



**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Área de concentração “Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental”**

**ANÁLISE DE PERDAS DE ÁGUA POR MEIO DE OTIMIZAÇÃO
PARA O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO
FRANCISCO, EIXO LESTE – BACIA DO RIO PARAÍBA**

Virgínia da Costa Brito

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2019

Virgínia da Costa Brito

**ANÁLISE DE PERDAS DE ÁGUA POR MEIO DE OTIMIZAÇÃO
PARA O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO
FRANCISCO, EIXO LESTE – BACIA DO RIO PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, área de concentração Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi

Coorientador: Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2019

B862a Brito, Virgínia da Costa.
Análise de perdas de água por meio de otimização para o projeto de integração do rio São Francisco, eixo leste – bacia do rio Paraíba / Virgínia da Costa Brito. – Campina Grande, 2019.
107 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi, Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos".

Referências.

1. Recursos Hídricos. 2. Escassez Hídrica. 3. Rio São Francisco – Transposição. 4. Escassez Hídrica – Perdas e Otimização. I. Curi, Wilson Fadlo. II. Santos, Valterlin da Silva. III. Título.

CDU 556.18(043)

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

VIRGÍNIA DA COSTA BRITO

TÍTULO: “ANÁLISE DE PERDAS DE ÁGUA POR MEIO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO, EIXO LESTE – BACIA DO RIO PARAÍBA”

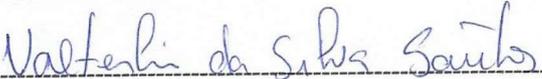
COMISSÃO EXAMINADORA

PARECER



Prof. Wilson Fadlo Curi – Dr.

APROVADO



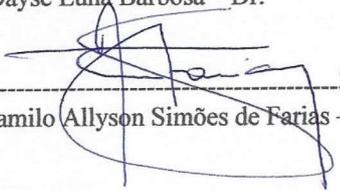
Prof. Valterlin da Silva Santos – Dr.

APROVADO



Prof.ª Dayse Luna Barbosa – Dr.ª

APROVADA



Prof. Camilo Allyson Simões de Farias – Dr.

APROVADA

Campina Grande, 26 de fevereiro de 2019

Dedico essa realização primeiramente a Deus, por sempre ter me mostrado o caminho a ser seguido e aos meus pais Vilma e José Ariosvaldo, por se dedicarem na minha educação e estarem sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Deus, por ter permitido que eu chegasse neste momento da minha vida profissional, por estar sempre ao meu lado me guiando e mostrando o caminho a ser seguido.

Aos meus pais, Vilma Maria e José Ariosvaldo, por todos os ensinamentos transferidos, por todo o empenho na minha educação, por sempre me apoiarem e me darem todo o suporte necessário. Tudo que conquistei e conquistarei devo a eles.

Aos meus irmãos Arthur e Arilma, por todo o carinho em todos esses anos, por toda a proteção que sempre tiveram comigo.

Ao meu namorado João Arthur, pelo apoio, parceria e amizade, me trazendo sempre as melhores palavras e conselhos.

Aos professores do PPGECA por todo o suporte ofertado nessa jornada, em especial aos meus orientadores Dr. Wilson Fadlo Curi e Dr. Valterlin da Silva Santos, por todos os ensinamentos passados e pelo empenho nesse trabalho.

Aos meus colegas do PPGECA, pela companhia nessa jornada e por todos os conhecimentos compartilhados.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro durante o período de estudos, e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

Diante de um cenário recorrente de escassez hídrica no semiárido nordestino devido as causas climáticas características da região, o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) trouxe esperança para a população que necessita dessas águas. No Estado da Paraíba, através do Eixo Leste, a bacia hidrográfica do Rio Paraíba, recebe as águas da transposição garantindo o suprimento hídrico de todo o trecho do rio, bem como dos quatro reservatórios em série - Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã - receptores da vazão de água do projeto. O PISF foi planejado e executado por meio de construção de canais abertos, onde a água é transportada em contato direto com o meio externo, acarretando em consideráveis perdas hídricas para o sistema. Devido a importância desse sistema para a região e a preocupação com a gestão hídrica da mesma, cabe o questionamento sobre como a água pode ser distribuída e utilizada a partir de sua chegada a bacia do rio Paraíba de forma a minimizar perdas de água e de ordem financeira. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento das perdas em trânsito no rio e por evaporação nos quatro reservatórios em série, que são receptores da vazão exógena do PISF, e calcular os custos das perdas hídricas para cada cenário. Para isso, criou-se quatro cenários, que levam em consideração a forma atual da transposição e cenários com proposta de uma nova adutora até a ETA (Estação de Tratamento de Água) de Gravatá, localizada no município de Queimadas – PB, transportando parte da vazão do projeto de integração. Consideram-se cenários com os usuais perímetros irrigados da área de estudo e também com restrições de área irrigada de acordo com a Resolução Conjunta ANA/AESA nº 87 de 5 de novembro de 2018. Os cenários foram avaliados por meio de um modelo de otimização multiobjetivo baseado em Programação Linear Sucessiva, criado por Santos (2011), para um período de 6 anos (2012 a 2017), o qual foi marcado pela forte seca na região em que os reservatórios chegaram a um nível crítico de acumulação. Os resultados obtidos mostraram que as demandas de abastecimento urbano e irrigação foram atendidas plenamente em todos os cenários. A vazão máxima estimada para o canal de integração Acauã-Araçagi não é sustentável, pois sua demanda não foi atendida em totalidade, e sobrecarrega todo o sistema, principalmente o reservatório Acauã. Conclui-se que os cenários que propõem o transporte de parte da vazão por meio de adutora, demonstraram maior eficiência com relação a menores perdas hídricas e consequentemente menores custos, tendo uma economia da ordem de 11,1 a 16,8 milhões de reais por ano. As limitações impostas aos perímetros irrigados pela Resolução Conjunta ANA/AESA nº 87, não trouxeram êxito aos seus objetivos de diminuir o volume de água consumido, na otimização ocorreu o oposto, isto é, acarretando em maiores perdas hídricas para o sistema, custando a mais 3,1 milhões de reais ao ano.

Palavras-chave: escassez hídrica; transposição; perdas; otimização.

ABSTRACT

On a recurrent water scarcity scenario in the northeastern semi-arid region due to the characteristic climatic causes of the region, the São Francisco River Integration Project (PISF) has brought hope to the population that needs these waters. In the State of Paraíba, through the east axis, the watershed of the Paraíba River receives the waters of transposition guaranteeing the water supply of the whole stretch of the river, as well as the four reservoirs of the series - Poções, Camalau, Boqueirão and Acauã – which are receivers of the project's water flow. The PISF was planned and executed through the construction of open channels, where the water is transported in direct contact with the external environment, leading to considerable water losses for the system. Due to the importance of this system for the region and the concern with its water management, a question is placed about how this water can be distributed and used when it reaches the Paraíba river basin in a way that water and financial losses can be minimized. Thus, the objective of this research is to study the behavior of water losses in transit along the river and by evaporation in the four reservoirs in series, which are recipients of the exogenous PISF flow, and calculate the costs of water losses for each scenario. For this, four scenarios were created taking into account the current form of transposition and scenarios with a proposal of a new pipeline to the ETA (Water Treatment Station) of Gravatá, located in the city of Queimadas, in Paraíba, transporting part of the flow of the integration project. Scenarios with the usual irrigated perimeters of the study area and also with irrigated area restrictions according to the ANA / AESA Joint Resolution No. 87 of November 5, 2018, were both considered. The scenarios were evaluated by means of a multiobjective optimization model based on Successive Linear Programming, created by Santos (2011), for a period of 6 years (2012 to 2017), which was marked by the strong drought in the region where the reservoirs reached a critical level of accumulation. The results showed that the demands of urban supply and irrigation were fully met in all scenarios. The maximum estimated flow rate for the Acauã-Araçagi integration channel is not sustainable, since its demand has not been fully met, and it overloads the entire system, especially the Acauã reservoir. It can be concluded that the scenarios that propose the transportation of part of the flow through a pipeline, showed greater efficiency in relation to lower water losses and consequently lower costs, with an economy in the range of 11.1 to 16.8 million Reais per year. The limitations imposed on the irrigated perimeters by the Joint Resolution ANA / AESA n° 87, did not bring success to their objectives of reducing the volume of water consumed, in the optimization process occurred the opposite, that resulted in greater water losses for the system, costing a further 3,1 million Reais per year.

Keywords: water scarcity; transposition; losses; optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização dos Eixos do Projeto.....	29
Figura 2 - Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba	30
Figura 3 - Procedimento metodológico da pesquisa.....	34
Figura 4 - Layout do sistema para o Cenário C1	36
Figura 5 - Layout do sistema para o Cenário C2.....	37
Figura 6 - Polígono de Thiessen com os postos pluviométricos	38
Figura 7 - Esquema físico do modelo SMAP mensal.....	40
Figura 8 - Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo	50
Figura 9 - Fluxograma do modelo de otimização.....	53
Figura 10 - Exemplo fictício de descarga em reservatório.....	54
Figura 11 - Volume de água e vertimento do reservatório Mucutu de 2012 a 2017	60
Figura 12 - Volume de água e vertimento do reservatório Taperoá II de 2012 a 2017	61
Figura 13 - Volume de água do reservatório Soledade de 2012 a 2017.....	61
Figura 14 - Volume de água do reservatório Serra Branca II de 2012 a 2017	61
Figura 15 - Volume de água e vertimento do reservatório Sumé de 2012 a 2017	62
Figura 16 - Volume de água do reservatório Santo Antônio de 2012 a 2017	62
Figura 17 - Volume de água do reservatório Cordeiro e atendimento da adutora do Congo no período de 2012 a 2017.....	63
Figura 18 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C1	64
Figura 19 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C1	64
Figura 20 - Atendimento da demanda do canal Acauã-Araçagi no Cenário C1	65
Figura 21 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C1.....	66
Figura 22 - Volume de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C1	67
Figura 23 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C1.....	69
Figura 24 - Perdas hídricas (hm ³) por evaporação e em leito de rio no Cenário C1	71
Figura 25 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C2.....	73
Figura 26 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C2	73
Figura 27 - Atendimento da demanda do canal Acauã-Araçagi no Cenário C1	74
Figura 28 - Volumes de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C2.....	75

Figura 29 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C2.....	76
Figura 30 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C2.....	76
Figura 31 - Perdas hídricas (hm ³) por evaporação e em leito de rio no Cenário C2	77
Figura 32 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C3	79
Figura 33 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C3	80
Figura 34 - Atendimento para o canal Acauã-Araçagi no Cenário C3.....	80
Figura 35 - Volumes de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C3.....	81
Figura 36 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C3.....	82
Figura 37 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C3.....	83
Figura 38 - Perdas hídricas (hm ³) por evaporação e em leito de rio no Cenário C3	84
Figura 39 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C4	85
Figura 40 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C4	86
Figura 41 - Atendimento para o canal Acauã-Araçagi no Cenário C4.....	86
Figura 42 - Volumes de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C4.....	87
Figura 43 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C4.....	88
Figura 44 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C4.....	89
Figura 45 - Perdas hídricas (hm ³) por evaporação e em leito de rio no Cenário C4	90
Figura 46 - Perda hídrica média anual de cada cenário para o período analisado.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Precipitação média (mm) dos postos pluviométricos mais próximos aos reservatórios no período de 2012 a 2017.....	39
Tabela 2 – Vazões afluentes médias (m ³ /s) nos reservatórios no período de 2012 a 2017.....	41
Tabela 3 - Evaporação média mensal (mm) dos reservatórios e valores de Kt.....	42
Tabela 4 - Vazões requeridas (m ³ /s) para as adutoras no período de 2019 a 2024.....	43
Tabela 5 – Vazão das áreas agrícolas para os Cenários C1 e C2 (L/s).....	43
Tabela 6 – Vazão das áreas agrícolas para os Cenários C3 e C4 (L/s).....	44
Tabela 7 – Volumes dos reservatórios (hm ³).....	45
Tabela 8 – Indicadores de Hashimoto para o a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C1.....	65
Tabela 9 – Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C1.....	66
Tabela 10 – Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C1.....	69
Tabela 11 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C1.....	72
Tabela 12 – Indicadores de Hashimoto para o a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C2.....	74
Tabela 13 - Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C2.....	76
Tabela 14 - Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C2.....	77
Tabela 15 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C2.....	78
Tabela 16 – Indicadores de Hashimoto para o a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C3.....	80
Tabela 17 - Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C3.....	82
Tabela 18 – Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C3.....	83
Tabela 19 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C3.....	84
Tabela 20 – Indicadores de Hashimoto para o a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C4.....	87
Tabela 21 - Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C4.....	88
Tabela 22 – Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C4.....	89

Tabela 23 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C4.....	90
Tabela 24 – Economia de água e financeira anuais.....	92

LISTA DE ABREVIACÕES

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA – Agência Nacional de Águas
CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CISDERGO - Cropping and Irrigation System Design with Optimal Reservoir and Groundwater Operation
DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
DNOS - Departamento Nacional de Obras e Saneamento
DTDQ – Demanda nas tomadas de água
ETA – Estação de Tratamento de Água
FO – Função Objetivo
GAMS - General Algebraic Modeling System
GAMS/MINUS - Modular In-Core Nonlinear Optimization System
GAMS/ZOMM – Zero/One Optimization Model
HOPDM - Higher Order Primal-Dual Method
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IOCS - Inspetoria de Obras Contra as Secas Contra as Secas
MI – Ministério da Integração
MODSIM – Modeling and Simulation
ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program
PD – Programação Dinâmica
PISF – Projeto de Integração do Rio São Francisco
PL – Programação Linear
PNL – Programação Não Linear
RIMA – Relatório de Impacto Ambiental
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
VRM – Volume meta dos reservatórios

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	16
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 MODELOS MATEMÁTICOS PARA AUXÍLIO NA GESTÃO HÍDRICA.....	20
2.1.1 Simulação	21
2.1.2 Otimização.....	22
2.1.3 Utilização de ferramentas computacionais para operação de reservatórios	23
2.2 DETALHES DO PISF COM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO NORDESTE SETENTRIONAL	27
2.2.1 Objetivos gerais do PISF	27
2.2.2 Detalhes executivos do PISF	28
CAPÍTULO III – METODOLOGIA.....	30
3.1 ÁREA DE ESTUDO	30
3.1.1 Sub-bacia do Rio Taperoá	30
3.1.2 Região do Alto Curso do Rio Paraíba	31
3.1.3 Região do Médio Curso do Rio Paraíba	31
3.2 DESCRIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS RECEPTORES DA VAZÃO DO PISF.....	32
3.2.1 Açude Poções	32
3.2.2 Açude Camalaú.....	33
3.2.3 Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)	33
3.2.4 Açude Argemiro de Figueiredo (Acauã)	33
3.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	34
3.3.1 Delineamento dos Cenários	35
3.3.2 Levantamento dos dados do sistema	38
3.3.3 Dados estruturais dos reservatórios	45
3.4 CRITÉRIOS OPERACIONAIS	46
3.4.1 Modelo de Simulação	46
3.4.2 Modelo de otimização quantitativo	47
3.4.3 Indicadores de desempenho.....	53

3.4.4 Índices de eficiência associados aos reservatórios	56
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	60
4.2 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO	63
4.2.1 Cenário C1	63
4.2.2 Cenário C2.....	72
4.2.3 Cenário C3.....	78
4.2.4 Cenário C4.....	85
4.3 RESUMO DAS PERDAS E DOS CUSTOS DOS CENÁRIOS	91
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
REFERÊNCIAS	96
ANEXOS	103

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos e seus usos múltiplos representam um dos grandes desafios para as sociedades atuais. A crescente necessidade por água potável, em combinação com a diminuição da sua disponibilidade, tanto no seu aspecto quantitativo quanto qualitativo, tem intensificado os conflitos pelo acesso, uso, consumo e gestão desse recurso, constituindo-se um problema de dimensões ecológica, cultural, social e de política de gestão pública (BRITO, 2008).

Essa questão é intensificada com as condições naturais do ambiente em que está inserido o Estado da Paraíba, onde maior parte do território está localizada numa região de clima semiárido, caracterizado por chuvas bastante irregulares a nível espaço-temporal, índices pluviométricos baixos e com perdas evaporativas nos reservatórios muito altas quando comparadas a outras regiões do Brasil (VIEIRA, 1996).

O semiárido paraibano sofre frequentemente com secas prolongadas que dificulta o atendimento das demandas hídricas tanto de abastecimento humano como para a irrigação de áreas agrícolas, a prática da piscicultura extensiva e/ou intensiva, entre outros usos.

De acordo com Farias *et al.* (2017), para amenizar o problema da escassez hídrica foram construídas, no território estadual, várias barragens de modo a garantir o abastecimento em períodos de crise. Devido às incertezas climáticas, a maior parte desses reservatórios são operados para manter o maior volume armazenado possível, dando prioridade apenas ao abastecimento e limitando os outros usos. Tal política gera conflitos e, ainda, aumenta as perdas por evaporação e vertimentos.

Entretanto, Rêgo *et al.* (2000) relata que, durante a ocorrência da seca de 1997-1999, diante da ameaça de colapso total do abastecimento urbano da cidade de Campina Grande (2ª maior cidade do Estado da Paraíba e do interior do Nordeste), representado pelo baixo nível a que ficou reduzido o volume d'água acumulado no reservatório Eptácio Pessoa (2º maior reservatório do Estado da Paraíba), foi necessário a implantação de um regime de racionamento da distribuição de água, que teve início no segundo semestre de 1998 e prolongou-se até os primeiros meses do ano 2000. Ao racionamento seguiu-se a suspensão, por medida judicial, da irrigação que

vinha sendo praticada, sem nenhum controle técnico, nas margens do açude e o fechamento da comporta de descarga de fundo para a perenização do rio Paraíba.

Durante a seca que se iniciou no ano de 2012, diversas cidades paraibanas sofreram com longos racionamentos no sistema de distribuição de água e nas atividades agropastoril devido aos baixos volumes de água armazenados nos reservatórios da região.

No caso do reservatório Epitácio Pessoa, em março de 2013, o Ministério Público e o DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca) decretaram a suspensão da irrigação em torno do açude, devido à perda de cerca 128 milhões de metros cúbicos de água no período de fevereiro de 2012 a fevereiro de 2013. Em dezembro de 2014 a CAGEPA (Companhia de Águas e Esgoto do Estado da Paraíba) iniciou um racionamento de água de 02 (dois) dias na cidade de Campina Grande e mais 18 cidades da região. Em outubro de 2015, quando o reservatório estava com 14% de sua capacidade de armazenamento, houve a ampliação do racionamento para 05 (cinco) dias. Entretanto, como não houve precipitações suficientes para elevar o nível d'água do reservatório, em dezembro de 2015, quando o reservatório estava com menos de 10% de sua capacidade, a CAGEPA instalou um sistema de captação flutuante no reservatório de modo a garantir o abastecimento dos centros urbanos. Contudo, em julho de 2016 o nível de água do reservatório atingiu o volume morto, diminuindo até atingir a marca histórica de apenas 2,9% da sua capacidade de armazenamento (11,97 milhões de metros cúbicos), em abril de 2017.

Para minimizar as consequências das secas na região, foi idealizado o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional através de dois eixos – Eixo Norte e Eixo Leste. O objetivo do projeto é 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).

No Estado da Paraíba é beneficiada a bacia do rio Piranhas-Açu – através do Eixo Norte – e a bacia do rio Paraíba – através do Eixo Leste. Esta última é responsável pelo abastecimento da cidade de Campina Grande.

Em março de 2017 as águas do PISF chegaram à cidade de Monteiro – PB (divisa com o Estado de Pernambuco), sendo que após 41 dias de percurso no leito do rio Paraíba elas chegaram ao reservatório Epitácio Pessoa, aumentando o nível de água

gradativamente. Em agosto de 2017 o reservatório atingiu novamente o seu volume morto, de modo que a CAGEPA suspendeu totalmente o racionamento de água para Campina Grande e mais 18 cidades abastecidas pelo reservatório.

De acordo com Farias *et al.* (2017), a proposta do PISF é de transportar toda vazão exógena através do leito do rio (como está sendo atualmente), mas isso aumenta significativamente as perdas em trânsito por infiltração, evaporação, desvios, etc., e como essa água perdida tem um custo fixo relativamente alto, uma solução viável para reduzir as perdas seria transportar parte dessa vazão por meio de uma adutora até os pontos de consumo.

Além disso, faltam projetos para analisar como a água será utilizada pelas bacias receptoras, tornando imprescindível o planejamento dos recursos hídricos dos reservatórios receptores no sentido de promover o uso eficiente e racional das disponibilidades hídricas entre os múltiplos usuários de forma integrada e otimizada. Esse planejamento deverá possibilitar a atenuação do desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, promovendo o desenvolvimento sustentável dos sistemas produtivos que usam a água como insumo básico.

Diante disto, o presente trabalho traz um estudo sobre uma possível forma de transportar parte da vazão exógena advinda do PISF e maneiras de como utilizar essa vazão na bacia do rio Paraíba, objetivando o melhor aproveitamento do uso dos recursos hídrico em questão e avaliando as perdas hídricas e financeiras decorrentes do percurso da água no leito do rio e por evaporação nos reservatórios.

Para tanto, criou-se cenários que se diferenciam pela forma de transportar a vazão do projeto e pelo uso das águas. Estes cenários foram analisados por meio de um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em Programação Linear Sucessiva, desenvolvido por Santos *et al.* (2011), para um horizonte de tempo de 6 anos (2012-2017), período este caracterizado por uma das piores secas sofridas pela região de estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é estudar potenciais formas de transporte e de utilização da vazão exógena advinda do PISF na bacia do rio Paraíba e promover um

melhor aproveitamento do uso dos recursos hídricos do sistema, através de um modelo de otimização multiobjetivo, avaliando as perdas hídricas e financeiras decorrentes do percurso da água no leito do rio e por evaporação nos reservatórios.

1.1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, podem ser citados:

- Propor cenários de operação do sistema com a implementação de uma possível adutora para transportar parte da vazão exógena do PISF até Estação de Tratamento de Água (ETA) de Gravatá, bem como o aumento da demanda agrícola do sistema;
- Avaliar o comportamento operacional do sistema hídrico através de indicadores de desempenho de atendimento às demandas e indicadores de eficiência associados aos reservatórios, considerando um período de seca hidroclimática (2012-2017);
- Quantificar os volumes de água perdidos por evaporação nos reservatórios e percurso da água no leito do rio nos cenários propostos;
- Estimar o retorno financeiro da implementação de uma adutora para transportar parcela da água do PISF, bem como do aumento da demanda agrícola do sistema.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS PARA AUXÍLIO NA GESTÃO HÍDRICA

Diante da problemática mundial de escassez hídrica, é notória a necessidade de inserção de novas práticas e tecnologias no uso dos recursos hídricos que visem à otimização na condução e na eficiência dos sistemas de aplicação da água. Para tanto a falta de investimentos na infraestrutura das bacias hidrográficas comprometem o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis (MENDOZA *et al.*, 2012).

Para Assis e Vieira (2015) a água é um recurso natural essencial à vida, porém limitada devido à degradação ambiental atual e o crescimento das demandas dos diferentes usos múltiplos, que exige cada vez mais mecanismos que conduzam a uma utilização eficiente e racional deste bem.

Sendo assim, na busca de soluções para os complexos problemas de planejamento e gestão dos recursos hídricos, lança-se mão de utilização de técnicas e ferramentas capazes de auxiliarem nos processos de análise, operação, planejamento e tomadas de decisão em sistemas de recursos hídricos. Os estudos de alternativas operacionais, em sistemas de recursos hídricos, são comumente feitos através de aplicação de complexas metodologias matemáticas e computacionais, incluindo técnicas de otimização e simulação (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993 e LABADIE, 2004).

Segundo Lanna (1997), para a análise de sistemas de recursos hídricos, são dois os principais propósitos: simular o comportamento da realidade e otimizar os processos decisórios. Para tanto, as seguintes técnicas são comumente utilizadas: a simulação e a otimização. A simulação tem como principal característica a flexibilidade, sendo esta considerada uma das principais vantagens, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática mais detalhada. As técnicas de otimização buscam identificar a solução que otimize uma determinada função objetivo que representa matematicamente os objetivos de um sistema a serem melhorados, ordenando-os em relação a sua atratividade, apesar de terem como algumas de suas restrições, um modelo matemático que simule o comportamento do sistema, estas devem ser, preferencialmente, mais

simples e pouco complexas, dada, em geral, a grande quantidade de equações que são necessárias para representar o sistema.

Desta forma, os modelos matemáticos, tanto a simulação quanto a otimização, são de fundamental importância para a gestão dos recursos hídricos, sendo indispensável o uso dessas ferramentas para maximizar a eficiência dos usos múltiplos deste recurso, melhorando assim a segurança hídrica de todo um sistema. Assim sendo, Oliveira (2013), ressalta que os modelos matemáticos computacionais são uma ferramenta importante de uso contínuo e indispensável para realização de estudos hidrológicos nas diferentes fases do seu planejamento e gerenciamento, sempre buscando o aproveitamento máximo de cada sistema através da busca da melhor alternativa. Com as necessidades impostas naturalmente e o avanço das técnicas de modelagens e da computação, há a possibilidade de criar programas de maior complexidade, tendo resultados rápidos e de ótima representação do sistema tornando-os mais fáceis e acessíveis para os hidrólogos.

Diante dessa situação, a adoção de um planejamento ótimo, com o uso de técnicas de simulação e otimização se fazem necessárias para utilizar água de forma eficiente, principalmente nos setores que consomem grandes volumes de água. Essas medidas se forem planejadas corretamente irão promover a modernização e a utilização racional da água, trabalhando com eficiência, sem prejudicar sua produção e nem causar impactos, de forma negativa, ao meio ambiente (PESSOA *et al.*, 2016).

2.1.1 Simulação

Para Salla *et al.* (2014), com a crescente necessidade de um planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos adequado a nível de bacia hidrográfica, fizeram que os modelos de simulação fossem cada vez mais aprimorados, aumentando consequentemente a complexidade matemática.

Os modelos de simulação são constituídos de expressões matemáticas estruturadas em sequência lógica capaz de descreverem a operação de um sistema no tempo e no espaço. O objetivo desses modelos é não somente representar e operar um sistema de forma detalhada, mas, principalmente, de fornecer informações que permitam a avaliação do comportamento real desse sistema (MAUAD, 2000).

Os modelos de simulação permitem a geração de cenários a partir dos quais se pode orientar o processo de tomada de decisão, proceder análises e avaliações de

sistemas que permitam propor a melhoria da performance dos mesmos, fazendo uso de parâmetros técnicos e econômicos. Logo, deve ser concebido como uma abstração da realidade cujos resultados possibilitam interferirmos na realidade que estamos simulando (BARROS, 2010).

Para Santos (2007), uma vantagem da simulação é de se resolver um sistema de reservatórios em função de um instante de tempo de cada vez. Essa característica reduz o tempo de processamento em relação à otimização. Assim, seus resultados são obtidos em função das variáveis no presente e, portanto, na sua análise temporal não é levado em consideração o que ocorre no futuro. A simulação é mais apropriada para análise de desempenho de alternativas operacionais de longo prazo e representa a operação do sistema com um melhor grau de segurança.

De modo geral, pode-se dizer que modelos de simulação são mais apropriados para análise da performance de alternativas operacionais de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança. Apesar de não serem capazes de gerar diretamente uma solução ótima, podem revelar uma solução pelo menos próxima dela, quando políticas alternativas são geradas por meio de numerosas rodadas do modelo (LIMA, 2004).

De modo geral, pode-se dizer que modelos de simulação 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 (NEPOMUCENO, 2018).

2.1.2 Otimização

A otimização, assim como a simulação, é uma ferramenta computacional que auxilia no processo de tomada de decisão na gestão de recursos hídricos. Os modelos de otimização são usados para encontrar a solução ótima que atenda a um objetivo determinado. A otimização permite que a solução ótima do sistema seja encontrada avaliando os valores definidos para as variáveis de decisão, maximizando ou minimizando a função objetivo (FO) que é sujeita a restrições.

Modelos de otimização almejam o encontro de uma solução ou configuração do modelo que possa atender plenamente a determinados critérios, denominados de critérios de otimização. De maneira geral, modelos de otimização checam situações

em que existem diversas e diferentes possíveis formulações para o modelo. O grau de complexidade de problemas de otimização tende a aumentar quanto maior for o número de configurações e de critérios a examinar em um problema (GOLDBARG *et al.*, 2015).

Os modelos de otimização aplicam-se aos casos em que interessa saber qual é a alternativa operacional ótima do sistema e são aplicados, preferencialmente, para um pequeno intervalo de tempo (depende do número de equações necessárias para descrever cada estado e da discretização temporal utilizada). Estes modelos utilizam algoritmos para selecionar, sistematicamente, soluções ótimas, procurando satisfazer uma função objetivo e restrições operacionais. Não existe, porém, um procedimento de otimização que possa resolver eficientemente qualquer tipo de problema. A escolha do modelo de otimização vai depender da forma, quantidade e propriedades matemáticas da função objetivo e das restrições (VIEIRA e CURI, 2016).

Em geral, o modelo de otimização é composto por uma função objetivo $F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, que se deseja maximizar ou minimizar, onde $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ são as variáveis de decisão do problema. Além da função objetivo, existem também as funções de restrição $g_i(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$, que passam a determinar a região viável das variáveis de decisão. Entre as soluções viáveis, a que satisfaz as restrições do problema e garante o melhor valor da função objetivo é chamada de solução ótima (PIZZOLATO e GANDOLPHO, 2013).

Na maioria dos casos, os modelos de suporte a decisão são combinações de técnicas de otimização e simulação. Na primeira, busca-se a alternativa operacional ótima do sistema e, na segunda, busca-se um refinamento da política operacional, através do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Alguns modelos combinam as duas técnicas de simulação e otimização e outros, que utilizam metodologias multiobjetivo, têm sido utilizados no planejamento e gerenciamento de sistema de recursos hídricos (LIMA, 2004).

Segundo Labadie (2004), há uma classificação das técnicas de otimização, como: Programação Linear (PL), Programação Dinâmica (PD), Programação Não-Linear (PNL) e Métodos Heurísticos.

2.1.3 Utilização de ferramentas computacionais para operação de reservatórios

A seguir estão apresentados estudos mais recentes utilizando modelos matemáticos para planejamento de recursos hídricos:

- Bashiri-Atrabi *et al.* (2015), desenvolvem uma técnica chamada algoritmo de busca por harmonia, ou harmony search (HS) desenvolvida para otimização da operação do reservatório no que diz respeito ao controle de inundação. O algoritmo HS é usado para minimizar o déficit de abastecimento de água e os danos causados pelas cheias a jusante de um reservatório. A eficácia do algoritmo HS é avaliada em comparação com outras técnicas. A HS mostrou resultados promissores em termos de velocidade de convergência para um valor de função objetivo ideal em comparação com outras técnicas. Os resultados mostram que o algoritmo HS pode ser efetivamente utilizado para operação do reservatório para gerenciamento de inundações.
- Pan *et al.* (2015), introduzem uma abordagem de otimização robusta (RO), Regra Iterativa de Decisão Linear (ILDR), de modo a fornecer uma aproximação tratável para um problema de geração de energia hidroelétrica multiperódica. A abordagem proposta amplia o método LDR existente, acomodando funções objetivo não-lineares. O desempenho do ILDR é comparado com as políticas de referência, incluindo a política de programação dinâmica estocástica de amostragem (SSDP) derivada de dados históricos. O ILDR resolve os sistemas de um ou mais servidores múltiplos com eficiência. Os resultados do estudo de caso de reservatório único mostram que o método RO é tão bom quanto o SSDP quando implementado nos fluxos históricos originais e supera a política do SSDP quando testado em entradas geradas com a mesma média e matriz de covariância usuais.
- Tiantian Yang *et al.* (2015), demonstram a aplicação de um Algoritmo de Otimização Evolutiva, ou Evolutionary Optimization Algorithm (EA) aprimorado, intitulado Método de Otimização Global de Evolução Complexa Multi-Objetivo com Análise de Componente Principal e Operador de Distância de Crowding, ou Multi-Objective Complex Evolution Global Optimization Method with Principal Component Analysis and Crowding Distance Operator (MOSPD), para a operação de reservatório de hidrelétricas do Oroville–Thermalito Complex (OTC). No estudo de gestão conjunta de hidrelétricas de água do OTC, a não-linearidade da geração de energia hidrelétrica e a relação entre água e

armazenamento do reservatório são explicitamente formuladas por função polinomial, a fim de se aproximar de situações realistas e reduzir a linearização nos erros de aproximação. As soluções do MOSPD proporcionam aos tomadores de decisão melhores alternativas operacionais para o gerenciamento eficaz e eficiente dos reservatórios OTC em resposta aos diferentes climas, especialmente a seca, que se tornou cada vez mais grave e frequente na Califórnia.

- Hamid-Reza Asgari *et al.* (2016), introduzem o algoritmo de otimização de plantas daninhas, ou weed optimization algorithm (WOA) para a operação ótima do reservatório. A eficácia do WOA é demonstrada com a otimização de funções matemáticas e sistemas de reservatórios. O WOA é aplicado em formulações de tempo contínuo e discreto de otimização de operação de reservatório e seus resultados são comparados com soluções ótimas globais obtidas com programação não linear (NLP), programação linear (LP) e algoritmo genético (GA). Os resultados mostram a rápida convergência do WOA para soluções que estão muito próximas das soluções ótimas globais dos problemas de otimização do reservatório.
- Farias *et al.* (2017), utilizou a simulação por meio do software Acquanet para analisar as perdas de água na distribuição do Projeto de Integração do Rio São Francisco pelo Eixo Leste. Analisa cenários de distribuição de água em termos de perdas de água, os quais foram simulados com o modelo Acquanet. Os resultados mostraram que a construção de dutos reduzirá as perdas de água e aumentará o ganho social, através do aumento da população beneficiada.
- Zhong-kai Feng *et al.* (2017), mostram o problema do rápido desenvolvimento da energia hidrelétrica na China que gera a “maldição da dimensionalidade” representando um grande desafio para a operação ótima do sistema hidrelétrico (OOHS). A programação dinâmica diferencial discreta (DDDP) é um método clássico para aliviar o problema de dimensionalidade da programação dinâmica para o OOHS, mas seu requerimento de memória e tempo computacional ainda cresce exponencialmente. A fim de melhorar o desempenho do DDDP, um novo método chamado programação dinâmica diferencial discreta ortogonal (ODDDP) é introduzido para resolver o problema OOHS. O método proposto é aplicado para a operação ótima de um sistema hidrelétrico de larga escala na China. Os resultados indicam que, em comparação com o DDDP padrão, o ODDDP só precisa de cerca de 0,37% do tempo de computação para obter os resultados com

cerca de 99,75% de geração no sistema hidrelétrico, fornecendo uma nova ferramenta eficaz para o problema OOHS em larga escala.

- Ming B. *et al.* (2017), para aliviar a carga computacional envolvida em problemas de operação de reservatórios restritos em grande escala e restritos, propõem um novo método de redução de espaço de busca, ou search space reduction method (SSRM) que considera as restrições de igualdade disponível (por exemplo, equilíbrio de água) e desigualdade (por exemplo, saída firme). Com base em um modelo de operação de reservatório de energia hidrelétrica, formularam o SSRM para um único reservatório e um sistema de múltiplos reservatórios, respectivamente. Para validar a eficiência do SSRM proposto, é individualmente integrado em duas técnicas de otimização representativas: programação dinâmica discreta, ou discrete dynamic programming (DDP) e o algoritmo cuckoo search (CS). Foram utilizados esses métodos acoplados para otimizar dois problemas de operação no mundo real do reservatório de Shuibuya e dos reservatórios em cascata de Shuibuya-Geheyan-Gaobazhou na China. Os resultados mostram que o SSRM melhora significativamente a eficiência de pesquisa das técnicas de otimização e pode ser integrado em praticamente qualquer método de otimização ou simulação.
- Yangyang Li *et al.* (2017), utilizam um modelo de otimização multiobjetivo melhorado baseado na programação de metas, ou goal programming (GP) para apoiar a operação do reservatório, assim, foi desenvolvido sob cenários de entrada de múltiplas taxas de garantia de escoamento e metas ecológicas com a combinação de demandas de água ecológica em estado estacionário e de pulso. Os resultados gerados poderiam cumprir com sucesso as metas operacionais predeterminadas para o projeto. Os resultados da modelagem indicaram que a capacidade de desvio e armazenamento de água para o reservatório Danjiangkou seria melhorada devido à operação do Projeto de desvio de água do Sul para o Norte. Os resultados mostraram que os riscos associados a possíveis inundações seriam comparativamente baixos sob as quatro taxas de garantia de escoamento.

2.2 DETALHES DO PISF COM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO NORDESTE SETENTRIONAL

2.2.1 Objetivos gerais do PISF

O objetivo principal do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional é assegurar a oferta de água para uma população e uma região que sofrem com a escassez e a irregularidade das chuvas. Não raro, ações emergenciais são aplicadas para atenuar a situação, mas não atingem os pontos centrais do problema: a pouca disponibilidade e a má distribuição de água na região. O Semiárido Nordestino, na área do Projeto, concentra uma população de cerca de 12 milhões de habitantes. Sem água, essa região estará fadada ao subdesenvolvimento, e a um grande número de brasileiros restarão poucas alternativas de desenvolvimento social e econômico (RIMA, 2004).

Os objetivos básicos do projeto são:

- Aumentar a oferta de água, com garantia de atendimento ao Semiárido;
- Fornecer água de forma complementar para açudes existentes na região, viabilizando melhor gestão da água;
- Reduzir as diferenças regionais causadas pela oferta desigual da água entre bacias e populações.

O objetivo principal do PISF é levar cerca de 2,3% da vazão regularizada do rio São Francisco – uma média de 42,4 m³/s – para às bacias do Ceará, do Paraíba e do Rio Grande do Norte; e mais 21,1m³/s (1,2%) destinados ao Estado de Pernambuco, totalizando 63,5 m³/s, o que garantirá a segurança da oferta hídrica para toda a população beneficiada. Devido às fortes secas e variações climáticas da região Nordeste, foram cada vez mais sendo utilizadas formas alternativas para suprimento hídrico, como a execução de cisternas, construção de reservatórios, entre outros. O grande problema a ser considerado perante essas alternativas de armazenamento de água, é que devido às condições climáticas da região, há forte índice de evaporação, e se mantidos cheios, esses reservatórios acabam não sendo aproveitados da melhor forma.

Com o projeto de integração, haverá uma garantia de disponibilidade hídrica de uma fonte permanente, o rio São Francisco, não sendo mais necessário que os açudes

trabalhem com cotas elevadas. A redução do nível de operação dos reservatórios acarretará uma diminuição das perdas por evaporação e vertimento, representando um ganho de água na região, que aumenta a disponibilidade hídrica e impulsiona à agricultura irrigada e a economia, tal processo denomina-se sinergia hídrica (FARIAS, 2009).

2.2.2 Detalhes executivos do PISF

A obra do PISF é composta por dois eixos que levam água do Rio São Francisco para os pontos de captação em Cabrobó (PE) os quais garantem o suprimento hídrico de reservatórios importantes para a região em diversos estados, como: Castanhão (CE), Armando Ribeiro Gonçalves (RN), Entremontes (PE), Pau dos Ferros (RN), Santa Cruz (RN), Chapéu (PE), Poço da Cruz (PE) e Epitácio Pessoa (PB).

A maior parte do transporte das águas é realizada em canais, cerca de 82% do total, o que pode ser questionado devido à grandes perdas hídricas que ocorrem no sistema. Além desses canais, também será lançada boa parte da água em leitos de rios para condução de seu destino final.

O PISF beneficia as seguintes bacias hidrográficas da região Nordeste (Figura 1):

- Do rio Jaguaribe, no Ceará;
- Do rio Piranhas-Açu, na Paraíba e Rio Grande do Norte;
- Do rio Apodi, no Rio Grande do Norte;
- Do rio Paraíba, na Paraíba;
- Dos rios Moxotó, Terra Nova e Brígida, em Pernambuco, na bacia do rio São Francisco.

Figura 1 - Localização dos Eixos do Projeto



Fonte - RIMA, (2004)

A definição do melhor traçado a ser percorrido pelos canais do Projeto de Integração leva em conta aspectos técnicos, econômicos e ambientais, ou seja, estuda o melhor caminho para conduzir a água, da forma menos custosa possível, e procura interferir o mínimo na natureza, levando o máximo de benefícios para a população do entorno dos canais (RIMA,2004).

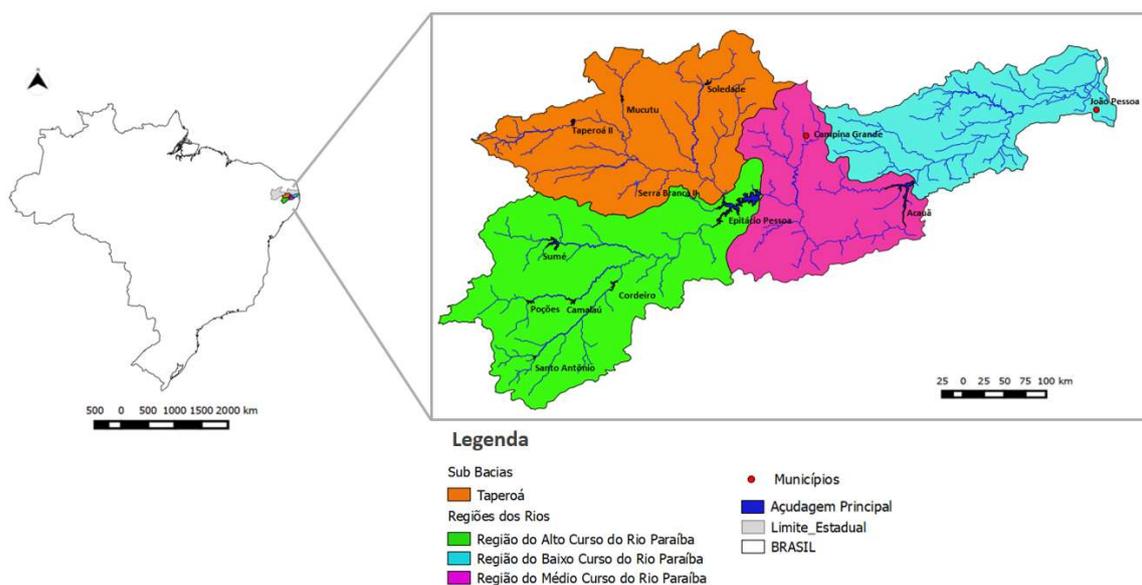
Dessa forma, considerando os objetivos desta pesquisa, levando-se em consideração os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, será possível analisar se esta afirmativa está de acordo com a realidade atual da transposição. Cabe o questionamento se a situação com que esta obra foi concluída, realmente foi a melhor alternativa de levar água com sua máxima eficiência e menores impactos em aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

CAPÍTULO III – METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do rio Paraíba (Figura 2), com uma área de 20.071,83 km², compreendida ente as latitudes 6°51'31" e 8°26'21" Sul e as longitudes 34°48'35"; e 37°2'15"; Oeste de Greenwich, é a segunda maior do Estado da Paraíba, pois abrange 38% do seu território, abrangendo 1.828.178 habitantes que correspondem a 52% da sua população total. Considerada uma das mais importantes do semiárido nordestino, ela é composta pela sub-bacia do Rio Taperoá e Regiões do Alto Curso do rio Paraíba, Médio Curso do rio Paraíba e Baixo Curso do rio Paraíba. Além da grande densidade demográfica, na bacia estão incluídas as cidades de João Pessoa, capital do Estado e Campina Grande, seu segundo maior centro urbano estadual (AESA, 2018).

Figura 2 - Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba



Fonte: Autor

3.1.1 Sub-bacia do Rio Taperoá

Para fins de análises e administração, e devido a sua larga escala de abrangência, a bacia hidrográfica do rio Paraíba foi dividida em sub-bacia do rio Taperoá e três regiões hidrográficas (alto, médio e baixo Paraíba) (PERH-PB, 2006).

Seu principal rio é o Taperoá, caracterizado por seu regime intermitente. Nasce na Serra do Teixeira e desemboca no rio Paraíba, no Açude de Boqueirão (reservatório Epitácio Pessoa). Drena uma área aproximada de 5.661,45 km² e apresenta clima semiárido quente, cujas temperaturas variam entre 18 a 22 °C a mínima, e a máxima entre 28 e 31 °C. A precipitação média anual oscila entre 400 e 600 mm e se concentra no período de dois a quatro meses. Esta bacia recebe contribuição dos rios São José dos Cordeiros, Floriano, Soledade, Boa Vista e Riacho dos Canudos (OLIVEIRA, 2013).

3.1.2 Região do Alto Curso do Rio Paraíba

O rio principal dessa região da bacia é o rio Paraíba, que nasce da confluência dos rios Sucurú e o rio do Meio localizado no município de Sumé. Essa região também recebe aflúências dos rios Monteiro e Umbuzeiro.

Encontra-se em altitudes superiores a 600m e drena uma área de aproximadamente 6.717,39 km². Seu clima é semiárido quente, com temperaturas mínimas variando entre 18 e 22 °C, e com máximas entre 28 e 31 °C. Os índices pluviométricos tem em média anual entre 300 e 600 mm, chegando a atingir 800 mm em períodos mais chuvosos, e apresenta prolongado tempo de estiagem podendo chegar a até 10 meses. Além de baixos índices pluviométricos, há uma significativa evaporação na região, variando entre 2500 e 3000 mm ao ano, com insolação de 7 a 8 horas diárias no período de janeiro a julho, e de 8 a 9 horas diárias no período de agosto a dezembro.

Nesta região de vegetação natural predominante do tipo caatinga, encontram-se os cinco principais açudes públicos da bacia do rio Paraíba, sendo: o açude Epitácio Pessoa, o segundo maior do estado com capacidade de 411 milhões de m³, localizado em Boqueirão; o açude Poções, com capacidade de 29,86 milhões de m³ e o açude Cordeiro, com capacidade de 69,96 milhões de m³, localizados em Monteiro; o açude Camalaú, com capacidade de 46,43 milhões de m³, localizado em Camalú; e o açude Sumé, com capacidade de 44,86 milhões de m³, situado na cidade de mesmo nome (OLIVEIRA, 2013).

3.1.3 Região do Médio Curso do Rio Paraíba

Essa região é responsável por drenar aproximadamente 3.760,65 km², onde se encontra entre as regiões do Alto Curso e Baixo Curso do Rio Paraíba. Recebe contribuições dos rios São Pedro, Catolé, Ingá e do riacho Bodocongó.

Assim como a região do Alto Curso do Rio Paraíba, o Médio Curso também é classificado como semiárido quente, com índices pluviométricos variando entre 600 e 1100 mm. A evaporação dessa região também é bastante significativa, variando em torno de 1600 e 3000 mm.

De acordo com Farias (2009), sua área abrange os seguintes municípios: Alcantil, Aroeiras, Barra de Santana, Barra de São Miguel, Boa Vista, Boqueirão, Campina Grande, Caturité, Fagundes, Gado Bravo, Itatuba, Montadas, Natuba, Pocinhos, Puxinanã, Queimadas, Riacho de Santo Antônio, Santa Cecília e Umbuzeiro. Suas temperaturas variam entre 18 e 22°C a mínima e a máxima atinge de 28 e 31 °C, com precipitação média anual decrescendo de leste para o oeste. Sua vegetação predominante é do tipo caatinga hiperxerófila, hipoxerófila, floresta caducifólia e subcaducifólia. Nesta região está situado o segundo maior reservatório da bacia do Rio Paraíba e o terceiro maior reservatório estadual, o Argemiro Figueiredo também conhecido como Acauã.

3.2 DESCRIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS RECEPTORES DA VAZÃO DO PISF

3.2.1 Açude Poções

De acordo com o DNOCS (2018), a barragem do Açude Poções está situada no riacho Mulungu, no município de Monteiro, estado da Paraíba. A cidade de Monteiro dista 164 km de Campina Grande e 292 km de João Pessoa, capital do Estado. A finalidade principal do açude é o aproveitamento do potencial hídrico para irrigação. A bacia hidrográfica do açude tem 656 km² e a região apresenta uma precipitação média de 588 mm. O barramento forma um lago que cobre uma área com 773,41 ha e acumula um volume de 29.861.562 m³.

3.2.2 Açude Camalaú

O reservatório de Camalaú, responsável pelo abastecimento da cidade de mesmo nome do referido reservatório, situa-se na região de Alto Curso do Rio Paraíba. Apresenta aproximadamente uma capacidade para armazenamento de 46 Hm³, e suas águas são utilizadas também para irrigação e piscicultura. Segundo Vieira (2008), a piscicultura beneficia 21 pescadores e tem instalado 60 tanques-rede (o limite máximo é de 178).

3.2.3 Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)

O açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), está localizado a 165 km da capital do estado e a 44 km de Campina Grande. Está situado na porção semiárida da bacia do Rio Paraíba, abastecendo 26 sedes municipais e distritos espalhados pelas microrregiões do Cariri e do Agreste.

O reservatório, com capacidade estimada em 411.686.287 m³, é alimentado por uma bacia hidrográfica de cerca de 14 mil km², cuja precipitação se concentra em quatro meses do ano (fevereiro a maio), sendo uma das mais baixas do Brasil.

O açude Boqueirão está inserido na sub-bacia hidrográfica do Alto Paraíba e recebe suas águas dos rios Paraíba e Taperoá. Localiza-se entre as latitudes sul de 07°20'48" e de 08°18'12", longitude oeste de 36°07'44" e 37°21'22". Apresenta temperatura média de 27°C, com precipitação média de 450 mm/ano e evaporação potencial média em torno de 2000 mm/ano.

Este reservatório enfrentou várias crises hídricas na região onde está inserido, em diversos períodos de tempo em que se encontrava em funcionamento. A seca que mais impactou o açude Boqueirão, foi a que teve início no ano de 2012 e se estendeu até a chegada da transposição em abril de 2017. Antes da finalização da obra do Projeto de Transposição do Rio São Francisco (PISF), o reservatório de Boqueirão sofreu com o quase total esgotamento dos seus recursos, sem previsão de chuvas para novas recargas. De acordo com dados da AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba), no dia 18 de abril de 2017, o açude apresentou cerca de 2,91% de sua capacidade total, batendo um novo recorde negativo desde a fundação e primeira sangria do açude, no fim da década de 1950.

3.2.4 Açude Argemiro de Figueiredo (Acauã)

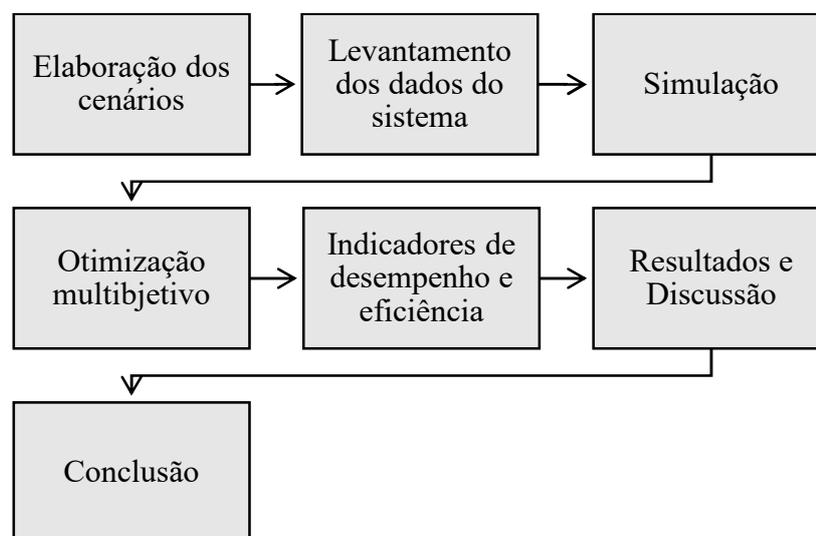
O açude Argemiro Figueiredo conhecido como Acauã, está situado no município de Natuba, na região do Médio Curso do Rio Paraíba e se localiza nas coordenadas 7°27'07"S de latitude e 35°34'22"O de longitude. Sua construção foi concluída em março de 2002 e apresenta capacidade máxima de 253 milhões de metros cúbicos, o que o torna o terceiro maior reservatório do Estado. Esse reservatório foi projetado para atender ao abastecimento das cidades de Itabaiana, Salgado de São Felix, Natuba e Itatuba, dar um reforço ao sistema integrado de o abastecimento de Campina Grande e para o controle de cheias no baixo Paraíba (FARIAS, 2009).

De acordo com Vieira (2008), sua finalidade é o abastecimento urbano das cidades de sua abrangência, tendo três sistemas adutores: Acauã – ramal norte, leste e oeste; a prática de piscicultura intensiva com cerca de 15 tanques-redes, em média, colocadas de forma permanente; o abastecimento rural das propriedades situadas nas margens do açude; na dessedentação animal e irrigação de pequenas áreas cultivadas nas margens do açude.

3.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para realização dessa pesquisa foi seguido às etapas do fluxograma a seguir (Figura 3).

Figura 3 - Procedimento metodológico da pesquisa



Fonte: Autor

Em resumo, este trabalho traz um estudo sobre uma possível forma de transportar parcela da vazão exógena advinda do PISF na bacia hidrográfica do Rio Paraíba, avaliando as perdas hídricas e financeiras decorrentes do percurso da água no leito do rio e por evaporação nos reservatórios. Sendo assim, criou-se cenários que se diferenciam pela forma de transportar essa vazão e pelo uso das águas, analisados por meio de um modelo de otimização multiobjetivo.

Neste estudo foram considerados os quatro reservatórios da bacia receptores da vazão do PISF (Poções, Camalaú, Eptácio Pessoa, conhecido como Boqueirão e Argemiro Figueiredo, conhecido como Acauã) como também os reservatórios a montante ao reservatório Boqueirão com uma capacidade maior que 10 milhões de metros cúbicos (Sumé, Santo Antônio, Cordeiro, Serra Branca II, Soledade, Mucutu, Taperoá II), pois os mesmos influenciam na vazão afluente ao reservatório. Esses dados foram adicionados as vazões afluentes ao reservatório Boqueirão para o processo de otimização.

Os resultados obtidos para os cenários propostos por meio do processo de otimização, foram avaliados de acordo com os Indicadores de eficiência e desempenho.

3.3.1 Delineamento dos Cenários

Cenário C1

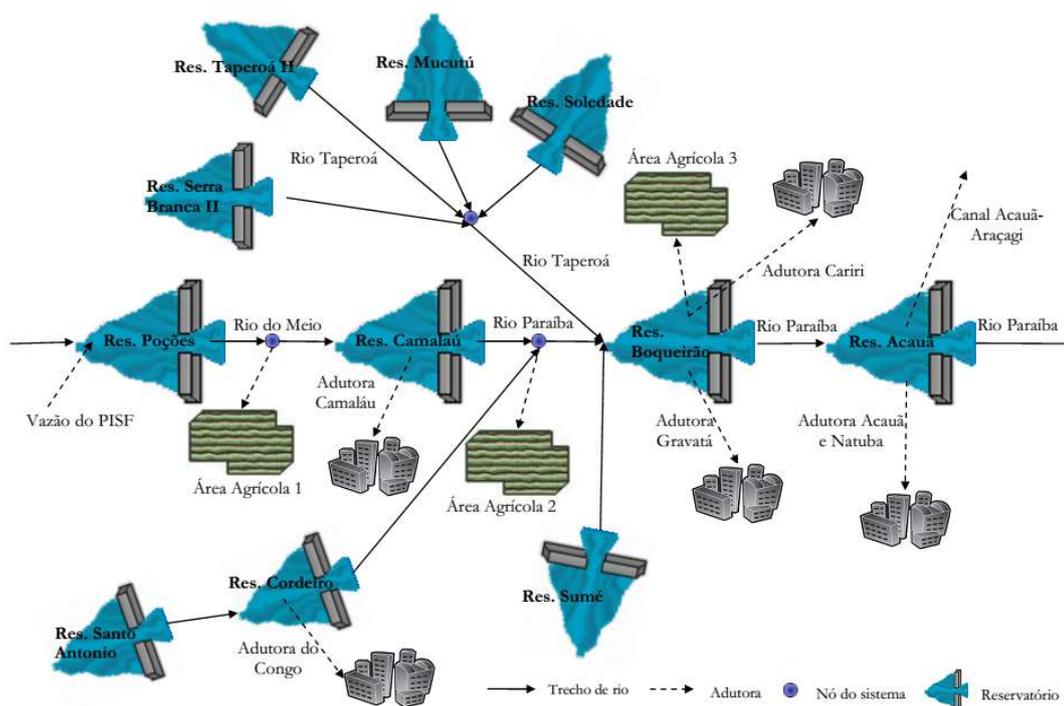
O Cenário C1 representa a situação atual do PISF, que recebe a água da transposição no município de Monteiro-PB e segue para o açude de Poções, e abastece em seguida os reservatórios de Camalaú, Boqueirão e Acauã, de onde sai uma vazão regularizada para abastecer os municípios às margens do rio Paraíba, como pode ser observado na Figura 4. O trecho principal, onde estão inseridos os quatro reservatórios em série, recebe afluições dos demais reservatórios representados na imagem, que foram simulados para mensuração das vazões contribuintes destes para o trecho principal em questão. Este cenário considera a Resolução Conjunta ANA/AESA-PB nº 87, de 05 de novembro de 2018, a qual estabelece as condições de uso de recursos hídricos superficiais e subterrâneos para o Sistema Hídrico Rio Paraíba - Boqueirão,

no Estado da Paraíba, limitando os usos da água da transposição, conforme seu Art. 4º, Incisos I e II:

I – a área de cultivo no entorno do Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) e ao longo do rio Paraíba fica limitada a 250,0 ha (duzentos e cinquenta hectares), para cada trecho;

II – a vazão autorizada a cada usuário de recursos hídricos será limitada à necessária para o cultivo em área máxima de 0,50 ha ou volume máximo diário igual a 25.920 L.

Figura 4 - Layout do sistema para o Cenário C1



Fonte – Autor

Desse modo, para a área agrícola 1 entre os reservatórios de Poções e de Camalaú foi estimada uma área de 50 ha, cuja demanda será de 30,0 L/s para todos os meses do ano. Para a área agrícola 2 entre os reservatórios de Camalaú e de Boqueirão foi estimada uma área de 200 ha, cuja demanda será de 120,0 L/s para todos os meses do ano. Para a área agrícola 3 foi considerada uma área de 250 ha, cuja demanda será de 150,0 L/s para todos os meses do ano.

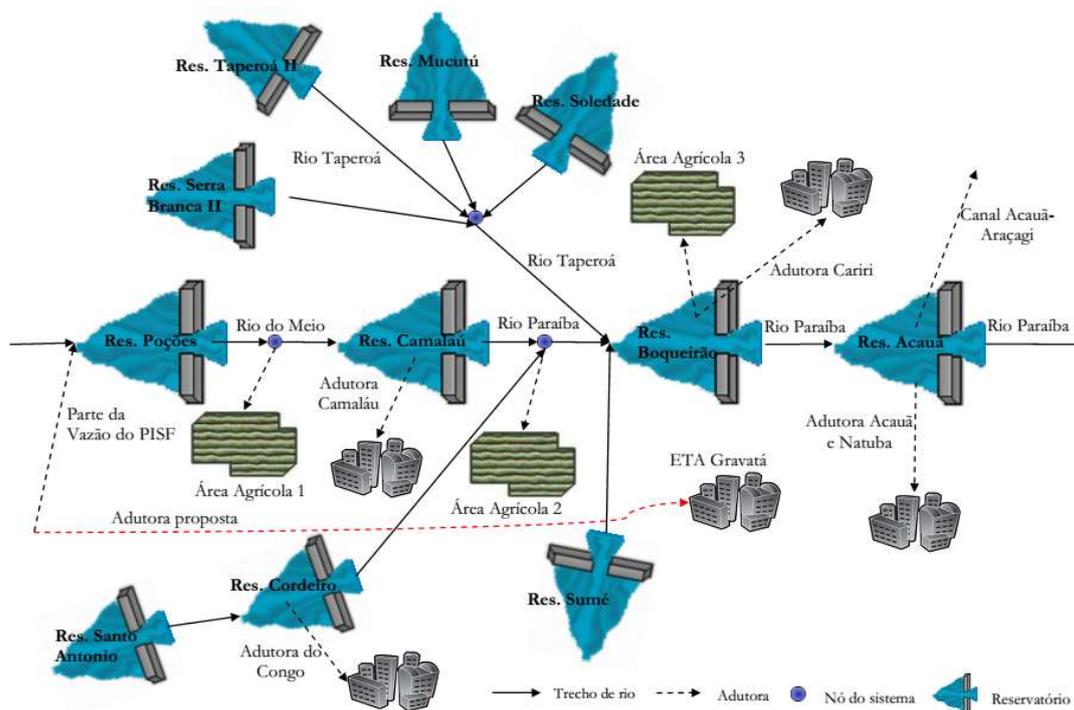
Cenário C2

O Cenário C2 mostra um possível traçado para o transporte das águas do PISF, em que a partir da chegada das águas da transposição em Monteiro, por meio de

adutora, será transportada uma parcela de vazão de água – esta vazão é dependente do valor requerido pela ETA (Estação de Tratamento de Água) de Gravatá, localizada no município de Queimadas – PB - até a ETA para posterior distribuição das demandas de abastecimento, por meio da adutora de Boqueirão (Figura 5), a qual abastece 10 cidades, dentre elas Campina Grande, com o requerimento de maior demanda. Esse valor de vazão, foi calculado de acordo com a progressão populacional (dados dos censos do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), consumo per capita da população e perdas na distribuição de água (dados do SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – série histórica de 2012) em cada município abastecido pela respectiva adutora, como pode ser observado no Anexo 1.

Este cenário também considera a Resolução Conjunta ANA/AESA-PB nº 87, de 05 de novembro de 2018 da mesma forma do Cenário C1, alterando apenas na forma de transportar a água, por meio de adutora e por leito de rio.

Figura 5 - Layout do sistema para o Cenário C2



Fonte- Autor

Cenário C3

O Cenário C3 apresenta a mesma situação do Cenário C1, diferindo apenas em relação às áreas agrícolas, cuja demanda hídrica foi estimada por Oliveira (2013) por meio de um modelo de otimização multiobjetivo maximizando o uso das áreas agrícolas e da água.

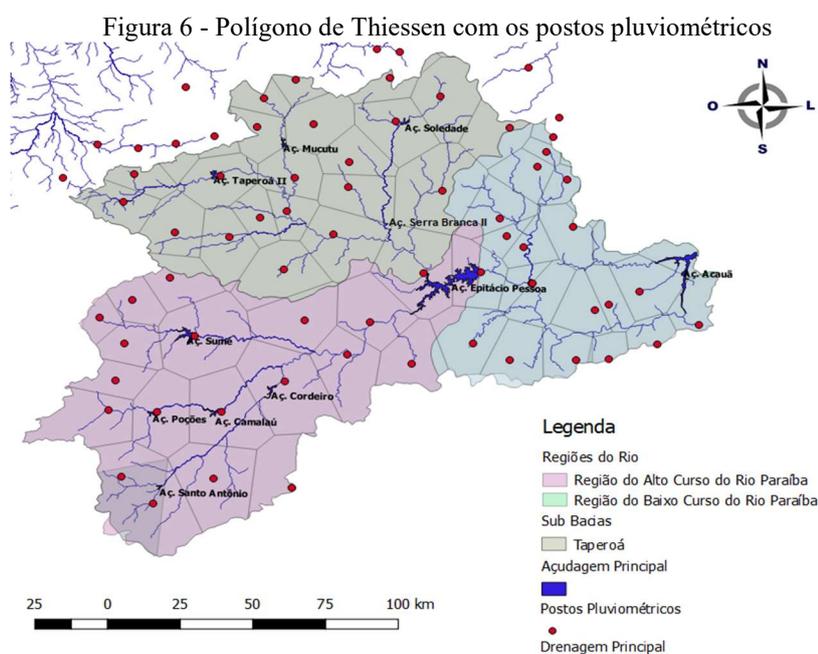
Cenário C4

O Cenário C4 apresenta o mesmo layout do Cenário C2, diferindo apenas com relação às áreas agrícolas, cuja demanda hídrica foi estimada por Oliveira (2013).

3.3.2 Levantamento dos dados do sistema

Precipitação

Os valores de precipitação foram disponibilizados pela AESA com dados históricos de 6 anos, de 2012 a 2017 (anos considerados como uma das maiores secas da região). Foi utilizado o Polígono de Thiessen (Figura 6) - através do software Qgis - para encontrar a chuva média da bacia hidráulica dos reservatórios.



Fonte: Autor

Para calcular a precipitação direta nos reservatórios foram utilizados valores dos postos pluviométricos mais próximos de cada reservatório como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1– Precipitação média (mm) dos postos pluviométricos mais próximos aos reservatórios no período de 2012 a 2017

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
RESERVATÓRIO ACAUÃ – Posto Itatuba											
41,32	40,16	31,31	66,81	74,85	83,17	82,03	21,97	7,39	13,06	5,77	45,44
RESERVATÓRIO BOQUEIRÃO– Posto Boqueirão											
26,26	30,5	9,6	34,23	39,63	37,25	62,95	8,76	9,16	4,58	17,13	17,18
RESERVATÓRIO CAMALAUÍ – Posto Camalaú											
22,55	22,1	51,25	68	26,53	14,9	21,17	4,67	0,86	3,66	12,4	31,38
RESERVATÓRIO POÇÕES – Posto Monteiro											
69	38,21	81,93	90,3	48,82	31,9	32,46	7,05	1,96	1,7	4,88	50,2
RESERVATÓRIO SOLEDADE – Posto Soledade											
13,28	35,16	18,05	28,06	37,5	33,26	31,6	6,2	5,56	2,65	2,66	6,98
RESERVATÓRIO MUCUTU – Posto Assunção											
16,6	24,63	64,18	51,93	15,66	20,32	17,02	2,1	0	0	3,66	8,83
RESERVATÓRIO TAPEROÁ II – Posto Taperoá											
50,73	77,2	58,23	79,22	37,08	24,03	31,53	2,06	3,13	3,55	10,26	18,06
RESERVATÓRIO SERRA BRANCA II – Posto Serra Branca											
36,2	28,71	33,13	33,13	34,98	18,26	21,86	3,23	7,75	1,42	6,76	15,35
RESERVATÓRIO SUMÉ – Posto Sumé											
31,55	20,02	67,38	70,86	23,35	15,73	19,16	10,66	1,96	3,38	5,72	21,96
RESERVATÓRIO SANTO ANTÔNIO – Posto São Sebastião do Umbuzeiro											
36,2	64,85	52,05	43,22	28,66	8,68	23,46	2,13	0,96	9,56	15,06	35,06
RESERVATÓRIO CORDEIRO – Posto Congo											
31,64	65,6	43,16	32,85	32,13	12,11	17,18	3,18	0,65	4,41	12,44	20,6

Fonte: AESA (2018)

Vazões afluentes

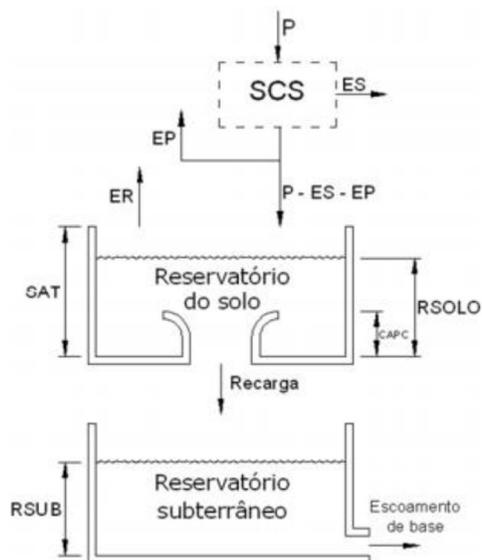
Os dados de vazões afluentes aos reservatórios e nós do sistema foram gerados pelo o modelo hidrológico chuva x vazão SMAP-M (LOPES *et al.*, 1981). O modelo foi calibrado e validado utilizando-se séries de vazões do posto fluviométrico de Poço de Pedras de acordo com Diniz (2008), onde foram geradas as séries de deflúvios

médios mensais de janeiro de 2012 a dezembro de 2017 a partir de dados de precipitação totais mensais.

De acordo com Nepomuceno (2018), o desenvolvimento do SMAP teve como base a experiência com a aplicação dos modelos Stanford Watershed IV e Mero em trabalhos realizados no DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Inicialmente, o SMAP foi desenvolvido para intervalos de tempo diários, sendo posteriormente utilizado em estudos mensais e horários, com devidas adaptações em sua estrutura. Como dados de entrada, o modelo utiliza as alturas totais de precipitação e evaporação no intervalo de tempo desejado, a área de drenagem e condições iniciais da bacia hidrográfica.

A versão mensal do modelo utilizada neste estudo, é constituída por dois reservatórios matemáticos que representam o solo (reservatório do solo) e o aquífero (reservatório subterrâneo), como pode ser visto na Figura 7. O reservatório de superfície é excluído da estrutura do modelo devido ao amortecimento desse reservatório ocorrer em intervalos inferiores a um mês.

Figura 7 - Esquema físico do modelo SMAP mensal



Fonte: Saraiva *et al.* (2010)

Os valores das vazões afluentes médias geradas para cada reservatório no período estudado podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Vazões afluentes médias (m³/s) nos reservatórios no período de 2012 a 2017

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
RESERVATÓRIO ACAUÃ											
0,9	1,13	0,71	1,85	4,68	6,87	12,2	3,17	1,64	0,69	0,23	0,28
RESERVATÓRIO BOQUEIRÃO											
2,01	1,79	1,8	4	4,98	2,18	3,05	0,54	0,21	0,12	0,22	0,35
RESERVATÓRIO CAMALAU											
0,06	0,06	0,25	1,17	0,41	0,1	0,15	0,02	0,003	0,004	0,015	0,12
RESERVATÓRIO POÇÕES											
1,07	0,54	1,53	2,23	1,32	0,72	1,1	0,13	0,01	0,004	0,01	0,33
RESERVATÓRIO SOLEDADE											
0,018	0,044	0,04	0,07	0,14	0,12	0,13	0,015	0,01	0,001	0,0006	0,004
RESERVATÓRIO MUCUTU											
0,08	0,12	0,74	0,89	0,25	0,14	0,18	0,013	0,006	0,0015	0,011	0,03
RESERVATÓRIO TAPEROÁ II											
0,56	0,42	1,48	1,75	0,85	0,22	0,33	0,04	0,02	0,01	0,03	0,08
RESERVATÓRIO SERRA BRANCA II											
0,04	0,015	0,012	0,014	0,04	0,005	0,01	0,001	0,002	0,0004	0,0008	0,002
RESERVATÓRIO SUMÉ											
0,89	0,31	1,17	3,45	1,71	0,65	1,02	0,26	0,03	0,04	0,03	0,08
RESERVATÓRIO SANTO ANTÔNIO											
0,17	0,44	0,29	0,25	0,17	0,06	0,2	0,009	0,0005	0,009	0,11	0,19
RESERVATÓRIO CORDEIRO											
0,22	0,42	0,49	0,93	0,47	0,15	0,302	0,03	0,002	0,015	0,08	0,332

Fonte: Autor

Evaporação

O volume de água mensal evaporado nos reservatórios foi obtido a partir da multiplicação da área do espelho d'água pela lâmina evaporada em tanques evaporimétricos Classe A. Para os onze reservatórios foram utilizadas medições de evaporação obtidas de três postos de estações climatológicas mais próximas dos reservatórios, sendo adotados os valores mensais do coeficiente do tanque Kt estimados por Oliveira *et al.* (2005) para a região do cariri paraibano.

Os dados do posto Monteiro foram usados nos reservatórios de Poções, Camalaú, Cordeiro, Santo Antônio e Sumé, o do posto São João do Cariri foi utilizado nos reservatórios de Taperoá II, Mucutu, Serra Branca II, Soledade e Boqueirão e do posto Campina Grande foi utilizado no reservatório de Acauã.

Os dados de evaporação média mensal nos reservatórios e os respectivos coeficientes do tanque Kt podem ser observados por meio da Tabela 3.

Tabela 3 - Evaporação média mensal (mm) dos reservatórios e valores de Kt

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
POSTO MONTEIRO												
EVAPORAÇÃO												
(MM)	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273
KT	0,78	0,8	0,78	0,89	0,93	0,92	0,87	0,82	0,76	0,79	0,8	0,8
POSTO SÃO JOÃO DO CARIRI												
EVAPORAÇÃO												
(MM)	228,54	202,38	200,12	174,24	153,57	119,4	128,84	159,6	197,16	250,53	238,64	238,01
KT	0,78	0,8	0,78	0,89	0,93	0,92	0,87	0,82	0,76	0,79	0,8	0,8
POSTO CAMPINA GRANDE												
EVAPORAÇÃO												
(MM)	147,1	132,5	108,1	88,3	102,5	64,9	73	105,1	126,1	153,6	151,2	165
KT	0,78	0,8	0,78	0,89	0,93	0,92	0,87	0,82	0,76	0,79	0,8	0,8

Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2005)

Abastecimento urbano

Para cálculo do abastecimento urbano, foi feito um estudo das adutoras inseridas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba com seus respectivos municípios abastecidos por cada adutora. Para análise do crescimento populacional, foram usados os dados disponibilizados pelo IBGE, nos censos de 1980, 1991, 1996, 2000, 2007 e 2010. Com esses dados foi possível fazer uma estimativa populacional e consequentemente o consumo per capita de cada município abastecido. Foi utilizado o software, LAB Fit (SILVA *et. al.*, 2004), para tratamento de dados experimentais para estimar esses valores.

De acordo com Farias (2009), para determinar a vazão de demanda máxima é necessário fazer alguns estudos, tais como: previsão de população e a estimativa de consumo, e a partir daí determinar a vazão de projeto, no final do período de alcance. Neste estudo o horizonte de projeto é o ano 2024, ou seja, de 6 anos.

Os dados de consumo *per capita* de cada município e dados das perdas no sistema de distribuição da água foram coletados no site do SNIS para o ano de 2012. A

estimativa de consumo per capita acrescida das perdas na distribuição foi feita utilizando estes dados do SNIS como pode ser verificado no Anexo 1.

A Tabela 4 apresenta os valores anuais utilizados no estudo.

Tabela 4 - Vazões requeridas (m³/s) para as adutoras no período de 2019 a 2024

Adutoras Bacia Rio Paraíba	Fonte hídrica	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Camalaú	Açude Camalaú	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Congo	Açude Cordeiro	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
Cariri	Açude Boqueirão	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Gravatá	Açude Boqueirão	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,13
Acauã e Natuba	Açude Acauã	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28

Fonte: Autor

Demandas para irrigação

Para a irrigação com as águas do PISF, foi considerada para os Cenários C1 e C2 a irrigação conforme a RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/AESA-PB N° 87, de 5 de novembro de 2018, a qual permite a irrigação apenas para as culturas temporárias.

A Tabela 5 apresenta os valores da vazão de cada área agrícola para os Cenários C1 e C2.

Tabela 5 – Vazão das áreas agrícolas para os Cenários C1 e C2 (L/s)

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
ÁREA AGRÍCOLA 1 – 50 HA											
30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
ÁREA AGRÍCOLA 2– 200 HA											
120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
ÁREA AGRÍCOLA 3– 250 HA											
150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0

Fonte: Autor

Para os Cenários C3 e C4, foram considerados os resultados de Oliveira (2013), nos quais as demandas hídricas de irrigação foram estabelecidas realizando um plano de cultivo das culturas agrícolas cultivadas nos municípios de Monteiro e Boqueirão, cujas informações foram obtidas através da Associação de Agricultores de cada localidade.

A Tabela 6 apresenta os valores da vazão de cada área agrícola para os Cenários C3 e C4.

Tabela 6 – Vazão das áreas agrícolas para os Cenários C3 e C4 (L/s)

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PERÍMETRO DE POÇÕES – 356 HA											
0,00	38,51	57,89	36,19	30,31	0,00	0,00	113,4	259,2	275,7	131,3	0,00
PERÍMETRO DO CONGO – 156 HA											
0,00	16,88	25,37	15,86	13,28	0,00	0,00	49,72	113,5	120,8	57,54	0,00
PERÍMETRO BOQUEIRÃO – 1020 HA											
444,1	207,8	224,4	198,7	336,2	299,3	265,1	304,7	439,9	729,4	594,7	890,9

Fonte: Adaptado de Oliveira (2013)

Cobrança pela água transposta

De acordo com a Lei 9.433/1997 em seu Art. 19, é preconizado que deve ser realizada a cobrança do uso, para reconhecimento de que a água é um recurso dotado de valor econômico incentivando assim a racionalização do seu uso, além da obtenção de recursos financeiros para financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos.

Conforme Oliveira (2013), para cobrança pelo serviço de adução de água bruta, pode-se citar a tarifa de demanda, consumo e os valores acrescidos da cobrança pelo uso da água. A primeira tarifa é devida aos custos operacionais fixos: manutenção das instalações, obras e equipamentos; operação e administração; demanda de energia elétrica referente à potência instalada das estações de bombeamento; seguros, impostos e taxas de caráter fixo; programas ambientais; e taxa de administração da Entidade Operadora Federal. Já a tarifa de consumo é proveniente dos custos operacionais variáveis do consumo de energia elétrica para bombeamento de água; encargos tributários respectivos; taxa de administração da Entidade Operadora Federal; e demais gastos necessários para a prestação do serviço.

De acordo com a Resolução nº 67, de 11 de Setembro de 2018, considerando que compete à ANA (Agência Nacional de Águas) regular a prestação dos serviços de adução de água bruta do PISF, cabendo-lhe o estabelecimento de tarifa, a tarifa de disponibilidade para 2018 terá o valor de R\$ 0,244/m³ e a tarifa de consumo terá o valor de R\$ 0,801/m³, sendo estes pagamentos de responsabilidade dos Estados

beneficiados pelo projeto. Estes valores estabelecidos são utilizados na otimização multiobjetivo.

3.3.3 Dados estruturais dos reservatórios

Os dados dos reservatórios adotados no modelo de otimização, tanto estruturais quanto operacionais, dizem respeito às relações cota-área-volume; volumes de armazenamento máximos e mínimos permitidos, características hidráulicas das tomadas d'água, descargas de fundo e vertedouros (SANTOS, 2007).

Relação Cota x Área x Volume

Os dados das curvas cota-área-volume, das descargas de fundo e vertedouros foram obtidos do Cadastro de Açude do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do rio Paraíba (TC/BR RIVERSIDE TECHNOLOGY, 2001). Os dados estão no Anexo 2.

Volumes de água máximos, mínimos e inicial dos reservatórios

Os dados de volume também foram disponibilizados pela AESA. Na Tabela 7 estão apresentados os valores máximos e mínimos dos reservatórios e também o volume inicial referente ao mês de janeiro de 2012.

Tabela 7 – Volumes dos reservatórios (hm³)

RESERVATÓRIO	VOLUME MÁXIMO (HM ³)	VOLUME MÍNIMO (HM ³)	VOLUME INICIAL (HM ³)
SANTO ANTONIO	24,42413	0,43	18,155866
CORDEIRO	69,965945	1,526365	44,84657
POÇÕES	29,861562	0,582125	15,37
CAMALAÚ	46,43752	0,16	26,58
SUMÉ	36,8	0,185437	35,48
SERRA BRANCA II	14,042568	0,9265	10,0365
TAPEROÁ II	15,1489	0,02815	9,9341
MUCUTU	25,37	0,65	21,056435
SOLEDADE	27,0581	3,5216	13,20398
BOQUEIRÃO	411,686287	34,19	373,6
ACAUÁ	253,1	2,03	205,78

Fonte –AES A (2018)

3.4 CRITÉRIOS OPERACIONAIS

Os cenários observaram os seguintes pressupostos para operação do sistema:

- O período de estudo corresponde a 6 (seis) anos, iniciando o processo de otimização no mês de janeiro;
- O volume de água inicial dos reservatórios foi considerado igual ao do dia 01 de janeiro de 2012;
- 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 dos reservatórios, em todos os meses, foi considerado igual à capacidade dos mesmos;
- As capacidades das tomadas d'água destinada ao abastecimento humano foram consideradas iguais as suas respectivas demandas;
- As perdas por evaporação e a infiltração em cada calha do rio foram consideradas da ordem de 5% entre os reservatórios Poções e Camalaú; de 20% entre Camalaú e Boqueirão e de 20% entre Boqueirão e Acauã.
- O Canal Acauã-Araçagi tem uma capacidade máxima de 10 m³/s, sendo esse valor considerado como sua demanda;
- As prioridades de atendimento foram: 1^a atendimento da demanda de abastecimento urbano das adutoras; 2^o atendimento da demanda das áreas agrícolas; 3^o atendimento da demanda do canal Acauã-Araçagi; 4^o atendimento ao volume meta dos reservatórios.

3.4.1 Modelo de Simulação

Com o intuito de verificar as vazões defluentes (vertidas) dos reservatórios Santo Antônio, Cordeiro, Sumé, Soledade, Mucutu, Taperoá II e Serra Branca II, que afluem para o reservatório Boqueirão, foi realizado a simulação da operação de cada reservatório separadamente utilizando o seguinte modelo:

$$Vr_{t+1} = Vr_t + Qa_t - R_t + Pr_t - Evr_t - Qv_t \quad (1)$$

$$Vr_{min} \leq Vr_t \leq Vr_{max} \quad (2)$$

Onde: Vr_t é o volume do reservatório no início do ano t ; Vr_{t+1} é o volume do reservatório no final do ano $t+1$; Qa_t é a vazão afluente ao reservatório durante o ano t ; R_t é o volume retirado de água do reservatório durante o ano t ; Pr_t é a precipitação direta sobre o espelho d'água do reservatório durante ano t ; Evr_t é o volume evaporado no reservatório durante o ano t , Qv_t é o volume vertido do reservatório durante o ano t ; Vr_{min} é o volume mínimo (ou morto) do reservatório; Vr_{max} é a capacidade máxima do reservatório.

As retiradas de água do reservatório foram efetuadas utilizando a chamada Política de Operação Linear Padrão (SLOP, da abreviação em inglês) (Loucks *et al.*, 1981). A SLOP especifica a vazão de retirada do reservatório em função da água disponível (volume total e influxos previstos). Quando a disponibilidade hídrica é menor do que as demandas, todo o armazenamento é liberado para satisfazer as demandas, do contrário o excesso de água é armazenado no reservatório até que sua capacidade de acumulação seja atingida e o vertimento ocorra.

3.4.2 Modelo de otimização quantitativo

Para avaliar o uso da água nos quatro reservatórios receptores da vazão do PISF e as perdas hídricas no sistema estudado foi utilizado o modelo de otimização multiobjetivo desenvolvido por Santos *et al.* (2011). O modelo é baseado em programação linear sucessiva, utilizando o Toolbox Optimization do software MATLAB 6.5 com o Método do Ponto Interior para a busca da solução ótima. Para tanto, linearizações apropriadas das não linearidades intrínsecas aos processos de cada um de seus componentes tiveram que ser pesquisadas e implementadas através do uso combinado do Artificio de Linearização por Segmentos e da Programação Linear Sequencial.

O modelo se destina a otimizar os múltiplos usos de um sistema de reservatórios, com a implantação ou melhoramento da operação das áreas irrigadas. O mesmo trabalha com variáveis relacionadas aos elementos naturais, tais como: hidroclimáticos e hidroagrícolas, como também outras variáveis (demandas hídricas, características físicas dos componentes, etc.) identificadas no estudo do sistema

hídrico. Para estes elementos, são definidas as informações necessárias ao modelo para a entrada de dados, envolvendo: os reservatórios, as demandas, calhas dos rios e perímetros irrigados.

A operação do reservatório e dos nós é fundamentada na equação do balanço hídrico destes elementos naturais, mesmo quando se faz uso de demandas fixas e variáveis. A demanda hídrica de um perímetro irrigado é determinada com base na necessidade suplementar líquida de irrigação, estabelecida através do balanço hídrico, no solo, para as culturas selecionadas, estando a área a ser plantada limitada pelos demais usos do reservatório. O modelo também leva em consideração os diferentes tipos de sistemas de irrigação e suas necessidades de altura manométrica, as áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura, os custos de água e de produção, os aspectos econômicos e a combinação ou variação nas fontes de bombeamento e a quantidade de água captada.

Como se trata de uma otimização multiobjetivo, utilizou-se o Método das Ponderações, na qual cada função objetivo é normalizada sendo atribuídos pesos para definir as prioridades de atendimento.

Neste trabalho, o modelo de otimização tem como objetivo principal prover um estudo da operação integrada do sistema de reservatórios e do atendimento às demandas do sistema com foco na alocação ótima dos recursos hídricos, entre os múltiplos usos via uma análise multiobjetivo.

Função Objetivo

O processo de otimização começa pela Função Objetivo (FO), a qual representa a medida de desempenho do sistema em estudo. Ros e Barros (2003) concluíram que a escolha da função objetivo a ser otimizada interfere na política de operação e deve ser definida com cuidado.

De acordo com Santos *et al.* (2011), a função objetivo especificada permite a medida do desempenho do modelo e está sujeita às inúmeras restrições, representadas por equações de natureza linear e não linear que traduzem as limitações físicas dos reservatórios, perímetros irrigados e equipamentos hidráulicos, limitações hidrológicas, legais, econômicas e sociais, inerentes aos sistemas de usos múltiplos.

Para esta pesquisa, o modelo é representado pelos seguintes tópicos, os quais são levados em consideração nas equações da FO, segundo Oliveira (2013):

- **Demandas nas tomadas de água (DTDQ):** permitem a captação de água nos reservatórios do sistema para atender determinados requerimentos de consumo, objetivando a minimização no déficit do atendimento para as demandas nas tomadas d'água e nós do sistema.
- **Volume meta dos reservatórios (VMR):** destina-se a manter o volume de água do reservatório em certo nível para atender certas demandas, como controle de cheias, recreação, piscicultura, ou geração de energia elétrica. Um critério operacional atribuído aos reservatórios é que o volume final no último ano seja igual ou maior ao volume inicial do reservatório em estudo.

Função Multiobjetivo

De acordo com Santos *et al.* (2011), o modelo permite efetuar uma análise multiobjetivo através do Método das Ponderações, sendo cada função objetivo, descrita anteriormente, normalizada. Logo a função objetivo do modelo é dada pela Equação 3.

$$\text{Min}f_0 = w_1 * DTDQ + w_2 * VER + w_3 * VMR - w_4 * RL - w_5 * MO \quad (3)$$

Onde,

w_i – coeficiente de ponderação que mede a relativa importância (ou prioridade de atendimento) dada a cada objetivo, $i = 1, \dots, 5$. Quando $w_i = 0$ a função objetivo i não será considerada no processo de otimização.

Equações de restrições

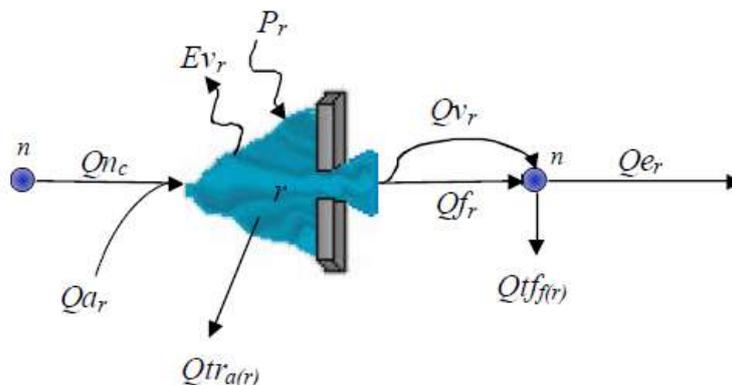
As equações de restrições estão relacionadas à operação dos reservatórios e aos critérios operacionais e agronômicos.

Operação dos reservatórios

De acordo com Santos *et al.* (2011), os reservatórios podem ser conectados a outros elementos do sistema, a montante, a um nó do sistema onde recebe vazões afluentes, e a jusante, o descarregador de fundo, vertedouros e tomadas de água,

através de nós (Figura 8). A vazão em cada um destes elementos depende de seus parâmetros hidráulicos e do nível de água dos reservatórios.

Figura 8 - Diagrama representando os componentes do reservatório avaliados pelo modelo



Fonte - SANTOS, 2007

O reservatório tem vários dados e equações associadas a ele. Dentre os dados podemos ressaltar os de precipitação, evaporação, volume morto, capacidade máxima, volumes operativos, etc. Existem, também, relações entre a cota da superfície do espelho líquido, a área desta superfície e o volume. Por outro lado, tem-se que efetuar, a cada mês t , o balanço hídrico do reservatório, que é baseado no princípio de conservação da massa e determina a variação mensal do volume armazenado do reservatório expressa pela seguinte equação:

$$VR_r(t) = VR_r(t-1) + Q_{ar}(t) - \sum_{ar} Q_{tra(r)}(t) - Q_{fr}(t) - Q_{vr}(t) + P_r(t) - Ev_r(t) + Q_{nc}(t) \quad (4)$$

Onde,

r – índice que representa o r -ésimo reservatório do sistema;

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

$VR_r(t)$ – volume do reservatório r no final do mês t ;

$VR_r(t-1)$ – volume do reservatório r no início do mês t ;

$Q_{ar}(t)$ – vazão afluyente ao reservatório r durante o mês t ;

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

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

$Q_{tra(r)}(t)$ – a -ésima vazão de tomada d'água do reservatório r no mês t ;

$Q_{tff(r)}(t)$ – f -ésima vazão de tomada d'água de fundo do reservatório r no mês t ;

$Q_{fr}(t)$ – vazão de descarga de fundo do reservatório r durante o mês t ;
 $Q_{vr}(t)$ – volume vertido do reservatório r durante o mês t ;
 $Pr(t)$ – volume precipitado no reservatório r durante o mês t ;
 $E_{vr}(t)$ – volume evaporado no reservatório r durante o mês t ;
 $Q_{nc}(t)$ – vazão de entrada no reservatório r oriundo de contribuições da c -ésima calha (trecho) do rio à montante do reservatório r no mês t .

Ainda segundo Santos *et al.* (2011), dependendo das vazões afluentes, a alocação mensal de água do reservatório para os diversos usos, as áreas do espelho d'água, as cotas do nível de água e os volumes mensais de água do reservatório variam de mês a mês sendo, portanto, necessário atualizá-los mensalmente. Para tanto, faz-se necessário o uso das relações cota-área-volume de cada um dos reservatórios. A área do espelho de água do reservatório é relacionada com o volume do reservatório através de segmentos de reta na curva área-volume de modo a obter um bom ajuste linear da mesma.

Outros componentes do sistema

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:

$$Q_{nminc}(t) \leq Q_{nc}(t) \leq Q_{nmaxc}(t) \quad (5)$$

Onde,

$Q_{nminc}(t)$ – vazão mínima na c -ésima calha de rio no mês t ;

$Q_{nmaxc}(t)$ – vazão máxima na c -ésima calha de rio no mês t .

As perdas por evaporação e a infiltração nas calhas dos rios são avaliadas através de um coeficiente de perda, que deve ser especificado para o sistema e representa a fração do fluxo que seria perdida durante o percurso na calha do rio.

Processo iterativo de otimização e análise de convergência

O modelo utiliza um procedimento iterativo do uso da PL, denominado Programação Linear Sequencial (ou Sucessiva). Os trechos segmentados do volume do reservatório ($V_{rmr}(t)$) são ajustados em cada iteração de modo a resultarem em um volume de água armazenado de forma correta (SANTOS *et al.*, 2011).

De acordo com Oliveira (2013), na primeira otimização ($l = 1$), os valores de cada trecho segmentado podem estar corretos, indicando assim a solução ótima do problema. Porém, quando isso não ocorre, para uma boa aceitação dos resultados, além da verificação dos valores dos trechos segmentados, são analisados os valores calculados para a função objetivo f_o , sendo avaliado através do erro relativo (*errofo*), dado por:

$$erro_{f_o} = \left| \frac{f_{o_l} - f_{o_{l-1}}}{f_{o_l}} \right| \leq tol \quad (6)$$

Onde,

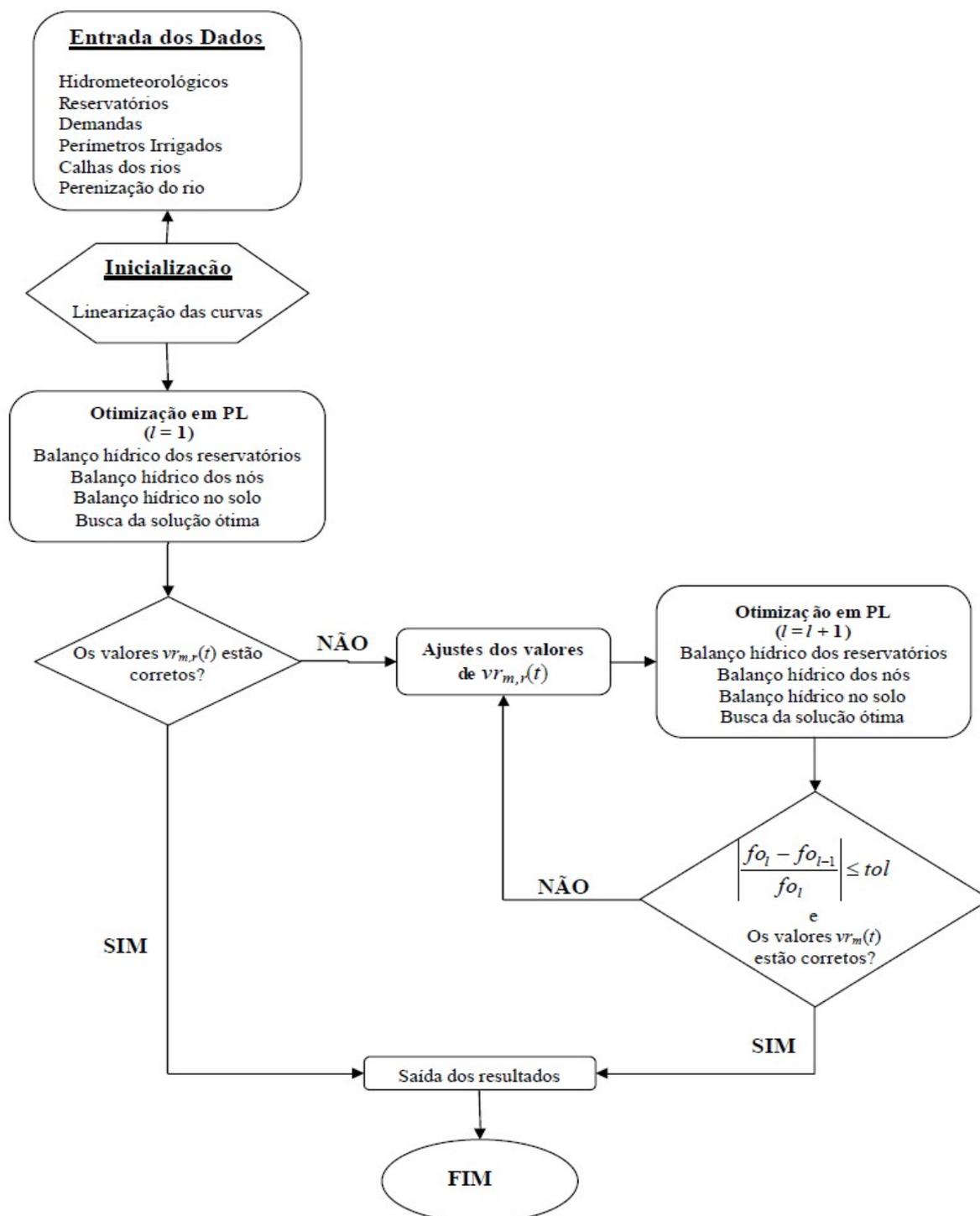
l – indica o número de vezes que está sendo aplicado o processo de otimização em PL ($l = 2$);

f_{o_l} – valor da função objetivo para a l -ésima otimização.

O erro relativo (*errofo*) deve respeitar certo nível de tolerância (tol) especificado para o sistema a ser otimizado. Para esse trabalho, foi utilizada uma tolerância da ordem de 10^{-8} .

O fluxograma geral do modelo está apresentado na Figura 9. É importante ressaltar que as saídas do modelo, que possibilitam extensivas análises de desempenho do sistema hídrico em estudo, são os valores mensais para volumes, cotas e áreas de espelho d'água, vazões mensais de afluxos, de descargas e de sangria por reservatório; vazões mensais nas tomadas d'água e nas calhas do rio; vazões mensais para irrigação por perímetro, áreas irrigadas e mão de obra alocadas por cultura e por perímetro, receita líquida anual auferida por cultura em cada perímetro (SANTOS, 2007).

Figura 9 - Fluxograma do modelo de otimização



Fonte – Santos (2007)

3.4.3 Indicadores de desempenho

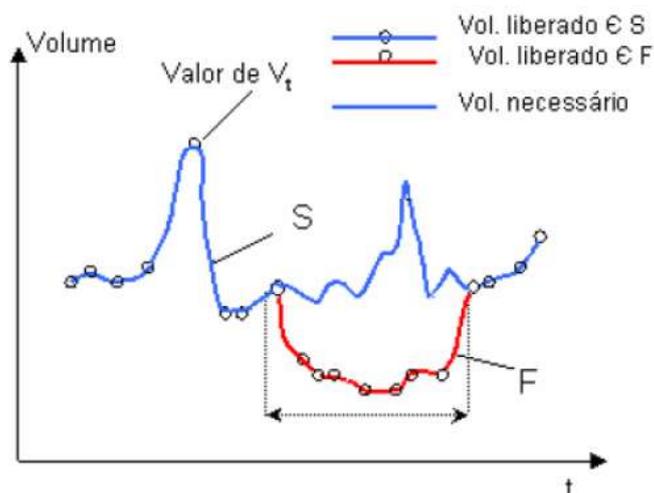
A operação de sistemas de recursos hídricos composto por reservatórios de abastecimento de água, e a incerteza quanto aos aspectos hidrológicos do sistema

podem levar a ocorrência de falhas no atendimento aos requerimentos hídricos. As características destas podem ser representadas pelos indicadores de desempenho.

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

De acordo com Oliveira (2013), tem-se a situação do funcionamento de um reservatório, em que V_t são os possíveis valores do volume liberado do reservatório no tempo t , podendo estar contido em dois conjuntos: S , o conjunto de todos os valores satisfatórios, ou seja, quando o volume liberado do reservatório é igual ao volume necessário para atender à demanda e F , o conjunto de todos os valores insatisfatórios, que ocorre quando o volume liberado é menor do que o volume necessário para atender à demanda (Figura 10).

Figura 10 - Exemplo fictício de descarga em reservatório



Fonte - Celeste (2006)

De acordo com Hashimoto *et al.* (1982), os três indicadores são definidos como:

Confiabilidade

O indicador de Confiabilidade (*Conf*) estabelecido por Hashimoto em 1982, é a capacidade de o sistema hídrico operar sem falhas no atendimento as demandas por determinado período de tempo (Equação 7). Este indicador é uma ferramenta de auxílio aos gestores de recursos hídricos que apresenta eficiência no atendimento aos requerimentos hídricos de um sistema.

$$Conf = \frac{Ns}{N} \quad (7)$$

Onde: Ns = Número de sucessos;

N = Número de períodos de tempo simulados.

Resiliência

O indicador de Resiliência (*Res*) indica a capacidade do sistema hídrico de retornar ao seu estado original após ter passado por períodos de falhas, podendo assim, ao atendimento de suas demandas (Equação 8).

Segundo Lanna (2002), um sistema que tenha muitas falhas, mas tende a se recuperar rapidamente é, em alguns casos, preferível a um sistema com poucas falhas, mas o qual as se recuperem lentamente.

$$Res = \frac{\text{Número de vezes que o sistema sai de uma falha}}{\text{Número total de falhas}} \quad (8)$$

Vulnerabilidade

O indicador de vulnerabilidade demonstra as consequências que uma falha pode ocasionar em todo o sistema hídrico. Assim, a Vulnerabilidade (*Vul*) indica o grau de severidade das falhas ocorridas no sistema. Ela pode ser definida como a média do percentual de déficits do conjunto de todos os valores insatisfatórios (Equação 9).

$$Vul = \sum \frac{\text{Percentual da falha } i \text{ no atendimento a demanda}}{\text{Número total de falhas}} \quad (9)$$

Sustentabilidade

Loucks (2000), ainda propôs um índice de sustentabilidade geral (*sust*) definido por:

$$sust = conf * res * (1-vul) \quad (10)$$

Vulnerabilidade máxima

A análise do déficit máximo (*def_{max}*) representa o valor mínimo de atendimento de uma demanda hídrica nos reservatórios estudados.

$$def_{max} = \frac{V_{inicial} - V_{fin}}{V_{inicial}} \quad (11)$$

3.4.4 Índices de eficiência associados aos reservatórios

Os índices de eficiência associados aos reservatórios são utilizados para comparar cenários de demanda hídrica sob diferentes formas de transporte, leito de rio ou por adutoras, por exemplo. Através deles, visa-se determinar quais cenários obtiveram menores perdas de água no sistema e avaliar os rendimentos hídricos de cada cenário.

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, que são chamados de indicadores de desempenho (como visto no tópico anterior) e os indicadores de eficiência associado aos reservatórios, os quais são baseados em equação de balanço hídrico, representados a seguir segundo Farias *et al.* (2017):

ηVr - Relação entre a variabilidade volumétrica do reservatório e o volume total afluente anual. Este índice indica a variabilidade intra-anual do volume do reservatório.

$$n_{vr} = \frac{Vr_{final} - Vr_{inicial}}{\Sigma Qa_t + \Sigma P_t} \quad (12)$$

Onde:

$Vr_{inicial}$ e Vr_{final} são os volumes iniciais e finais dos reservatórios respectivamente. Qa_t e P_t são respectivamente os volumes mensais afluentes e precipitado no reservatório.

Na fórmula se os valores resultarem em negativos, indica uma depleção do reservatório (anos de seca) e valores positivos, significa um acúmulo, isto é, ganho de água no reservatório.

η_E - É a relação entre o volume evaporado (E_t) (superfície do reservatório) e o volume afluente:

$$n_E = \frac{\Sigma E_t}{\Sigma Qa_t + \Sigma P_t} \quad (13)$$

Onde E_t : evaporação mensal do reservatório.

Este índice tem como características:

- ✓ Estabelecer eficiência no armazenamento de água;
- ✓ Pode indicar que o reservatório tem baixa profundidade e grande área do espelho líquido;
- ✓ Pode ser usado para determinar a rapidez com que a água deve ser usada para reduzir as perdas por evaporação.

η_P - É a relação entre a precipitação direta sobre a bacia hidráulica do reservatório (superfície líquida do reservatório) e o volume anual total afluente. Este índice indica a porcentagem de precipitação direta na bacia hidráulica do reservatório:

$$n_P = \frac{\Sigma P_t}{\Sigma Qa_t + \Sigma P_t} \quad (14)$$

Onde P_t : precipitação direta do reservatório

✓ Esse índice pode indicar que o reservatório tem baixa profundidade e grande área do espelho líquido;

✓ Altas taxas indicam que a bacia de contribuição é pequena.

η_V - Relação entre o volume vertido (QV_t) (sangria do reservatório) e o volume afluente:

$$\eta_V = \frac{\sum QV_t}{\sum Qa_t + \sum P_t} \quad (15)$$

Onde QV_t : derrame do último reservatório

Esse índice tem como características:

- Estabelecer a eficiência quanto ao armazenamento da água (perdas) ou capacidade relativa do reservatório;
- Indica o quanto o reservatório desperdiça a água afluente por vertimento.

η_u - Relação entre o volume de água utilizado (Qu_t) (descarregadores, tomadas d'água) e o volume afluente:

$$\eta_u = \frac{\sum Qu_t}{\sum Qa_t + \sum P_t} \quad (16)$$

Onde Qu_t : reservatórios de volume de água retiram (para suprir demanda urbana, irrigação de animais e irrigação)

Esse índice tem como características:

- Estabelecer a eficiência quanto ao uso da água;
- Altos índices indicam que existem poucos desperdícios;

De acordo com Oliveira (2013), uma relação entre todos os índices citados pode criar diversos cenários, como os de demanda e hidroclimáticos. No primeiro tipo de cenário pode associar uma ou várias demandas com parâmetros (e.g.: evaporação) e compará-los. Nos cenários hidroclimáticos (seco, médio e chuvoso) é possível avaliar a eficiência de várias atividades relacionadas à represa (e.g.: controle de cheias, e prevenção de secas).

Essa relação pode ser expressa por:

$$\eta_{Vr} + \eta_E + \eta_V + \eta_u - \eta_P = 100\% \quad (17)$$

Segundo Farias et al (2017), os indicadores associados à potencialidade dos reservatórios são obtidos pela soma dos influxos mais a precipitação direta e a disponibilidade dos reservatórios é igual à soma dos influxos mais a precipitação direta menos as perdas; As demandas de água são usos consuntivos (consumo de água para abastecimento humano e irrigação). Dentro deste contexto, os seguintes índices são definidos:

Índice de Ativação Potencial (IAP) é definido como a razão entre disponibilidade e potencialidade:

$$IAP = \frac{\text{disponibilidade}}{\text{potencialidade}} = 1 - \text{perdas} = 1 - \eta_E - \eta_V - \eta_{pt} = nvr + \eta_u \quad (18)$$

O Índice de Utilização de Disponibilidade (IUD) é a razão entre demanda e disponibilidade:

$$IUD = \frac{\text{demanda}}{\text{disponibilidade}} = \frac{\eta_u}{nvr + \eta_u} \quad (19)$$

O Índice de Utilização Potencial (IUP) é a razão entre a demanda e a potencialidade:

$$IUP = \frac{\text{demanda}}{\text{potencialidade}} = \eta_u \quad (20)$$

Tais índices também podem ser aplicados ao sistema integrado de reservatórios, onde as afluições que entram no sistema mais a precipitação direta sobre os reservatórios formam a potencialidade. Disponibilidade é a potencialidade menos as perdas em trânsito, evaporações nos reservatórios e volumes de vertimento no leito do rio a jusante do sistema. As demandas são todos os usos consuntivos (abastecimento humano e irrigação).

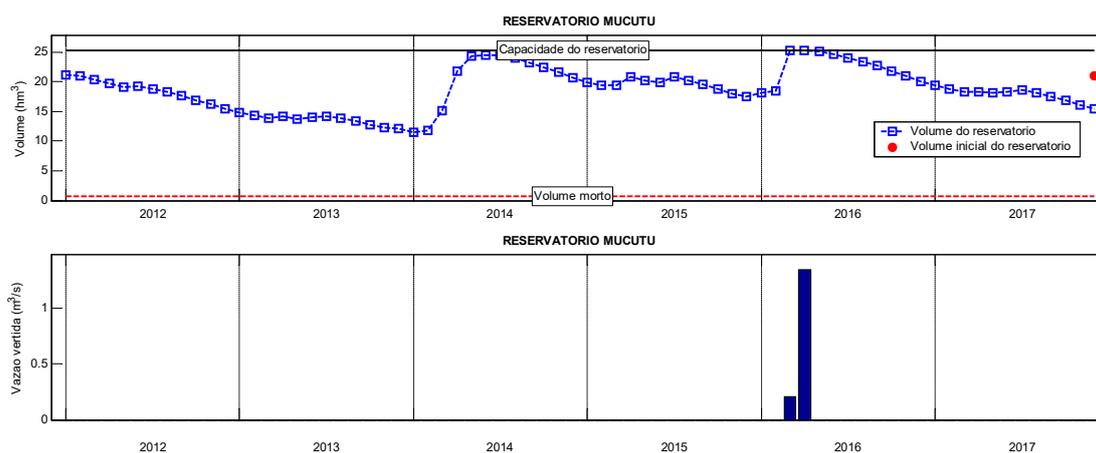
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Como dito anteriormente, o objetivo da simulação é analisar as vazões defluentes dos reservatórios Santo Antônio, Cordeiro, Sumé, Soledade, Mucutu, Taperoá II e Serra Branca II, que afluem para o reservatório Boqueirão.

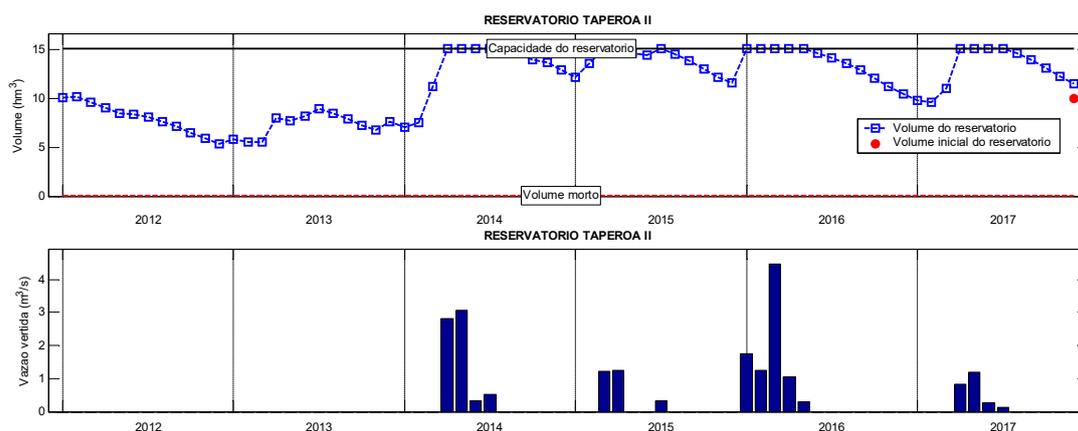
Observa-se que para o reservatório Mucutu (Figura 11) ocorre vertimento apenas em dois meses do ano de 2016. A vazão vertida foi de 0,205 m³/s no mês de março e de 1,35 m³/s no mês de abril de 2016, totalizando 1,555 m³/s toda a vazão vertida. Ocorreram depleções no nível do reservatório em vários períodos, atingindo sua capacidade máxima apenas em alguns meses dos anos de 2014 e 2016.

Figura 11 - Volume de água e vertimento do reservatório Mucutu de 2012 a 2017



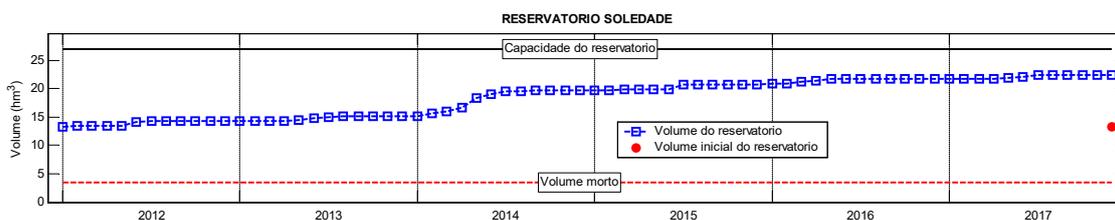
No reservatório Taperoá II (Figura 12), os únicos anos que não houve vertimento foram os de 2012 e 2013. Em maio de 2016 houve o maior volume vertido no mês de março 4,5 m³/s e em julho de 2017 foi registrado o menor vertimento no período analisado, de 0,126 m³/s. Os vertimentos ocorridos ao longo dos anos analisados, totalizaram um volume de 20,734 m³/s.

Figura 12 - Volume de água e vertimento do reservatório Taperoá II de 2012 a 2017



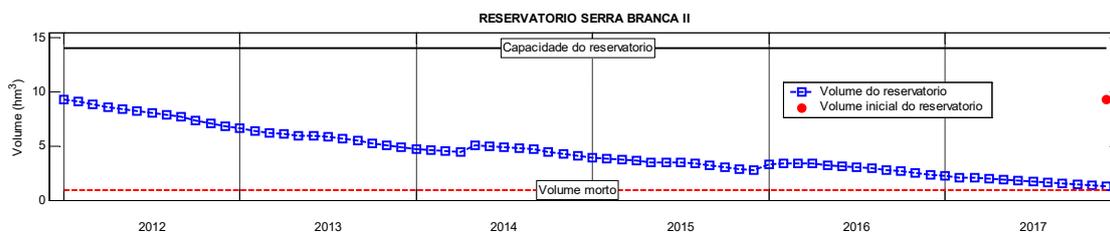
Observa-se que para o reservatório Soledade (Figura 13) não ocorreram vertimento para o período analisado devido à baixa afluência ao reservatório (a maior foi de 0,28 m³/s, em junho de 2014).

Figura 13 - Volume de água do reservatório Soledade de 2012 a 2017



O reservatório Serra Branca II (Figura 14), assim como no reservatório Soledade, não houve vertimento no reservatório, ocorrendo depleção no seu nível em todo o período, chegando ao nível morto no final do ano de 2017.

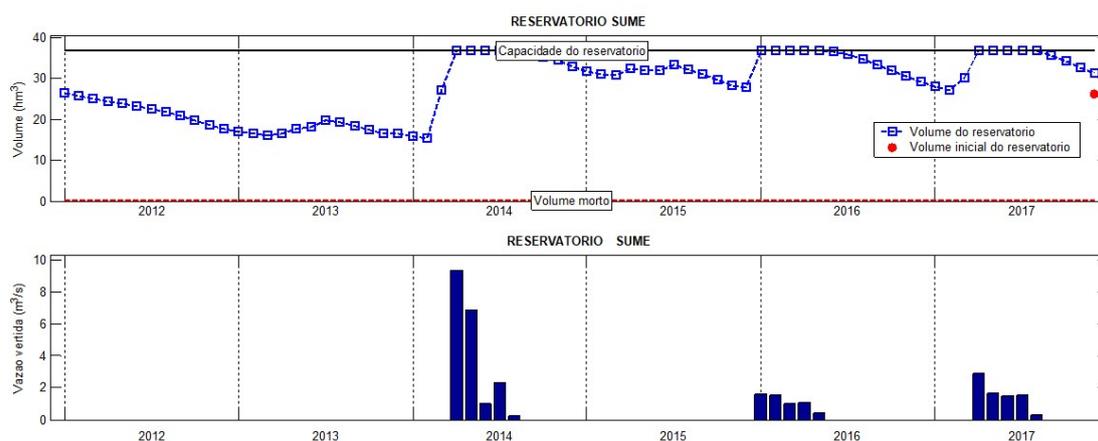
Figura 14 - Volume de água do reservatório Serra Branca II de 2012 a 2017



O reservatório Sumé (Figura 15) contribui diretamente para o trecho principal do estudo, no leito do rio Paraíba. Os anos que não houve vertimento foram os de

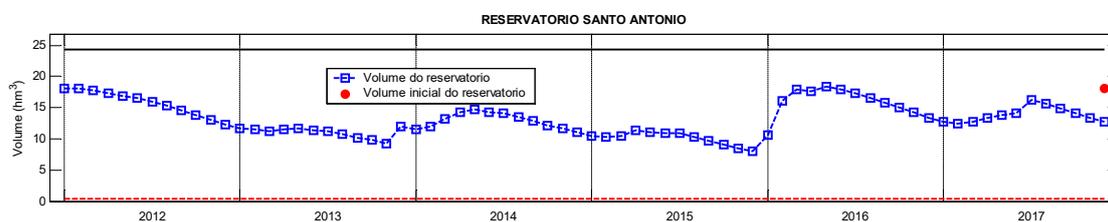
2012, 2013 e 2015. Os volumes vertidos nos outros anos variaram de $0,25\text{m}^3/\text{s}$ em agosto de 2014 a $9,38\text{m}^3/\text{s}$ em abril de 2014, totalizando um volume de $33,6\text{m}^3/\text{s}$ em todo o período analisado. Em alguns meses dos anos de 2014, 2016 e 2017 o reservatório atingiu seu volume máximo. Nestes três anos, o reservatório recebeu vazões afluentes consideráveis, contribuindo para chegada no volume máximo nestes períodos.

Figura 15 - Volume de água e vertimento do reservatório Sumé de 2012 a 2017



O açude de Santo Antônio (Figura 16) aflui diretamente no açude de Cordeiro, de onde desagua no trecho principal do rio Paraíba. O reservatório não apresentou vertimento no período analisado, apresentando oscilações em seu nível de volume. Dessa forma, não houve contribuição deste para o açude Cordeiro.

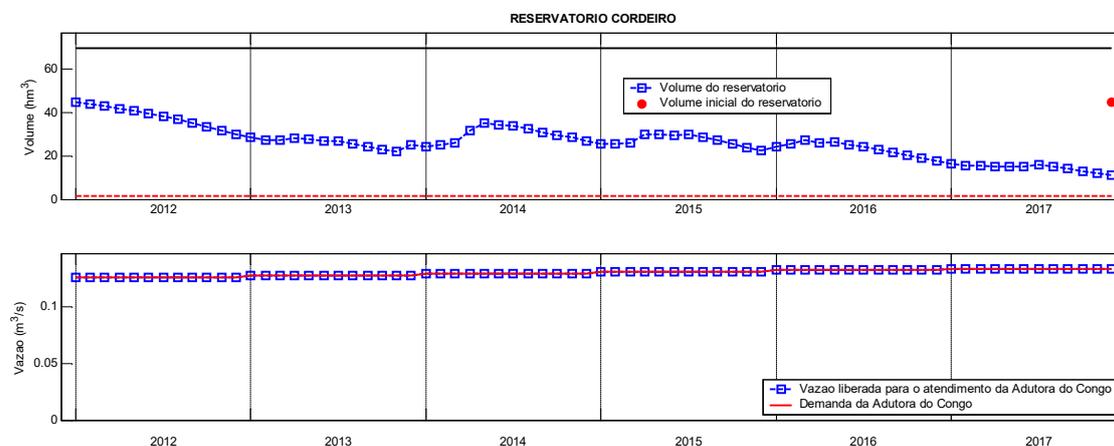
Figura 16 - Volume de água do reservatório Santo Antônio de 2012 a 2017



O reservatório Cordeiro é responsável pelo abastecimento da adutora do Congo, e conforme a Figura 17, tem-se que ocorreu o atendimento desta, no período analisado sem apresenta falhas. No período em análise não houve vertimento no reservatório, logo não houve contribuição deste para o trecho principal do rio Paraíba. Ocorreu depleção no nível do reservatório, chegando ao menor volume deste período,

com apenas 11,19 hm³, onde sua capacidade de armazenamento é de 69,96 hm³ aproximadamente.

Figura 17 - Volume de água do reservatório Cordeiro e atendimento da adutora do Congo no período de 2012 a 2017



O Anexo 3 mostra as vazões afluentes provenientes dos reservatórios a montante ao reservatório Boqueirão, no período de 2012 a 2017.

4.2 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

4.2.1 Cenário C1

A Figura 18 apresenta o atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano (1^o prioridade de atendimento) através das adutoras consideradas no sistema. Observa-se que as demandas de abastecimento urbano foram atendidas sem apresentar falhas ao longo dos 6 anos de operação.

A segunda prioridade estabelecida para o sistema foi o da demanda hídrica para irrigação das áreas agrícolas, que nesse cenário, considera a Resolução Conjunta ANA/AESA-PB N^o 87, limitando as áreas irrigadas. A Figura 19 mostra que as demandas estabelecidas para as áreas agrícolas neste cenário foram atendidas sem apresentar falhas no período analisado.

Figura 18 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C1

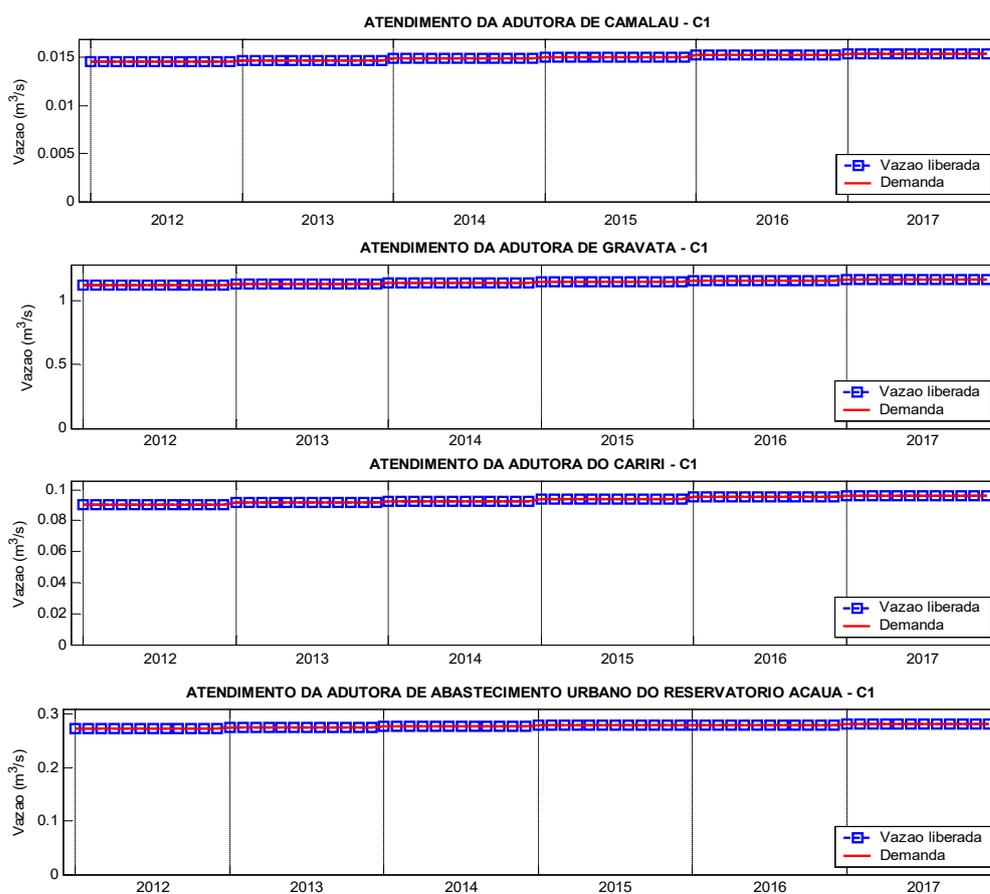
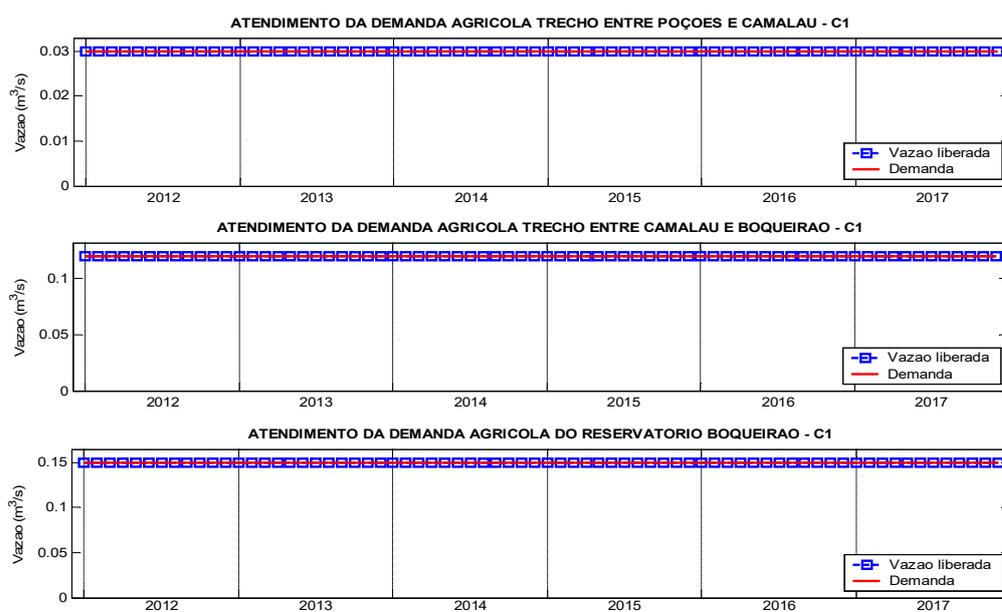


Figura 19 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C1



A única demanda não atendida foi a estabelecida para o canal Acauã-Araçagi. Devido ao alto valor demandado de $10\text{m}^3/\text{s}$ do canal, este apresentou falhas no atendimento em todo o período analisado conforme observado na Figura 20. De modo que essa demanda não apresenta Confiabilidade, Resiliência e Sustentabilidade (Tabela 8). A vulnerabilidade das falhas é de cerca 57% sendo a vulnerabilidade máxima (que indica o grau de severidade das falhas ocorridas no sistema) de 75%, ou seja, em média o sistema só conseguirá liberar para o canal uma vazão de $4,3\text{ m}^3/\text{s}$, podendo em alguns meses liberar apenas $2,5\text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 20 - Atendimento da demanda do canal Acauã-Araçagi no Cenário C1

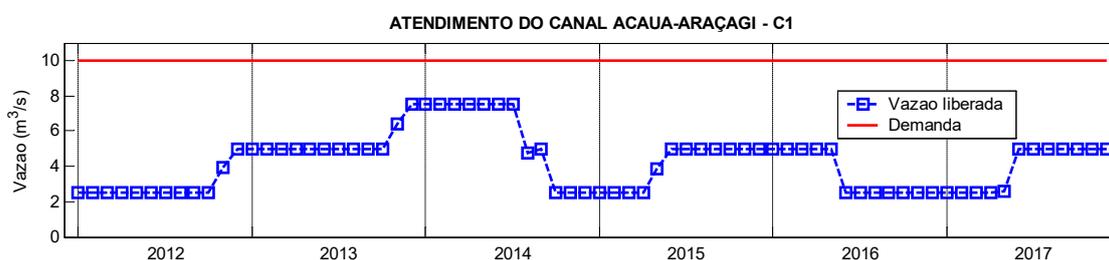
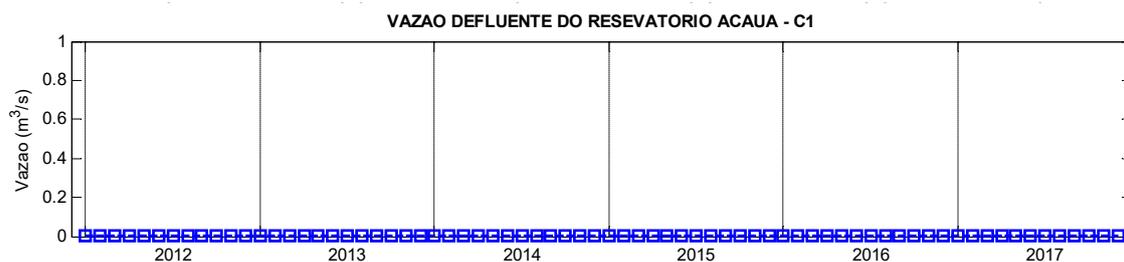


Tabela 8 – Indicadores de Hashimoto para a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C1

Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade máxima	Sustentabilidade
0	0	0,57	0,75	0

Com relação à vazão defluente do reservatório Acauã (Figura 21) tem-se que o mesmo não foi capaz de perenizar o rio Paraíba a jusante dele. Isso é por causa da alta demanda do canal Acauã-Araçagi, de modo, que tal situação é preocupante para o atendimento de possíveis demandas que possam surgir a jusante do reservatório.

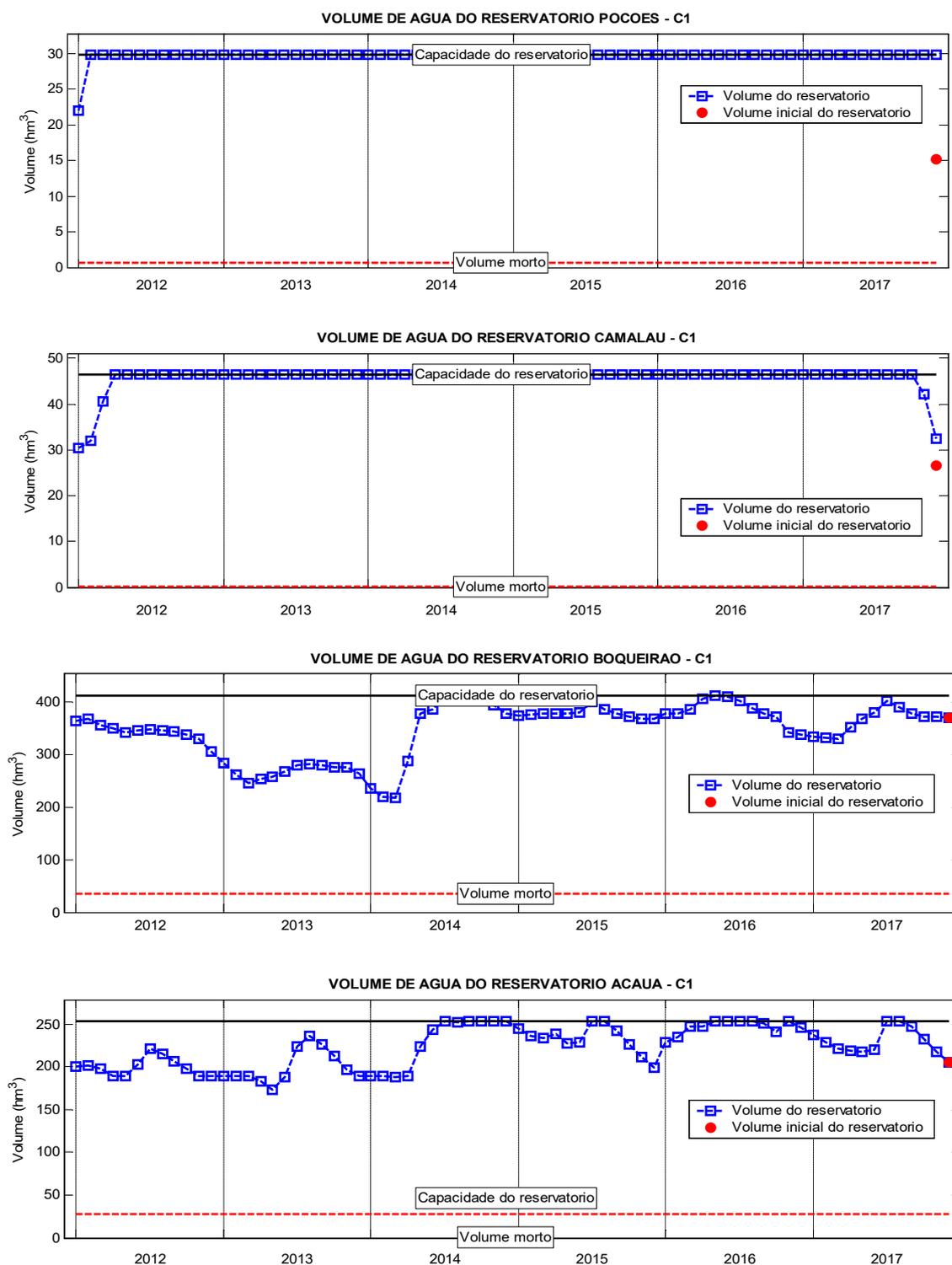
Figura 21 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C1



Na Figura 22, tem-se os volumes de água dos reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã. Pode-se observar que os açudes de Poções e Camalaú permanecem a maior parte do tempo em seus volumes máximos, Camalaú apresentando um decréscimo no seu volume no final de 2017, devido ao atendimento da sustentabilidade dos reservatórios Boqueirão e Acauã, tendo como restrição seu volume final tendo que ser maior ou igual ao volume inicial. Dessa forma, como o reservatório Boqueirão iniciou com um volume alto, Camalaú teve que liberar água para suprir as demandas de Boqueirão.

Os volumes mensais dos reservatórios Boqueirão e Acauã apresentam comportamento característico, que diminuem entre agosto e janeiro (meses com menores vazões afluentes), aumentando na estação chuvosa (entre abril e maio). Alcançaram por alguns períodos seu volume máximo, entre julho e setembro de 2014 e, maio e junho de 2016. O reservatório Acauã alcançou seu volume máximo em maior parte do tempo se comparado com o reservatório Boqueirão.

Figura 22 - Volume de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C1



No período analisado o volume médio anual dos reservatórios Boqueirão e Acauã permaneceu acima de 52% das suas capacidades, o menor volume estimado no açude Boqueirão foi de 217,76 hm³ (cerca de 52,9% da capacidade total do

reservatório) e 173,38 hm³ no açude Acauã (cerca de 68,5% da capacidade total do reservatório). Isso se deve à vazão exógena do PISF que garantiu uma vazão afluyente no trecho a montante do reservatório Boqueirão, mesmo com suas perdas em trânsito e por evaporação. Dessa forma, é possível observar que mesmo o período analisado sendo considerado seco, os volumes de água desses dois reservatórios permaneceram acima de 50% de suas capacidades, mostrando a relevância das afluências aos reservatórios.

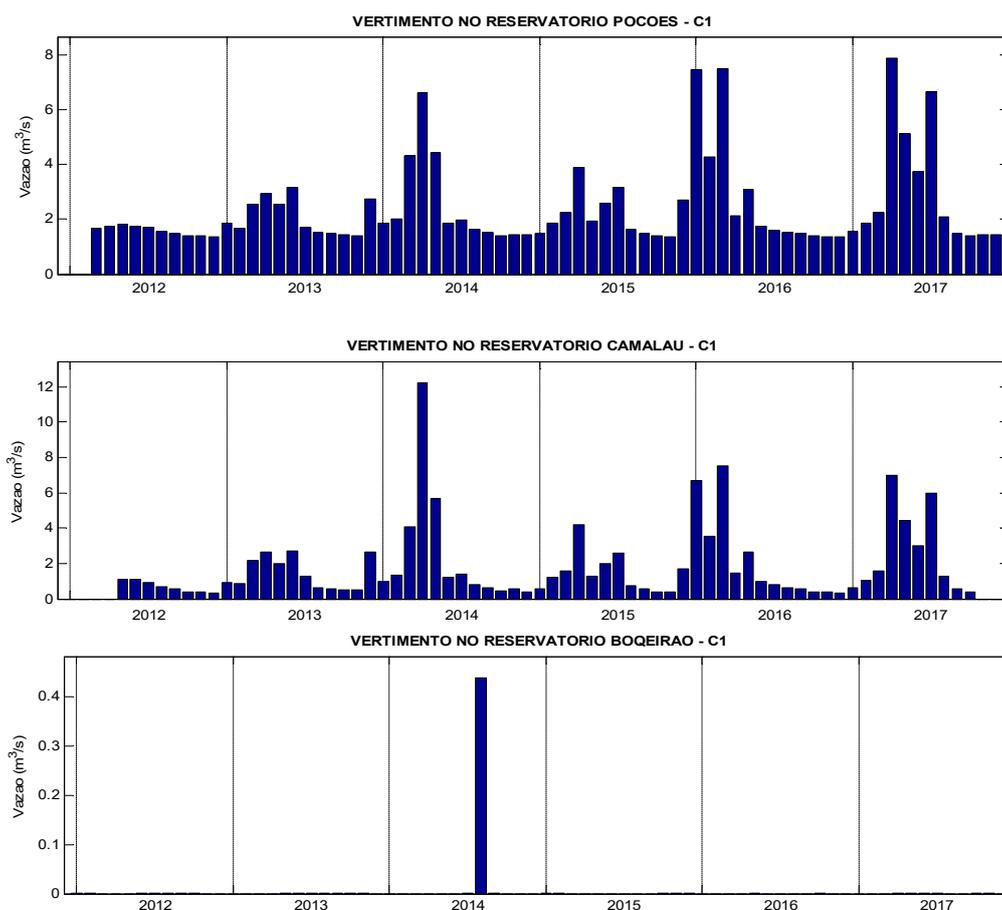
A Tabela 9 apresenta os valores dos volumes evaporados médios mensais dos reservatórios no Cenário C1. Os maiores volumes evaporados ocorrem entre os meses de outubro a dezembro. Entre todos os reservatórios, Boqueirão apresentou o maior volume evaporado devido à maior área do espelho d'água.

Tabela 9 – Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C1

Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	1,34	1,08	0,94	0,8	0,82	0,9	1,05	1,31	1,41	1,61	1,65	1,69
Camalaú	1,36	1,07	0,93	0,81	0,84	0,92	1,07	1,33	1,43	1,64	1,67	1,68
Boqueirão	6,03	5,39	5,15	5,21	4,97	3,89	4,06	4,78	5,38	7,03	6,69	6,56
Acauã	1,8	1,65	1,31	1,22	1,47	0,94	1,04	1,45	1,6	1,98	1,93	2,07

Os vertimentos dos 04 reservatórios receptores da vazão exógena do PISF no cenário C1 podem ser observados na Figura 23. Observa-se que ocorrem vertimentos, praticamente, durante todo o período para os reservatórios Poções e Camalaú. Já no reservatório Boqueirão só ocorreu no mês de agosto de 2014. Não ocorreu vertimento no reservatório Acauã.

Figura 23 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C1



A Tabela 10 apresenta os resultados dos Índices de Eficiência associado aos reservatórios.

Tabela 10 – Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C1

RESERVATÓRIO	IAP	IUD	IUP	n_{vr}	n_E	n_P	η_V	η_u
POÇÕES	0,47	0,92	0,43	0,02	0,09	0,02	0,46	0,43
CAMALAU	0,54	0,96	0,51	0,01	0,10	0,02	0,37	0,51
BOQUEIRÃO	0,70	0,92	0,65	0,00	0,35	0,06	0,00	0,65
ACAUÃ	0,93	0,95	0,88	0,00	0,12	0,05	0,00	0,88

Pode-se observar que:

- O indicador IAP mostra que os reservatórios Poções e Camalaú, apresentam potencial para ampliar suas demandas, em 53% e 46% respectivamente. O reservatório Boqueirão ainda pode ampliar suas demandas em 30%. Já no reservatório de Acauã, essa ampliação é bastante reduzida, devido ao canal Acauã-Araçagi requerer grande parte de sua vazão;

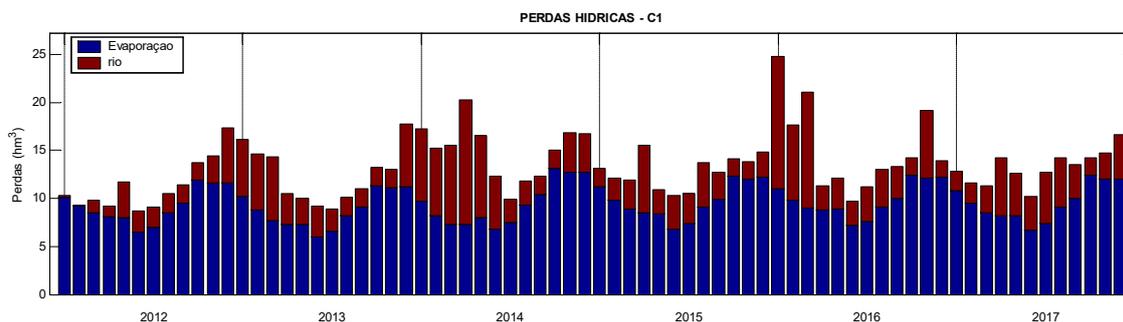
- O indicador IUD indica que todos os reservatórios apresentam um alto valor de alocação de água, todos acima de 90%, devido à alta demanda do Canal Acauã-Araçagi, sendo necessários cuidados para o aumento de demanda, com estudos para todo o sistema para que não ocorram conflitos no futuro;
- O indicador IUP, o qual relaciona demanda e potencialidade do reservatório, mostra que apenas no açude Acauã o valor é alto, demonstrando que as demandas estão próximas ao limite de potencialidade do reservatório, não podendo apresentar acréscimos nas demandas requeridas deste. Esse valor alto como no indicador IAP, é devido ao canal Acauã-Araçagi que sobrecarrega o reservatório com sua alta demanda, que pode gerar conflitos mesmo com as águas da transposição, que como pode ser analisado neste e nos próximos cenários, não consegue atender a totalidade da demanda do canal de $10\text{m}^3/\text{s}$;
- Apenas os reservatórios de Poções e Camalaú apresentam uma variabilidade interanual do seu volume, pois permanecem cheios devido à vazão exógena do PISF. Os reservatórios Boqueirão e Acauã apresentaram o mesmo comportamento característico na variação de seus volumes em épocas de estiagem;
- A relação entre o volume evaporado e o volume afluente, ou a eficiência quanto ao armazenamento de água nos reservatórios é muito menor no açude Boqueirão, e isso se dá pela grande área do seu espelho d'água, o qual facilita o processo de evaporação e a quantidade evaporada. De acordo com os resultados, a água deve ser primeiramente utilizada no reservatório Boqueirão, seguido pelos reservatórios de Acauã, Camalaú e Poções, para melhor aproveitamento da água, minimizando as perdas por evaporação;
- A influência da precipitação é maior nos reservatórios Boqueirão e Acauã, pois com relação aos outros dois reservatórios, eles apresentam menores vazões afluentes;
- Os reservatórios de Poções e Camalaú são de média capacidade e recebem muita vazão exógena do PISF devido suas proximidades com o município de Monteiro, onde ocorre a chegada das águas do PISF. Essas águas suprem todas as demandas desses reservatórios e o volume excedente é vertido, não sendo aproveitado por eles, perenizando o rio a jusante. Já os reservatórios Boqueirão e Acauã não promovem regularização interanual no período analisado, pois as

demandas nos dois reservatórios são muito elevadas e por apresentarem uma capacidade de armazenamento maior não houve a liberação de água por vertimento;

- Relacionando com o tópico anterior, percebe-se que o maior aproveitamento se dá no reservatório de Acauã, devido sua alta demanda, principalmente para atendimento do canal Acauã-Araçagi, fazendo com que as águas sejam aproveitadas completamente. O outro reservatório com bom aproveitamento é o Boqueirão, também devido suas demandas serem altas. Já nos reservatórios Poções e Camalaú o extravasamento de água é demasiado, não sendo esta água aproveitada em sua totalidade.

A Figura 24 apresenta as perdas hídricas no Cenário C1, tanto por evaporação quanto em rio ao longo do período analisado.

Figura 24 - Perdas hídricas (hm^3) por evaporação e em leito de rio no Cenário C1



Observa-se que as perdas hídricas se situaram entre, aproximadamente, 10 e 20 milhões de m^3 de água. Observa-se que a maior parte das perdas hídricas é devido à evaporação de água nos reservatórios (principalmente no reservatório Boqueirão), porém, de março a maio de 2014 e em janeiro e março de 2016 as perdas hídricas ao longo do trecho do rio superaram as perdas por evaporação.

A Tabela 11 apresenta o volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C1. Tem-se que o ano de 2016 foi o que apresentou maior perda de água no sistema. Em média se perde cerca de 160 hm^3 de água por ano (maior que a capacidade dos reservatórios Poções e Camalaú juntos).

Tabela 11 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C1

ANO	EVAPORAÇÃO (HM³)	PERDA NO RIO (HM³)	TOTAL
2012	110,6	24,9	135,5
2013	104,8	44,1	148,9
2014	113,2	66,6	179,8
2015	116,7	37,1	153,8
2016	118,2	63,5	181,7
2017	114,9	44,1	159,0
MÉDIA	113,1	46,7	159,8

Considerando a Resolução nº 67, de 11 de Setembro de 2018, que preconiza o preço da água do PISF com o valor de R\$ 0,81/m³, tem-se que o custo financeiro das perdas hídricas no Cenário C1 será de cerca 129 milhões de reais por ano.

4.2.2 Cenário C2

Nesse cenário é considerada uma adutora que transportará uma parcela das águas do PISF até a ETA Gravatá, localizada no município de Queimadas – PB. As áreas agrícolas são as mesmas do Cenário C1.

A Figura 25 apresenta o atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano (1º prioridade de atendimento) através das adutoras consideradas no sistema. Observa-se que as demandas de abastecimento urbano foram atendidas sem apresentar falhas ao longo dos 6 anos de operação.

A segunda prioridade estabelecida para o sistema foi o da demanda hídrica para irrigação das áreas agrícolas, que nesse cenário, considera a Resolução Conjunta ANA/AESA-PB Nº 87, limitando as áreas irrigadas. A Figura 26 mostra que as demandas estabelecidas para as áreas agrícolas neste cenário foram atendidas sem apresentar falhas no período analisado.

Figura 25 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C2

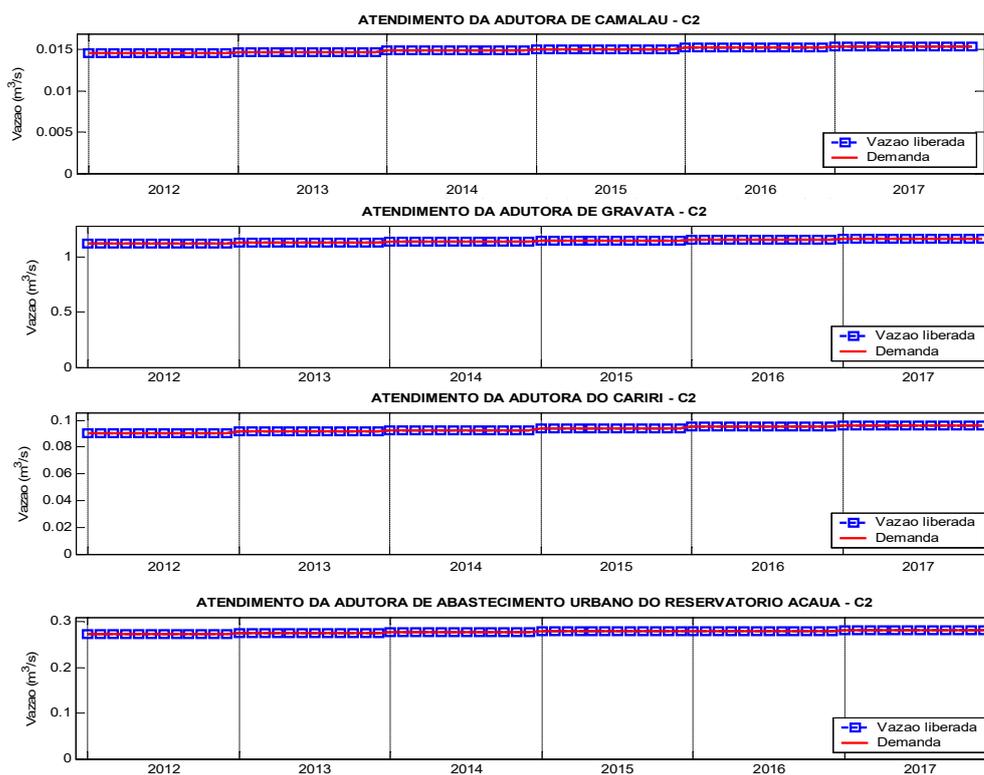
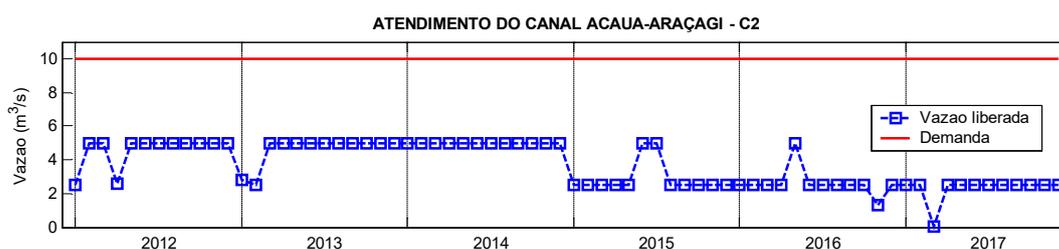


Figura 26 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C2



A única demanda não atendida foi a estabelecida para o canal Acauã-Araçagi (do mesmo modo do Cenário C1) como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Atendimento da demanda do canal Acauã-Araçagi no Cenário C1



Tem-se que essa demanda não apresenta Confiabilidade, Resiliência e Sustentabilidade (Tabela 12). A vulnerabilidade das falhas é de cerca 63% (maior que a do Cenário C1) sendo a vulnerabilidade máxima (que indica o grau de severidade das falhas ocorridas no sistema) de 100%, ou seja, em média o sistema só conseguirá liberar para o canal uma vazão de 3,7 m³/s, podendo em algum momento não atender a demanda.

Tabela 12 – Indicadores de Hashimoto para o a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C2

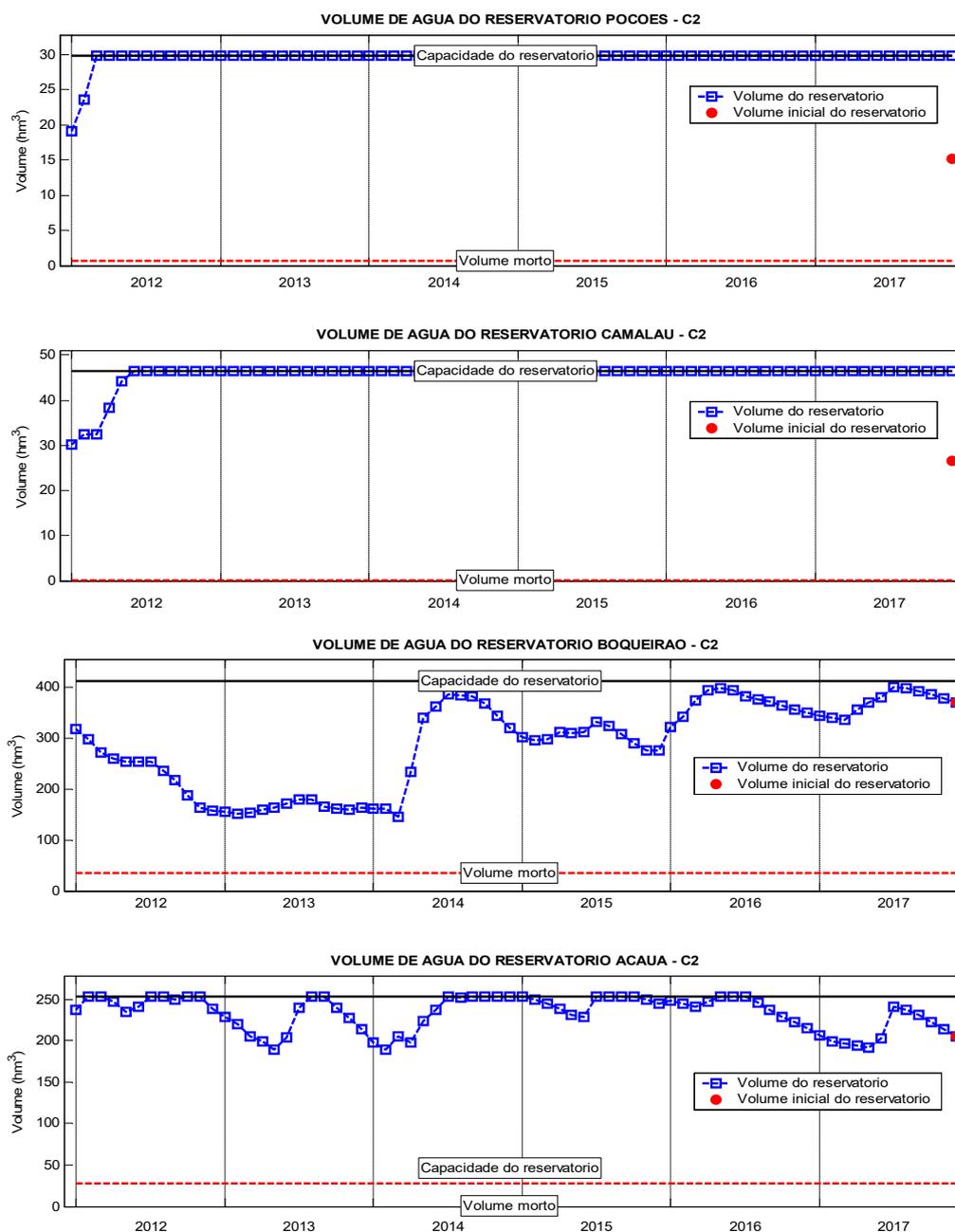
Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade máxima	Sustentabilidade
0	0	0,63	1,00	0

A Figura 28 mostra os volumes de água dos reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã. Pode-se observar que os reservatórios Poções e Camalaú permanecem a maior parte do tempo em seus volumes máximos (do mesmo modo do Cenário C1) devido à proximidade desses reservatórios ao PISF, e por apresentarem uma capacidade menor de armazenamento.

Observa-se que o volume de água no reservatório Boqueirão nos anos de 2012 a 2015 são bem inferiores aos apresentados no Cenário C1. Isso se deve a diminuição da vazão exógena do PISF no rio Paraíba, já que nesse cenário, parte dessa vazão atende diretamente a demanda da ETA Gravatá. Em nenhum momento o reservatório atingiu sua capacidade de armazenamento.

Diferentemente do reservatório Boqueirão, o reservatório Acauã apresentou um volume maior de água nos anos de 2012 e 2013 quando comparado com o Cenário C1, apresentando comportamento similar nos outros anos.

Figura 28 - Volumes de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C2



A Tabela 13 apresenta os valores dos volumes evaporados médios mensais dos reservatórios no Cenário C2. Os valores apresentam similaridades ao Cenário C1, entretanto há uma diminuição nos valores do reservatório Boqueirão devido a diminuição do volume de água do reservatório neste cenário.

Tabela 13 - Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C2

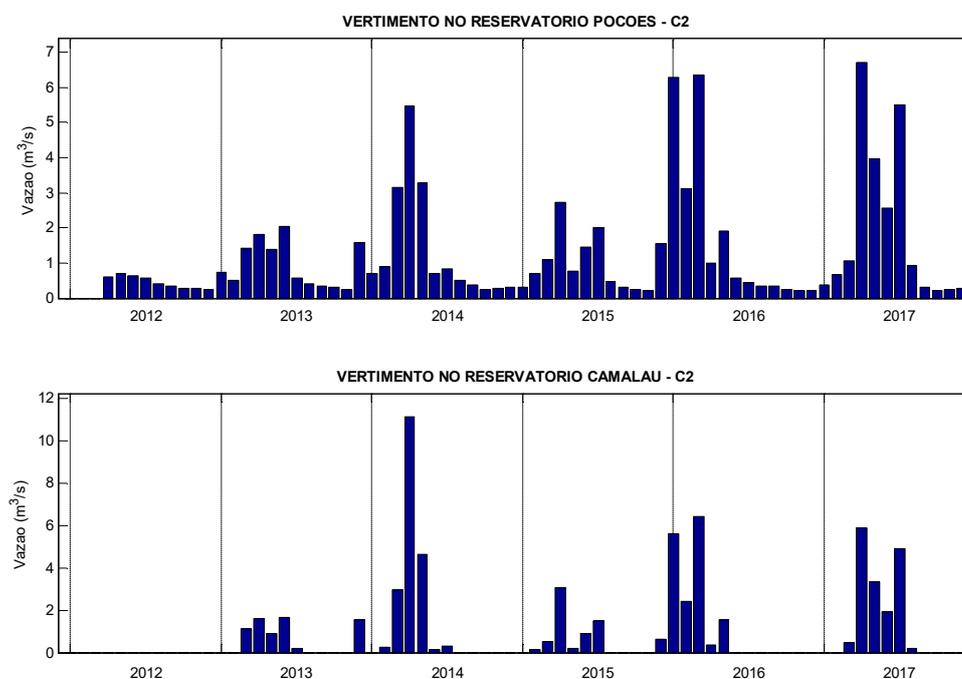
Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	1,33	1,06	0,93	0,8	0,83	0,9	1,05	1,31	1,41	1,61	1,65	1,69
Camalaú	1,36	1,07	0,92	0,79	0,83	0,92	1,07	1,33	1,43	1,64	1,68	1,72
Boqueirão	5,22	4,7	4,5	4,6	4,47	3,52	3,66	4,29	4,82	6,18	5,78	5,64
Acauã	1,86	1,71	1,35	1,25	1,51	0,95	1,05	1,47	1,63	2,05	2,01	2,16

Da mesma forma do Cenário C1, não houve vazão defluente do reservatório Acauã (Figura 29). E com relação aos vertimentos (Figura 30), os mesmos só ocorreram nos reservatórios de Poções e Camalaú.

Figura 29 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C2



Figura 30 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C2



A Tabelas 14 apresenta os resultados dos Índices de Eficiência associado aos reservatórios Cenário C2, respectivamente.

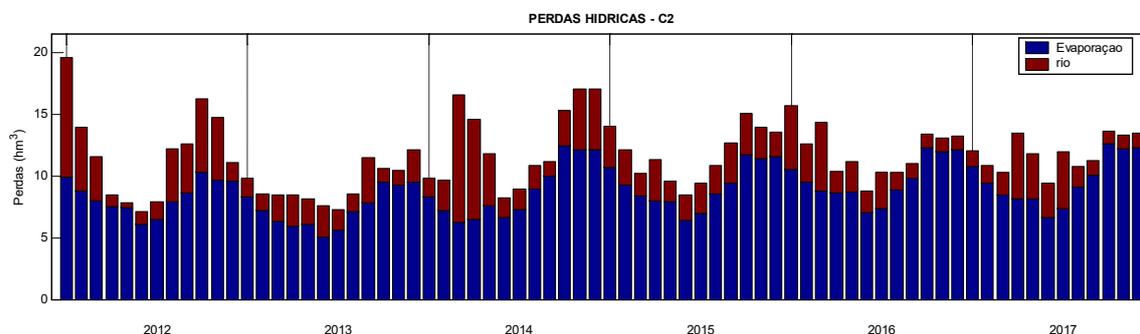
Tabela 14 - Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C2

RESERVATÓRIO	IAP	IUD	IUP	n_{vr}	n_E	n_p	η_V	η_u
POÇÕES	0,60	0,92	0,55	0,02	0,12	0,03	0,31	0,55
CAMALAU	0,61	0,92	0,56	0,03	0,14	0,02	0,27	0,56
BOQUEIRÃO	0,69	0,92	0,63	0,00	0,37	0,06	0,00	0,63
ACAUÃ	0,92	0,94	0,87	0,00	0,13	0,06	0,00	0,87

Os valores de índices de eficiência neste cenário estão próximos aos do Cenário C1, diferindo um pouco com relação a potencialidade de aumento de demanda, pois para o Cenário C2, parte da vazão do PISF é desviada para a ETA, sendo assim, a vazão no trecho do rio diminui. O reservatório de Acauã é o que tem o menor potencial para aumento das demandas, pois conforme foi visto anteriormente, o canal Acauã-Araçagi com capacidade de 10m³/s, sobrecarrega o reservatório, pois requer grande demanda. Percebe-se que para todos os reservatórios, há valores de alocação dos seus volumes acima de 90%. O maior IUP apresentado é também no açude Acauã, pois suas demandas estão muito próximas ao limite de potencialidade do reservatório.

A Figura 31 apresenta as perdas hídricas no Cenário C2, tanto por evaporação quanto em rio ao longo do período analisado.

Figura 31 - Perdas hídricas (hm³) por evaporação e em leito de rio no Cenário C2



Observa-se uma variação dos valores das perdas hídricas nesse cenário para o período analisado (valores entre 7 a 20 hm³). Observa-se que a maior parte das perdas hídricas é devido à evaporação de água nos reservatórios (do mesmo modo que no

Cenário C1), porém, nos meses de março e abril de 2014 as perdas hídricas ao longo do trecho do rio superaram as perdas por evaporação.

A tabela 15 apresenta volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C2. Tem-se uma diminuição, em média, de cerca 13% do volume de água perdido em comparação com o Cenário C1 (cerca de 21 milhões de m³ de água por ano, quase a capacidade do reservatório Poções), de modo que a implementação da adutora até a ETA Gravatá resultará em uma economia de água para o sistema.

Tabela 15 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C2

ANO	EVAPORAÇÃO (HM ³)	PERDA NO RIO (HM ³)	TOTAL
2012	100,4	43,0	143,4
2013	87,7	23,9	111,6
2014	105,3	45,8	151,2
2015	110,4	30,9	141,3
2016	115,8	28,6	144,4
2017	115,2	27,2	142,4
MÉDIA	105,8	33,2	139,0

Tem-se que o ano de 2014 foi o que apresentou maior perda de água no sistema, com a maior perda hídrica no trecho do rio. Porém houve maior perda por evaporação nos anos de 2016 e 2017 por causa dos volumes de água dos reservatórios.

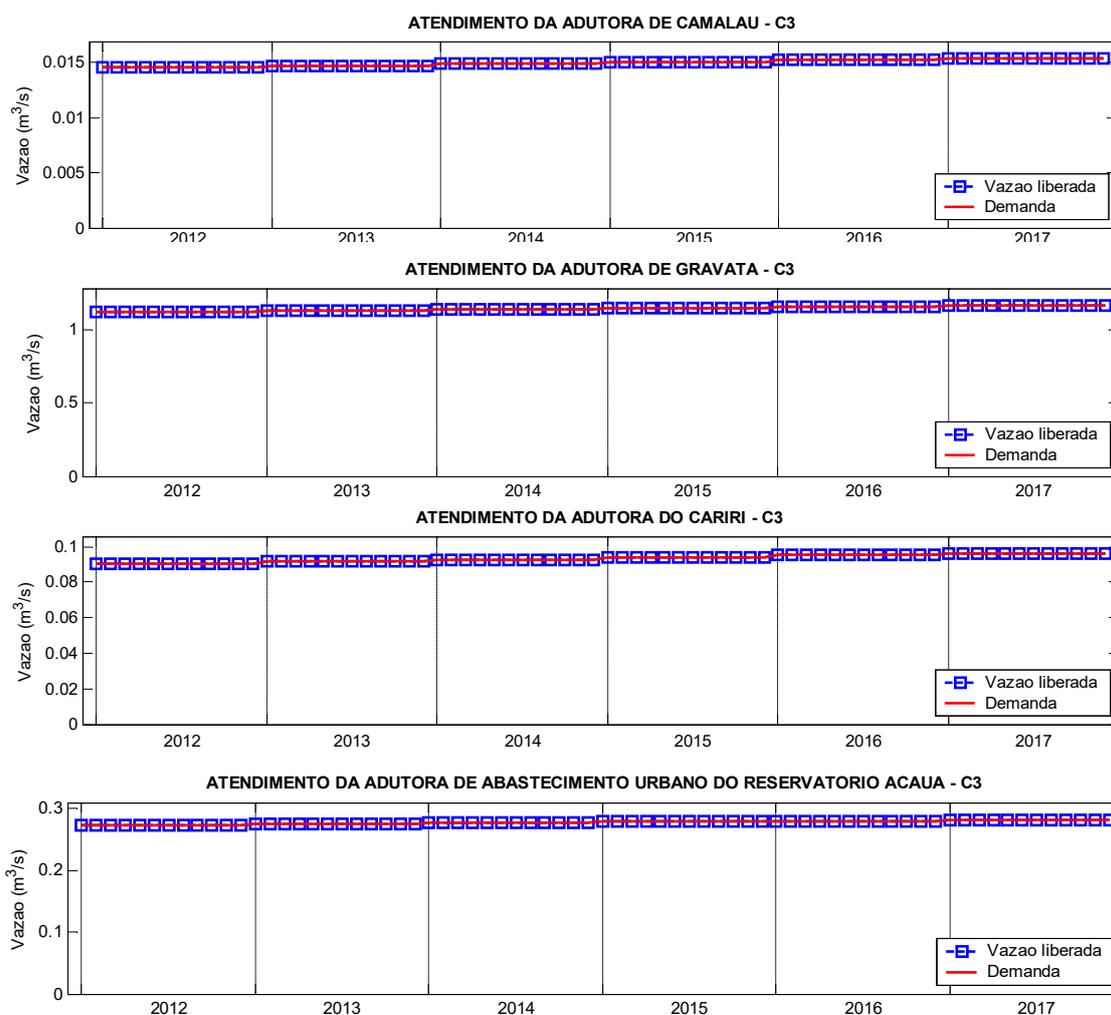
Considerando a Resolução nº 67, de 11 de Setembro de 2018, que preconiza o preço da água do PISF com o valor de R\$ 0,81/m³, temos que o custo financeiro das perdas hídricas no Cenário C2 será de cerca 113 milhões de reais por ano (cerca que 13% menor que o custo do Cenário C1).

4.2.3 Cenário C3

O Cenário C3 apresenta a mesma situação do Cenário C1, diferindo apenas em relação às áreas agrícolas, cuja demanda hídrica foi estimada por Oliveira (2013) por meio de um modelo de otimização multiobjetivo maximizando o uso das áreas agrícolas e da água.

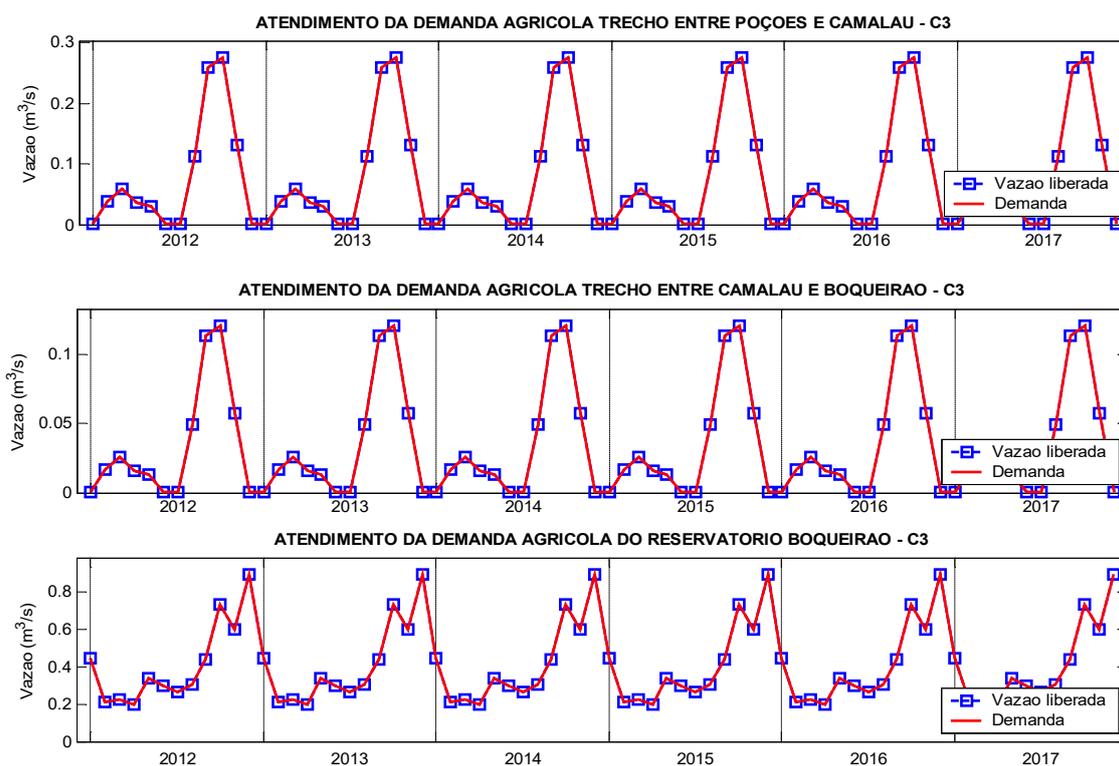
A Figura 32 apresenta o atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano (1º prioridade de atendimento) através das adutoras consideradas no sistema. Observa-se que as demandas de abastecimento urbano foram atendidas sem apresentar falhas ao longo dos 6 anos de operação.

Figura 32 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C3



A segunda prioridade estabelecida para o sistema foi o da demanda hídrica para irrigação das áreas agrícolas, que nesse cenário, considera as áreas irrigadas de Oliveira (2011). A Figura 33 mostra que as demandas estabelecidas para as áreas agrícolas neste cenário foram atendidas sem apresentar falhas no período analisado.

Figura 33 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C3



O atendimento da demanda estabelecida para o canal Acauã-Araçagi (Figura 34) apresenta comportamento similar ao apresentando no Cenário C1, porém com vulnerabilidade um pouco maior (Tabela 16).

Figura 34 - Atendimento para o canal Acauã-Araçagi no Cenário C3

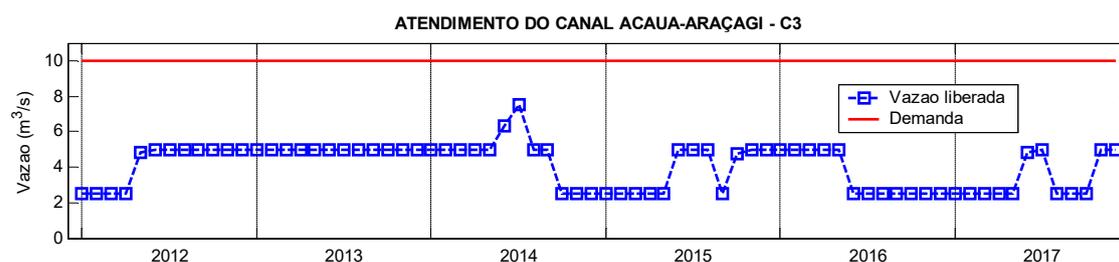
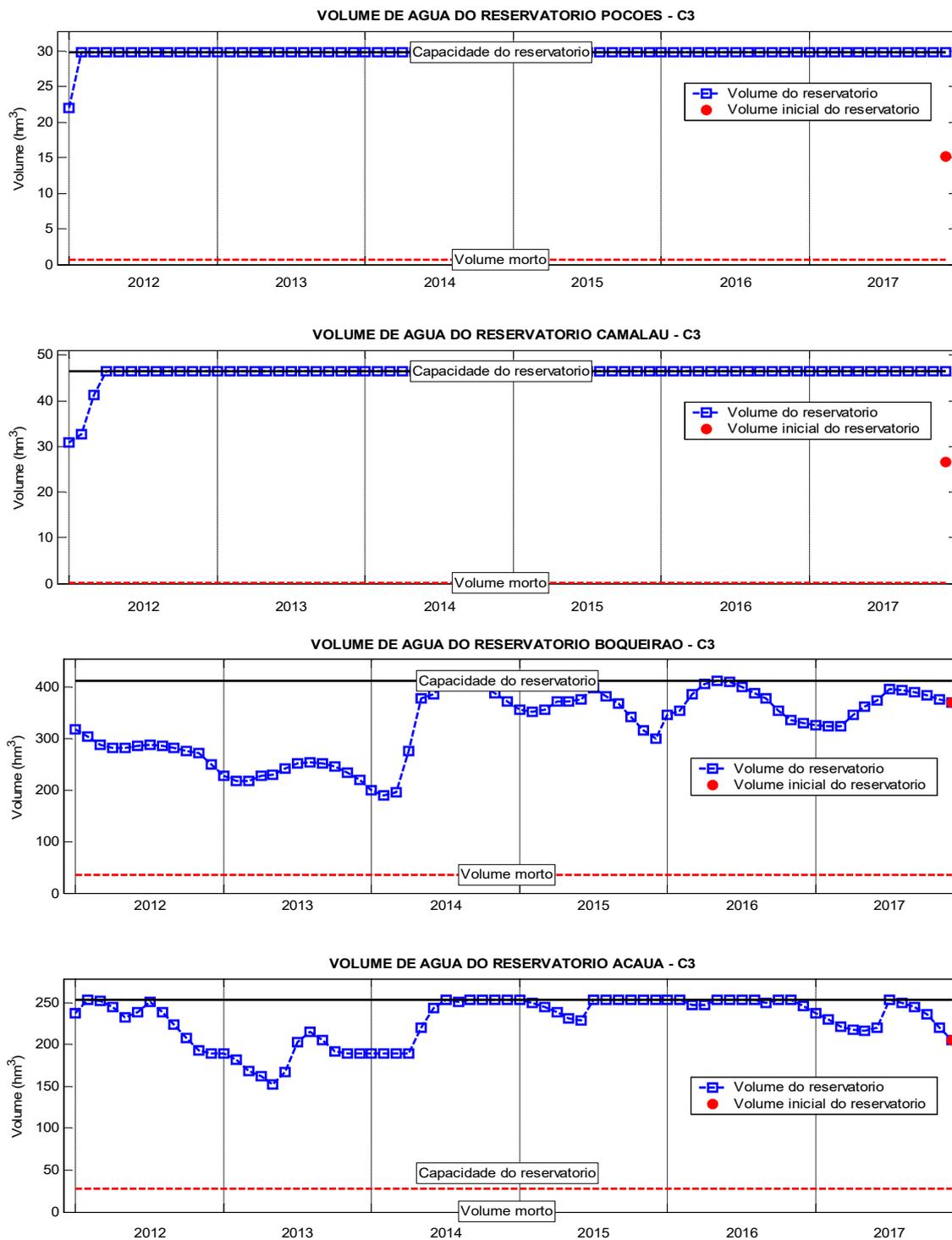


Tabela 16 – Indicadores de Hashimoto para o a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C3

Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade máxima	Sustentabilidade
0	0	0,59	0,75	0

A Figura 35 mostra os volumes de água dos reservatórios Poções, Camaláu, Boqueirão e Acauã.

Figura 35 - Volumes de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C3



Da mesma forma que nos Cenários C1 e C2, o volume de água dos reservatórios Poções e Camalaú permanecem praticamente todo o período de tempo em seus volumes máximos. No reservatório Boqueirão os volumes de água situaram entre os valores apresentados nos Cenários C1 e C2, ou seja, houve uma diminuição do volume de água armazenado por causa do aumento da demanda hídrica nas áreas agrícolas (comparação com o Cenário C1) como um aumento do volume de água armazenado por causa da maior vazão do PISF no leito do rio. O reservatório atinge o seu volume máximo em 2014 e 2016. Com relação ao reservatório Acauã tem-se que o volume de água apresenta comportamento similar aos cenários anteriores.

A Tabela 17 apresenta os valores dos volumes evaporados médios mensais dos reservatórios no Cenário C3. Os valores apresentam similaridades aos Cenários C1 e C2, entretanto há uma diminuição nos valores do reservatório Boqueirão (quando comparado com os valores do Cenário C1). Assim tem-se que o aumento da demanda hídrica do sistema diminui as perdas por evaporação nos reservatórios.

Tabela 17 - Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C3

Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	1,34	1,08	0,94	0,8	0,83	0,9	1,05	1,31	1,41	1,61	1,65	1,69
Camalaú	1,36	1,1	0,93	0,81	0,84	0,92	1,07	1,33	1,43	1,64	1,68	1,72
Boqueirão	5,7	5,07	4,88	5,02	4,83	3,79	3,96	4,66	5,27	6,84	6,43	6,24
Acauã	1,84	1,71	1,35	1,24	1,49	0,95	1,04	1,45	1,6	2,001	1,96	2,12

Da mesma forma dos Cenários C1 e C2, não houve vazão defluente do reservatório Acauã (Figura 36). Com relação aos vertimentos (Figura 37), ocorreram nos reservatórios de Poções, Camalaú e Boqueirão (apenas em 2014).

Figura 36 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C3

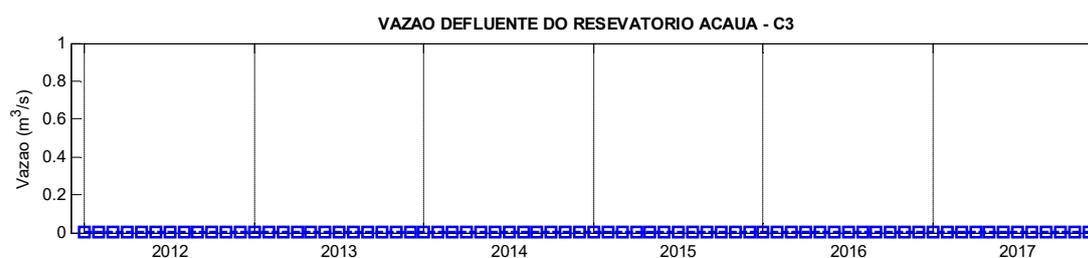
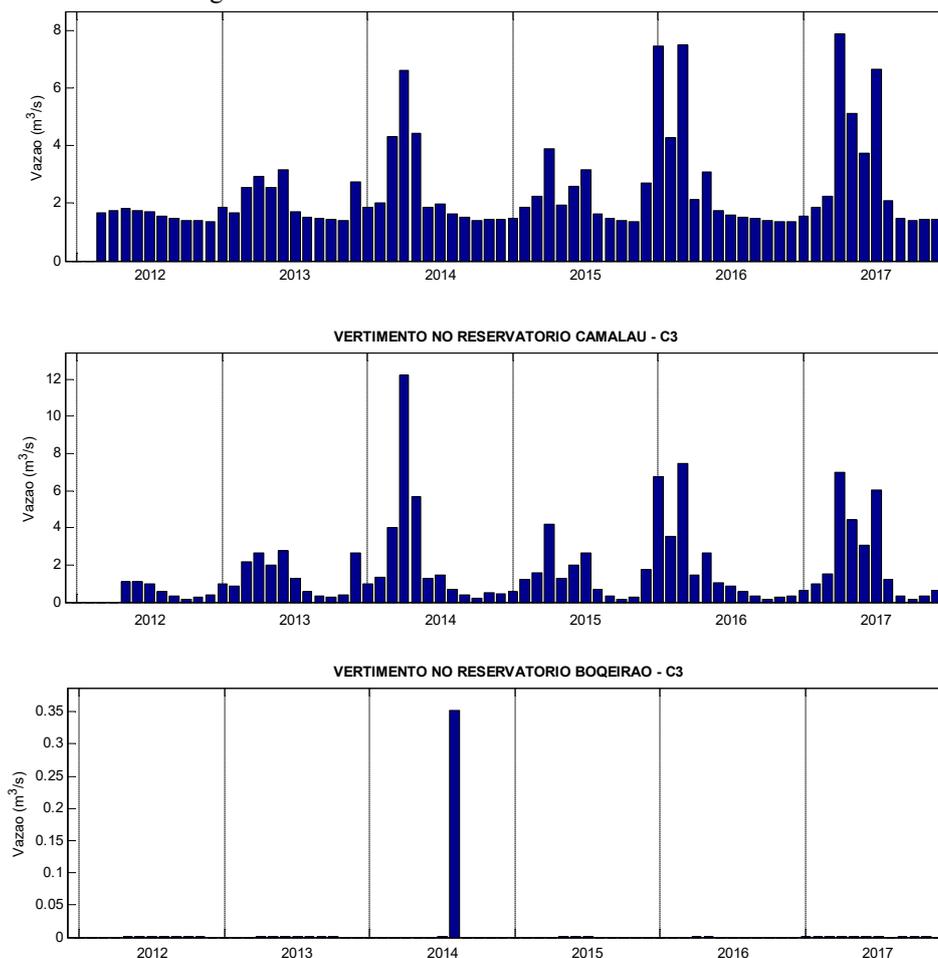


Figura 37 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C3



A Tabela 18 apresenta os resultados dos Índices de Eficiência associado aos reservatórios no Cenário C3.

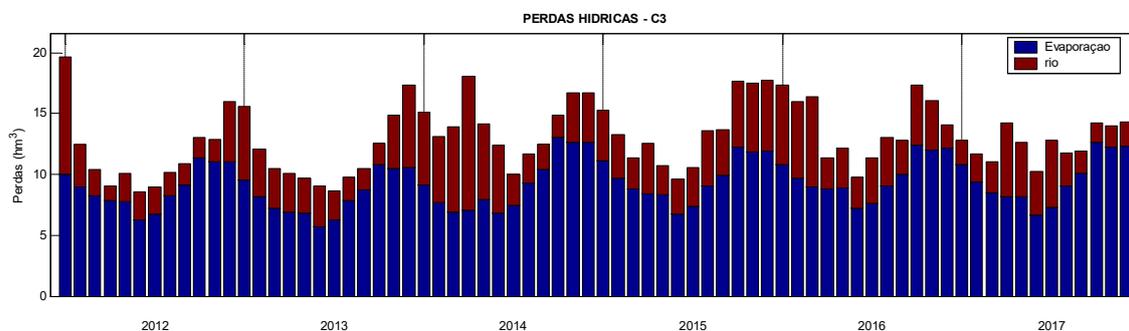
Tabela 18 – Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C3

RESERVATÓRIO	IAP	IUD	IUP	n_{vr}	n_E	n_P	η_V	η_u
POÇÕES	0,47	0,92	0,43	0,02	0,09	0,02	0,46	0,43
CAMALAU	0,54	0,93	0,50	0,02	0,11	0,02	0,37	0,50
BOQUEIRÃO	0,71	0,93	0,66	0,00	0,34	0,05	0,00	0,66
ACAUÃ	0,93	0,94	0,88	0,00	0,12	0,05	0,00	0,88

Os valores de índices de eficiência neste cenário estão próximos aos valores do Cenário C1. O Cenário C3 requer maior demanda para irrigação, diminuindo o seu potencial para aumento de demandas com relação aos cenários anteriores. O reservatório de Acauã é o que tem o menor potencial para aumento das demandas como nos cenários anteriores, devido à sobrecarga no reservatório.

A Figura 38 apresenta as perdas hídricas no Cenário C2, tanto por evaporação quanto em rio ao longo do período analisado.

Figura 38 - Perdas hídricas (hm³) por evaporação e em leito de rio no Cenário C3



Observa-se uma variação dos valores das perdas hídricas nesse cenário para o período analisado (valores entre 7 a 20 hm³). Observa-se que a maior parte das perdas hídricas é devido à evaporação de água nos reservatórios (do mesmo modo que no Cenário C1), porém, nos meses de março e abril de 2014 as perdas hídricas ao longo do trecho do rio superaram as perdas por evaporação (como no Cenário C2).

A Tabela 19 apresenta volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C3. Tem-se uma diminuição, em média, de cerca 2% do volume de água perdido em comparação com o Cenário C1 (cerca de 4 milhões de m³ de água por ano), de modo que o aumento da demanda hídrica do sistema resultará em uma economia de água para o sistema.

Tabela 19 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C3

ANO	EVAPORAÇÃO (HM ³)	PERDA NO RIO (HM ³)	TOTAL
2012	106,7	35,5	142,3
2013	99,1	41,6	140,7
2014	111,2	58,0	169,2
2015	115,5	48,3	163,8
2016	117,6	50,2	167,8
2017	115,4	36,4	151,7
MÉDIA	110,9	45,0	155,9

Tem-se que o ano de 2014 foi o que apresentou maior perda de água no sistema, com a maior perda hídrica no trecho do rio. Porém houve maior perda por evaporação no ano de 2016 por causa dos volumes de água dos reservatórios.

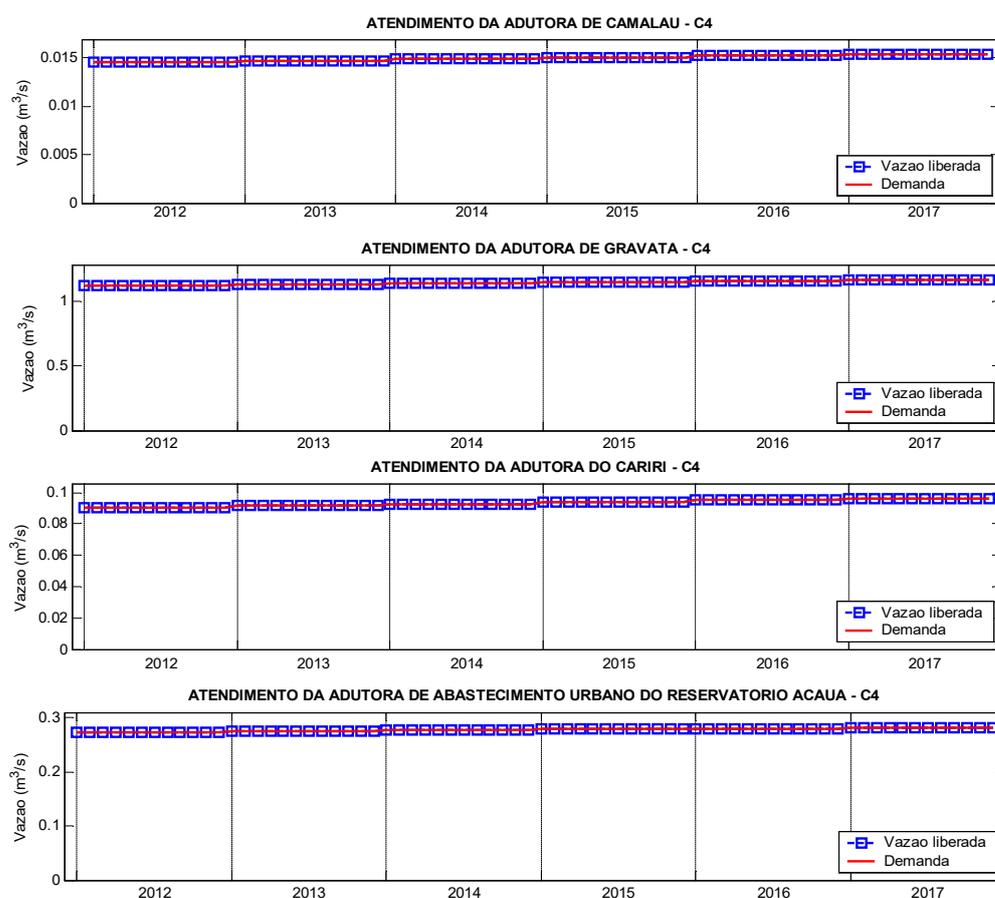
Considerando a Resolução nº 67, de 11 de Setembro de 2018, que preconiza o preço da água do PISF com o valor de R\$ 0,81/m³, temos que o custo financeiro das perdas hídricas no Cenário C3 será de cerca 126 milhões de reais por ano (cerca que 2% menor que o custo do Cenário C1).

4.2.4 Cenário C4

O Cenário C4 apresenta o mesmo layout do Cenário C2, diferindo apenas com relação às áreas agrícolas, cuja demanda hídrica foi estimada por Oliveira (2013).

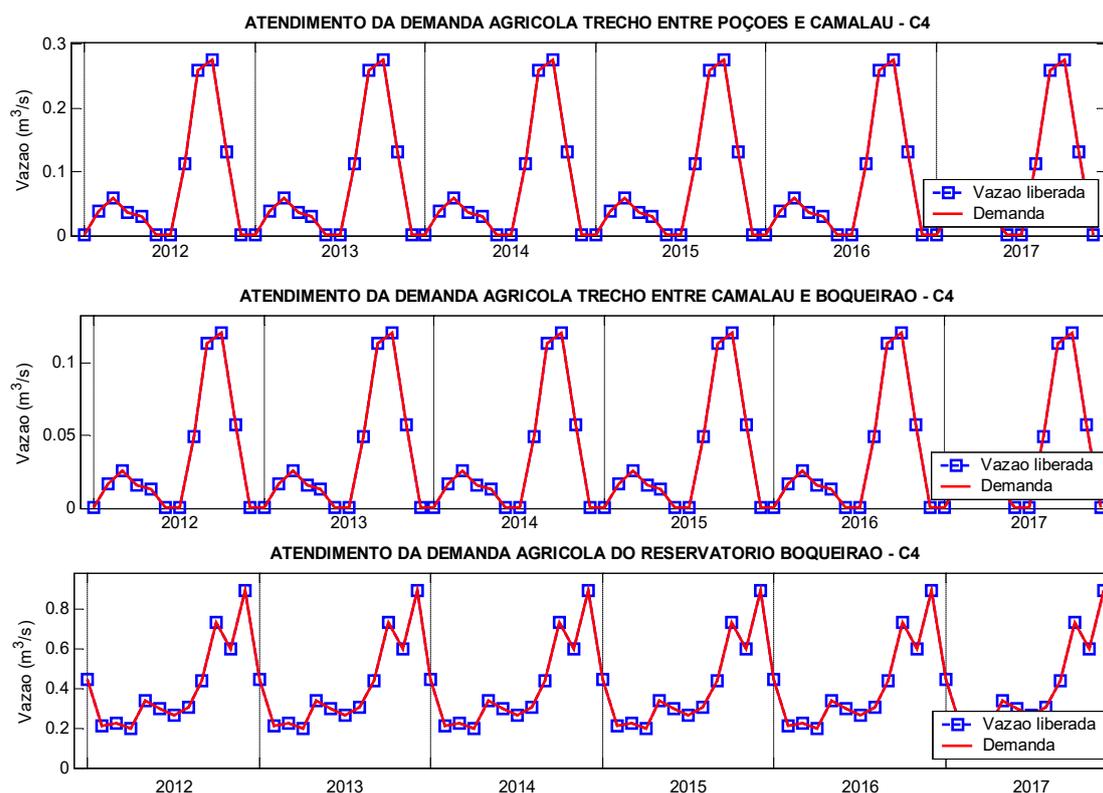
A Figura 39 apresenta o atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano (1º prioridade de atendimento) através das adutoras consideradas no sistema. Observa-se que as demandas de abastecimento urbano foram atendidas sem apresentar falhas ao longo dos 6 anos de operação.

Figura 39 - Atendimento das demandas de abastecimento urbano no Cenário C4



A segunda prioridade estabelecida para o sistema foi o da demanda hídrica para irrigação das áreas agrícolas, que nesse cenário, considera as áreas irrigadas de Oliveira (2011). A Figura 40 mostra que as demandas estabelecidas para as áreas agrícolas neste cenário foram atendidas sem apresentar falhas no período analisado.

Figura 40 - Atendimento das demandas agrícolas do Cenário C4



O atendimento da demanda estabelecida para o canal Acauã-Araçagi (Figura 41) apresenta comportamento similar ao apresentando no cenário C2, porém com vulnerabilidade um pouco maior (Tabela 20).

Figura 41 - Atendimento para o canal Acauã-Araçagi no Cenário C4

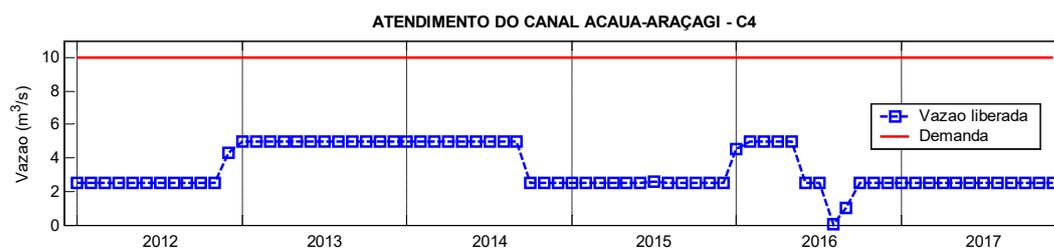
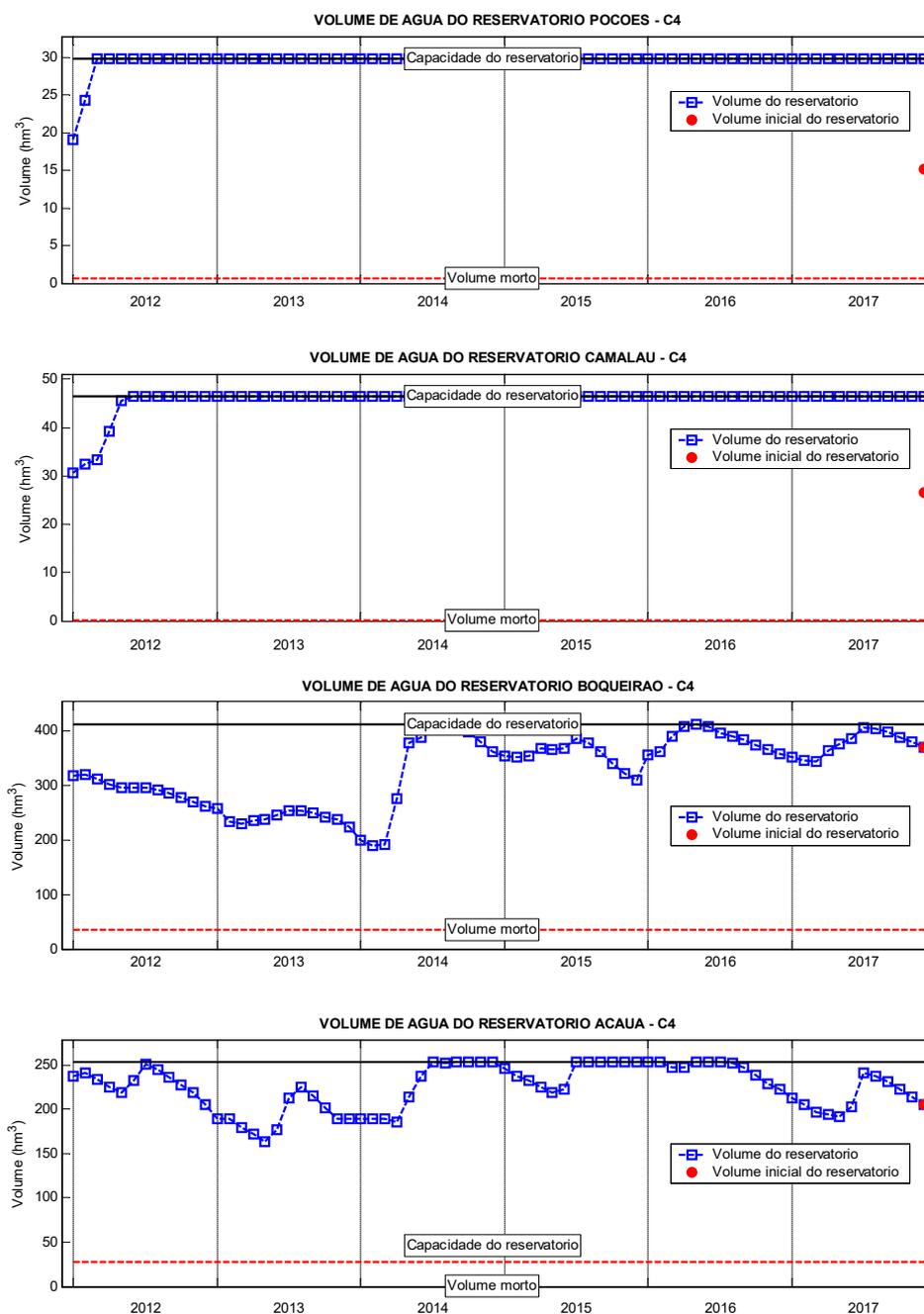


Tabela 20 – Indicadores de Hashimoto para o a demanda do Canal Acauã-Araçagi no Cenário C4

Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade máxima	Sustentabilidade
0	0	0,66	1,00	0

A Figura 42 mostra os volumes de água dos reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã.

Figura 42 - Volumes de água dos reservatórios receptores da vazão do PISF no Cenário C4



Da mesma forma que nos cenários anteriores, o volume de água dos reservatórios Poções e Camalaú permanecem praticamente todo o período de tempo em seus volumes máximos. Os volumes de água dos reservatórios Boqueirão e Acauã apresentam comportamento similar ao do Cenário C3.

A Tabela 21 apresenta os valores dos volumes evaporados médios mensais dos reservatórios no Cenário C4. Os valores apresentam similaridades aos cenários anteriores, sendo os valores próximos aos observados no Cenário C3.

Tabela 21 - Evaporação média mensal dos reservatórios no Cenário C4

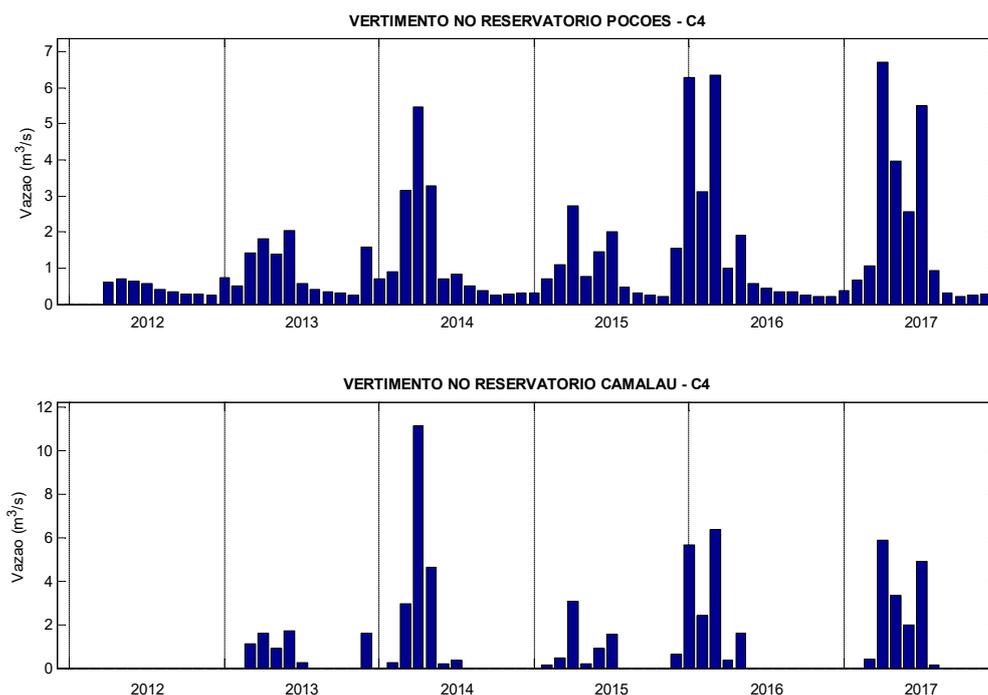
Reservatório	Evaporação média mensal (hm ³ /mês)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Poções	1,33	1,06	0,93	0,8	0,83	0,9	1,05	1,31	1,41	1,61	1,65	1,69
Camalaú	1,36	1,08	0,92	0,79	0,83	0,92	1,07	1,33	1,43	1,64	1,68	1,72
Boqueirão	5,78	5,16	4,96	5,09	4,88	3,82	3,97	4,67	5,28	6,85	6,46	6,3
Acauã	1,82	1,68	1,32	1,21	1,46	0,93	1,04	1,45	1,61	2,005	1,96	2,11

Da mesma forma que nos cenários anteriores, não houve vazão defluente do reservatório Acauã (Figura 43). Com relação aos vertimentos (Figura 44), ocorreram nos reservatórios de Poções e Camalaú.

Figura 43 - Vazão defluente do reservatório Acauã no Cenário C4



Figura 44 - Vertimento nos reservatórios no Cenário C4



A Tabela 22 apresenta os resultados dos Índices de Eficiência associado aos reservatórios no Cenário C4.

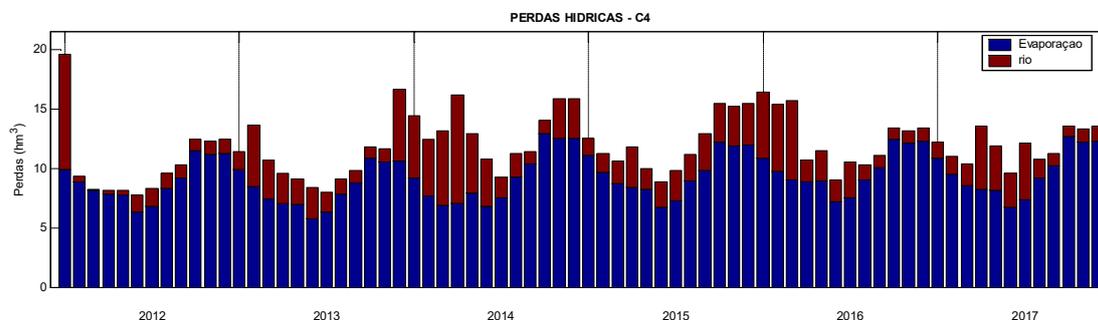
Tabela 22 – Índices de Eficiência associados aos reservatórios no Cenário C4

RESERVATÓRIO	IAP	IUD	IUP	n_{vr}	n_E	n_p	η_V	η_u
POÇÕES	0,60	0,92	0,55	0,02	0,12	0,03	0,31	0,55
CAMALAU	0,61	0,91	0,56	0,03	0,14	0,02	0,27	0,56
BOQUEIRÃO	0,66	0,91	0,60	0,00	0,40	0,06	0,00	0,60
ACAUÃ	0,92	0,93	0,86	0,00	0,14	0,06	0,00	0,86

Os valores de índices de eficiência neste cenário são maiores do que o Cenário C3, devido a diferença na vazão da transposição, visto que o Cenário C4 apresenta parte da vazão do PISF cedida para a ETA, diminuindo assim o potencial para aumento de demandas nos reservatórios Poções e Camalaú. Para o reservatório Boqueirão, houve diferença no potencial de ativação com relação ao Cenário C3, devido a diminuição das perdas hídricas no reservatório por causa da ETA. O reservatório de Acauã é o que tem o menor potencial para aumento das demandas como nos cenários anteriores, devido à sobrecarga no reservatório.

A Figura 45 apresenta as perdas hídricas no Cenário C4, tanto por evaporação quanto em rio ao longo do período analisado.

Figura 45 - Perdas hídricas (hm³) por evaporação e em leito de rio no Cenário C4



Observa-se uma variação dos valores das perdas hídricas nesse cenário para o período analisado (valores entre 8 a 20 hm³). Observa-se que a maior parte das perdas hídricas é devido à evaporação de água nos reservatórios (do mesmo modo que nos cenários anteriores).

A Tabela 23 apresenta volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C4. Tem-se uma diminuição, em média, de cerca 11% do volume de água perdido em comparação com o Cenário C1 (cerca de 18 milhões de m³ de água por ano) e de 9% em relação ao Cenário C3 (cerca de 14 milhões de m³ de água por ano) o que comprova que a implementação da adutora diminuirá substancialmente as perdas hídricas do sistema.

Tabela 23 – Volume anual das perdas hídricas por evaporação e leito do rio para o Cenário C4

ANO	EVAPORAÇÃO (HM ³)	PERDA NO RIO (HM ³)	TOTAL
2012	107,1	19,4	126,5
2013	100,5	29,4	129,9
2014	110,6	47,0	157,7
2015	114,9	30,2	145,1
2016	118,2	32,5	150,7
2017	116,0	27,3	143,3
MÉDIA	111,2	31,0	142,2

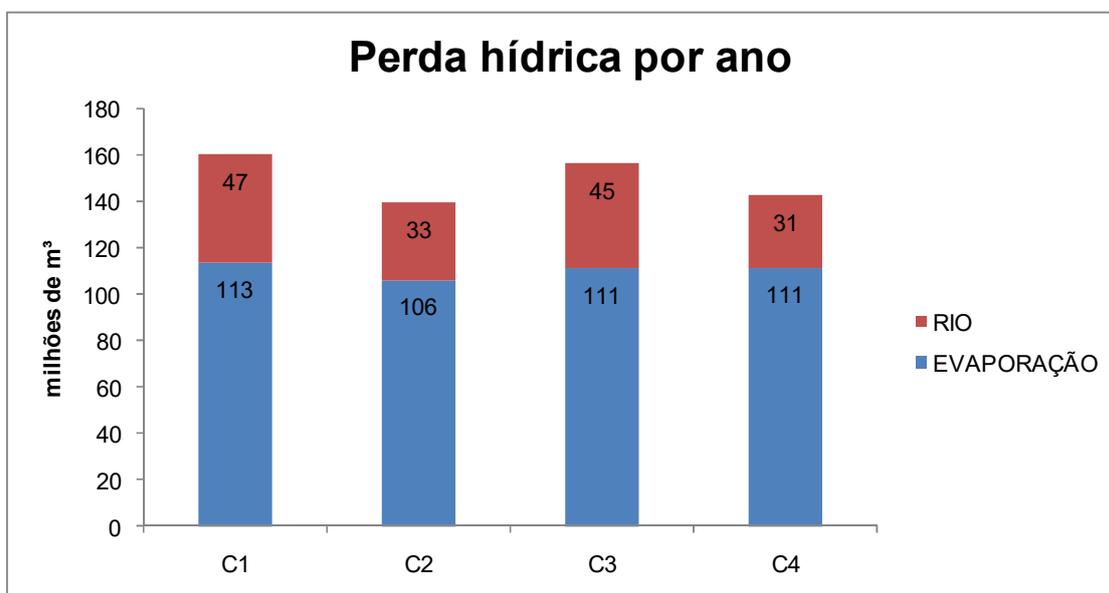
Tem-se que o ano de 2014 foi o que apresentou maior perda de água no sistema, com a maior perda hídrica no trecho do rio. Porém houve maior perda por evaporação no ano de 2016 por causa dos volumes de água dos reservatórios.

Considerando a Resolução nº 67, de 11 de Setembro de 2018, que preconiza o preço da água do PISF com o valor de R\$ 0,81/m³, temos que o custo financeiro das perdas hídricas no Cenário C4 será de cerca 115 milhões de reais por ano (cerca que 11% menor que o custo do Cenário C1).

4.3 RESUMO DAS PERDAS E DOS CUSTOS DOS CENÁRIOS

A Figura 46 apresenta a perda hídrica média anual de cada cenário para o período analisado.

Figura 46 - Perda hídrica média anual de cada cenário para o período analisado



Verifica-se que as perdas hídricas são menores nos cenários que propõem a adutora para transportar parte da vazão do PISF diretamente para a ETA Gravatá (Cenários C2 e C4) em comparação aos cenários que representam a atual forma de transportar as águas do PISF (Cenários C1 e C3). Isso se deve ao fato de parte da vazão transportada via adutora não sofrer perdas hídricas, principalmente ao longo do rio.

Tem-se, também, que o aumento do uso da água nas áreas agrícolas (Cenário C3) diminuiu as perdas hídricas (quando comparada com o Cenário C1) devido principalmente a diminuição do volume evaporado dos reservatórios (principalmente do reservatório Boqueirão). Fato não ocorrido quando comparado entre os cenários C2

e C4, pois, no cenário C4, o reservatório Boqueirão teve que armazenar mais água (devido à diminuição da vazão no leito do rio e o aumento da demanda hídrica do sistema) para garantir o atendimento da sustentabilidade hídrica, o que aumentou a área do espelho d'água aumentando consequentemente o volume evaporado. Fato comprovado pela diminuição da vazão liberada por descarga de fundo pelo reservatório nesse cenário. Porém, tem-se que as perdas hídricas no leito do rio foram as menores dos cenários analisados

A Tabela 24 realiza um comparativo entre os cenários, avaliando a economia de água e o custo financeiro considerando a Resolução nº 67, de 11 de Setembro de 2018, que preconiza o preço da água do PISF com o valor de R\$ 0,81/m³.

Tabela 24 – Economia de água e financeira anuais

COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS	ECONOMIA DE ÁGUA ANUAL (HM³)	ECONOMIA FINANCEIRA ANUAL (R\$)
CENÁRIOS C1 E C2	20,76	16.811.961,70
CENÁRIOS C1 E C3	3,86	3.128.924,70
CENÁRIOS C1 E C4	17,57	14.232.113,40
CENÁRIOS C3 E C4	13,7	11.103.188,70

Tem-se que a economia de água no sistema pode-se chegar a mais de 20 milhões de m³ por ano, o que equivale ao volume acumulado de muitos reservatórios da região (comparativo entre Cenário C1 e C2), resultando em uma economia financeira de quase 17 milhões reais por ano.

Observa-se que a implementação da adutora até a ETA Gravatá (Cenários 2 e 4) sempre resultarão em uma economia financeira, em média, maior que 10 milhões de reais.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo de otimização multiobjetivo utilizado nessa pesquisa apresentou capacidade de gerar soluções otimizadas para todas as análises multiobjetivo propostas, atendendo todas as restrições do sistema impostas ao modelo. Também teve a habilidade de prover informações para analisar o desempenho de vários tipos de usos de água, com suas respectivas demandas, integrando e analisando, simultaneamente, os diversos componentes do sistema de recursos hídricos.

Diante disto, conclui-se que o sistema estudado não apresentou falhas no atendimento as demandas de abastecimento e de irrigação nos quatro cenários propostos em todo período analisado, sendo essas demandas respectivamente de primeira e segunda prioridades de atendimento.

Para a terceira prioridade de atendimento - canal de integração Acauã-Araçagi - em nenhum cenário houve atendimento às demandas sem apresentar falhas, devido a sua elevada e requerida vazão, fazendo com que todo o sistema fique sobrecarregado para que haja alguma liberação para seu abastecimento, o qual não foi atendido em sua totalidade. Sendo assim, pode-se afirmar que não há sustentabilidade para o canal, visto que a magnitude de suas falhas é da ordem de 60% em média.

Com relação à análise dos valores gastos com as perdas hídricas nos quatro cenários, é possível verificar que para os cenários com implementação da adutora até a ETA de Gravatá, o valor gasto é inferior se comparado aos cenários sem adutora, devido as menores perdas hídricas ocorridas no sistema, principalmente em leito de rio.

Fazendo uso da Resolução nº 87 que limita as áreas irrigadas no percurso estudado, comparando os Cenários C1 e C2, com e sem adutora, tem-se uma estimativa de economia anual de R\$ 16.811.961,70 para o cenário com adutora. Comparando os Cenários C3 e C4, considerando as áreas irrigadas sem restrições, a estimativa da economia anual é de R\$ 11.103.188,70 para o cenário com adutora. É possível aferir que para os Cenários C1 e C3, sem adutoras, mas com e sem limitação de áreas irrigadas respectivamente, a limitação estabelecida na Resolução nº 87, não economiza as águas do PISF e sim aumenta as perdas hídricas por evaporação, resultando num gasto anual estimado em R\$ 3.128.924,70. Ou seja, o objetivo de diminuir a demanda das águas do PISF para irrigação e conseqüentemente diminuir o gasto hídrico para o sistema não foi alcançado por haver um maior volume de água

armazenado tanto no reservatório quanto em leito de rio, fazendo com que as perdas (evaporativas e em trânsito) sejam maiores. Sendo assim, ocorreram ainda mais perdas hídricas por evaporação, as quais poderiam ser aproveitadas de forma planejada pelos produtores rurais, gerando renda na agricultura local.

O reservatório Epitácio Pessoa apresentou comportamento típico em todos os cenários e em todo o período analisado, apresentando maiores volumes no período chuvoso (abril a maio) e menores nos períodos com poucas vazões afluentes (agosto a janeiro). Manteve na maior parte do tempo nos quatro cenários uma média de volume acima de 70% da sua capacidade, apresentando potencial de ativação, mas sendo necessário um estudo detalhado que avalie o comportamento do sistema caso ocorra a ampliação de alguma demanda ou a implementação de uma nova.

O reservatório Acauã também apresentou, em todos os cenários, um comportamento típico no período analisado, porém diferentemente do reservatório Epitácio Pessoa, seu potencial de ativação é bastante reduzido, devido à alta demanda do canal de integração Acauã-Araçagi que sobrecarrega o reservatório, fazendo com que não haja vazão defluente desse reservatório para perenização do rio Paraíba, mesmo com as águas do PISF.

Os reservatórios Poções e Camalaú não utilizam toda a sua disponibilidade, por apresentarem um espelho d'água menor que dos reservatórios Epitácio Pessoa e Acauã e por serem mais próximos da entrada das águas do PISF no Estado da Paraíba, rapidamente atingem a capacidade máxima e o volume excedente é liberado para o trecho do rio Paraíba a jusante.

Contanto, recomendam-se para trabalhos futuros:

- Estabelecimento de uma vazão firme para o canal de integração Acauã-Araçagi de modo que não haja alguma demanda reprimida no sistema e que não gere conflitos pelo uso da água na bacia;
- Estabelecimento de uma vazão para a perenização do rio Paraíba a jusante do reservatório Acauã de modo a atender possíveis demandas a jusante do mesmo e garantindo as condições ecológicas do rio;
- Aproveitamento, principalmente para usos não consuntivos (prática da piscicultura e/ou carcinocultura), dos reservatórios Poções e Camalaú desde que sejam realizados estudos de viabilidade, para evitar ocorrência de problemas futuros;

- Aumento da área agrícola do sistema, por causa, da vazão exógena do PISF, o que causará uma diminuição das perdas hídricas e um melhor aproveitamento da água.

Contudo, essa pesquisa também pode ser implementada no Eixo Norte do PISF, ampliando a visão dos gestores e possibilitando uma melhor tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: < <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website>>. Acesso em: 15/01/2018.

ANA – Agência Nacional das Águas. RESOLUÇÃO Nº 67, DE 11 DE SETEMBRO DE 2018. *Aprova as tarifas para a prestação do serviço de adução de água bruta do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF pela CODEVASF, para o ano de 2018, com fundamento no art. 4º, inciso XIX da Lei nº 9.984, de 2000.* Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2018/0067-2018_Ato_Normativo.pdf?150511>. Acesso em: 08/11/2018.

ANA – Agência Nacional das Águas. RESOLUÇÃO CONJUNTA ANA/AESA-PB Nº 87, DE 05 DE NOVEMBRO DE 2018. *Estabelece as condições de uso de recursos hídricos superficiais e subterrâneos para o Sistema Hídrico Rio Paraíba - Boqueirão, no Estado da Paraíba, durante o período de pré-operação do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - PISF.* Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2018/0087-2018_Ato_Normativo.pdf?154812>. Acesso em: 10/11/2018.

ASSIS, L. F., VIEIRA, A. S.; *Modelo de Cobrança Pelo Uso Da Água: Estimação e Análise da Arrecadação na Sub-Bacia Do Rio Do Peixe No Sertão Da Paraíba.* XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, – Brasília – DF, 2015.

BARROS, S. V. A. *Otimização dos usos múltiplos em pequenos açudes na bacia do açude de Sumé-PB.* Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração: Recursos hídricos e Sanitária - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2010.

BASHIRI-ATRABI, H., QADERI, K., RHEINHEIMER, DE et al. *Application of Harmony Search Algorithm to Reservoir Operation Optimization.* Water Resources Management. Vol. 29: p. 5729–5748, 2015.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.* Diário Oficial da União, Brasília, 9 de janeiro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em 20/02/2018.

BRITO, F. B. de. *O conflito pelo uso da água do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) - PB*. 208 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Geografia. João Pessoa - PB, 2008.

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 de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2006.

DINIZ, L. S. *Regionalização de parâmetros de modelos chuva-vazão usando redes neurais*. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2008.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20da%20Paraiba/pocoos.htm>>. Acesso em: 20/01/2018.

FARIAS, E. E. V. *Distribuição da água do projeto de integração do Rio São Francisco no estado da Paraíba - eixo leste: análise de perdas*. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, área de concentração: Recursos Hídricos - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2009.

FARIAS, E.E.V. ; CURI, W. F. ; DINIZ, L. S. . *São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 22, p. 1, 2017.

GOLDBARG, M.C.; LUNA, H. P.L.; GOLDBARG, E.F.G. *Programação linear e fluxos em redes*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

HAMID-REZA ASGARI; OMID BOZORG HADDAD; MARYAM PAZOKI; AND HUGO A. LOÁICIGA. *Weed Optimization Algorithm for Optimal Reservoir Operation*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 142. 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.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Dados Históricos dos Censos. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censohistorico/default_hist.shtm>. Acesso em: 13/07/2018.

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.

LANNA, A. E. L. *Introdução*. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre. Editora da Universidade / UFRGS – ABRH, p.15-41, 1997.

LANNA, A. E. *Introdução*. In: PORTO, R. L. L. (Org.). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, p. 16-41, 2002.

LIMA, C. A. G. *Análise e sugestões para diretrizes de uso das disponibilidades hídricas superficiais da bacia hidrográfica do rio Piancó, situada no estado da Paraíba*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Recursos Naturais - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2004.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. *Simulação Hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado*. In: IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Fortaleza, CE, Brasil. Anais... Fortaleza/CE: ABRH, p. 42-62, 1981.

LOUCKS, D. P. *Sustainable water resources management*. Water International Resource Association, v. 25, n. 1 p. 3-10, mar. 2000.

MAUAD, F. F. *Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O conflito de usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em Portugal*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Tese de Doutorado, 2000.

MENDOZA, C.J.C1, FRIZZONE, J.A. *Economia de energia em irrigação por pivô central em função da melhoria na uniformidade da distribuição de água*. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza v.6, n. 3, p.184 – 197, 2012.

MING, B., LIU, P., BAI, T. et al. *Improving Optimization Efficiency for Reservoir Operation Using a Search Space Reduction Method*. Water Resources Management. Vol. 31, p. 1173-1190, 2017.

NEPOMUCENO, T. C. *Modelo para simulação de nitrogênio e fósforo em sistemas de recursos hídricos, aplicação em região do alto curso do rio Piranhas-PB*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2018.

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

OLIVEIRA, D. S. L. *Análise de alternativas para o uso das águas do Projeto de Integração do rio São Francisco do Eixo Leste no estado da Paraíba através de um modelo de otimização multiobjetivo*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2013.

PAN, L., HOUSH, M., LIU, P., CAI, X., and CHEN, X. *Robust stochastic optimization for reservoir operation*. Water Resources Research. Vol. 51, p.409– 429, 2015.

PERH-PB. *Plano estadual de recursos hídricos: Resumo executivo e atlas*. Governo Estadual da Paraíba: Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, SECTMA; Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA – Brasília, DF: Consórcio TC/ BR – Concremat, 2006.

PESSOA, M. F., ASSIS, L. F., VIEIRA, A. S.; *Planejamento Ótimo da Água na Agricultura Irrigada: Um Estudo de Caso em Um Perímetro Paraibano*. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais. v. 7, n. 1 2016.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. *Técnicas de otimização*. Rio De Janeiro: Editora Ltc. 225 P, 2013.

REGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; RIBEIRO, M. M. R. (2000). *Uma Análise da Crise de 1998-2000 no Abastecimento D'água de Campina Grande - PB*. In: V SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, Natal, RN, Brasil. Anais... Natal/RN: 21 a 24 de Novembro de 2000, CD-ROM.

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

ROS, D. A.; BARROS, M. *Estratégias Operacionais de Sistemas Hidroenergeticos: Impactos de Diferentes Objetivos*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba, 2003. CD-ROM

SALLA, M. R., ARQUIOLA, J. P., SOLERA, A., ÁLVAREZ, J. A., PEREIRA, C. E., ALAMY FILHO, J. E., OLIVEIRA, A. L. *Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 189 - 204, 2014.

SANTOS, V. da S. *Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos*. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração: Engenharia Hidráulica - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2007.

SANTOS, V. da S. *Modelo de otimização quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento dos recursos hídricos superficiais, com aplicação à bacia do rio Paraíba*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Recursos Naturais - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2011.

SANTOS, V. DA 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, p.49-60, 2011.

SANTOS, V. DA S.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. *Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos II: Aplicação*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.16, p.61-71, 2011.

SILVA, W. P. et al. "*LAB Fit Ajuste de Curvas*": *Um software em português para tratamento de dados experimentais*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 4, p. 419 – 427, nov. 2004.

SIMONOVIC, S. P. *Reservoir system analysis: closing gap between theory and practice*. Journal of Water Resources Planning and Management. 118 (3), p.262-280, 1992.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Série Histórica. Disponível em: <<http://app3.cidades.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em: 15/09/2018.

SRINIVASAN, K., NEELAKANTAN, T. R., NARAYAN, P. S., NAGARAJUKUMAR, C. *Mixed-Integer programming model for reservoir performance optimization*. Journal of Water Resources Planning and Management. 125 (5), p. 298-301, 1999.

TC/BR RIVERSIDE TECHNOLOGY. *Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba*. João Pessoa: SEMARH/PB, 2001.

TIANTIAN YANG, XIAOGANG GAO, SCOTT LEE SELLARS and SOROOSH SOROOSHIAN. *Improving the multi-objective evolutionary optimization algorithm for hydropower reservoir operations in the California Oroville–Thermalito complex*. Environmental Modelling & Software. Vol. 69, p. 262-279, 2015.

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

VIEIRA, Z. M. C. L. *Metodologia de análise de conflitos na implantação de medidas de gestão da demanda de água*. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2008.

VIEIRA, A. S.; CURI, W. F.. *Evidenciação dos modelos de simulação e técnicas para o planejamento integrado dos sistemas hídricos*. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental. Vol. 5, p. 233-266, 2016.

WURBS, R. A. *Reservoir-system simulation and optimization models*. Journal of Water Resources Planning and Management. 119 (4), p.455-472, 1993.

YANGYANG LI, QUAN CUI, CHUNHUI LI, XUAN WANG, YANPENG CAI, GUANNAN CUI and ZHIFENG YANG. *An improved multi-objective optimization model for supporting reservoir operation of China's South-to-North Water Diversion Project*. Science of The Total Environment. Vol. 575, p. 970-981, 2017.

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.

ZHONG-KAI FENG, WEN-JING NIU, CHENG CHUN-TIAN and SHENG-LI LIAO. *Hydropower system operation optimization by discrete differential dynamic programming based on orthogonal experiment design*. Energy. Vol. 126, p. 720-732, 2017.

ANEXOS

ANEXO 1– Consumo per capita e perdas na distribuição dos municípios

MUNICÍPIOS	CONSUMO PER CAPITA (L/HAB.DIA)	PERDA NA DISTRIBUIÇÃO (%)	PER CAPITA + PERDA (L/HAB.DIA)	PROGRESSÃO POPULACIONAL - 2024	CONSUMO (M ³ /ANO)
CAMALAÚ	98,7	40,73	138,9	3288	166697,28
SÃO JOÃO DO TIGRE	90,2	11,9	100,93	2100	77365,75
SÃO SEBASTIÃO DO UMBUZEIRO	139,2	19,11	165,8	2798	169327,70
ZABELÊ	90,2	11,9	100,93	1816	66902,95
AMPARO	124,6	14,2	142,29	1646	85488,33
CONGO	79,3	50,55	119,38	4832	210558,96
COXIXOLA	121,3	37,35	166,6	853	51871,8
DESTERRO	54,3	59,08	86,38	6742	212567,57
GURJÃO	105,2	17,31	123,41	2727	122836,88
LIVRAMENTO	87,1	25,59	109,38	5029	200792,60
MONTEIRO	97,7	10,69	108,14	24153	953381,88
OURO VELHO	102	22,01	124,45	2363	107337,67
PARARI	95,8	26,96	121,62	1075	47723,66
PRATA	90	28,79	115,91	2809	118841,8
SANTO ANDRÉ	121,3	37,35	166,6	1109	67439,42
SÃO JOÃO DO CARIRI	92,6	20,03	111,14	3202	129901,74
SÃO JOSÉ DOS CORDEIROS	90,2	11,9	100,93	2030	74786,89
SERRA BRANCA	97,5	28,54	125,32	9048	413893,27
SUMÉ	98,7	45,25	143,36	13384	700345,08
TAPEROÁ	97,5	28,54	125,32	9771	446966,3
ASSUNÇÃO	145,8	20	174,96	4457	284625,8
JUNCO DO SERIDÓ	125,9	2,27	128,75	5743	269901,72
TENÓRIO	145,8	20	174,96	2426	154925,33
BOA VISTA	91,9	15,37	106,02	4009	155144,83
BOQUEIRÃO	88,2	31,5	115,98	14656	620444,09
CABACEIRAS	95,5	37,76	131,56	3111	149389,26
JUAZEIRINHO	88,3	17,63	103,86	10127	383930,37
OLIVEDOS	85,2	16,79	99,50	2315	84079,3
SOLEDADE	85,7	10,05	94,31	12893	443831,08
ALCANTIL	108,6	2,27	111,06	2782	112778,95
POCINHOS	111,5	21,33	135,28	14310	706603,14
PUXINANÃ	88	38,83	122,17	6358	283517,18
BARRA DE SÃO MIGUEL	108,6	2,27	111,06	2904	117724,69
CAMPINA GRANDE	97,1	24,53	120,91	397044	17523656,03

CATURITÉ	106,3	34,27	142,72	4261	221981,43
MASSARANDUBA	88	38,83	122,17	6146	274063,63
LAGOA SECA	89,9	18,53	106,55	13063	508070,25
QUEIMADAS	81,7	16	94,77	29465	1019246,79
RIACHO DE SANTO ANTÔNIO	27,7	6,18	29,41	1347	14460,48
AROEIRAS	91,2	46,97	134,03	15760	771032,36
FAGUNDES	83,7	36,64	114,36	5968	249129,4
GADO BRAVO	106,3	34,27	142,72	947	49334,99
INGÁ	89,1	29,49	115,37	10375	436912,93
ITABAIANA	142,7	47,76	210,85	20393	1569476,57
ITATUBA	89,7	23,29	110,59	7374	297657,13
JUAREZ TÁVORA	86,2	13,47	97,81	6303	225023,81
JURUPIRANGA	95,4	58,74	151,43	10546	582928,62
MOGEIRO	128,8	59,47	205,39	6868	514894,21
PILAR	91,2	46,97	134,03	9468	463206,5
RIACHÃO DO BACAMARTE	53,7	36,19	73,13	3472	92681,29
RIACHÃO DO POÇO	106,3	34,27	142,72	1448	75435,13
SALGADO DE SÃO FÉLIX	101,3	57,08	159,12	6812	395637,85
SÃO MIGUEL DE TAIPU	185,8	2,27	190,01	4362	302532,8
CALDAS BRANDÃO	93,5	29,24	120,83	5233	230808,69
GURINHÉM	89,2	19,78	106,84	7224	281721,35
MARI	96,2	30,27	125,31	17596	804871,04
SAPÉ	86,4	34,3	116,03	41146	1742650,28
SOBRADO	96,7	17,57	113,69	1809	75067,92
BAYEUX	100,3	43,18	143,60	111399	5839255,08
CABEDELO	160,4	42,23	228,13	99401	8277118,86
CRUZ DO ESPÍRITO SANTO	105,4	62,34	171,1	11407	712410,74
JOÃO PESSOA	148,9	40,28	208,87	893811	68144218,39
SANTA RITA	113	41,13	159,47	134816	7847513,77
NATUBA	85,7	18,87	101,87	3733	138804,62
UMBUZEIRO	111,1	17,1	130,09	3447	163683,57
CARAÚBAS	60,9	50,74	91,8	2705	90637,08
SÃO DOMINGOS DO CARIRI	90,1	25,91	113,44	1955	80951,45
ARAÇAGI	100	28,33	128,33	8202	384185,37
CUITEGI	83,2	37,04	114,01	5786	240791,95
GUARABIRA	117,5	37,41	161,45	57731	3402186,76
ITAPOROROCA	48,4	0	48,4	14662	259018,89
MAMANGUAPE	106,2	31,91	140,08	37614	1923289,32
PILOEZINHOS	87,9	44,43	126,95	3610	167280,89
RIO TINTO	110,2	45,92	160,80	13880	814664,41

ANEXO 2 – Relação Cota x Área x Volume dos reservatórios

RESERVATÓRIO	COTA(m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
POÇÕES	32,00	0	0
	33,00	3.750	1.875
	34,00	11.000	9.250
	35,00	59.500	44.500
	36,00	219.000	183.750
	37,00	577.750	582.125
	38,00	992.000	1.367.000
	39,00	1.579.500	2.652.750
	40,00	2.167.250	4.526.125
	41,00	2.838.750	7.029.125
	42,00	3.640.250	10.268.625
	43,00	4.596.250	14.386.875
	44,00	5.756.000	19.563.000
	45,00	7.107.000	25.994.500
	46,00	8.381.250	33.728.625
	47,00	8.615.250	42.716.875
48,00	11.603.000	53.326.000	

RESERVATÓRIO	COTA(m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
CAMALAU	305,00	26.000	-
	306,00	79.680	52.840
	307,00	133.360	159.360
	308,00	187.040	319.560
	309,00	240.720	533.440
	310,00	294.400	801.000
	311,00	327.840	1.112.120
	312,00	361.280	1.456.680
	313,00	394.720	1.834.680
	314,00	428.160	2.246.120
	315,00	461.600	2.691.000
	316,00	906.400	3.375.000
	317,00	1.351.200	4.503.800
	318,00	1.796.000	6.077.400
	319,00	2.240.800	8.095.800
	320,00	2.685.600	10.559.000
	321,00	3.363.920	13.583.760
	322,00	4.042.240	17.286.840
	323,00	4.720.560	21.668.240
	324,00	5.398.880	26.727.960
325,00	6.077.200	32.466.000	

326,00	6.985.760	38.997.480
327,00	7.894.320	46.437.520
328,00	8.802.880	54.786.120
329,00	9.711.440	64.043.280
330,00	10.620.000	74.209.000

RESERVATÓRIO	COTA(m)	ÁREA (m2)	VOLUME (m3)
BOQUEIRÃO	343,00	37223	16994
	344,00	70593	69800
	345,00	142867	174286
	346,00	257180	366771
	347,00	421869	707956
	348,00	631536	1230617
	349,00	873903	1981542
	350,00	1158564	2990176
	351,00	1506467	4314820
	352,00	1866251	5996469
	353,00	2261179	8058687
	354,00	2697741	10529191
	355,00	3217443	13477904
	356,00	3859121	17006273
	357,00	4556783	21217917
	358,00	5260937	26112154
	359,00	6158316	31819531
	360,00	7030425	38416664
	361,00	8029009	45934680
	362,00	8999597	54453579
	363,00	10013408	63965416
	364,00	11031533	74490376
	365,00	12260463	86139409
	366,00	13693060	99074597
	367,00	15486319	113650769
	368,00	17365964	130099018
	369,00	19443185	148504719
	370,00	21743159	169122415
	371,00	24290550	192184935
	372,00	26752308	217765387
	373,00	29120116	245796027
	374,00	31256425	276130869
	375,00	33046998	308486064
376,00	34539523	342495505	
377,00	36142787	377846134	
377,55	38135841	397990704	
377,90	39623321	411686287	

RESERVATÓRIO	Cota(m)	Área (m2)	Volume (m3)
ACAUÃ	90	140000	0
	94	380000	2000000
	98	980000	4800000
	100	1410000	7000000
	104	2560000	14500000
	108	4090000	27500000
	112	5960000	47600000
	114	7020000	60800000
	116	8140000	76100000
	118	9340000	93800000
	120	10590000	114000000
	122	11880000	136600000
	124	13200000	161800000
	126	14550000	189500000
	128	15900000	220100000
	130	17250000	253100000
132	18570000	288800000	

Fonte: AESA (2018)

ANEXO 3 – Vazões afluentes provenientes dos reservatórios a montante do reservatório Boqueirão

MÊS - ANO	VAZÃO (M³/S)	MÊS - ANO	VAZÃO (M³/S)
Jan-12	0,006	Jan-15	9,1115E-05
Fev-12	0,064	Fev-15	0,016
Mar-12	0,002	Mar-15	1,246
Abr-12	0	Abr-15	1,266
Mai-12	0,008	Mai-15	0,003
Jun-12	0,248	Jun-15	0,024
Jul-12	0,064	Jul-15	0,585
Ago-12	0,009	Ago-15	0,002
Set-12	0	Set-15	0,001
Out-12	0	Out-15	0
Nov-12	0	Nov-15	0
Dez-12	0	Dez-15	0,005
Jan-13	0	Jan-16	3,477
Fev-13	0	Fev-16	2,833
Mar-13	0	Mar-16	5,812
Abr-13	0,02	Abr-16	3,591
Mai-13	0,045	Mai-16	0,844

Jun-13	0,107	Jun-16	0,011
Jul-13	0,088	Jul-16	0,0003
Ago-13	0,051	Ago-16	0
Set-13	0,011	Set-16	0
Out-13	0,0001	Out-16	0
Nov-13	0,0029	Nov-16	0
Dez-13	0,015	Dez-16	0
Jan-14	0	Jan-17	0
Fev-14	0,174	Fev-17	0
Mar-14	0,115	Mar-17	0
Abr-14	13,616	Abr-17	3,729
Mai-14	10,598	Mai-17	2,911
Jun-14	1,62	Jun-17	1,85
Jul-14	3,011	Jul-17	1,872
Ago-14	0,269	Ago-17	0,338
Set-14	0,038	Set-17	0,005
Out-14	0,01	Out-17	0
Nov-14	0	Nov-17	0
Dez-14	0	Dez-17	0