta flexível de modelagem de bacia hidrográfica que permite simular e otimizar o gerenciamento de sistemas de reservatórios de múltiplos objetivos para operações diárias.

O sistema CTIWM (Ito et al., 2001), foi desenvolvido para integrar os processos hidrológicos e avaliar os riscos associados às alternativas de planejamento de recursos hídricos. O sistema apresenta como principais objetivos: organizar e processar dados de vazão e de demanda de água, simular operação de reservatórios, estimar a precipitação média e escoamento na bacia e executar análises de riscos para o planejamento a médio e curto prazo. Foi aplicado na bacia hidrográfica do Rio Chikugo – Japão.

Pode-se observar que existem vários modelos que podem ser utilizados na análise de sistemas de reservatórios. Entretanto, não existe uma metodologia consagrada que possa ser utilizada para todas as configurações possíveis de um sistema, visto que estas diferem sob vários aspectos. A escolha de uma metodologia a ser aplicada depende de vários fatores, dentre os quais: a configuração do sistema, os objetivos de uso dos recursos hídricos e o estágio da aplicação. Na maioria dos casos, os modelos de suporte a decisão são combinações de técnicas de otimização e simulação.

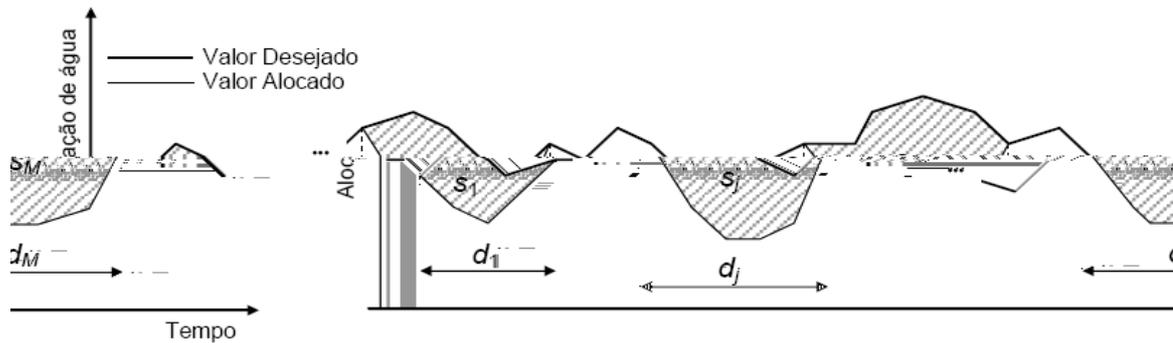
Fatores subjetivos podem entrar em cena com pesos significativos e precisam ser considerados com o devido cuidado ao lado de outros aspectos que podem ser tratados mais objetivamente. Uma das questões mais polêmicas em planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é como escolher e formalizar os critérios que guiarão à escolha da melhor alternativa (Porto e Azevedo, 1997).

A opção de não utilizar a técnica de rede de fluxo no modelo de simulação proposto foi devido o algoritmo Out-of-Kilter só representar cada componente como um sistema formado por uma rede de arcos e nós. Este processo limita a representatividade dos processos não-lineares vinculados a vários componentes. Portanto, optou-se pela técnica de programação linear padrão.

#### **4.4 – Indicadores de desempenho do sistema**

O desempenho do sistema, cujas regras operativas são obtidas via a execução do modelo de simulação proposto, foi avaliado pelos seguintes indicadores: confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência. Estes indicadores foram propostos por Hashimoto et al (1982).

Os indicadores de desempenho do sistema (Celeste et al, 2006), ao longo do tempo, são determinados, utilizando a série temporal  $X_t$ ,  $t = 1, \dots, NT$ , e um valor limite  $X_0$  especificado, separando os valores satisfatórios dos insatisfatórios de modo que uma falha ocorra quando  $X_t < X_0$ . Seja  $NF$  o número total de intervalos de tempo no qual  $X_t < X_0$  e sejam  $d_j$  e  $s_j$ , respectivamente, a duração e o volume de déficit do  $j$ -ésimo evento de falhas,  $j = 1, \dots, M$ , onde  $M$  é o número de eventos insatisfatórios (Figura 4.1).



**Figura 4.1** – Duração e volumes de déficit em período de falhas.

A confiabilidade (*Conf*) é a probabilidade da série temporal permanecer em estado satisfatório durante o horizonte de operação, ou seja, a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas.

$$Conf = \Pr\{X_t \geq X_0\} = 1 - \frac{NF}{NT} \quad (4.2)$$

A resiliência (*Res*) é a forma como o sistema recupera-se de uma falha, uma vez que esta tenha ocorrido, ou seja, é a probabilidade de haver um estado satisfatório no período  $t+1$  dado um valor insatisfatório no período  $t$ . Pode ser, ainda, definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em estado insatisfatório,  $E[d]$ .

$$Res = \frac{1}{E[d]} = \left[ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_j \right]^{-1} \quad (4.3)$$

A vulnerabilidade (*Vul*) é a magnitude das falhas a que o sistema está sujeito.

$$Vul = E\{s\} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M s_j \quad (4.4)$$

Loucks (1997) (*apud* Kjeldsen e Rosbjerg, 2001) ainda propôs um índice de sustentabilidade geral definido por:

$$Sust = Conf * Res * [1 - Vul] \quad (4.5)$$

## CAPÍTULO V

### METODOLOGIA

Neste capítulo são detalhadas as formulações matemáticas utilizadas no desenvolvimento do modelo de simulação integrado proposto, que tem o intuito de atender os múltiplos usos, respeitando os limites operacionais dos componentes do sistema (reservatórios, calhas dos rios e pontos de passagem da água, retiradas), visando à satisfação no atendimento dos diferentes setores de usuários.

A técnica de planejamento utilizada no desenvolvimento deste modelo foi a programação linear, por permitir uma grande flexibilidade na modelagem de sistemas de recursos hídricos, apresentar um baixo tempo de processamento, convergir sempre na direção do ótimo global e ser largamente utilizada para solução de problemas de sistemas de grande porte.

A elaboração de um sistema de apoio à decisão, que venha contemplar os interesses entre os usos múltiplos e os limites operacionais dos reservatórios, é um procedimento bastante complexo. Devido à grande variabilidade dos tipos de sistemas e dos parâmetros de seus componentes, nenhum dos modelos apresentados na literatura é capaz de representar fidedignamente toda essa complexidade.

O modelo de simulação desenvolvido neste trabalho opera em escala mensal (Figura 5.1), possui em seu núcleo uma rotina de otimização baseada em programação linear padrão sequencial e não é baseado em rede de fluxo. Será capaz de quantificar a alocação dos recursos hídricos entre as demandas dos diferentes setores com um determinado nível de prioridade, levando em consideração as limitações operacionais e físicas do sistema nos meses simulados. Por ser um modelo de simulação, a sua visão é restrita, o planejamento a ser realizado no mês  $t$  se dá em função das condições do sistema no mês  $t-1$ , ou seja, não considera outros dados a priori do mês  $t-1$  e a posteriori do mês  $t$ .

Os dados do problema (Tabela 5.1) são de natureza física (demandas, componentes dos reservatórios, entre outros) e natural (hidro-climáticas). Para representação do sistema a ser estudado são definidos quatro elementos hidráulicos básicos (Figura 5.2): reservatórios, nós de passagem (a montante, a jusante, desvios, união e dreno), links (trechos de rio, adutora e canais) e as retiradas (abastecimento, irrigação, etc.).

O modelo foi desenvolvido na linguagem de programação do MATLAB (Matrix Laboratory) versão 6.5. É um ambiente que permite efetuar análise numérica, cálculo matricial, processamentos de sinais e gráficos, e é de fácil utilização. Possui, também, um pacote de otimização de programação linear em sua biblioteca, utilizado no desenvolvimento do modelo de simulação.

**Tabela 5.1** – Elementos de entrada considerados no modelo

<b>DADOS DE ENTRADA</b>	
<b>1- RESERVATÓRIOS</b>	<b>3 – CALHAS DE RIOS E TERMINAIS</b>
<b>1.1 – Hidrometeorológicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vazões afluentes (m<sup>3</sup>/s);</li> <li>• Precipitação média mensal (m/mês);</li> <li>• Evaporação média mensal (m/mês);</li> <li>• Coeficiente do Tanque Classe A – 0,7.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade máxima.</li> </ul>
<b>1.2 – Estruturais</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cota x área x volume;</li> <li>• Vertedores (equação de descarga, coeficiente de descarga, cota da soleira e largura);</li> <li>• Descarga de fundo (equação de descarga, área da secção, cota da geratriz inferior);</li> <li>• Tomada d'água (cota mínima operacional).</li> </ul>	<b>4 – PERÍMETROS IRRIGADOS</b>
<b>1.3 – Operacionais</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume máximo e mínimo de armazenamento;</li> <li>• Volume meta;</li> <li>• Descarga de fundo máxima para diferentes níveis;</li> <li>• Retiradas máximas para diferentes níveis;</li> </ul>	<b>4.1 – Culturas</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição das culturas;</li> <li>• Plano de cultura;</li> <li>• Coeficiente da cultura;</li> <li>• Requerimentos hídricos.</li> </ul>
<b>2 – DEMANDAS HÍDRICAS</b>	<b>4.2 – Dados meteorológicos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitação efetiva (mm/mês);</li> <li>• Evaporação / evapotranspiração (mm/mês);</li> <li>• Coeficiente do tanque Classe A – 0,7.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abastecimento humano e a pecuária;</li> <li>• Irrigação de culturas perenes e sazonais;</li> <li>• Indústria;</li> <li>• Vazão ecológica;</li> <li>• Piscicultura;</li> <li>• Lazer;</li> <li>• Energia elétrica.</li> </ul>	<b>4.3 – Sistemas de irrigação</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de sistema de irrigação (gotejamento, microaspersão, outros);</li> <li>• Eficiência de aplicação por cultura;</li> <li>• Eficiência do sistema de distribuição.</li> </ul>
	<b>4.4 – Áreas</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Área máxima de cultivo por cultura.</li> </ul>

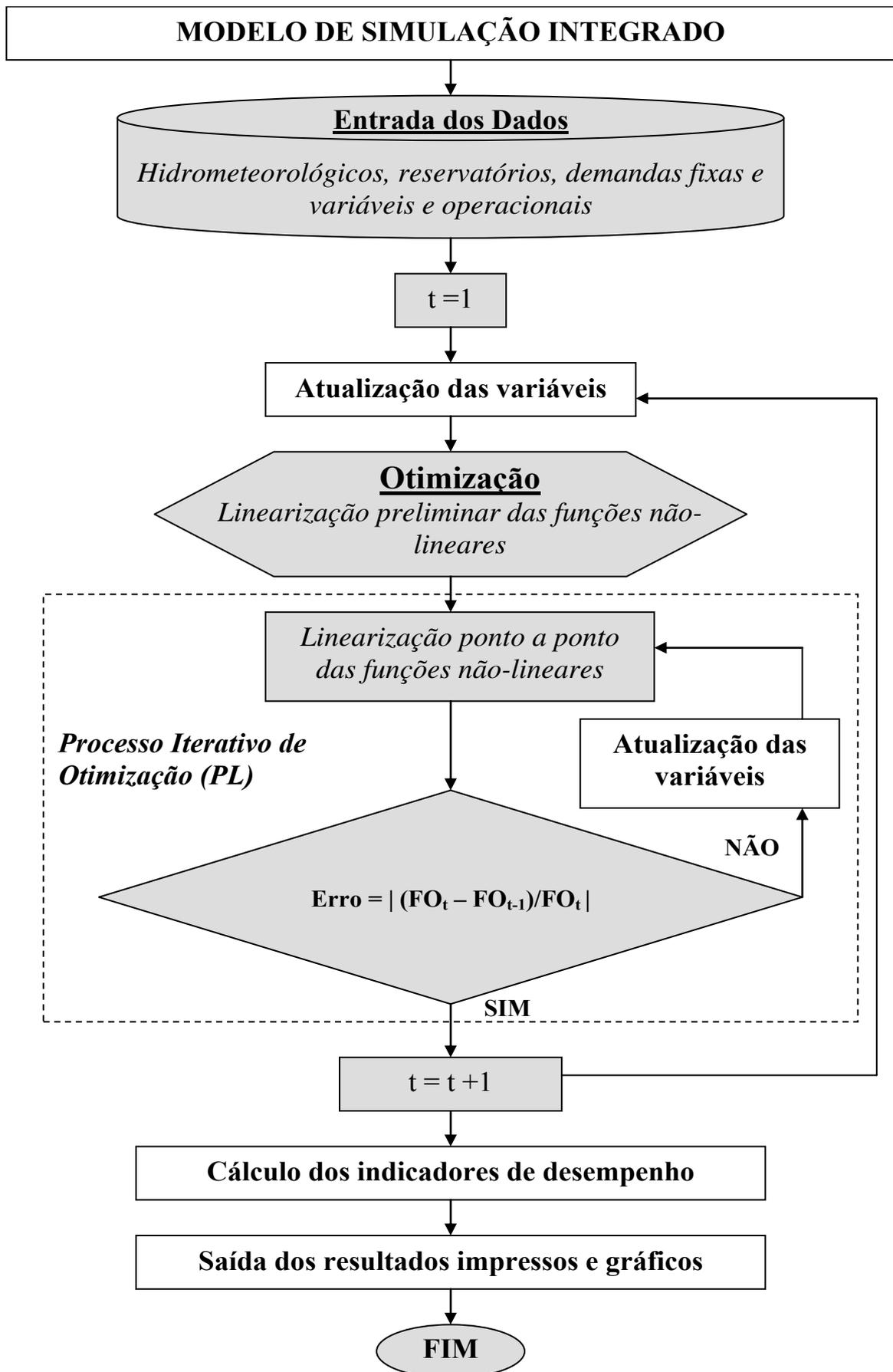
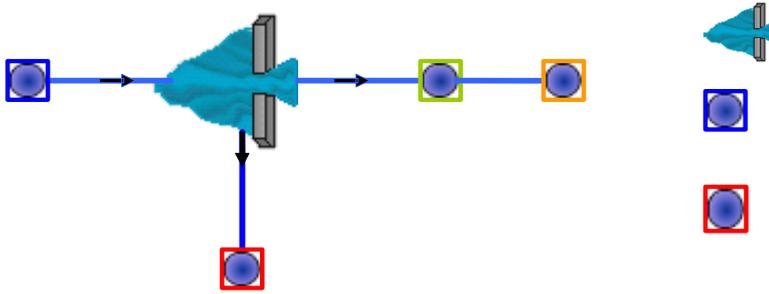


Figura 5.1 – Fluxograma de funcionamento do modelo de simulação.



**Figura 5.2** – Componentes para representação de um determinado sistema.

## 5.1 – Aspectos matemáticos do modelo

### 5.1.1 – Níveis de prioridades

As prioridades são valores que multiplicam as variáveis de decisão da função objetivo considerada no modelo, a fim de demonstrar o grau de preferência de uma variável com relação às outras, podendo inclusive ter o mesmo nível preferência. Esses valores são de natureza inteira e maiores ou iguais a zero, podendo atingir valores de grande proporção, chamados de *Big M*.

### 5.1.2 – Demandas máximas fixas e variáveis

#### 5.1.2.1 – Abastecimento humano e a pecuária

As demandas máximas de abastecimento humano e dessedentação animal foram consideradas, neste modelo, como a soma dos valores estimados entre os dois setores,

totalizando um limite máximo  $Da_{max_{ic}}$  em  $m^3$  para um mês  $t$ . Este valor pode ser obtido de Planos Diretores de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas.

### 5.1.2.2 – Irrigação

As demandas máximas para um mês  $t$ , em  $m^3$ , estimadas para irrigação de culturas sazonais e permanentes,  $Dis_{max_{ic}}$  e  $Dip_{max_{ic}}$ , respectivamente, são os limites a serem retirados em cada mês  $t$  e são estimadas a partir da metodologia proposta na literatura especializada, a qual estabelece os seguintes passos:

#### 1 - Cálculo da evapotranspiração potencial mensal da cultura $j$ no mês $t$ e perímetro $k$

Estima-se, de forma aproximada, em função da taxa de evapotranspiração de referência no mês  $t$  no perímetro  $k$ ,  $Eto_{kt}$ , em mm/mês que, por sua vez, pode ser representada por:

$$Eto_{kt} = C_{tk} * Ev_{kt} \quad (5.1)$$

onde:

$t$  – indica o mês,  $t = 1, \dots, nm$ ;

$nm$  – é o número de meses em estudo;

$C_{tk}$  – é o coeficiente do tanque evaporimétrico no perímetro  $k$  e

$Ev_{kt}$  – é a taxa de evaporação média mensal em mm/mês de um tanque evaporimétrico, normalmente do tipo classe A, colocado no perímetro.

Logo:

$$Evp_{jkt} = Kc_{jt} * Eto_{kt} \quad (5.2)$$

onde:

$Evp_{jkt}$  – é a evapotranspiração potencial mensal (mm/mês) da cultura  $j$ , num perímetro  $k$ ;

$Kc_{jt}$  – é o coeficiente de cultivo da cultura  $j$  que reflete a necessidade hídrica em função de sua fase de crescimento.

## **2 - Cálculo da precipitação efetiva no mês $t$ no perímetro $k$ , $Pef_{kt}$ em mm/mês**

A taxa da precipitação, sob o ponto de vi

#### 4 - Cálculo da eficiência do sistema de irrigação, $Eirr_{jk}$

A quantidade de água a ser captada para cada tipo de cultura  $j$  dependerá, também da eficiência do sistema de irrigação,  $Eirr_{jk}$ , que por sua vez, é resultado do produto entre a eficiência do sistema de distribuição de água para cada perímetro,  $Esis_{jk}$ , e da eficiência de aplicação da irrigação por cultura,  $Ep_j$ , assim tem-se que:

$$Eirr_{jk} = Esis_{jk} * Ep_j \quad (5.6)$$

#### 5 - Cálculo da Lâmina mensal de água, $Lm_{jkt}$

A lâmina mensal de água,  $Lm_{jkt}$  de irrigação da cultura  $j$  no mês  $t$  para o perímetro  $k$ , a ser fornecida pelo sistema será obtida por:

$$Lm_{jkt} = \frac{LR_{jkt}}{(1 - LR_{jkt}) * Eirr_{jk}} \quad (5.7)$$

#### 6 - Cálculo das demandas máximas mensais por perímetro

##### - Culturas permanentes

$$Dip \max_{kt} = \sum_{j=1}^{jp} (Lm_{jkt} * A \max_{jk}) \quad (5.8)$$

##### - Culturas sazonais

$$Dis \max_{kt} = \sum_{j=1}^{js} (Lm_{jkt} * A \max_{jk}) \quad (5.9)$$

onde:

$A \max_{jk}$  – é área máxima irrigável para cada cultura  $j$ , no perímetro  $k$ ;

$jp$  – é o número de culturas permanentes;

$js$  – é o número de culturas sazonais;

### **5.1.2.3 – Indústria**

A demanda máxima para indústria  $D_{in\ max_{ic}}$  utilizada pelo modelo de simulação pode ser estimada de acordo com as metodologias propostas nos Planos Diretores das Bacias Hidrográficas. Essa demanda é o limite máximo para que o modelo determine a retirada ótima no mês  $t$ , para esse tipo de setor.

### **5.1.2.4 – Vazão ecológica**

O modelo contempla também, a demanda de vazão ecológica no mês  $t$  para garantir a sobrevivência dos ecossistemas aquáticos, em algum trecho do rio, representado por 'links' e que pode ser estimada a partir de várias metodologias (vide Garcia e Andreazza, 2004).

### **5.1.2.5 – Jusante dos reservatórios**

Essa demanda,  $D_{n\ max_{ic}}$ , é o limite máximo permitido para a retirada deste setor localizado nos nós de passagens que ficam a jusante dos reservatórios e será estimada dependendo do tipo uso (irrigação, abastecimento, lazer ou piscicultura) que o planejador definir, permitindo o modelo determinar a retirada ótima no mês  $t$ .

### **5.1.2.6 – Piscicultura, lazer e energia elétrica**

Esses tipos de demandas dependem de um nível meta, ou seja, um volume meta que deve ser mantido no reservatório para garantir o atendimento destas demandas. O modelo desenvolvido contempla também este tipo de modalidade.

## **5.1.3 – Características hidro-climáticas**

Com relação à precipitação e a evaporação para cada reservatório considerado, estas devem entrar no modelo em mm/mês, para serem convertidas, em seguida, para m/mês. Já com relação às vazões afluentes, estas devem entrar em m<sup>3</sup>/s e logo convertidas para m<sup>3</sup>/mês.

### 5.1.4 – Função objetivo

Os múltiplos objetivos a serem alcançados num determinado sistema são estabelecidos segundo uma função matemática que contemple os interesses dos diferentes setores de usuários. Neste caso, a função objetivo utilizada neste modelo de simulação procurou maximizar a satisfação do atendimento de requerimentos hídricos (vazões e volumes) dos usos múltiplos. Logo, a função objetivo proposta é representada por:

$$Z(Ra, Rip, Ris, Rin, Re, Rn, Sp, SC^-, SM^-, Sdj) = \sum_{t=1}^{nm} (F01(t) + F02(t)) \quad (5.10)$$

O objetivo da função F01 é maximizar o atendimento do requerimento hídrico dos diferentes usuários, e é chamada para cada mês  $t$ , sendo representada pela Equação 5.11.

*Maximizar*

$$FOI(t) = \sum_{i=1}^{NR} \left[ \sum_{c=1}^{NA} \alpha_{ca} Ra_{ic}(t) + \sum_{c=1}^{NP} \alpha_{cip} Rip_{ic}(t) + \sum_{c=1}^{NS} \alpha_{cis} Ris_{ic}(t) + \sum_{c=1}^{NI} \alpha_{cin} Rin_{ic}(t) + \sum_{c=1}^{NE} \alpha_{ce} Re_{ic}(t) + \sum_{c=1}^{NN} \alpha_{cn} Rn_{ic}(t) \right] \quad (5.11)$$

onde:

$c$  – componentes existentes em um determinado sistema;

$i$  – reservatórios em um determinado sistema;

$\alpha_{ca}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento ao abastecimento humano e a pecuária;

$\alpha_{cip}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento a irrigação de culturas perenes;

$\alpha_{cis}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento a irrigação de culturas sazonais;

$\alpha_{cin}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento a indústria;

$\alpha_{ce}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento a vazão ecológica;

$\alpha_{ce}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento a retirada no nó de passagem;

$NR$  – número de reservatórios;

$NA$  – número de demandas de abastecimento existente em um determinado sistema;

$NP$  – número de demandas de irrigação com culturas perenes existentes em um determinado sistema;

$NS$  – número de demandas de irrigação com culturas perenes existentes em um determinado sistema;

$NI$  – número de demandas industriais existentes em um determinado sistema;

$NE$  – número de vazões ecológicas a serem satisfeitas existentes em um determinado sistema;

$NN$  – número de uma determinada demanda a ser satisfeita nos nó de passagem  $n_{cs}$  existentes em um determinado sistema;

$Ra_{ic}(t)$  – variável de decisão que representa a retirada de água para o  $c$ -ésimo abastecimento humano e consumo animal e num determinado mês  $t$ ;

$Rip_{ic}(t)$  – variável de decisão que representa a retirada de água para irrigação das culturas perenes do  $c$ -ésimo perímetro irrigado em um determinado mês  $t$ ;

$Ris_{ic}(t)$  – variável de decisão que representa a retirada de água para irrigação das culturas sazonais do  $c$ -ésimo perímetro irrigado em um determinado mês  $t$ ;

$Rin_{ic}(t)$  – variável de decisão que representa a retirada de água para a  $c$ -ésima indústria em um determinado mês  $t$ ;

$Re_{ic}(t)$  – variável de decisão que representa a retirada de água na  $c$ -ésima da vazão ecológica, num determinado mês  $t$ ;

$Rn_{ic}(t)$  – variável de decisão que representa a retirada de água para o  $c$ -ésimo setor em um nó de passagem  $n_{cs}$  a jusante do reservatório  $i$  num determinado mês  $t$ ;

Já o objetivo da função  $F02$  é atender as metas operacionais estabelecidas para os reservatórios, para que venham a satisfazer os usos múltiplos do sistema.

*Maximizar*

$$F02(t) = \sum_{i=1}^{NR} [\alpha_{v\min,i} \cdot SC_i^-(t) + \alpha_{vmeta,i} \cdot SM_i^-(t) - \alpha_{vvert,i} \cdot Sp_i(t) - \alpha_{vres,i} \cdot Sdj_i(t)] \quad (5.12)$$

onde:

$\alpha_{vmin,i}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento ao requerimento de volume mínimo do reservatório  $i$ ;

$\alpha_{vmeta,i}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento ao requerimento de volume meta do reservatório  $i$ ;

$\alpha_{vvert,i}$  – coeficiente que representa a penalização do vertimento no reservatório  $i$ ;

$\alpha_{vres,i}$  – coeficiente que representa a prioridade no atendimento a vazão residual ;

$SC_i^-(t)$  – variável de decisão que representa o volume mínimo que deve ser mantido no reservatório  $i$ , no mês  $t$  (pode ser utilizado para a piscicultura extensiva);

$SM_i^-(t)$  – variável de decisão associada ao atendimento do volume meta em um reservatório  $i$ , no mês  $t$  (pode ser utilizado para a energia elétrica ou lazer);

$Sp_i(t)$  – variável de decisão que contempla o volume vertido de um determinado reservatório  $i$ , no mês  $t$ ;

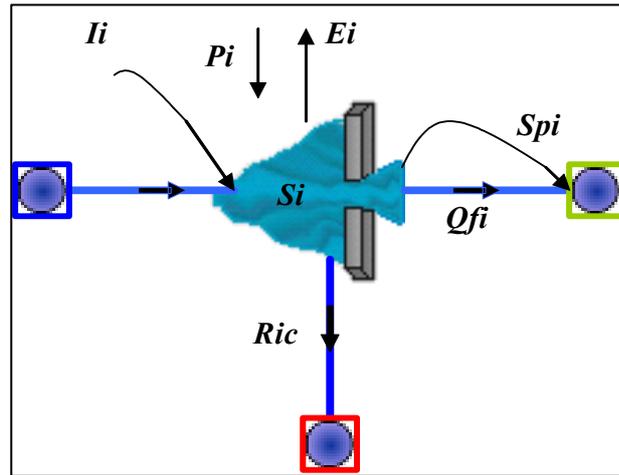
$Sdj_i(t)$  – variável de decisão que representa vazão residual, de um determinado reservatório  $i$ , no mês  $t$ .

O balanço de massa e outras restrições operacionais dos componentes no modelo de simulação são consideradas numa rotina de programação linear seqüencial, realizada a nível mensal, sendo utilizada de forma iterativa, a fim de determinar para cada mês  $t$  os valores ótimos das variáveis de decisão. Essas equações (restrições de igualdade e desigualdade) e suas representações são tratadas a seguir.

### 5.1.5 – Dos reservatórios e seus componentes

No modelo, os reservatórios podem ser conectados por nós de passagem a sua jusante, via descarregador de fundo, vertedores e tomadas d'água, e nós de passagem a sua montante chamados de fonte, onde recebem suas afluências ou vazões residuais de outros reservatórios. Portanto, os reservatórios são representados matematicamente pelas equações de balanço de massa e restrições, que levam em consideração as limitações operacionais e físicas destes componentes.

Para determinar a variação mensal do volume armazenado nos reservatórios, quando não estiverem em série (Figura 5.3), usa-se a equação do balanço hídrico expressa abaixo:



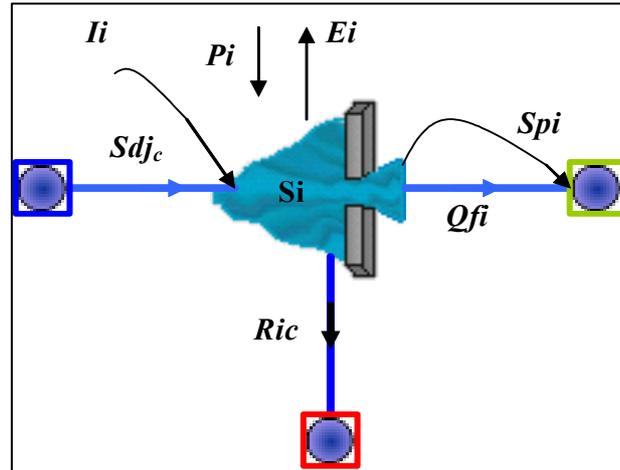
**Figura 5.3** – Representação física do balanço de massa em um reservatório  $i$ .

$$S_i(t) + R_{ic}(t) + Q_{fi}(t) + Sp_i(t) = S_i(t-1) + I_i(t) + [P_i(t) - E_i(t)] * Am_i(t) \quad (5.13)$$

onde:

- $S_i(t)$  - volume armazenado do reservatório  $i$  no fim do mês  $t$ ;
- $S_i(t-1)$  - volume armazenado do reservatório  $i$  no início do mês  $t$ ;
- $R_{ic}(t)$  - retirada de água pela tomada d' água no reservatório  $i$  no mês  $t$ ;
- $Q_{fi}(t)$  - retirada d' água pela descarga de fundo do reservatório  $i$  no mês  $t$ ;
- $Sp_i(t)$  - vertimento do reservatório  $i$  no mês  $t$ ;
- $I_i(t)$  - vazão afluyente no reservatório  $i$  no mês  $t$ ;
- $P_i(t)$  - taxa de precipitação no reservatório  $i$  no mês  $t$ ;
- $E_i(t)$  - taxa de evaporação no reservatório  $i$  no mês  $t$ ;
- $Am_i(t)$  - área média do espelho d' água no reservatório  $i$  no mês  $t$ ;

Caso o reservatório esteja em série (Figura 5.4) à equação do balanço hídrico computará a vazão residual  $Sdj_i(t)$  advinda do reservatório a montante e, portanto, ficará:



**Figura 5.4** - Representação física do balanço de massa em reservatórios em série.

$$-Sdj_i(t) + S_i(t) + Ric(t) + Qfi(t) + Spi(t) = S_i(t-1) + I_i(t) + [P_i(t) - E_i(t)] * Am_i(t) \quad (5.14)$$

Para calcular a área média  $Am_i(t)$  apresentada no balanço de massa dos reservatórios, usa-se a Equação 5.15 abaixo:

$$Am_i(t) = \left[ \frac{A_i(t) + A_i(t-1)}{2} \right] \quad (5.15)$$

onde:

$A_i(t)$  - é área da superfície líquida do reservatório  $i$ , em  $m^2$ , no final mês  $t$ ;

$A_i(t-1)$  - é área da superfície líquida do reservatório  $i$ , em  $m^2$ , no início do mês  $t$ .

No entanto, as áreas da superfície líquida do reservatório estão relacionadas aos seus volumes de forma não linear. Portanto, para levar em consideração, na equação do balanço hídrico, o volume precipitado e evaporado nos reservatórios é necessário fazer uso das relações área x volume, numa forma linearizada, e determinar em seguida a área média da superfície líquida do reservatório  $i$  no mês  $t$ ,  $Am_i(t)$ , seguindo o procedimento abaixo:

A determinação da área média  $Am_i(t)$ , na primeira iteração da rotina de otimização do modelo de simulação proposto, é realizada através de uma única reta, começando de forma relaxada como apresentada Figura 5.5.



**Figura 5.5** – Linearização da curva área x volume de um determinado reservatório  $i$ .

Em seguida, é determinada a inclinação e a intercessão da reta, pelas equações abaixo:

$$a = \operatorname{tg} \theta = \left( \frac{A \max_i}{S \max_i} \right) \quad (5.16)$$

$$b = A \max_i - a * S \max_i \quad (5.17)$$

onde:

$a$  - é a inclinação da reta;

$b$  - é a intercessão da reta;

$A \max_i$  - é área máxima da superfície líquida, em  $\text{m}^2$ , no reservatório  $i$ ;

$A \min_i$  - é área mínima da superfície líquida, em  $\text{m}^2$ , no reservatório  $i$ ;

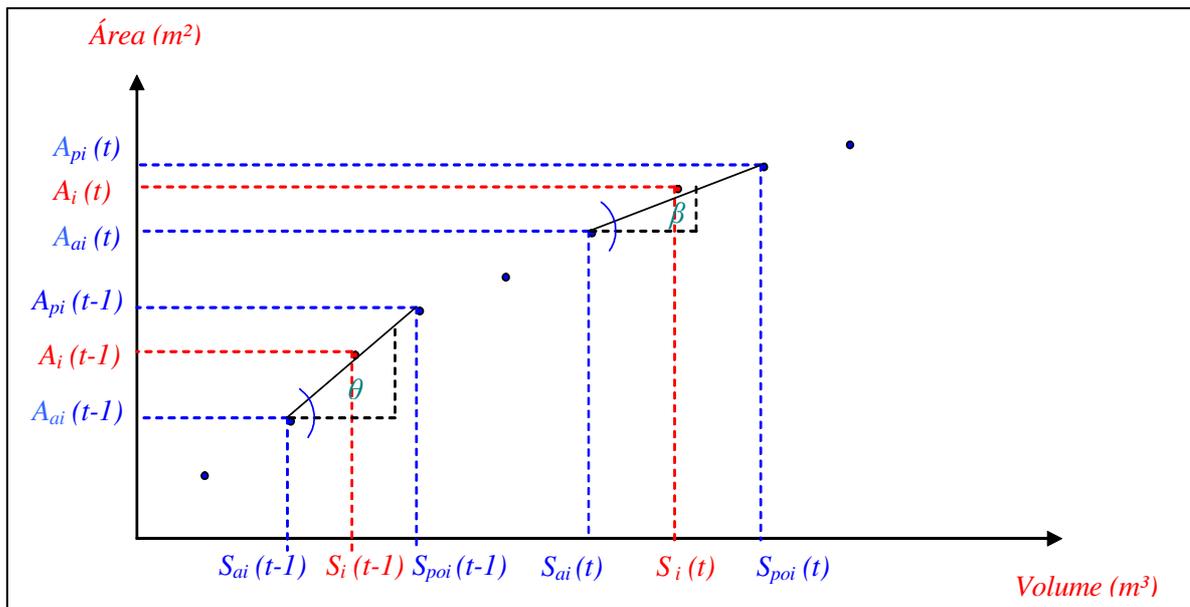
$S \max_i$  - é o armazenamento máximo, em  $\text{m}^3$ , do reservatório  $i$ ;

$S \min_i$  - é o armazenamento mínimo, em  $\text{m}^3$ , do reservatório  $i$ ;

Logo a área média da superfície líquida, em  $\text{m}^2$ , ficará:

$$Am_i(t) = \left[ \frac{a * S_i(t) + b + a * S_i(t-1) + b}{2} \right] \quad (5.18)$$

Para as iterações seguintes, utilizando-se da programação seqüencial, a área média da superfície líquida é determinada a partir dos volumes obtidos pela primeira iteração. Com esses volumes acham-se, por interpolação, as áreas correspondentes no gráfico da curva área x volume dos reservatórios, para, em seguida, capturar os seus pontos superiores e inferiores e definir para cada instante uma reta. A intercessão e a inclinação da reta variam, em cada instante  $t$ , como pode ser visto na Figura 5.6 abaixo, até que a convergência do processo seja atingida:



**Figura 5.6** – Linearização da curva área x volume de um reservatório  $i$  ponto a ponto.

As intercessões e as inclinações, para cada valor de  $S_i(t)$  e  $A_i(t)$ , são determinadas pelas equações abaixo:

$$a(t) = tg\beta = \left[ \frac{A_{pi}(t) - A_{ai}(t)}{S_{poi}(t) - S_{ai}(t)} \right] \quad (5.19)$$

$$b(t) = A_{pi}(t) - a(t) * S_{poi}(t) \quad (5.20)$$

$$a(t-1) = tg\theta = \left[ \frac{A_{pi}(t-1) - A_{ai}(t-1)}{S_{poi}(t-1) - S_{ai}(t-1)} \right] \quad (5.21)$$

$$b(t-1) = A_{pi}(t-1) - a(t) * S_{poi}(t-1) \quad (5.22)$$

onde:

- $a(t)$  - a inclinação da reta, no final do mês  $t$ ;
- $a(t-1)$  - a inclinação da reta, no início do mês  $t$ ;
- $b(t)$  - a intercessão da reta, no final do mês  $t$ ;
- $b(t-1)$  - a intercessão da reta, no início do mês  $t$ ;
- $A_{pi}(t)$  - ponto posterior a área do espelho d'água  $A_i(t)$ , no final do mês  $t$ ;
- $A_{ai}(t)$  - ponto anterior a área do espelho d'água  $A_i(t)$ , no final do mês  $t$ ;
- $A_{pi}(t-1)$  - ponto posterior a área do espelho d'água  $A_i(t-1)$ , no início do mês  $t$ ;
- $A_{ai}(t-1)$  - ponto anterior a área do espelho d'água  $A_i(t-1)$ , no início do mês  $t$ ;
- $S_{poi}(t)$  - ponto posterior ao volume armazenado  $S_i(t)$ , no final do mês  $t$ ;
- $S_{ai}(t)$  - ponto anterior ao volume armazenado  $S_i(t)$ , no final do mês  $t$ ;
- $S_{poi}(t-1)$  - ponto posterior ao volume armazenado  $S_i(t-1)$ , no início do mês  $t$ ;
- $S_{ai}(t-1)$  - ponto anterior ao volume armazenado  $S_i(t-1)$ , no início do mês  $t$ ;

Logo a área média da superfície líquida, em  $m^2$ , será determinada por:

$$Am_i(t) = \left[ \frac{a(t) * S_i(t) + b(t) + a(t-1) * S_i(t-1) + b(t-1)}{2} \right] \quad (5.23)$$

Ainda, para os reservatórios, será necessário inserir as limitações operacionais das variáveis de decisão  $S_i(t)$ ,  $R_{ic}(t)$ ,  $Qf_i(t)$ ,  $Sp_i(t)$ , para que o modelo de simulação possa determinar os valores ótimos correspondentes em cada mês  $t$ . Os intervalos estão representados pelas restrições de desigualdade abaixo:

$$0 \leq R_{ic}(t) \leq D \max_{ci} \quad (5.24)$$

$$0 \leq S_i(t) \leq S \max_i \quad (5.25)$$

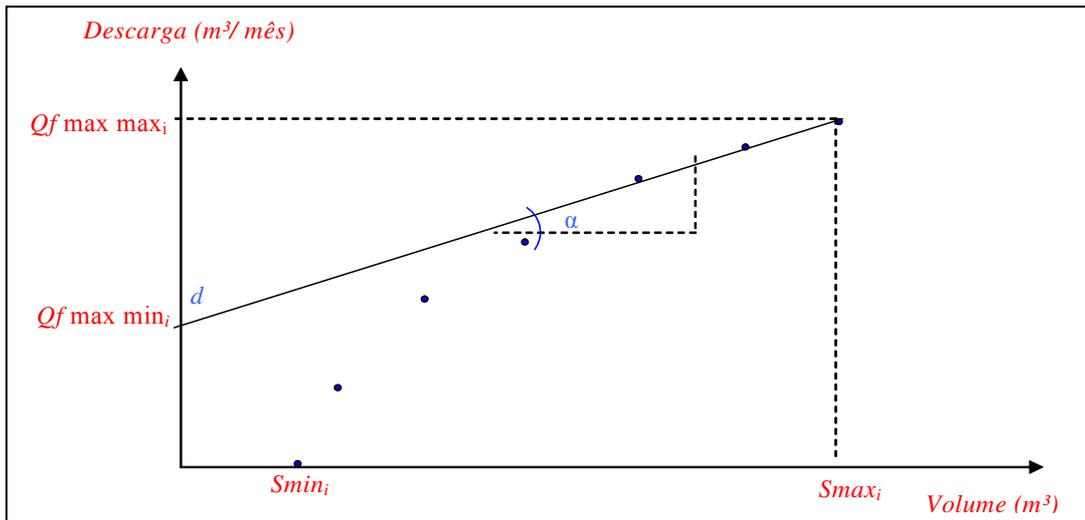
$$0 \leq Qf_i(t) \leq Qf \max_i \quad (5.26)$$

$$0 \leq Sp_i(t) \leq Sp \max_i \quad (5.27)$$

onde:

$D_{\max_i}$  - é a demanda máxima na tomada d'água em um reservatório  $i$ ;

$Q_{f \max_i}$  - é descarga máxima proveniente do volume máximo em um reservatório



**Figura 5.7** – Linearização da curva descarga x volume armazenado no reservatório  $i$ .

A inclinação e a intercessão da reta são determinadas por:

$$z = \operatorname{tg} \alpha = \left( \frac{Qf \max \max_i - Qf \max \min_i}{S \max_i} \right) \quad (5.29)$$

$$d = Qf \max \max_i - z * S \max_i \quad (5.30)$$

onde:

$z$  - é a inclinação da reta;

$d$  - é a intercessão da reta;

$Qf \max \max_i$  - é a descarga máxima para a cota máxima, em  $m^3$ , de um reservatório  $i$ , no mês  $t$ ;

$Qf \max \min_i$  - é a descarga máxima para cota mínima, em  $m^3$ , de um reservatório  $i$ , no mês  $t$ ;

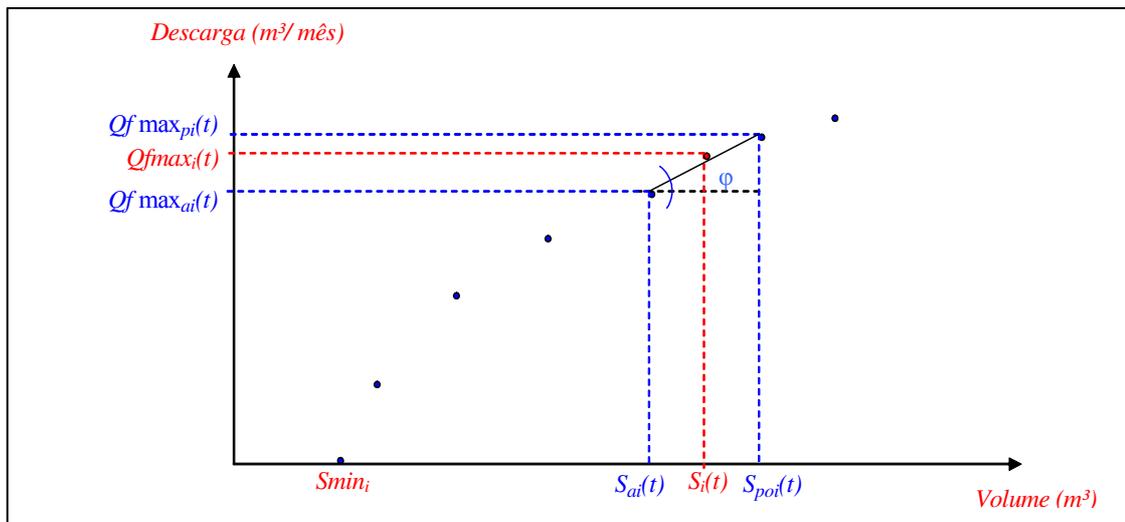
$S \max_i$  - é o armazenamento máximo, em  $m^3$ , do reservatório  $i$ ;

$S \min_i$  - é o armazenamento mínimo, em  $m^3$ , do reservatório  $i$ ;

Logo a descarga, para cada mês  $t$ , em um determinado reservatório  $i$ , via descarrega de fundo, será representada pela combinação da inequação 5.26 e a equação da reta representada na Figura 5.7, ou seja:

$$0 \leq Qf_i(t) - z * S_i(t) \leq d \quad (5.31)$$

Com os volumes armazenados  $S_i(t)$  determinados na primeira iteração, pode-se determinar por interpolação as descargas máximas correspondente  $Qf_{max_c}(t)$ , a partir do gráfico descargas de fundo máxima x volume, para em seguida construir retas com os pontos posteriores e anteriores de  $S_c(t)$  e  $Qf_{max_c}(t)$ , em cada mês  $t$ , como se pode observar na Figura 5.8.



**Figura 5.8** – Linearização da curva descarga x volume armazenado ponto a ponto.

As intercessões e as inclinações para cada valor  $S_i(t)$  e  $Qf_{max_i}(t)$  podem ser determinadas pelas equações abaixo:

$$z(t) = tg \varphi = \left[ \frac{Q_{max_{pi}}(t) - Qf_{max_{ai}}(t)}{S_{poi}(t) - S_{ai}(t)} \right] \quad (5.32)$$

$$d(t) = Qf_{max_{pi}}(t) - z(t) * S_{poi}(t) \quad (5.33)$$

onde:

$z(t)$  - a inclinação da reta, no final do mês  $t$ ;

$d(t)$  - a intercessão da reta, no final do mês  $t$ ;

$S_{poi}(t)$  - ponto posterior ao volume armazenado  $S_i(t)$ , no final do mês  $t$ ;

$S_{ai}(t)$  - ponto anterior ao volume armazenado  $S_i(t)$ , no final do mês  $t$ ;

$Qf \max_{pi}(t)$  - ponto posterior a descarga máxima, no final do mês  $t$ ;

$Qf \max_{ai}(t)$  - ponto anterior a descarga máxima, no final do mês  $t$ ;

Logo a descarga máxima de fundo, em  $m^3$  para cada mês  $t$  em um determinado reservatório  $i$ , será representada pela combinação da inequação 5.26 e a equação da reta.

$$0 \leq Qf_i(t) - z(t) * S_i(t) \leq d(t) \quad (5.34)$$

O vertimento máximo foi estimado pela equação a seguir (Quintela, 1981):

$$Sp \max_i(t) = Cv_i * Bv_i * (Hv \max_i(t) - Hsol_i)^{1,5} \quad (5.35)$$

onde:

$Cv_i$  - é o coeficiente de descarga que depende da forma do vertedouro do reservatório  $i$ ;

$Bv_i$  - é a largura de base do vertedouro do reservatório  $i$ ;

$Hv \max_i(t)$  - é cota o nível máximo do reservatório  $i$  que gera a lâmina vertente máxima projetada para o vertedouro;

$Hsol_i$  - é a cota da soleira inferior do vertedouro do reservatório  $i$ ;

Neste modelo, as vazões vertidas só ocorrerão se, e somente se, o volume  $S_i(t)$  do reservatório  $i$  ultrapassar a cota da soleira inferior do vertedouro. Portanto, foi inserido na rotina de otimização do modelo um artifício que permite separar volume vertido do volume  $S_i(t)$  calculado pela equação do balanço hídrico em certo mês  $t$ .

A variável de decisão  $Sp_i(t)$ , proposta na função objetivo F02, representa o vertimento de um determinado reservatório  $i$  em instante  $t$  e tem que ser minimizada para que vertimento só ocorra quando volume  $S_i(t)$  for maior que  $S \max_i$ . Por outro lado, o volume vertido  $Sp_i(t)$ , em um determinado reservatório  $i$ , deve satisfazer também a inequação 5.27.

Para contemplar os objetivos de volumes meta nos reservatórios, a fim de atender os requerimentos operacionais do setor energético, de lazer e contenção de cheias, incluiu-se, neste modelo de simulação, o conceito do volume meta (Figuras 5.9 e 5.10).

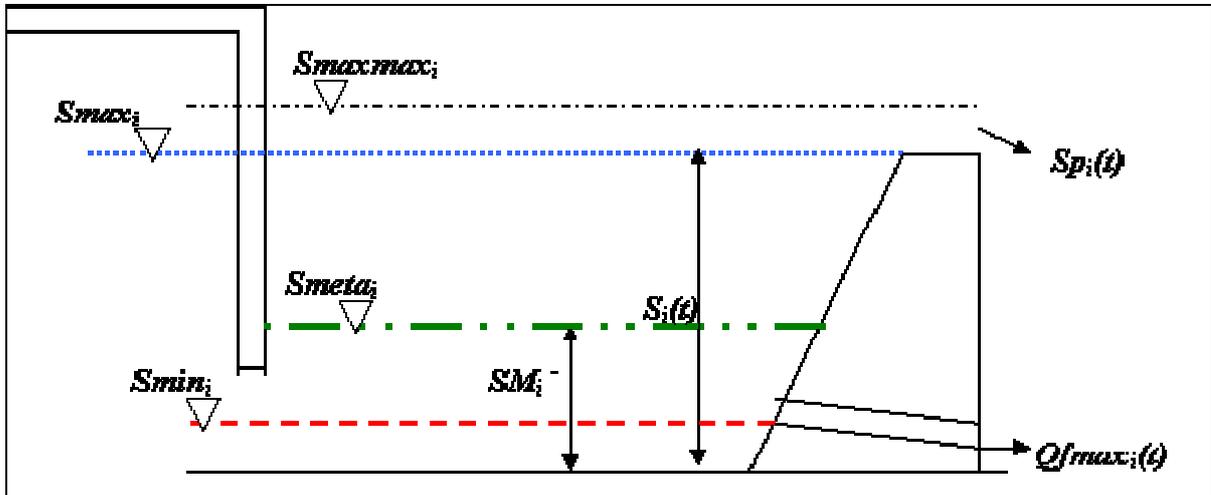
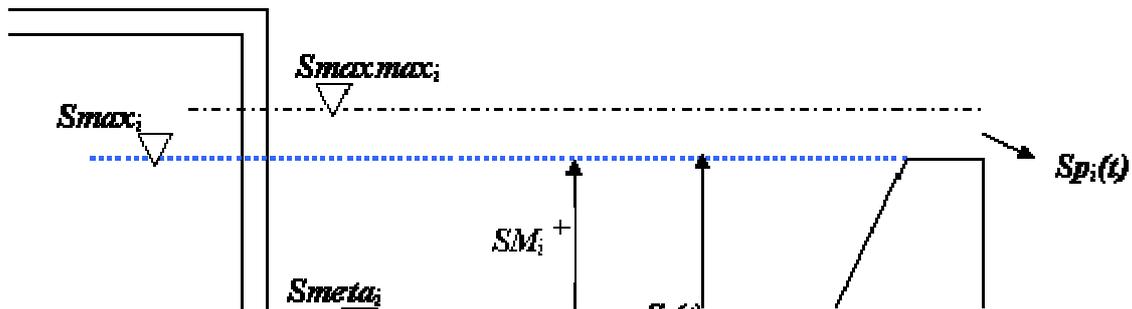


Figura 5.9 – Esquema do volume meta  $S_{meta}$  e o volume  $SM_i^-(t)$  em um reservatório  $i$



$$S_i(t) = S_{meta_i} + SM_i^+(t) - SM_i^-(t) \quad (5.36)$$

para as seguintes restrições de desigualdades:

$$0 \leq SM_i^-(t) \leq S_{meta_i} \quad (5.37)$$

$$0 \leq SM_i^+(t) \leq S_{max_i} - S_{meta_i} \quad (5.38)$$

Um problema que ocorre, normalmente, em regiões semi-áridas é a alta taxa de evaporação atuante, fazendo com que os reservatórios atinjam o volume mínimo rapidamente, podendo chegar à condição de completamente vazios. A maioria dos modelos simulação, vistos na literatura, repetem o valor do volume mínimo de um mês para outro quando ocorre a situação do reservatório estar com água armazenada igual ao volume mínimo. Para considerar essa possibilidade perante a cota mínima variável no modelo de simulação, utilizou-se também o conceito de volume meta, discutido anteriormente, sendo que a restrição do volume mínimo passa a ser um volume meta  $S_{min_i}$ , que o modelo procura manter no reservatório no mês  $t$  com alta prioridade, como se pode observar nas Figuras 5.11 e 5.12.

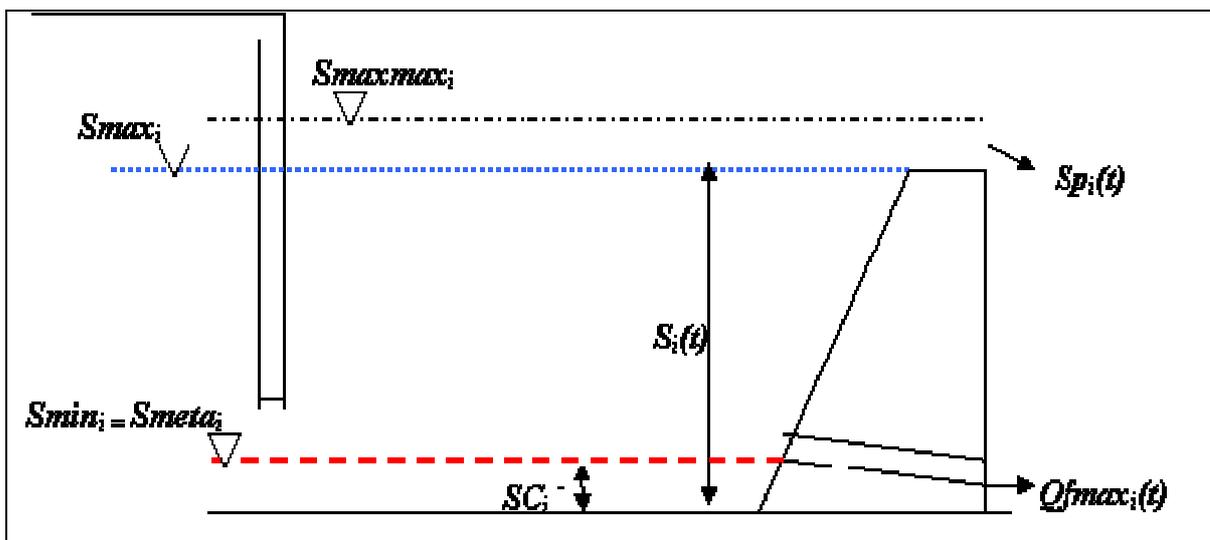
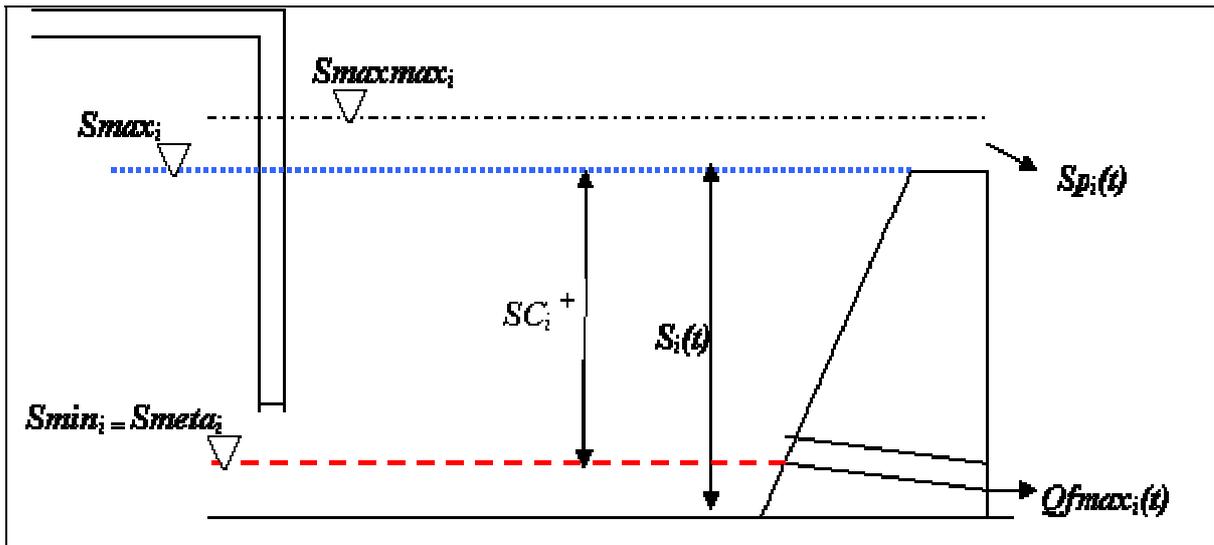


Figura 5.11 – Esquema do volume meta  $S_{min_i}$  e o volume  $SC_i^-(t)$  em um reservatório  $i$



**Figura 5.12** – Esquema do volume meta  $S_{min_i}$  e o volume  $SC_i^+(t)$  em um reservatório  $i$

Para estabelecer o atendimento a um volume mínimo  $S_{min_i}$ , procura-se maximizar o volume  $SC_i^-(t)$ , que é uma variável de decisão na função objetivo  $FO2$ , atribuindo a ela uma grande prioridade. Portanto, a Equação 5.39 representa o volume mínimo a ser atingido:

$$S_i(t) = S_{min_i} + SC_i^+(t) - SC_i^-(t) \quad (5.39)$$

para as seguintes restrições de desigualdades:

$$0 \leq SC_i^-(t) \leq S_{min_i} \quad (5.40)$$

$$0 \leq SC_i^+(t) \leq S_{max_i} - S_{min_i} \quad (5.41)$$

onde:

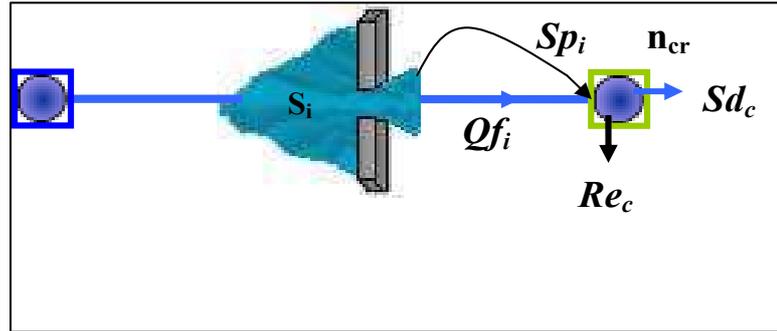
$SC_i^+(t)$  - é o volume útil armazenado em um reservatório  $i$ , no mês  $t$ .

### 5.1.6 – Outros componentes do sistema

O nó de passagem é também um componente do sistema, esse tipo de elemento permite a conexão de outros dois ou mais componentes (reservatório, links, etc.), e permite

realizar o balanço de massa, sem precisar utilizar o conceito de rede de fluxo. Num sistema qualquer, os nós de passagem podem ser considerados em diferentes situações.

A Figura 5.13, representa o balanço de massa entre as vazões provenientes do vertimento e da descarga de fundo de um reservatório  $i$ , e as vazões de saída  $Re_c(t)$  e  $Sd_c(t)$ , no nó de passagem  $n_{cr}$ .



**Figura 5.13** – Representação física do nó de passagem  $n_{cr}$ .

Para representar este balanço de massa no modelo de simulação proposto foi inserida, na rotina de otimização seqüencial, a Equação 5.48.

$$Q_{f_i}(t) + S_{p_i}(t) = Re_c(t) + Sd_c(t) \quad (5.48)$$

para as seguintes restrições de desigualdade:

$$0 \leq Sd_c(t) \leq Sd \max_c \quad (5.49)$$

$$0 \leq Re_c(t) \leq De \max_c \quad (5.50)$$

onde:

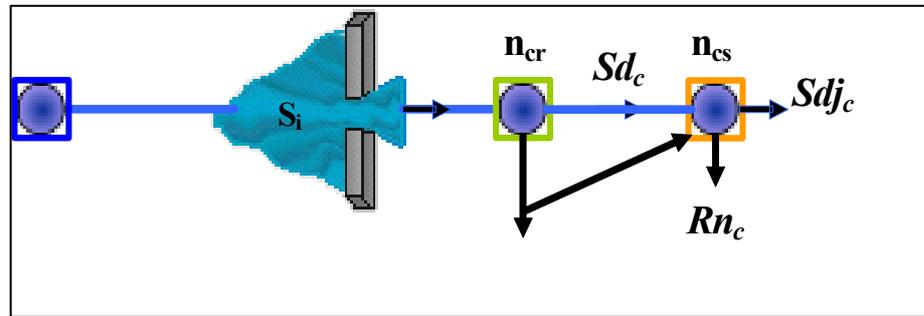
$Re_c(t)$  - é a retirada da vazão ecológica no instante  $t$ , no nó de passagem  $n_{cr}$ ;

$Sd_c(t)$  - é a vazão residual, no instante  $t$ , no nó de passagem  $n_{cr}$ ;

$Sd \max_c$  - é o limite máximo da vazão residual  $Sd_c(t)$ ;

$De \max_c$  - é o limite máximo da retirada da vazão ecológica  $Re_c(t)$ .

A parte retirada da vazão ecológica considerada no modelo de simulação proposto, será considerada no balanço hídrico da próxima situação representado pela Figura 5.14 .



**Figura 5.14** – Representação física do nó de passagem  $n_{cs}$ .

Seguindo o mesmo princípio proposto anteriormente para representar o balanço hídrico no nó de passagem  $n_{cs}$  foi utilizada a Equação 5.51 abaixo:

$$Re_c(t) + Sd_c(t) = Rn_c(t) + Sdj_c(t) \quad (5.51)$$

para as seguintes restrições de desigualdade:

$$0 \leq Sdj_c(t) \leq Sdj_{max_c} \quad (5.52)$$

$$0 \leq Rn_c(t) \leq Dn_{max_c} \quad (5.53)$$

onde:

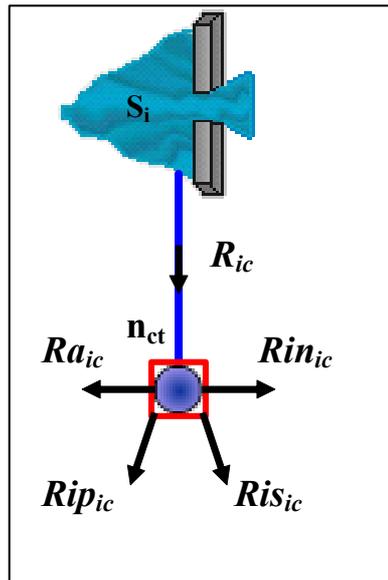
$Rn_c(t)$  - é a retirada de um determinado uso no instante  $t$ , no nó de passagem  $n_{cs}$ ;

$Sdj_c(t)$  - é a vazão residual na saída, no instante  $t$ , no nó de passagem  $n_{cs}$ ;

$Sdj_{max_c}$  - é o limite máximo da vazão residual  $Sdj_c(t)$ ;

$Dn_{max_c}$  - é o limite máximo da retirada  $Rn_c(t)$ .

Outra situação que pode se encontrar para o nó de passagem está representada na Figura 5.15 abaixo:



**Figura 5.15**– Representação física do nó de passagem  $n_{ct}$

Para esta situação, a representação matemática do balanço de massa é dada pela Equação 5.54.

$$R_{ic}(t) = Ra_{ic}(t) + Rip_{ic}(t) + Ris_{ic}(t) + Rin_{ic}(t) \quad (5.54)$$

para as seguintes restrições de desigualdade:

$$0 \leq Ra_{ic}(t) \leq Da \max_{ic} \quad (5.55)$$

$$0 \leq Rip_{ic}(t) \leq Dip \max_{ic} \quad (5.56)$$

$$0 \leq Ris_{ic}(t) \leq Dis \max_{ic} \quad (5.57)$$

$$0 \leq Rin_{ic}(t) \leq Din \max_{ic} \quad (5.58)$$

onde:

$Ra_{ic}(t)$  - é a retirada de água para o abastecimento humano e pecuário, no nó  $n_{ct}$ , no mês  $t$ ;

$Rip_{ic}(t)$  - é a retirada de água para a irrigação para cultura perene, no nó  $n_{ct}$ , no mês  $t$ ;

$Ris_{ic}(t)$  - é a retirada de água para a irrigação para cultura sazonal, no nó  $n_{ct}$ , no mês  $t$ ;

$Rin_{ic}(t)$  - é a retirada de água para a indústria, no nó  $n_{ct}$ , no mês  $t$ ;

$Da_{max_{ic}}$  - Demanda máxima de abastecimento humano e a pecuária no nó  $n_{ct}$ ;

$Din_{max_{ic}}$  - Demanda máxima da indústria no nó  $n_{ct}$ ;

$Dip_{max_{ic}}$  - Demanda máxima para a irrigação de culturas perenes estimada pela Equação 5.8 no nó  $n_{ct}$ ;

$Dis_{max_{ic}}$  - Demanda máxima para a irrigação de culturas sazonais estimada pela Equação 5.9 no nó  $n_{ct}$ ;

### 5.1.7 – Cálculo dos indicadores de desempenho do sistema

Com as retiradas ótimas determinadas pela rotina de programação linear seqüencial do modelo de simulação integrado foi possível determinar os indicadores de desempenho definidos por Hashimoto et al. (1982), que são: a confiabilidade, a resiliência e a vulnerabilidade.

### 5.1.8 – Análise de convergência do modelo de simulação

O modelo de simulação é executado com base em um programa principal chamado de *Simula*, responsável por chamar mês a mês a rotina de programação linear seqüencial, onde está inserida toda modelagem matemática descrita anteriormente, apoiando-se em arquivos como *Dados* que contém todos os valores pertinentes ao sistema, e o arquivo *Estima*, que é responsável por estimar as demandas de irrigação máximas de culturas perenes e sazonais em cada mês, além de outros arquivos, onde estão representadas as matrizes com as equações e inequações do modelo e que entrarão na rotina de otimização linear do MATLAB, chamada de *Linprog*. A impressão dos resultados também está inserida no arquivo *Simula*.

Como o modelo entra num processo iterativo, a convergência é analisada, através dos valores calculados para a função objetivo em cada iteração. Para se obter uma boa precisão numérica o seguinte erro relativo é analisado:

$$\text{errofo} = \left| \frac{FO_t - FO_{t-1}}{FO_t} \right| \leq \text{Tolerância} \quad (5.59)$$

Deve respeitar uma tolerância numérica especificada de 0,00001, valor adotado neste trabalho em todo o processo de simulação.

## CAPÍTULO VI

### ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão apresentadas a descrição e os dados relativos às características fisiográficas, climáticas e hidrológicas da bacia do Rio Piancó - PB, bem como os cenários de demandas do subsistema em estudo utilizado na aplicação do modelo de simulação desenvolvido neste trabalho. A descrição e os dados da bacia hidrográfica do Rio Piancó - PB foram coletados do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó - PB (SCIENTEC, 1997).

#### **6.1 – Bacia Hidrográfica do Rio Piancó**

##### **6.1.1 – Localização**

Pertencente ao conjunto das sete sub-bacias do rio Piranhas, a bacia do rio Piancó está localizada no Sudoeste do estado da Paraíba, no Nordeste do Brasil, entre os paralelos 6° 43' 51'' e 7° 58' 15'' Sul e meridianos 37° 27' 41'' e 38° 42' 49'' a Oeste de Greenwich e está inserida no perímetro do semi-árido. Limita-se ao Leste com a sub-bacia do rio Espinharas, ao Oeste com o estado do Ceará, ao Sul com estado de Pernambuco e ao Norte com as sub-bacias do Alto e Médio Piranhas (Figura 6.1). O rio principal é o rio Piancó, que nasce na Serra de Umbuzeiro no município de Santa Inês e deságua no rio Piranhas, no município de Pombal, tendo suas principais afluições vindas dos riachos: Várzea de Boi, Miguel, Madruga, Goiabeira, Catolé, Passagem de Pedra, Pilões, Vaca da Morta, Cachoeira Grande, Brusca, Saco, Santana, Fartura, Canas, Serra Vermelha, Meio, Aguiar, Campi Verde, Cachoeira, Ortis, Coelho e Humaitá. Possui uma área de, aproximadamente, 9.228 km<sup>2</sup>, onde está localizada a maior reserva hídrica do estado da Paraíba, que são os reservatórios interligados Coremas - Mãe D'água, com uma capacidade de armazenamento de cerca 1,37 bilhões de m<sup>3</sup> de água. O subsistema de reservatórios utilizado no estudo de caso, reservatórios Catolé II e Poço Redondo, está situado nesta bacia hidrográfica e está localizado a montante do Coremas - Mãe D'água.

### 6.1.2 – Vegetação

A cobertura vegetal nativa é tipo xerófito, pertencente ao bioma caatinga. É uma vegetação com características homogêneas, porte arbóreo e arbustivo, com formações lenhosas, geralmente com espinhos, plantas suculentas e com estratos herbáceos normalmente no período do inverno.

A vegetação da bacia tem maior predominância a Leste e Sudeste e é mais rara ao Centro-Oeste e Nordeste. É muito vulnerável a partir do momento em que não é explorada racionalmente, aspecto que vem predominando na bacia. A área de antropismo como a agricultura irrigada e o desmatamento já ocupam mais da metade das terras, em consequência, ocorre o processo de desertificação da região. A SCIENTEC (1997) estima que os impactos negativos afetem uma área da ordem de 6.187 km<sup>2</sup>, equivalente a 67,4% da área total. Este fato é bastante preocupante, visto que a cobertura vegetal é de grande importância na interceptação das chuvas, que minimiza o processo de erosão, bem como melhora o processo de infiltração nos solos.

### 6.1.3 – Climatologia

Nos limites da bacia, próximo do município de Triunfo, domina o clima tipo *Awig*, de acordo com a classificação de Köppen, enquanto no restante da bacia são classificados como *BSh'*. A umidade relativa média anual varia entre 64% a 72%, chegando, nos meses mais chuvosos, a uma umidade de 81% e nos meses secos a 60%. A temperatura média anual chega a 24 °C, com uma amplitude térmica de 4 °C. Nos meses de outubro a janeiro ocorrem às temperaturas mais elevadas e nos meses entre março a maio ocorrem às temperaturas mais baixas.

A insolação média diária varia em torno de 7,3 horas nas circunvizinhanças da Serra de Triunfo a 8,7 no restante da bacia. A velocidade média dos ventos na bacia pode atingir a 2,8 m/s.

A evaporação potencial, geralmente, é estimada a partir de dados climáticos ou medidos através de tanques evaporimétricos, adotando-se um coeficiente de correção que varia de 0,7 a 0,8, dependendo do tipo de estação. A evaporação anual, na bacia, chega a 3.000 mm. Já a precipitação média anual fica em torno de 810 mm, sendo que nos meses de fevereiro a abril a precipitação chega a 60% desse valor, apresentando uma variação anual em torno de 40%.

#### 6.1.4 – Pedologia

Nas terras da bacia foram constatados nove classes de solos, de acordo com estudo e avaliações de solos apresentados sinteticamente no Plano Diretor de Recursos Hídricos das Bacias do Piancó – Piranhas (1997). São eles: Litossolos, Bruno Não Cálculo, Podzólicos, Cambissolos, Regossolos, Aluvissolos, Vertissolos, Solodizados, Latossolos e Afloramento de Rocha. A partir de novos levantamentos existentes, em uma abordagem mais generalizada, os solos foram classificados de acordo com sua capacidade de uso das terras, sendo enquadradas nas classes III, IV, VI, VII e VIII.

#### 6.1.5 – Capacidade de uso do Solo

A capacidade de uso avalia as possibilidades e limitações que os solos apresentam para exploração e considera as condições que propiciarão o seu empobrecimento e desgaste com cultivos anuais, perenes, pastagens, reflorestamentos, vida silvestre e outros usos. Na avaliação da capacidade de uso da bacia do rio Piancó, pelo referido plano, foram definidas cinco classes, inseridas em três grupos (SCIENTEC, 1997a, p.37):

- Grupo A - *terras passíveis de utilização com culturas anuais, perenes, pastagens e/ou reflorestamento e vida silvestre, comportando as classes II a IV;*
- Grupo B - *terras impróprias para cultivos intensivos, mas ainda adaptadas para pastagens e/ou reflorestamento e vida silvestre, porém cultiváveis em casos de algumas culturas especiais protetoras do solo, compreendendo as classes V a VII; e*
- Grupo C - *terras não adequadas para cultivos anuais, perenes, pastagens ou reflorestamentos, porém apropriados para proteção da flora e fauna, recreação ou armazenamento de água, compreendendo a classe VIII.*

A distribuição das classes de capacidade de uso do solo e suas respectivas áreas podem ser observadas nas Tabelas 6.1 e 6.2.

**Tabela 6.1** – Resumo das Classes de capacidade de uso do solo na bacia

<b>Grupo</b>	<b>Classe de capacidade</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(%) da área total</b>
<b>A</b>	III	1103,2	12,1
	IV	1472,7	16,0
<b>B</b>	VI	1558,1	16,9
	VII	4625,1	50,3
<b>C</b>	VIII	430,3	4,7

Fonte : SCIENTEC, 1997a p. 36

**Tabela 6.2** – Resumo das Classes de uso do solo na bacia

<b>Legenda</b>	<b>Classe de capacidade</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(%) da área total</b>
<b>Lvd</b>	Latossolos Vermelho Amarelo	1,75	0,02
<b>PE</b>	Podzólico Vermelho Amarelo	983,91	10,66
<b>RE</b>	Regossolo Eutrófico	223,05	2,42
<b>NC</b>	Bruno Não Cálcico	915,31	9,92
<b>Cc</b>	Cambissolo Eutrófico	310,33	3,36
<b>Ae</b>	Aluissolo Eutrófico	150,25	1,63
<b>Re</b>	Litossolo Eutrófico	6316,88	68,45
<b>Ar</b>	Afloramento de Rochas	8,34	0,09
<b>Total</b>		8909,8	100

Fonte : SCIENTEC, 1997a p. 36

### 6.1.6 – Relevo

O relevo da bacia apresenta uma altitude mediana igual a 461 m e uma altitude média de 485 m. Verifica-se que apenas 5% da área encontra-se em altitudes bastante elevadas e o restante corresponde a altitudes que variam de 260 a 790 m, caracterizando um relevo de moderado a forte.

## **6.1.7 – Hidrologia**

### **6.1.7.1 – Superficial**

De acordo com a classificação da ordem dos cursos d'água de Strahler (citado por Villela e Mattos, 1975), a bacia é de ordem 7, tendo como rio principal o Piancó com um comprimento de 208 km, onde recebe contribuições de 20 cursos d'água.

A bacia do rio Piancó é relativamente compacta e regular, possui um fator de forma igual a 0,21 e um coeficiente de compacidade igual a 1,59, implicando que esta bacia é pouca sujeita a enchentes. Ela apresenta uma razoável densidade de drenagem chegando a 1,52 km/km<sup>2</sup>.

A capacidade de gerar escoamento é de 0,33, significando que o percurso da água da chuva em direção aos cursos d'água é relativamente elevado, fazendo a infiltração desempenhar um papel importante na forma do hidrograma.

### **6.1.7.2 – Subterrânea**

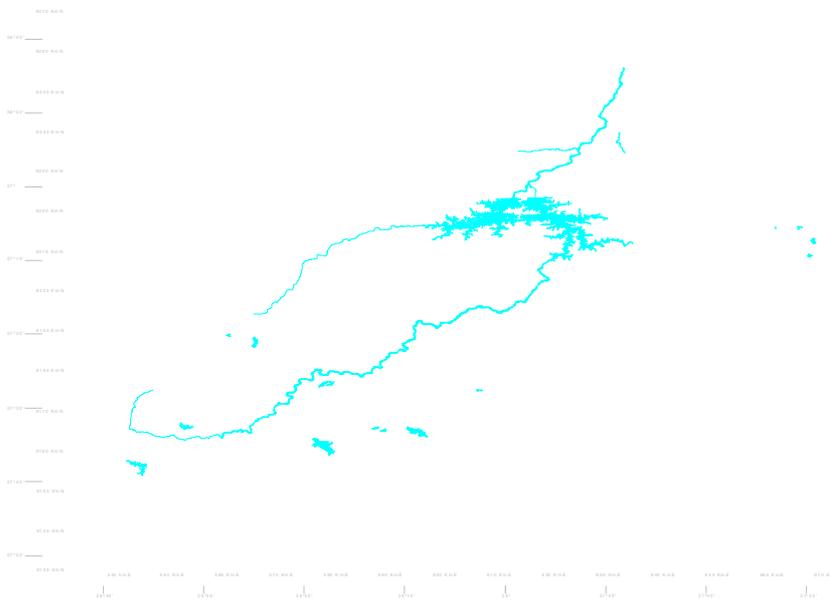
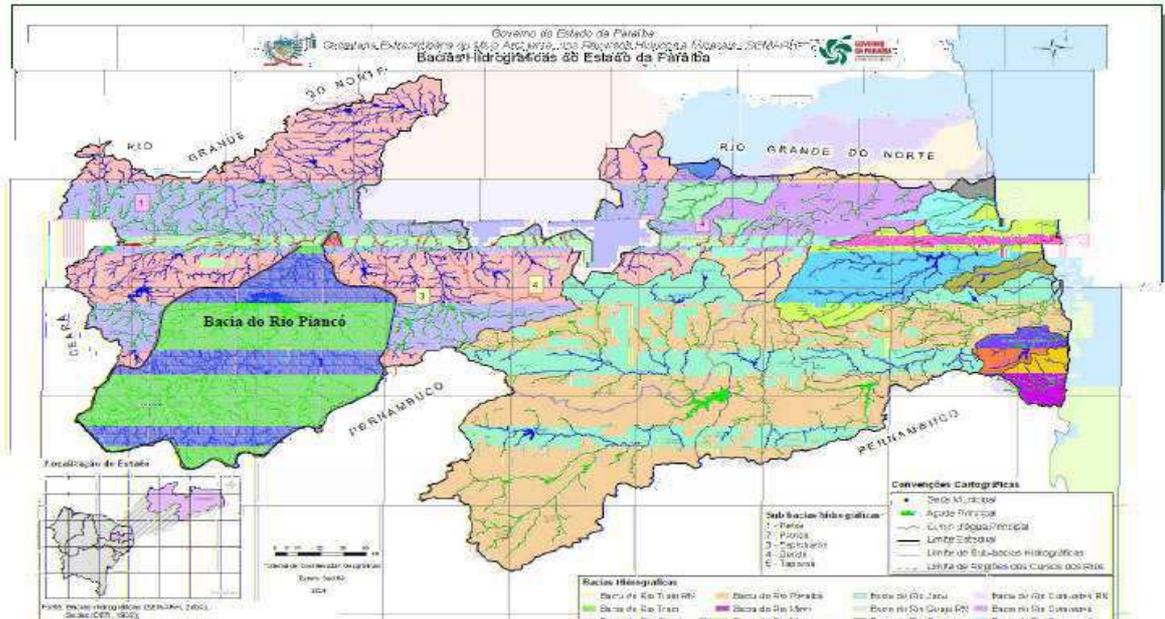
Como o subsolo da região semi-árida é de base predominante cristalina, o potencial de água subterrânea é bastante reduzido, não sendo diferente para a bacia do Rio Piancó. Segundo SCIENTEC (1997a, p. 160) o potencial de água subterrânea corresponde a 62,1 milhões de m<sup>3</sup>, sendo 49,6 milhões referentes a aluviões e 12,5 milhões de m<sup>3</sup> relativos a reservas renováveis do cristalino.

Da água que está disponível atualmente da bacia, a água subterrânea corresponde a 3,6% desta disponibilidade, tornando-se pouco significativa no momento para a análise do subsistema, justificando assim a não consideração da água subterrânea no balanço hídricos dos reservatórios.

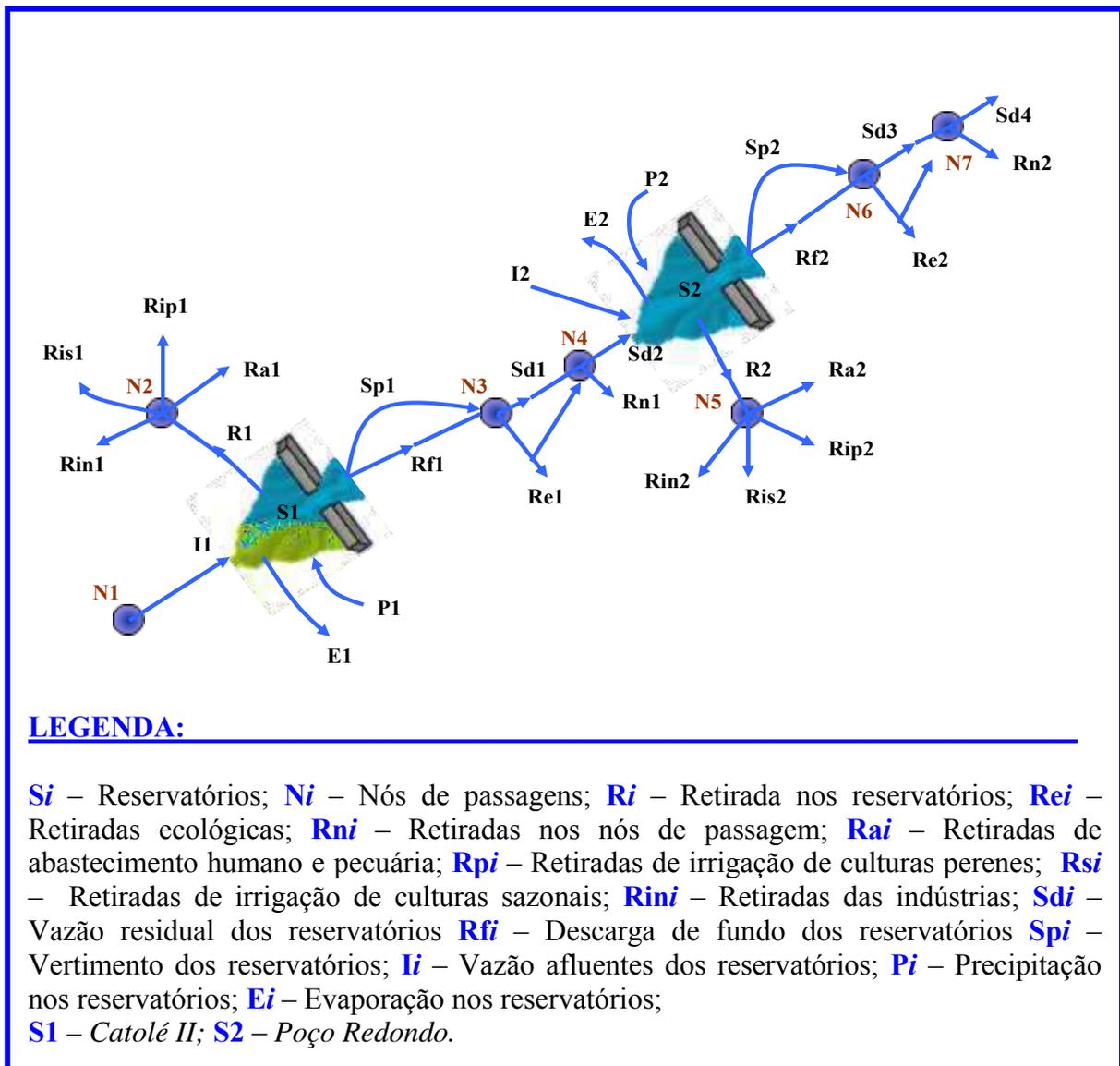
## **6.1.8 – Qualidade das águas**

O crescimento populacional, a industrialização e a busca por alimento vêm fazendo com que o homem intervenha cada vez mais nos recursos hídricos de forma nada racional. Com isso, tem-se colhido resultados como a poluição dos mananciais e, conseqüentemente, afetando a qualidade da água. Mais preocupante é que ocorra na região semi-árida, onde os rios, na sua maioria, são intermitentes e, portanto, não podem ser utilizados como diluidores

de despejos. As águas do subsistema estudado são classificadas como C1-S1 e no modelo de simulação proposto, não foi levado em consideração o aspecto qualitativo, pois o objetivo desta pesquisa é puramente o aspecto quantitativo.



6.2). Juntos possuem uma capacidade máxima 99,36 milhões de metros cúbicos e estão à montante do reservatório Coremas – Mãe D'água. São, também, mostradas na Figura 6.2 as variáveis de vazões de entrada e saída de cada componente do sistema que serão disponibilizadas pelo modelo de simulação para serem utilizadas em sua análise, contemplando os possíveis usos em um sistema de recursos hídricos.



**Figura 6.2** – Layout do sistema com as possíveis variáveis de decisão do modelo.

### 6.2.1 – Reservatório Catolé II

O açude Catolé II está localizado na latitude 7,69° Sul e longitude 38,18° Oeste. Tem uma capacidade de armazenamento de 10,5 milhões de metros cúbicos e foi construído com a

finalidade de atender o abastecimento da cidade de Manaíra e um perímetro irrigado, da iniciativa privada, com uma área de 29,2 ha.

### **6.2.2 – Reservatório Poço Redondo**

O açude de Poço Redondo está localizado na latitude 7,58° Sul e longitude 38,30° Oeste. Tem uma capacidade de armazenamento de 62,75 milhões de metros cúbicos e foi construído com a finalidade atender o projeto público de irrigação de Poço Redondo, com uma área 250 ha, e o abastecimento da cidade de Santana de Mangueira.

## **6.3 – Dados de entrada do subsistema para o modelo de simulação**

### **6.3.1 – Período de simulação**

O horizonte de tempo utilizado para simular subsistema Catolé II e Poço Redondo será de 684 meses.

### **6.3.2 – Prioridades**

Nem todas as possíveis variáveis de decisão utilizadas no modelo, que foram apresentadas na Figura 6.2 acima, serão determinadas. Isso irá depender das finalidades de uso dos reservatórios e das limitações operacionais do sistema, quando da simulação de cada cenário para o sistema em estudo. Com relação aos níveis de prioridades da função objetivo proposta, foram atribuídos valores de acordo com o estabelecido pela Lei 9.433, que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil, onde o abastecimento humano tem prioridade máxima.

Foram definidas 32 variáveis de decisão no modelo para representar o subsistema em estudo, sendo que nem todas são associadas a preferências (coeficientes) na função objetivo e, neste caso, é assumido ter prioridade igual a zero, ou seja, a variável de decisão não é considerada na função objetivo. A Tabela 6.3 mostra os valores das prioridades adotadas no modelo de simulação para o sistema em estudo.

**Tabela 6.3** – Valores das prioridades para cada variável de decisão

Reservatório de Catolé II			Reservatório de Poço Redondo		
Valores das prioridades	Variáveis de Decisão	Descrição	Valores das prioridades	Variáveis de decisão	Descrição
$10e^9$	Ra1	Retirada para abastecimento	$10e^9$	Ra2	Retirada para abastecimento
$10e^8$	Rip1	Retirada para irrigação de culturas perenes	$10e^8$	Rip2	Retirada para irrigação de culturas perenes
$10e^7$	Ris1	Retirada para irrigação de culturas sazonais	$10e^7$	Ris2	Retirada para irrigação de culturas sazonais
$10e^{12}$	Sp1	Vertimento	$10e^{12}$	Sp2	Vertimento
$10e^{11}$	SC1	Volume abaixo da cota mínima	$10e^{11}$	SC2	Volume abaixo da cota mínima
$10e^3$	SM1	Volume abaixo da cota meta	$10e^3$	SM2	Volume abaixo da cota meta
$10e^2$	Re1	Retirada para vazão ecológica	$10e^2$	Re2	Retirada para vazão ecológica
0	Sd1	Vazão residual	$10e^8$	Sd3	Vazão residual

### 6.3.3 – Precipitação

Os dados pluviométricos mensais utilizados na simulação para cada reservatório foram obtidos do posto pluviométrico mais próximo do subsistema, que é o de Manaíra no município de Manaíra (SUDENE, 1990). Estes dados são apresentados no Anexo 1.

### 6.3.4 – Vazões Afluentes aos reservatórios

As vazões afluentes, foram obtidas do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PDRH-PB, 1997) para uso no modelo simulação do subsistema em estudo. Foi gerado a partir do modelo MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável) uma série de 57 anos de vazões afluentes ( $m^3/s$ ) para cada reservatório, as quais estão apresentadas nos Anexos 2 e 3.

### 6.3.5 – Evaporação nos reservatórios

Os dados de evaporação média mensal para os dois reservatórios foram obtidos do Tanque Classe A do posto Climatológico de Coremas, onde se utilizou um coeficiente de correção de 0,7, conforme mostrado na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4** – Dados de evaporação média mensal do Tanque classe A.

Posto	Evaporação média mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Coremas	272,3	215,4	204,1	182,4	183,1	182,2	219,9	271,9	299,6	332,9	319	310,6

Fonte: Plano Diretor de Recursos Hídricos - PDRH (1997)

### 6.3.6 – Abastecimento Humano e a Pecuária

O reservatório Catolé II está comprometido com o abastecimento urbano e rural da cidade de Manaíra, com uma população aproximadamente de 13.879 hab. de acordo com o censo de 2000 do IBGE. Com relação à pecuária, de acordo com o documento de Pesquisa da Pecuária Municipal da Fundação IBGE, relativos aos anos 1974 a 1994, o número de cabeças é em torno de 7463 entre bovinos, suínos, ovinos, caprinos e eqüinos.

De acordo com as mesmas fontes, o reservatório Poço Redondo abastece a cidade de Santana de Mangueira, que possui uma população urbana e rural de aproximadamente 6.068 hab. Com relação à pecuária, possui em torno de 5.026 cabeças dentre os animais já citados.

### 6.3.7 – Irrigação

Para o sistema em estudo, existe um projeto de irrigação, da iniciativa privada, vinculado ao reservatório Catolé II, com uma área de 29,2 ha e um projeto público de irrigação, que é o perímetro de Poço Redondo, com uma área de 500 ha, que será atendido pelo reservatório Poço Redondo. Portanto, neste trabalho, a demanda máxima de irrigação mensal foi estimada para um conjunto de culturas perenes e sazonais, a partir da área máxima irrigável em m<sup>2</sup>, que será dividida igualmente para cada cultura.

As culturas selecionadas foram obtidas a partir do manual de Orçamento Agropecuário do Banco do Nordeste S/A (2003) e estudos de Silva (2004), onde foram levados em consideração dois pontos importantes na análise do comportamento hídrico do sistema: a aptidão agrícola e os sistemas de irrigação implantados. Nas tabelas 6.5 e 6.6 são apresentados

os dados utilizados na determinação de  $Dipmax_{ic}$  e  $Dismax_{ic}$  para cada reservatório do subsistema utilizado.

**Tabela 6.5** – Distribuição dos coeficientes de cultivos (kc) e plano de cultivo das culturas no ano hidrológico.

Culturas	Meses do ano hidrológico											
	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul
<b>Manga</b>	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
<b>Goiaba</b>	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
<b>Coco</b>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>Mamão</b>	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
<b>Limão</b>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>Melancia (s)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,91	0,98	0,82
<b>Melancia (es)</b>	0,00	0,67	0,91	0,98	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Melão (s)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,75	1,00	0,75
<b>Melão (s)</b>	0,00	0,45	0,75	1,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Tomate (s)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,75	1,15	0,80
<b>Tomate (es)</b>	0,00	0,45	0,75	1,15	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Engenharia de Irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados. Aspersão e Gotejamento (Gomes, 1999) onde: s – safra; es – entressafra.

**Tabela 6.6** – Dados do sistema de irrigação aplicado às culturas.

Culturas	Sistema de irrigação	Esis (%)	Eirr (%)
<b>Manga</b>	microaspersão	90	90
<b>Goiaba</b>	microaspersão	90	90
<b>Coco</b>	microaspersão	90	90
<b>Mamão</b>	microaspersão	90	90
<b>Limão</b>	microaspersão	90	90
<b>Melancia (s)</b>	gotejamento	90	92
<b>Melancia (es)</b>	gotejamento	90	92
<b>Melão (s)</b>	gotejamento	90	92
<b>Melão (s)</b>	gotejamento	90	92
<b>Tomate (s)</b>	gotejamento	90	92
<b>Tomate (es)</b>	gotejamento	90	92

Fonte: COIPI – Cooperativa Agropecuária dos Irrigantes do Projeto Piancó, 2003.

Onde: **Esis** – Valor percentual da eficiência do sistema de distribuição para irrigação por cultura; **Eirr** – Valor percentual da eficiência da aplicação da irrigação por ha.

### 6.3.8 – Reservatórios

Os dados mostrados nesta seção são de natureza operacional (volumes máximo e mínimo, volume meta) e estruturais (relação cota x área x volume, dados referentes às características físicas dos vertedouro, descarga de fundo, vazões máximas e mínimas) referentes aos dois reservatórios em estudo.

#### 6.3.8.1 – Relação cota x área x volume

A partir da relação área x volume, apresentada na Tabela 6.7, pode ser analisado e calculado os volumes evaporados e precipitados em um reservatório no modelo de simulação.

**Tabela 6.7 – Dados cota x área x volume dos reservatórios.**

Reservatório Catolé II			Reservatório Poço Redondo		
Cota(m)	Volume (m3)	Área (m2)	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
119,0	0	0	75,0	0	0
120,0	1.060	2.120	76,0	30.648	18.084
121,0	4.720	5.200	77,0	55.776	61.296
122,0	18.900	23.160	78,0	80.904	129.636
123,0	51.700	42.440	79,0	106.032	223.104
124,0	105.160	64.480	80,0	131.160	341.700
125,0	183.800	92.800	81,0	251.008	532.784
126,0	296.920	133.440	82,0	370.856	843.716
127,0	440.800	154.320	83,0	490.704	1.274.496
128,0	620.500	205.080	84,0	610.552	1.825.124
129,0	867.780	289.480	85,0	730.400	2.495.600
130,0	1.193.320	361.600	86,0	934.016	3.327.808
131,0	1.581.160	414.080	87,0	1.137.632	4.363.632
132,0	2.030.620	484.840	88,0	1.341.248	5.603.072
133,0	2.552.440	558.800	89,0	1.544.864	7.046.128
134,0	3.152.060	640.440	90,0	1.748.480	8.692.800
135,0	3.845.080	745.600	91,0	1.921.368	10.527.724
136,0	4.630.260	824.760	92,0	2.094.256	12.535.536
137,0	5.499.780	914.280	93,0	2.267.144	14.716.236
138,0	6.457.000	1.000.160	94,0	2.440.032	17.069.824
139,0	7.506.360	1.098.560	95,0	2.612.920	19.596.300
140,0	8.655.800	1.200.320	96,0	2.810.872	22.308.196
140,5	9.267.190	1.245.240	97,0	3.008.824	25.218.084
141,0	9.901.200	1.290.800	98,0	3.206.776	28.325.844
141,5	10.500.000	1.360.746	99,0	3.404.728	31.631.596
			100,0	3.602.680	35.135.300
			101,0	3.902.249	38.500.740
			102,0	4.100.181	41.875.217
			103,0	4.401.635	45.321.348
			104,0	4.599.569	49.275.120
			105,0	4.902.543	55.020.408
			106,0	5.111.049	58.552.215
			107,0	5.414.021	62.751.154

### 6.3.8.2 – Volumes Máximos e Mínimos

De acordo com as especificações técnicas da SUPLAN, relativas aos reservatórios em estudo, os volumes máximos e mínimos utilizados no modelo são apresentados na Tabela 6.8.

**Tabela 6.8** – Dados dos volumes máximos e mínimos dos reservatórios.

<b>Reservatórios</b>	<b>Volume máximo (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume mínimo (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Catolé II</b>	10.500.000,00	484.840,00
<b>Poço Redondo</b>	62.751.154,00	5.603.072,00

Fonte: SCIENTEC, 1997.

### 6.3.8.3 – Volumes iniciais e metas

Os volumes iniciais utilizados na simulação dos dois reservatórios em estudo serão calculados como sendo 60% do volume máximo. O seu impacto dessa escolha nos resultados de uma simulação com 684 meses (57 anos) se torna desprezível a partir dos primeiros anos.

Já com relação aos volumes metas, estes foram considerados como sendo 30% do volume máximo, com finalidade de manter a água armazenada nos reservatórios para um possível combate a seca. Como pode ser observado na Tabela 6.9

**Tabela 6.9** – Dados dos volumes iniciais e metas dos reservatórios.

<b>Reservatórios</b>	<b>Volume inicial de simulação (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume meta (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Catolé II</b>	6.300.000,00	3.150.000,00
<b>Poço Redondo</b>	37.650692,40	18.825.346,20

### 6.3.8.4 – Descarregadores e Vertedouros

Os dados necessários para a determinação das vazões descarregadas pelos reservatórios  $Df_{max1}$  e  $Df_{max2}$ , são mostrados na Tabela 6.10. Para se determinar a vazão descarregada máxima a cada instante de tempo  $t$ , foi necessário fazer uso das relações cota x volume para cada reservatório e são apresentadas na Tabela 6.7.

**Tabela 6.10** – Dados das características físicas dos descarregadores de fundo dos Reservatórios.

<b>Reservatórios</b>	<b>Coefficiente de vazão (<math>C_f</math>)</b>	<b>Diâmetro do tubo (mm)</b>	<b>Área da seção transversal (<math>m^2</math>)</b>	<b>Cota da geratriz inferior (m)</b>
<b>Catolé II</b>	0,6	200	0,0314	127
<b>Poço Redondo</b>	0,6	500	0,1962	88

Fonte:  $C_f$  – (Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas; DAEE – Departamento de águas e energia elétrica do Estado de São Paulo, 2006; 2º edição)

As vazões mensais extravasadas pelo vertedouro são determinadas através da cota do nível d'água, a partir de sua cota de soleira no reservatório, obtida após a realização do balanço hídrico nos reservatórios. Com estes dados, pode-se estabelecer a relação dos vertimentos máximos dos reservatórios em estudo,  $Sp_{max1}$  e  $Sp_{max2}$ , que são calculados a partir dos dados apresentados na Tabela 6.11.

**Tabela 6.11** – Dados das características físicas dos vertedouros dos reservatórios.

<b>Reservatórios</b>	<b>Coefficiente de descarga do vertedor (<math>C_v</math>)</b>	<b>Largura do vertedor (m)</b>	<b>Cota da soleira inferior do vertedor (m)</b>
<b>Catolé II</b>	0,350	100	141,5
<b>Poço Redondo</b>	0,350	150	107

Fonte:  $C_v$  – (Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas; DAEE – Departamento de águas e energia elétrica do Estado de São Paulo, 2006; 2º edição)

### 6.3.9 – Vazões residuais máximas

Os limites máximos, apresentados na Tabela 6.12 abaixo, para as variáveis de decisão  $Sd1$ ,  $Sd2$ ,  $Sd3$  e  $Sd4$  do subsistema em estudo, que representam as vazões residuais, foram atribuídos de forma que sejam maiores que a soma das vazões das descargas máximas e vertidas dos reservatórios.

**Tabela 6.12** – Limites máximos dos intervalos das vazões residuais do sistema em estudo.

<b>Vazões residuais máximas (m<sup>3</sup>/mês)</b>			
<i>Sdmax1</i>	<i>Sdmax2</i>	<i>Sdmax3</i>	<i>Sdmax4</i>
10e <sup>20</sup>	10e <sup>20</sup>	10e <sup>30</sup>	10e <sup>30</sup>

#### 6.4 – Definições dos cenários

Com o intuito de se obter uma melhor compreensão e avaliação do potencial de uso da disponibilidade hídrica do subsistema, foram estabelecidos alguns cenários de demandas de uso d'água, atuais e projetadas para o futuro, quando mantidos a mesma situação climática e operacional dos reservatórios e os mesmos níveis de prioridades descritos anteriormente.

Para o cenário 01, correspondente ao ano de 2007, os dados das demandas máximas mensais, apresentados na Tabela 6.13, foram obtidos do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó – PB (1997), com exceção da área do perímetro e da demanda máxima para a vazão ecológica, que foram atribuídos aleatoriamente.

**Tabela 6.13** – Cenário 01 com os dados de demandas máximas e área máxima irrigável para o ano de 2007.

<b>Reservatório de Catolé II</b>		<b>Reservatório de Poço Redondo</b>	
<i>Damax<sub>c</sub></i> (l / s)	16,89	<i>Damax<sub>c</sub></i> (l / s)	8,08
<i>Dinmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0	<i>Dinmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0
<i>Demax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,05	<i>Demax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,5
<i>Dnmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0	<i>Dnmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0
Área irrigável (ha)	8	Área irrigável (ha)	80

Com relação o cenário 02, correspondente ao ano de 2013, os dados das demandas máximas mensais e a área do perímetro, apresentados na Tabela 6.14, foram obtidos do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó – PB (1997), já a demanda máxima para a vazão ecológica foi atribuída aleatoriamente. .

**Tabela 6.14** – Cenário 02 com os dados de demandas máximas e área máxima irrigável para o ano de 2013.

Reservatório de Catolé II		Reservatório de Poço Redondo	
<i>Damax<sub>c</sub></i> (l / s)	19,12	<i>Damax<sub>c</sub></i> (l / s)	9,31
<i>Dinmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0	<i>Dinmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0
<i>Demax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,05	<i>Demax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,5
<i>Dnmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0	<i>Dnmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0
Área irrigável (ha)	29,2	Área irrigável (ha)	500

Para o Cenário 03 foram utilizados os dados das demandas máximas de abastecimento humano e da pecuária e as demandas máximas para vazão ecológica apresentados na Tabela 6.14. Com relação área a ser irrigada para cada reservatório, foram consideradas duas situações:

- para o reservatório Catolé II foi atribuída uma área menor em comparação aos outros cenários, correspondendo a 4 ha, que foi dividida igualmente entre as culturas, e
- para o reservatório Poço Redondo foram utilizadas áreas ótimas para cada cultura, obtidas pelo modelo de otimização proposto por Santos (2007), que teve como objetivos maximizar a receita líquida e a mão-de-obra oriunda da agricultura irrigada e atender os requerimentos de vazão para o abastecimento e ecológica, assim como maximizar o volume que está abaixo da cota meta.

Para calcular a área ótima por cultura, foram considerados os critérios referentes ao abastecimento, a receita líquida e a mão-de-obra, onde se atribuiu o maior peso para o abastecimento e peso iguais para os outros critérios. As tabelas 6.15 e 6.16 apresentam os dados utilizados no modelo para a simulação do cenário 03.

**Tabela 6.15** – Cenário 03 com os dados de demandas máximas para os diferentes setores.

Reservatório de Catolé II		Reservatório de Poço Redondo	
<i>Damax<sub>c</sub></i> (l / s)	19,12	<i>Damax<sub>c</sub></i> (l / s)	9,31
<i>Dinmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,0	<i>Dinmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,0
<i>Demax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,05	<i>Demax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,5
<i>Dnmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,0	<i>Dnmax<sub>c</sub></i> (l / s)	0,0
Área (ha)	4	Área (ha)	450

**Tabela 6.16** – Cenário 03 com os dados de áreas ótimas.

<b>Culturas</b>	<b>Reservatório de Poço Redondo</b>
	<b>Áreas ótimas (ha)</b>
<b>Manga</b>	50
<b>Goiaba</b>	50
<b>Coco</b>	50
<b>Mamão</b>	50
<b>Limão</b>	50
<b>Melancia (s)</b>	50
<b>Melancia (es)</b>	50
<b>Melão (s)</b>	50
<b>Melão (s)</b>	50
<b>Tomate (s)</b>	50
<b>Tomate (es)</b>	50

**s** - safra; **es** - entressafra.

## CAPÍTULO VII

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão discutidos e analisados os resultados obtidos através da aplicação do modelo de simulação proposto. Os resultados são oriundos de um estudo feito para os reservatórios Catolé II e Poço Redondo, de forma integrada, para um período de 684 meses. Procurou-se analisar o comportamento do subsistema em relação ao atendimento das demandas e à satisfação das restrições operacionais.

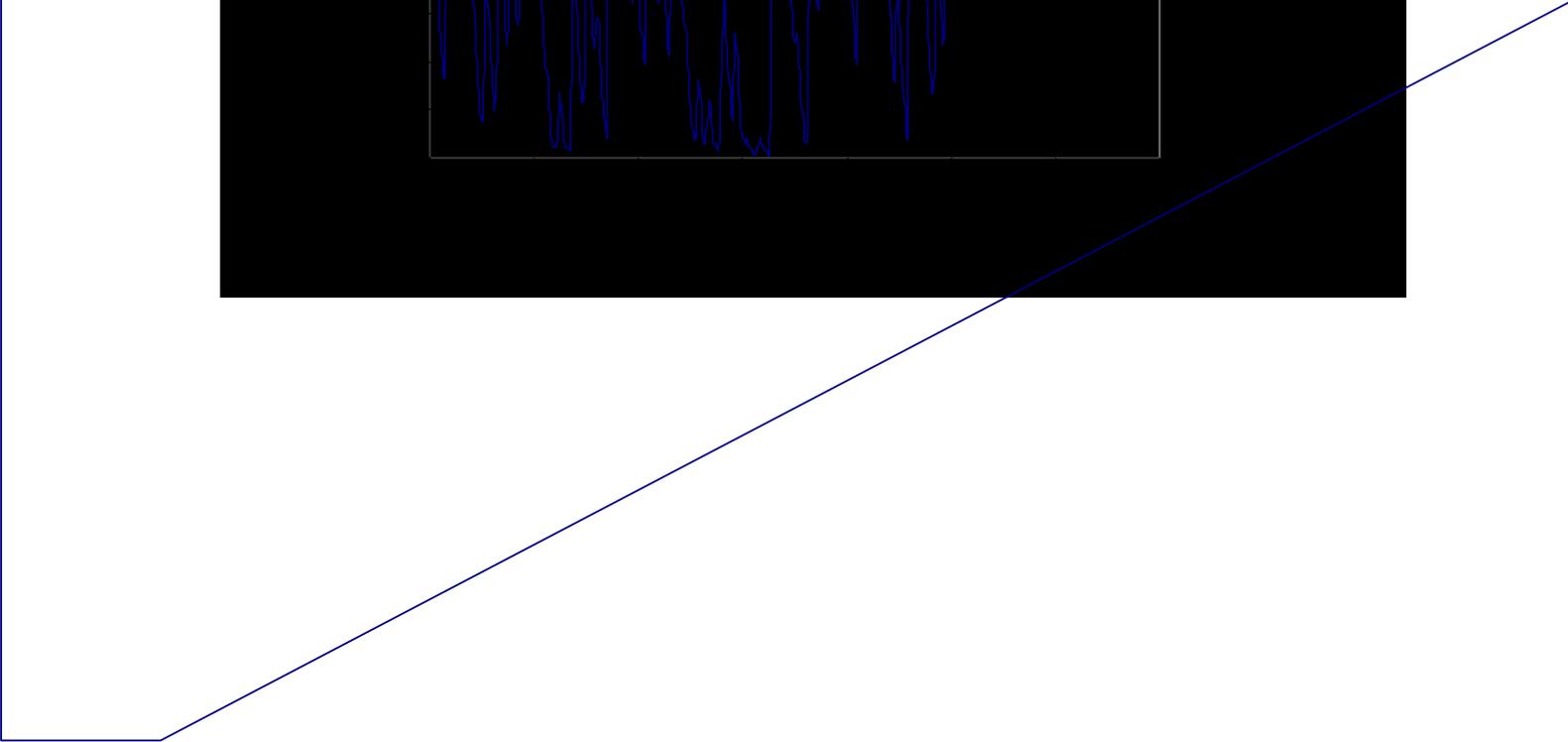
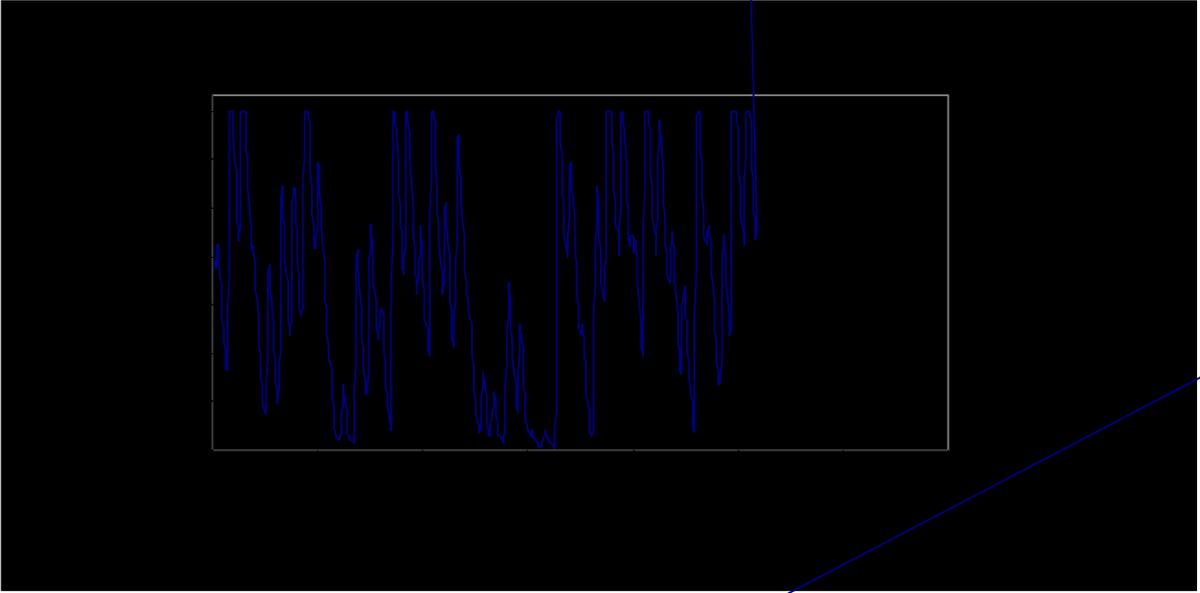
#### 7.1 – Cenário 01

##### 7.1.1 – Reservatório Catolé II

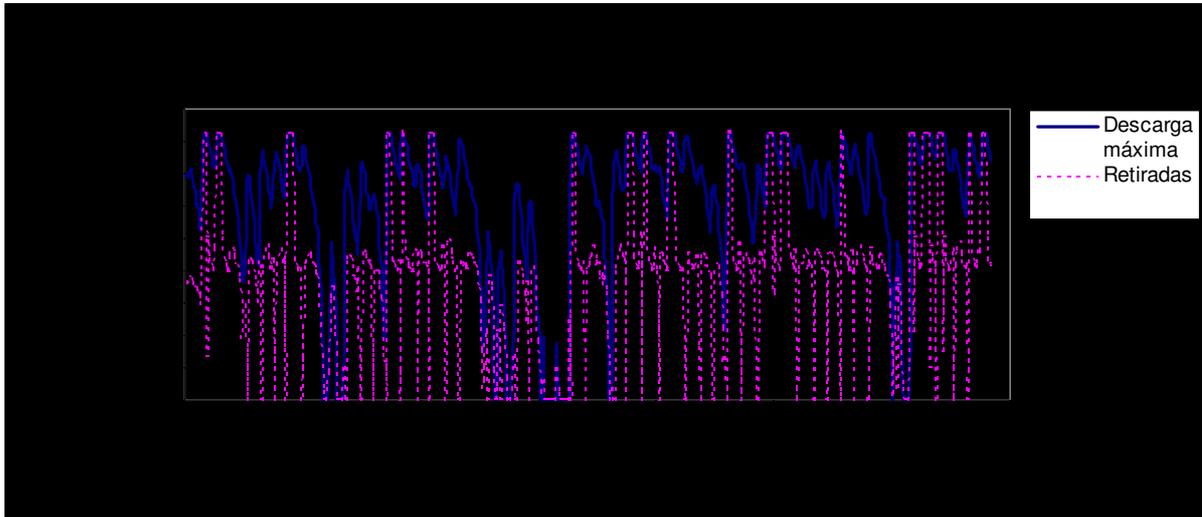
Os resultados obtidos na simulação do reservatório Catolé II, para este cenário, são apresentados na Tabela 7.1 e Figuras 7.1 a 7.6.

Com um volume inicial de 60% do volume máximo e volume meta igual a 30% do volume máximo, pode-se observar que nem sempre as restrições de volume mínimo foram respeitadas, conforme mostrada na Figura 7.1, assim como houve falhas no atendimento ao volume meta. O motivo é que, em determinados meses da série de dados, houve a ocorrência de severas secas, com pequenas vazões afluentes, que influenciaram diretamente no atendimento das demandas. Mais ainda, como o modelo de simulação é míope, ou seja, do conhecimento do estado do sistema no instante  $t-1$  faz-se à alocação de água para o instante  $t$  e, uma vez entrando num regime de pouca afluência, com o volume do reservatório próximo do crítico, ocorreu à violação da restrição de volume mínimo.

Observa-se, também, na Figura 7.1 a grande variabilidade do volume no reservatório Catolé II, típico de reservatórios de pequenos portes, indicando, também, o uso de quase toda a disponibilidade hídrica do mesmo.

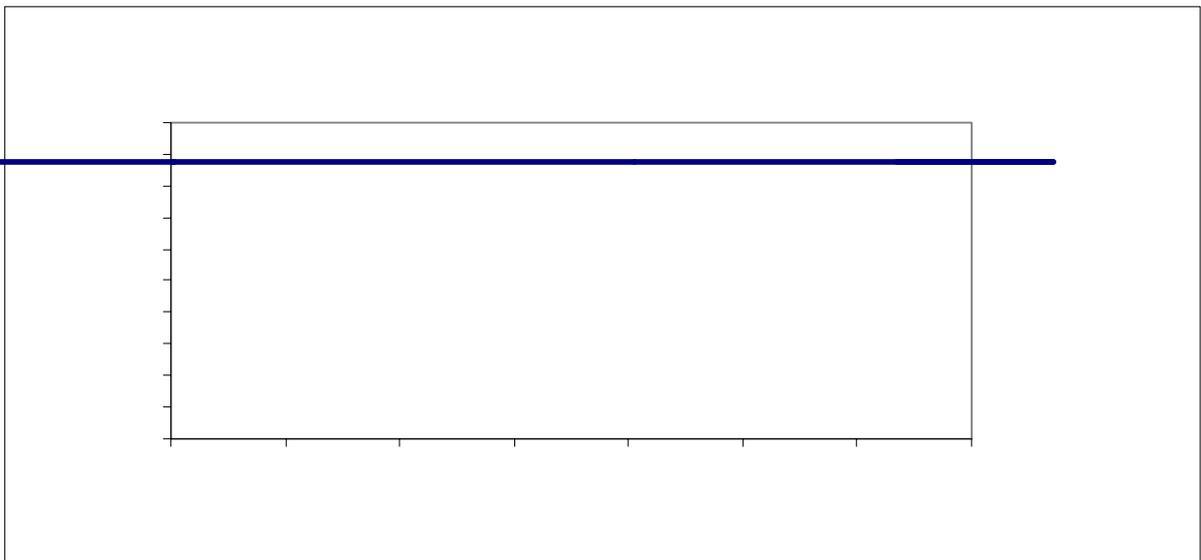


descarga máxima, que é limitada pela sua cota hidráulica em cada mês  $t$ . A Figura 7.3 mostra o comportamento das retiradas feitas através da descarga de fundo em cada mês  $t$ .

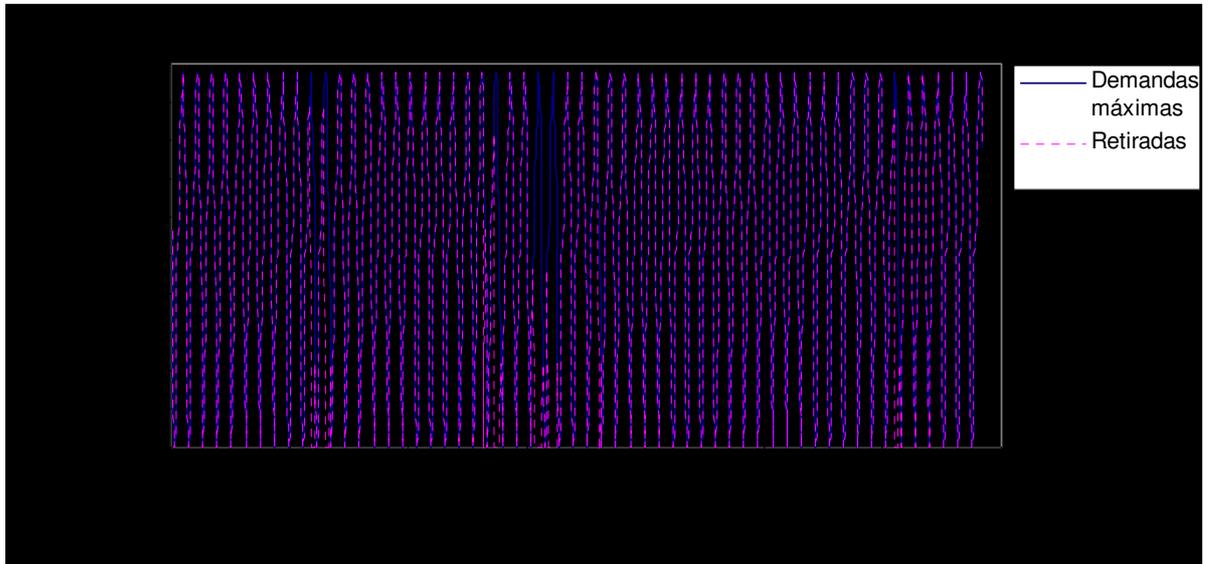


**Figura 7.3** – Retiradas pela descarga de fundo no açude Catolé II no cenário 01.

As retiradas para o abastecimento humano e a pecuária foram quase todas atendidas, com exceção nos meses onde ocorreram severas secas. Apesar de se ter pouca disponibilidade de água durante estes meses, o modelo de simulação alocou toda a água disponível para esse tipo de demanda, por ter maior prioridade com relação às outras demandas. A Figura 7.4 mostra a alocação feita para o abastecimento durante o período simulado.

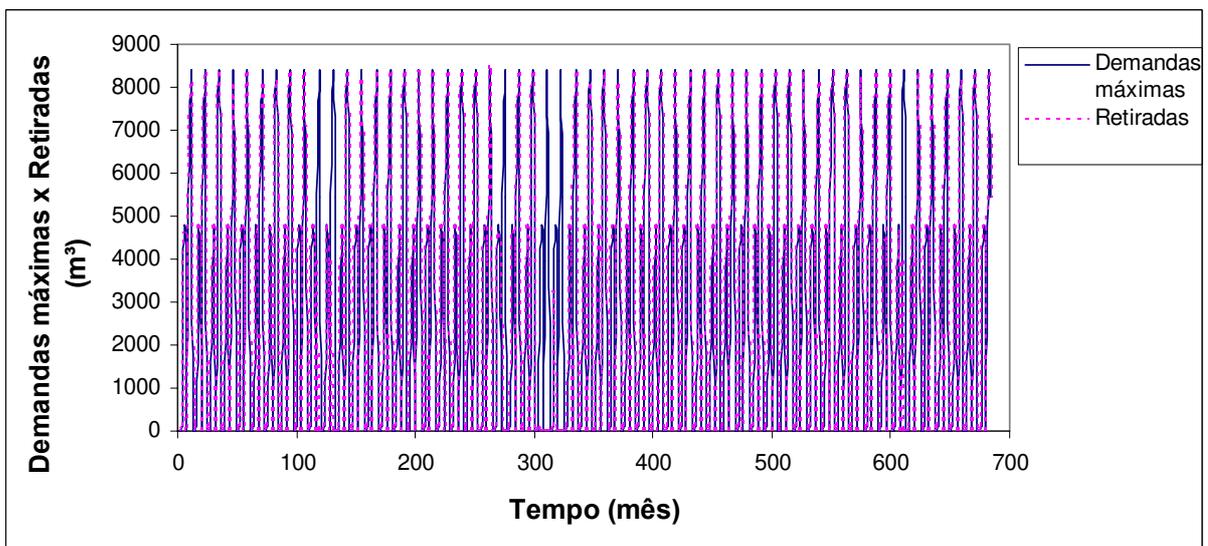


As retiradas para irrigação de culturas perenes foram atendidas na maioria dos meses, como pode ser visto na Figura 7.5. Houve falhas somente nos meses em o reservatório recebeu pequenas vazões afluentes, pois a prioridade deste uso é imediatamente inferior àquela estabelecida para atender a demanda de abastecimento humano e a pecuária.



**Figura 7.5** – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Catolé II no cenário 01.

Após o atendimento das demandas de abastecimento humano e a pecuária e da irrigação de culturas perenes, a próxima demanda a ter maior prioridade no atendimento é a retirada de água para irrigação de culturas sazonais. De acordo com a Figura 7.6 pode ser observado que também ocorreram falhas no atendimento das demandas das culturas sazonais.



**Figura 7.6** – Retiradas para irrigação de culturas sazonais no açude Catolé II no cenário 01.

A Tabela 7.1 abaixo apresenta os indicadores de desempenho para o atendimento às demandas do reservatório de Catolé II, para o cenário 01, segundo os resultados obtidos pelo modelo de simulação. O açude de Catolé II teve um desempenho satisfatório com relação à alocação de água para as demandas existentes. Só ficou a desejar o atendimento das demandas para irrigação de culturas sazonais, que mostrou desempenho razoável.

**Tabela 7.1** – Indicadores de desempenho das demandas no açude Catolé II no cenário 01.

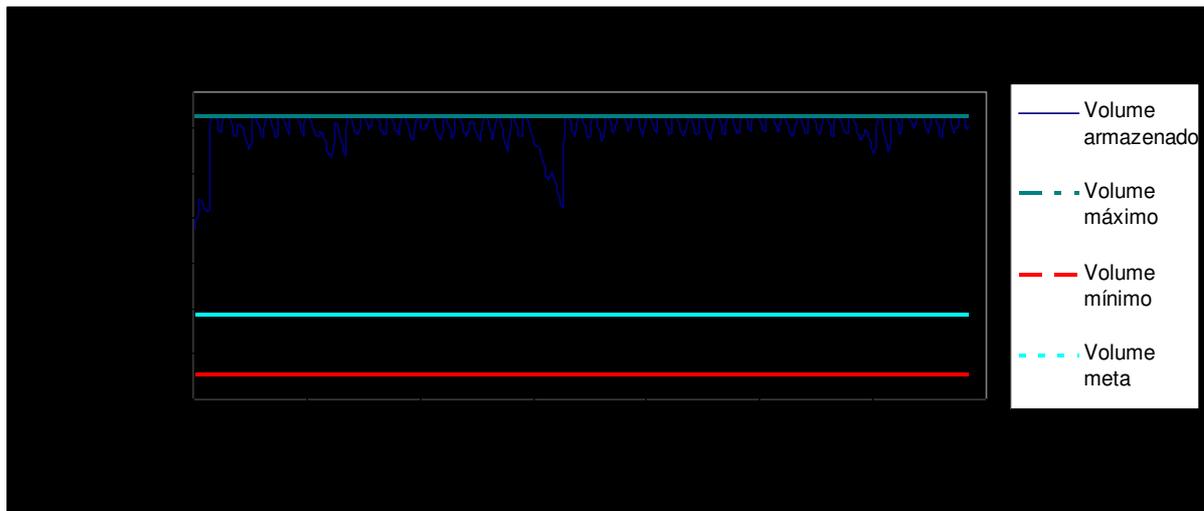
RESERVATÓRIO CATOLÉ II			
	RETIRADA DE ABASTECIMENTO m <sup>3</sup>	RETIRADA PARA CULTURAS PERENES m <sup>3</sup>	RETIRADA PARA CULTURAS SAZONAIS m <sup>3</sup>
Nº DE FALHAS	3	35	117
Nº DE VEZES ENTROU NUMA FALHA E RECUPEROU	3	8	69
CONFIABILIDADE (%)	99,56	94,42	74,34
RESILIÊNCIA (%)	100,00	22,86	58,97
VULNERABILIDADE (%)	28,92	100,00	24,60
SUSTENTABILIDADE (%)	70,77	0,00	33,06

Ainda pode ser observado na Tabela 7.1, que apesar da alta confiabilidade no atendimento ao abastecimento humano e a pecuária, quando o reservatório falha, ele fica em média 1 mês no processo de falha e, durante este período, consegue atender, em média, 71,08% das demandas. Já o atendimento à demanda das culturas perenes possui uma confiabilidade satisfatória, mas fica, em média, 4,37 meses no processo de falha, sendo que, em alguns meses não consegue atender nada dessa demanda. Com relação ao atendimento do requerimento hídrico das culturas sazonais, elas possuem uma confiabilidade razoável, ficando, em média, 1,69 dos meses no processo de falha, mas, em compensação, consegue atender, em média, 75,40% dessas demandas. Isso se dá porque o requerimento hídrico é menor com relação ao consumo de água para culturas perenes e possuem planos de cultivos diferentes, isto é, só são plantadas em parte do ano. Como a sustentabilidade depende dos três indicadores a situação que apresentou uma maior segurança hídrica foi o atendimento do abastecimento humano e a pecuária, devido ao pequeno requerimento hídrico e a ter a maior prioridade entre as demandas no modelo de simulação. A sustentabilidade do atendimento às demandas das culturas perenes foi considerada crítica, pelo fato de ocorrerem falhas em que não é possível atender, em nada, a sua demanda hídrica.

### 7.1.2 – Reservatório Poço Redondo

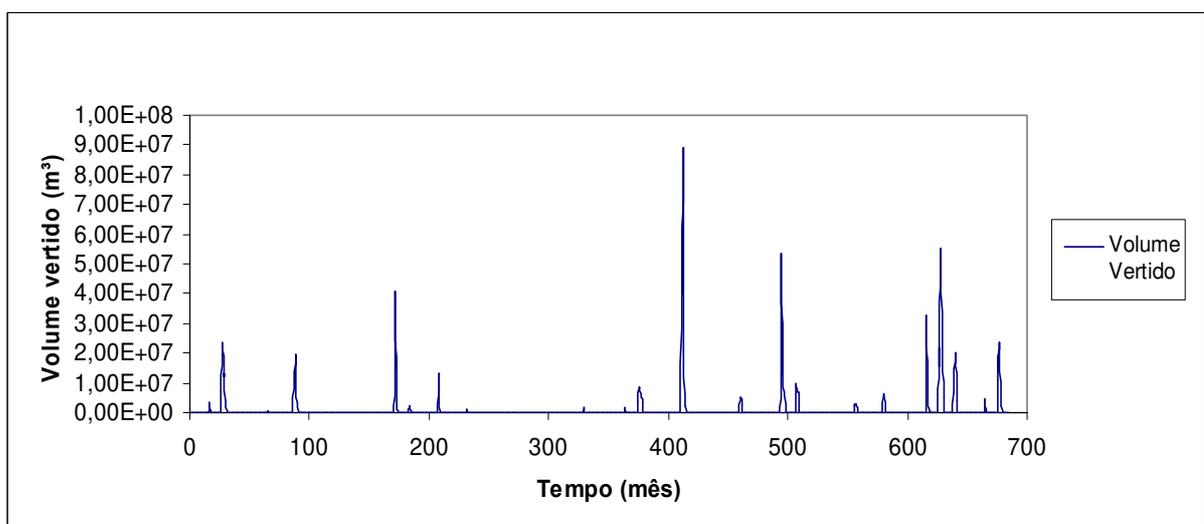
A Tabela 7.2 e as Figuras 7.7 a 7.12 apresentam os resultados relativos à operação do reservatório Poço Redondo. Com um volume inicial igual a 60% do volume máximo, o

comportamento do volume armazenado do açude de Poço Redondo apresentou uma pequena variabilidade conforme pode ser observado na Figura 7.7, além de usar bem as disponibilidades hídricas. Diferentemente do reservatório Catolé II, a restrição de volume mínimo não foi violada. Com relação ao volume meta que representa 30% do volume máximo, para ser usado numa possível seca, este requerimento foi atendido durante o período simulado.



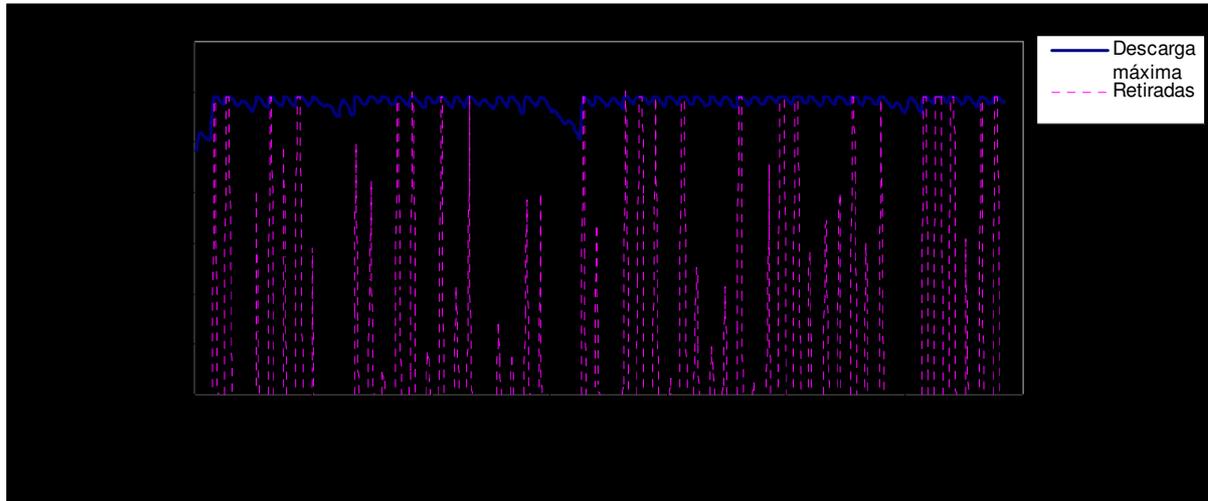
**Figura 7.7** – Comportamento do volume armazenado do açude Poço Redondo no cenário 01.

A Figura 7.8 mostra que ocorreram muitas perdas por vertimento. Isso se deve a dois fatores: vazões afluentes reguladas pelo reservatório Catolé II e ao seu tamanho.



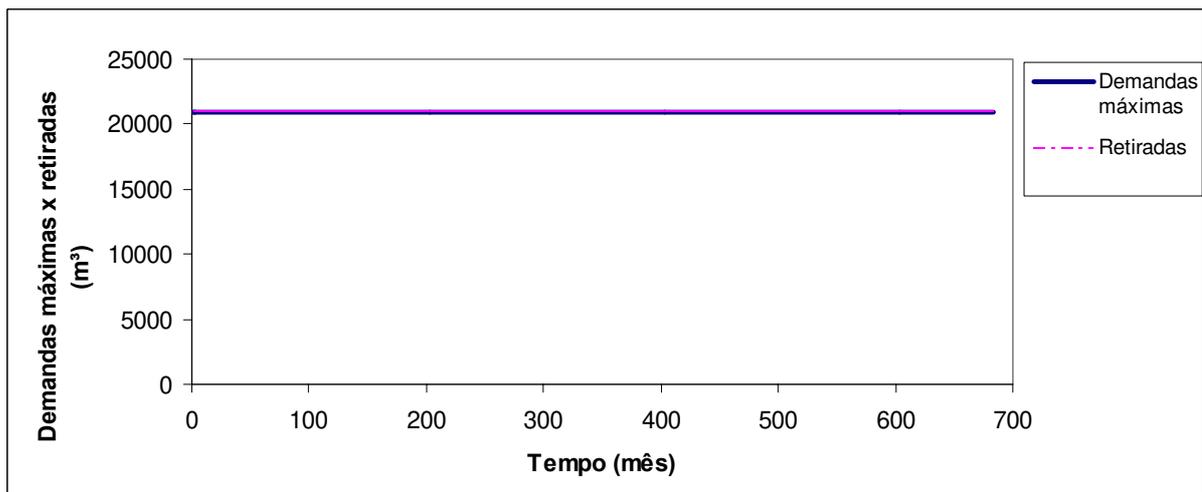
**Figura 7.8** – Comportamento do volume vertido do reservatório Poço Redondo, no cenário 01.

As retiradas d'água pela descarga de fundo (inclusive para atender os requerimentos de vazão ecológica), neste cenário, só foram atendidas quando o modelo conseguir alocar as demandas requeridas pela tomada d'água (de maior prioridade) e do volume meta.



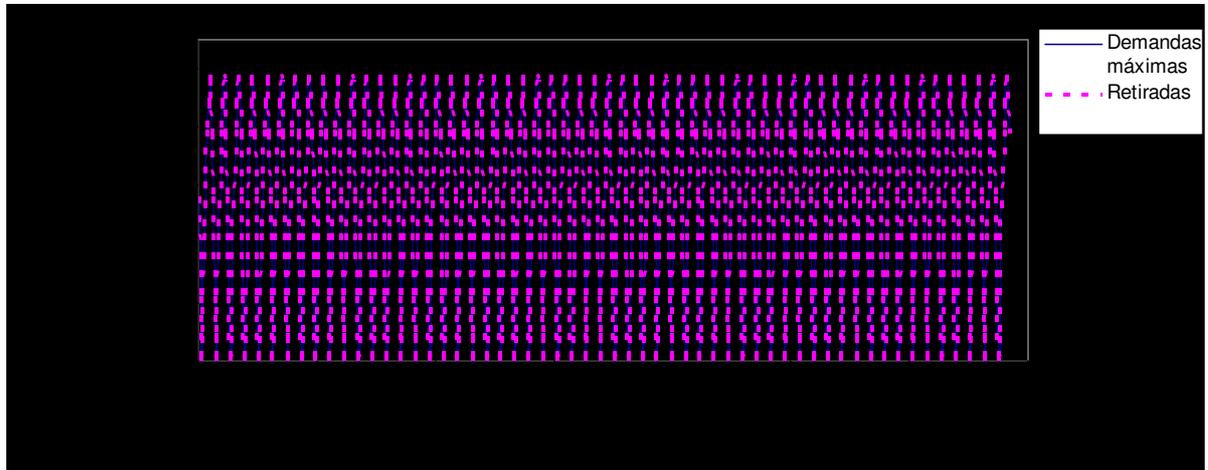
**Figura 7.9** – Retiradas pela descarga de fundo no açude Poço Redondo no cenário 01.

As retiradas para o abastecimento humano e a pecuária foram todas atendidas, até nos meses onde ocorreram severas secas, isso ocorreu devido ao pequeno requerimento hídrico desta demanda e a sua prioridade máxima de atendimento. A Figura 7.10 mostra a alocação feita para o abastecimento durante o período simulado.



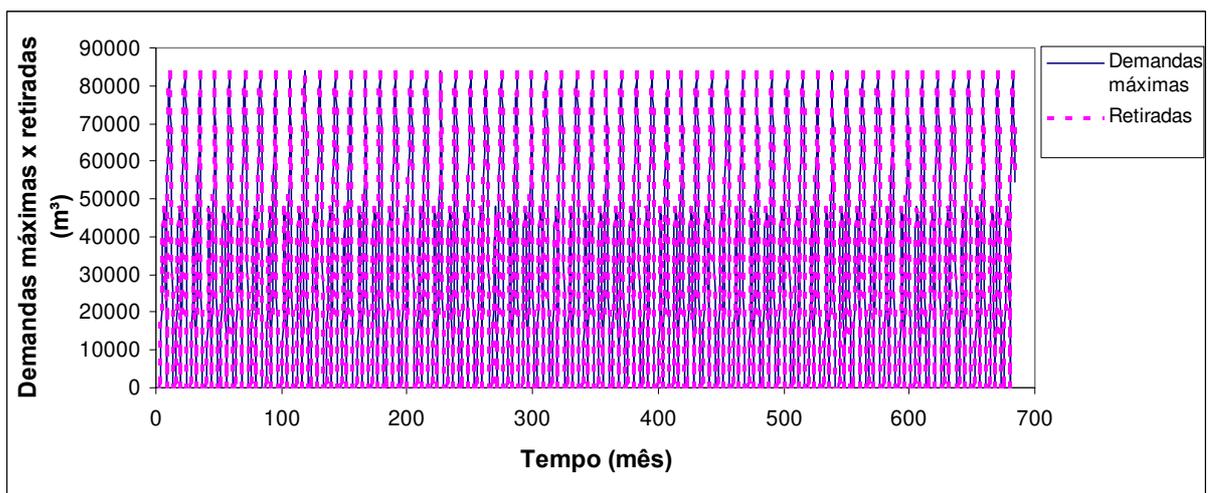
**Figura 7.10** – Retiradas para o abastecimento no açude Poço Redondo no cenário 01.

As retiradas d'água para a irrigação de culturas perenes foram suficientes, em todos os meses, para atender os seus requerimentos, como mostra a Figura 7.11. Não ocorreram falhas, mesmo nos meses em o reservatório recebeu pequenas vazões afluentes.



**Figura 7.11** – Retiradas para irrigação de culturas perenes no açude Poço Redondo no cenário 01.

Na seqüência de prioridades as demandas para irrigação para culturas sazonais são as próximas a terem prioridades. De acordo com a Figura 7.12 abaixo pode ser observado que o seu requerimento atendimento foi completamente satisfeito em todo período simulado.



**Figura 7.12** – Retiradas para irrigação de culturas sazonais no açude Poço Redondo no cenário 01.

A Tabela 7.2 mostra os indicadores de desempenho do atendimento às demandas hídricas do reservatório Poço Redondo, no cenário 01. De acordo com os resultados, o

atendimento às demandas para o abastecimento humano e a pecuária, irrigação de culturas perenes e culturas sazonais foram completamente satisfeitos (100%), ou seja, não houve falhas em nenhum setor, gerando um índice de sustentabilidade excelente.

**Tabela 7.2** – Indicadores de desempenho das demandas no açude Poço Redondo no cenário 01.

RESERVATÓRIO POÇO REDONDO			
	RETIRADA DE ABASTECIMENTO m <sup>3</sup>	RETIRADA PARA CULTURAS PERENES m <sup>3</sup>	RETIRADA PARA CULTURAS SAZONAIS m <sup>3</sup>
Nº DE FALHAS	0	0	0
Nº DE VEZES ENTROU NUMA FALHA E RECUPEROU	0	0	0
CONFIABILIDADE (%)	100	100	100
RESILIÊNCIA (%)	100	100	100
VULNERABILIDADE (%)	0	0	0
SUSTENTABILIDADE (%)	100	100	100

### 7.1.3 – Integração dos reservatórios Catolé II e Poço Redondo

Analisando o sistema, de forma integrada, observou-se que existe uma contribuição de água do reservatório Catolé II para o reservatório Poço Redondo, através do descarregador de fundo ou vertedouro, a fim de satisfazer primeiro as demandas de maior prioridade. O reservatório Poço Redondo só descarrega, primeiramente, através do descarregador de fundo e, depois, do vertedouro, a fim de manter o nível do reservatório em seu volume máximo ou para atender os requerimentos de vazão ecológica.

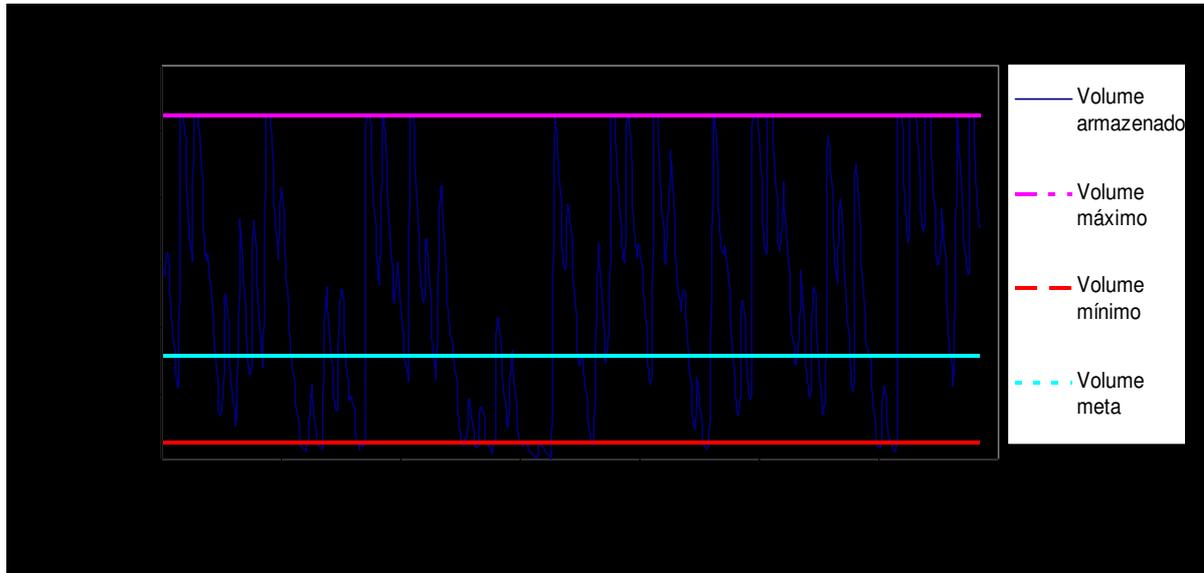
O subsistema simulado possui demandas com o mesmo nível de preferência de atendimento, como é o caso das demandas de abastecimento humano e a pecuária. Para este cenário 01, o modelo de simulação identificou esses tipos de demandas em cada reservatório e alocou a água de forma a satisfazê-las em primeiro lugar, já que elas possuem maior prioridade entre os setores de demandas.

## 7.2 – Cenário 02

### 7.2.1 – Reservatório Catolé II

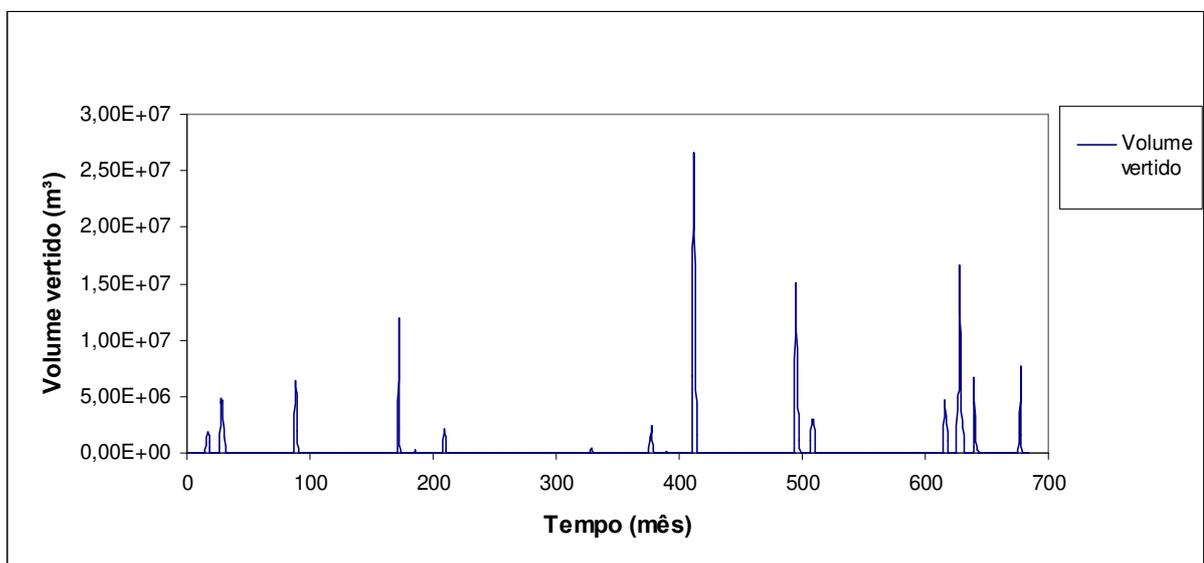
A diferença deste cenário com relação ao cenário 01 para o açude Catolé II está no aumento nas demandas hídricas, que foram projetadas para o ano de 2013. De acordo com os resultados apresentados na Figura 7.13, considerando o mesmo volume inicial de 60% do volume máximo, não houve diferenças significativas com relação ao comportamento do

volume armazenado no reservatório Catolé II no cenário 01, ou seja, as limitações operacionais de volume mínimo não foram atendidas em alguns meses, assim como a demanda de volume meta, já que houve um aumento dos requerimentos hídricos dos setores de demanda.



**Figura 7.13** – Comportamento do volume armazenado do açude Catolé II no cenário 02.

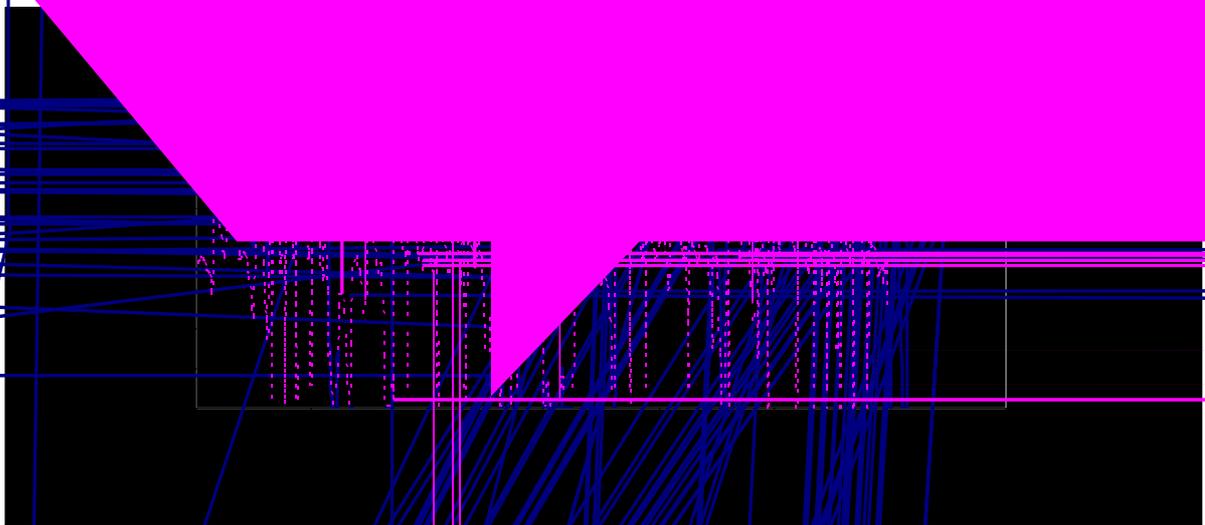
Para volume vertido, só ocorreram perdas por vertimento nos meses onde o reservatório de Catolé II recebeu grandes vazões afluentes, satisfazendo a restrição estabelecida no modelo. No entanto, houve uma diminuição deste volume devido ao crescimento do requerimento hídrico das demandas, como pode ser observado na Figura 7.14.



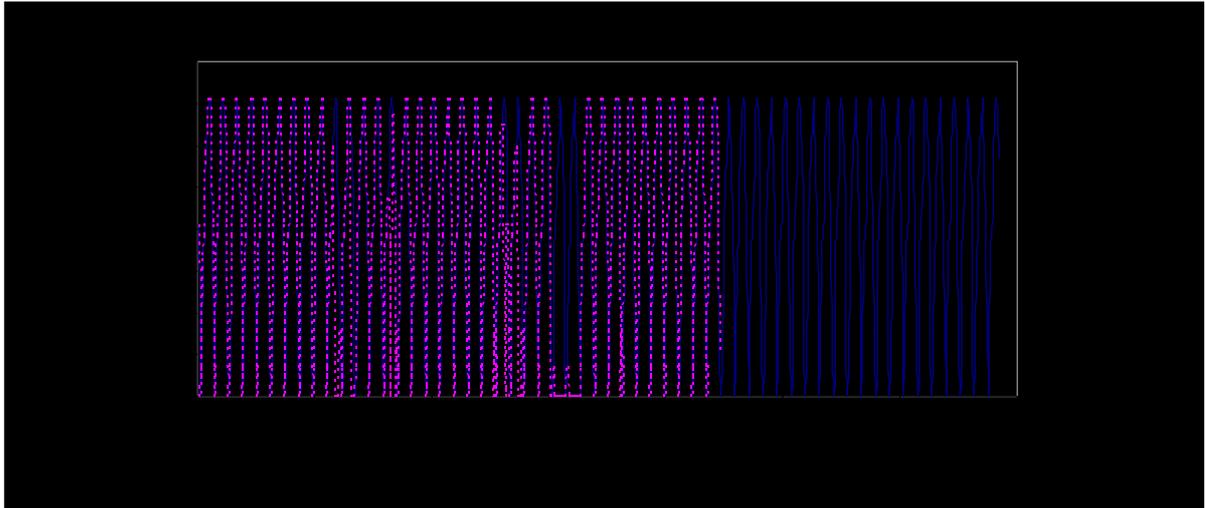
**Figura 7.14** – Comportamento do volume vertido do reservatório Catolé II, no cenário 02.

A retirada d'água pela descarga não foi muito diferente do cenário 01 armazenado à descarga máxima pe

cenário, ar o volume como pode ser



uso só ocorreram quando as demandas de abastecimento foram atendidas. É de se esperar que o número de ocorrência de falhas para este uso cresça, conforme pode ser visto na Figura 7.17.



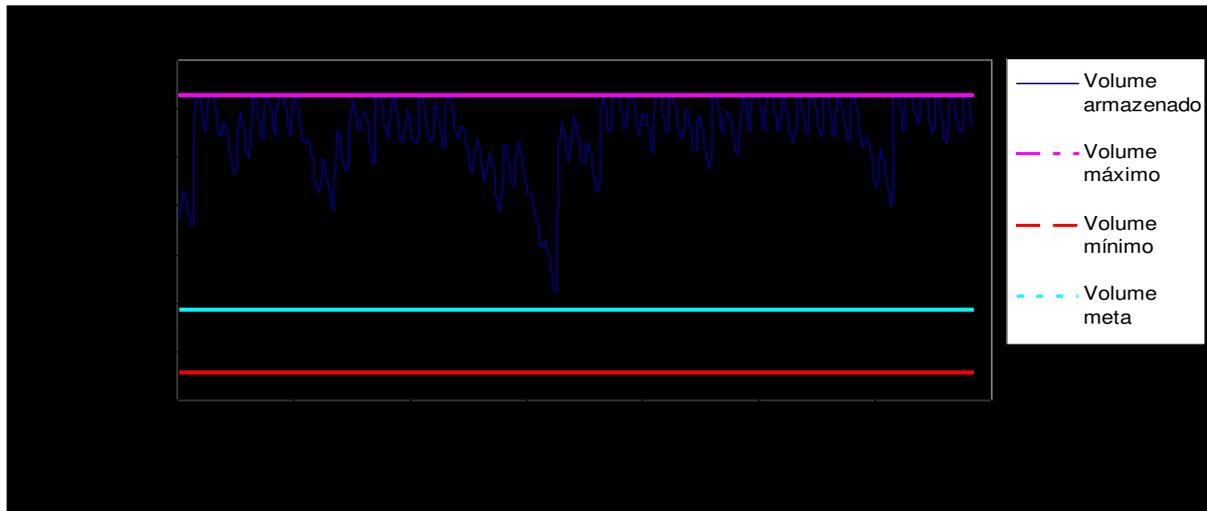
A Tabela 7.3 abaixo mostra os indicadores de desempenho do atendimento às demandas hídricas no cenário 02. De acordo com os resultados obtidos pelo modelo de simulação, as demandas de abastecimento humano e da pecuária foram atendidas (99,27%) em, praticamente, todo o tempo, recuperando-se rapidamente da falha e, quando na falha, atendendo em média 78,15% da demanda, demonstrando um excelente desempenho. Já o atendimento às demandas de irrigação das culturas perenes apresentaram uma confiabilidade de 90,75%, ficando na falha, em média 4,14 meses seguidos, com atendimento de 1,763 % do requerimento hídrico em alguns meses. No entanto, para o atendimento das demandas da irrigação de culturas sazonais apesar de ter apresentado uma confiabilidade de 48,47%, as falhas ocorreram com uma média de 1,75 meses seguidos, atendendo em média 83,4% do requerimento hídrico. Portanto, os índices de sustentabilidade retratam bem o atendimento às demandas hídricas vinculadas ao reservatório Catolé II.

**Tabela 7.3** – Indicadores de desempenho das demandas no açude Catolé II no cenário 02.

RESERVATÓRIO CATOLÉ II			
	RETIRADA DE ABASTECIMENTO m³	RETIRADA PARA CULTURAS PERENES m³	RETIRADA PARA CULTURAS SAZONAIS m³
Nº DE FALHAS	5	58	235
Nº DE VEZES ENTROU NUMA FALHA E RECUPEROU	5	14	134
CONFIABILIDADE (%)	99,27	90,75	48,47
RESILIÊNCIA (%)	100,00	24,14	57,02
VULNERABILIDADE (%)	21,85	98,24	16,60
SUSTENTABILIDADE (%)	77,58	0,39	23,05

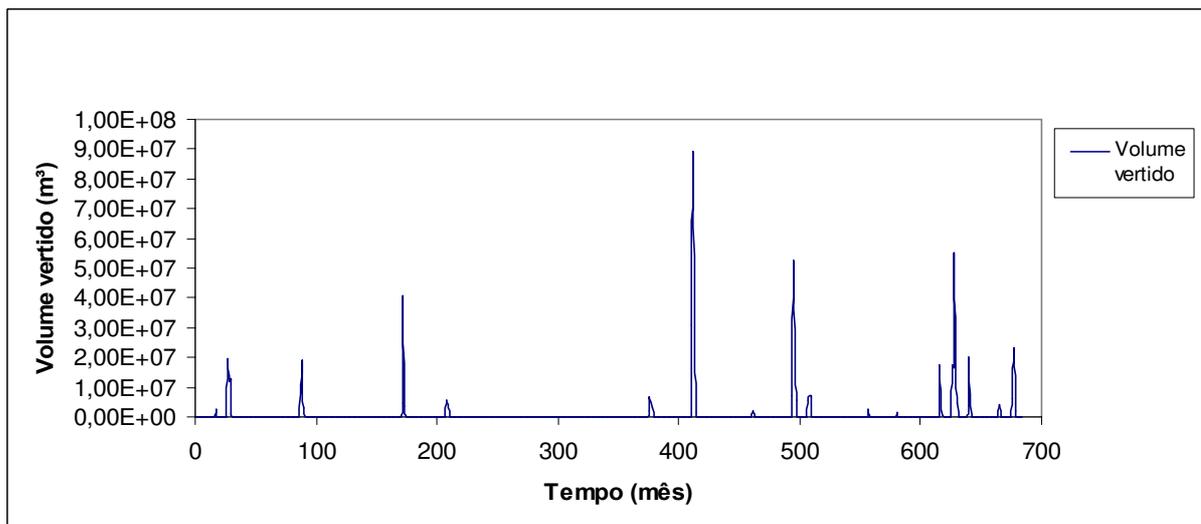
### 7.2.2 – Reservatório Poço Redondo

Neste cenário foram simulados os atendimentos às demandas projetadas para o açude Poço Redondo para o ano de 2013, onde ocorreu um aumento no consumo de água, devido à previsão do aumento populacional e da área máxima irrigável. A simulação foi iniciada com um volume inicial de 60% do volume máximo. Pode-se observar na Figura 7.19 que houve uma redução no volume mensal armazenado com relação aos obtidos no cenário 01, mas o modelo conseguiu atender às limitações operacionais de volume mínimo em todos os meses. Por outro lado, o requerimento de volume meta, que representa 30% do volume máximo, também foi alcançado em todos os meses.



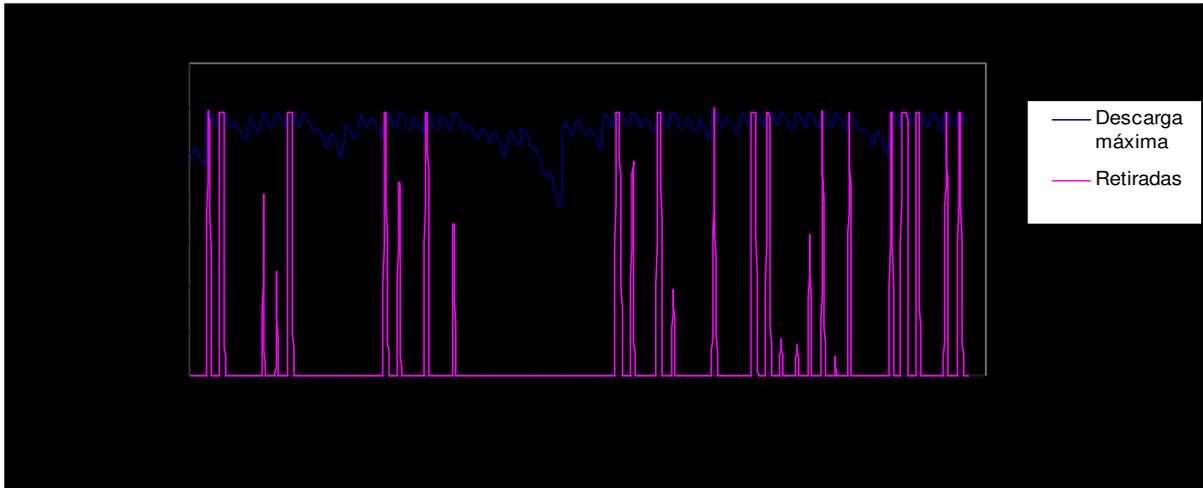
**Figura 7.19** – Comportamento do volume armazenado do açude Poço Redondo no cenário 02.

De acordo com a Figura 7.20, houve uma ligeira diminuição no volume vertido do reservatório Poço Redondo, devido ao aumento no requerimento hídrico das demandas.



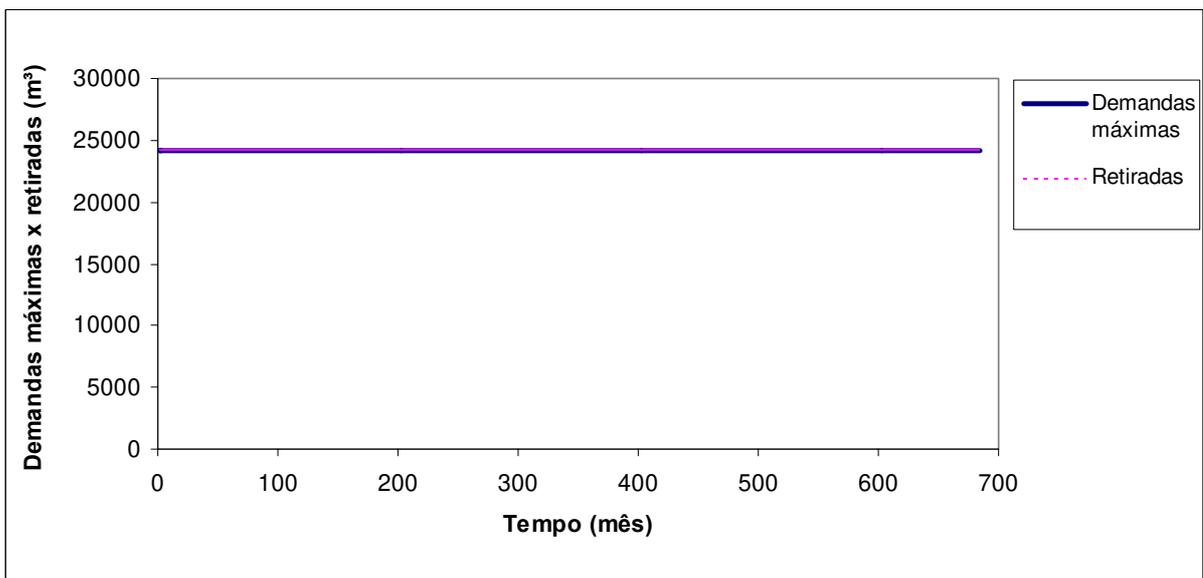
**Figura 7.20** – Comportamento do volume vertido do açude Poço Redondo, no cenário 02.

A retirada d'água pela descarga de fundo (para atender os requerimentos de volume máximo no reservatório e de vazão ecológica), neste cenário, é realizada de acordo com as prioridades do modelo (conseguir suprir as demandas requeridas pela tomada d'água com maior prioridade e reduzir o vertimento). Observou-se, também, para este cenário, que a restrição que associa o volume armazenado à descarga máxima, em cada mês  $t$ , foi satisfeita. Os dados são apresentados na Figura 7.21.



**Figura 7.21** – Retiradas pela descarga de fundo no açude Poço Redondo no cenário 02.

Com relação ao atendimento dos requerimentos hídricos do abastecimento humano e da pecuária, o modelo de simulação conseguiu alocar a água disponível para satisfazer as mesmas em todos os meses, conforme pode ser visto na Figura 7.22.



**Figura 7.22** – Retiradas para o abastecimento no açude Poço Redondo no cenário 02.

As demandas hídricas da irrigação de culturas perenes foram todas atendidas, apesar da área máxima irrigável ser maior, como pode ser observado na Figura 7.23.