



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS JURÍDICAS E SOCIAIS – CCJS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS CONTÁBEIS – UACC
CURSO DE ADMINISTRAÇÃO



ROBERTO LIRA BATISTA

**PLANEJAMENTO DA UTILIZAÇÃO DA ÁGUA DE UM SISTEMA HÍDRICO: UM
ESTUDO DE CASO NO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO – SOUSA/PB**

SOUSA
2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS JURÍDICAS E SOCIAIS – CCJS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS CONTÁBEIS – UACC
CURSO DE ADMINISTRAÇÃO**

ROBERTO LIRA BATISTA

**PLANEJAMENTO DA UTILIZAÇÃO DA ÁGUA DE UM SISTEMA HÍDRICO: UM
ESTUDO DE CASO NO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO – SOUSA/PB**

Trabalho de Curso apresentado ao Curso de
Administração da Universidade Federal de Campina
Grande, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Administração

Orientador: Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos

**SOUSA
2013**

ROBERTO LIRA BATISTA

**PLANEJAMENTO DA UTILIZAÇÃO DA ÁGUA DE UM SISTEMA HÍDRICO: UM
ESTUDO DE CASO NO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO – SOUSA/PB**

Esta monografia foi julgada adequada para obtenção do grau de Bacharel em Administração, e aprovada na forma final pela Banca Examinadora designada pela Coordenação do Curso do Centro de Ciências Jurídicas e Sociais da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof.Dr. Valterlin da Silva Santos
Professor Orientador

Prof. Dr. Camilo Alysson Simões de Farias
Prof. Examinador

Prof.^a Cristiane Queiroz Reis
Prof. Examinador

**SOUSA
2013**

Dedico este trabalho a minha família, e em especial a minha mãe, Maria das Graças Lira Batista, que sempre me educou da melhor forma possível, apesar das grandes dificuldades enfrentadas, e nunca deixou de me apoiar nas minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela paciência e pela sabedoria a mim concedidas para concluir esta difícil missão.

A meu digníssimo orientador, o Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos, primeiramente pelo incentivo à realização do trabalho, e em seguida pelo empenho e dedicação ao longo da sua feitura. Por tudo, muito obrigado. Pela pessoa e pelo profissional exemplar que é você, digo sem sombra de dúvidas, não poderia ter escolhido melhor orientador.

A todos os meus professores da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Sousa, e aos demais funcionários desta instituição, já que estivemos juntos ao longo desta jornada.

A minha mãe Maria das Graças, e aos meus irmãos, Cleiniano, Cristiano, Fabiano, Rosiane, Rosy-Mary, Celso e Aline, pelo amor e incentivo em todos os momentos.

Aos meus amigos Ronaldo e Giliard, “os irmãos Targino”, que me ajudam desde o começo, com a minha vinda e com minha adaptação aqui na cidade Sorriso.

Aos meus amigos da Residência Universitária I, pela convivência de quase cinco anos, que, apesar de dificuldades e percalços, ajudaram a tornar a jornada menos árdua, e com certeza nos ensinam tanto quanto a Universidade, seja a amadurecer, a conviver com as diferenças, tornando-nos pessoas melhores.

Aos meus amigos e colegas da UFCG, que sempre estiveram comigo, e que se tornaram muito mais que apenas colegas de sala, tornaram-se amigos para o resto da vida. Não vou citar nomes, para não correr o risco de ser injusto com alguém.

E a todos que de alguma maneira me ajudaram na realização desse sonho. Agradeço sinceramente a todos.

*Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire conhecimento*

Provérbios 3:13

RESUMO

A disponibilidade de água doce de qualidade no mundo vem sofrendo acentuada queda nas últimas décadas, principalmente em função do aumento na demanda, aliado a problemas como desperdício e poluição. Não obstante, a falta de políticas de planejamento adequadas para a utilização dos recursos hídricos é um fator que contribui para que um grande contingente populacional não tenha acesso à água de boa qualidade. Diante disso, este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de propor o planejamento para a utilização dos recursos hídricos provenientes do Reservatório São Gonçalo, localizado no Município de Sousa-PB. Para tanto foram propostas regras de operação (cenários) baseadas no atendimento satisfatório dos usuários, de acordo com as prioridades e condições estabelecidas. Para análise das regras de operação do sistema hídrico foi utilizado o modelo de simulação de bacias hidrográficas Acquanet. Os resultados obtidos mostraram que com a implantação de uma política de planejamento e controle do reservatório é possível garantir o atendimento sustentado das demandas de abastecimento humano. Com relação a demanda para a agricultura irrigada tem-se que as políticas de operações influenciam no grau de atendimento dessas demandas.

Palavras-chaves: Recursos Hídricos. Operação de reservatórios. Semiárido.

ABSTRACT

The availability of fresh water in the world has suffered a sharp decline in recent decades, mainly due to the increase in demand, coupled with issues such as waste and pollution. Nevertheless, the lack of appropriate planning policies for the use of water resources is a factor that contributes to a large contingent of the population doesn't have access to good quality water. Thus, this study aims to propose the planning for the use of water resources of the São Gonçalo reservoir, located in Sousa-PB. Therefore, has been proposed operation rules based on meet satisfactory users, according to the priorities and conditions. To analysis of operation rules has been used the water system model AcquaNet. The results showed that with the implementation of a policy planning and control can ensure the fulfillment of the demands of sustainable human supply. Regarding irrigated agriculture demand the operations policies influence in degree of meeting these demands.

Key-words: Water resources. Reservoir operation. Semiarid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Volume do reservatório São Gonçalo nos últimos 10 anos.....	19
Figura 2 - Manifestantes bloqueiam trecho da BR 230 próximo ao Município de Sousa-PB.	20
Figura 3 - A distribuição da água na Terra.	23
Figura 4 - A distribuição da água por continente.....	23
Figura 5 - Distribuição dos recursos hídricos por região do Brasil.	25
Figura 6 - Subdivisão do armazenamento em um reservatório de múltiplos usos.	40
Figura 7 - Localização do Açude São Gonçalo na Bacia do Alto Piranhas.	41
Figura 8 - Principais demandas do reservatório São Gonçalo.	44
Figura 9 - Tela inicial do Acquanet 2013.	48
Figura 10 - Representação gráfica de uma simulação no Acquanet.	51
Figura 11 - Exemplo de descarga de um reservatório.....	54
Figura 12 - Cenário 1: atendimento da demanda para abastecimento urbano.	56
Figura 13 - Cenário 1: atendimento da demanda para abastecimento difuso.....	57
Figura 14 - Cenário 1: volume do reservatório.....	58
Figura 15 - Cenário 1: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.....	58
Figura 16 - Cenário 1: atendimento da demanda para irrigação difusa.....	59
Figura 17 - Cenário 2: atendimento da demanda para abastecimento urbano.....	62
Figura 18 - Cenário 2: atendimento da demanda para abastecimento difuso.....	62
Figura 19 - Cenário 2: volume do reservatório.....	63
Figura 20 - Cenário 2: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.....	63
Figura 21 - Cenário 2: atendimento da demanda para irrigação difusa.....	64
Figura 22 - Cenário 3: volume do reservatório.....	66
Figura 23 - Cenário 3: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.....	67
Figura 24 - Cenário 3: atendimento da demanda para irrigação difusa.....	67
Figura 25 - Cenário 4: volume do reservatório.....	70
Figura 26 - Cenário 4: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.....	70

Figura 27 - Cenário 4: atendimento da demanda para irrigação difusa.....	71
Figura 28 - Cenário 5: volume do reservatório.....	73
Figura 29 - Cenário 5: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.....	74
Figura 30 - Cenário 5: atendimento da demanda para irrigação difusa.....	74
Figura 31 - Cenário 6: volume do reservatório.....	76
Figura 32 - Cenário 6: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.....	77
Figura 33 - Cenário 6: atendimento da demanda para irrigação difusa.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados referentes ao Reservatório São Gonçalo.	42
Tabela 2 - Demanda média mensal do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.	45
Tabela 3 - Demanda média mensal para irrigação difusa.	45
Tabela 4 - Média mensal de evaporação do Reservatório São Gonçalo.	46
Tabela 5 - Cenário 1: Indicadores de desempenho.	59
Tabela 6 - Cenário 1: médias mensais para os volumes vertidos e evaporados.	60
Tabela 7 - Cenário 2: indicadores de desempenho.	64
Tabela 8 - Cenário 2: médias mensais para o vertimento (em m ³ /s) e a evaporação (em m ³).	65
Tabela 9 - Cenário 3: Indicadores de desempenho.	68
Tabela 10 - Cenário 3: médias mensais para vertimento (em m ³ /s) e a evaporação (em m ³)	68
Tabela 11 - Cenário 4: indicadores de desempenho.	71
Tabela 12 - Cenário 4: médias mensal para vertimento (em m ³ /s) e a evaporação (em m ³)	.72
Tabela 13 - Cenário 5: indicadores de desempenho.	75
Tabela 14 - Cenário 5: médias mensal para vertimento (em m ³ /s) e a evaporação (em m ³)	. 75
Tabela 15 - Cenário 6: indicadores de desempenho.	78
Tabela 16 - Cenário 6: médias mensal para vertimento (em m ³ /s) e a evaporação (em m ³)	. 78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

ANA - Agência Nacional de Águas

ASA - Articulação no Semiárido

CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba

Conf. - Confiabilidade

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LABSID - Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos

MMA - Ministério do Meio Ambiente

OMS - Organização Mundial de Saúde

ONU - Organização das Nações Unidas

PD - Programação Dinâmica

PISG - Perímetro Irrigado de São Gonçalo

PL - Programação Linear

PNL - Programação Não-Linear

Res. - Resiliência

SEMARH - Secretaria Extraordinária de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba

UNICEF - Fundo das Nações Unidas para a Infância

USP - Universidade de São Paulo

Vul. - Vulnerabilidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 JUSTIFICATIVA	17
3 OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
4.1 A ÁGUA NO MUNDO.....	22
4.2 A SITUAÇÃO DA ÁGUA NO BRASIL E NO SEMIÁRIDO.....	24
4.3 O USO DOS RECURSOS HÍDRICOS	26
4.4 A PROBLEMÁTICA DA ÁGUA.....	29
4.5. A POLÍTICA NACIONAL DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	30
4.6 A IMPORTÂNCIA DO PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS	32
4.7 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO EM SISTEMAS HÍDRICOS	34
4.7.1 OTIMIZAÇÃO.....	35
4.7.2 SIMULAÇÃO.....	37
4.7.3 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.....	39
5 METODOLOGIA.....	41
5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	41
5.2 DADOS DO SISTEMA	43
5.2.1 DEMANDAS HÍDRICAS	43
5.2.2 EVAPORAÇÃO	46
5.2.3 VAZÕES AFLUENTES	46
5.2.4 DADOS DO RESERVATÓRIO E CRITÉRIOS OPERACIONAIS.	47
5.3 SISTEMA DE SUPORTE À DECISAO ACQUANET	47
5.3.1 TIPOS DE SIMULAÇÃO	49
5.3.2 POSSIBILIDADES DE CÁLCULO	50
5.3.3. DESENHO DA REDE DE FLUXO	50
5.4 PROPOSTA DE OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO	51
5.5 INDICADORES DE DESEMPENHO	53

5.5.1 CONFIABILIDADE.....	54
5.5.2 RESILIÊNCIA OU ELASTICIDADE	54
5.5.3 VULNERABILIDADE.....	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
6.1 CENÁRIO 1	56
6.2 CENÁRIO 2.....	61
6.3 CENÁRIO 3.....	65
6.4 CENÁRIO 4.....	69
6.5 CENÁRIO 5.....	72
6.6 CENÁRIO 6.....	76
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.	80
REFERÊNCIAS.....	82
ANEXOS	86

1 INTRODUÇÃO

A água em um dos elementos mais importantes da natureza, pois é ela que possibilita a existência da vida no Planeta Terra. A disponibilidade de água no mundo permaneceu praticamente inalterada nos últimos séculos, porém a oferta de água doce de boa qualidade sofreu uma grave queda nos últimos anos, sobretudo em razão de grandes acréscimos nas diversas demandas, bem como de problemas como desperdício e poluição de mananciais e corpos d'água (BRITO, SILVA e PORTO, 2007).

Segundo dados do Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) quase metade da população mundial não dispõe de um serviço de saneamento básico adequado, e que aproximadamente 1/6 da população não conta com sistema de abastecimento. Além disso, as projeções revelam que até 2050, caso não sejam tomadas medidas imediatas, cerca de 45% dos habitantes do planeta viverão em países com sérios problemas de recursos hídricos (MMA, 2005).

O conhecimento acerca dos recursos hídricos deve figurar cada vez mais entre as questões de interesse primordial para a sociedade como um todo, de maneira a possibilitar que sejam tomadas providências no sentido de tentar frear os processos que diminuem a oferta de água, bem como proporcionar políticas que objetivem reduzir as desigualdades pelo uso e que busquem a conscientização dos diversos usuários quanto as melhores formas de utilização (MAUAD e LIMA, 2003).

O Brasil é um dos países com maior disponibilidade hídrica do Mundo. Porém, devido às dimensões continentais e às características distintas de várias regiões, algumas apresentam sérios problemas em termos de recursos hídricos disponíveis. É o caso da região do semiárido brasileiro, que engloba a maior parte da Região Nordeste do país, que por causa das altas taxas de evaporação, chuvas bastante irregulares a nível espaço-temporal e baixos índices pluviométricos, quando comparado com o resto do Brasil, condicionam as atividades humanas e o desenvolvimento socioeconômico da região (VIEIRA, 1996).

Uma das principais alternativas para melhorar a oferta hídrica em certas regiões consiste na técnica da construção de reservatórios, geralmente

interrompendo algum curso natural de água, com a finalidade de acumular o recurso ao longo dos períodos de maior precipitação para ser utilizada nos períodos de estiagem. Muitos reservatórios foram construídos no Brasil, notadamente na região Nordeste do país, ao longo das últimas décadas, para tentar minimizar os efeitos provocados pela escassez hídrica (BRITO, SILVA e PORTO, 2007).

Vianna Junior e Lanna (2002) destacam que devido às características de múltiplos usos dos reservatórios e do seu caráter conflitante, faz-se necessária a adoção de regras operacionais que contemplem todos esses usos, perante um quadro de objetivos gerais e futuros.

Diante do exposto, destaca-se a importância da gestão e do planejamento para proporcionar uma melhor utilização dos recursos hídricos, de forma a satisfazer todos os seus usuários. É fundamental, sobretudo, em regiões que apresentam a escassez de água, já que os problemas oriundos dessa escassez tendem a se agravar caso não sejam implantadas políticas adequadas de uso dos recursos hídricos (BERBERT, 2003).

Assim, este trabalho objetiva analisar o caso de um sistema hídrico localizado na região semiárida do Nordeste brasileiro, mais especificamente no Estado da Paraíba, no intuito de propor planejamentos para utilização dos recursos hídricos dele provenientes, de modo a satisfazer os seus usuários, bem como evitar possíveis conflitos pelo uso da água.

O objeto de estudo é o reservatório São Gonçalo, situado no Município de Sousa, Estado da Paraíba, localizado na bacia do Rio Piranhas, responsável pelo abastecimento de cerca de 60.000 habitantes, além do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, onde são cultivadas diversas culturas, tanto permanentes, quanto temporárias.

Dessa forma buscar-se-á através da execução desse trabalho responder o seguinte questionamento: Quais as estratégias mais eficientes de utilização dos recursos hídricos provenientes do Reservatório São Gonçalo para garantir a satisfação dos seus usuários nos próximos anos?

2 JUSTIFICATIVA

A água é um recurso finito. Com o aumento da população mundial, a demanda por este recurso vem sendo cada vez maior, ao passo que a sua oferta sofreu acentuada queda ao longo das últimas décadas. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), estima-se que até 2050 mais de 45% da população mundial sofrerá com a carência de água potável. (RIBEIRO, 2003)

O Brasil é um país com uma das maiores ofertas de recursos hídricos de todo o planeta. O território brasileiro detém cerca de 53% de toda a água doce disponível na América do Sul, e conta com o maior curso de água doce do Planeta, o Rio Amazonas. Devido às dimensões continentais, porém, existem muitos contrastes entre as diversas regiões que formam o nosso país; e um deles é disponibilidade hídrica. Enquanto a Região Amazônica apresenta alguns dos maiores mananciais de água doce do mundo, a Região Nordeste apresenta graves problemas decorrentes da escassez deste recurso (BRITO, SILVA e PORTO, 2007).

Nas áreas onde predomina o clima semiárido os problemas de escassez de água são mais graves e antigos. A oferta de recursos hídricos sempre foi umas questões mais preocupantes da Região Nordeste do Brasil, notadamente nas áreas que correspondem ao sertão nordestino, principalmente em razão do pouco volume de precipitações que ocorrem durante o ano, bem como também dos altos índices de perdas por evaporação (BERBERT, 2003).

De modo geral, as políticas públicas que objetivam mitigar os problemas gerados pela escassez de água são insuficientes, e quando existentes, mostram-se pouco efetivas, já que estes problemas arrastam-se há muitas décadas.

Apesar de antiga, a técnica de armazenar água em reservatórios por meio da interrupção do curso de rios foi uma das mais importantes formas de ajudar a melhorar a oferta de água em regiões castigadas pela escassez de chuvas, como é o caso de algumas áreas do Nordeste brasileiro. As águas resultantes das precipitações que ocorrem nos períodos chuvosos, geralmente entre os meses de janeiro e maio, são acumuladas para ajudar a diminuir o hiato entre a oferta e a demanda durante o restante do ano. Deste modo, ao longo do tempo muitos reservatórios foram construídos na extensão de cursos d'água para ajudar a

desenvolver as regiões menos chuvosas, aumentando a oferta hídrica, bem como objetivando perenizar rios intermitentes.

Ainda assim, ano após ano, nos períodos de estiagem, o problema da falta de água insiste em se repetir na vida do sertanejo. Está bem claro que a efetividade dessa solução da armazenagem para a escassez de recursos hídricos perpassa por uma administração eficiente dos reservatórios. Trata-se, então, de buscar um aperfeiçoamento na utilização, tendo por base as prioridades de uso, de modo que o recurso esteja sempre disponível (BRITO, SILVA e PORTO, 2007).

O reservatório São Gonçalo foi construído em meados da década de 1930 para ajudar a diminuir os problemas de disponibilidade hídrica, auxiliando no desenvolvimento da região onde se encontra. O reservatório é responsável pelo abastecimento dos aglomerados urbanos de Sousa, Marizópolis, Distrito São Gonçalo, e Núcleos Habitacionais I, II e III. Além disso, a água também serve ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo, onde são cultivadas diversas culturas, tanto permanentes, como coco, banana, capim, goiaba, acerola, manga, graviola e caju, quanto temporárias, como milho, feijão e batata.

Deste modo, as águas do reservatório são utilizadas tanto para abastecimento urbano, que inclui o consumo humano e industrial, quanto para o desenvolvimento de atividades agrícolas. São Gonçalo é, portanto, um sistema hídrico de extrema importância para ajudar a desenvolver a microrregião do Município de Sousa.

Atualmente, a região passa por período de estiagem que se arrasta desde meados do ano de 2011 até agora. A Figura 1 apresenta o volume do reservatório nos últimos 10 anos. Percebe-se uma acentuada queda do volume de água do reservatório desde agosto de 2011, sendo seu volume no dia 05 de setembro de 2013 de 13.103.000 m³, que representa 29,37% da sua capacidade máxima (AESAs, 2013).

Figura 1 - Volume do reservatório São Gonçalo nos últimos 10 anos.



Fonte: AESA, 2013.

Os diversos usuários que dependem da água de São Gonçalo para sobreviver têm sofrido com o baixo volume do reservatório – devido à falta de precipitações durante o período chuvoso, suficientes para repor o volume de água do açude – o que tem impossibilitado o desenvolvimento das atividades agropecuárias estabelecidas, provocando grandes perdas para os irrigantes que desenvolvem culturas permanentes, ou a criação de animais, bem como inviabilizando o estabelecimento de quaisquer culturas temporárias. Some-se a isso, o racionamento de água ao qual estão sujeitas as populações urbanas que vivem em localidades abastecidas por São Gonçalo.

Vale ressaltar que não é rara a ocorrência de conflitos entre esses diversos usuários, e entre eles e os órgãos responsáveis pela gestão do reservatório, que, diante do agravamento da conjuntura têm tomado medidas extremas para tentar garantir a manutenção do abastecimento humano, que deve ser priorizado em situações de escassez hídrica.

Recentemente, um grande protesto realizado pela população de diversos municípios da região de Sousa em razão da escassez de água enfrentada foi notícia em vários órgãos de imprensa local e nacional (Figura 2). Os manifestantes bloquearam diversos trechos da BR 230 que passam pela região de Sousa, pedindo maior agilidade nas obras do projeto de transposição do rio São Francisco, que promete garantir a oferta de água para mais de 12 milhões de pessoas em 390

municípios do Sertão e do Agreste dos Estados do Ceará, Paraíba, Rio Grande do Norte e Pernambuco (Ministério da Integração Nacional, 2013).

Figura 2 - Manifestantes bloqueiam trecho da BR 230 próximo ao Município de Sousa-PB.



Fonte: G1.COM, 2013.

Diante do exposto, este trabalho tem como finalidade analisar possíveis maneiras de utilização dos recursos hídricos provenientes do Reservatório São Gonçalo, tendo em vista as suas atuais demandas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Propor e analisar possíveis regras de operação dos recursos hídricos provenientes do reservatório de São Gonçalo, de modo a satisfazer os seus usuários, minimizando possíveis conflitos pelo uso da água.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar o atual cenário de utilização dos recursos hídricos do reservatório São Gonçalo-PB.
- Quantificar as demandas de água para os usuários do reservatório.
- Apresentar propostas (cenários) de operação do uso da água do reservatório.
- Avaliar o nível de atendimento das demandas em cada cenário proposto.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 A ÁGUA NO MUNDO

A água é o recurso natural mais importante para a existência da vida no planeta Terra. Diante disso, o uso consciente deste precioso bem é indispensável à manutenção da vida. Infelizmente, a maioria das pessoas ainda vive alheia a discussões sobre este tema, que deveria figurar como uma das preocupações fundamentais da sociedade atual.

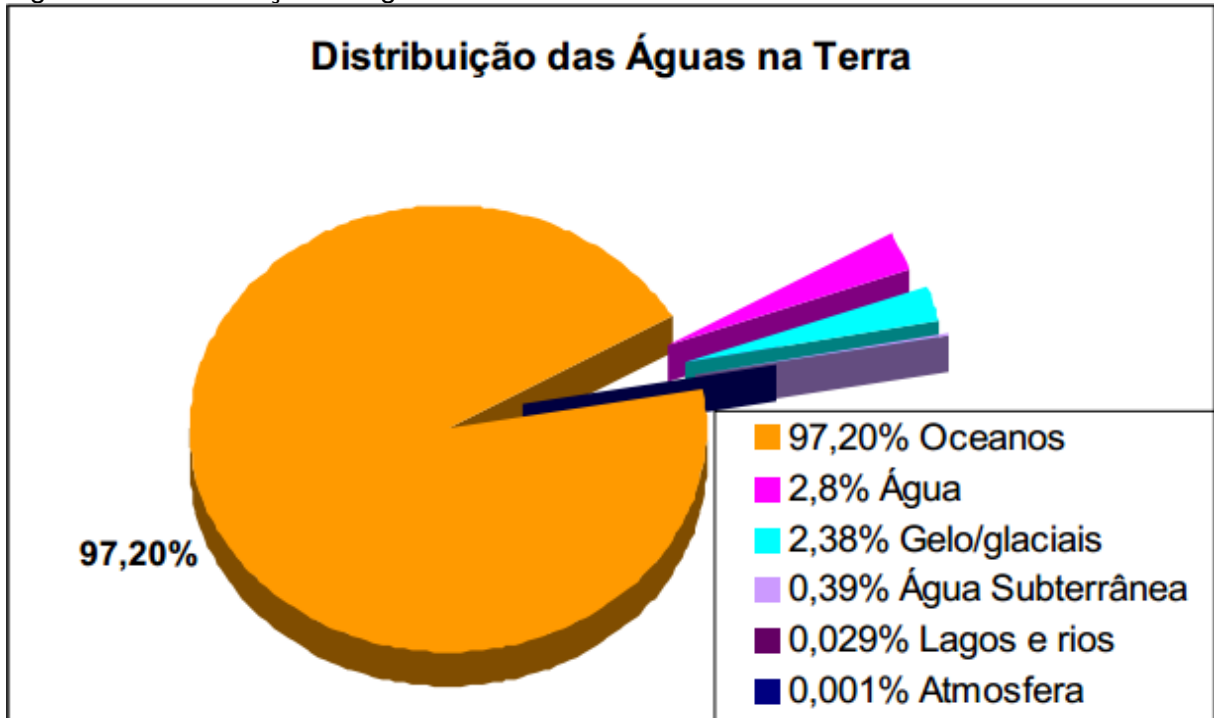
Assim, é necessário conhecer bem este elemento para se ter a noção do quanto ele é essencial à manutenção da vida no Planeta. A água está presente em três estados diferentes na natureza, a saber, sólido, líquido e gasoso, e está em constante movimento por meio do seu *ciclo hidrológico*, que é descrito sucintamente por Curi e Santos (2008, p. 2) da seguinte forma:

O ciclo da água inicia-se com a energia solar, incidente no planeta Terra, que é responsável pela evaporação das águas dos rios, reservatórios e mares, bem como pela transpiração das plantas. O vapor d'água forma as nuvens, cuja movimentação sofre influência do movimento de rotação da Terra e das correntes atmosféricas. A condensação do vapor d'água forma as chuvas. Quando a água das chuvas atinge a terra, ocorrem dois fenômenos: um deles consiste no seu escoamento superficial em direção dos canais de menor declividade, alimentando diretamente os rios e o outro, a infiltração no solo, alimentando os lençóis subterrâneos. A água dos rios tem como destino final os mares e, assim, fechando o ciclo das águas.

A água compõe cerca de 2/3 da superfície da Terra, sendo que 97,20% localizam-se nos mares e oceanos, e são, portanto, inadequadas para o consumo humano e animal, bem como para o desenvolvimento de atividades agrícolas, em razão dos altos teores de sais, sobrando assim, apenas 2,80% de água doce. (Figura 3) A água doce é aquela que possui salinidade igual ou inferior a 0,50‰ (0,5 grama de sais por 1000 gramas de água) Do total de água doce, cerca de 2,38% correspondem às geleiras e calotas polares, outros 0,39% equivalem às águas subterrâneas; 0,001% está presente na atmosfera; sendo assim, apenas 0,029 % do

volume de água está armazenada nos rios e lagos, disponível efetivamente para as diversas atividades humanas (VICTORINO, 2007).

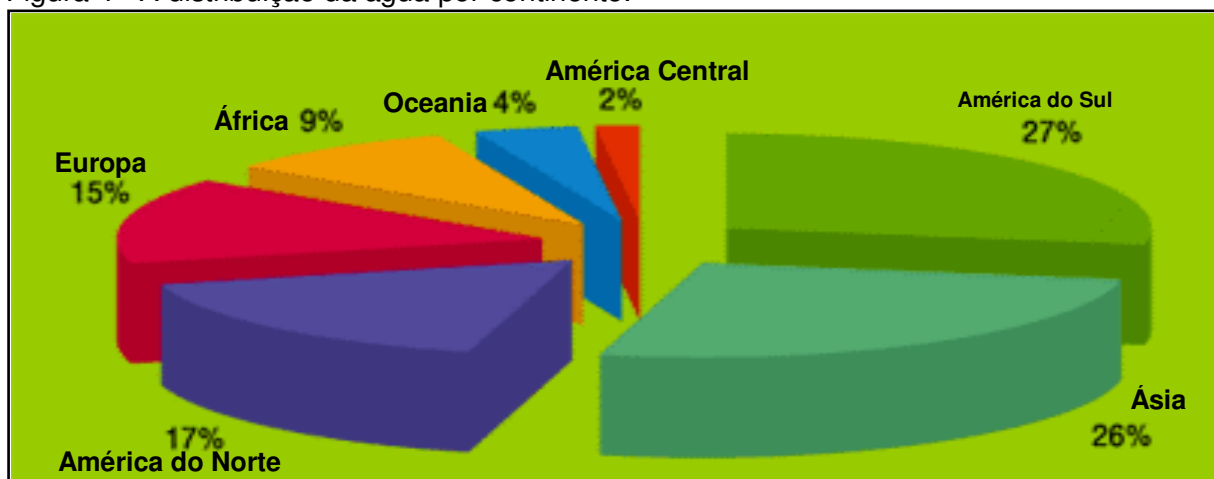
Figura 3 - A distribuição da água na Terra.



Fonte: VICTORINO, 2007; p. 16.

Os recursos hídricos estão distribuídos de forma bastante desigual ao longo da superfície terrestre, motivo pelo qual, algumas regiões possuem um excedente hídrico enquanto outras enfrentam séria escassez. A distribuição da água pelos continentes pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 - A distribuição da água por continente.



Fonte: CURI e SANTOS, 2008. P. 4.

Como se pode notar, os maiores volumes de água encontram-se na América do Sul e na Ásia. Os menores potenciais estão localizados na África, na Oceania e na América Central.

4.2 A SITUAÇÃO DA ÁGUA NO BRASIL E NO SEMIÁRIDO

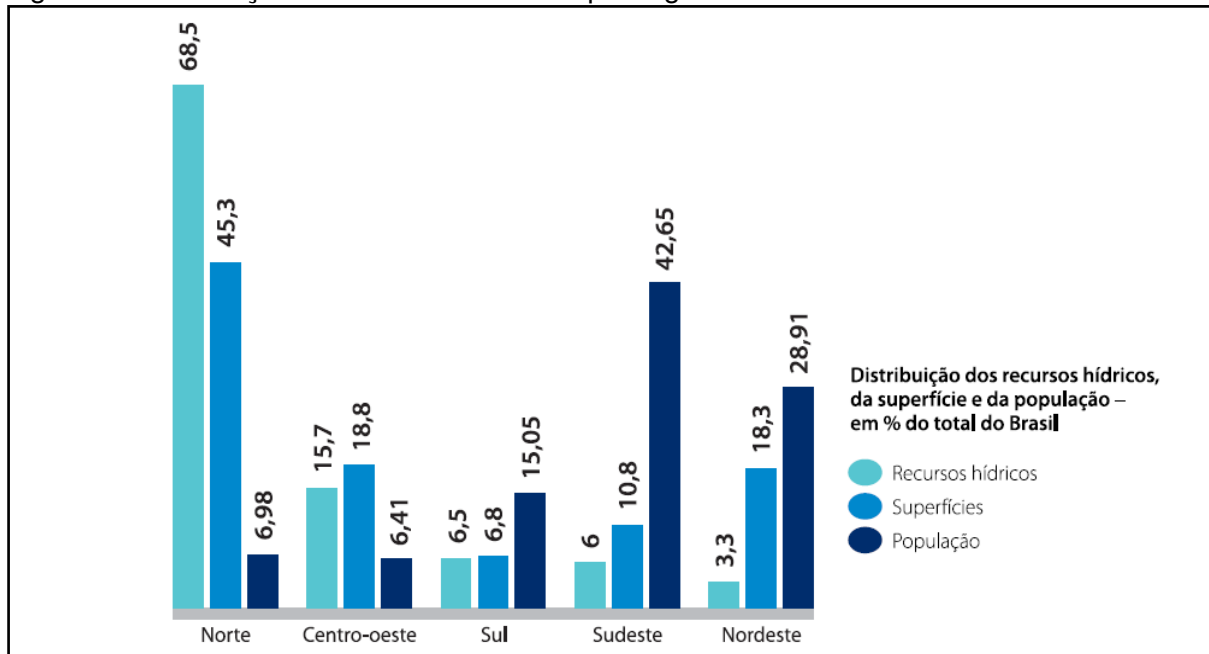
O Brasil é considerado um país privilegiado pela sua disponibilidade hídrica, pois possui umas das maiores reservas de água doce do planeta, contando com aproximadamente 12% do total de água disponível na superfície da Terra. Em seu território está localizado o maior rio em extensão e volume do Planeta, o Rio Amazonas. Além disso, conforme indicado por relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente em 2003, o Brasil está entre os trinta primeiros países no mundo em disponibilidade hídrica, com 48.314 m³ per capita/ano (RIBEIRO, 2003).

Conforme dados levantados em dezembro de 2007, a vazão média anual dos rios presentes no território brasileiro era de 179 mil m³/s, o que corresponde a aproximadamente 12% da disponibilidade global de recursos hídricos, conforme dito (ANA, 2010). Para se ter uma ideia, o volume de água por pessoa no Brasil é dezenove vezes superior ao mínimo estabelecido pela ONU. Como é possível então que haja tantos problemas oriundos da falta de água neste imenso país tropical?

Devido às dimensões continentais, o Brasil possui características hidrogeológicas e climáticas muito divergentes, caracterizando grandes contrastes em relação à disponibilidade dos recursos hídricos ao longo do seu território. Ou seja, a questão principal e mais óbvia está na desproporção em que toda esta água está distribuída ao longo do seu território, bem como na desproporção das diversas demandas pelo recurso (Figura 3). Por exemplo, na Região Amazônica, que conta com menos de 7% da população, encontram-se cerca de 70% dos recursos hídricos do país (SETTI et al, 2000). Por outro lado, a Região Nordeste, que abriga quase 27% da população conta com apenas 3% de toda a água doce do país, sendo que desse total, 63% encontra-se na Bacia do Rio São Francisco, e 15% na Bacia do Rio Parnaíba (BRITO, SILVA e PORTO, 2007).

A Figura 5 apresenta a distribuição da oferta pelo território brasileiro pelas cinco grandes regiões:

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



Fonte: MMA, 2005, p. 29.

Somam-se a estes enormes contrastes uma série de fatores agravantes que acentuam as desigualdades em termos de disponibilidade de água, como o aumento excessivo do consumo, a poluição de corpos d'água e a má gestão dos recursos hídricos de um modo geral.

Quando se fala em escassez de água é inevitável a associação com a Região Nordeste do Brasil, afinal é esta a porção do território do país que mais comumente sofre com este problema. Na realidade, mesmo a região nordestina apresenta situações distintas, com características diferenciadas entre algumas áreas, como as zonas litorâneas e a porção que faz limite com a região amazônica, contrastando com a porção mais central da região, que é conhecida como o Semiárido brasileiro, e que se estende do estado do Piauí ao norte do estado de Minas Gerais, ocupando o equivalente a 67% do território do Nordeste, numa área que compreende 1.133 municípios (BRITO, SILVA e PORTO 2007).

O semiárido brasileiro, onde vivem aproximadamente 22 milhões de pessoas, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – dos quais 56% em área rural – possui características muito particulares em relação ao restante do país.

Nesta região predomina o bioma da caatinga, único exclusivamente brasileiro; o regime pluviométrico varia entre 200 e 800 mm anuais, dependendo da área, a região semiárida mais chuvosa do mundo (ASA Brasil, 2013). O problema é que essas chuvas concentram-se basicamente em quatro meses do ano (de fevereiro a maio) e existe uma grande variabilidade de um ano para o outro. Além disso, em consequência da irregularidade das precipitações, a região semiárida apresenta altas taxas de evapotranspiração que ajudam a diminuir a disponibilidade hídrica, bem como reduzir seriamente a qualidade da água (CIRILO, MONTENEGRO E CAMPOS, 2010).

4.3 O USO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A água é o elemento que possibilita a existência da vida na Terra. Ao longo do seu ciclo, a água é utilizada das mais diversas formas pelos seres vivos, notadamente pelo ser humano, numa infinidade de atividades. Porém, conforme já foi dito, apenas aproximadamente 0,03% de toda a água do planeta está efetivamente disponível para o uso do ser humano, sob a forma de rios e lagos. Constitui um bem de valor inestimável, que é utilizado em diversas atividades humanas, principalmente (conforme descrito por Curi e Santos, 2008):

- Abastecimento público, que é subdividido em uso doméstico (água para beber, preparar alimentos, na higiene pessoal, limpeza de habitações, entre outros), e uso público (escolas, hospitais e outros estabelecimentos públicos, irrigação de parques, limpeza de logradouros, combate a incêndios, etc.);
- Uso industrial, como matéria-prima, na produção de alimentos, produtos em geral, em atividades que requerem refrigeração, limpeza em áreas de produção, na lavagem de máquinas e equipamentos ou utilizada sob a forma de vapor, etc.;
- Produção de energia elétrica, por meio de usinas hidrelétricas construídas nos cursos de rios;
- Comercial, em restaurantes, bares, escritórios, lojas, oficinas;

- Agrícola e pecuário, na agricultura irrigada para produção de alimentos, no tratamento de animais, lavagem de máquinas e equipamentos;
- Recreacional, como nas atividades de lazer, turismo, na prática de alguns esportes, em piscinas, clubes, lagos, parques, etc.
- Navegação, no transporte de cargas e de pessoas em diversos tipos de embarcações;
- Saneamento, na diluição e tratamento de efluentes;
- Piscicultura e carcinocultura, na produção de peixes e camarão em reservatórios e tanques.
- Entre outros usos.

Segundo Setti et al (2000), a utilização da água pode ser dividida em dois tipos: de caráter consultivo, quando a água é retirada do seu curso natural, e somente parte dela retorna ao seu curso após o uso, como por exemplo, nos caso dos abastecimento urbano, do abastecimento industrial, da atividades agrícolas irrigadas; de caráter não consultivo, quando toda água captada retorna ao seu curso de origem, como no caso dos usos para a geração de energia elétrica, para recreação, pesca, navegação, entre outras.

A maior parcela de água consumida na atualidade – cerca de 70% – é destinada à produção agrícola, o que, aliás, representa 90% do total de água empregada no consumo humano. Evidentemente que faz todo sentido, afinal, a crescente população mundial precisa ser alimentada; contudo, a grande questão é utilizar essa água da maneira mais eficiente possível, em termos de produtividade por unidade de água consumida (BRITO, PORTO e SILVA, 2007).

Além disso, esta finalidade demanda muitos cuidados técnicos, principalmente em razão dos altos níveis de desperdício que as atividades agrícolas podem acarretar, bem como dos problemas oriundos da perda de qualidade da água, pela poluição dos corpos d'água ao longo de áreas irrigáveis, através da utilização de compostos agrotóxicos e fertilizantes com o objetivo de aumentar a produtividade.

Quando existe uma oferta abundante de água, ela pode ser tratada como um bem livre, sem valor econômico; porém, na atual conjuntura dos recursos hídricos no mundo, esta realidade está cada vez mais distante, tendo em vista que cada vez mais a demanda de água pelos diversos usuários supera a oferta, tornando-se

necessários mecanismos que possam frear esta demanda, como é o exemplo dos mecanismos de cobrança pelo uso da água. Passa-se, assim, a tratar a água como um bem dotado de valor econômico, ao qual deve ser atribuído um valor justo (SETTI et al, 2000).

De acordo com Silva (2009), a gestão dos recursos hídricos é um dos maiores desafios para as sociedades contemporâneas, numa realidade aonde, apesar do acelerado processo de degradação dos meios naturais, as questões ambientais já vieram à tona e estão mais em alta do que nunca; ou seja, boa parte da população já se mostra consciente, e não está mais disposta a simplesmente aceitar a apropriação dos recursos naturais, como a água, que são transformados em elemento econômico sob a égide do capitalismo.

De um modo geral, a utilização dos recursos hídricos pelo homem depende de fatores como a região, a disponibilidade hídrica, a realidade socioeconômica e cultural, as técnicas empregadas para sua captação, tratamento e distribuição aos usuários (CURI E SANTOS, 2008). Assim, cada povo aprendeu ao longo de sua formação, maneiras próprias de se utilizar a água de forma a atender suas necessidades. Os romanos, por exemplo, ficaram famosos pela construção de grandes canais, aquedutos e reservatórios a fim de transportar água por grandes distâncias para o abastecimento de suas cidades, tornando-as prósperas (REBOUÇAS, 2004).

A oferta de água no mundo é suficiente para suprir a demanda de todos os habitantes, porém, devido à distribuição da água pelo planeta algumas regiões apresentam escassez deste recurso; aliando-se isso ao aumento excessivo da demanda, bem como ao uso inapropriado e a poluição de mananciais, temos um quadro preocupante de falta iminente de água de qualidade para boa parte da população. Alguns podem afirmar que a convivência com a escassez de água sempre foi um problema para muitas regiões, porém a forma como gradativamente isto se agrava aponta para a culpabilidade das formas de consumo do homem no mundo atual. Os estudos mais pessimistas apontam que até 2025 cerca de 2/3 da população poderá ter acesso limitado à água de boa qualidade (BARLOW e CLARKE, 2003 apud BRITO, SILVA e PORTO, 2007).

4.4 A PROBLEMÁTICA DA ÁGUA

Com o acentuado crescimento da população mundial e as diversas transformações no modo de vida do ser humano ao longo dos últimos séculos, a disponibilidade dos recursos naturais vem sofrendo forte impacto, já que o seu uso desenfreado supera assustadoramente a capacidade do planeta de renová-los. Este modelo vigente de utilização compromete seriamente a oferta dos recursos naturais para as gerações posteriores. Enquanto a população mundial aumentou cerca de duas vezes ao longo do século passado, o consumo de água cresceu pelo menos nove vezes (BRITO, SILVA e PORTO, 2007).

Se pararmos para pensar, a questão da água já é um problema da geração atual, visto que diversas regiões sofrem com a pouca disponibilidade hídrica. Estimativas apontam que mais de 1 bilhão de pessoas vivem em condições de pouca disponibilidade hídrica atualmente, e que este número saltará para 5,5 bilhões nos próximos vinte e cinco anos. Conforme já foi dito, a oferta de água em termos globais é suficiente para atender a demanda de toda a população mundial, no entanto, a distribuição geográfica irregular do recurso bem como das populações acaba fazendo com que algumas regiões sofram com pouca disponibilidade hídrica (SETTI et al, 2000).

Diante desse cenário, os conflitos pelo uso da água são iminentes. Muitos países localizados em regiões que são consideradas zonas de estresse hídrico vivem sérias tensões em razão da disputa pela água. Exemplos mais comuns são vistos na África, nas regiões ao longo do rio Nilo, que abastece principalmente Sudão e Egito, bem como no rio Senegal, na parte noroeste do continente; no Oriente médio, as disputas pelo acesso à água envolvem principalmente Israel, Palestina, Síria, Jordânia, Turquia e Iraque, sendo os principais conflitos relacionados ao controle pelo rio Jordão, e pelos rios Tigres e Eufrates; na Ásia, alguns países como Paquistão, Índia e Bangladesh, e até mesmo a China vivem tensões constantes pelos corpos d'água da região. Até mesmo na América Latina, que é considerada uma região abundante em água, cerca de 92 milhões de pessoas sofrem pela escassez de água, devido à falta de políticas públicas que tornem a oferta menos desigual (RIBEIRO, 2003).

As preocupações com as questões ambientais ganharam bastante impulso após a década de 1970, mas o tema dos recursos hídricos só passou a ser tratado com maior atenção a partir da Rio-92 (Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em 1992). Decorrido este período, os debates acerca da importância dos recursos hídricos para o desenvolvimento econômico e social tornaram-se mais efetivos em âmbito local e mundial, novas legislações específicas foram criadas ou aprimoradas em vários países, diversas organizações e governos têm se esforçado para avançar nos estudos acerca da temática da água (BERBERT, 2003).

É evidente que muita coisa já mudou nas últimas décadas quando em se tratando das discussões acerca dos recursos hídricos, que tendem a ser reconhecidos como uma verdadeira *commodity*, e que podem se transformar também em um importante elemento de barganha política (BERBERT, 2003). Prova disso são os diversos fóruns, simpósios e congressos que são realizados cada vez mais frequentemente para debater propostas de soluções para os problemas relativos à temática.

4.5. A POLÍTICA NACIONAL DOS RECURSOS HÍDRICOS

O Brasil já possui uma legislação mais moderna relativa às águas desde a década de 1930, com o Código das Águas, Decreto-Lei nº 24.643, de 10 de julho de 1934, que dispõe sobre normas referentes à: águas em geral e sua propriedade, aproveitamento das águas, forças hidráulicas (regulamentação da indústria hidrelétrica). Com o objetivo de responder as demandas de um país que passava por grandes transformações desenvolvimentistas, este Código foi tido por especialistas como muito avançado para a época em que foi elaborado (SILVESTRE, 2008).

No entanto, diante das constantes transformações institucionais, políticas e sociais e, sobretudo do significativo aumento da demanda que o país assistiu nas décadas seguintes, esta legislação tornou-se pouco efetiva em combater desequilíbrios hídricos e conflitos pela utilização da água, ou propiciar uma gestão

mais eficiente do recurso. Assim, em face destas lacunas, foram sancionadas em 1997 e 2000, respectivamente, as leis nº 9.433 e nº 9.984 (SETTI et al, 2000).

A lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 constituiu um passo fundamental no trato com os recursos hídricos brasileiros, dispondo sobre a instituição da Política Nacional dos Recursos Hídricos e a criação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos. A Política Nacional dos Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos (Art. 1º da Lei 9.433; BRASIL, 1997):

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

Conforme afirmam Cirilo, Montenegro e Campos (2010, p. 82), a chamada Lei das Águas implantou uma nova filosofia baseada em:

controle do uso por meio de instrumentos como outorga e da, ainda incipiente, cobrança pelo uso da água bruta; planos de recursos hídricos para as bacias hidrográficas e os estados; estruturação de entidades gestoras e organismos de bacia; e programas de obras estruturadoras.

Já o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos tem os seguintes objetivos (Art. 32 da Lei 9.433; BRASIL, 1997):

- I - coordenar a gestão integrada das águas;
- II - arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos;
- III - implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos;

IV - planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos;

V - promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos.

Por sua vez, a Lei 9.984 que foi sancionada em 17 de julho de 2000, criou a Agência Nacional de Águas, entidade executiva federal, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, responsável por implementar a Política Nacional dos Recursos Hídricos, e por coordenar o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos. (BRASIL, 2000)

4.6 A IMPORTÂNCIA DO PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Diante deste quadro de iminente escassez de recursos hídricos para o atendimento das necessidades básicas de boa parte da população mundial, fazem-se necessárias enormes modificações quanto às atuais formas de consumo da água, a começar pela reeducação dos usuários quanto à necessidade de evitar desperdícios, o incremento das políticas públicas com finalidade de se reduzir as desigualdades pela utilização da água, entre outras ações.

A gestão dos recursos hídricos passou por importantes evoluções nos últimos tempos, sobretudo em razão aumento da preocupação de governos e entidades quanto à importância da água para o desenvolvimento socioeconômico. Essa preocupação acompanha a mudança de paradigmas quanto às questões ambientais, que ganharam considerável visibilidade nas últimas décadas. Diante dessas mudanças surgiu o conceito do desenvolvimento sustentável, que prevê que o crescimento deve acontecer de modo sustentado, garantindo que os mesmos recursos disponíveis hoje possam ser utilizados pelas gerações futuras,

A ideia de planejar as coisas é tão antiga quanto à maior parte dos conhecimentos humanos. Segundo o dicionário Aurélio (FERREIRA, 2001, p. 574), planejar significa: “fazer o plano ou a planta de; projetar, traçar [...]; elaborar um plano de.” Em termos econômicos, o planejamento refere-se à maneira de conciliar um recurso escasso diante de uma necessidade abundante. Assim, quando se trata de um elemento tão fundamental à manutenção da vida no planeta como são os

recursos hídricos, é essencial que se tenha planejamentos para garantir acesso a todos os usuários de forma igualitária, levando em conta as disponibilidades e as prioridades de usos (SETTI et al, 2000).

Em termos de recursos hídricos, o planejamento torna-se uma tarefa muito mais complexa, tendo em vista as diversas particularidades. Além das disponibilidades, das prioridades de uso, a gestão da água envolve aspectos relacionados à distribuição e as formas de acesso, e às questões como a poluição de mananciais e formas de uso que gerem desperdício, entre outros problemas. Deste modo, apenas dispor do recurso em abundância, sem saber administrá-lo de forma coerente é tão grave quanto lidar com a escassez (CURI e SANTOS, 2008).

Uma gestão eficiente deve objetivar o atendimento das necessidades da melhor forma possível, com bases nos recursos disponíveis. Porém, para uma administração eficiente dos recursos hídricos, é necessário que haja antes um bom planejamento, com base em informações acerca de todos os aspectos envolvidos com o tema. Setti et al (2000) afirmam que a administração dos recursos hídricos requer um conjunto de ações que possam concretizar o planejamento efetuado, com os devidos suportes técnicos, jurídicos e administrativos; deste modo, o gerenciamento da água ocorre por meio de processos integrados de planejamento e de administração.

Um bom planejamento precisa estar baseado em informações confiáveis e, principalmente, possuir um objetivo claro. Setti et al (2000, p. 44), descrevem muito bem os aspectos mais importantes do planejamento dos recursos hídricos ao afirmar que:

O planejamento dos recursos hídricos visa à avaliação prospectiva das demandas e das disponibilidades desses recursos e a sua alocação entre usos múltiplos, de forma a obter os máximos benefícios econômicos e sociais, com a mínima degradação ambiental. É necessário planejar a longo prazo, em razão do tempo de maturação das obras hidráulicas, da vida útil dessas obras e pela repercussão das decisões tomadas, que podem atingir várias gerações, sendo muitas vezes irreversíveis.

Para Curi e Santos (2008) o planejamento precisa definir as metas de racionalização de uso, do aumento na quantidade demandada e da melhoria na qualidade da água, apontando as respectivas medidas que devem ser tomadas, os

programas a serem desenvolvidos e os projetos a serem implantados. Assim, o planejamento dos recursos hídricos deve objetivar:

- *A manutenção dos recursos existentes* – respeitando a capacidade de suporte do meio ambiente; controlando a poluição e a degradação; buscando a proteção dos mananciais, das matas ciliares e da biodiversidade;
- *O incremento das formas de utilização* – aumentando e mantendo os sistemas de captação, armazenamento, tratamento e distribuição;
- *A redução dos desperdícios* – reeducando os usuários quanto as formas de utilização; aumentando o tratamento e o reuso de águas residuais; melhorando a eficiência/rendimento dos recursos hídricos ao longo dos sistemas de captação, tratamento e distribuição.
- *As melhorias nos usos* – reduzindo as desigualdades de usos; socializando a água, como forma de promoção social; estabelecendo parâmetros e elementos de controle.

A definição dos objetivos é fundamental para controlar a consecução dos planos de ação. De acordo com Mauad e Lima (2003), a finalidade do planejamento é orientar decisões futuras, enfatizando a importância de antecipar possíveis acontecimentos por meio de técnicas de análise e formulação de cenários.

Deste modo, o planejamento é uma ferramenta de extrema importância para garantir uma melhor utilização dos recursos de um sistema hídrico, levando em conta as disponibilidades e prioridades de uso, satisfazendo assim todos os usuários de maneira igualitária.

4.7 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO EM SISTEMAS HÍDRICOS

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos para auxiliar no planejamento de sistemas hídricos de todos os tipos. Neste sentido, muitas são as técnicas matemáticas e os programas que têm ajudado a apontar políticas de utilização mais eficientes dos recursos hídricos disponíveis nesses sistemas, com base nas

prioridades de uso, nas particularidades de cada sistema ou região, nas restrições impostas por cada sistema.

Diante disso, as duas principais técnicas de estudo de suporte a decisão em sistemas hídricos são a simulação e a otimização, amplamente difundidas e utilizadas no campo das engenharias.

4.7.1 OTIMIZAÇÃO

De modo geral, os modelos de suporte à decisão que se utilizam de técnicas de otimização buscam a solução ótima para determinado problema, de forma que se atendam os objetivos para a operação de um sistema. Ou seja, a solução que maximiza a eficiência no planejamento de um sistema hídrico é dada por um modelo de otimização.

Para tanto é necessário estabelecer primeiramente uma função objetivo, dada por uma representação matemática dos objetivos a serem alcançados por meio da operação do sistema que está sendo analisado. Os modelos de otimização, a depender dos objetivos requeridos, devem buscar a maximização ou a minimização da função-objetivo, cujas variáveis básicas são chamadas de variáveis de decisão. Dada a solução do problema, os valores obtidos para o conjunto de variáveis de decisão formam uma solução ótima para a operação do sistema em análise (ARAGÃO, 2008).

Os processos físicos e condições ao redor do problema formam o conjunto de equações de restrição, que, no caso de sistemas hídricos, podem ser, por exemplo, os limites para a capacidade dos reservatórios, os limites para as vazões efluentes, as obrigações legais, ambientais, as limitações técnicas de equipamentos hidromecânicos, etc. Ou seja, as restrições, que também são representadas por funções matemáticas, tem como finalidade forçar o modelo de otimização à obedecer a leis físicas, exigências operacionais, socioeconômicas e políticas, entre outras (ARAGÃO, 2008).

Os avanços mais significativos na engenharia de recursos hídricos das últimas décadas advém do desenvolvimento e adoção de técnicas de otimização para planejamento e gerenciamento de sistemas complexos de recursos

hídricos. Tendo em vista a existência de inúmeras possibilidades viáveis para o planejamento de sistemas hídricos, a utilização dos modelos de simulação pode tornar a escolha da melhor regra uma tarefa muito árdua. As técnicas de otimização, por sua vez, providenciam um meio de superar tal dificuldade, já que dispõem da habilidade de examinar todas as alternativas possíveis e buscar a decisão ótima (YEAH, 1985 *apud* SANTOS, 2011).

A maior parte dos modelos de otimização baseia-se em algum tipo de programação matemática, sendo os mais utilizados conforme FARIAS (2004):

- **Programação Linear (PL)** - Uma das técnicas mais utilizadas no planejamento de recursos hídricos, a PL tem como principais vantagens: a possibilidade de se adequar a grande quantidade de problemas, bem como a problemas de grande dimensão; uma maior facilidade de ser entendida, se comparada a outras técnicas de otimização; a disponibilidade de pacotes computacionais prontos a nível comercial; entre outras. Neste tipo de programação, somente podem ser utilizadas expressões lineares (tanto para as restrições quanto para a função-objetivo) para representar o sistema.
- **Programação Não-Linear (PNL)** – é um método de programação que envolve pelo menos um termo não-linear (a função-objetivo ou alguma equação de restrição); utiliza-se de métodos numéricos iterativos, gerando soluções a cada passo. Na PNL, os sistemas podem ser representados de forma mais real, dispensando simplificações, o que pode aumentar a precisão dos resultados. Porém, devido a não linearidade, o resultado obtido pode não ser o ótimo global. Além disso, devido à complexidade dos cálculos e ao esforço computacional exigido, a PNL não é um método tão popular.
- **Programação Dinâmica (PD)** – método matemático bastante popular na análise de sistemas hídricos, na PD um problema que envolve diversas variáveis é subdividido em várias etapas ou estágios sequenciais, na qual, cada um desses estágios pode representar um ponto de tomada de decisão, o que implica que a decisão de uma etapa é influenciada pela etapa anterior. Por exemplo, em recursos hídricos, a sequência pode ser um grupo de reservatórios. Ou seja, o problema é decomposto para facilitar a solução. A PD pode ser usada em problemas que envolvem funções não-lineares, convexas e descontínuas. Uma deficiência da PD, chamada “maldição da

dimensionalidade”, ocorre quando aplicado a sistemas de reservatórios múltiplos, decorrente do fato de o tempo computacional crescer exponencialmente com o número de variáveis de estado.

4.7.2 SIMULAÇÃO

A técnica da simulação consiste em uma representação matemática de um sistema físico que tem por objetivo prever seu comportamento diante de um determinado conjunto de condições (FARIAS, 2009). De acordo com Santos (2011, p. 26), “a simulação é uma técnica de modelagem usada para aproximar o comportamento espacial e/ou temporal de um sistema, representando as suas principais características por meio de equações matemáticas.”

Quando comparada com a técnica da otimização, a simulação não identifica políticas ótimas para a operação de sistemas hídricos, entretanto, pode proporcionar uma representação mais realista e detalhada da complexidade do sistema analisado, podendo ser utilizado para estudar sistemas de múltiplos reservatórios (ARAGÃO, 2008).

Além disso, a simulação permite modificar as variáveis de entrada e as políticas de operação, o que, por meio de procedimentos de tentativa e erro, possibilita resultados bem próximos dos valores ótimos (FARIAS, 2009).

Os métodos de simulação contam ainda com a vantagem da flexibilidade, ao possibilitar a representação por meio de uma descrição matemática detalhada de todas as características de um sistema hídrico, já que é preciso resolver um sistema de equações associado a um instante de tempo de cada vez. Em razão disso, a simulação não consegue prever comportamentos futuros, já que as decisões são tomadas em função do estado das variáveis em um tempo presente (SANTOS, 2011).

Segundo Braga (1987 *apud* ARAGÃO, 2008, p.8), há dois tipos básicos de simulação em recursos hídricos,

O primeiro diz respeito à simulação dos processos hidrológicos (os que transformam chuva em vazão) e de qualidade de água, onde as

equações diferenciais e empíricas são utilizadas para representação de vários aspectos quali-quantitativos do ciclo hidrológico. O segundo tipo de modelo de simulação refere-se aos aspectos de dimensionamento e operação de sistema de recursos hídricos. Modelos de simulação associados com operação de reservatórios consideram, 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.

Conforme Santos (2011), tem se tornado tendência a utilização de técnicas que incorporam rotinas de otimização em modelos de simulação. Um modelo deste tipo pode, por exemplo, definir de modo preliminar, por meio de um algoritmo de otimização, algumas alternativas que serão, em seguida, detalhadas e testadas por um algoritmo de simulação. Além disso, por outro lado, segundo Lima e Lanna (2005 *apud* SANTOS, 2011), os modelos de simulação podem ser usados, preliminarmente, para demarcar espaços de soluções possíveis, que depois serão analisados de forma mais precisa por modelos de otimização, para localizar o ponto da solução ótima.

Santos (2011) cita ainda vários trabalhos desenvolvidos por meio de técnicas combinadas, como o modelo desenvolvido por Vieira (2007), e o modelo desenvolvido Munevar e Chung (1999) no California Department of Water Resources.

Uma das mais conhecidas técnicas para combinar modelos de simulação e otimização são os modelos de fluxo de rede, que representam o sistema por meio de uma rede de nós e arcos. Nesta rede, os nós representam elementos pontuais do sistema, tais como reservatórios, demandas, importações e confluências, e os arcos representam as ligações entre os nós, como trechos de rios, adutoras, canais naturais ou artificiais, etc (SANTOS, 2011).

Um dos mais conhecidos modelos de rede de fluxo é o desenvolvido por Labadie *et al* (1984), no Colorado State University, chamado MODSIM. Ele permite fazer a otimização da alocação de água via modelo de rede de fluxo aplicada de forma individual para cada mês (LIMA, 2004 *apud* FARIAS, 2009).

Pesquisadores do Laboratório de Sistema de Suporte à Decisão da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), desenvolveram uma versão aprimorada do modelo MODSIM, que recebeu o nome de ACQUANET. Com ele

é possível montar redes de fluxo com um grande número de reservatórios, demandas, trechos de canais, rios e adutoras, e para cada trecho pode-se atribuir um valor percentual de perdas em trânsito. Além disso, o Acquanet pode ser utilizado também de forma satisfatória para a análise individual de cada reservatório que compõe o sistema (FARIAS, 2009).

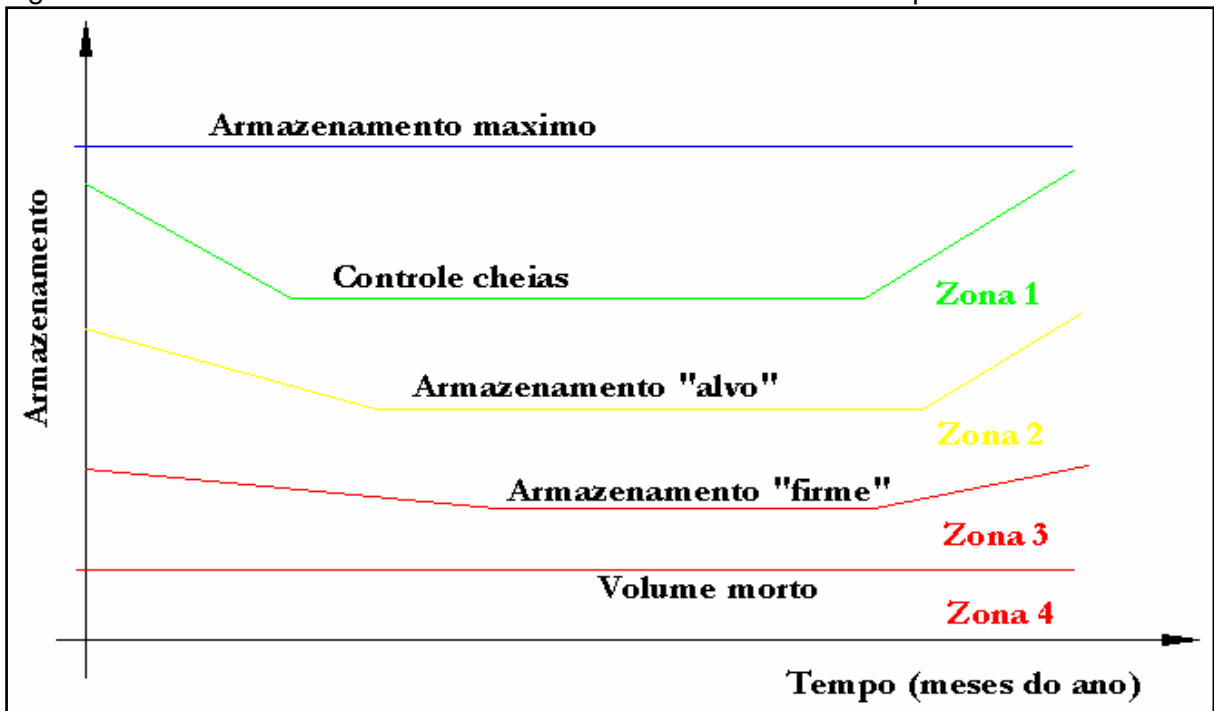
4.7.3 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Há muitas regras diferentes para a operação de reservatórios, porém todas elas indicam o armazenamento ou descarga alvo que se deseja alcançar em determinados espaços de tempos, sejam estes diário, semanal, mensal, etc (LOUKSet *al.* 1981, *apud* BRAVO, COLLISCHONN e PILAR, 2005).

De acordo com Wurbs (1996, *apud* BRAVO, COLLISCHONN e PILAR, 2005, p. 4), “uma das regras de operação mais importantes inclui a divisão do armazenamento total em diferentes ‘zonas’ que possuem políticas de descarga específicas”.

Conhecidas como curvas-guia, estas regras de operação servem para indicar níveis de armazenamento alvos ou ideais objetivando alguma finalidade específica. As curvas guia determinam regras de descarga em função do armazenamento, ao longo do ano (WURBS, 1996 *apud* BRAVO, COLLISCHONN e PILAR, 2005). Observe na Figura 6 como podem ser representadas as curvas guia em um reservatório de múltiplos usos.

Figura 6 - Subdivisão do armazenamento em um reservatório de múltiplos usos.



Fonte: BRAVO, COLLISCHONN e PILAR, 2005.

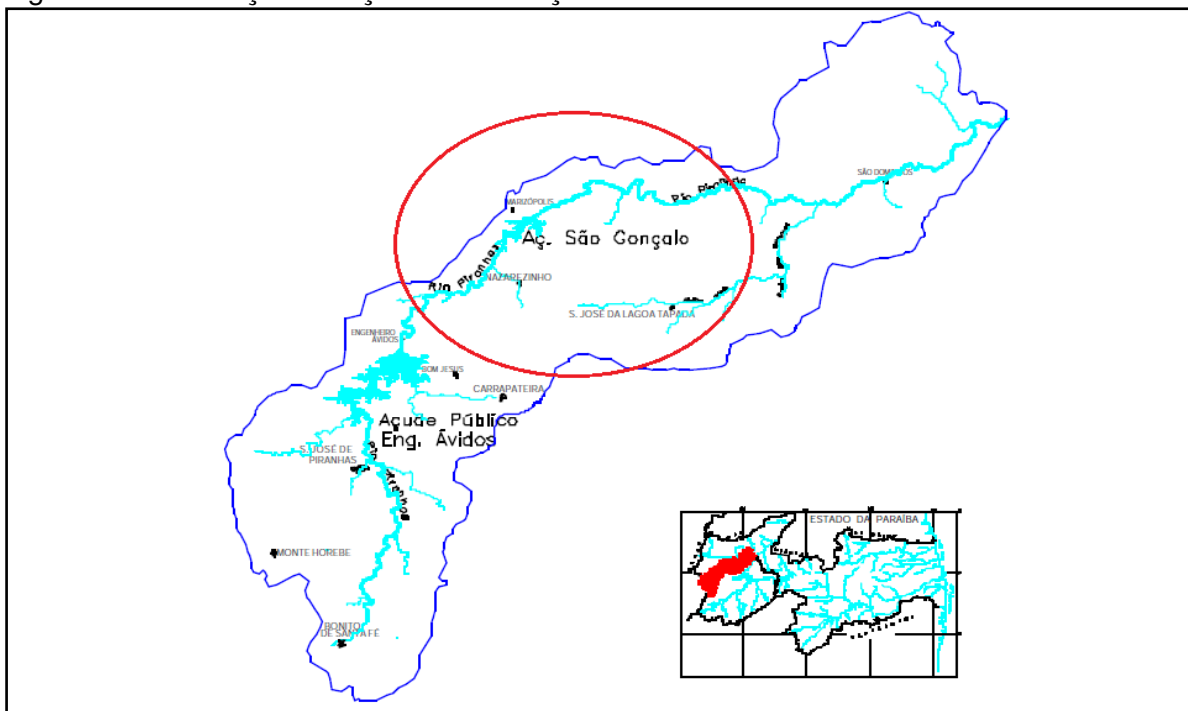
Para compreender melhor as curvas guias representadas na figura 6 pode-se considerar dois usos para este reservatório, como o controle de cheias e o fornecimento de água para consumo. Quando o volume do reservatório encontrar-se acima da “curva de controle de cheias”, significa que 100% das demandas de fornecimento são atendidas, bem como são feitas descargas adicionais para que o volume armazenado seja levado ao nível desta curva, criando-se assim um espaço no reservatório para atenuar futuras cheias. Se o volume encontra-se na zona 1, não há necessidades de descargas adicionais e o fornecimento para consumo é 100% atendido. Já se o volume armazenado encontrar-se na zona 2, pode-se iniciar um racionamento, atendendo-se a demanda de fornecimento em apenas 75%, por exemplo. Na zona 3, aumenta-se a necessidade de racionar o uso, e o atendimento da demanda poderia diminuir, por exemplo, para apenas 50%. Já na zona 4 nenhuma demanda poderá ser atendida (BRAVO, COLLISCHONN e PILAR, 2005).

5 METODOLOGIA

5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O sistema hídrico estudado neste trabalho corresponde ao Reservatório São Gonçalo (Figura 7), localizado entre os municípios de Sousa, Marizópolis e Nazarezinho, na região do Alto Sertão do Estado da Paraíba. O reservatório pertence à bacia hidrográfica do Alto Piranhas uma das sub-bacias do Rio Piranhas, situando-se entre as latitudes $6^{\circ}36'47''$ e $7^{\circ}22'56''$ Sul e, entre as longitudes $37^{\circ}48'15''$ e $38^{\circ}38'15''$ Oeste no Sertão Paraibano.

Figura 7 - Localização do Açude São Gonçalo na Bacia do Alto Piranhas.



Fonte: Adaptado de PDRH/PB, SCIENTEC, 1997.

O reservatório São Gonçalo teve sua construção iniciada em 1935, época em que diversas obras hidráulicas começaram a ser implantadas no intuito de mitigar os problemas da escassez de água na região Nordeste do Brasil. A finalidade principal do açude seria o abastecimento humano; hoje, é responsável pelo abastecimento hídrico dos aglomerados urbanos de Sousa, Marizópolis, Distrito São Gonçalo, e

Núcleos Habitacionais I, II e III. Além disso, a água também é utilizada pelo Perímetro Irrigado de São Gonçalo, onde são desenvolvidas diversas culturas agrícolas, tanto permanentes, como coco, banana, capim, goiaba, acerola, manga, graviola e caju, quanto temporárias, como milho, feijão e batata.

Abaixo alguns dados técnicos do reservatório São Gonçalo, segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PDRH/PB (SCIENTEC1997) podem ser observados no Tabela1:

Tabela 1 - Dados referentes ao Reservatório São Gonçalo.

Volume máximo (m ³)	44.600.000
Volume morto (m ³)	2.982.000
Altura (m)	25,30
Comprimento (m)	380,00
Material	Terra
Área da bacia hidráulica (ha)	700
Área da bacia hidrográfica (km ²)	315
Largura do vertedor (m)	230
Vazão máxima – vertedor (m ³ /s)	1800

Fonte: PDRH/PB, SCIENTEC, 1997 *apud* FARIAS, 2004; p. 19.

Segundo Farias (2004) as principais características hidroclimáticas da região do reservatório São Gonçalo são:

- A temperatura média mensal de 26,6 C°;
- A umidade relativa do ar tem média mensal em torno de 62%, tendo como períodos de menor umidade os meses de outubro e novembro;
- A insolação média mensal é de 8,7 horas por dia;
- A velocidade média do vento fica em torno de 1,7 m/s; são normalmente ventos fracos ou moderados, com direções sudeste e nordeste;
- Os dados sugerem uma taxa média anual de evapotranspiração da ordem de 2.937 mm;
- Os dados mostram uma precipitação média anual por volta de 800 mm, sendo os meses de fevereiro, março e abril os meses de maior precipitação.

O Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), que juntamente com os órgãos estaduais de gestão hídrica, a Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) e Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) são responsáveis pela administração dos recursos hídricos do açude público federal de São Gonçalo. Esses órgãos fazem o monitoramento frequente da situação do reservatório.

5.2 DADOS DO SISTEMA

5.2.1 DEMANDAS HÍDRICAS

As principais demandas hídricas (Figura 8) a serem supridas pelo reservatório São Gonçalo foram abastecimento dos Municípios de Sousa (Distrito Sede, Distrito São Gonçalo e Núcleos Habitacionais I, II e III) e do Município de Marizópolis; a demanda para abastecimento difuso de comunidades localizadas próximas aos reservatório; a demanda para a irrigação do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), localizado a jusante do reservatório; bem como a água retirada de forma pelos irrigantes que vivem ao redor do reservatório, conhecida como irrigação difusa.

A demanda para o abastecimento humano constitui a prioridade maior entre as demandas no caso do Reservatório São Gonçalo, assim como em qualquer outro sistema hídrico construído com tal finalidade, conforme garante a legislação vigente sobre o tema no Brasil (Lei nº 9.433/97). De acordo com o DNOCS, a demanda hídrica para a finalidade de abastecimento urbano de Sousa e Marizópolis captada pela Estação de Tratamento de Águas da CAGEPA, em média, por dia, no reservatório São Gonçalo é da ordem de 22,5 mil m³ (0,26 m³/s). No mês de junho de 2013, durante visita realizada pelos técnicos da Agência Nacional de Águas (ANA), constatou-se que a vazão destinada aos referidos núcleos urbanos era de 24,7 mil m³/dia (0,286 m³/s). Por sua vez, a outorga emitida pela ANA para a adutora é de cerca 13,8 mil m³/dia, ou seja, 0,16 m³/s. Deste modo, será considerada neste estudo este valor para o abastecimento urbano de Sousa, Marizópolis, São Gonçalo e Núcleos I, II e III.

Figura 8 - Principais demandas do reservatório São Gonçalo.



Fonte: AESA, 2013

A demanda para o abastecimento difuso considerada neste trabalho foi estimada pelos técnicos da ANA. O abastecimento difuso diz respeito a algumas pequenas comunidades que existem próximas a área do açude e que se utilizam de sua água para consumo humano e animal. Assim sendo, para a operação do reservatório, esta é considerada uma demanda com prioridade igual ao abastecimento urbano, já que refere a consumo humano e animal. A demanda média para esta finalidade foi estimada pelos técnicos da ANA em 0,002 m³/s.

Para fins do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, considerou-se uma demanda média mensal variável, conforme está representado na Tabela 2. Esta demanda foi proposta pelos técnicos da ANA em estudo recente realizado no Perímetro Irrigado, no mês de junho 2013. Porém, em períodos de escassez hídrica, o volume liberado para uso no PISG corresponde apenas à chamada irrigação de salvação, que corresponde a 60% do volume liberado normalmente, e que tem por objetivo evitar que as culturas permanentes já estabelecidas no perímetro sejam perdidas.

Outra demanda considerada para fins deste trabalho diz respeito ao abastecimento ou irrigação difuso, que é aquele que ocorre de forma não controlada pelos órgãos gestores do reservatório, correspondente aos recursos hídricos retirados pelas populações ribeirinhas que vivem ao redor do açude. (Tabela 3) Esta demanda também foi estimada pelos técnicos da ANA. Do mesmo modo que a

demanda para o PISG, em períodos de escassez hídrica, o volume liberado para a irrigação difusa também corresponde à irrigação de salvação.

Tabela 2 - Demanda média mensal do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.

Meses	Volume Demandado (m³/s)	Volume liberado para "irrigação de salvação" (m³/s)
<i>Janeiro</i>	1,30	0,78
<i>Fevereiro</i>	0,54	0,32
<i>Março</i>	0,35	0,21
<i>Abril</i>	0,43	0,26
<i>Maio</i>	1,11	0,67
<i>Junho</i>	1,27	0,76
<i>Julho</i>	1,51	0,91
<i>Agosto</i>	1,78	1,07
<i>Setembro</i>	2,00	1,20
<i>Outubro</i>	2,05	1,23
<i>Novembro</i>	2,14	1,28
<i>Dezembro</i>	1,87	1,20

Tabela 3 - Demanda média mensal para irrigação difusa.

Meses	Volume Demandado (m³/s)	Volume liberado para "irrigação de salvação" (m³/s)
<i>Janeiro</i>	0,07	0,04
<i>Fevereiro</i>	0,03	0,02
<i>Março</i>	0,02	0,01
<i>Abril</i>	0,02	0,01
<i>Maio</i>	0,06	0,04
<i>Junho</i>	0,07	0,04
<i>Julho</i>	0,08	0,05
<i>Agosto</i>	0,10	0,06
<i>Setembro</i>	0,11	0,07
<i>Outubro</i>	0,11	0,07
<i>Novembro</i>	0,12	0,07
<i>Dezembro</i>	0,10	0,06

5.2.2 EVAPORAÇÃO

A evaporação é uma das mais importantes variáveis a serem consideradas quando se analisa o planejamento de sistema hídrico, pois, além de constituir uma demanda incontrolável, representa uma das mais significativas perdas no volume de água desse sistema.

Por estar localizada em uma região semiárida, a Bacia Hidrográfica do Alto Piranhas, na qual se encontra o Reservatório São Gonçalo, apresenta altas taxas de evaporação. Os valores utilizados para fins deste trabalho constituem a média mensal dos dados de evaporação observados no tanque "Classe A" da Estação Climatológica de São Gonçalo, conforme visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Média mensal de evaporação do Reservatório São Gonçalo.

Evaporação Média Mensal (m³) - Tanque "Classe A" (Estação Climatológica de São Gonçalo)

<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Total</i>
300,7	213,9	195,5	170,0	183,1	176,0	216,4	274,8	315,1	344,7	333,9	332,5	2542,0

Fonte: Estação Climatológica de São Gonçalo (SCIENTEC, 1997)

5.2.3 VAZÕES AFLUENTES

Os dados de vazões afluentes ao Reservatório São Gonçalo utilizados neste trabalho foram obtidos junto ao Banco de Dados da Secretaria Extraordinária de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - SEMARH, atualmente AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba). A série histórica contém os valores das vazões afluentes entre os anos 1933 e 1989, considerando portanto, uma total de 57 anos. (Anexo B).

Segundo informações do DNOCS, o reservatório São Gonçalo recebe ainda, durante o segundo semestre do ano, um suporte hídrico do reservatório Engenheiro Ávidos, localizado à montante do reservatório, da ordem de 1,8 m³/s, já considerando as perdas em trânsito de cerca de 22%, conforme recomendações de Aragão (2008).

5.2.4 DADOS DO RESERVATÓRIO E CRITÉRIOS OPERACIONAIS.

Conforme já foi especificado, o volume máximo do reservatório é de 44.600.000 m³ e o volume mínimo, ou volume morto é de 2.982.000 m³. O volume inicial utilizado corresponde à média dos volumes do mês de janeiro para os últimos 18 anos, de acordo com o DNOCS/CAGEPA (2013), que foi de 18.440.000 m³. Um resumo dos principais dados referentes ao Reservatório São Gonçalo encontram-se no Anexo A.

Os dados referentes as curvas *cota-área-volume* foram obtidos do Cadastro de Açudes do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Piranhas e Piancó. A tabela contendo esses dados encontra-se disponível no Anexo C.

Os demais critérios operacionais utilizados devem observar os seguintes pressupostos:

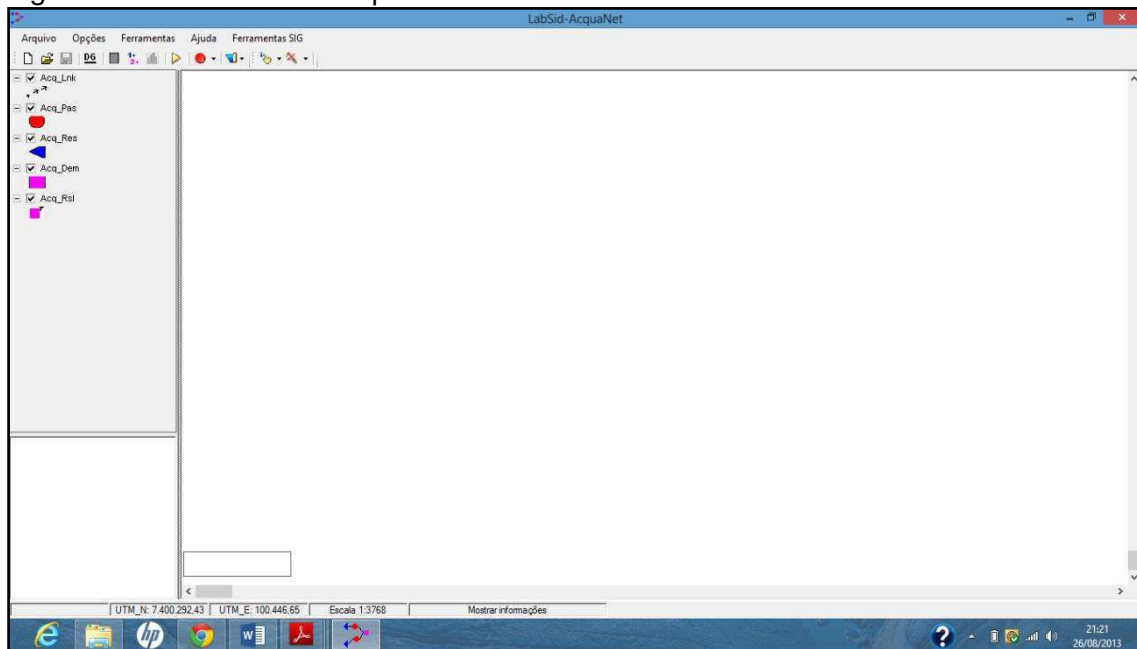
- O período utilizado para o cálculo é de 57 anos, ou 684 meses, contados a partir de janeiro de 1933, até dezembro de 1989. Esses valores foram obtidos com a AESA/DNOCS/CAGEPA.
- O volume meta do reservatório para todos os meses da série equivale à capacidade máxima do mesmo.
- As capacidades das tomadas d'água destinadas ao abastecimento humano foram consideradas iguais as suas respectivas demandas.

5.3 SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO ACQUANET

Para efetuar o cálculo dos cenários propostos para o planejamento dos recursos hídricos do Reservatório São Gonçalo optou-se pelo uso do modelo de rede de fluxo Acquanet 2013 versão 1.0.0. (Figura 9) Este modelo de simulação de bacias hidrográficas foi desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos –LabSid, da Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), a partir do aperfeiçoamento do

modelo de simulação ModSimP32, desenvolvido também pelo LabSid (AQUANET, 2013).

Figura 9 - Tela inicial do Acquanet 2013.



Fonte: AQUANET, 2013.

O Acquanet é um modelo de simulação integrado largamente utilizado para a análise de sistemas complexos em recursos hídricos. O software Acquanet é estruturado como um sistema de suporte à decisão que facilita o compreensão e a formulação do problema, a interpretação dos resultados de análise e auxilia na tomada de decisão (LABSID, 2013).

É possível representar bacias hidrográficas completas por meio de redes de fluxo, através de arcos e nós; enquanto estes representam os elementos mais estáticos da bacia (reservatórios, demandas, confluências, etc.), ou seja, pontos de entradas e saídas dos fluxos, àqueles representam os elementos mais dinâmicos onde ocorrem os fluxos (rios, canais, dutos, etc.) (FARIAS, 2009).

O Acquanet armazena seus dados por meio de banco de dados no formato de Microsoft Access. O programa utiliza um banco de dados temporário, que existe somente enquanto o modelo está sendo usado. Isso reduz o esforço computacional, uma vez que não há necessidade de alocar memória para as variáveis, já que elas estão automaticamente no banco de dados. Desta forma, quando um projeto for

aberto apenas uma parte do banco dados é lida, sendo que o restante só será lido quando necessário (AQUANET, 2013).

No Acquanet o usuário tem a possibilidade de inserir quantos nós de demanda forem necessários para levar em conta as demandas da bacia hidrográfica; o modelo atenderá estas demandas de acordo com o nível de prioridade estabelecido pelo usuário, que deve estar 1 e 99 (sendo 1 o valor de maior prioridade). Além disso, o modelo utiliza o conceito de volume meta, ao qual se atribui uma prioridade, para simular a operação do reservatório. Assim, sempre que o volume armazenado ficar abaixo do volume meta, e desde que as outras prioridades sejam menores, o reservatório irá guardar água. O Acquanet também considera as perdas por evaporação, através de processo iterativo.

5.3.1 TIPOS DE SIMULAÇÃO

Conforme descrição do manual do sistema Acquanet (2013), o modelo consegue efetuar os cálculos de maneira sequencial no tempo (chamada Simulação Contínua) ou estatisticamente (Planejamento Tático). No caso da Simulação Contínua, o valor mais importante é o número total de anos de simulação (NT). O usuário precisa fornecer séries de vazões afluentes mensais com duração igual ao número total de anos. O Acquanet efetuará os cálculos continuamente, para todos os anos existentes. No final, os resultados serão fornecidos mensalmente para todos os anos. No primeiro ano da simulação, o modelo parte com os volumes iniciais dos reservatórios fornecidos pelo usuário e efetua os cálculos até o final deste ano; já no segundo ano, a simulação considera como os volumes iniciais iguais aos volumes finais do ano anterior; o procedimento é repetido até o número total de anos e os resultados da simulação são fornecidos de forma contínua, do primeiro ao último ano.

Já no Planejamento Tático, é necessário fornecer, além do número total de anos de simulação (NT), o número de anos do horizonte de simulação (NH), que corresponde ao número de anos durante os quais se pretende estudar o comportamento do sistema em análise. Neste tipo de simulação, os cálculos ocorrem da seguinte maneira: partindo, no primeiro ano, com os volumes iniciais dos

reservatórios fornecidos pelo usuário, o modelo efetua os cálculos sequencialmente para o n° de anos do horizonte da simulação. Na segunda rodada, o procedimento é repetido partindo-se novamente dos volumes iniciais fornecidos pelo usuário; os cálculos são efetuados para o n° de anos do horizonte, mas partindo do segundo ano da série de vazões. O procedimento é repetido até que seja efetuado o cálculo partindo-se do ano $NT-NH+1$ da série de vazões. Os resultados obtidos são valores estatísticos para todos os meses do horizonte de simulação.

O Planejamento Tático é a opção de cálculo mais indicada quando o objetivo é fazer o planejamento e/ou a operação de sistemas de reservatórios.

5.3.2 POSSIBILIDADES DE CÁLCULO

No modelo de rede de fluxo Acquanet existem duas opções de cálculo, a saber, Estados Hidrológicos e Calibração. As diferenças entre estas duas possibilidades estão na entrada de dados e na forma como o modelo efetuará os cálculos.

Quando o usuário escolher a opção Estados Hidrológicos, o modelo considerará o estado hidrológico (quantidade de água armazenada nos reservatórios) para determinar qual o valor de demanda, de volume meta e as prioridades que serão utilizadas no cálculo de cada um dos meses. O modelo permite ao usuário utilizar até sete estados hidrológicos, fornecendo valores diferentes das grandezas citadas para cada um dos estados.

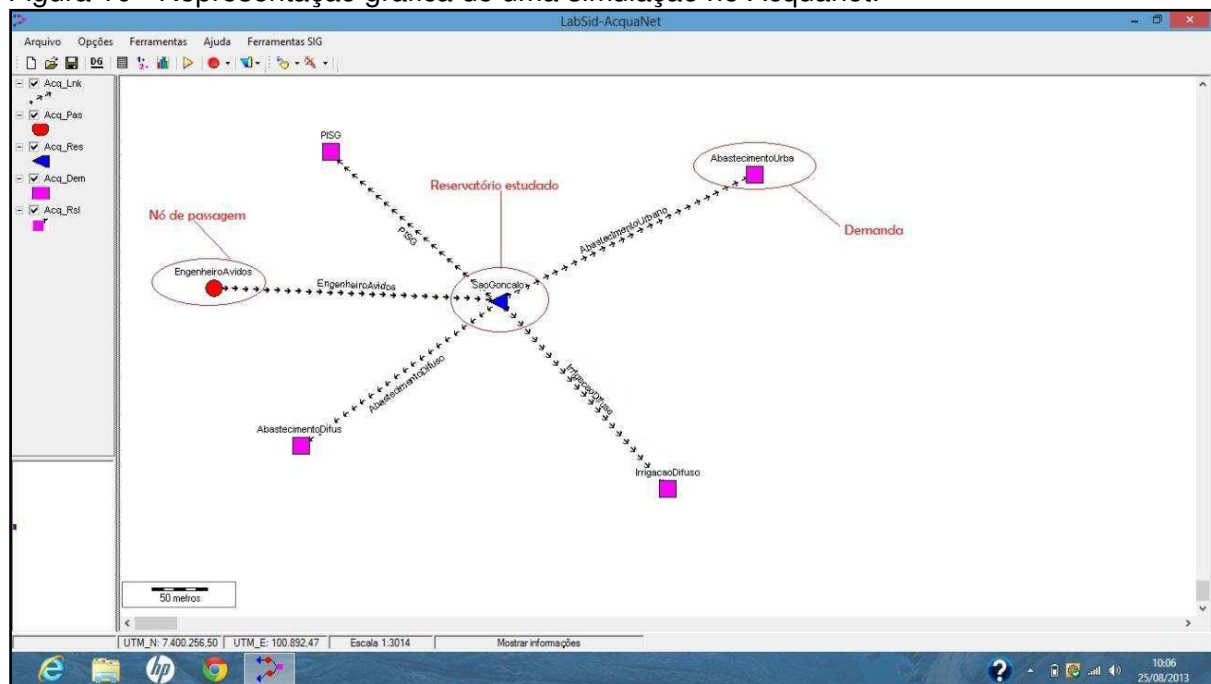
Já para a opção Calibração, o modelo efetua os cálculos com os valores fornecidos sem considerar o estado atual do sistema.

5.3.3. DESENHO DA REDE DE FLUXO

O primeiro passo para resolver um problema através do modelo Acquanet é elaborar a rede de fluxo, onde os nós, os reservatórios, as demandas e os links são representados graficamente por meio de símbolos, para desenhar a topografia da

bacia hidrográfica que está sendo analisada. No caso do sistema hídrico analisado, a representação é simplificada, já que o foco está em apenas um reservatório da bacia hidrográfica. Este é um procedimento bem simples, pois o Acquanet possui uma seleção de botões para inserir ou editar algum elemento do desenho de forma prática. Observe na figura 10 abaixo a representação gráfica do sistema estudado feita utilizando o Acquanet 2013.

Figura 10 - Representação gráfica de uma simulação no Acquanet.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 PROPOSTA DE OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO

Para a operação do reservatório, foram analisadas seis propostas (cenários) diferentes de operação que estão descritos a seguir:

- *Cenário 1* – Representa a situação atual, onde as demandas são atendidas de acordo com a disponibilidade de água, ou seja, caso haja água suficiente no reservatório, todas as demandas serão atendidas na sua totalidade.

- *Cenário 2* – Quando o volume reservatório encontrar-se abaixo de 40% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, proporcionando-lhes apenas a chamada “irrigação de salvação”, que equivale a 60% do volume normalmente liberado para tal finalidade.
- *Cenário 3* – Quando o volume do açude encontrar-se abaixo de 30% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, proporcionando-lhes apenas a “irrigação de salvação”.
- *Cenário 4* – Quando o volume do reservatório ficar abaixo de 20% de sua capacidade máxima, deverá ocorrer a supressão completa da oferta de água destinada a irrigação, tanto a difusa quanto a do Perímetro Irrigado.
- *Cenário 5* – Combinação dos cenários 2 e 4, ou seja, quando o reservatório estiver abaixo de 40% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, proporcionando-lhes apenas a “irrigação de salvação”; e caso o volume fique inferior aos 20% do capacidade máxima, deve ocorrer a supressão completa da oferta liberada para a irrigação.
- *Cenário 6* – Combinação dos cenários 3 e 4, ou seja, quando o reservatório estiver abaixo de 30% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, proporcionando-lhes apenas a “irrigação de salvação”; e caso o volume fique inferior aos 20% do capacidade máxima, deve ocorrer a supressão completa da oferta liberada para a irrigação.

Em todos os cenários, as demandas para abastecimento dos aglomerados urbanos e abastecimento difuso das comunidades ribeirinhas têm prioridade maior de atendimento, já que dizem respeito a consumo humano e dessedentação animal. Já as demandas para o Perímetro Irrigado de São Gonçalo e para a irrigação difusa

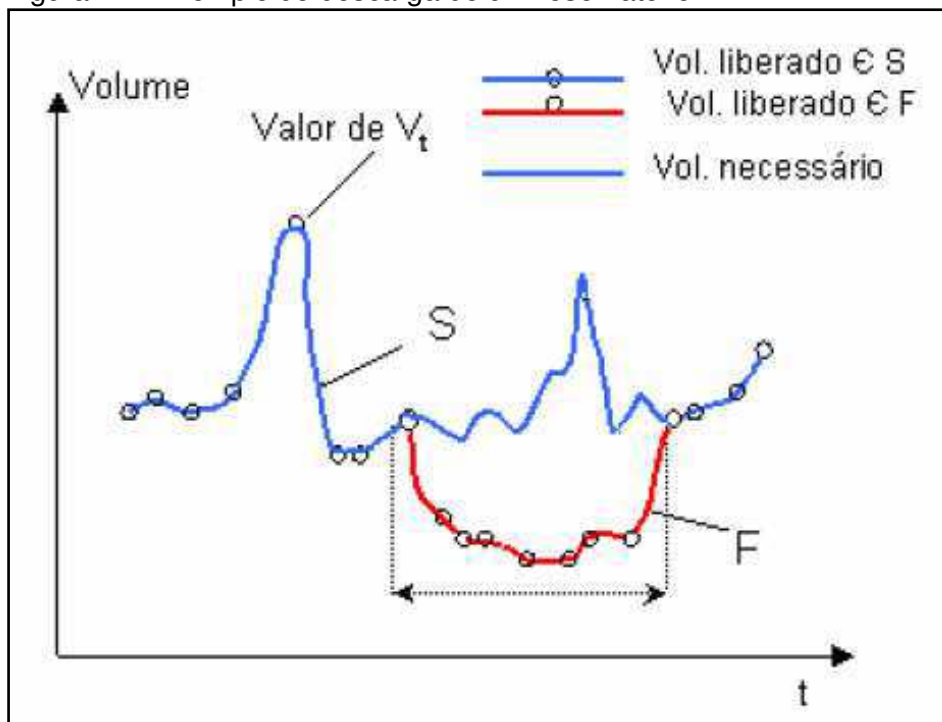
dos sítios localizados em comunidades próximas ao açude terão prioridades menores de atendimento.

5.5 INDICADORES DE DESEMPENHO

Para avaliar o grau de atendimento das demandas e facilitar a compreensão das propostas de operação do reservatório São Gonçalo foram utilizados os seguintes indicadores de desempenho: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Tais indicadores foram propostos por Hashimoto et al. (1982) e, são bastante utilizados em análise de sistema hídricos, já que providenciam meios de ponderar melhores resultados das diversas regras de operação propostas, bem como auxiliam na avaliação de futuros projetos a serem implantados (VIANNA E LANNA, 2002 *apud* SANTOS, 2011).

Seja V_t os possíveis valores do volume liberado no reservatório em função do tempo t ; estes volumes podem estar contidos em dois conjuntos: S , o conjunto de todos os valores satisfatórios, no qual o volume liberado é igual ao volume necessário para atender a todas as demandas, e F ; o conjunto de todos os valores insatisfatórios, no qual o volume liberado é menor que o volume necessário para atender as demandas (FARIAS, 2009). Veja a representação gráfica (Figura 11).

Figura 11 - Exemplo de descarga de um reservatório.



Fonte: CELESTE, 2006 *apud* FARIAS, 2009 p. 12.

5.5.1 CONFIABILIDADE

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

$$Conf = \frac{prob\{V_t \in S\}}{N_s}$$

Onde N_s é o número de sucesso no período de tempo simulado.

5.5.2 RESILIÊNCIA OU ELASTICIDADE

A resiliência (*res*) ou elasticidade é usada para avaliar a média de quão rapidamente o sistema retorna de um estado de falha para um estado satisfatório de

atendimento da demanda. Ou seja, a resiliência do reservatório é a probabilidade de ocorrer um estado satisfatório no período $t+1$ dado um valor insatisfatório no período t . Sua equação é a seguinte:

$$Res = prob\{V_{t+1} \in \frac{S}{V_t}\}$$

Ou *resiliência* = número de vezes que o reservatório sai de uma falha/nº total de falhas.

Algumas vezes é preferível um sistema que apresente muitas falhas, mas que se recupere mais rápido, do que um tenha poucas falhas e demore mais para se recuperar.

5.5.3 VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade (*vul*) serve para mostrar o quão severa é a magnitude das falhas ao qual o sistema está sujeito, caso ela tenha ocorrido. Ela é definida como a média do percentual de déficits hídricos de todos os valores do conjunto F . Matematicamente, é dada por:

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

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

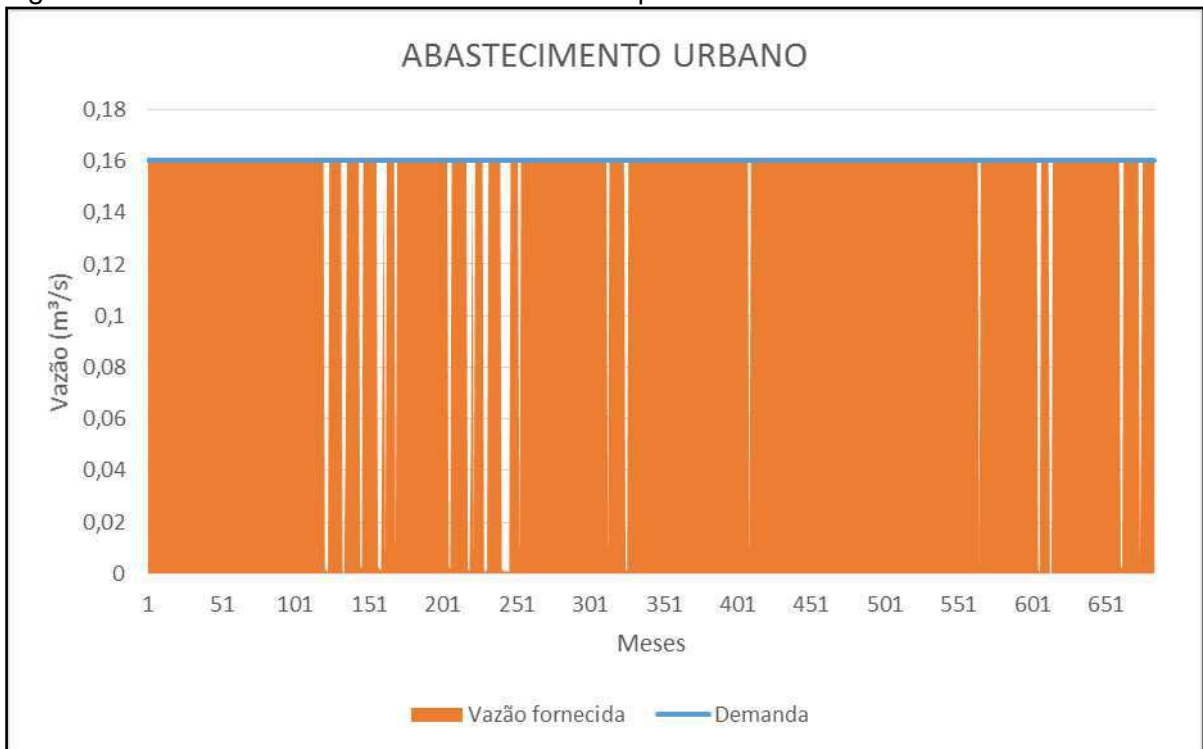
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CENÁRIO 1

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

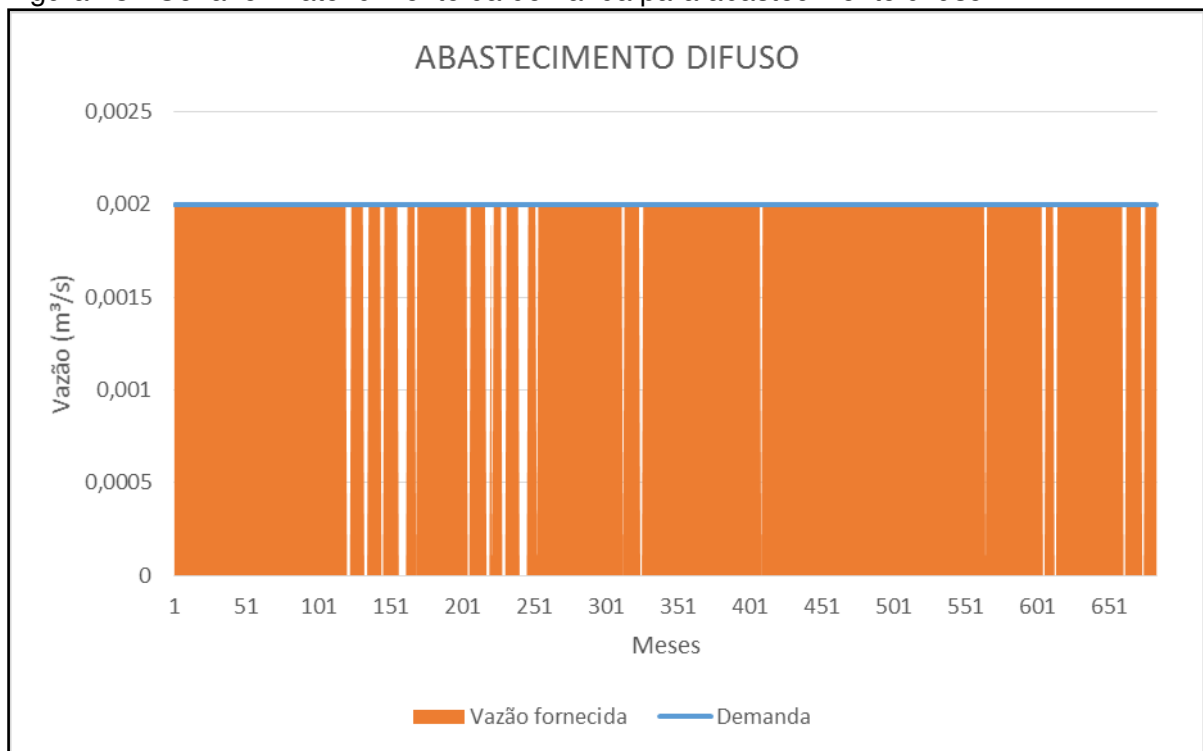
Com relação à demanda para o abastecimento urbano e o abastecimento difuso, para os quais foi estabelecida maior prioridade de atendimento, constatou-se a ocorrência de algumas falhas, conforme pode ser visualizado nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 - Cenário 1: atendimento da demanda para abastecimento urbano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Cenário 1: atendimento da demanda para abastecimento difuso.



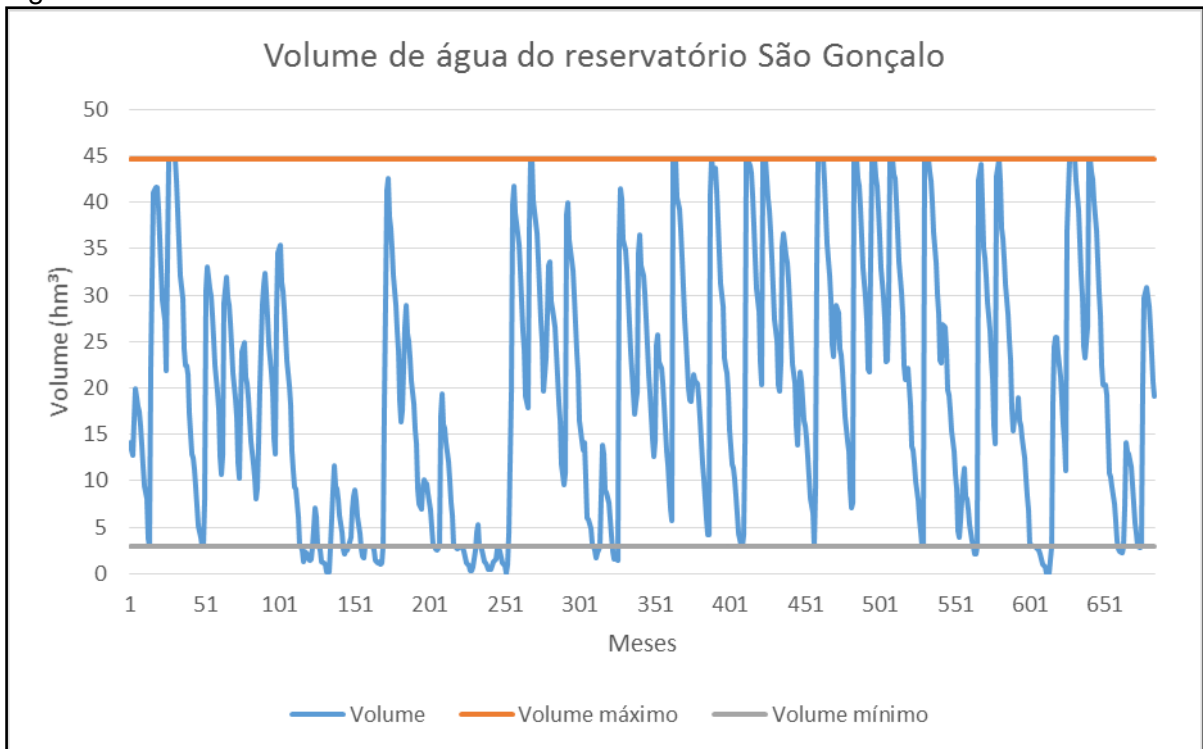
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que as falhas de atendimento destas demandas – foram registrados 44 meses com ocorrência de falha tanto para o abastecimento urbano quanto para o difuso – ocorreram quando o volume do reservatório encontrava-se igual ou abaixo do volume morto, como mostra a Figura 14.

De forma geral, pode-se perceber uma variação bastante grande no volume de água do reservatório, que atingiu as extremidades da capacidade do reservatório, ou seja, grandes oscilações entre o volume máximo e o volume mínimo, chegando a secar completamente em determinados períodos. Entretanto, é importante ressaltar que se trata de um reservatório de pequeno porte, no qual se considera que tais variações não estão fora da normalidade.

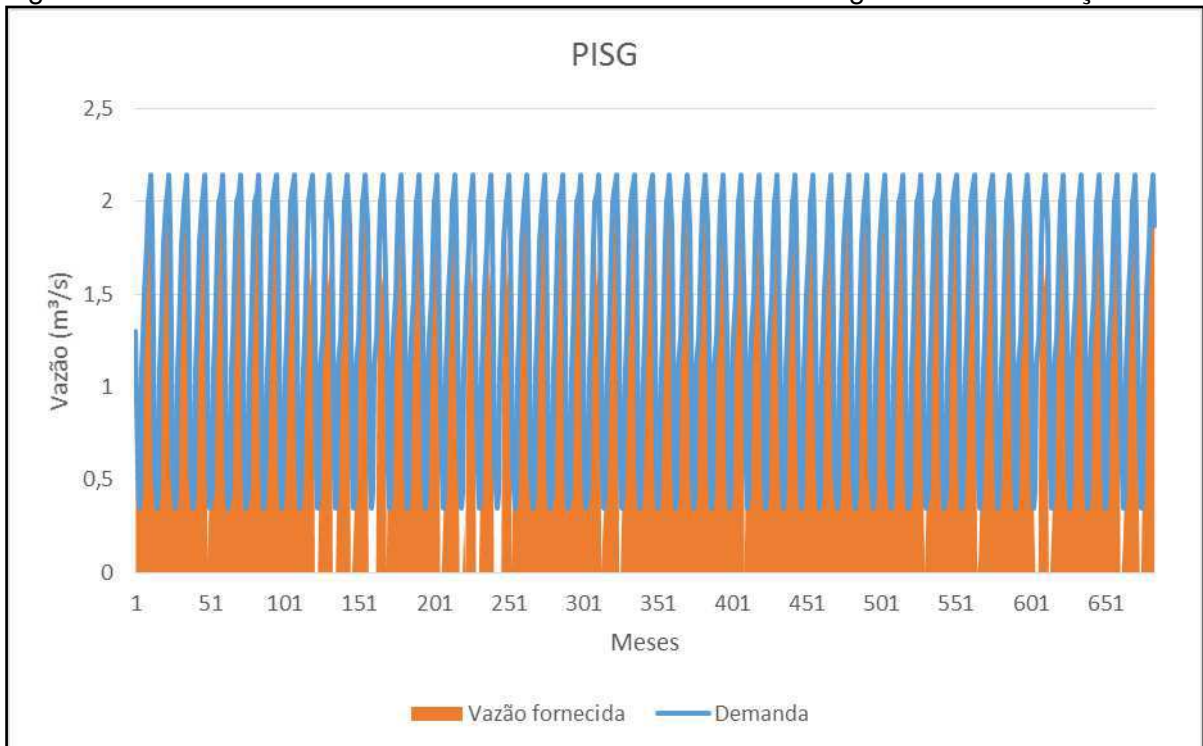
Já em relação à demanda para a irrigação, tanto do Perímetro quanto à irrigação difusa, pode-se observar que estas registraram mais ocorrência de falhas, conforme mostrado nas Figuras 15 e 16, respectivamente. No total, ocorreram 95 meses com falhas para a demanda do PISG e 114 meses com falhas para a demanda da irrigação difusa. Isso acontece porque essas demandas possuem um grau de prioridade menor que a demanda para abastecimento humano.

Figura 14 - Cenário 1: volume do reservatório.



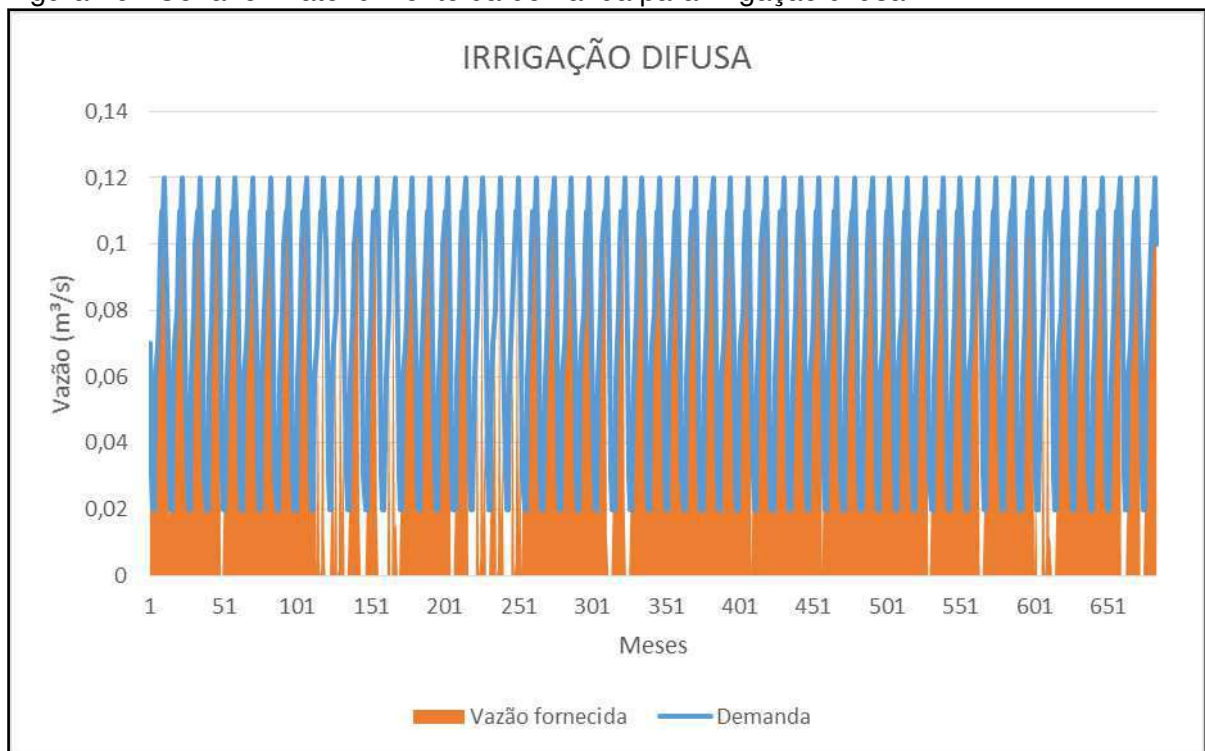
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Cenário 1: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Cenário 1: atendimento da demanda para irrigação difusa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se refere aos indicadores de desempenho, ou indicadores de Hashimoto *et al* (1982) – *confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade* – utilizados para avaliar o grau de atendimento das demandas e possibilitar uma melhor interpretação das propostas de operação do reservatório, observou-se os seguintes resultados (Tabela 5):

Tabela 5 - Cenário 1: Indicadores de desempenho.

INDICADORES	Abastecimento urbano	Abastecimento difuso	PISG	Irrigação difusa
<i>Confiabilidade</i>	0,94	0,94	0,86	0,83
<i>Resiliência</i>	0,43	0,43	0,39	0,23
<i>Vulnerabilidade</i>	0,93	1,00	0,61	0,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que, no que diz respeito ao atendimento das demandas para abastecimento urbano e difuso, a confiabilidade atingiu 94%, ou seja, o sistema possui cerca de 6% de chance de apresentar falhas. Por sua vez, a resiliência, ou elasticidade, é de apenas 43%, demonstrando que, nos casos de ocorrência

de alguma falha, a capacidade do sistema se recuperar desta falha é muito baixa. Além disso, a vulnerabilidade de 93% para abastecimento urbano e de 100% para o abastecimento difuso demonstra que, quando falhar, a demanda será quase, ou totalmente suprimida, respectivamente.

Quanto às demandas para a irrigação, nota-se uma confiabilidade menor, sendo 86% para a demanda do PISG e 83% para a demanda de irrigação difusa. Estas demandas também apresentam menor resiliência (39% para o PISG e 23% para a irrigação difusa). No entanto, apresentam menor vulnerabilidade no caso de ocorrência de falhas, sendo este indicador equivalente à 61% para a demanda do PISG e 88% para a demanda de irrigação difusa.

Outro fator importante a ser observada neste cenário 1 são os valores médios mensais evaporados e vertidos do reservatório. Os volumes evaporados e/ou vertidos representam perdas significativas, e, portanto, devem ser analisados, pois valores muito altos significam que os reservatórios não conseguem promover regularização interanual.

A Tabela 6 mostra as médias mensais dos volumes vertidos e evaporados para o período de estudo (57 anos, ou 684 meses).

Tabela 6 - Cenário 1: médias mensais para os volumes vertidos e evaporados.

<i>Meses</i>	<i>Volume Vertido (m³/s)</i>	<i>Volume Evaporado (10³ m³)</i>
Janeiro	0	725,63
Fevereiro	0	469,51
Março	1,16	546,86
Abril	3,01	664,95
Mai	1,56	827,81
Junho	1,05	776,40
Julho	1,11	911,42
Agosto	0	1.115,40
Setembro	0	1.186,82
Outubro	0	1.175,47
Novembro	0	1.023,05
Dezembro	0	923,00
Média	1,46	862,19

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes valores mostram os vertimentos ocorrem entre os meses de março e julho, sendo os maiores valores no mês de abril. A média anual é de cerca de 1,46 m³/s. Com relação aos volumes evaporados, observa-se que os maiores valores ocorrem entre os meses de julho a dezembro (durante a estação seca), sendo a média anual equivalente à 862 mil m³.

6.2 CENÁRIO 2

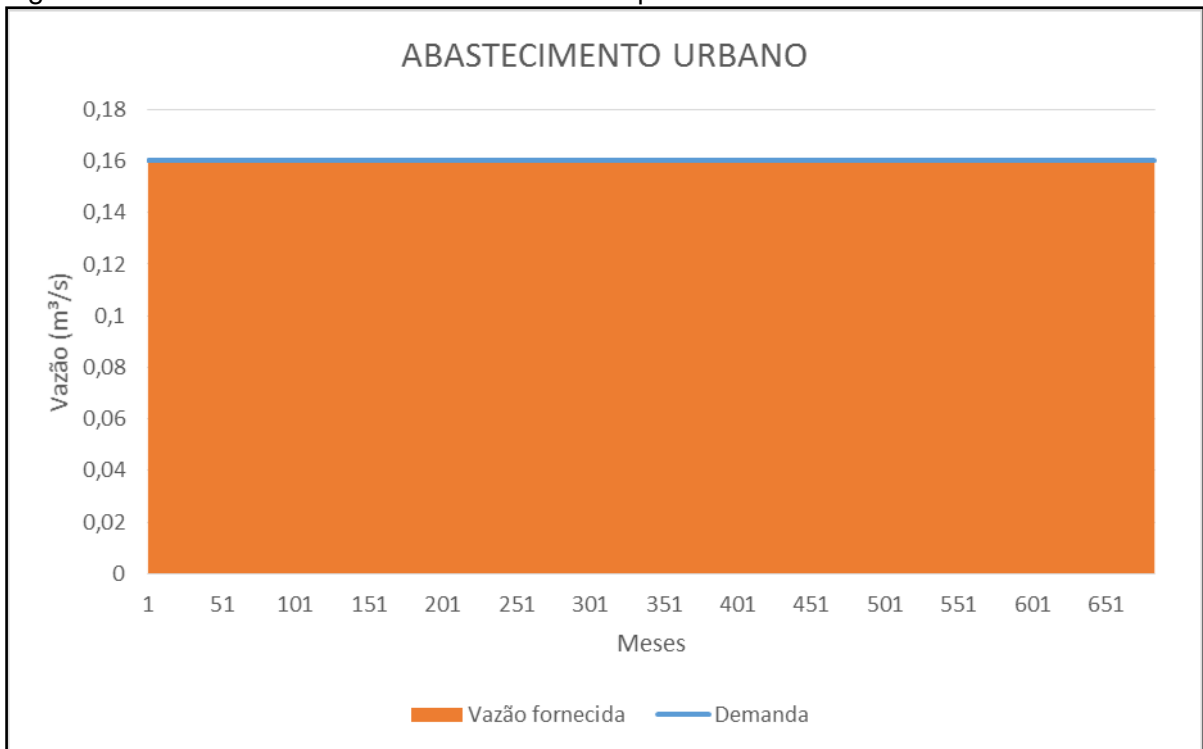
Quando o volume do reservatório encontrar-se abaixo de 40% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, proporcionando-lhes apenas a chamada “irrigação de salvação”, que equivale a 60% do volume normalmente liberado para tal finalidade.

Com relação à demanda para o abastecimento urbano e o abastecimento difuso, observou-se, que neste cenário 2 não ocorreram eventos de falhas, conforme se pode notar nas Figuras 17 e 18.

Desta forma, neste cenário são atendidas 100% das demandas que envolvem abastecimento urbano e difuso. Isso ocorre porque estas demandas apresentam atendimento prioritário, e conforme pode observar no gráfico do volume do reservatório (Figura 19), em nenhum momento ele fica abaixo do volume morto. Em apenas um único mês o reservatório fica com o volume mínimo.

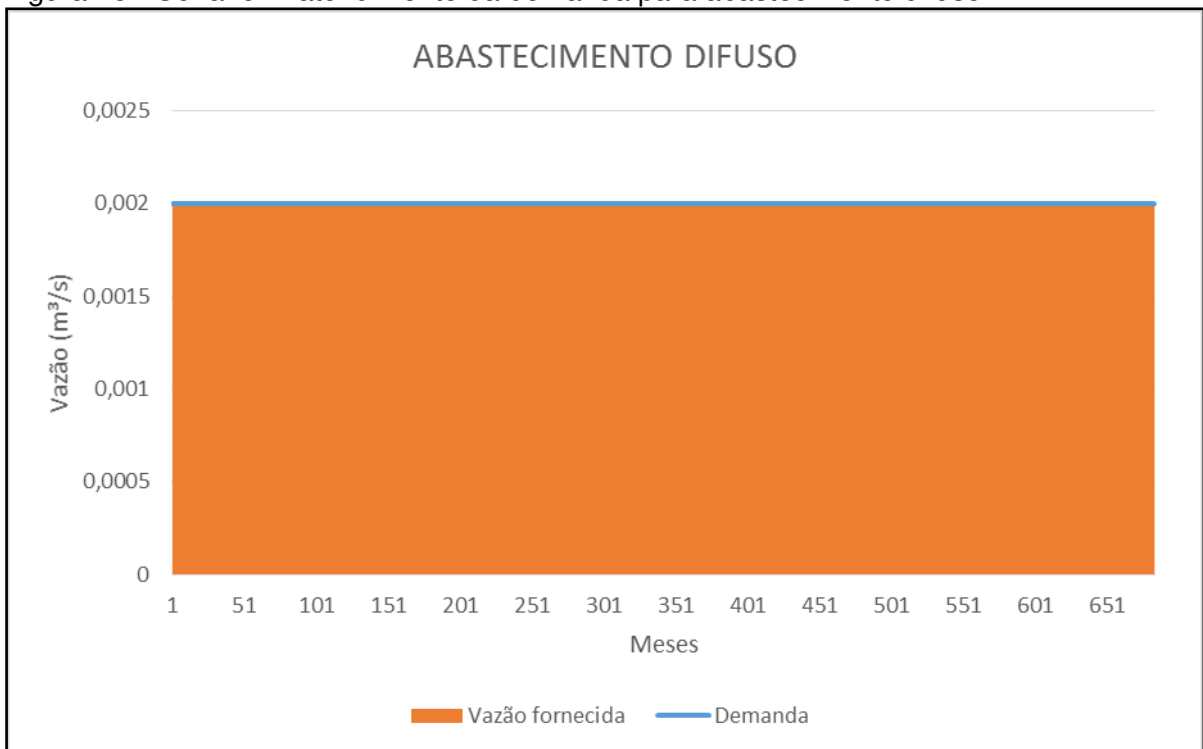
Em termos de demandas para a irrigação, observou-se que a ocorrência de falhas apresentou um aumento. O atendimento da demanda para o Perímetro Irrigado de São Gonçalo apresentou um total de 278 meses com falha (Figura 21); mesmo número de falhas da demanda para a irrigação difusa (Figura 20).

Figura 17 - Cenário 2: atendimento da demanda para abastecimento urbano.



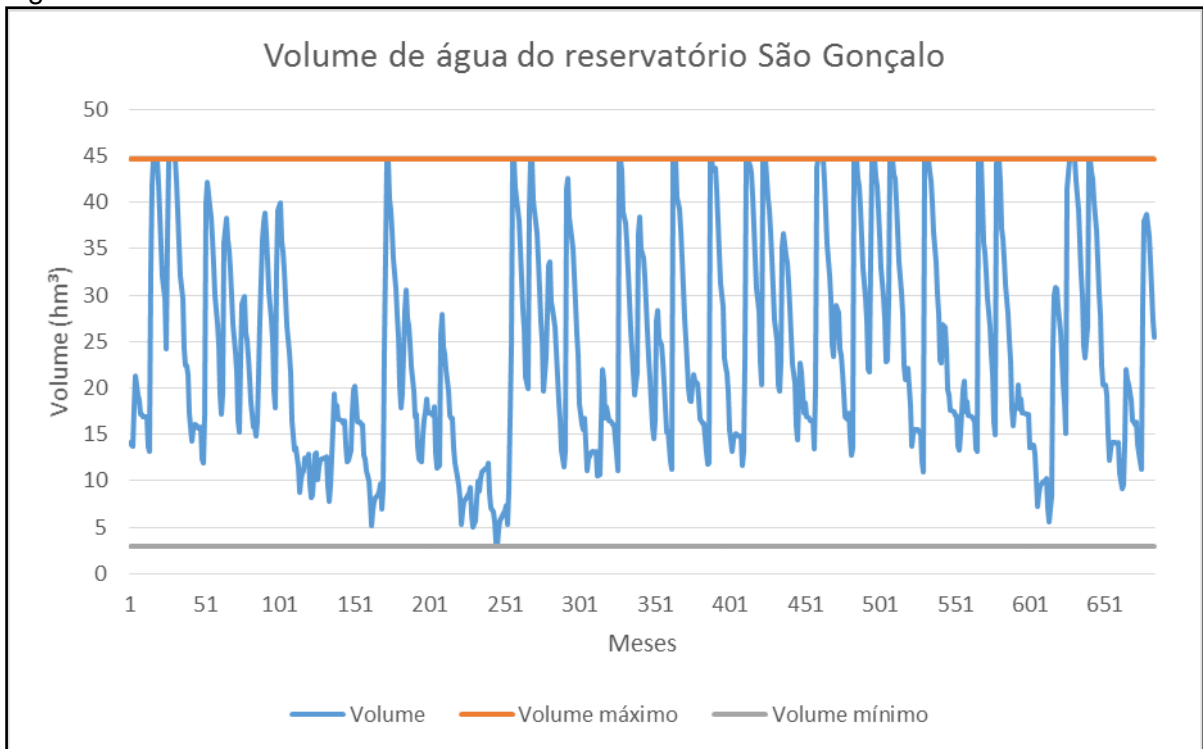
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Cenário 2: atendimento da demanda para abastecimento difuso.



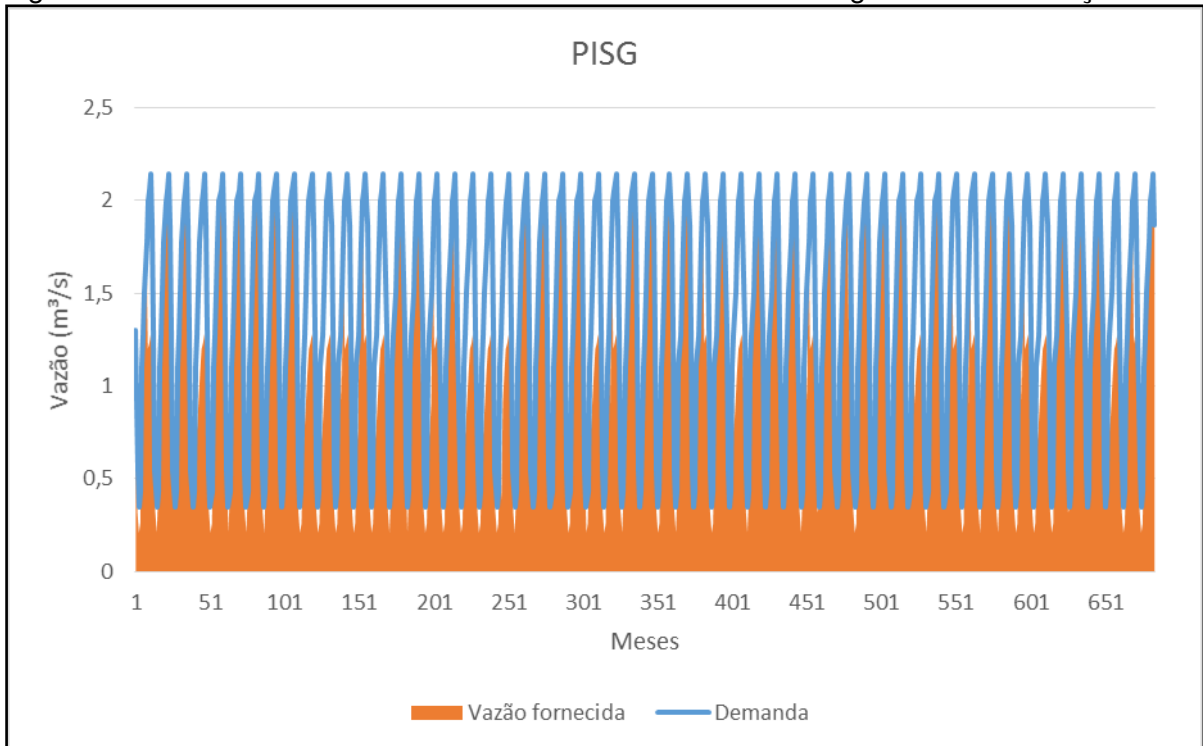
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Cenário 2: volume do reservatório.



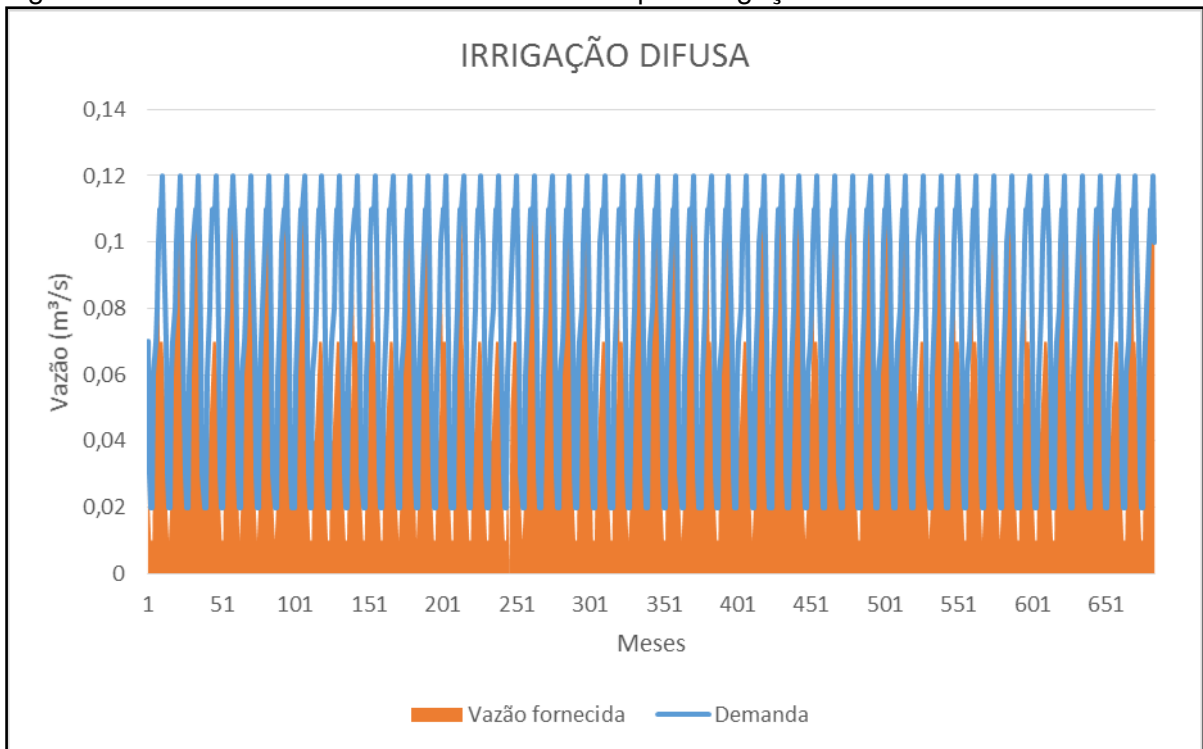
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Cenário 2: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Cenário 2: atendimento da demanda para irrigação difusa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto aos indicadores de desempenho, observou-se os seguintes resultados para este cenário 2 (Tabela 7):

Tabela 7 - Cenário 2: indicadores de desempenho.

INDICADORES	Abastecimento urbano	Abastecimento difuso	PISG	Irrigação difusa
<i>Confiabilidade</i>	1,00	1,00	0,59	0,59
<i>Resiliência</i>	-	-	0,14	0,14
<i>Vulnerabilidade</i>	-	-	0,40	0,41

Fonte: Elaborado pela autor.

Como não ocorreram falhas no atendimento das demandas para abastecimento urbano e difuso, observa-se que o sistema atingiu 100% de confiabilidade.

Já em relação às demandas para a irrigação, percebe-se que o indicador de confiabilidade diminuiu em relação ao cenário 1, sendo agora de apenas 59%, para ambas as demandas (PISG e irrigação difusa). Estas demandas também apresentam uma resiliência muito menor neste cenário, de apenas 14% para o PISG

e irrigação difusa. Por outro lado, apresentam também menor vulnerabilidade no caso de ocorrência de falhas, sendo este indicador igual a 40% para a demanda do PISG e 41% para a demanda de irrigação difusa.

Quanto aos volumes evaporados e os vertimentos, observe na Tabela 8 as médias mensais destes volumes.

Tabela 8 - Cenário 2: médias mensais para o vertimento (em m³/s) e a evaporação (em m³).

<i>Meses</i>	<i>Volume Vertido (m³/s)</i>	<i>Volume Evaporado (m³)</i>
Janeiro	0	983,67
Fevereiro	0	634,88
Março	1,68	676,14
Abril	3,77	755,72
Maió	1,80	911,39
Junho	0,11	852,98
Julho	0,11	1.011,70
Agosto	0	1.255,35
Setembro	0	1.366,35
Outubro	0	1.405,46
Novembro	0	1.279,68
Dezembro	0	1.213,46
Média	1,84	1.028,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

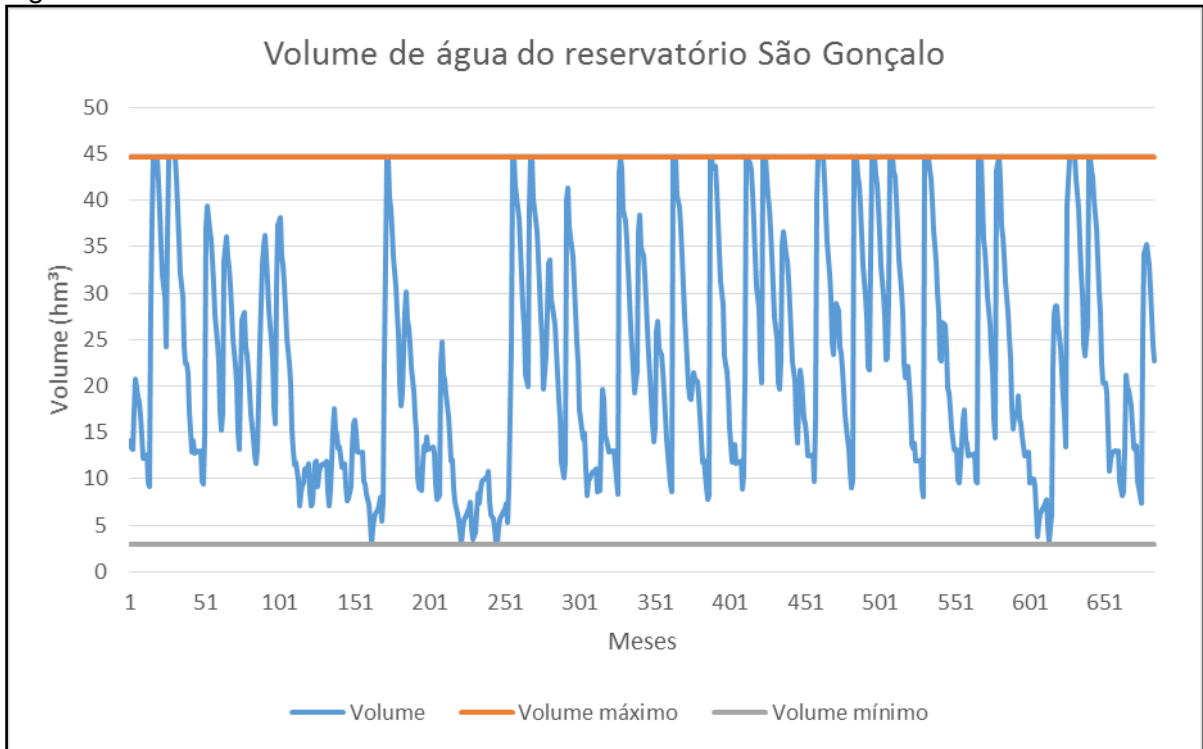
Estes valores mostram que ocorreram aumentos tanto no volume evaporado quanto no volume vertido do reservatório, em relação ao cenário 1.

6.3 CENÁRIO 3

Neste cenário 3, quando o volume do açude encontrar-se abaixo de 30% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, proporcionando-lhes apenas a “irrigação de salvação”.

Com relação à demanda para o abastecimento urbano e o abastecimento difuso, os resultados obtidos são os mesmos descritos no cenário anterior; ou seja, não ocorreram eventos de falhas. Da mesma forma, no que se refere ao volume do reservatório, pode-se notar que em nenhum momento ele ficou abaixo do volume morto, no entanto, em quatro ocorrências o volume atinge este patamar (Figura 22).

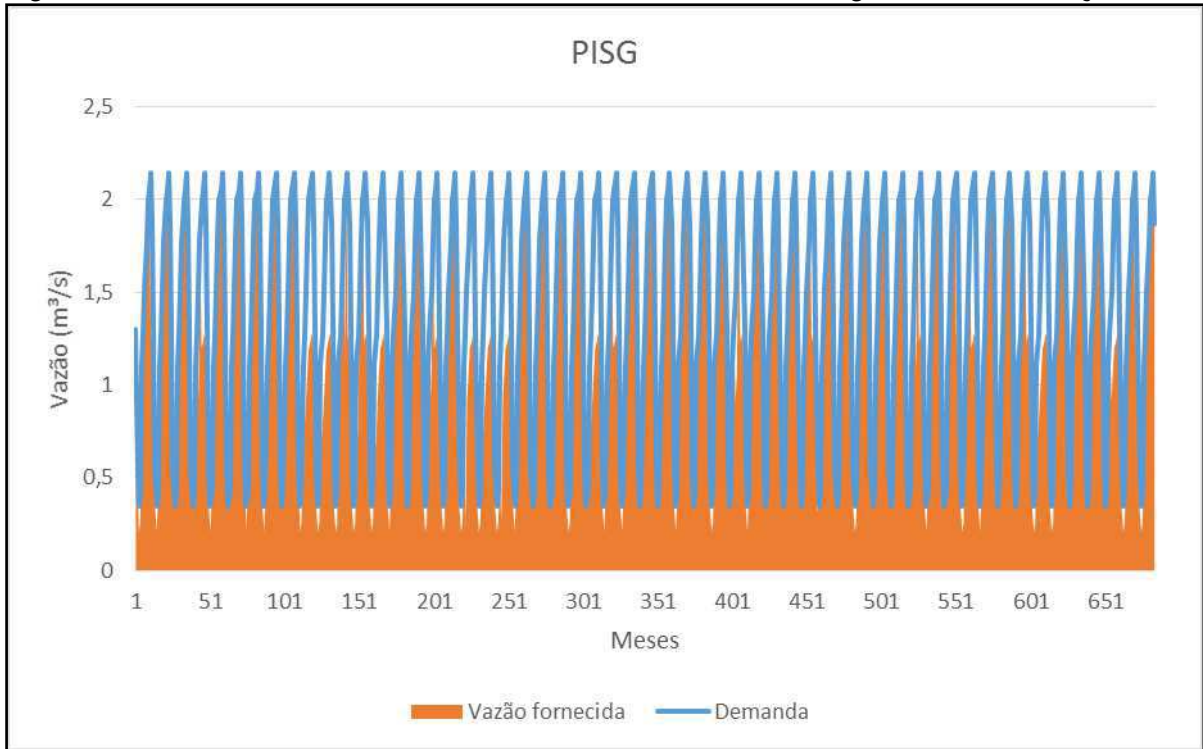
Figura 22 - Cenário 3: volume do reservatório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

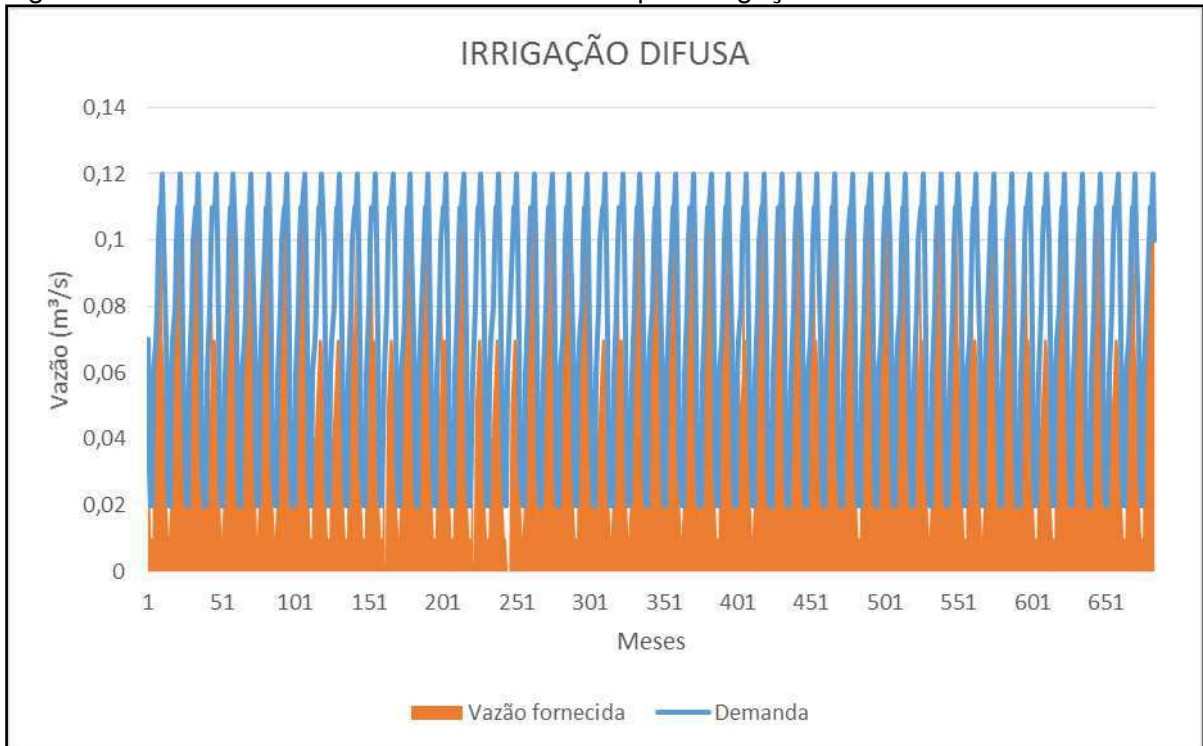
Já em relação às demandas para a irrigação, percebe-se que o número de falhas diminuiu em relação ao cenário 2, mas ainda é bem maior que no cenário 1, já que apresentou para este cenário 3 um total de 224 ocorrências de falha para as demandas do PISG e da irrigação difusa (Figuras 23 e 24).

Figura 23 - Cenário 3: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Cenário 3: atendimento da demanda para irrigação difusa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os indicadores de desempenho apresentaram os seguintes resultados para este cenário 3 (Tabela 9):

Tabela 9 - Cenário 3: Indicadores de desempenho.

INDICADORES	Abastecimento urbano	Abastecimento difuso	PISG	Irrigação difusa
<i>Confiabilidade</i>	1,00	1,00	0,67	0,67
<i>Resiliência</i>	-	-	0,14	0,14
<i>Vulnerabilidade</i>	-	-	0,40	0,42

Fonte: Elaborado pela autor.

Assim como no cenário anterior, o sistema atingiu 100% de confiabilidade para as demandas de abastecimento urbano e difuso. Já no que se refere às demandas para a irrigação, percebe-se que o indicador de confiabilidade aumentou em relação ao cenário 2, ficando 67%, para as duas demandas (PISG e irrigação difusa). Quanto à resiliência os valores permaneceram os mesmos que no cenário anterior, apenas 14% para o PISG e irrigação difusa. O indicador de vulnerabilidade permaneceu igual ao cenário 2 40% para a demanda do PISG, e maior para a demanda de irrigação difusa, de 42%.

No que se refere aos volumes evaporados e vertidos, pode-se observar as seguintes médias mensais (Tabela 10):

Tabela 10 - Cenário 3: médias mensais para vertimento (em m³/s) e a evaporação (em m³)

Meses	Volume Vertido (m ³ /s)	Volume Evaporado (m ³)
Janeiro	0	912,61
Fevereiro	0	582,98
Março	1,47	632,75
Abril	3,46	724,04
Maiο	1,73	883,18
Junho	0,11	825,30
Julho	0,11	974,82
Agosto	0	1.207,07
Setembro	0	1.308,07
Outubro	0	1.336,96
Novembro	0	1.206,21

Dezembro	0	1.136,21
Média	1,69	977,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que tanto o volume evaporado quanto o volume vertido do reservatório foram menores em relação ao cenário 2, mas ainda são maiores quando comparados ao cenário 1.

6.4 CENÁRIO 4

No cenário 4, quando o volume do reservatório ficar abaixo de 20% de sua capacidade máxima, deverá ocorrer a supressão completa da oferta de água destinada a irrigação, tanto a difusa quanto a do Perímetro Irrigado.

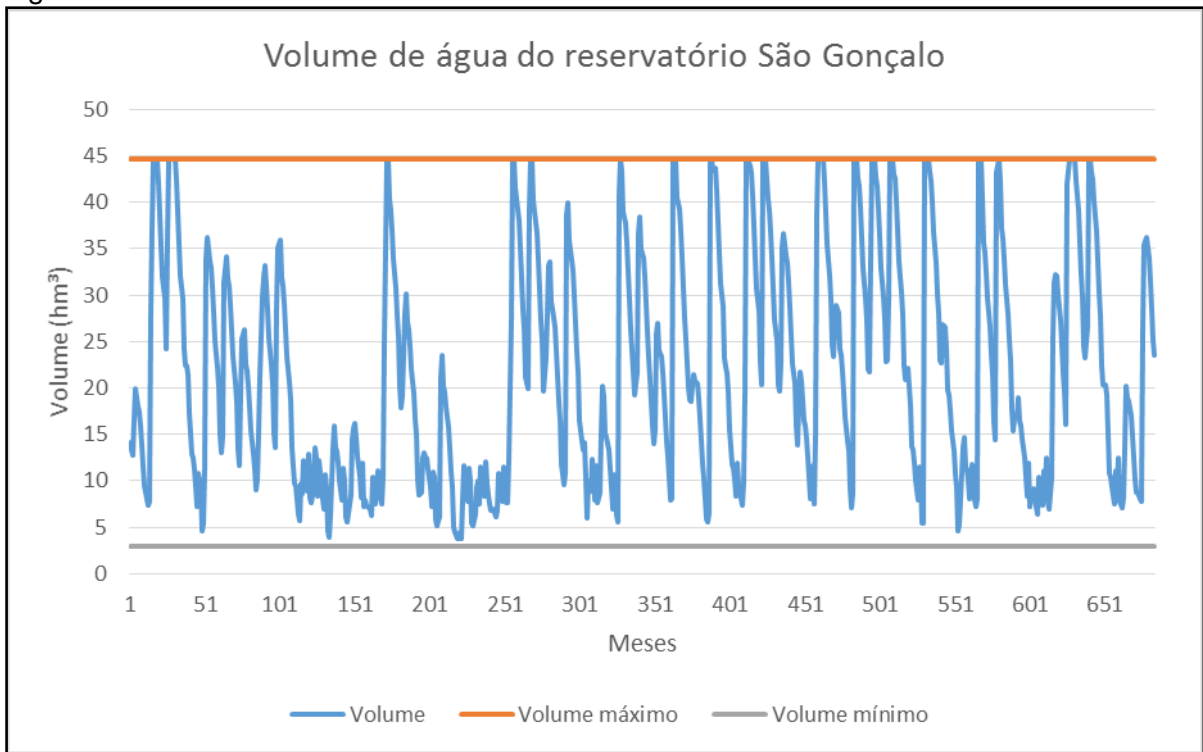
Os resultados mostram que, assim como nos cenários 2 e 3, as demandas para o abastecimento urbano e o abastecimento difuso são plenamente atendidas, sem ocorrência de falhas. Quanto ao volume do reservatório, pode-se perceber que em nenhum momento ele ficou igual ou abaixo do volume mínimo, ou volume morto. (Figura 25).

Em relação às demandas para o Perímetro Irrigado de São Gonçalo e para a irrigação difusa, pode-se notar que o número de falhas diminuiu em relação aos cenários 2 e 3, mesmo sendo maior que no cenário 1, apresentado um total de 111 ocorrências de falhas para ambas as demandas. (Figura 26 e 27).

Entretanto, apesar de apresentar menor nº de falhas, neste cenário 4 os eventos de falhas tornaram-se mais intensos – o que se pode notar nas figuras 26 e 27, em que os espaços com falhas são maiores.

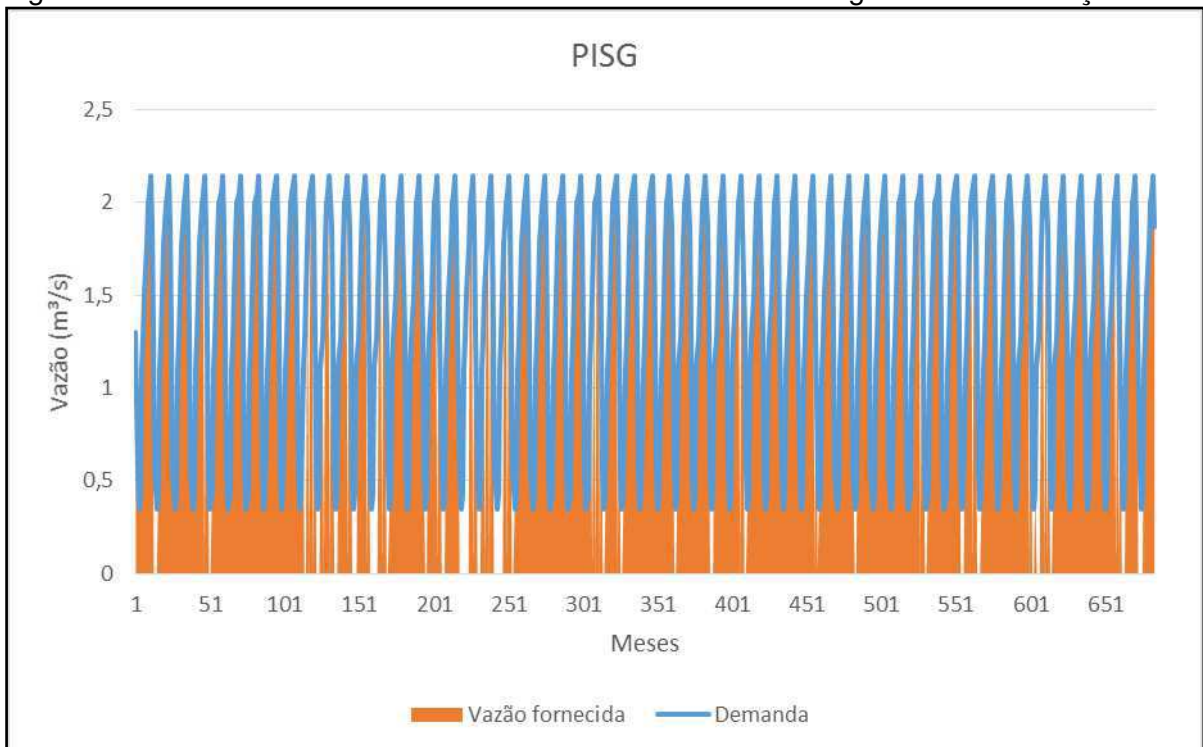
No que se refere aos indicadores de desempenho foram obtidos os seguintes resultados para este cenário 4 (Tabela 11):

Figura 25 - Cenário 4: volume do reservatório.



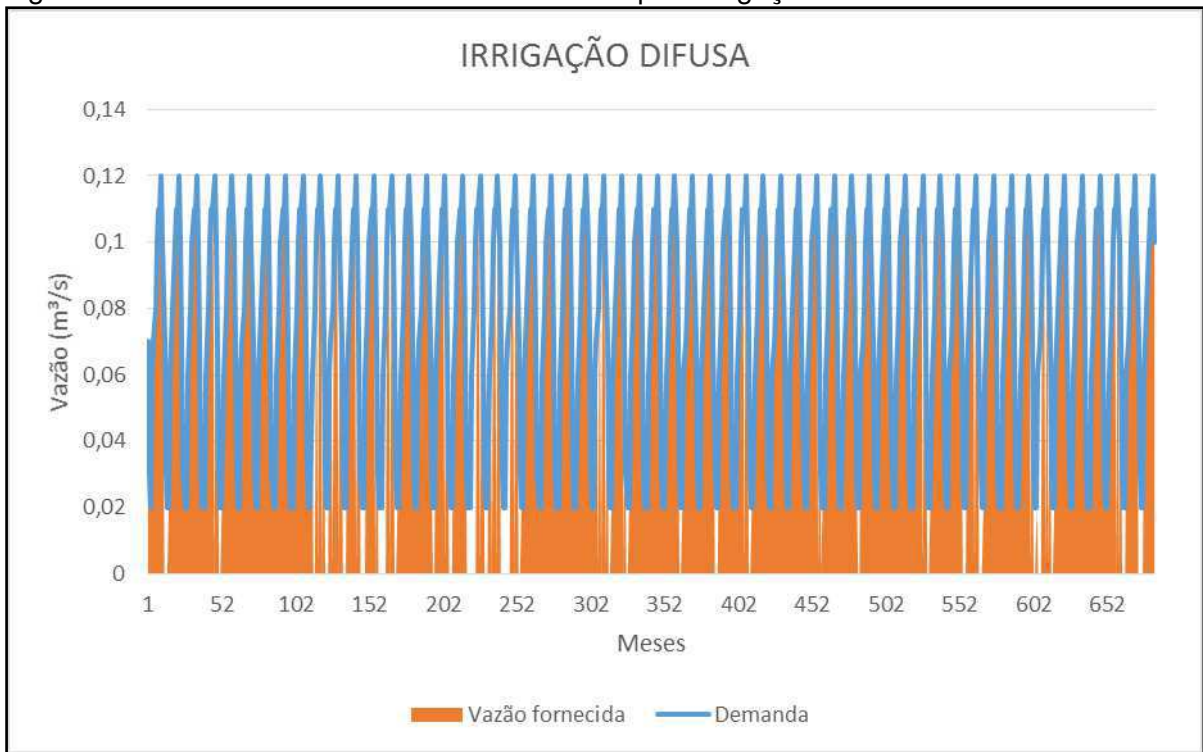
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 26 - Cenário 4: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Cenário 4: atendimento da demanda para irrigação difusa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Cenário 4: indicadores de desempenho.

INDICADORES	Abastecimento urbano	Abastecimento difuso	PISG	Irrigação difusa
<i>Confiabilidade</i>	1,00	1,00	0,84	0,84
<i>Resiliência</i>	-	-	0,50	0,50
<i>Vulnerabilidade</i>	-	-	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pela autor.

Pode-se notar que o indicador de confiabilidade aumentou em relação aos cenários anteriores, ficando em 84%, para as demandas do PISG e da irrigação difusa. Quanto ao indicador resiliência os valores também aumentaram, ficando em 50% para ambas as demandas. Por sua vez, o indicador de vulnerabilidade aumentou em relação aos cenários anteriores, sendo igual a 100% para as duas demandas de irrigação, o que demonstra que, apesar de menos frequentes, no caso de ocorrerem falhas no sistema, elas serão mais intensas para este cenário.

Em relação à evaporação e ao vertimento, os resultados obtidos para o cenário 4 foram os seguintes (Tabela 12):

Tabela 12 - Cenário 4: médias mensal para vertimento (em m³/s) e a evaporação (em m³)

<i>Meses</i>	<i>Volume Vertido (m³/s)</i>	<i>Volume Evaporado (m³)</i>
Janeiro	0	870,40
Fevereiro	0	554,33
Março	1,46	616,09
Abril	3,45	714,70
Maiο	1,71	876,42
Junho	0,11	819,72
Julho	0,11	973,57
Agosto	0	1.205,51
Setembro	0	1.293,54
Outubro	0	1.310,47
Novembro	0	1.171,84
Dezembro	0	1.096,18
Média	1,68	958,56

Fonte: Elaborado pelo autor.

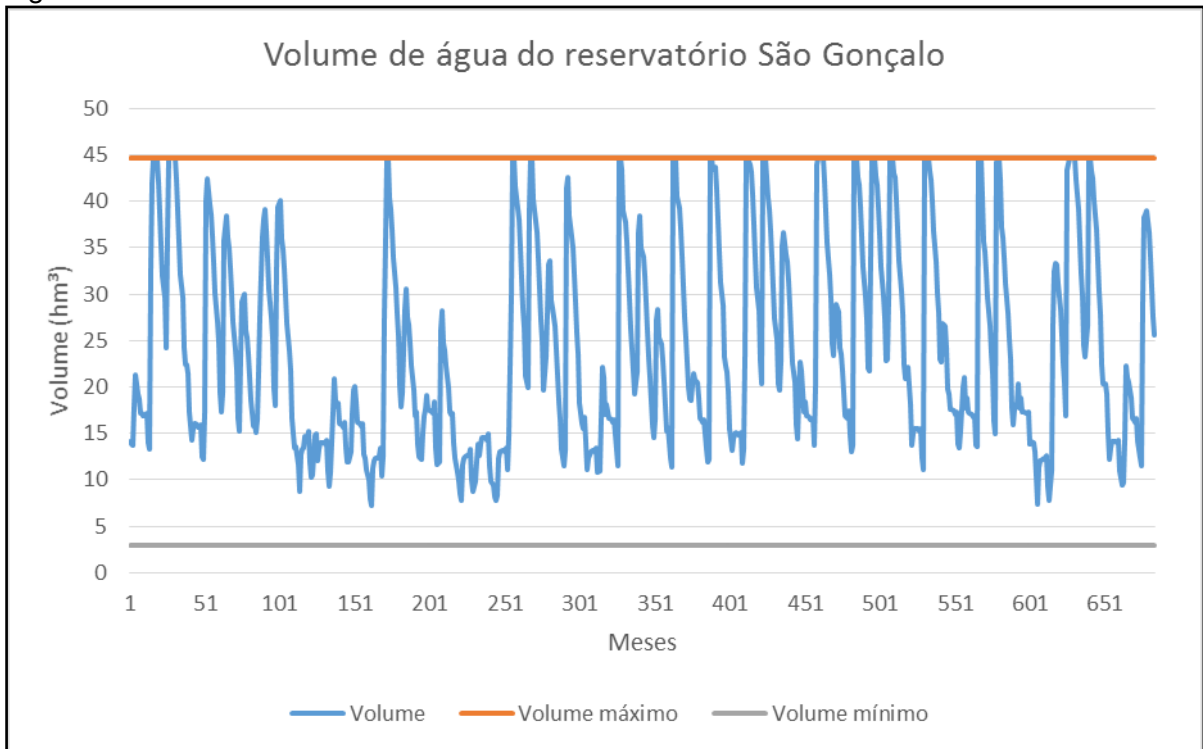
Tanto o volume evaporado quanto o volume vertido do reservatório foram menores em relação aos cenários 2 e 3, porém ainda são maiores que os volumes obtidos no cenário 1.

6.5 CENÁRIO 5

Este cenário é uma combinação dos cenários 2 e 4, ou seja, quando o reservatório estiver abaixo de 40% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, proporcionando-lhes apenas a “irrigação de salvação”; e caso o volume fique inferior aos 20% do capacidade máxima, deve ocorrer a supressão completa da oferta liberada para a irrigação.

Mais uma vez os resultados mostram que, assim como nos cenários 2, 3 e 4 as demanda para o abastecimento urbano e o abastecimento difuso não apresentam falhas. No que se refere ao volume do reservatório, pode-se observar que ele permaneceu sempre acima do volume morto. (Figura 28)

Figura 28 - Cenário 5: volume do reservatório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

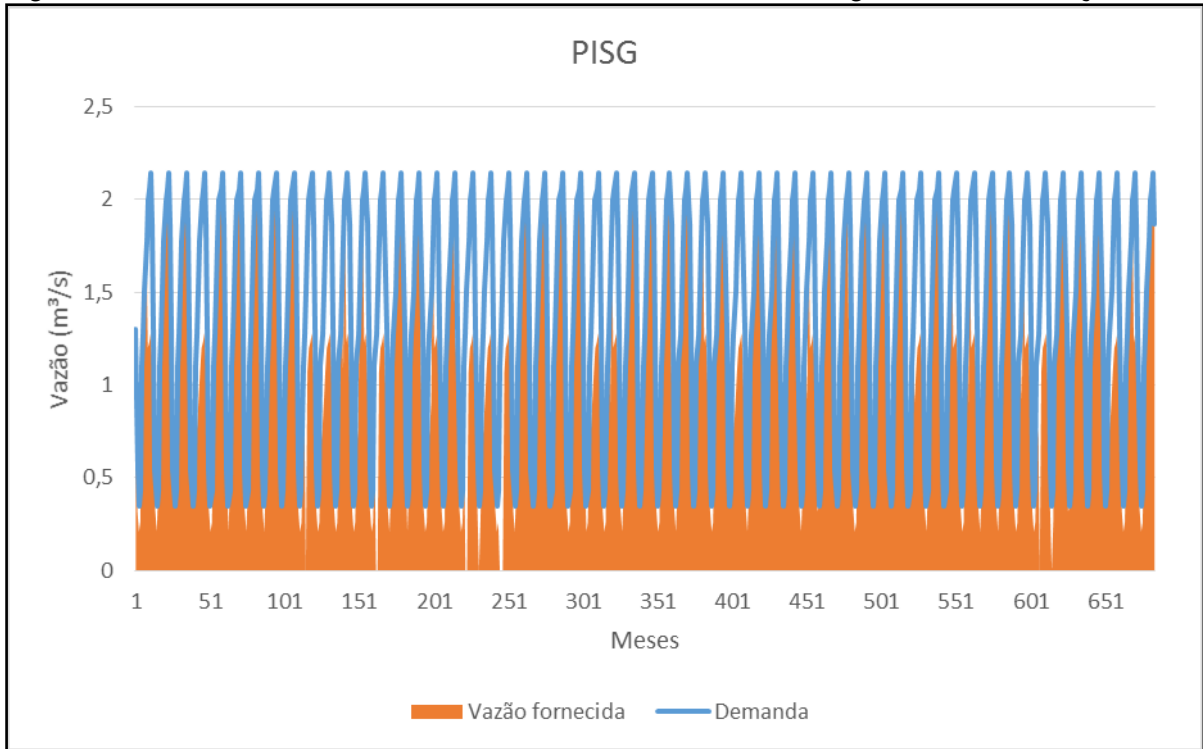
Já quanto ao atendimento das demandas do PISG e da irrigação difusa, pode-se observar que apresentaram muitas ocorrências de falhas – já que foram 277 meses com falhas para cada uma das demandas – sendo menor apenas do que o nº de falhas registradas no cenário 2. (Figuras 29 e 30)

Observa-se que os eventos de falhas são mais curtos, porém são mais frequentes, se comparados aos resultados do cenário anterior.

No que se refere aos indicadores de desempenho foram obtidos os seguintes resultados para este cenário 5 (Tabela 13):

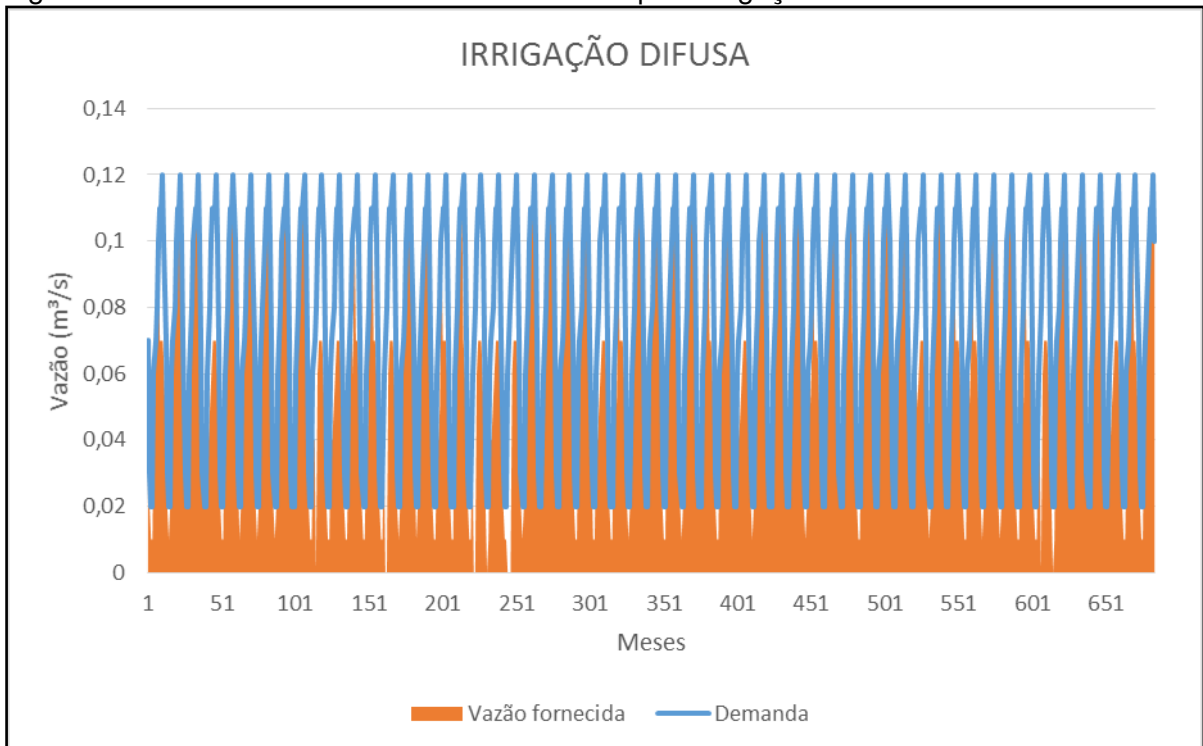
Como se pode observar, os resultados deste cenário foram próximos aos obtidos no cenário 3. Os indicadores mostram que a confiabilidade foi de 60%, para as demandas do PISG e da irrigação difusa; a resiliência ficou em 14% para as duas demandas; e a vulnerabilidade ficou em 42% para o PISG e 43% para a irrigação difusa.

Figura 29 - Cenário 5: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Cenário 5: atendimento da demanda para irrigação difusa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Cenário 5: indicadores de desempenho.

INDICADORES	Abastecimento urbano	Abastecimento difuso	PISG	Irrigação difusa
<i>Confiabilidade</i>	1,00	1,00	0,60	0,60
<i>Resiliência</i>	-	-	0,14	0,14
<i>Vulnerabilidade</i>	-	-	0,42	0,43

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à evaporação e ao vertimento, os volumes obtidos também se aproximaram bastante dos resultados obtidos no cenário 2, conforme se pode observar na Tabela 14.

Tabela 14 - Cenário 5: médias mensal para vertimento (em m³/s) e a evaporação (em m³).

Meses	Volume Vertido (m ³ /s)	Volume Evaporado (m ³)
Janeiro	0	1.007,60
Fevereiro	0	651,54
Março	1,73	689,95
Abril	3,93	765,33
Mai	1,80	918,86
Junho	0,11	861,90
Julho	0,11	1.027,51
Agosto	0	1.279,07
Setembro	0	1.391,79
Outubro	0	1.431,61
Novembro	0	1.303,42
Dezembro	0	1.238,37
Média	1,89	1.047,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

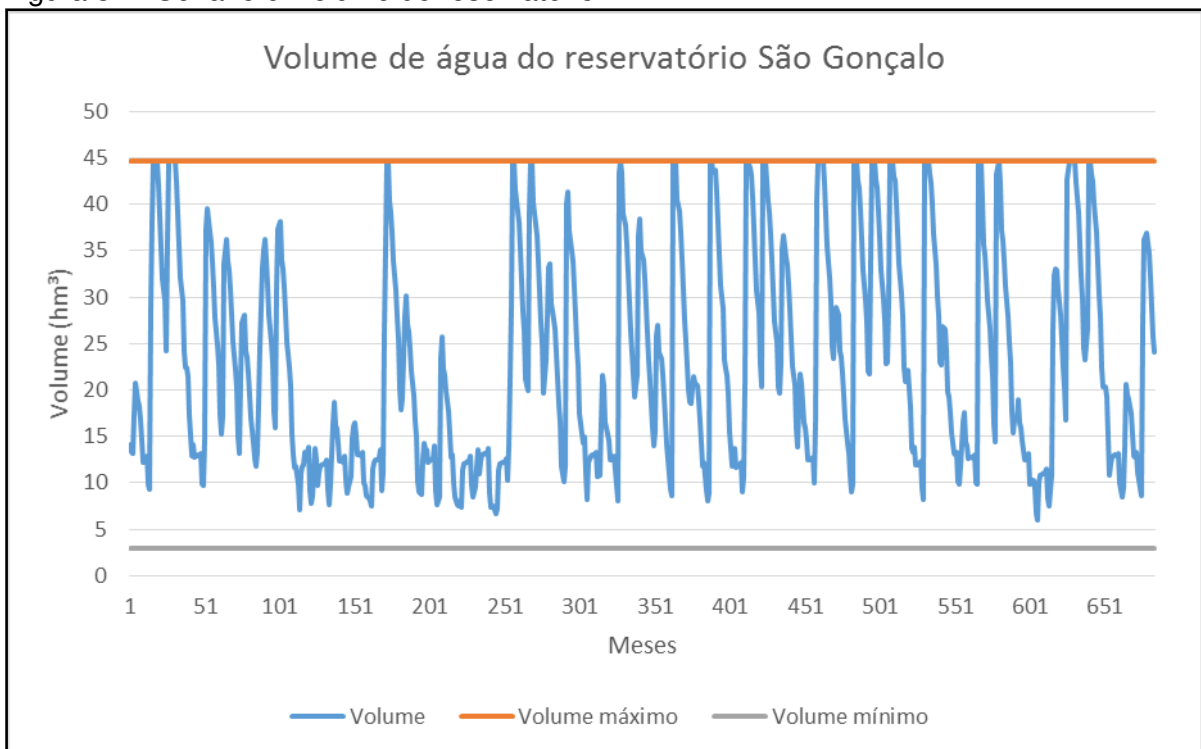
Tanto o volume evaporado quanto o volume vertido do reservatório foram os maiores obtidos com relação aos cenários propostos.

6.6 CENÁRIO 6

Este último cenário representa a combinação dos cenários 3 e 4. Deste modo, quando o reservatório estiver abaixo de 30% de sua capacidade máxima, deverá ser suprimida parte da oferta destinada ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo e à irrigação difusa das comunidades ribeirinhas, mantendo-se apenas a “irrigação de salvação”; e caso o volume fique inferior aos 20% do capacidade máxima, é necessário suprimir por completo a oferta de água para a irrigação.

Os resultados obtidos mostram que as demandas para a abastecimento urbano e o abastecimento difuso são plenamente atendidas. Quanto ao volume do reservatório, percebe-se que em nenhum momento ficou igual ou abaixo do volume morto. (Figura 31)

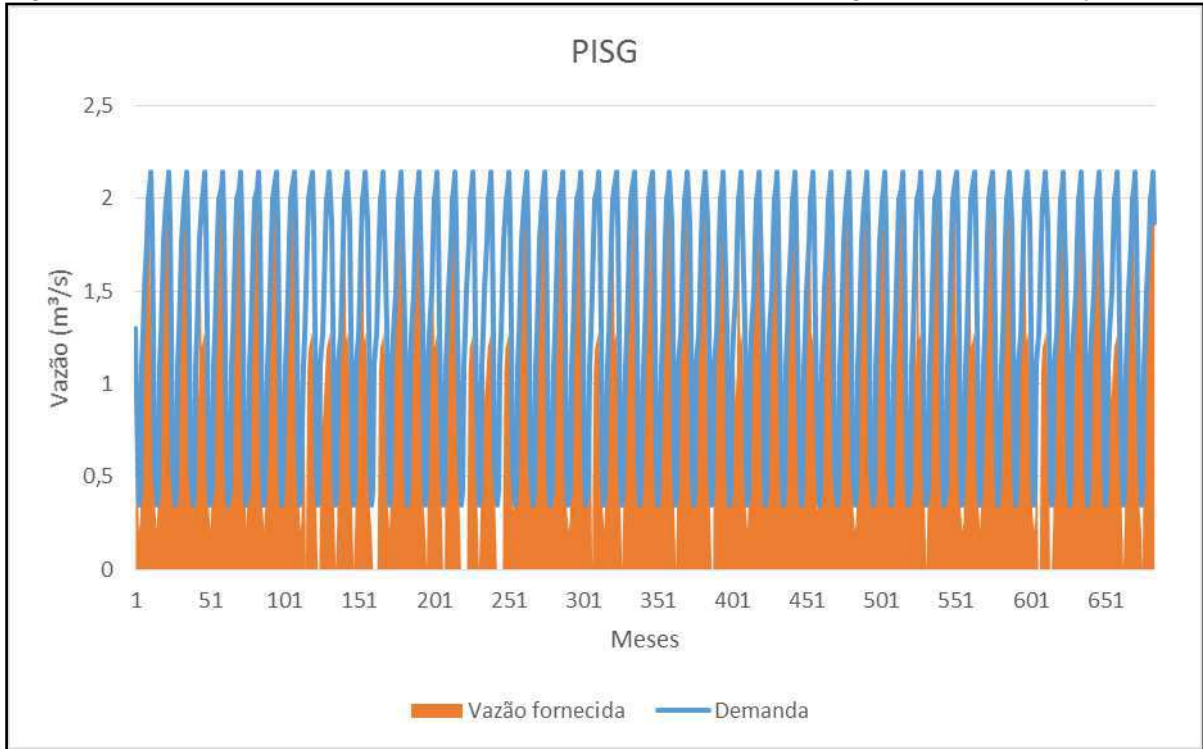
Figura 31 - Cenário 6: volume do reservatório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

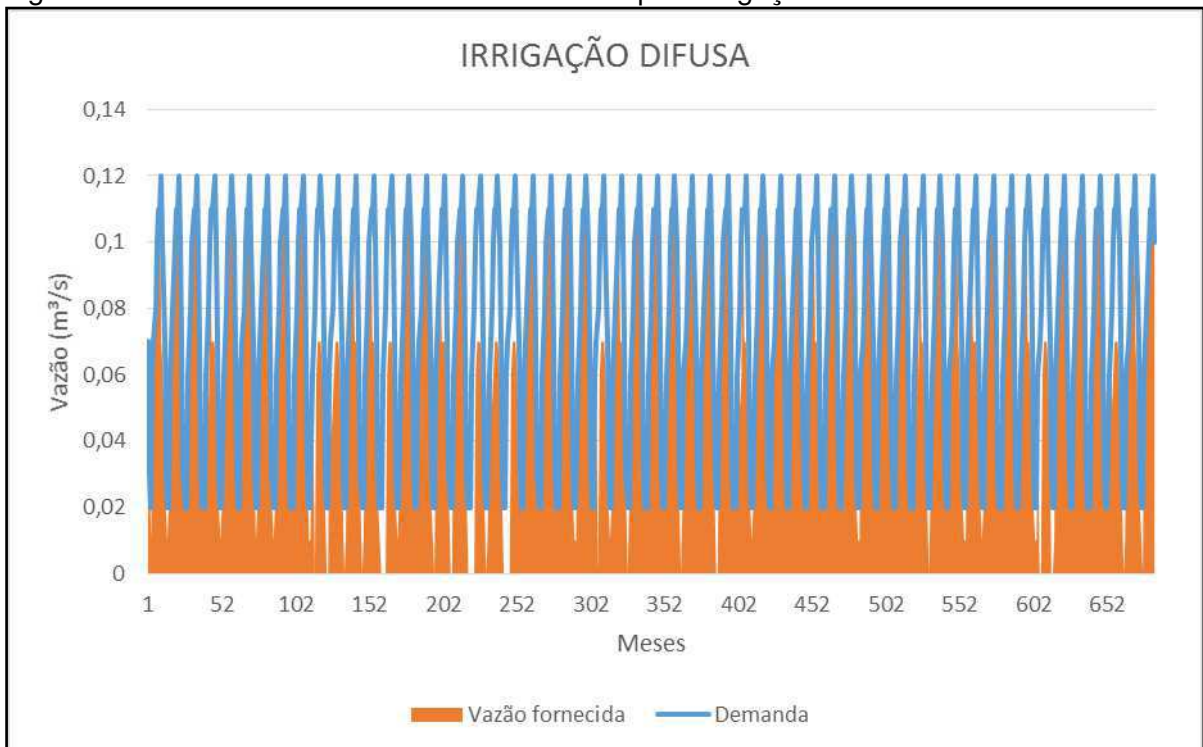
As demandas para o PISG e para a irrigação difusa apresentaram novamente muitas ocorrências de falhas – foram 215 ocorrências para cada uma das demandas – porém em menor número que o cenário anterior. (Figuras 32 e 33)

Figura 32 - Cenário 6: atendimento da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Cenário 6: atendimento da demanda para irrigação difusa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os indicadores de desempenho obtidos foram os seguintes (Tabela 15):

Tabela 15 - Cenário 6: indicadores de desempenho.

INDICADORES	Abastecimento urbano	Abastecimento difuso	PISG	Irrigação difusa
<i>Confiabilidade</i>	1,00	1,00	0,69	0,69
<i>Resiliência</i>	-	-	0,16	0,16
<i>Vulnerabilidade</i>	-	-	0,50	0,50

Fonte: Elaborado pela autor.

Os resultados obtidos para os indicadores de desempenho neste cenário ficaram próximos dos obtidos no cenário anterior. A confiabilidade do atendimento das demandas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo e da irrigação difusa foi de 69%, um pouco maior do que no cenário 5. O indicador resiliência também foi parecido, 16% para as duas demandas; e a vulnerabilidade ficou em 50%, tanto para o PISG quanto para a irrigação difusa.

As variáveis evaporação e vertimento apresentaram os seguintes volumes para este cenário 6 (Tabela 16):

Tabela 16 - Cenário 6: médias mensal para vertimento (em m³/s) e a evaporação (em m³).

Meses	Volume Vertido (m ³ /s)	Volume Evaporado (m ³)
Janeiro	0	941,33
Fevereiro	0	601,63
Março	1,55	649,88
Abril	3,64	737,75
Mai	1,74	896,74
Junho	0,11	838,84
Julho	0,11	996,37
Agosto	0	1.238,12
Setembro	0	1.340,91
Outubro	0	1.370,88
Novembro	0	1.238,54
Dezembro	0	1.169,53
Média	1,76	1.001,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto o volume evaporado quanto o volume vertido do reservatório foram menores do que nos cenários 2 e 5. Porém são maiores em relação aos outros cenários (1, 3 e 4).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Os resultados mostram que, com exceção do cenário 1, as demandas para abastecimento urbano e abastecimento difuso, prioritárias em relação às demandas para irrigação difusa e do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, são atendidas plenamente. Assim, tem-se que a simples implantação de uma política de operação garante o abastecimento humano das comunidades atendidas pelo reservatório.

Com relação às demandas para a irrigação difusa e do Perímetro Irrigado de São Gonçalo tem-se que as políticas operacionais influenciam no nível de atendimento dessas demandas.

De modo que, considerando o indicador de confiabilidade, o cenário que apresenta melhor resultado é o cenário 4, com 84% de confiabilidade para as demandas de irrigação. No entanto, este cenário apresenta o maior valor quanto ao indicador vulnerabilidade, que é de 100% neste caso. Isso significa que, apesar de mais confiável, quando ocorrerem falhas neste cenário, elas serão mais severas que em outros cenários, já que a demanda seria totalmente suprimida. Isso significa que este é uma regra de operação que se mostra inviável, pois como se trata de uma demanda para fins agrícolas, uma falha de 100% no volume de água que deveria ser fornecido no período de um mês pode inviabilizar a sustentabilidade de uma cultura agrícola que esteja sendo desenvolvida.

Considerando o indicador de resiliência, que retrata a capacidade do sistema de se recuperar de um evento de falha, o melhor resultado encontra-se também no cenário 4, onde este indicador ficou em 50% para ambas as demandas de irrigação. No entanto, este é um cenário que se mostra inviável em razão da alta vulnerabilidade ao qual está sujeito o sistema.

Já em relação ao indicador de vulnerabilidade, o cenário que apresenta o melhor resultado é o cenário 2. Neste cenário, o atendimento das demandas de irrigação se mostra menos vulnerável em relação aos demais, tanto para o PISG (vulnerabilidade=40%) quanto para a irrigação difusa (vulnerabilidade=41%). Vale ressaltar novamente que esta análise considera apenas os cenários de 2 a 6, já que estes não apresentam falhas para o abastecimento urbano e difuso.

Com relação à evaporação e ao vertimento os resultados mostraram grande variabilidade entre os cenários propostos sendo que os maiores valores foram verificados no cenário 5 e os menores no cenário 4 (considerando apenas os cenários de 2 a 6).

Desta forma, em face dos resultados obtidos em todos os cenários propostos e levando-se em consideração o atendimento das demandas do reservatório, pode-se apontar que o cenário que apresenta os melhores resultados é o cenário 3. Pois, esta regra de operação proposta garante o atendimento de 100% das demandas prioritárias (abastecimento urbano e difuso), e apresenta também um atendimento mais sustentável em termos de demanda para irrigação, já que demonstra um menor indicador de vulnerabilidade para atendimento do PISG e o segundo menor da irrigação difusa, tendo uma confiabilidade maior do que no cenário 2.

É importante ressaltar que o reservatório considerado pertence a um sistema hídrico maior, composto, também pelo reservatório Engenheiro Ávidos, localizado a montante, e pelo trecho do Rio Piranhas entre os dois açudes. Sendo importante analisar como suas respectivas demandas e a forma de operação do reservatório Engenheiro Ávidos influenciará na operação do reservatório São Gonçalo.

REFERÊNCIAS

ACQUANET. **Manual do usuário**. Disponível em: http://www.labsid.com.br/download.php?area=arquivo&id=16&arq=5140c7a3b3624_Manual_AcquaNet_com_SIG.pdf. Último acesso em 20/08/2013.

AESA, Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Mapa Hidrográfico da Paraíba**. Disponível em: www.aesa.pb.gov.br. Último acesso em: 15/04/2013

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água, panorama nacional**. Brasília: ANA/Engecorps/Cobrape, 2010.

ARAGÃO, T. G. **Transposição das Águas do Rio São Francisco para a Bacia do Rio Paraíba: uma Avaliação da Sinergia e Sustentabilidade Hídrica Utilizando o Modelo de Rede de Fluxo Acquanet**. 2008, 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2008.

ASA Brasil, Articulação no Semiárido Brasileiro. **Semiárido**. 2013. Disponível em: http://www.asabrasil.org.br/portal/informacoes.asp?cod_menu=105 Último acesso em 15/04/2013.

BERBERT, C. O. O Desafio das Águas. In: **Uso e Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil: desafios teóricos e político-institucionais**. São Carlos: Rima, 2003. p. 81-97.

BRASIL, Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, p. 470, 8 de janeiro de 1997.

BRASIL, Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, p. 1. 18 de julho de 2000.

BRAVO, J. M., COLLISCHONN, W., PILAR, J. V. Otimização da Operação de Reservatórios: Estado-da-Arte. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa, 2005. CD-ROM.

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

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

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

FARIAS, E. E. V. **Distribuição da Água do Projeto de Integração do Rio São Francisco no Estado da Paraíba- Eixo Leste: Análise de Perdas**. 2009, 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2009.

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

FERREIRA, A. B. H. **Miniaurélio Século XXI: o minidicionário da língua portuguesa**. 5ª edição, revisada e ampliada. – Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001

G1.COM. **Protestos na PB bloqueia trecho de BR pela transposição do São Francisco**. Disponível em www.g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2013/08/protesto-na-pb-bloqueia-trecho-de-br-pela-transposicao-do-sao-francisco.html. Último acesso em 25/08/2013.

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

LABSID. **LabSidAcquaNet 2013**. Disponível em: http://www.labsid.com.br/produto_interna.php?id=141. Último acesso em 20/08/2013.

MAUAD, F. F.; LIMA, G. Planejamento Estratégico de Sistemas Hídricos. In: **Uso e Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil: desafios teóricos e político-institucionais**. São Carlos: Rima, 2003. p. 99-125.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Projeto São Francisco**. Disponível em <http://www.integracao.gov.br/pt/web/guest/projeto-sao-francisco1>. Último acesso em 25/08/2013.

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

REBOUÇAS, A. C. **Uso Inteligente da Água**. 1ª ed. São Paulo: Escrituras, 2004.

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

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

SCIENTEC, Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba: Bacias do Rio Piancó e do Alto Piranhas**. SEPLAN. Paraíba. Brasil. 1997

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2ª ed. – Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

SILVA, O. A. **Recursos Hídricos, Ação do Estado e Reordenação Territorial: o processo de implantação da barragem e do distrito de irrigação de Ponto Novo no estado da Bahia - Brasil**. Santiago de Compostela: Universidade de Santiago de Compostela, 2009. (Publicação de tese em CD-Rom)

SILVESTRE, M. E. D. Código de 1934: Água para o Brasil Industrial. **Revista Geopaisagem** (online). Ano 7, nº 13, 2008. Disponível em: <http://www.feth.ggf.br/%C3%81gua.htm>. Último acesso em 15/04/2013

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

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

VIEIRA, V. P. P. B. Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semiárido Nordeste. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 91-107. 1996

ANEXOS

ANEXO A

Resumo das principais informações sobre Reservatório São Gonçalo.

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

Fonte: SCIENTEC,1997.

1970	0,207	0,162	2,251	2,320	1,241	0,048	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,520
1971	0,18	3,41	9,87	8,68	3,18	2,47	1,20	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	2,418
1972	0,213	0,615	1,970	1,874	1,363	0,326	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,272	0,553
1973	0,289	0,023	0,846	16,209	4,007	1,209	0,174	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	1,897
1974	0,089	0,947	5,461	17,444	3,561	1,268	0,093	0,000	0,000	0,000	0,088	0,000	2,413
1975	0,36	1,11	3,29	8,30	4,14	1,35	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,575
1976	0,00	0,4679	0,9785	1,1692	0,0652	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0047	0,0069	0,0000	0,224
1977	0,08	0,256	19,405	7,614	4,279	1,467	0,146	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	2,781
1978	0,19	0,942	2,372	0,839	0,726	0,071	0,006	0,005	0,000	0,005	0,001	0,000	0,430
1979	0,04	0,57	1,28	2,49	1,91	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,564
1980	0,121	0,649	15,563	1,661	0,274	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	1,524
1981	0,056	0,199	11,631	4,892	0,924	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,105	0,018	1,485
1982	0,024	0,018	1,239	0,873	2,347	0,755	0,001	0,000	0,000	0,024	0,111	0,000	0,449
1983	0,010	0,864	0,538	0,236	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,137
1984	0,014	0,005	1,518	6,750	3,813	2,157	0,320	0,000	0,000	0,000	0,021	0,038	1,220
1985	0,632	11,864	12,953	22,592	10,502	2,487	1,333	0,111	0,000	0,000	0,000	0,045	5,210
1986	0,061	0,620	2,082	8,201	4,819	1,472	0,193	0,000	0,001	0,002	0,018	0,000	1,456
1987	0,017	0,187	0,817	0,423	0,001	0,001	0,011	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,123
1988	0,021	0,048	0,665	2,338	4,066	1,297	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,073	0,713
1989	0,396	0,001	0,226	7,508	5,090	2,037	0,578	0,000	0,090	0,014	0,000	0,218	1,347

Fonte: SCIENTEC, 1997.

ANEXO C

Curva cota-área-volume

Cota(m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
226,00	10.000	-
227	40000	22000
228	86000	96000
229	160000	250000
230	260000	442000
231	420000	780000
232	646000	1348000
233	800000	2050000
234	988000	2982000
235	1150000	4050000
236	1356000	5326000
237	1600000	6900000
238	1922000	8604000
239	2240000	10700000
240	2626000	13152000
241	3000000	15900000
242	3444000	19222000
243	4000000	23200000
244	4716000	27382000
245	5200000	32500000
246	6158000	38256000
247	7000000	44600000
248	7890000	52304000
249	8850000	61000000
250	9896000	70090000

Fonte:SCIENTEC, 1997