



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE TECNOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS**

ANTONIONE PONTES ABRANTES

**AVALIAÇÃO DO AUMENTO DAS DEMANDAS NA REGIÃO RECEPTORA
DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO – EIXO
NORTE NO ESTADO DA PARAÍBA**

**SUMÉ - PB
2021**

ANTONIONE PONTES ABRANTES

**AVALIAÇÃO DO AUMENTO DAS DEMANDAS NA REGIÃO RECEPTORA
DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO – EIXO
NORTE NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Ciências Ambientais.

Linha de Pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água.

Orientador: Professor Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.

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

**SUMÉ - PB
2021**



A161a Abrantes, Antonione Pontes.

Avaliação do aumento das demandas na região receptora do Projeto de Integração do Rio São Francisco – Eixo Norte no Estado da Paraíba. / Antonione Pontes Abrantes. - 2021.

72 f.

Orientador: Professor Dr. Camilo Allyson Simões de Farias; Co-orientador: Professor Dr. Valterlin da Silva Santos.

Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROFÁGUA.

1. Demandas hídricas - otimização. 2. Eventos hidroclimáticos. 3. Modelo de otimização multicritério. 4. Vazão excedente. 5. Semiárido Brasileiro. 6. Transposição do Rio São Francisco – Eixo Norte Paraíba. 7. Projeto de Integração do Rio São Francisco. 8. Recursos hídricos. 9. Sistema hídrico. 10. Método multiobjectivo. Bacias hidrográficas – índices de eficiência. 11. Rio Piranhas. 12. Hidrologia. I. Farias, Camilo Allyson Simões de. II. Santos, Valterlin da Silva. III. Título.

CDU: 556.18(041.3)

ANTONIONE PONTES ABRANTES

**AVALIAÇÃO DO AUMENTO DAS DEMANDAS NA REGIÃO RECEPTORA
DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO – EIXO
NORTE NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.
Orientador – UFCG

Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos.
Coorientador – UFCG

Prof. Dr. Paulo da Costa Medeiros.
Examinador interno – UATEC/CDSA/UFCG

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos.
Examinador externo – UFPB

Trabalho aprovado em 15 de abril de 2021.

SUMÉ - PB

Aos meus pais, Antônio e Gediane, meus irmãos, Ary e Layza a minha namorada Gabryelle, e a todos que com brandura e dedicação me apoiaram, dedico-lhes essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida e também pelas inúmeras oportunidades e conquistas que me possibilitou alcançar, e mesmo diante das dificuldades não deixou-me desanimar, dotando-me de discernimento, força e coragem para vencer as adversidades.

Aos meus pais, Antônio e Gediane, e meus irmãos, Ary e Layza, pela sutileza, amor, âmparo e incentivos em mais uma etapa da minha vida.

A minha namorada Gabryelle, por tamanha dedicação, ajuda, cuidados e compreensão na conclusão desse trabalho.

Gratidão também a todos os que fazem parte do Sindicato dos Trabalhadores Rurais de Aparecida, especialmente a Valéria Rita, Marinalva, Aparecida Ferreira, Myrla, Ronaldo, Jamilton e Rhuan, pelo apoio, por acreditarem em mim e me liberarem para as atividades presenciais e extraordinárias que estavam previstas na grade curricular proposta pelo programa.

Aos meus orientadores, os professores, Camilo Allyson e Valterlin, pelas contribuições, paciência, dedicação e esforços empregados com veemência, para concretização desse sonho.

A todos os professores e a coordenação do Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos por tamanho aprendizado.

Aos amigos (pessoais) e colegas de curso que me ajudaram a manter o equilíbrio emocional, a alegria e o pensamento positivo.

Ao Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu, por disponibilizar informações importantes e por assumir o compromisso de destacar as principais contribuições desse trabalho junto aos membros participantes.

A Agência Executiva de Gestão das Águas – AESA, pela promoção de acesso de diversos dados e informações pluviométricas da série histórica adotada.

Ao apoio para realização deste trabalho por meio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – Profágua, em nível de Mestrado, na Categoria Profissional, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Deixa-me ser o que sou,
O que sempre fui,
Um rio que vai fluindo.
E o meu destino é seguir...
seguir para o mar.
Onde tudo recomeça...
onde tudo se refaz...

Mario Quintana

RESUMO

A região do rio Piranhas, no sertão paraibano, passou recentemente por umas das piores secas que acometeu o Nordeste brasileiro. As populações da zona rural e das cidades sofreram com longos períodos de racionamentos no abastecimento de água e as atividades agropastoris foram suspensas ou limitadas. A região será beneficiada com o Projeto de Integração do rio São Francisco (PISF), com um aporte de 2,7 m³/s (vazão firme) segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia dos rios Piancó-Piranhas-Açu (PRH-PPA), dos quais 1,0 m³/s atenderá às demandas hídricas no estado da Paraíba e 1,7 m³/s àquelas do estado do Rio Grande do Norte. Entretanto, os estudos realizados pelo PRH-PPA não consideraram as demandas hídricas atuais ao longo do curso do rio Piranhas, como também a última seca que atingiu a região no período de 2012 a 2017. O objetivo deste trabalho foi averiguar se a vazão firme proposta pelo PRH-PPA é suficiente para atender às demandas hídricas atuais da região do curso do rio Piranhas no estado da Paraíba, bem como verificar a possibilidade de aumento ou diminuição dessas demandas, considerando eventos hidroclimáticos críticos (secas e cheias). Para tanto, primeiramente, foram identificadas as principais demandas hídricas e a infraestrutura hídrica ao longo do curso do rio Piranhas no estado da Paraíba, por onde passarão as águas do PISF. Em seguida, foram definidos dois cenários distintos. O primeiro cenário (C1) teve o intuito de verificar o atendimento das demandas hídricas atuais do sistema (curso do rio Piranhas no estado da Paraíba) com o aporte da vazão exógena do PISF, prevista pelo PRH-PPA. O segundo cenário (C2) teve a finalidade de analisar a possibilidade de aumentar (em até 100%) ou a diminuição do valor das demandas hídricas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG) e das áreas difusas ao longo do curso do rio Piranhas e no reservatório São Gonçalo. O sistema foi operado com o auxílio de um modelo de otimização multiobjetivo, cujo meta principal era a minimização dos déficits de atendimento das demandas hídricas, caso ocorresse alguma falha no seu atendimento. Foram considerados os eventos hidroclimáticos (precipitação e vazões nos cursos dos rios) do período de 2000 a 2019. Tal período contempla anos com eventos de cheia (2004 a 2009) e de secas (2012 a 2017). Os resultados constataram que a vazão firme de 1,0 m³/s do PISF destinada ao estado da Paraíba não é suficiente para o atendimento de todas as demandas hídricas quando se considera o período da última seca (2012 a 2017). Também se verificou a possibilidade de aumentar, em até 100%, os valores das demandas hídricas do PISG e das áreas difusas, porém, no período da última seca, deve-se haver uma diminuição dos valores das demandas hídricas. Vale destacar que tais mudanças ocasionaram, em média, uma economia anual de água de mais de 50 milhões de metros cúbicos para o sistema. Estando, portanto, correlacionado com os objetivos programáticos da agenda ODS 2030, no que diz respeito ao item 06 – Água potável e saneamento, e item 12 - Consumo e produção sustentável.

Palavras-chave: Otimização de demandas hídricas; Eventos hidroclimáticos; Vazão excedente; Semiárido; Rio Piranhas.

ABSTRACT

The region of the Piranhas River - located in Paraíba's outback - recently went through one of the worst droughts that affected the Northeast of Brazil. Rural and urban populations have suffered from water shortages, with agricultural activities being suspended or limited. This region will benefit from the São Francisco River Integration Project (PISF, in Portuguese), with a contribution of 2.7 m³/s (steady flow) according to the Water Resources Plan for the Piancó-Piranhas-Açu Watershed (PRH-PPA, in Portuguese). Part of such contribution (1.0 m³/s) will meet water demands in Paraíba State while 1.7 m³/s will attend Rio Grande do Norte State. However, studies carried out by the PRH-PPA did not consider current water demands along the course of the Piranhas River or even the last drought that hit the region between 2012 to 2017. The objective of this study was to investigate whether the steady flow proposed by PRH-PPA is sufficient to meet the current water demands in the region of Piranhas River (in Paraíba State) and verify the possibility of increasing or decreasing these demands, considering critical hydroclimatic events (droughts and floods). To this end, first, we identified the main water demands and the water system infrastructure along the course of the Piranhas River, where the PISF waters arrive. Then, we defined two distinct scenarios. The first scenario (C1) intended to verify the fulfillment of the current water demands considering the exogenous flow from the PISF. The second scenario (C2) aimed to analyze the possibility of increasing (up to 100%) or decreasing the value of water demands in the São Gonçalo Irrigated Perimeter (PISG, in Portuguese) and of the diffuse areas along the course of Piranhas River and around São Gonçalo reservoir. We operated the water system with a multiobjective optimization model, whose main goal was to minimize the deficits in meeting water demands. To do that, the model took into account hydroclimatic processes (e.g., precipitation and flows) from 2000 to 2019. This period includes years with floods (2004 to 2009) and droughts (2012 to 2017). The results found that the steady flow of 1.0 m³/s of the PISF destined for the state of Paraíba is not sufficient to meet all water demands when considering the period of the last drought (2012 to 2017). It was possible to increase, by up to 100%, the water demand values of the PISG and diffuse areas; however, in the last drought, a decrease in water demand values was necessary. It is worth noting that such changes have prompted, on average, an annual water saving of more than 50 million cubic meters for the system. It being, therefore, correlated with the programmatic objectives of the ODS 2030 schedule, in relation to the item 06 – Drinking water and sanitation, and item 12 – Consumption and sustainable production.

Keywords: Optimization of hydraulic demands; Hydroclimatic events; Surplus flow; Semiarid; Piranhas River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização dos Eixos do Projeto.....	25
Figura 2 –	Localização do Rio Piranhas que receberão as águas do PISF no Estado da Paraíba, Brasil.....	26
Figura 3 –	Localização da bacia hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu.....	27
Figura 4 –	Unidades de Planejamento Hidrológico do Alto Piranhas e do Médio Piranhas Paraibano.....	28
Figura 5 –	Eixos do PISF.....	30
Figura 6 –	Intervenções hidráulicas do PISF.....	31
Figura 7 –	Diagrama unifilar do trajeto das águas do PISF – eixo norte- Estado da Paraíba, Brasil.....	33
Figura 8 –	Procedimentos metodológicos da pesquisa.....	33
Figura 9 –	Demandas do sistema hídrico.....	34
Figura 10 –	Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.....	41
Figura 11 –	Exemplo fictício de descarga em um sistema.....	47
Figura 12 –	Atendimento das demandas de abastecimento urbano dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e no rio Piranhas no cenário C1.....	50
Figura 13 –	Atendimento das demandas hídricas das áreas difusas 1, 2 e 3 no cenário C1.....	51
Figura 14 –	Atendimento das demandas hídricas da área difusa 4 e do PISG no cenário C1.....	51
Figura 15 –	Volumes de água armazenados nos reservatórios para o cenário 1.....	53
Figura 16 –	Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C1.....	54
Figura 17 –	Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C1.....	55
Figura 18 –	Vazão no rio Piranhas na divisa entre os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte no cenário C1.....	55

Figura 19 –	Perdas hídricas anuais consideradas para o Cenário C1.....	56
Figura 20 –	Perdas por evaporação nos reservatórios e difusas nos rios para o Cenário C1.	57
Figura 21 –	Vazão no rio Piranhas na divisa entre os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte no cenário C2.....	60
Figura 22 –	Perdas hídricas anuais para o Cenário C2.....	60
Figura 23 –	Perdas por evaporação nos reservatórios e difusas nos rios no Cenário C2.....	61
Figura 24 –	Volumes de água armazenados nos reservatórios para o cenário C2.....	62
Figura 25 –	Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C2.....	63
Figura 26 –	Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C2.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Valor da vazão para o abastecimento dos núcleos urbanos.....	35
Tabela 2	– Parâmetros de calibração do modelo SMAP mensal.....	36
Tabela 3	– Postos pluviométricos mais próximos aos reservatórios.....	36
Tabela 4	– Evaporação média mensal (em “mm”) dos reservatórios do sistema.....	37
Tabela 5	– Evapotranspiração de referência média mensal, em “mm”.....	37
Tabela 6	– Dados volumétricos dos reservatórios.....	38
Tabela 7	– Atributos dos vertedores.....	38
Tabela 8	– Características dos descarregadores de fundo.....	38
Tabela 9	– Valores dos Indicadores de desempenho de atendimento das demandas no Cenário C1.....	52
Tabela 10	– Perdas hídricas do sistema associada ao Cenário C1.....	56
Tabela 11	– Índices de eficiências de bacias hidrográficas para o Cenário C1...	57
Tabela 12	– Aumento de demandas estabelecidas para o Cenário C2.....	58
Tabela 13	– Valores dos Indicadores de desempenho de atendimento das demandas no Cenário C2.....	59
Tabela 14	– Perdas hídricas do sistema associada ao Cenário C2.....	61
Tabela 15	– Índices de eficiências de bacias hidrográficas para o Cenário C2...	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
DNOCS	Departamento Nacional de Obras contra as Secas
FO	Função Objetivo
IAP	Indicador de ativação da potencialidade
IUD	Indicador de utilização da disponibilidade
IUP	Indicador de utilização da potencialidade
PB	Paraíba
PIB	Produto Interno Bruto
PISF	Projeto de Integração do rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional
PISG	Perímetro Irrigado de São Gonçalo
PL	Programação Linear
PRH-PPA	Plano de Recursos Hídricos da Bacia dos rios Piancó-Piranhas-Açu
RN	Rio Grande do Norte
UPH	Unidade de Planejamento Hidrológico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Geral	16
1.1.2 Específicos	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 A SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS E OS USOS MÚLTIPLOS.....	17
2.2 PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS.....	19
2.2.1 Otimização	20
2.2.2 Simulação	22
2.3 PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO.....	23
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	26
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	26
3.1.1 Unidade de Planejamento Hidrológico do Alto Piranhas	28
3.1.2 Unidade de Planejamento Hidrológico do Médio Piranhas Paraibano	29
3.2 DETALHES DO PISF.....	29
3.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	33
3.3.1 Levantamento dos dados do sistema hídrico	34
3.3.1.1 Demandas hídricas.....	34
3.3.1.2 Vazões Afluentes.....	35
3.3.1.3 Precipitação.....	36
3.3.1.4 Evaporação.....	37
3.3.1.5 Dados dos reservatórios estudados.....	37
3.3.2 Concepção dos cenários	38
3.3.3 Modelo de otimização multiobjetivo	39
3.3.3.1 Função Objetivo.....	39
3.3.3.2 Restrições.....	40
3.3.3.3 Processo iterativo de otimização e análise de convergência.....	43
3.3.4 Critérios operacionais	45
3.3.5 Indicadores de desempenho e eficiência	46
3.3.5.1 Indicadores de desempenho de atendimento das demandas.....	46
3.3.5.2 Índices de eficiências de bacias hidrográficas.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50

4.1 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO.....	50
4.1.1 Cenário C1.....	50
4.1.2 Cenário C2.....	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional resultou em demandas diversificadas e crescentes por água em quantidade e qualidade, limitando a disponibilidade para acesso, consumo e gestão desse recurso (BRITO, 2019).

Especificamente, o semiárido nordestino, apresenta características climáticas bem definidas, tais como altas taxas de evaporação, chuvas irregulares no espaço e no tempo e baixos índices pluviométricos, que condicionam o desenvolvimento socioeconômico e a qualidade de vida da população (SANTOS; CURI, 2014; VIEIRA, 1996).

A região do rio Piranhas, no estado da Paraíba, apresenta frequentes problemas de escassez hídrica, decorrentes de secas prolongadas que dificultam o atendimento das demandas hídricas para abastecimento humano, irrigação de áreas agrícolas (principal atividade econômica da região), prática da piscicultura extensiva e/ou intensiva, entre outros.

De acordo com Santos e Nóbrega (2017), no ano de 2012 iniciou-se uma das piores secas dos últimos 50 anos. O sistema hídrico, formado pelos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, responsáveis por abastecer duas importantes cidades paraibanas, Sousa e Cajazeiras, entraram em colapso em 2015. As populações da zona rural e das cidades que eram abastecidas pelos reservatórios sofreram com o racionamento de água até dezembro de 2019, sendo ainda proibida a retirada de água dos mananciais e do próprio rio Piranhas para fins de irrigação de culturas agrícolas.

Para minimizar as consequências das secas na região Nordeste, foi idealizado o Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. No estado da Paraíba será beneficiada a bacia do rio Piranhas-Açu – através do Eixo Norte – e a bacia do rio Paraíba – através do Eixo Leste. Os principais objetivos são assegurar a oferta de água, com garantia de atendimento para a população; fornecer água de forma complementar para açudes existentes na região, viabilizando uma melhor gestão da água; e reduzir as diferenças regionais causadas pela oferta desigual da água entre bacias e populações (RIMA, 2004).

Mesmo com o aumento da oferta hídrica nas regiões beneficiadas, é necessário um gerenciamento adequado dos recursos hídricos existentes, devendo-se considerar a variabilidade hidrológica. Tal gerenciamento envolve a alocação da água disponível

para os seus diversos usos e usuários, minimizando os prejuízos que possam advir da escassez ou excesso hídrico e maximizando os benefícios originados do uso múltiplo da água (CARNEIRO; FARIAS, 2013; ALBUQUERQUE et al., 2003).

Diante do exposto, destaca-se a importância do planejamento dos recursos hídricos da região para proporcionar uma melhor utilização, de forma a satisfazer todos os seus usuários. Berbert (2003) destaca que esse planejamento 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.

Tal previsibilidade deve promover o uso eficiente e racional das disponibilidades hídricas entre os múltiplos usuários de forma integrada e otimizada, atenuando o desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água. Além disso, as estratégias de planejamento possibilitam o desenvolvimento sustentável dos sistemas produtivos que usam a água como insumo básico, sendo imprescindível para o processo de expedição de outorga de direito do uso dos recursos hídricos.

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu – PRH-PPA (ANA, 2016) traz apenas as curvas de garantia dos principais reservatórios, as curvas de permanências de alguns pontos dos rios e o desempenho dos reservatórios no atendimento das demandas atribuídas, utilizando como vazão de referência para a expedição de outorgas a Q_{90} (vazão regularizada pelos reservatórios com 90% de garantia). Assim, não apresenta regras para a operação dos reservatórios nem a capacidade de atendimento de suas respectivas demandas com o aporte da vazão exógena do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF.

Diante disto, o presente trabalho traz um estudo sobre o atendimento das demandas existentes na região do rio Piranhas com o aporte da vazão exógena do PISF, avaliando a possibilidade de aumento ou diminuição de acordo com a disponibilidade hídrica.

Para tanto, criou-se um cenário com as demandas atuais do sistema e outro cenário com a possibilidade de aumento de até 100% do valor dessas demandas. Estes cenários foram analisados por meio de um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em Programação Linear (PL), desenvolvido por Santos et al. (2011), para um horizonte de tempo de 20 anos (2000-2019), período este caracterizado por uma das

piores secas (2012-2019) e maiores cheias (2008-2009) ocorridas na região de estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o atendimento das demandas na região do rio Piranhas receptora do PISF - Eixo Norte no estado Paraíba, analisando o impacto no sistema hídrico e considerando um aumento sistemático dessas demandas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as principais demandas/outorgas na região do rio Piranhas receptora do PISF - Eixo Norte no estado Paraíba;
- Propor cenários com o aumento sistemático no valor dessas demandas;
- Avaliar os principais impactos no sistema através de indicadores de desempenho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS E OS USOS MÚLTIPLOS

Pela perspectiva presente, a água é elemento indispensável para existência das formas de vida como um todo, uma vez que permite e garante a qualidade de vida da sociedade, a sustentabilidade do desenvolvimento socioeconômico e a conservação das suas reservas de capital ecológico (REBOUÇAS, 1997). No entanto, sua compreensão holística é deflagrada por efeitos comuns de seca ou enchentes, que por consequência presumível, tem sido agravado redundantemente pela degradação dos recursos hídricos, crescimento exponencial da população aliado a irracionalidade de utilidade e inadequação de manejo reduzindo a oferta de água nos mananciais (OLIVEIRA; NÓBREGA; ALMEIDA, 2012).

A retórica pertinente sobre essa questão revela que a disponibilidade de atendimento e seus usos preponderantes constituem em si, uma grandeza indeterminada, por conta da demanda ascendente de água potável para prover a acessibilidade das populações em quantidade e qualidade suficiente em que necessitem. Isso acumula e intensifica os conflitos pela distribuição, consumo e gestão desse bem (BRITO, 2019).

Sendo assim, ao delegar esse aspecto aplicando as condições naturais do ambiente na qual se insere a realidade brasileira, embora destacado como a maior reserva hídrica superficial do planeta, apresenta-se entre seus quadros sociais e territoriais problemas de escassez. Isso é justificado por Camara (2003), pela fragmentação do arranjo espacial e temporal de suas viabilidades hídricas, condensadas pelo comprometimento elementar dos parâmetros substanciais classificáveis de proveito ideal e da ineficiência no gerenciamento cabível desse artifício vital. Neste sentido, a região do semiárido nordestino especificamente, detém variabilidades climáticas e pluviométricas que implicam na intermitência direta nos volumes a serem armazenados, como também nas perdas circunstanciais por evaporação, deixando muitas localidades convivendo com colapsos por falta de água e operando sob um sistema de racionamento (FARIAS; CURTI; DINIZ, 2017).

A retratação do supracitado impacto pode afetar o fornecimento em cadeia de todos os usuários, incluindo o meio ambiente por não poder satisfazê-los integralmente entre as múltiplas finalidades a que se destina, ou seja, em um cenário

desfavorável de escassez a oferta é insuficiente para atender toda a demanda requerida (MACHADO, 2011). Ao passo que isso acontece, existe entre as partes conflitantes uma disputa particular pela divisão de um bem comum, que se intensifica proporcionalmente na medida em que se aumenta as requisições de volume a ser designado para os segmentos interessados e, quando há um desprovisionamento hídrico incapaz de solucionar as principais necessidades constituídas por lei. Com efeito, mediante a essa inadequação concernente, fica evidente a obrigatoriedade de uma hierarquização de preferências (prioritárias) para que os recursos sejam alocados da forma mais eficiente possível (CAMARA, 2003).

Dessa forma, a alocação de água surge como um meio alcançável de suprir os litígios determinados pelos atuais e futuros dependentes dos corpos hídricos. Já que promulga, de acordo com Machado (2011) uma criteriosa delimitação de possibilidades de aproveitamento do sistema de forma equitativa, uma gestão integrada e induzindo “os consumidores”, a submeter-se a uma abordagem mais racional das fontes existentes. Instituído essa linha de raciocínio é que a Agência Nacional de Águas – ANA (2011), adequa sua formulação considerando o âmbito quali-quantitativo, o uso coerente e a ocupação distributiva da água.

Adotando um instrumento de concessão de vazão regularizada por tempo determinado, em um ponto de captação autorizado de um manancial pertencente a Bacia Hidrográfica do requerente usuário, denominada na Política Nacional de Recursos Hídricos de outorga, na qual, tanto a aquisição como a funcionalidade da mesma deve respeitar a pluralidade de obtenção auferida para as demandas já pactuadas como as ambientais, econômicas, sociais; ademais as futuras como ensejo para sustentabilidade e mitigação dos conflitos (ANA, 2011). Todavia, um dos grandes problemas no processo de anuência de direito de abastecimento, é quantificar a vazão máxima a ser liberada para os desfrutadores legítimos do bem em evidência (RODRIGUES et al., 2007).

Outro fator crítico a ser citado é a imposição de “único critério a todo seu território, como também os limites máximos determinados para concessão de outorgas são inadequados a realidade das bacias, muitas vezes cerceando o seu desenvolvimento” (MENDES, 2007, p. 14). Ainda segundo o autor, se prescreve nesta seara uma suscitação de estudo aprofundado para analisar o panorama de elucidação da efetividade das ferramentas de regulamentação, visto que persiste uma indefinição sobre as práticas de gestão quanto as consequências restritivas dos volumes mínimos

e absoluto outorgáveis em detrimento a situação de disponibilidade real e à postura frente a novos pleitos de outorga.

Na propositura detalhada por Braga (2013), foi constada uma situação preocupante sobre o grau de incerteza da governabilidade mencionada anteriormente, pois, ao tentar equacionar uma alocação de água baseada em cenários para a Bacia do Piranhas-Açu, foi elencado estratégias configurando as variáveis e o comportamento das mesmas a cada simulação, de modo que ao estimular o abastecimento como prioridade total, se materializa uma falha severa que atingiu principalmente os irrigantes pelo déficit resultante do modelo disseminado. Interpretando o resultado, ele mesmo justifica que a demanda vulnerável de irrigação tende a aumentar pelo provável incremento das áreas irrigadas e elevação da temperatura, condicionados pela tendência de crescimento do Produto Interno Bruto – PIB da bacia (BRAGA, 2013). Portanto, é muito oportuna uma avaliação no atendimento de todas as demandas, seja ela em situação de disponibilidade desfavorável, como em um aumento da oferta existente para diagnosticar a sensibilidade dos usuários e os impactos decorrentes de um favorecimento futuro.

2.2 PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Pelas circunstâncias que aderem à complexidade na resolução de problemas envolvendo os sistemas de recursos hídricos e com os inúmeros avanços das tecnologias, está se tornando comum a representação da realidade através de modelagem matemática e ferramentas computacionais a fim de auxiliar nas operações, planejamento e nas tomadas de decisões sob regime processual de atendimento aos padrões quantitativos-qualitativos exigidos (BRITO, 2019).

Para Lanna (1997), se trata de simplificar a real complexidade existente, por intermédio de informações expressivas que manifeste soluções como resposta plausível para uma adversidade questionável.

Nesses termos o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos se tornam fundamental para análise de modelos sistêmicos com enfoque principal para esses recursos (LIMA; LANNA, 2005).

Sobre isso, Santos (2007, p. 6) ressalta:

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

Para tanto, ao propor critérios para escolha de uma alternativa viável que consolide um estudo operacional que integre os métodos estruturais de intervenção, tem sido comumente útil à inclusão de técnicas de otimização e simulação (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993; LANNA, 1997; LABADIE, 2004). Sendo elas, classes precisas para mensurar o comportamento da realidade e otimizar os processos deliberativos que circundam sob esse contexto de atuação (LANNA, 2002).

2.2.1 Otimização

As técnicas de otimização, consistem em práticas indissociáveis de instrumentos algorítmicos, que dão suporte a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos, cujo objetivo é determinar um conjunto de valores formulados analiticamente para as variáveis que determinam uma dada Função Objetivo (FO), na qual será maximizada ou minimizada; detendo imposições restritivas a serem respeitados na composição do sistema (REIS, 2014). Ou seja, será encontrada a solução ótima para o problema, de modo a atingir as finalidades estabelecidas por procedimentos operacionais previstos.

Os pensadores Braga, Barbosa e Nakayama (1998) comentam que esse tipo de modelo procura identificar os pontos máximos e mínimos expressados matematicamente na condução do objeto, adotando certas hipóteses e simplificações. Das quais se destaca uma convergência solúvel entre as equações de restrição e da função pretendida, obtendo como vantagem principal a concretização de resultados otimizados de forma simultânea (FARIAS, 2009).

A acepção que garante a performance do referido modelo está compilada em uma configuração que possa corresponder plenamente a determinados critérios, visto que seus conceitos intrínsecos assumem uma identidade fundamental para ordenar, interpretar e integrar módulos ponderáveis, análogo a situação-problema envolvendo os sistemas hídricos (BRITO, 2019). Por conseguinte, a função objetivo equivale a

forma de valoração do nível de desempenho adquirido por contingências específicas atribuídas num conjunto de variáveis de decisão a serem empregadas na amostra (SIMONOVIC, 1992). Já as restrições se tratam de processos físicos e condições de contorno para forçar o modelo a obedecer às leis e exigências operacionais que viabilizam a região abrangente dessas variáveis (SANTOS, 2007).

Essas metodologias são baseadas e classificadas de acordo com o tipo de programação matemática dominante, sendo que os mais aplicados são: a programação linear e a programação dinâmica. Cada classificação, detém estruturação técnica própria para se chegar a uma resposta solucionável desde a forma determinística ou estocástica, a implícita ou explícita (ROS; BARROS, 2003).

Na programação linear deve haver inter-relações entre as variáveis que enalteça as equações que caracterizam os impasses a serem resolvidos, devendo tanto a função objetivo quanto as restrições apresentarem expressões lineares (SIMÕES, 2013). Trata-se de um mecanismo conceituado e bem disseminado por sua flexibilidade de adaptação multidimensional aos problemas e pelas facilidades de compreensão de seus algoritmos.

A programação dinâmica por sua vez, considera uma sequência de acontecimentos e uma série de alternativas, que está dívida em estágios parciais de um ponto do processo no qual uma decisão deve ser tomada (SANTOS, 2007). O seu maior atributo é a caracterização de um grande número de sistemas de recursos hídricos, advindos por vertentes estocásticas e não-lineares que são incorporados a formulação de uma linguagem dinâmica.

Costa Neto (2020) utilizou-se da otimização por programação linear para analisar as alternativas para o uso da água do Projeto de Integração do Rio São Francisco – Eixo Norte no estado da Paraíba, aplicando previsões para alternar a vazão exógena de modo a encontrar a solução capaz de atender todas as demandas e restrições interposta ao modelo, cujo o resultado principal demonstrou fragilidade de atendimento do cenário delineado pelo Plano original de Recursos Hídricos

Logo, por essas premissas, podemos dizer que a otimização se perfaz de um procedimento eficiente de utilizações sucessivas da simulação para determinar a melhor alternativa (BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998).

2.2.2 Simulação

Os modelos de simulação denotam um conjunto ordenado de expressões matemáticas, estruturadas de maneira lógica, a fim de prever o seu comportamento espacial e/ou temporal dentro de um sistema contendo certas condições a serem respeitadas (SANTOS, 2012). De maneira geral, são apreciadas como ferramentas poderosas no âmbito das operações e do planejamento, pois subsidiam o entendimento sobre os modos de atuação em bacias hidrográficas e na previsão de condições diferentes das observadas (CAMARA, 2003).

Segundo Vieira (2007, p. 9), “essa técnica tem como artifício principal a flexibilidade, já que permite que o sistema seja demonstrável por uma descrição matemática mais detalhada, em decorrência de se obter um resultado da interface sistêmica associado ao tempo instantâneo de cada ocorrência”.

Dessa forma, independentemente do nível de complexidade procedimental requerido não implica necessariamente em políticas ótimas de operação. Contudo consegue permitir uma aproximação mais realista do ótimo desejado. Esse último argumento, por sinal, justifica a diferença entre aplicar a simulação e/ou otimização. Muito embora, têm se inserido como tendência positiva o uso de técnicas de simulação em esquemas de otimização, porque a junção das características de ambos e/ou complemento das rotinas de cada um delimitam as possibilidades até concretizar a solução, fornecendo aos planejadores respostas mais confiáveis (LIMA; LANNA, 2005).

Sob o ponto de vista individual, a simulação se trata de um perfil comparativo e alternativo de desempenho entre relações circunstanciais abrangendo reservatórios múltiplos, com finalidades múltiplas são basicamente regidos por regras pré-dimensionais (BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998).

Santos (2012, p. 26) ao explicar sobre o enfoque patenteado por esses tipos de modelos, defende que “são mais apropriados para análise do desempenho de alternativas operacionais, principalmente, de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança”.

2.3 PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

A região do Nordeste brasileiro enfrenta, historicamente, o problema recorrente da seca, especialmente no território ocupado pelo clima Semiárido. Isso porque as peculiaridades climatológicas do lugar se caracterizam pela distribuição irregular, tanto temporal como espacial, do volume de chuvas, ocorrendo períodos de estiagens em intervalos de tempo indefinidos, que resultam em uma redução da produção agrícola e fornecimento de água para a população (ABRANTES, 2015).

Essa realidade forçada por esses eventos foi e é uma das maiores preocupações que circunda entre os habitantes da referida localidade. Já que grande parte dela sobrevive da agricultura e pecuária em pequenas propriedades familiares, e simplesmente pelo fato dos baixos índices pluviométricos, não se consegue realizar a produção de alimentos sequer para garantir a subsistência familiar. Por isso mesmo, estima-se que cerca de 10 milhões de pessoas inseridas nesse ambiente, se utilizem dessas práticas tradicionais, cujo são consideradas atividades muito vulneráveis a períodos prolongados de estiagem (CASTRO, 2011).

Neste sentido, a carência dos recursos hídricos é agravada pela escassez, que passou a demandar por esse motivo a construção de reservatórios de acumulação para atender com urgência as necessidades dos múltiplos usos da água. Contudo, a política adotada de regularizar barragens e açudes não solucionavam os problemas de falta de água, exigindo uma alternativa mais eficiente que pudesse sanar de uma vez por todas a deficiência hídrica para diminuir os efeitos comuns da seca. Que foi atribuída desde sua cogitação imperial para a transposição de vazão exógena do rio São Francisco (GUIMARÃES, 2016).

A conjectura primitiva de idealização do Projeto de Integração do rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF, como é chamado, deteve um contexto de criação baseado na necessidade de intervenção do Poder Público que em épocas remotas já mensuravam a importância de buscar meios para contornar o problema. Ao passo que foi criado órgãos para lidar diretamente com o fenômeno, também passaram a realizar estudos de transferências de água interligando mais de um rio, além de outras iniciativas visando a disponibilidade favorável. Sua viabilidade sofreu altos e baixos, desde mudanças no esboço, falta de infraestrutura e tecnologia apropriada, arquivamento pelas instâncias superiores pelo impacto e dimensionamento da obra, abandonos quando a execução estava

consolidada, sendo retomadas com certo intervalo de tempo e novas metodologias (RIMA, 2004). Com todo esse enredo entorno do PISF, o mesmo só foi concluído com 23 anos depois de iniciada.

De acordo com Brito (2019), o objetivo principal do PISF é a segurança hídrica, de modo assegurar a oferta de água para uma população que sofre com a escassez e irregularidades das chuvas. Soma-se a este, o fornecimento de água complementar para açudes possibilitando uma melhor gestão da água e, a redução das diferenças regionais causadas pela oferta desigual da água entre bacias e populações. Há uma estimativa que resida cerca de 12 milhões de habitantes na área do projeto e que sem os mantimentos hídricos toda a região estará destinada ao subdesenvolvimento (RIMA, 2004).

A obra é composta atualmente, por dois eixos:

- **Eixo Leste:** Inicia-se a partir do lago da barragem de Itaparica-PE. Percorre cerca de 200 km até o Rio Paraíba – PB, levando água para o açude Epitácio Pessoa. Terá uma capacidade máxima de 28 m³/s e transportará um volume médio de 18,3m³/s. O sistema compõe-se de 5 estações de bombeamento, 5 aquedutos, 2 túneis e 9 reservatórios de pequeno porte.
- **Eixo Norte:** Será o objeto de estudo desta pesquisa, sendo que o seu início se configura, a partir da captação próximo à cidade de Cabrobó – PE. Percorre cerca de 400 km, conduzindo água aos rios, Salgado e Jaguaribe, no Ceará; Apodi, no RN; e Piranhas-Açu na PB e RN. Terá uma capacidade máxima de 99 m³/s e transportará um volume médio de 45,2 m³/s. O eixo é composto por 4 estações de bombeamento, 22 aquedutos, 6 tuneis e 26 reservatórios de pequeno porte.

Figura 1 – Localização dos Eixos do Projeto.



Fonte: RIMA (2004).

Dessa forma, considerando os objetivos desta pesquisa, será possível analisar se as premissas de atendimento prescritas na sua elaboração terão validade prática alcançável sob efeitos de aumento progressivo dos recursos para veiculação a que se destina, de modo que, possa justificar o alto investimento alocado para esta solução, sob o risco de não conseguir atender todos os usuários com o nível de garantia desejado e suportado pelo sistema.

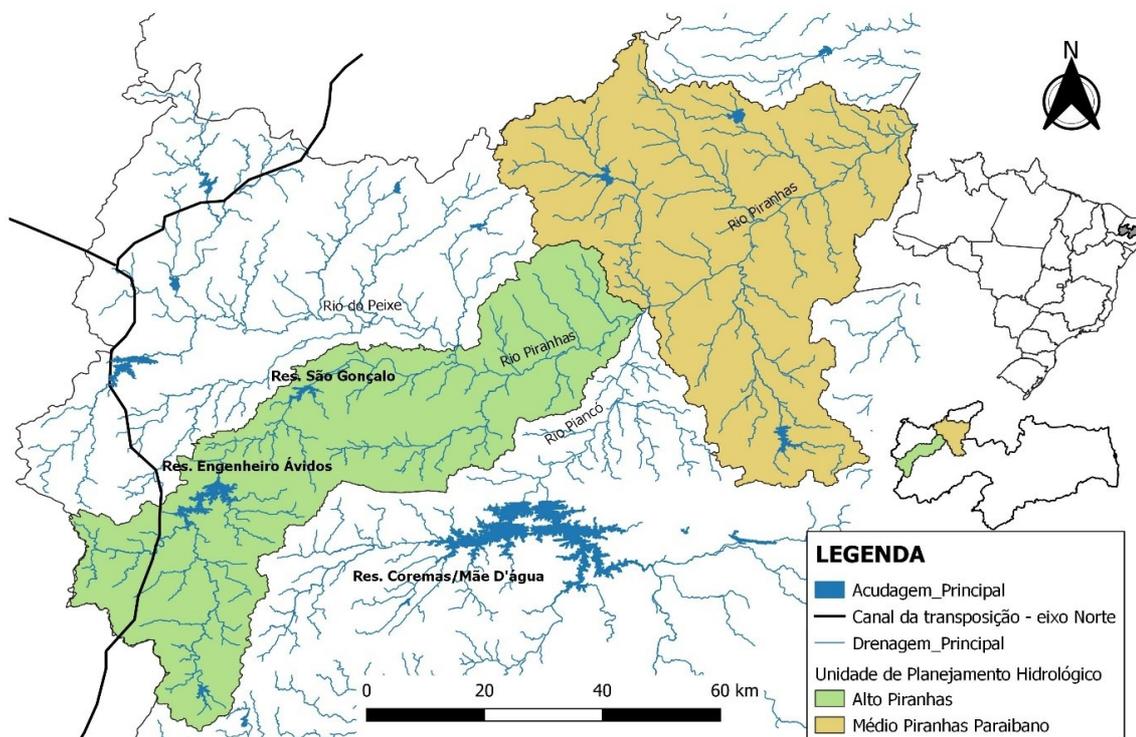
Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu.



Fonte: ANA (2016).

A fim de considerar, de forma mais equitativa e detalhada, os fatores geomorfológicos, hidrográficos e hidrológicos semelhantes em sub-bacias adjacentes, o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016) apresentou o conceito de Unidade de Planejamento Hidrológico – UPH, e dividiu a referida bacia em 11 (onze) UPH's. Nesse contexto a área de estudo está incluída nas UPH's do Alto Piranhas e do Médio Piranhas Paraibano (Figura 4), detalhadas a seguir.

Figura 4 – Unidades de Planejamento Hidrológico do Alto Piranhas e do Médio Piranhas Paraibano.



Fonte: Elaboração própria, 2016.

3.1.1 Unidade de Planejamento Hidrológico do Alto Piranhas

A Unidade de Planejamento Hidrológico do Alto Piranhas está localizada no extremo oeste do Estado. Sua área é de 2.562 km², abrangendo cerca de 19 (dezenove) municípios paraibanos, dos quais 7 (sete) tem sede na UPH (ANA, 2016).

Seus indicadores fisiográficos apontam para uma característica alongada, o que indica baixa susceptibilidade a enchentes. Apresenta-se bastante declivoso, com inclinações médias da ordem de 9,1 m/km (0,91%). No que diz respeito à densidade de drenagem, a UPH do Alto Piranhas traz um valor de 1,4 km de riachos para cada 1 km² de área, o que implica numa eficiência de drenagem de razoável a média. Do ponto de vista climatológico, baseado na clássica formulação de Köppen, a referida área de captação é considerada de clima semiárido quente - classificado como Bsh - , e quente e úmido com chuvas concentradas entre verão e outono – Aw'. A precipitação em anos médios fica em torno dos 900 mm/ano, podendo chegar, em anos chuvosos, à marca de 1400 mm/ano e, em anos secos, ao mínimo médio de 600 mm/ano (PARAÍBA, 1996a).

Segundo a ANA (2016), a UPH do Alto Piranhas contém 72 (setenta e dois) reservatórios superficiais que cumprem a função de regularização das vazões em períodos de estiagem. Dos 72 (setenta e dois) mananciais, destacam-se Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, cujas capacidades são, 293 hm³, e 40 hm³, respectivamente.

A gestão dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo é responsabilidade da União, uma vez que foram construídos com recursos financeiros do Departamento Nacional de Obras contra as Secas – DNOCS.

3.1.2 Unidade de Planejamento Hidrológico do Médio Piranhas Paraibano

A Unidade de Planejamento Hidrológico do Médio Piranhas Paraibano está localizado no noroeste do Estado da Paraíba, e estende-se até o estado do Rio Grande do Norte. Ocupa uma área de 2.894 km² abrangendo cerca de 24 municípios paraibanos dos quais 11 tem sede na UPH (ANA, 2016).

Quanto ao relevo, a região se apresenta relativamente acidentada, com cotas variando entre 650 m e 180 m, situando-se totalmente no domínio cristalino. O clima predominante na região é do tipo semiárido quente – classificado como Bsh -, e quente e úmido com chuvas de verão e outono – Aw' -, considerando a classificação de Köppen. A precipitação em anos médios fica em torno dos 800 mm/ano e é marcada pela alta irregularidade espaço-temporal. Por sua vez, a temperatura média anual é de 26,5° C, a umidade relativa média do ar, da ordem de 50% e a evapotranspiração potencial ultrapassa os 2000 mm/ano, sendo que vegetação natural é a caatinga arbórea-arbustiva (PARAÍBA, 1996b).

Segundo a ANA (2016), a Região do Médio Piranhas paraibano contém 161 reservatórios superficiais dos quais 3 são considerados estratégicos, são eles: Engenheiro Arcoverde, Carneiro e Riacho dos Cavalos, cujas capacidades são, nessa ordem, 36,8 hm³, 31,3 hm³ e 17,7 hm³.

3.2 DETALHES DO PISF

O enfoque principal do Projeto de Integração do rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) é assegurar oferta hídrica a 12 milhões de cidadãos da região semiárida dos Estados de Pernambuco, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte (CASTRO, 2011). Outrossim, Brasil (2004) acrescenta mais dois

importantes objetivos ao PISF, a saber: (i) fornecimento complementar de água a açudes já existentes na região; e (ii) redução das diferenças regionais causadas pela oferta desigual da água entre bacias e populações.

Ainda de acordo com Brasil (2004), a água a ser transposta será derivada da vazão de regularização da Barragem de Sobradinho e beneficiará as bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe (CE), Piranhas-Açu (PB/RN), Apodi (RN), Paraíba (PB), Moxotó (PE), Terra Nova (PE) e Brígida (PE).

Farias (2009) explica que o PISF garantirá disponibilidade hídrica de uma fonte permanente, o que tende a inibir o costume de manter elevados níveis nos reservatórios, cujo efeito implica em grandes perdas por evaporação e vertimento. O referido empreendimento, portanto, vai dar mais força à agricultura irrigada e, conseqüentemente, a economia da região refletirá tais vantagens.

O PISF conta com estações de bombeamento, canais, pequenos reservatórios, usinas hidrelétricas (para recuperação de parte da energia gasta nas estações elevatórias) na composição do sistema que realizará o transporte da água até os diversos pontos de entrega (BRASIL, 2000).

O projeto é composto por dois eixos independentes: Norte e Leste, conforme expõem a Figura 5.

Figura 5 – Eixos do PISF.

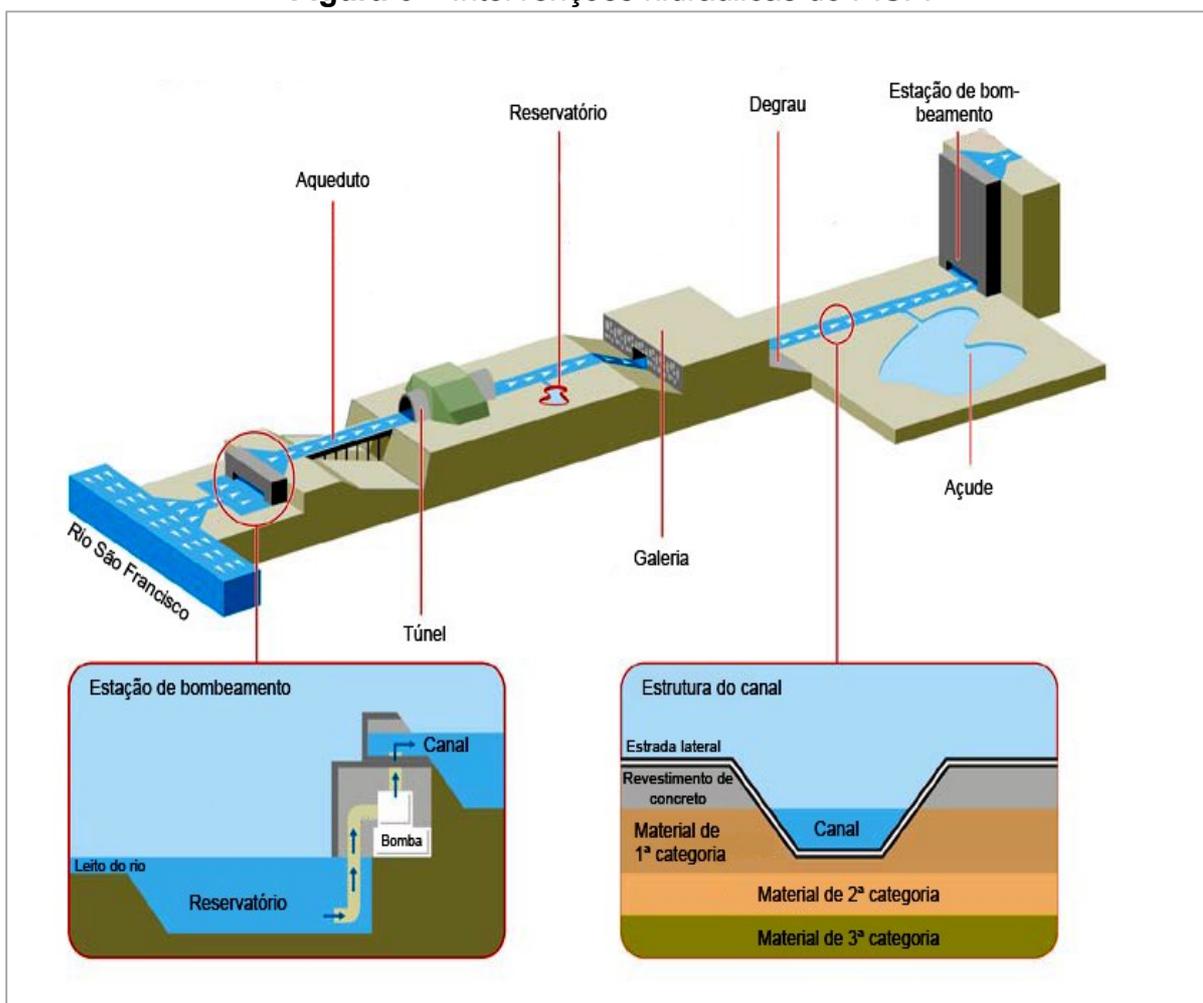


Fonte: Brasil (2004).

Os eixos principais – Norte e Leste, foram subdivididos em 6 trechos de obras, em cuja distribuição tocou ao Eixo Leste apenas o Trecho V, ficando os demais (I, II, III, IV e VI) a cargo do Eixo Norte.

Ainda considerando o que diz Brasil (2000), a maioria do percurso que não se apresenta no leito natural dos rios ocorre em canais, lançando-se mão, a depender das condições topográficas e de estruturas, como os aquedutos e os túneis (Figura 6).

Figura 6 – Intervenções hidráulicas do PISF.



Fonte: Adaptado de Brasil (2004).

O Eixo Norte, como visto anteriormente, é formado por 5 trechos de obras. Considerando o enfoque deste trabalho, destaque especial será dado aos trechos I e II. A captação de água para o Eixo Norte tem início entre o Reservatório de Sobradinho e a Ilha Assunção, perto do município de Cabrobó – PE (BRASIL, 2000).

No Trecho I, estão localizadas as principais estações de bombeamento, que precisam vencer um desnível geométrico de 165 m, desde a cota 325 m no leito do

rio até a cota 490 m. São então percorridos, entre canais, aquedutos e túneis, mais de 140 km até o reservatório de Jati, que fica localizado no município de mesmo nome, no Estado do Ceará. O Trecho II é, obviamente, a sequência do Trecho I, de modo que se inicia a jusante do Reservatório Jati e segue percorrendo a divisa entre os Estados do Ceará e da Paraíba. Sua principal função é atender a bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, e seu funcionamento se dá todo por gravidade, o que dispensa a necessidade de estações elevatórias (BRASIL, 2000).

Em suma, pode-se então dizer que o Eixo Norte compõe-se de 402 km de canais artificiais, 4 estações elevatórias, 22 aquedutos, 6 túneis e 26 reservatórios de pequeno porte, além de duas pequenas centrais hidrelétricas (reservatórios Jati e Atalho – Ceará), com potência instalada de 40 MW e 12 MW, nessa ordem (BRASIL, 2004).

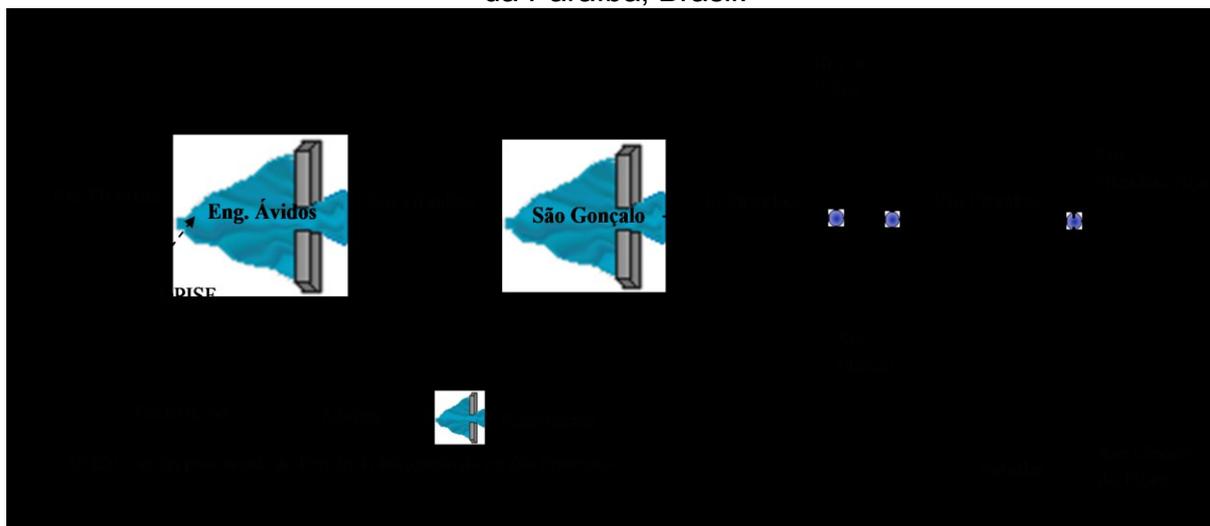
Depois de vários momentos de impasse, finalmente, em março de 2017, foi inaugurada a primeira fase da obra, pela chegada das águas do PISF ao Eixo Leste, inaugurando a maior obra de transposição hídrica do Brasil e da América Latina (FERREIRA, 2019). Para o Eixo Norte, a previsão ainda se encontra incerta, para que as águas do PISF possam abastecer todo o mencionado eixo.

Segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016), o eixo norte do PISF, prevê dois pontos de entrega de água para a bacia: um pelo rio Piranhas, a montante do açude Engenheiro Ávidos, e outro pelo açude Lagoa do Arroz, por meio do riacho Cacaré. Entretanto, segundo informações do próprio Comitê da referida bacia, a princípio, só haverá a entrega das águas a montante do açude Engenheiro Ávidos.

A vazão firme total prevista é de 2,7 m³/s, sendo 1,0 m³/s destinado para o abastecimento da Paraíba e 1,7 m³/s para o abastecimento do Rio Grande do Norte (ANA, 2016).

A seguir, é possível observar um diagrama unifilar do trajeto das águas do PISF no rio Piranhas no Estado da Paraíba considerando esse ponto de entrada e os seus ramais de intercessão.

Figura 7 – Diagrama unifilar do trajeto das águas do PISF – eixo norte- no Estado da Paraíba, Brasil.



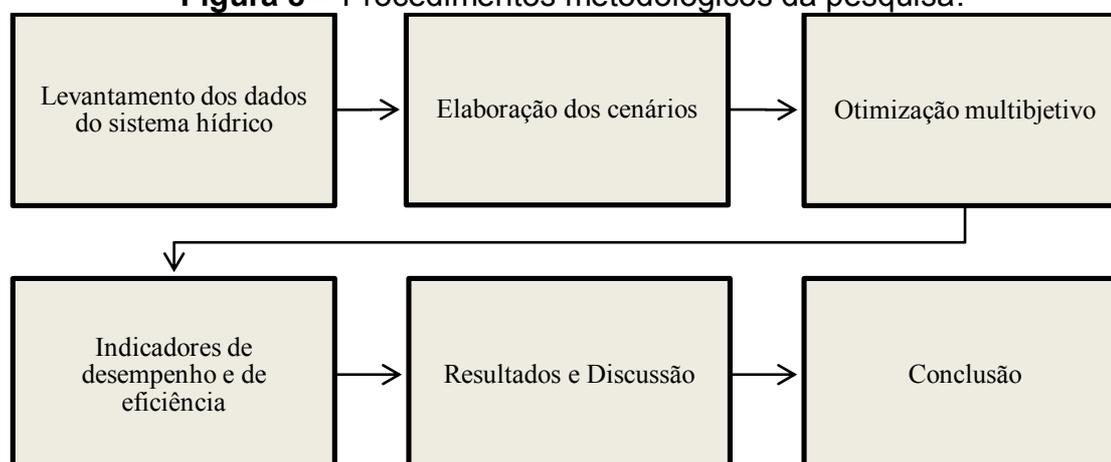
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Observa-se que os únicos reservatórios beneficiados com as águas do PISF no rio Piranhas paraibano serão os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo. Os mesmos são responsáveis pelo abastecimento de água de duas importantes cidades paraibanas (Sousa e Cajazeiras) e do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), que possui uma área total de 3.139 ha, e de diversas demandas difusas ao longo do rio Piranhas e no entorno dos reservatórios (REIS; SANTOS; FARIAS, 2019).

3.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A realização desta pesquisa baseou-se na seguinte sequência metodológica, apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Tabela 1 – Valor da vazão para o abastecimento dos núcleos urbanos.

Setor	Demanda (L/s)	Fonte Hídrica
Abastecimento urbano de Cajazeiras	190 ¹	Res. Engenheiro Ávidos
Abastecimento urbano de Sousa, Marizópolis Nazarezinho	230 ¹	Res. São Gonçalo
Abastecimento urbano de São Bento, Brejo do Cruz, Belém do Brejo do Cruz, Catolé do Rocha, Vista Serrana, Riacho dos Cavalos, Jerico, Mato Grosso, Bom Sucesso, Brejo dos Santos, Paulista e Lagoa.	301 ²	Rio Piranhas
Perímetro Irrigado de São Gonçalo	1400 ¹	Res. São Gonçalo
Área Difusa 1	150 ¹	Rio Piranhas
Área Difusa 2	160 ¹	Res. São Gonçalo
Área Difusa 3	170 ¹	Rio Piranhas
Área Difusa 4	1600 ²	Rio Piranhas

Fonte: ¹ Resolução Conjunta ANA/AESA-PB N° 76/2018; ² Resolução conjunta ANA/IGARN/AESA N° 65/2019.

A área difusa 3 corresponde ao centro de aquicultura do DNOCS e irrigantes que captam água no rio Piranhas a jusante do reservatório São Gonçalo, até a confluência com o rio do Peixe. A estimativa da vazão para o atendimento das demandas hídricas do PISG considerou uma área irrigável de 2800 hectares com uma vazão específica de 0,5 L/s/ha, mesmo sendo de conhecimento que a área irrigável do perímetro seria de 4384,88 hectares (correspondência encaminhada pelo DNOCS/CEST-PB), até que seja concluída a modernização da infraestrutura (Nota Técnica N° 11/2018/COMAR/SER).

A área difusa 4 corresponde aos irrigantes e aquicultores que captam água no rio Piranhas da confluência com o rio Piancó até a divisa com o estado do Rio Grande do Norte. A vazão foi estimada considerando tanto o cadastro georreferenciado contratado pela ANA, quanto pelas estimativas feitas pelo Plano de Recursos Hídricos da Bacia (Nota Técnica N° 15/2019/COMAR/SRE).

3.3.1.2 Vazões Afluentes

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios e nós do sistema foram gerados pelo modelo hidrológico chuva x vazão SMAP-M (ANA, 2016). O mencionado modelo foi calibrado através de séries de vazões do posto fluviométrico de Piancó (37340000), em que foram geradas as séries de deflúvios médios mensais de janeiro de 2011 a dezembro de 2019 a partir de dados de precipitação totais mensais. Na Tabela 2, encontram-se os parâmetros de calibração do SMAP-M para a estação fluviométrica selecionada.

Tabela 2 – Parâmetros de calibração do modelo SMAP mensal.

Estação Fluviométrica	Período de Calibração	Parâmetros do Modelo SMAP – Mensal						R ²
		Sat	Pes	Crec	K	Tuin	Ebin	
Piancó	Jan/99 a dez/2004	539	3,9	0,0	3	19	0,0	0,81

Fonte: ANA (2016).

Sendo: Tuin – taxa de umidade inicial do solo (%); Ebin – escoamento de base inicial (m³/s); Sat – capacidade de saturação do solo (mm); Pes – taxa de geração de escoamento superficial; Crec – coeficiente de recarga do aquífero; K – taxa de depleção do nível da água do aquífero subterrâneo.

As vazões provenientes do rio do Peixe foram obtidas do posto fluviométrico Aparecida (37290000) para o período de estudo. As vazões do rio do Piancó foram estimadas em 500 L/s, de acordo com estudos da Nota Técnica N° 15/2019/COMAR/SRE.

3.3.1.3 Precipitação

Os dados de precipitação dos postos utilizados foram obtidos do banco de dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do estado da Paraíba (AESAs, 2020a) e do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016).

Para o cálculo da precipitação direta no reservatório, foram utilizados valores precipitados dos postos pluviométricos mais próximos dos reservatórios, conforme disposto na Tabela 3.

Tabela 3 – Postos pluviométricos mais próximos aos reservatórios.

Reservatórios	Posto pluviométrico	Precipitação média (mm)
São Gonçalo	São Gonçalo	914,4
Engenheiro Ávidos	São José de Piranhas	979,3

Fonte: ANA (2016).

Para a determinação das séries de vazões afluentes aos reservatórios e nós do sistema, utilizaram-se os postos pluviométricos, apresentados no

Quadro 1.

Quadro 1 – Postos pluviométricos utilizados para o cálculo da vazão afluyente.

Reservatórios	Posto Pluviométrico
São Gonçalo	São Gonçalo, Cajazeiras e Aguiar
Engenheiro Ávidos	São José de Piranhas, Bonito de Santa Fé, São Gonçalo, Aguiar e Serra Grande
Região do curso do rio não controlado	-
Região do Alto Curso do rio Piranhas	Sousa, São Gonçalo, Coremas, Pombal e Aguiar
Região do Médio Curso do rio Piranhas paraibano	Pombal, Condado, Malta, Vista Serrana, Paulista, Jericó, Catolé do Rocha, São Bento e Brejo do Cruz

3.3.1.4 Evaporação

Para a determinação da evaporação nos reservatórios foram utilizados os dados do vetor de evaporação, dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Evaporação média mensal (em “mm”) dos reservatórios do sistema.

Reservatórios	Vetor de Evaporação (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Gonçalo	182	127	106	105	134	150	189	231	247	259	241	229
Engenheiro Ávidos	173	122	102	102	129	145	184	224	243	252	231	221

Fonte: ANA (2017).

As informações de evapotranspiração de referência para a determinação das vazões afluentes foram retiradas do PRH-PPA (ANA, 2016), que apresenta o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith.

Para as áreas de estudo foi selecionada a estação climatológica de São Gonçalo por ser a mais representativa da região.

Os dados de evapotranspiração de referência constam da Tabela 5.

Tabela 5 – Evapotranspiração de referência média mensal, em “mm”.

Estação Climatológica	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Gonçalo	210	183	189	173	164	148	162	189	202	222	217	220

Fonte: ANA (2016).

3.3.1.5 Dados dos reservatórios estudados

Os dados das relações *cota-área-volume* dos reservatórios foram obtidos Nota Técnica Nº 11/2018/COMAR/SRE.

A Tabela 6 apresenta a capacidade máxima de armazenamento, volume máximo, volume morto e o volume inicial correspondente ao dia 01 de janeiro de 2020 dos reservatórios do sistema.

Tabela 6 – Dados volumétricos dos reservatórios.

Reservatório	Volume (hm ³)		
	Máximo ¹	Morto ¹	Inicial (jan/2020)
Engenheiro Ávidos	293,6	6,7	1.610
São Gonçalo	40,6	2,0	1.800

Fonte: ¹ ANA (2017); ² AESA (2020a).

Os vertedores dos reservatórios têm suas características, tais como: tipo, largura, cota da soleira e vazão máxima de projeto, expostas na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 – Atributos dos vertedores.

Reservatório	Vertedor			
	Tipo ¹	Largura ² (m)	Cota da soleira ¹ (m) ¹	Vazão máxima de projeto (m ³ /s)
São Gonçalo	Creager	230	247	1.800
Engenheiro Ávidos	Soleira espessa	160	317	1.610

Fonte: ¹ ANA (2017); ² SCIENTEC (1997).

As informações concernentes aos descarregadores de fundo (diâmetro, cota de entrada e vazão máxima de projeto) dos reservatórios estratégicos considerados constam na Tabela 8, seguinte.

Tabela 8 – Características dos descarregadores de fundo.

Reservatório	Descarregador de fundo		
	Diâmetro (m)	Cota de entrada (m)	Vazão máxima de projeto (m ³ /s)
São Gonçalo	2,60	234	50,9
Engenheiro Ávidos	1,20	295	14,1

Fonte: ANA (2017).

3.3.2 Concepção dos cenários

Para avaliar a capacidade de atendimentos das demandas hídricas do sistema foram propostos cenários operacionais, como descrito a seguir:

- Cenário C1 (situação atual) – será avaliado o atendimento das demandas atuais do sistema hídrico;
- Cenário C2: será avaliado um aumento ou decréscimo anual no valor das demandas das áreas difusas e do PISG.

3.3.3 Modelo de otimização multiobjetivo

Com o intuito de analisar a alocação ótima da água no sistema hídrico no cenários propostos foi utilizado o modelo de otimização multiobjetivo desenvolvido por Santos et al. (2011). O modelo destina-se a otimizar os múltiplos usos de um sistema de recursos hídricos, promovendo a alocação ótima dos recursos naturais existentes (água e terras aptas ao plantio) entre os múltiplos usos de um sistema de recursos hídricos, quando operado de forma integrada, via uma análise multiobjetivo.

O modelo é baseado em programação linear sucessiva para a busca da solução ótima. Para a viabilização da análise de variáveis não-lineares, artifícios de linearização foram implementados aos correspondentes processos, através do uso combinado da Linearização por Segmentos e da Programação Linear Sequencial. Por se tratar de otimização multiobjetivo, utiliza-se o Método das Ponderações, no qual cada função objetivo é normalizada, sendo atribuídos pesos para definir as prioridades de atendimento (SANTOS et al., 2011).

A seguir será descrita as principais equações do modelo usado na pesquisa.

3.3.3.1 Função Objetivo

O modelo desenvolvido por Santos et al. (2011) apresenta 5 (cinco) funções objetivo. Entretanto, nesse trabalho foram utilizadas apenas 2 (duas) dessas funções, as quais serão tratadas a seguir:

A Equação 1 representa a função objetivo destinada à minimização do déficit do atendimento das demandas nas tomadas d'água dos reservatórios e dos nós do sistema.

$$DTD_d = \sum_t \left(\frac{Dt_{d,t} - Qt_{d,t}}{Dt_{d,t}} \right)^2 \quad (1)$$

Sendo:

d – a d-ézima tomada d'água do sistema;

$Dt_{d,t}$ – a demanda requerida na tomada d'água d no mês t ;

$Qt_{d,t}$ – o volume mensal destinado ao atendimento da demanda na tomada d'água d no mês t ($Qt_{d,t} \leq Dt_{d,t}$).

A Equação 2 representa a função objetivo destinada a minimizar o déficit entre o volume de água do reservatório r no final do mês t ($VR_{r,t}$) e o volume meta estabelecido neste mês ($VR_{meta,r,t}$):

$$VM_r = \sum_t \left(\frac{VR_{meta,r,t} - VR_{r,t}}{VR_{meta,r,t}} \right)^2 \quad (2)$$

O modelo utiliza o Método das Ponderações para efetuar a análise multiobjetivo, sendo cada função objetivo, descrita anteriormente, normalizada. Logo, a função objetivo do modelo é dada pela Equação 3.

$$\min f o = \sum_d \omega_{1,d} \cdot DTD_d + \sum_r \omega_{2,r} \cdot VM_r \quad (3)$$

Sendo:

ω – o coeficiente de ponderação que mede a relativa importância ou prioridade de atendimento entre as funções objetivo.

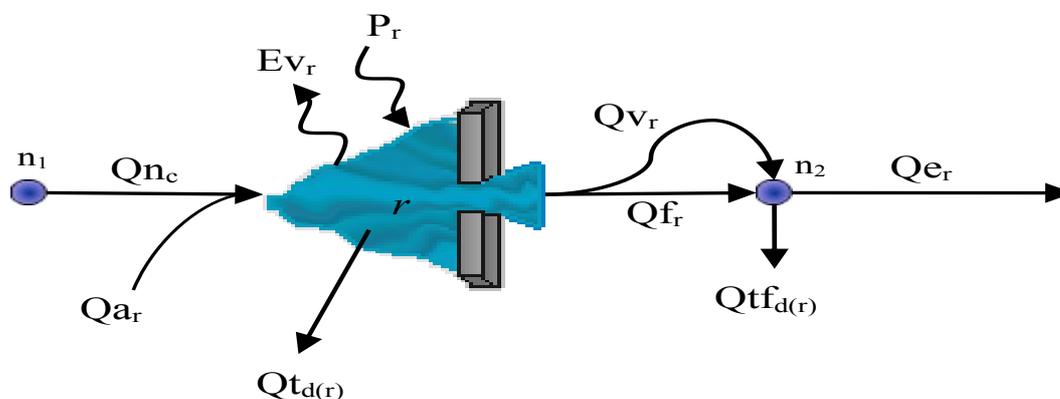
3.3.3.2 Restrições

As restrições do modelo, utilizadas neste trabalho, dizem respeito ao balanço de massa nos reservatórios e nós do sistema bem como aspectos técnicos e operacionais do sistema hídrico estudado.

Os reservatórios podem ser conectados a outros elementos do sistema como a nós, descargas de fundo, vertedouros e tomadas de água (Figura 10), tendo o balanço hídrico, baseado no princípio de conservação da massa, expressa pela Equação 4.

$$VR_{r,t} = VR_{r,t-1} + Qa_{r,t} - \sum_{d(r)} Qtr_{d(r),t} - Qf_{r,t} - Qtf_{d(r),t} - Qv_{r,t} + P_{r,t} - Ev_{r,t} + Qn_{c,t} \quad (4)$$

Figura 10 – Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo.



Fonte: Santos *et al.* (2011).

Sendo:

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

$VR_{r,t}$ – o volume do reservatório r no final do mês t ;

$VR_{r,t-1}$ – o volume do reservatório r no início do mês t ;

$Qa_{r,t}$ – a volume afluente ao reservatório r durante o mês t ;

$d(r)$ – o índice que representa a d -ésima tomada d'água do reservatório r ;

$Qt_{d(r),t}$ – o d -ésimo volume alocado para a tomada d'água do reservatório r no mês t ;

$Qtf_{d(r),t}$ – o d -ésimo volume alocado para a tomada d'água de fundo do reservatório r no mês t ;

$Qf_{r,t}$ – o volume liberado através da descarga de fundo do reservatório r durante o mês t ;

$Qv_{r,t}$ – o volume vertido do reservatório r durante o mês t ;

$P_{r,t}$ – o volume precipitado no reservatório r durante o mês t ;

$Ev_{r,t}$ – o volume evaporado no reservatório r durante o mês t ;

$Qn_{c,t}$ – o volume afluente ao reservatório r oriundo de contribuições da c -ésima calha (trecho) do rio a montante do reservatório r no mês t ;

$Qe_{r,t}$ – o volume de fluente liberado pelo reservatório r no mês t .

O volume precipitado e evaporado no reservatório r em cada mês t é dado pelas equações:

$$P_{r,t} = p_{r,t} \left(\frac{AR_{r,t} + AR_{r,t-1}}{2} \right) \quad (5)$$

$$E_{r,t} = e_{r,t} \left(\frac{AR_{r,t} + AR_{r,t-1}}{2} \right) \quad (6)$$

Sendo:

$p_{r,t}$ – a taxa de precipitação para o reservatório r no mês t;

$e_{r,t}$ – a taxa de evaporação para o reservatório r no mês t;

$AR_{r,t}$ – a área do espelho d'água do reservatório r no final do mês t;

$AR_{r,t-1}$ – a área do espelho d'água do reservatório r no início do mês t.

O volume a ser captado através das tomadas d'água está limitado pela sua capacidade máxima (Qt_{max_d}) e a cota de entrada do tubo da tomada d'água d no reservatório r ($Ht_{d,(r)}$), escrito matematicamente pela expressão:

$$0 \leq Qt_{d,t} \leq Qt_{max_d} \quad (7)$$

$$Qt_{d(r),t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq Ht_{d(r)} \quad (8)$$

Sendo:

$HR_{r,t}$ – a cota do nível d'água do reservatório r no mês t.

Os volumes extravasados através dos vertedouros são limitados de acordo com as equações abaixo:

$$0 \leq Qv_{r,t} \leq Qv_{max_r} \quad (9)$$

$$Qv_{r,t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq Hvert_r \quad (10)$$

Sendo:

Qv_{max_r} – o volume mensal máximo vertido que é projetado para o reservatório r;

$Hvert_r$ – representa a cota da soleira do vertedor do reservatório r.

O volume liberado através da descarga de fundo ($Q_{f,r,t}$) do reservatório r em cada mês t está limitado pela cota de entrada da tubulação de descarga de fundo (H_{fe_r}) e pelo volume máximo que pode ser aduzida pela descarga de fundo em cada mês t ($Q_{fmax,r,t}$), matematicamente temos:

$$0 \leq Q_{f,r,t} \leq Q_{fmax,r,t} \quad (11)$$

$$Q_{f,r,t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq H_{fe_r} \quad (12)$$

O volume máximo que pode ser aduzido pela descarga de fundo ($Q_{fmax,r,t}$) pode ser estimado pela Equação 13, referida pelo Departamento de águas e Energia Elétrica de São Paulo – DAEE (2005):

$$Q_{fmax,r,t} = C_{f_r} \cdot A_{f_r} \cdot \sqrt{2g(HR_{r,t} - H_{fs_r})} \quad (13)$$

Sendo:

C_{f_r} – o coeficiente de vazão de descarga de fundo do reservatório r ;

A_{f_r} – a área da seção transversal do tubo de descarga de fundo do reservatório r ;

H_{fs_r} – a cota de jusante da geratriz inferior do tubo de descarga de fundo do reservatório r .

Na operação do reservatório, tem-se um volume final (VR_t) e um volume inicial (VR_{t-1}) que resultarão em duas vazões máximas (Q_{fmax_t} e $Q_{fmax_{t-1}}$) que poderão ser aduzidas pela descarga de fundo para um mês t . Para minimizar esse problema utilizou-se média destas duas vazões.

O volume de água do reservatório r está limitado pela Equação 14:

$$VR_{m_r} \leq VR_{r,t} \leq VR_{cap_r} \quad (14)$$

Sendo:

VR_{m_r} – o volume morto (ou mínimo) do reservatório r ;

VR_{cap_r} – o volume máximo (ou capacidade) do reservatório r .

A sustentabilidade hídrica do sistema pode ser garantida fazendo-se que o volume de água do reservatório no último mês de estudo seja igual ou superior ao volume inicial estabelecido para o mesmo (CURI; CURI; OLIVEIRA, 2004).

Dentre os componentes do sistema hídrico estão as calhas dos rios cujas vazões podem estar limitadas por valores inferiores, indicando requerimentos de regularizações e de vazões ecológicas para saneamento do rio, ou superiores, para o controle de cheias, que podem ser descritas matematicamente por:

$$Q_{nmin,c,t} \leq Q_{n,c,t} \leq Q_{nmax,c,t} \quad (15)$$

Sendo $Q_{nmin,c,t}$ é a vazão mínima na c-ézima calha de rio no mês t; $Q_{nmax,c,t}$ é a vazão máxima na c-ézima calha de rio no mês t.

Além destas restrições, o modelo promove, ainda, o balanço hídrico em cada nó do sistema s, através da seguinte expressão:

$$\sum_e Q_{entra_{e,s,t}} = \sum_i Q_{entra_{i,s,t}} \quad (16)$$

Sendo $Q_{entra_{est}}$ representa a e-ézima vazão de entrada no nó s, no mês t; $Q_{sai_{ist}}$ representa a i-ézima vazão de saída do nó s, no mês t.

As perdas por evaporação e a infiltração nos segmentos das calhas dos rios são avaliadas através de coeficientes de perda, que devem ser especificados para os segmentos e representam as frações dos fluxos que seriam perdidos durante o percurso nos segmentos das calhas dos rios.

3.3.3.3 Processo iterativo de otimização e análise de convergência

Segundo Santos et al. (2011), o Artificio de Linearização por Segmentos garante para a minimização de uma função convexa que os trechos segmentados da variável de decisão serão “percorridos” em uma forma sequencial, do primeiro ao último, atingindo a cada trecho percorrido o seu valor máximo.

Porém, observou-se que, em certos casos, isso não ocorre. Pelo motivo do caráter multiobjetivo idealizado no próprio modelo, em que o atendimento de uma

determinada demanda do sistema pode ter maior prioridade do que o volume meta do reservatório.

Para contornar tal problema é utilizado um procedimento iterativo no uso da PL, denominado Programação Linear Sequencial (ou Sucessiva), em que a cada iteração os trechos segmentados do volume do reservatório são ajustados de modo a resultarem em um volume de água armazenado de forma correta. Tem-se, na maioria das vezes, que logo na primeira iteração os valores de cada trecho segmentado podem estar corretos, indicando assim a solução ótima do problema.

Entretanto, quando isso não ocorre, para uma boa aceitação dos resultados, além da verificação dos valores dos trechos segmentados, é analisado o processo de convergência da função objetivo f_0 , que é avaliado através do cálculo do erro relativo (erro_{f_0}), dado por:

$$\text{erro}_{f_0} = \left| \frac{f_{0l} - f_{0l-1}}{f_{0l}} \right| \leq \text{tol} \quad (17)$$

Sendo:

f_{0l} – o valor da função objetivo para a l -ésima iteração ($l \geq 2$);

tol – o nível de tolerância especificado para o sistema a ser otimizado.

3.3.4 Critérios operacionais

Para a operação do sistema hídrico, observam-se os seguintes pressupostos:

- O período de estudo corresponde a 20 (vinte) anos, iniciando o processo de otimização no mês de janeiro.
- As séries de precipitação e vazão compreenderam ao período de janeiro de 2000 a dezembro de 2019 (de 2004 a 2009 são considerados anos com pluviometria acima da média e de 2012 a 2017 anos com pluviometria abaixo da média).
- O volume de água inicial dos reservatórios foi considerado igual ao do dia 01 de janeiro de 2020;
- O volume de água do reservatório, ao final do período de estudo de otimização, deve ser maior ou igual ao volume inicial, garantindo a sustentabilidade hídrica das atividades econômicas;

- O volume meta do reservatório Engenheiro Ávidos foi considerado igual 2/3 de sua capacidade segundo informações de técnicos do DNOCS. Para o reservatório São Gonçalo foi considerado igual a sua capacidade;
- As capacidades das tomadas d'água destinada ao abastecimento urbano foram consideradas iguais as suas respectivas demandas;
- As perdas hídricas difusas nos leitos dos rios foram consideradas como sendo 5% da vazão transiente no trecho do rio.
- As prioridades de atendimento foram: 1ª atendimento: demanda de abastecimento urbano das adutoras ($\omega = 100$); 2º atendimento: demandas das áreas difusas e do PISG ($\omega = 10$); 3º atendimento: volume meta dos reservatórios ($\omega = 1$).

3.3.5 Indicadores de desempenho e eficiência

De acordo com Farias et al. (2017) os estudos de recursos hídricos usam uma grande quantidade de dados, o que tornam as propostas de gerenciamento uma tarefa muito difícil. Para isso é necessário criar parâmetros de avaliação que retenham apenas os dados essenciais, chamados de indicadores de desempenho de atendimento das demandas e os índices de eficiências de bacias hidrográficas.

Tais índices e indicadores, segundo Farias et al. (2017), são bastante utilizados para comparar cenários de demanda hídrica em diferentes formas de distribuição de água. Por eles, é possível determinar que cenários obtiveram os melhores resultados quanto à alocação ótima dos recursos hídricos, possibilitando o dimensionamento dos rendimentos hídricos de cada cenário.

3.3.5.1 Indicadores de desempenho de atendimento das demandas

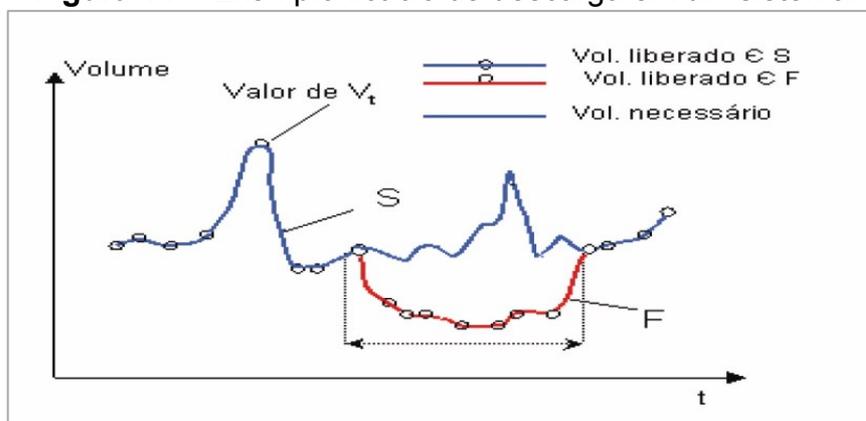
A operação de sistemas de recursos hídricos compostos por reservatórios de abastecimento de água associada à incerteza no que concerne às condições hidroclimáticas a que o mesmo está sujeito podem levar à ocorrência de falhas no atendimento às demandas hídricas. A dimensão das mencionadas falhas pode ser estimada por indicadores de desempenho.

Celeste (2006) afirma que as falhas decorrentes da operação de sistemas de reservatórios são praticamente inevitáveis durante períodos hidrológicos críticos. As falhas, vistas sob vários aspectos, podem ser representadas pelos seguintes

indicadores de desempenho propostos por Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982): confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Esses três indicadores, juntos, podem ser usados para caracterizar o “risco” a que estão sujeitos a operação e o planejamento de um dado sistema hídrico.

Nesse contexto, considere V_t como sendo os possíveis valores do volume liberado pelo sistema no tempo t , os quais podem estar contidos em dois conjuntos: S - o conjunto de todos os valores satisfatórios, isto é, quando o volume liberado pelo sistema é igual ao volume necessário para atender à demanda; e F - o conjunto de todos os valores insatisfatórios, quando o volume liberado é menor do que o volume necessário para atender à demanda. A Figura 11 ilustra o raciocínio descrito.

Figura 11 – Exemplo fictício de descarga em um sistema.



Fonte: Celeste (2006).

A confiabilidade (Conf.) é a capacidade de o sistema hídrico operar sem falhas no atendimento às demandas por determinado período de tempo, ou seja, indica a probabilidade de a demanda ser atendida sem falha, descrita matematicamente como:

$$\text{Conf} = \frac{N_s}{N} \quad (18)$$

Sendo:

N_s – o número de períodos de tempo com sucessos;

N – o número de períodos de tempo considerados.

Constitui-se numa ferramenta de auxílio aos gestores de recursos hídricos que apresenta a eficiência no atendimento aos requerimentos hídricos de um sistema.

A resiliência (Res.), muitas vezes chamada de elasticidade, descreve quão rapidamente o sistema retorna de uma falha caso esta tenha ocorrido, ou seja, indica

a probabilidade de uma demanda recuperar-se de uma falha, caso ela ocorra. Como se vê ainda na Figura 11, pode-se entendê-la como a relação entre probabilidade de $V_t \in F$ e $V_{t+1} \in S$ e a probabilidade de $V_t \in F$, ou seja:

$$\text{Res} = \text{Prob}\{V_{t+1} \in S / V_t \in F\} = \frac{\text{Prob}(V_t \in F \cap V_{t+1} \in S)}{\text{Prob}(V_t \in F)} \quad (19)$$

Em alguns casos, um sistema que apresenta muitas falhas, mas que se recupera rapidamente é mais preferível a aquele que apresente poucas falhas e se recupere lentamente (FARIAS et al., 2017).

A vulnerabilidade (Vul.) indica quão severa é a falha, caso ocorra, e pode ser definida como a média do percentual de déficit hídrico do conjunto de todos os valores insatisfatórios (conjunto F).

Matematicamente, fica definida como:

$$\text{Vul} = \frac{1}{n_f} \sum \left| \frac{V_t - V_d}{V_d} \right| \quad (20)$$

Sendo:

n_f – o número de eventos de falha;

V_d – a demanda necessária no tempo t ;

V_t – corresponde à vazão efetivamente disponibilizada no tempo t .

3.3.5.2 Índices de eficiências de bacias hidrográficas

Os índices de eficiência associados ao sistema utilizados foram baseados no trabalho de Vieira (1996) adaptado por Farias et al. (2017), são eles:

- Indicador de ativação da potencialidade (IAP) – relação entre disponibilidade e potencialidade, indica a porcentagem de água utilizada em relação a toda a água disponível na bacia.

$$\text{IAP} = \frac{\text{Disponibilidade}}{\text{Potencialidade}} \quad (21)$$

Geralmente, áreas de captação com IAP inferior a 0,6 apresentam possibilidades de aumento da disponibilidade no seu espaço geográfico. Bacias hidrográficas com um IAP superior a 0,6, em que as demandas apresentam-se reprimidas por incapacidade de aumentar a disponibilidade, podem ser supridas através de aportes advindos de transposições de água a partir de outras bacias (VIEIRA, 1996).

- Indicador de utilização da disponibilidade (IUD) – relação entre demanda e disponibilidade, indica o percentual de água disponível destinado a atender às demandas.

$$IUD = \frac{\text{Demanda}}{\text{Disponibilidade}} \quad (22)$$

Valores acima de uma unidade são preocupantes ao atendimento das demandas, pois em anos de baixa pluviosidade haverá conflitos pelo uso da água (VIEIRA, 1996).

- Indicador de utilização da potencialidade (IUP) – razão entre demanda e potencialidade, indica a quantidade de água (vazão total) utilizada para atendimento das demandas.

$$IUP = \frac{\text{Demanda}}{\text{Potencialidade}} \quad (23)$$

A potencialidade de uma bacia hidrográfica representa a quantificação dos recursos hídricos sem a intervenção humana, em seu estado natural. Vieira (1996) a representa pelo escoamento natural médio, soma do escoamento superficial direto com o escoamento de base. Segundo Farias et al. (2017), a potencialidade é obtida pela soma dos influxos mais a precipitação direta nos reservatórios.

A disponibilidade hídrica é a parcela da potencialidade ativada pelo homem. Suas variações dependem dos fatores naturais e daqueles ligados ao destino da água e seu aproveitamento. A disponibilidade é inferior à potencialidade (CELESTE, 2006).

Farias et al. (2017) explanam que a disponibilidade é igual à soma das entradas mais a precipitação direta menos as perdas (volume de água perdido em trânsito no leito do rio, evaporação nos reservatórios e volumes vertidos a jusante do sistema). E as demandas são os usos consuntivos (abastecimento humano, irrigação, entre outros).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

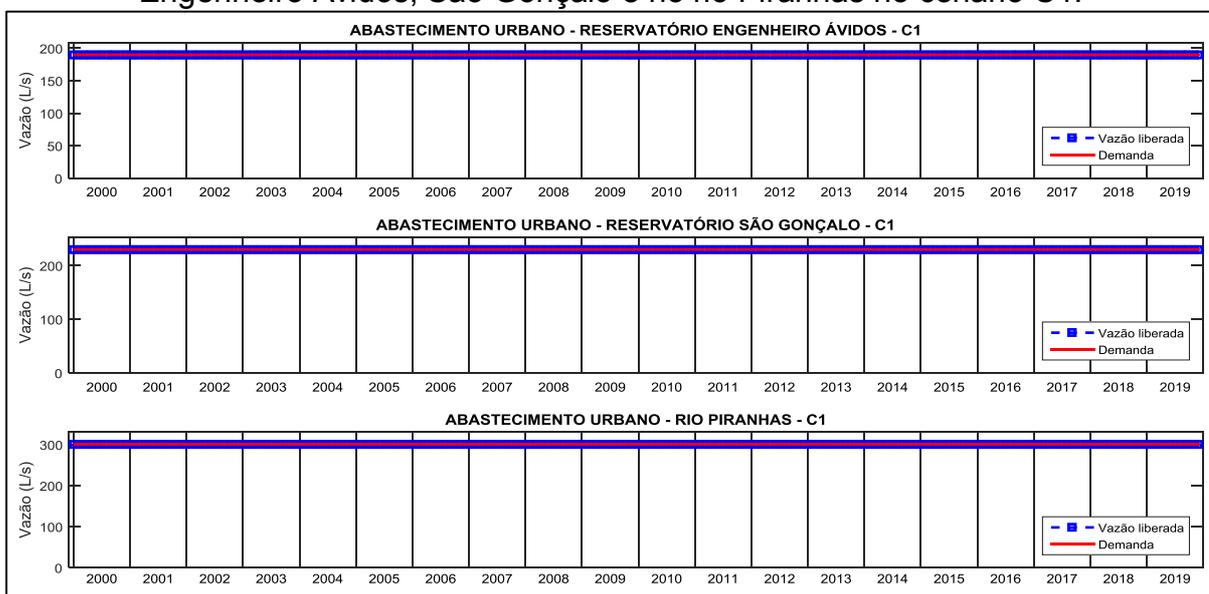
4.1 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

4.1.1 Cenário C1

A premissa desse cenário é o diagnóstico de atendimento às demandas iniciais previstas para o sistema hídrico. Para tanto é necessário considerar a indicação da vazão transposta firme em $2,7\text{m}^3/\text{s}$, sendo $1,0\text{ m}^3/\text{s}$ destinado a aumentar a disponibilidade hídrica para suprir os usos no estado da Paraíba e outros $1,7\text{ m}^3/\text{s}$ alocados para a mesma finalidade no estado do Rio Grande do Norte, conforme está disposto no Plano de Recursos Hídricos do Rio Piancó-Piranhas-Açu.

Observa-se que ao longo de todo o período evidenciado na pesquisa não houve falhas de atendimento das demandas hídricas de abastecimento urbano no cenário C1, como se observa na Figura 12.

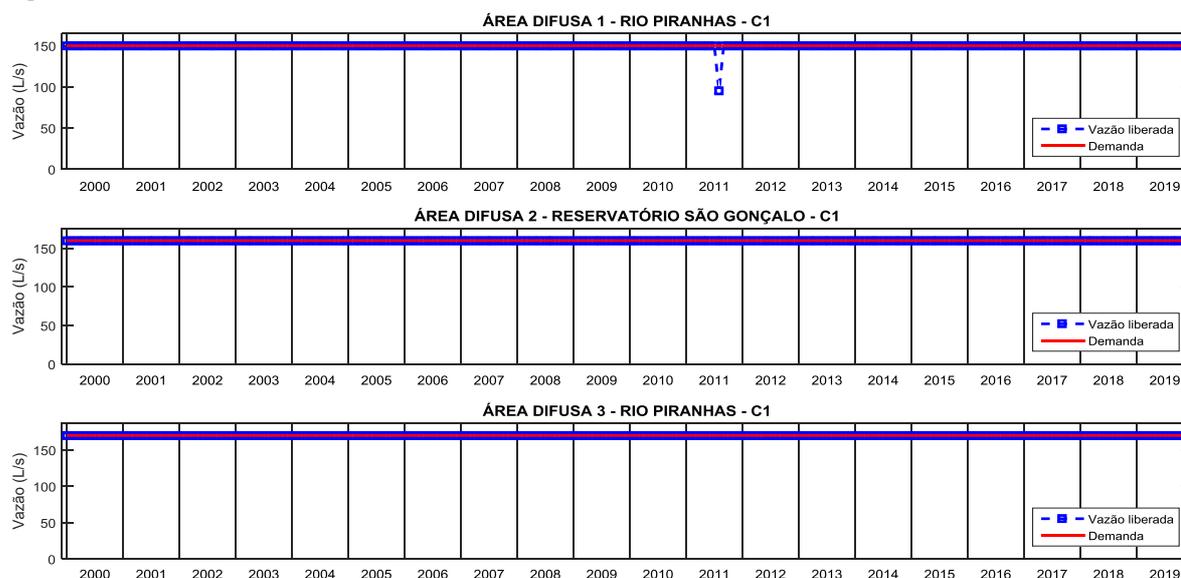
Figura 12 – Atendimento das demandas de abastecimento urbano dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e no rio Piranhas no cenário C1.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Na área difusa 1 ocorreu uma falha no atendimento de sua demanda hídrica no ano de 2011, enquanto nas áreas difusas 2 e 3 não ocorreram falhas no atendimento.

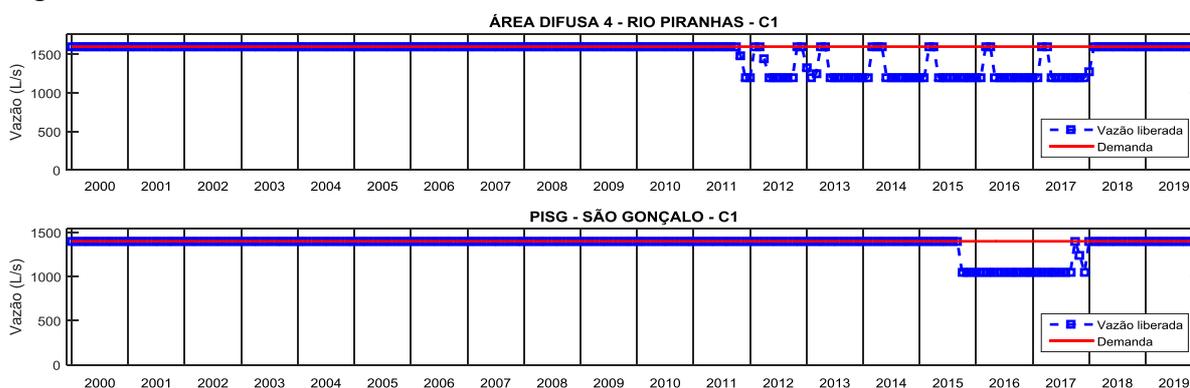
Figura 13 – Atendimento das demandas hídricas das áreas difusas 1, 2 e 3 no cenário C1.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

A Figura 14 apresenta o atendimento das demandas hídricas na área difusa 4 e no PISG.

Figura 14 – Atendimento das demandas hídricas da área difusa 4 e do PISG no cenário C1.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Observa-se que houve repetidas falhas no atendimento da demanda da área difusa 4, situada na região do Médio Piranhas Paraibano e que representa demandas hídricas ao longo do rio Piranhas, da confluência com rio Piancó até a divisa com o estado do Rio Grande do Norte. Verifica-se que as falhas se relacionam diretamente com o recente período seco vivenciado na região entre 2012 a 2018. Logo, mesmo com a vazão exógena do PISF, não será possível atender sua demanda hídrica de cerca de 1.600 L/s.

Com relação ao atendimento da demanda hídrica do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), observa-se, também, falhas no atendimento de sua demanda, da metade do ano de 2015 até o final de 2017 (intervalo inserido no regime seco). Assim,

mesmo com a vazão exógena do PISF, não será possível atender sua demanda hídrica de cerca de 1.400 L/s.

Na Tabela 9 encontram-se os valores dos indicadores de desempenho de atendimento das demandas, propostos por Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982), considerando o Cenário C1.

Tabela 9 – Valores dos Indicadores de desempenho de atendimento das demandas no Cenário C1.

DEMANDAS DO SISTEMA	INDICADORES DE DESEMPENHO		
	CONF.*	RES.**	VUL.***
Abast. Engenheiro Ávidos	1,00	-	-
Abast. São Gonçalo	1,00	-	-
Abast. Rio Piranhas	1,00	-	-
PISG	0,89	0,08	0,24
Área difusa 1	0,996	1,00	0,37
Área difusa 2	1,0	-	-
Área difusa 3	1,0	-	-
Área difusa 4	0,75	0,13	0,24

* CONF. – Confiabilidade; ** RES – Resiliência; *** VUL. – Vulnerabilidade.

Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

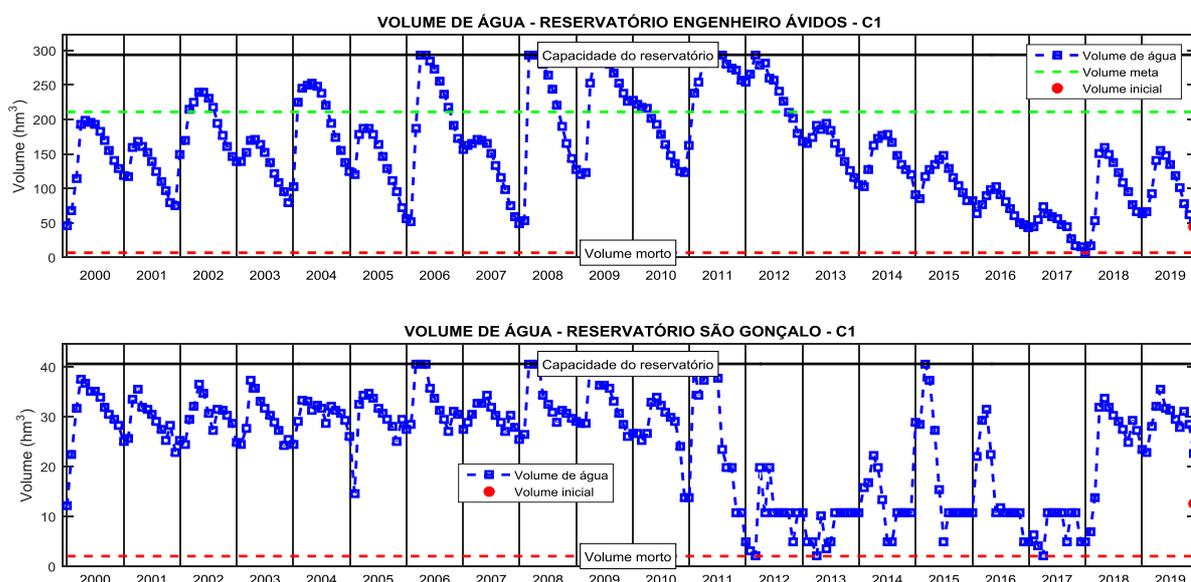
Verifica-se que a confiabilidade (CONF) de atendimento das demandas do sistema foram superiores ou iguais a 75%. Entretanto, a resiliência (RES) do atendimento do PISG e da Área difusa 4 ficaram abaixo de 15%, ou seja, caso ocorra uma falha de atendimento no PISG serão necessários, em média, 12,5 meses para que a sua demanda hídrica ser atendida integralmente novamente; enquanto na Área Difusa 4 serão necessários, em média, de 7,7 meses. A vulnerabilidade (VUL) para atendimento destas demandas foi de 24%, ou seja, caso ocorra um evento de falha no PISG ou na Área Difusa 4, em média, apenas 76% da demanda hídrica será disponibilizada.

A situação constatada considerando este cenário é diferente da verificada no sistema hídrico, que desde janeiro de 2013 tem proibida a retirada de água do reservatório São Gonçalo para atendimento das demandas hídricas (para as culturas agrícolas) do PISG. Desde 2015 o PISG está desativado devido à seca que ocorreu na região.

Esse fato é também observado no trecho do rio Piranhas-Açu, compreendido entre a confluência do rio Piancó até o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (trecho onde se encontra a Área difusa 4), no qual desde julho de 2015 está proibida as captações de água superficial para fins de irrigação e aquicultura.

A Figura 15 mostra o comportamento do volume de água dos reservatórios no do período de estudo no cenário C1.

Figura 15 – Volumes de água armazenados nos reservatórios para o cenário 1.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Observa-se, no período entre 2000 e 2011, que o comportamento do volume de água dos reservatórios é bem característico, aumentando no período chuvoso (janeiro a abril) e diminuindo no período seco (julho a dezembro).

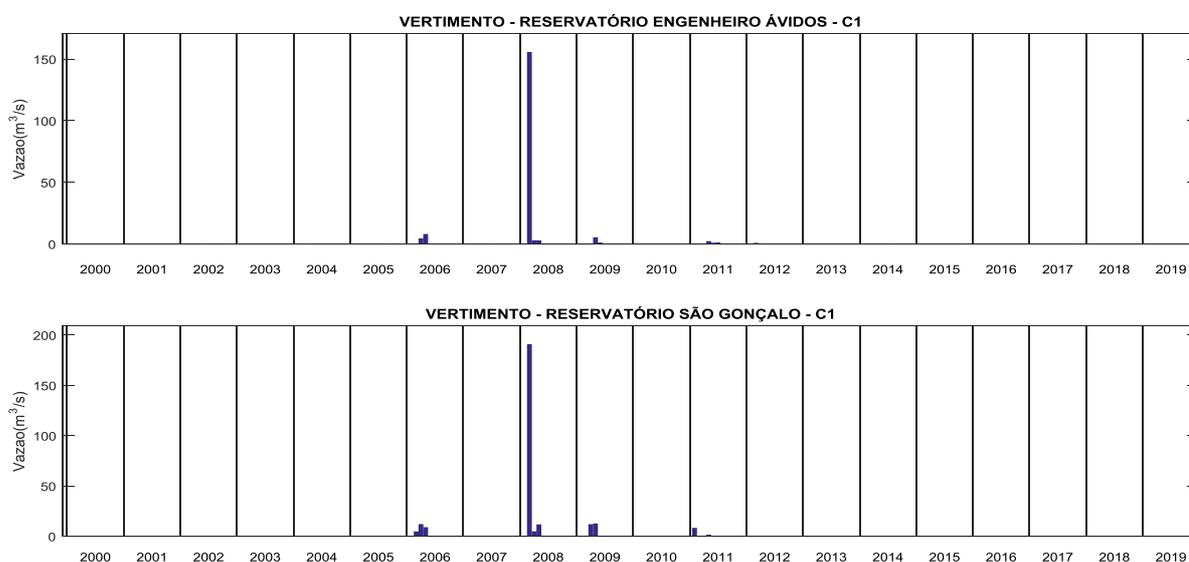
Particularmente, o reservatório Engenheiro Ávidos atingiu a sua capacidade de armazenamento em cinco oportunidades, chamando atenção para o ano de 2012 (última vez que o reservatório atingiu sua capacidade de armazenamento), sendo primordial para enfrentar a seca até o ano de 2017. Este último ano é o período mais crítico, em que se atingiu o volume morto, precisamente em dezembro de 2017, elevando-se nos meses posteriores (2018-2019). Fato diferente do ocorrido, no qual de maio de 2015 a março de 2018 o volume de água do reservatório esteve inferior a 10% de sua capacidade de armazenamento.

Com relação ao reservatório de São Gonçalo, no C1, tem-se que até o ano de 2010 o volume de água do açude esteve praticamente acima de 50% de sua capacidade de armazenamento. Entre 2012 e 2017 (período da seca na região), o volume de água do reservatório ficou praticamente abaixo de 25% da capacidade de armazenamento, sendo que nos anos de 2012, 2013 e 2017 atingiu o volume morto; apesar de que no ano de 2015 atingiu a sua capacidade de armazenamento. Tal

variabilidade deve-se ao fato da grande quantidade de demanda associada ao reservatório, bem como a sua baixa capacidade de armazenamento ($40,6 \text{ hm}^3$).

Com relação aos vertimentos (Figura 16), é possível identificar que tanto o reservatório Engenheiro Ávidos quanto o reservatório São Gonçalo apresentaram vertimentos em épocas semelhantes. Tais eventos ocorreram para ambos em 2006, 2008, 2009 e 2011, com destaque positivo para o ano de 2008 (período consagrado por grande pluviosidade na região).

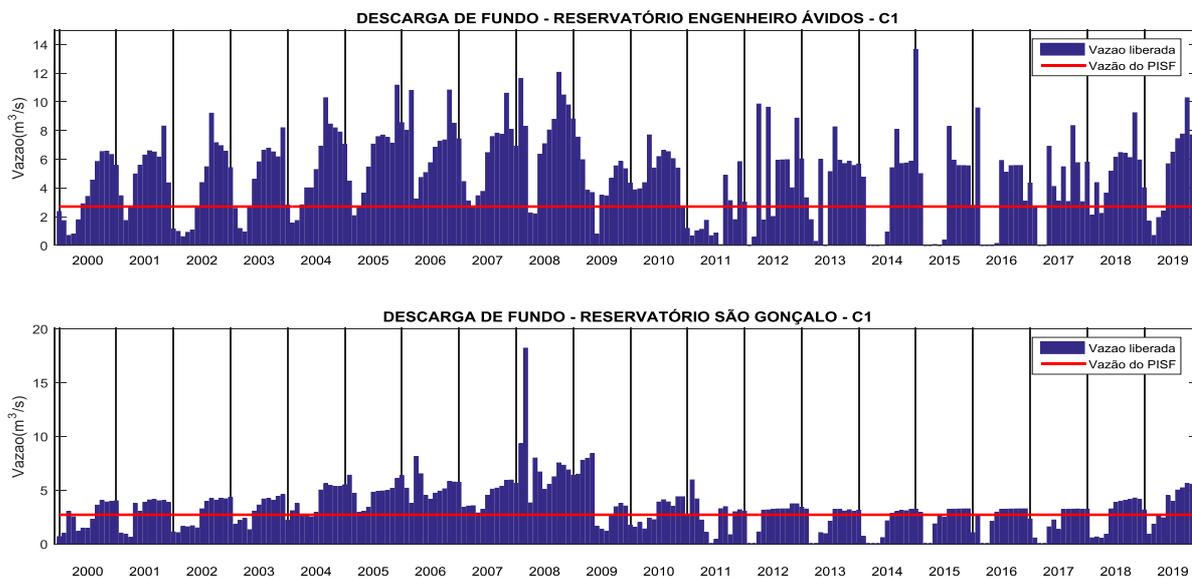
Figura 16 – Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C1.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

As vazões liberadas por descarga de fundo pelos reservatórios do sistema no Cenário C1 estão dispostas na figura 17.

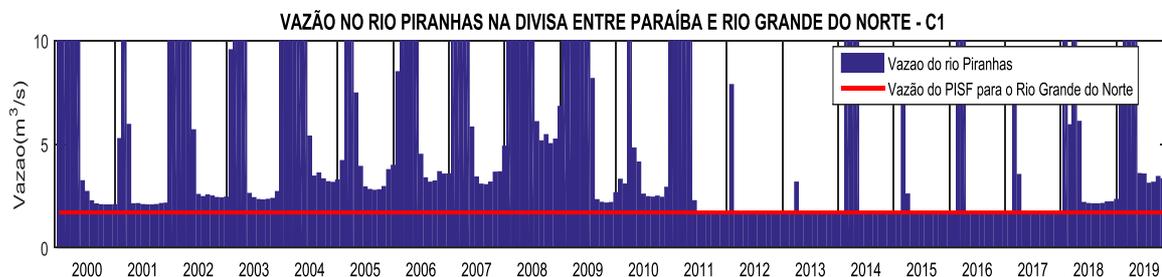
Figura 17 – Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C1.



Observa-se que as vazões liberadas por descarga de fundo pelo reservatório Engenheiro Ávidos foram, em média, maiores que as vazões de entrada do PISF (2,7 m³/s). Porém, em alguns meses, a vazão liberada é menor ou praticamente inexistente, principalmente na época que preceitua a quadra chuvosa (janeiro-abril), fazendo que uma quantidade maior de água ficasse armazenada nos reservatórios. No tocante ao reservatório de São Gonçalo, o comportamento é similar, com a diferença de que no período de 2012 a 2017 as vazões liberadas são bem próximas a vazão de entrada do PISF.

A próxima Figura apresenta a vazão no rio Piranhas na divisa entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, no cenário C1.

Figura 18 – Vazão no rio Piranhas na divisa entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte no cenário C1.



OBS: tem-se que a vazão excedente a 1,7 m³/s na divisa PB/RN é considerada perda para o sistema (perda hídrica gerencial) pois não foi utilizada.

Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Destaca-se que a vazão do rio Piranhas na divisa entre PB/RN nos anos de 2000-2011 e 2018-2019 são superiores a vazão do PISF estabelecida para o Rio

Grande do Norte (1,7 m³/s), segundo o Plano de Recursos Hídricos do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016).

As perdas hídricas do sistema, considerando o Cenário C1, estão descritas na tabela a seguir, compostas por perdas hídricas físicas (evaporação nos reservatórios e perdas hídricas difusas ao longo do leito dos rios) e gerenciais (vazão acima de 1,7 m³/s no rio Piranhas na divisa entre PB/RN).

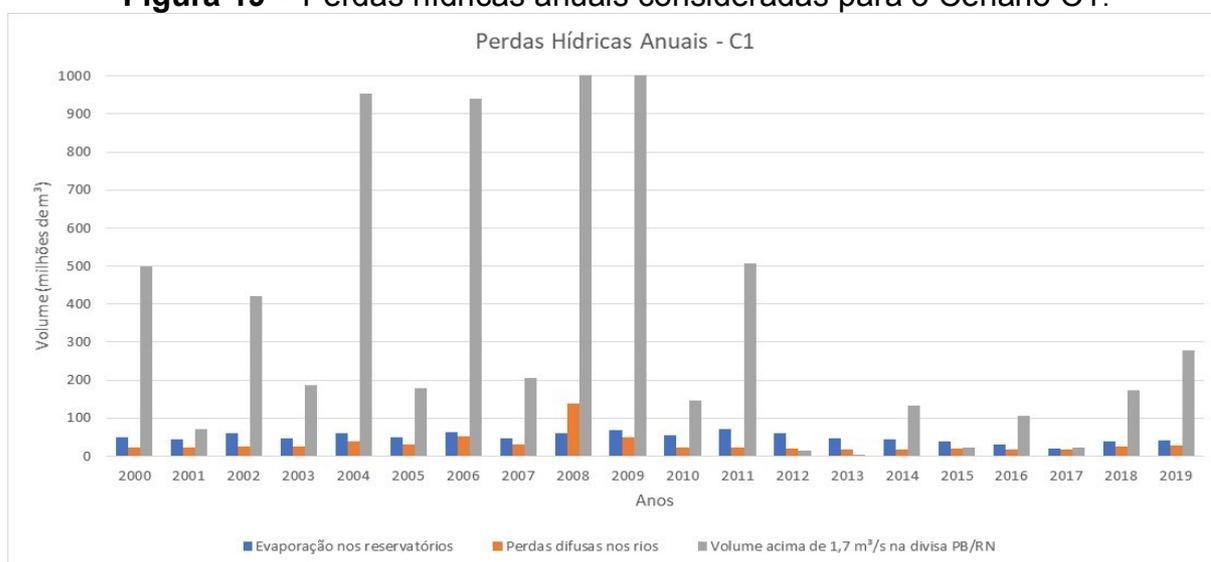
Tabela 10 – Perdas hídricas do sistema associada ao Cenário C1.

PERDAS HÍDRICAS	EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS	DIFUSAS AO LONGO DO LEITO DO RIO	VAZÃO ACIMA DE 1,7 m ³ /S NA DIVISA PB/RN	TOTAL
MÉDIA ANUAL (hm ³)	50,0	32,4	468,2	550,5

Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Tem-se que 85% das perdas hídricas do sistema é decorrente da vazão excedente de 1,7m³/s no rio Piranhas na divisa entre PB/RN. Observa-se na Figura 19 que até 2011 as perdas hídricas na divisa são bem maiores, com destaque para 2008 e 2009. Apenas nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2017 as perdas hídricas físicas são maiores que as perdas gerenciais.

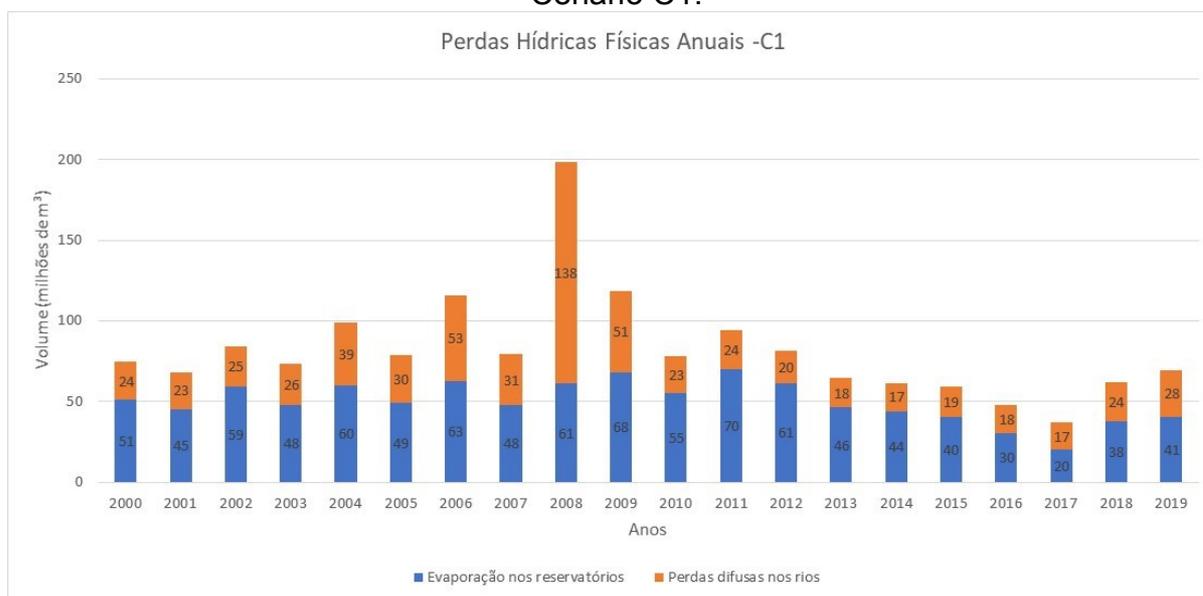
Figura 19 – Perdas hídricas anuais consideradas para o Cenário C1.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Apenas em 2008 as perdas hídricas difusas no rio superaram as perdas por evaporação nos reservatórios, excepcionalmente, pelo motivo de precipitação elevada e acima dos padrões para o período, como destacado na Figura 20.

Figura 20 – Perdas por evaporação nos reservatórios e difusas nos rios para o Cenário C1.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Em média, as perdas por evaporação nos reservatórios representam cerca de 60% das perdas hídricas físicas.

A Tabela 11 demonstra os Índices de Eficiência de Bacias Hidrográficas propostos por Vieira (1996) e adaptados por Farias et al. (2017). O Índice de Ativação da Potencialidade (IAP) indica que apenas 29% de toda água gerada pelo sistema (vazões afluentes, vazão do PISF e precipitação nos reservatórios) se encontra disponível para utilização. Assim, segundo Vieira (1996), há possibilidade de aumento da disponibilidade no sistema com a redução das perdas hídricas, já que há estimativa de que 71% de toda a potencialidade preexistente foi perdida.

Quanto ao Índice de Utilização da Disponibilidade (IUD), vê-se que 81% dos recursos hídricos atualmente disponíveis são utilizados para o atendimento das demandas. E o Índice de Utilização da Potencialidade (IUP) retrata que se utiliza apenas 23% do potencial hídrico do sistema. Ambos os indicadores apontam que há possibilidade para aumento dessas demandas no sistema.

Tabela 11 – Índices de eficiências de bacias hidrográficas para o Cenário C1.

ÍNDICES DO SISTEMA	IAP	IUD	IUP	PERDAS
	0,29	0,81	0,23	0,71

Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

4.1.2 Cenário C2

Conforme observado nos resultados do Cenário C1, em média, cerca de 71% de toda água gerada no sistema foi perdida. Desse modo, o Cenário C2 foi fundamentado na possibilidade do aumento anual, em até 100%, no valor das demandas das áreas difusas e do PISG, como forma de diminuir as perdas hídricas e avaliar a capacidade de ampliação das demandas do sistema.

Sob esse aspecto, a Tabela 12 induz o percentual de aumento da demanda das áreas difusas e do PISG com base no valor estabelecido no cenário C1 para cada ano analisado.

Tabela 12 – Aumento de demandas estabelecidas para o Cenário C2.

TAXA DE CRESCIMENTO	ÁREA DIFUSA 1	ÁREA DIFUSA 2	ÁREA DIFUSA 3	ÁREA DIFUSA 4	PISG
2000	100%	100%	100%	62%	50%
2001	100%	100%	100%	50%	50%
2002	100%	100%	100%	65%	50%
2003	100%	100%	100%	50%	50%
2004	100%	100%	100%	100%	51%
2005	100%	100%	100%	50%	64%
2006	100%	100%	100%	100%	100%
2007	100%	100%	100%	100%	100%
2008	100%	100%	100%	100%	100%
2009	100%	100%	100%	100%	73%
2010	100%	100%	100%	50%	76%
2011	100%	100%	100%	100%	100%
2012	100%	100%	100%	-40%	100%
2013	100%	100%	100%	-49%	-49%
2014	100%	100%	100%	-49%	-41%
2015	100%	100%	90%	-49%	-49%
2016	-15%	-15%	-15%	-49%	-49%
2017	-15%	-15%	-15%	-49%	-49%
2018	70%	-15%	-15%	-49%	-49%
2019	100%	100%	100%	100%	100%
Média	87%	83%	82%	35%	39%
Acréscimo médio	98%	100%	99%	79%	76%
Redução média	-15%	-15%	-15%	-48%	-48%

Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Observa-se que, em termos médios, há possibilidade de aumentar os valores das demandas hídricas do sistema. Entretanto, dependendo do regime pluviométrico, tais acréscimos variam (principalmente no PISG e na área difusa 4) e, em alguns anos (período da seca), será necessário reduzir os valores de demandas hídricas.

Considerando o regime pluviométrico do ano de 2000 a 2011 (anos considerados com pluviosidade acima ou próximos da média histórica), há possibilidade de um aumento de 100% do valor estabelecido para as demandas

hídricas no cenário C1 nas áreas difusas 1, 2 e 3, e entre 50% e 100% na área difusa 4 e no PISG. Vale ressaltar que o valor das demandas hídricas do PISG e da área difusa 4 são cerca de 10 vezes maiores que as demandas das áreas difusas 1, 2 e 3. Contudo, nos anos de 2013 a 2017 (período da seca) têm-se que as demandas hídricas da área difusa 4 e do PISG obtiveram uma redução média de cerca 50% no valor de suas demandas hídricas. Nas áreas difusas 1, 2 e 3 a redução foi de cerca 15% no valor de suas demandas hídricas, para os anos de 2016 e 2017. Vale destacar que no ano de 2019 todas as demandas hídricas obtiveram um aumento de 100%, evidenciando que em anos de pluviometria próximo a média histórica é possível dobrar os valores das demandas hídricas do sistema.

Ao analisar os indicadores de desempenho (Tabela 13) propostos por Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982) tem-se que as demandas hídricas de abastecimento urbano não obtiveram nenhuma falha em seu atendimento, mesmo com o aumento do valor das demandas das áreas difusas e do PISG.

Tabela 13 – Valores dos Indicadores de desempenho de atendimento das demandas no Cenário C2.

DEMANDAS DO SISTEMA	INDICADORES DE DESEMPENHO		
	CONF.	RES.	VUL.
Abast. Engenheiro Ávidos	1,00	-	-
Abast. São Gonçalo	1,00	-	-
Abast. Rio Piranhas	1,00	-	-
PISG	0,70	0,01	0,48
Área difusa 1	0,90	0,04	0,15
Área difusa 2	0,85	0,03	0,15
Área difusa 3	0,85	0,03	0,15
Área difusa 4	0,65	0,01	0,48

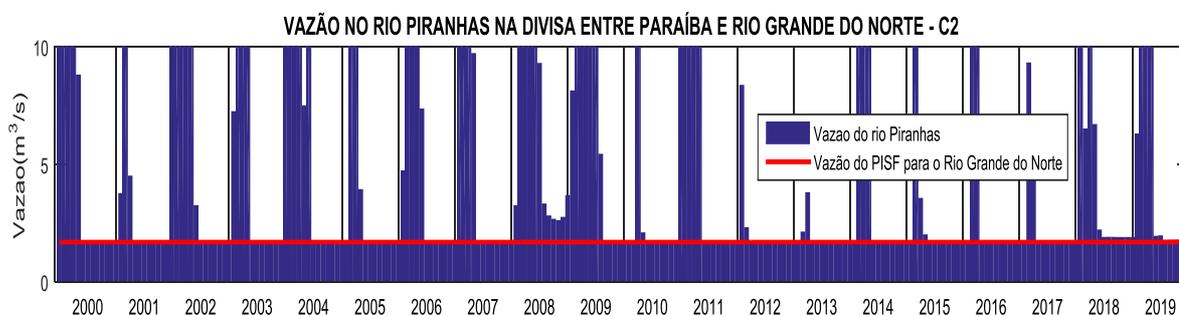
Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Todavia, observou-se que as demandas hídricas do PISG e das áreas difusas apresentaram uma diminuição nos valores de confiabilidade (CONF) e resiliência (RES) e um aumento da vulnerabilidade (VUL), quando comparados com aqueles obtidos no Cenário C1. Ou seja, o aumento no valor das demandas hídricas das áreas difusas e do PISG implicou, no período da seca (período no qual ocorreram as reduções), em uma menor vazão destinada ao atendimento dessas demandas hídricas e em um maior período de racionamento.

A Figura 21 apresenta a vazão no rio Piranhas na divisa entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C2. Observa-se que houve uma diminuição na vazão excedente (vazão acima dos 1,7 m³/s destinado para atendimento das demandas do estado do Rio Grande do Norte), principalmente no 2º semestre.

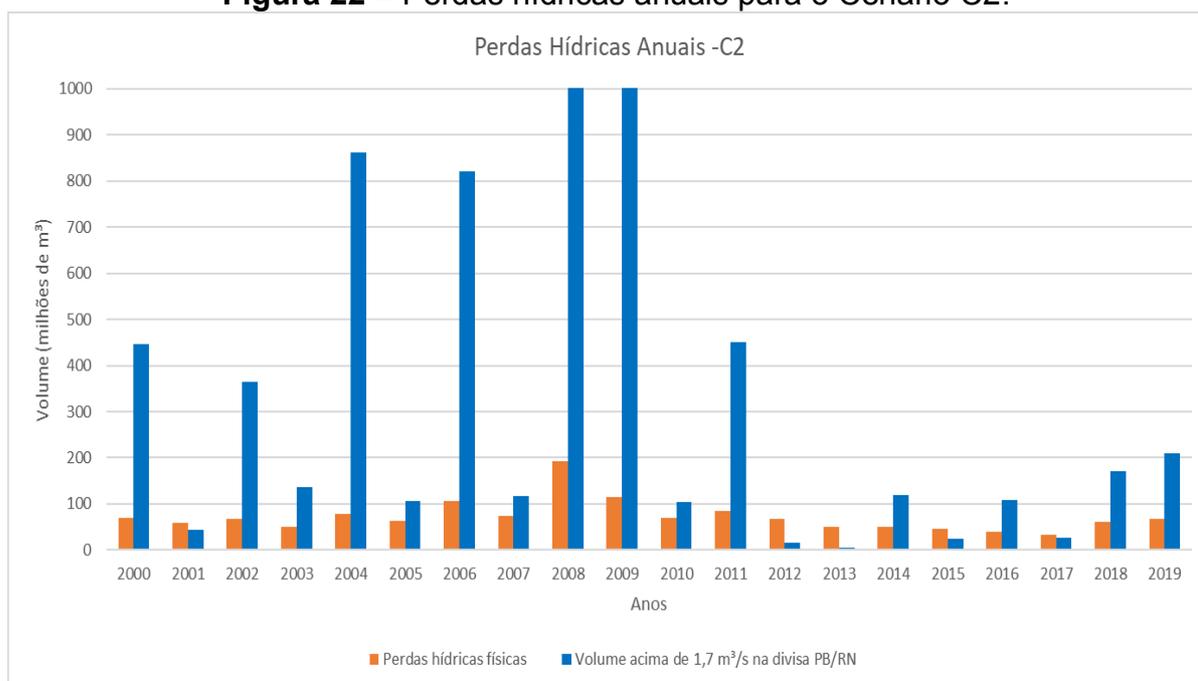
Entretanto, ainda se observa, no 1º semestre, valores de vazão acima da vazão destinada.

Figura 21 – Vazão no rio Piranhas na divisa entre os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte no cenário C2.



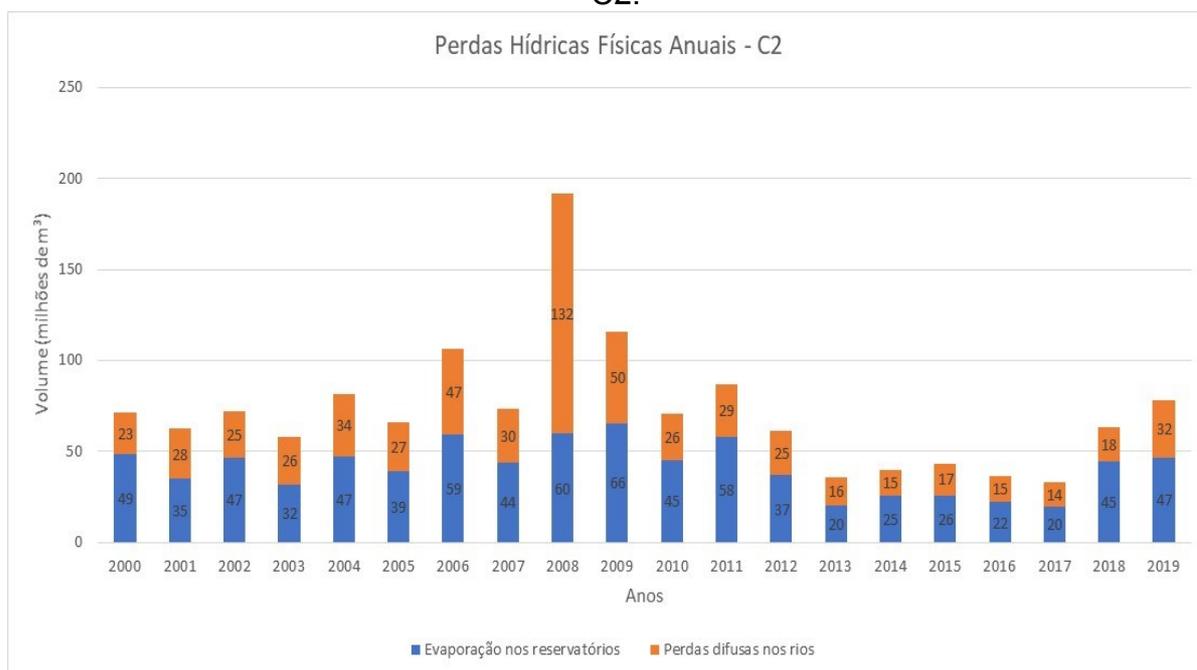
O comportamento das perdas hídricas ao longo dos anos é semelhante ao Cenário C1, como apresentado nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Perdas hídricas anuais para o Cenário C2.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Figura 23 – Perdas por evaporação nos reservatórios e difusas nos rios no Cenário C2.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

A Tabela 14 apresenta os valores quantitativos das perdas hídricas no sistema para o cenário C2.

Tabela 14 – Perdas hídricas do sistema associada ao Cenário C2.

PERDAS HÍDRICAS	MÉDIA ANUAL NO CENÁRIO C2 (hm³)	REDUÇÃO EM RELAÇÃO AO CENÁRIO C1 (%)
EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS	41,1	18
DIFUSAS AO LONGO DO LEITO DO RIO	31,3	3
VAZÃO ACIMA DE 1,7 m³/S NA DIVISA PB/RN	425,8	9
TOTAL	498,2	10

Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

Observa-se que a vazão excedente na divisa PB/RN continua bastante elevada, representando uma proporção de 85% das perdas hídricas. Todavia, houve uma redução de cerca de 9% do Cenário C1 para o Cenário C2. Redução também observada nas perdas físicas, com maior intensidade em relação a evaporação dos reservatórios e menor no leito do rio. Em média, houve uma redução anual de aproximadamente 10% nas perdas hídricas em relação ao Cenário C1, o que representa um valor superior a capacidade de armazenamento do reservatório São Gonçalo.

Sobre os Índices de Eficiências de Bacias Hidrográficas (Tabela 15), observa-se uma melhoria nos índices quando comparado com o Cenário C1.

Tabela 15 – Índices de eficiências de bacias hidrográficas para o Cenário C2.

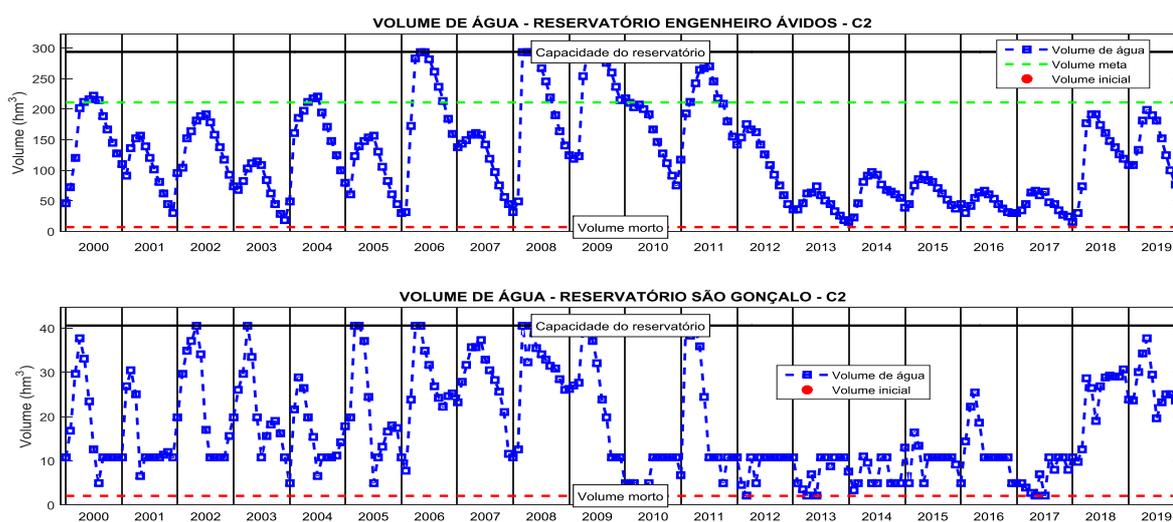
ÍNDICES DO SISTEMA	IAP	IUD	IUP	PERDAS
		0,35	0,86	0,30

Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

O Índice de Ativação da Potencialidade (IAP) deteve um aumento de 6% em relação ao Cenário C1, representando maior capacidade de toda a água gerada pelo sistema estar disponível para os diversos usuários que dela dependem. Houve também uma elevação de 5% da utilização da água necessária para suprir as demandas correspondentes, através do Índice de Utilização de Disponibilidade (IUD).

Entretanto, é preciso considerar que se trata de índices médios do ano de 2000 a 2019, intercalando anos de pluviometria acima da média (2004 a 2009) e períodos com pluviometria considerados abaixo da média (2012 a 2017). Assim, destaca-se que muitas dessas perdas são resultantes da vazão excedente na divisa entre a Paraíba e o Rio Grande do Norte, principalmente no ano de 2008, que de forma isolada representa cerca de 25% de toda a perda estimada.

Os comportamentos dos volumes de água nos reservatórios do sistema, para o Cenário C2, estão contidos na Figura 24.

Figura 24 – Volumes de água armazenados nos reservatórios para o cenário C2.

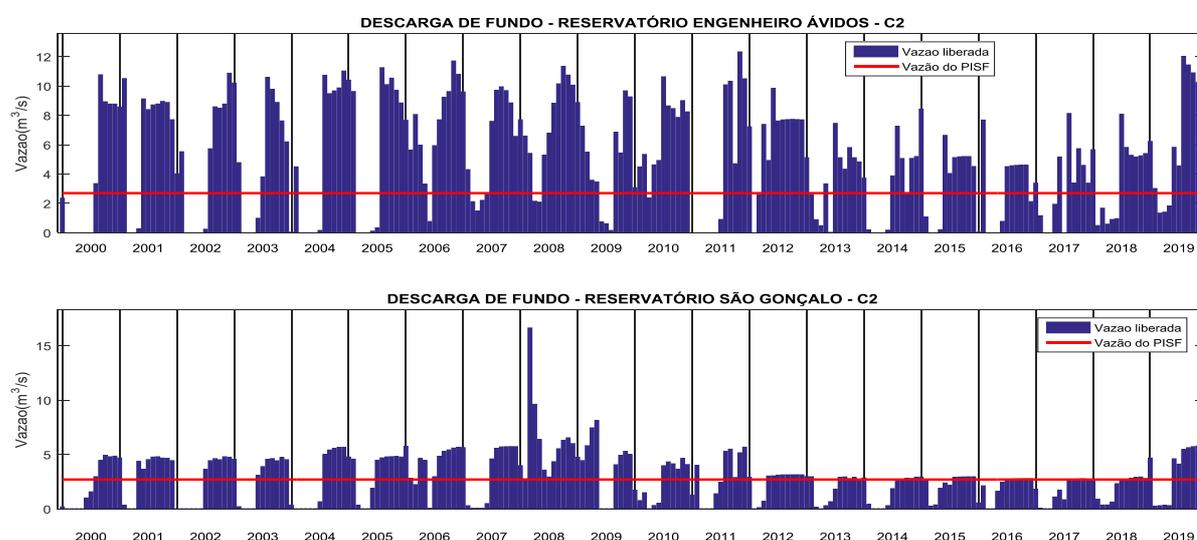
Percebe-se, com o aumento das demandas em 100%, que o reservatório Engenheiro Ávidos continuou com uma variabilidade caracterizada por aumento na época chuvosa e diminuição na época seca. Entretanto, houve queda na quantidade armazenada e declínios acentuados com a intensificação dos usos, tanto que nos

finais dos anos de 2001, 2003, 2006, 2007, 2013, 2016 e 2017 o volume ficou abaixo de 50 hm³, atingindo o volume morto nos anos de 2013 e 2017. Diferente do Cenário C1, em que o referido reservatório atingiu a capacidade hídrica cinco vezes, no Cenário C2 o volume máximo foi atingido apenas em três oportunidades (2006, 2008 e 2009). Outro destaque é que no intervalo de 2012 ao final de 2017 o volume permaneceu abaixo dos 100 hm³.

Em relação ao reservatório de São Gonçalo, houve variações volumétricas com amplitudes desproporcionais, refletidos na série de 2000 a 2010. Observa-se que se chegou a atingir a sua capacidade total seis vezes e, ao mesmo tempo, se aproximar do volume morto nos anos de 2000, 2004, 2005 e 2010. Nos dados apresentados no Cenário C1, para o mesmo período, o volume do manancial manteve-se acima de 50% da capacidade. No tocante ao período seco, houve poucas alterações no regime de captação e uso, mantendo-se o volume abaixo de 10 hm³ na maior parte do período considerado. O volume morto foi atingido nos mesmos períodos observados no Cenário C1.

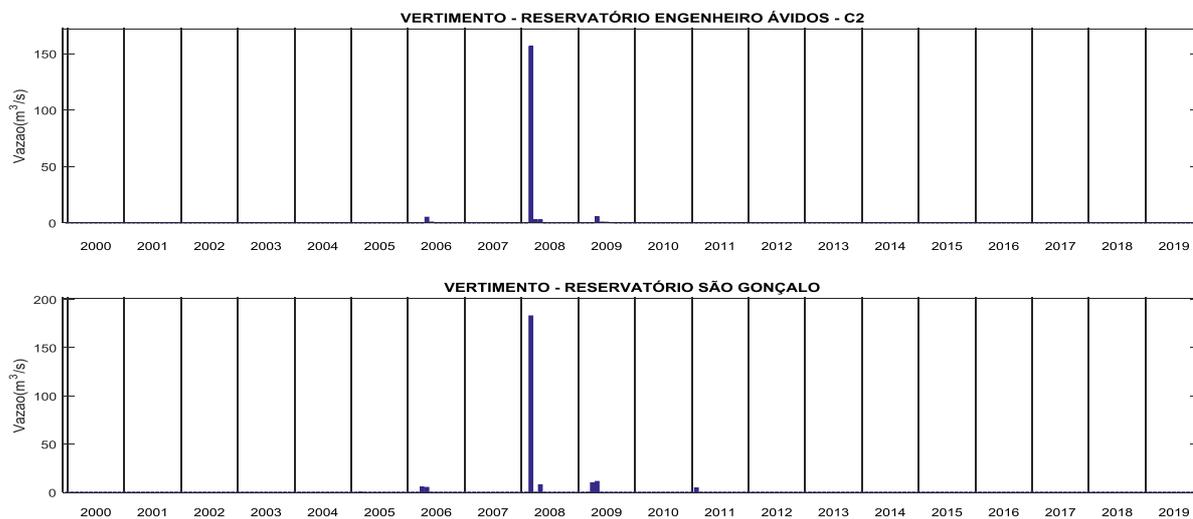
Os valores das vazões liberadas por descarga de fundo dos reservatórios estudados no Cenário C2 estão contidos na Figura 25. Observa-se uma diminuição nos valores da vazão liberada por descarga de fundo pelo reservatório São Gonçalo. Tal diminuição ocorreu principalmente nos anos de 2004 a 2008, devido ao aumento das demandas do sistema. Ocorreu também diminuição na vazão liberada pelo reservatório Engenheiro Ávidos, porém em menor intensidade.

Figura 25 – Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C2.



Os vertimentos (Figura 26), tanto em Engenheiro Ávidos como em São Gonçalo, ocorreram praticamente nos mesmos períodos observados no Cenário C1.

Figura 26 – Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo para o Cenário C2.



Fonte: Construída com os dados da pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados e na metodologia apresentada, conclui-se que:

- Há possibilidade de aumento real de até 100% do valor estabelecido nas demandas hídricas do PISG e das áreas difusas do sistema. Tal aumento dependerá do regime pluviométrico no ano, sendo que em anos de seca será necessário reduzir as demandas hídricas.
- Os valores estabelecidos para o abastecimento dos núcleos urbanos foram atendidos integralmente, mesmo com o aumento das demandas hídricas do PISG e das áreas difusas.
- A vazão de 1,0 m³/s destinada para o estado da Paraíba, proveniente do PISF, é insuficiente para o atendimento de todas as demandas do sistema quando se considera um período de seca.
- O sistema apresentou grandes perdas hídricas (principalmente em anos de pluviometria acima da média), no qual o aumento das demandas hídricas do PISG e das áreas difusas foram capazes de reduzi-las.

A metodologia aplicada neste estudo apresenta um entendimento acerca da utilização dos recursos hídricos do sistema, sob a ótica da alocação ótima, sendo condicionado, por sua vez, por premissas restritivas de caráter físico, administrativo e socioambiental, que estimulam a possibilidade de avaliar o desempenho do sistema como um todo ou dos seus componentes particulares. A apresentação de cenários foi útil para investigar situações prováveis, bem como para estabelecer diagnósticos, limites de comparação e referenciais, a fim de contribuir para a propositura de análises e subsídios para o estabelecimento de políticas de uso dos recursos hídricos.

O Cenário C1 aponta uma quantidade exorbitante de recursos hídricos que o sistema deixa de absorver (em períodos de pluviometria normais ou acima da média) por não apropriar os usos integrais para fins agrícolas, principalmente, dos integrantes das áreas que demandam esse recurso ao longo do percurso delimitado até a divisa entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, regrado por uma vazão contínua de entrega em torno de 1,7 m³/s.

O Cenário C2 apresentou-se como uma solução viável, uma vez que demonstrou que é possível aumentar as demandas para reconduzir o recurso

excedente em uma escala de suprimento para cobrir a maior parte das áreas afetadas por restrições e limitações de uso. Diminuindo, por sua vez, uma parcela considerável de toda a vazão adicional transpassada para o Rio Grande do Norte, que é considerada, neste estudo, como perda do sistema.

Por fim, mesmo com a vazão exógena proveniente do PISF, em períodos de seca deve-se ter um plano de racionamento, principalmente das demandas agrícolas, a fim de garantir o atendimento integral das demandas de abastecimento humano e evitar o colapso das culturas agrícolas cultivadas.

Como sugestões de trabalhos futuros pode-se:

- Avaliar a possibilidade de aumento (em alguns) anos da vazão exógena do PISF;
- Considerar como a operação de outros reservatórios (como o Lagoa do Arroz e o Coremas Mãe/D'água) podem influenciar no atendimento das demandas do sistema.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, A. P. **Avaliação do modelo de cisterna adotado pelo Programa Um Milhão de Cisternas no município de Sousa-PB**. 2015. 43 f. Monografia (Graduação em Administração) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências Jurídicas e Sociais, Sousa, 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/15354>

ACQUANET. **Manual do usuário**. Disponível em: <http://www.labsid.com.br/download.php?area=arquivo&id=16&arg=5140c7a3b3624> **Manual AcquaNet com SIG.pdf**. Acesso em 20 fev. 2020.

ALBUQUERQUE, A. S. O.; ANDRADE, P. R. G. S.; CURI, R. C.; CURI, W. F. Uma Análise da Operação de um Sistema de Cinco Reservatórios do Alto Capibaribe, Pernambuco. **Anais [...]** XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Curitiba, PR: 23 a 27 de Novembro de 2003.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu**. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: http://piranhasacu.ana.gov.br/produtos/PRH_PiancoPiranhasAcu_ResumoExecutivo_30062016.pdf. Acesso em 20 fev. 2020.

ANA. Agência Nacional de Águas. Outorga de direito de uso de recursos hídricos. **Cadernos de capacitação em recursos hídricos**, Brasília, v. 6, n. 1, p. 50, 2011.

ANA. Agência Nacional de Águas. Planilhas de outorgas. **Outorgas Emitidas**. Brasília: ANA, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Plano de recursos hídricos da bacia**

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

BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F.; NAKAYAMA, P. T. Sistemas de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 73-95, jul/set., 1998.

BRAGA, C. F. C. Alocação de Água no Semiárido: Cenários Climáticos Presente e Futuro no Contexto da Demanda do Presente. **Anais [...]** XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

BRASIL. Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional. **Relatório Síntese de Viabilidade Técnico-econômica e ambiental**, 2000.

BRASIL. Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente do Projeto de integração do rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. **RIMA**, 2004.

BRITO, V. C. **Análise de perdas de água por meio de otimização para o projeto de integração do rio São Francisco, eixo leste – bacia do rio Paraíba**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de

Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/7896>

CAMARA, A. C. F. C. **Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB)**. 2003. 219 p. Dissertação (Mestrado em engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento ambiental) – Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CARNEIRO, T. C.; FARIAS, C. A. S. Otimização Estocástica Implícita e Redes Neurais Artificiais para Auxílio na Operação Mensal dos Reservatórios Coremas - Mãe d'Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 115-124, 2013.

CASTRO, C. N. **Transposição do rio São Francisco**: análise de oportunidade do projeto. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011.

CELESTE, A. B. **Determinação e análise de indicadores de desempenho e de sustentabilidade de seis açudes na bacia do rio Piancó – PB e de suas potenciais demandas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2006. 119 p. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/10524>

COSTA NETO, F. D. A. D. **Análise de alternativas para o uso das águas do projeto de integração do rio São Francisco-eixo norte, no Estado da Paraíba através de um modelo de otimização multiobjetivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020. 137p. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/16552>

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A. Análise de Alterações na Receita Líquida de um Perímetro Irrigado no Semi-Árido sob Condições de Variações Hídricas e Econômicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 3, p. 39-53, 2004.

DAEE. Departamento de águas e Energia Elétrica de São Paulo. Diretoria de Procedimentos de Outorga e Fiscalização (Org.). **Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas**. São Paulo, 2005. 116 p.

FARIAS, E. E. V. **Distribuição da Água do Projeto de Integração do Rio São Francisco no Estado da Paraíba – Eixo Leste**: Análise de Perdas. 2009. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3779>

FARIAS, E. E. V.; CURI, W. F.; DINIZ, L. da S. Projeto de Integração do Rio São Francisco, Eixo Leste: análise de perdas e indicadores de desempenho. **RBRH**, Porto Alegre, v. 22, e47, 2017.

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, 2004. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11826>

FERREIRA, J. G. A transposição das águas do Rio São Francisco na resposta à seca do Nordeste brasileiro. Cronologia da transformação da ideia em obra. **Revista Latino-Americana de Relações Internacionais**, v. 1, n. 2, p. 53–72, 2019.

GUIMARÃES, B. S. **A transposição do Rio São Francisco**: Análise da efetividade do projeto. 2016. 49 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2016.

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.

LABADIE, J. W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-Of-The-Art Review. **Journal of Water Resources Planning and Management.**, v. 130. n. 2, p. 93-11, 2004.

LABSID. **LabSid AcquaNet 2013**. Disponível em: http://www.labsid.com.br/produto_interna.php?id=141. Acesso em: 20 fev. 2020.

LANNA, A. E. Análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos. *In*: PORTO, R. La L. (Org.). **Técnicas quantitativas para gerenciamento de recursos hídricos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.

LANNA, A. E. Introdução. *In*: PORTO, R. La L. (Org.). **Técnicas quantitativas para gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002. p. 15-41,

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

MACHADO, E. C. M. N. **Metodologia multi-objetivo para alocação da vazão excedente em bacias hidrográficas**. 2011. 131 f. Tese – (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1883>

MENDES, L. A. **Análise dos critérios de outorga de direito de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência**. 2007. 189 p. Dissertação de (Mestrado em Recursos Hídricos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, G. C. S.; NÓBREGA, R. S.; ALMEIDA, H. A. Perfil socioambiental e estimativa do potencial para a captação de água da chuva em Catolé de Casinhas, PE. **Revista de Geografia (UFPE)**, Recife, v. 29, n. 1, 2012.

REBOUÇAS, A. C. Água na Região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 11, n. 29, p.127-54, 1997.

REIS, C. Q. **Avaliação da sustentabilidade hídrica dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo**. 2014. 73 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2014.

REIS, C. Q.; SANTOS, V. S.; FARIAS, C. A. S. Avaliação da sustentabilidade hídrica dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pombal, v. 13, n. 2, p. 01-09, 2019.

RIMA. **Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente do Projeto de integração do rio São Francisco com bacias hidrográficas do nordeste setentrional**. MI Ministério da Integração Nacional, Brasília, jun. 2004.

RODRIGUES, A. C. L.; CELESTE, A. B.; BARBOSA, R. L.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Estudo da influência da transposição do rio São Francisco sobre o processo de outorga de uso da água na bacia hidrográfica do Rio Piancó-PB. **Anais [...]** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Porto Alegre: ABRH, v. 1, p. 1-17, 2007.

ROS, D. A.; BARROS, M. Estratégias operacionais de sistemas hidroenergéticos: impactos de diferentes objetivos. **Anais [...]** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba – PR, 2003.

SANTOS, V. da S. **Modelo de Otimização quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento dos Recursos Hídricos superficiais, com aplicação à Bacia do Rio Paraíba**. 2012, 170 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1768>

SANTOS, V. da S. **Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de Recursos Hídricos**. 2007. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4075>

SANTOS, V. S.; CURI, W. F. Sustentabilidade do Uso dos Recursos Hídricos do Reservatório Epitácio Pessoa através de um Modelo de Otimização Multiobjetivo. **REUNIR: Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 4, n. 3, p. 95-112, 2014.

SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 49-60, 2011.

SANTOS, V. S.; NOBREGA, A. K. Q. Análise multicriterial no auxílio de tomada de decisão: Estudo de caso no reservatório São Gonçalo, Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 5, p. 837-842, 2017.

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.

SIMÕES, João Paulo de Oliveira. **Análise comparativa do potencial dos manejos de produção agrícola convencional e orgânica para áreas irrigadas no entorno do reservatório Epitácio Pessoa**. 2013. 129 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

SIMONOVIC, S. P. Reservoir System Analysis: Closing Gap between Theory and Practice. **Journal of Water Resources Planning and Management.**, v. 118, n. 3, p. 262- 280, 1992.

VIEIRA, A. S. **Um modelo de simulação, via programação linear sequencial, para sistema de recursos hídricos.** 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3465>

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

WURBS, R. A. Reservoir-System Simulation and Optimization Models. **Journal of Water Resources Planning and Management.**, v. 119, n. 4, p. 455-472, 1993.

YEH, W. W-G. Reservoir Management and Operation Models: a State-of-the-Art Review. **Water Resources Research**, v. 21, n. 12, p.1797-1818, 1985.