



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO - EIXO NORTE, NO ESTADO DA PARAÍBA
ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

Francisco de Assis da Costa Neto

Campina Grande – PB

Outubro de 2020

Francisco de Assis da Costa Neto

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO, EIXO NORTE, ESTADO DA PARAÍBA,
ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO**

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

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

Campina Grande

2020

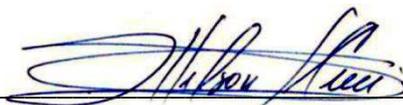
- C837a Costa Neto, Francisco de Assis da.
Análise de alternativas para o uso das águas do projeto de integração do Rio São Francisco, eixo Norte, estado da Paraíba, através de um modelo de otimização multiobjetivo / Francisco de Assis da Costa Neto. - Campina Grande, 2020.
118 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.
"Orientação: Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi, Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos.
Referências.
1. Escassez Hídrica. 2. Operação de Reservatórios. 3. Piranhas-Açu. 4. Semiárido. I. Curi, Wilson Fadlo. II. Santos, Valterlin da Silva. III. Título.

CDU 556.18(43)

FRANCISCO DE ASSIS DA COSTA NETO

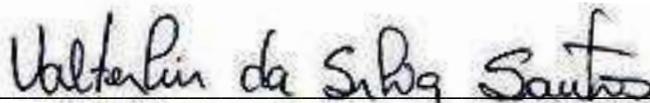
**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO, EIXO NORTE, NO ESTADO DA PARAÍBA
ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO**

Dissertação 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.



Prof. PhD. Wilson Fadlo Curi (UFCG)

Orientador (UAF/CCT/UFCG)



Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos (UFCG)

Coorientador (UACC/CCJS/UFCG)



Profª. Drª. Andréa Carla Lima Rodrigues

Examinador Interno (UAEC/CTR/UFPG)



Prof. Dr. Francisco Jácome Sarmento

Examinador Externo (Depto. Eng. Civil/CT/UFPG)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
 POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
 Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO: FRANCISCO DE ASSIS DA COSTA NETO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. WILSON FADLO CURI – PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. VALTERLIN DA SILVA SANTOS – UFCG – COORIENTADOR, DR.ª ANDRÉA CARLA LIMA RODRIGUES – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR. FRANCISCO JÁCOME SARMENTO – UFPB – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 21/2020). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O USO DAS ÁGUAS DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO - EIXO NORTE, NO ESTADO DA PARAÍBA ATRAVÉS DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INÍCIO: 14:30 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O CANDIDATO FOI ARGUIDO ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS DA COMISSÃO, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, ESTE CONCEITO PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O CONCEITO “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 22 DE OUTUBRO DE 2020**



Documento assinado eletronicamente por **WILSON FADLO CURI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/10/2020, às 17:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES, PROFESSOR**, em 22/10/2020, às 17:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO DE ASSIS DA COSTA NETO, ENGENHEIRO-AREA**, em 23/10/2020, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da



[Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.](#)



Documento assinado eletronicamente por **VALTERLIN DA SILVA SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/10/2020, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.](#)



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 23/10/2020, às 14:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1079758** e o código CRC **72912D55**.

Referência: Processo nº 23096.036170/2020-68

SEI nº 1079758

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, a meus pais, a minha esposa e a meu filho por todo o apoio e motivação que sempre me deram para chegar até aqui com êxito.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me permitido nascer numa família maravilhosa, rodeada de amor, cuidados e incentivos de toda qualidade e por ter me dado consciência e sabedoria para querer trilhar sempre o caminho do bem e daquilo que Lhe é bom e agradável;

A meus pais por jamais terem medido esforços no exercício da importante missão de guiar um filho pelos caminhos da vida;

À minha esposa e ao meu filho simplesmente por existirem, porque assim são meu maior estímulo para ser cada vez melhor enquanto profissional e principalmente como ser humano;

Às minhas irmãs e cunhados, sobrinhos e sobrinhas, de um modo geral pela amizade, torcida e companheirismo;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA –, pela oportunidade de participar de tão seletivo, comprometido e vocacionado grupo de professores, verdadeiramente competentes e preparados em todos os sentidos;

Ao meu caro orientador Professor Wilson Fadlo Curi por todos os seus ensinamentos técnicos e acadêmicos, mas também por sua notável generosidade enquanto ser humano, serenidade, paciência e senso de humor;

Ao meu co-orientador Professor Valterlin da Silva Santos pelo generoso repasse de muitas das suas experiências acadêmicas, pela paciência, pelas orientações, pelas ideias, pelo tempo dispensado a mim e à minha pesquisa. Trata-se, pois, de um cidadão dotado de admirável humanidade e competência profissional;

A toda a Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, especialmente à pessoa do Professor Marcos Antônio de Souza Simplício, chefe do Laboratório de Estruturas, pela generosa concessão de tempo e compreensão em face das várias dificuldades inerentes ao processo de pós-graduação, para que este funcionário-aluno pudesse realizar seu sonho;

Aos amigos da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas – UACA –, pela amizade e companheirismo durante todo o tempo em que estivemos juntos, sentimentos que permanecem vivos até hoje;

Especialmente ao meu amigo-irmão, o meteorologista Doctor Scientist Hudson Ellen Alencar Meneses, que desde o primeiro instante me apoiou e incentivou copiosamente não apenas nessa ideia do Mestrado, como também em tantas outras questões profissionais e até mesmo pessoais;

Ao Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido – CDSA –, Campus Sumé, às pessoas de Flávio Lira e Hugo Vladimir e de modo especial ao meu também amigo-irmão Paulo Rangel de Almeida Silva por toda a sua amizade, consideração e companheirismo;

Ao meu amigo Jaílson Marques Rodrigues, que me deu a primeira oportunidade de emprego como engenheiro civil na então 5ª maior construtora do país, no Estado do Rio de Janeiro, onde tive certamente algumas das melhores experiências profissionais e pessoais da minha vida;

Ao amigo Florêncio Magno Farias Fonseca pela valiosíssima ajuda, lastreada em sua natural generosidade e em seus notáveis saberes no âmbito do Direito Administrativo, dos quais obtive importante favor;

Ao amigo Thiago Cabral Nepomuceno, pelas valiosíssimas ajudas, conversas, amizade e companheirismo.

RESUMO

Por ser um recurso limitado e variável, muitos são os fatores que têm pressionado a água e os setores a ela relacionados em todo o mundo, sendo a sobreexploração uma das principais causas. A explosão demográfica mundial tem levado a um aumento exponencial da demanda hídrica em vários segmentos da sociedade, situação que exige a adoção de métodos que otimizem o uso da água. A questão da escassez hídrica é especialmente importante para regiões do planeta como a do semiárido nordestino, que é fortemente marcada por severos ciclos de estiagem, altas taxas de evaporação, bem como pela alta variabilidade espaço-temporal das chuvas e baixas intensidades precipitadas. A fim de promover a segurança hídrica no semiárido nordestino e atenuar os impactos das citadas condições climáticas, o Governo Federal, através do então Ministério da Integração Nacional, em 2007, deu início às obras do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias do Nordeste Setentrional (PISF). Nesse contexto, especificamente naquilo que concerne ao Eixo Norte, com o intuito de diagnosticar as potencialidades, vulnerabilidades e sustentabilidade em decorrência do reforço hídrico proveniente da transposição do conjunto hídrico, formado pelas regiões do Alto e Médio cursos do rio Piranhas, mais a sub-bacia do rio do Peixe, foi realizado um levantamento de todas as demandas de abastecimento urbano e irrigação das mencionadas vertentes, cujo principal objetivo foi analisar alternativas de entrada da vazão exógena proveniente do PISF na bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, considerando e avaliando a sustentabilidade hídrica das citadas demandas. Os mencionados requerimentos hídricos e os dados estruturais dos reservatórios estratégicos (tais como curvas cota-área-volume, tipo e extensão de seus vertedouros, cota e diâmetro dos seus descarregadores de fundo, informações de precipitação e seu escoamento superficial derivado, além de dados de evaporação) serviram de entrada a um modelo de otimização multiobjetivo baseado em Programação Linear Sucessiva. Para tanto, foram estabelecidos quatro cenários possíveis, que simularam: 1) a proposta apresentada no Plano de Recursos Hídricos (Cenário C1); 2) como se a toda a vazão exógena fluísse exclusivamente pela vertente do Alto Piranhas (Cenário C2); 3) como se a vazão exógena escoasse exclusivamente pelo subsistema Peixe (Cenário C3); e 4) o modelo deixado livre para determinar os valores de vazão exógena estritamente necessários ao pleno atendimento de todas as demandas e restrições inerentes ao sistema (Cenário C4). Os resultados apontaram que os cenários extremistas, isto é, aqueles em que se alocou, por hipótese, toda a vazão exógena numa única vertente (situações segunda e terceira), são ruins e prejudicam intensamente as vertentes preteridas, com recorrentes eventos de falha em várias unidades consumidoras. O cenário-base, não obstante a sua maior equidade em face dos cenários extremos, apresentou-se carente de ajustes pontuais, haja vista que alguns elementos componentes do sistema não foram satisfatoriamente atendidos. O Cenário C4, por sua vez, demonstrou resultados mais exitosos, e nenhuma falha de atendimento foi observada. Contudo, para a sua viabilização, percebeu-se recomendável um gerenciamento ostensivo, rigoroso, através da aplicação de planos concebidos em menor escala temporal sobre a utilização dos recursos, para que se exija em termos de vazão exógena apenas o que for necessário em face das demandas apresentadas para aquele determinado período previsto no horizonte de planejamento, buscando, desta maneira, aproximar-se o máximo possível da realidade instantânea operacional.

Palavras-chave: Escassez hídrica. Operação de reservatórios. Piranhas-Açu. Semiárido.

ABSTRACT

Being a limited and variable resource, many factors has pressed the water and its relationated sectors around the world, such as superexploration and aquifers' contamination. The world's demografic explosion has taken to an exponential increase about hydrics demand at many society's segments, situation that requires the adoption of methods that optimize the water uses. The water's scarcity question is especially important to planet's regions like brazilian semiarid, that is strongly marked by long drought's periods, high evaporation rates, as well as high rains variability spacial and temporally and low precipitation's intensity. These atributes configure themselves as an important dificulty to economic and social region's development. In order to promote hydric's security for brazilian's semiarid, the Federal Government started, at 2006, the San Francisco's river integration project with the Northeast septentrional's basins. The mentioned project was divided in two axis: north and east. The first aims to attend the Sertão region and the second correspond to Borborema and Agreste regions attendance. At north axis, the prevision is to provide 2.7 m³/s of flow acessing the Piranhas-Açu river's basin by two areas: Piranhas' river high course region and Peixe's river subbasin. Each one will receive, respectively, 1.7 m³/s and 1.0 m³/s. An important condition was imposed by the basin's principal management instrument, that is 1.7 m³/s as residual flow to the neighboring state Rio Grande do Norte. So, from a multiobjective optimization model, based on Linear Programming, it has done a survey about the demands on urban supply and irrigation at whole study area to be used as inputs for the mentioned otimization model and to diagnosticate hydric system' potentialities, vulnerabilities and sustainability, from the water's transposition reinforcement. It were established four scenarios, that simulated: exactly the Hydric Resources Plan proposes (Scenario 1); as if all of external reinforcement flows was drained, exclusively, by the Piranha's river high course region (Scenario 2); as if the whole external contribution was drained by Peixe's river subbasin (Scenario 3); and the model left free to arbitrate the optimum exogenous flow values by the system (Scenario 4). The results pointed that the extreme scenarios (like the second and the third) are bad and hardly prejudice the deprecated basins, by recurrent events of fail at various consumers units. The basic scenario, although its greater balance relatively the extremes scenarios, is needy of pontuals adjustments. The fourth scenario, by its turn, presented very good results through no events of fail. However, it is needy a rigorous managements plans in a smaller temporal scale, to be demanded as an exogenous flow reinforcement only the necessary to that management horizont.

Keywords: Water scarcity. Semiarid. Reservoir operation. Piranhas-Açu river.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo fictício de descarga em reservatório.....	17
Figura 2. Eixos do PISF.	25
Figura 3. Trechos do PISF.	26
Figura 4. Intervenções hidráulicas do PISF.	26
Figura 5. Localização da bacia hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu.	28
Figura 6. Regiões do Alto Piranhas, Médio Piranhas Paraibano e Peixe.	29
Figura 7. Localização da Região do Alto Curso do Rio Piranhas.	30
Figura 8. Localização da Região do Médio Curso do Rio Piranhas.	32
Figura 9. Localização da sub-bacia do Rio do Peixe.	33
Figura 10. Fluxo metodológico.....	38
Figura 11. Leiaute do sistema para o Cenário C1.	40
Figura 12. Leiaute do sistema para o Cenário C2.	41
Figura 13. Leiaute do sistema para o Cenário C3.	42
Figura 14. Leiaute do sistema para o Cenário C4.	43
Figura 15. Esquema de consideração do balanço hídrico em um reservatório.	56
Figura 16. Fluxograma do modelo de otimização.	59
Figura 17. Volumes de água, vazões de vertimento e demandas de abastecimento urbano do reservatório Bartolomeu I de 2011 a 2019.....	60
Figura 18. Volumes de água, vazões de vertimento e demandas de abastecimento urbano do reservatório Capivara de 2011 a 2019.	61
Figura 19. Volumes de água, vazões de vertimento e demandas de irrigação para o reservatório Engenheiro Arcoverde de 2011 a 2019.....	62
Figura 20. Volumes de água e vazões de vertimento para o reservatório Riacho dos Cavalos de 2011 a 2019.....	63
Figura 21. Volumes de água e vazões de vertimento para o reservatório Carneiros de 2011 a 2019.	64
Figura 22. Atendimento das demandas de abastecimento urbano dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C1.	66
Figura 23. Atendimento das demandas de abastecimento urbano do reservatório Lagoa do Arroz e do rio Piranhas no Cenário C1.	66
Figura 24. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C1.	67
Figura 25. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C1.	67
Figura 26. Atendimento das demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C1.....	68

Figura 27. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C1.	70
Figura 28. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C1.	72
Figura 29. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C1.	72
Figura 30. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C1.	74
Figura 31. Atendimento das demandas de abastecimento urbano dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C2.	76
Figura 32. Atendimento das demandas de abastecimento urbano do reservatório Lagoa do Arroz e do rio Piranhas no Cenário C2.	76
Figura 33. Demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C2.	77
Figura 34. Demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C2.	77
Figura 35. Demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C2.	78
Figura 36. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C2.	80
Figura 37. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C2.	82
Figura 38. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C2.	82
Figura 39. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C2.	83
Figura 40. Atendimento às demandas de abastecimento urbano para os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C3.	86
Figura 41. Atendimento às demandas de abastecimento urbano para o reservatório Lagoa do Arroz e o Rio Piranhas no Cenário C3.	86
Figura 42. Demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C3.	87
Figura 43. Demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C3.	87
Figura 44. Demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C3.	88
Figura 45. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C3.	90
Figura 46. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C3.	91

Figura 47. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C3.....	92
Figura 48. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C3.....	93
Figura 49. Atendimento das demandas de abastecimento urbano para os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C4.	95
Figura 50. Atendimento das demandas de abastecimento urbano para o reservatório Lagoa do Arroz e o Rio Piranhas no Cenário C4.....	96
Figura 51. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C4.	96
Figura 52. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C4.	97
Figura 53. Atendimento das demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C4.....	97
Figura 54. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C4.....	99
Figura 55. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C4.....	101
Figura 56. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C4.....	102
Figura 57. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C4.....	103
Figura 58. Vazão estabelecida pelo PRH-PPA <i>versus</i> vazão otimizada.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Postos pluviométricos mais próximos aos reservatórios.....	44
Tabela 2. Parâmetros de calibração do modelo SMAP mensal.	45
Tabela 3 Evaporação média mensal (em “mm”) dos reservatórios estratégicos.	46
Tabela 4. Evapotranspiração de referência média mensal, em “mm”.	46
Tabela 5. Demandas hídricas para abastecimento urbano nos reservatórios estratégicos.	48
Tabela 6. Informações sobre os perímetros irrigados.	48
Tabela 7. Demandas hídricas das áreas difusas.	49
Tabela 8. Volumes dos reservatórios (hm ³).	50
Tabela 9. Atributos dos vertedores.	50
Tabela 10. Características dos descarregadores de fundo.....	51
Tabela 11. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário 1. ...	69
Tabela 12. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C1.	71
Tabela 13. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C1.	73
Tabela 14. Volume anual das perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C1.	74
Tabela 15. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C1.....	75
Tabela 16. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário C2.	79
Tabela 17. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C2.	81
Tabela 18. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C2.	83
Tabela 19. Volume anual médio de perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C2.	84
Tabela 20. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C2.....	85
Tabela 21. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário C3.	89
Tabela 22. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C3.	91
Tabela 23. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C3.	92
Tabela 24. Volume anual médio de perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C3.	94
Tabela 25. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C3.....	94
Tabela 26. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário C4.	98
Tabela 27. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C4.	100
Tabela 28. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C4.	102
Tabela 29. Volume anual médio de perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C4.	103

Tabela 30. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C4.....	104
Tabela 31. Vazões médias mensais ótimas de entrada nos reservatórios no Cenário C4.....	105
Tabela 32. Anexo 1: Curva cota-área-volume do reservatório Engenheiro Ávidos.....	114
Tabela 33. Anexo 2: Curva cota-área-volume do reservatório São Gonçalo.....	115
Tabela 34. Anexo 3: Curva cota-área-volume do reservatório Lagoa do Arroz.....	116
Tabela 35. Anexo 4: Demandas de abastecimento urbano por município com base na projeção populacional para o ano de 2030.....	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Postos pluviométricos utilizados para o cálculo da vazão afluyente.....	45
Quadro 2. Relação de municípios considerados nas demandas de abastecimento urbano conforme sua fonte hídrica.	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AD – Área difusa
AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA – Agência Nacional de Águas
BHRPPA – Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu
CONF. – Confiabilidade
DÉF. MÁX. – Déficit máximo
DNOCS – Departamento Nacional de Obras contra as Secas
DTQD – Demanda hídrica nas tomadas d'água
FO – Função objetivo
IAP – Índice de Ativação da Potencialidade
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGARN – Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte
IOCS – Instituto de Obras Contra as Secas
IUD – Índice de Utilização da Disponibilidade
IUP – Índice de Utilização da Potencialidade
MO – Mão de obra
PISF – Projeto de Integração do Rio São Francisco
PISG – Perímetro Irrigado de São Gonçalo
PIVE – Perímetro Irrigado Várzea da Ema
PL – Programação Linear
PPA – Piancó-Piranhas-Açu
PRH – Plano de Recursos Hídricos
RES. - Resiliência
RIMA – Relatório de Impactos ao Meio Ambiente
RL – Receita líquida
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SUST. - Sustentabilidade
UPH – Unidade de Planejamento Hidrológico
VER – Vazão efluente dos reservatórios
VMR – Volume-meta do reservatório
VUL. – Vulnerabilidade

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	5
2.1 – OBJETIVO GERAL	5
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 – PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	6
3.2 – OS MODELOS MATEMÁTICOS E A GESTÃO DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	8
3.3 – OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	9
3.3.1 – MÉTODO DAS PONDERAÇÕES	12
3.4 – PROGRAMAÇÃO LINEAR	12
3.5 – ÍNDICES DE DESEMPENHO DE SISTEMAS HÍDRICOS	16
3.5.1 - ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE E VULNERABILIDADE DE BACIAS	19
3.5.2 – ÍNDICES DE EFICIÊNCIA ASSOCIADOS AOS RESERVATÓRIOS	20
3.6 – PROJETOS DE INTEGRAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	23
4 – PISF E ÁREA DE ESTUDO: CARACTERIZAÇÃO	24
4.1 – DETALHES DO PISF	24
4.2 – ÁREA DE ESTUDO	27
4.2.1 - GENERALIDADES	27
4.2.2 – REGIÃO DO ALTO CURSO DO RIO PIRANHAS	29
4.2.3 – REGIÃO DO MÉDIO CURSO DO RIO PIRANHAS PARAIBANO	31
4.2.4 – SUB-BACIA DO RIO DO PEIXE	32
4.3 – DESCRIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS PARA A ÁREA DE ESTUDO	34
4.3.1 – REGIÃO DO ALTO CURSO DO RIO PIRANHAS	34
4.3.2 – REGIÃO DO MÉDIO CURSO DO RIO PIRANHAS PARAIBANO	35
4.3.3 - SUB-BACIA DO RIO DO PEIXE	36
5 - METODOLOGIA	38
5.1 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	38

5.2 – CONCEPÇÃO DOS CENÁRIOS	39
5.3 – LEVANTAMENTO DOS DADOS DO SISTEMA	44
5.4 – DADOS ESTRUTURAIS DOS RESERVATÓRIOS	49
5.5 – CRITÉRIOS OPERACIONAIS	51
5.5.1 – MODELO DE SIMULAÇÃO	52
5.5.2 – MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVO	53
6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
6.1 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	60
6.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO	66
6.2.1 – CENÁRIO C1	66
6.2.2 – CENÁRIO C2	75
6.2.3 – CENÁRIO C3	85
6.2.4 – CENÁRIO C4	95
7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 - INTRODUÇÃO

A escalada da dificuldade ao acesso à água é uma realidade mundial. A água é também um dos elementos da natureza com maior presença simbólica, sendo motivo frequente de lutas, privações e simultaneamente conflito e consenso. Torna-se do mesmo modo fundamental na definição da ocupação de territórios, interferindo diretamente na dinâmica das relações sociais (FERNÁNDEZ-ARROYO e RODRÍGUEZ-MARÍN, 2017). Sua função vai além do abastecimento aos cidadãos e das atividades produtivas, passando pelo exercício de funções ecológicas, prestação de serviços ambientais e condicionamento de valores sociais e práticas cotidianas.

A questão hídrica é, então, cada vez mais marcante por causa da escassez e da distribuição desigual (FERREIRA, 2019). Esse tema é particularmente relevante à região do semiárido nordestino, na qual boa parte do Estado da Paraíba está inserida, cujas características climáticas marcantes lhe conferem elevadas taxas de evaporação, ciclos de fortes estiagens, secas prolongadas, alta variabilidade espaço-temporal das chuvas, além de baixos índices pluviométricos.

As mais recentes e emblemáticas estiagens ocorreram entre 1998/2003 (RÊGO; GALVÃO; ALBUQUERQUE, 2012); e, ainda mais recentemente, a grande seca de 2012 a 2017 (LUCENA, 2018). Todas se destacaram intensamente pelo flagelo que impuseram às populações habitantes no semiárido.

No mesmo sentido, Oliveira e Lanna (1997) afirmam que o pouco desenvolvimento da região semiárida nordestina se deve boa parte à precária infraestrutura hídrica, agravada pelo uso ineficiente e irracional da água, cuja solução, segundo Curi *et al.* (2005), passa pela aplicação de tecnologias adequadas ao clima da região.

O problema da escassez hídrica está no cerne da motivação para a construção de grandes empreendimentos hidráulicos, com o intuito de armazenar e transferir grandes quantidades de água de bacias excedentárias para bacias deficitárias (FERREIRA, 2019). É por isso que durante muito tempo, a fim de atenuar os efeitos da seca no semiárido, foi deliberadamente estimulada a construção de pequenos reservatórios, os quais, a princípio, tinham a finalidade exclusiva de suprir o consumo humano e matar a sede dos animais.

Com o passar do tempo, no entanto, à medida que aumentavam os núcleos urbanos e com eles a demanda por água e alimentos, deu-se início à construção de grandes reservatórios,

o que permitiu a diversificação de seus usos (FARIAS *et al.* 2017). Essas grandes barragens, então, rapidamente se tornaram um componente-chave na administração de grandes sistemas hídricos e isto as fez objeto de pesquisas científicas, com a intenção de obter melhores práticas de gestão dos recursos hídricos (LIU *et al.* 2015) .

No mundo inteiro, muitos reservatórios têm sido construídos para atender a demandas de abastecimento humano, irrigação, indústria, geração de energia e controle de inundações, mas, segundo Ahmad *et al.* (2014), tem aumentado a cada ano o custo para construção de represas. Além disso, não é fácil construir novas barragens devido às questões de custo ambiental, geológico, etc., o que torna imperativa a otimização dos reservatórios e sistemas hídricos já existentes, como parte de uma estratégia para lidar com as demandas hídricas atuais e futuras.

Um erro muito comum, todavia, consiste em adotar regras operacionais que mantenham o maior volume armazenado possível, ação comumente baseada nas incertezas climáticas, o que força a prioridade ao abastecimento humano e limita os demais usos, contrariando aquilo que fundamenta Brasil (1997) quando diz que “*a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas*”. Além disso, nessas condições, as perdas por evaporação e vertimento tonam-se substancialmente elevadas, potencializando os conflitos hídricos em épocas de seca (ARAGÃO, 2008).

Em 2012, iniciou-se mais um severo ciclo de estiagem em todo o semiárido nordestino, em decorrência do qual vários municípios da Paraíba sofreram intensamente com duros e prolongados períodos de racionamento, por causa dos baixos volumes armazenados nos reservatórios da região (NUNES, 2015).

Com o intuito de promover a segurança hídrica no semiárido nordestino, entre os anos de 2003 e 2006, tiveram início as obras do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias do Nordeste Setentrional (PISF), cujo objetivo, entre outros, segundo Brasil (2000) é:

[...] aumentar a sustentabilidade da produção e reduzir os efeitos das secas em extensas porções territoriais do semiárido nordestino, criando eixos hídricos interiores com garantia de água suficiente para viabilizar a exploração da agricultura irrigada e da piscicultura nos vales atravessados e ao longo dos sistemas hidráulicos do projeto, especialmente para a pequena agricultura difusa. (BRASIL, 2000, p. 1-11)

O PISF foi dividido em 2 eixos: norte e leste, os quais por sua vez foram subdivididos em 6 trechos. O Trecho V ficou a cargo do Eixo Leste, enquanto os demais restaram para compor o Eixo Norte. No Estado da Paraíba, são contempladas as bacias do Rio Paraíba (Eixo

Leste) e do Rio Piranhas-Açu (Eixo Norte). Ao Trecho II, porém, coube atender à bacia do Rio Piranhas-Açu (BRASIL, 2000), objeto da presente pesquisa.

O Eixo Norte derivará 2,7 m³/s para dois pontos de entrada no Estado da Paraíba (um pela sub-bacia Rio do Peixe e outro pela Região do Alto Curso do Rio Piranhas), de cuja vazão a Paraíba terá direito a 1 m³/s, devendo entregar na fronteira com o Rio Grande do Norte 1,7 m³/s (ANA, 2016). Contudo, até o presente momento, há apenas os projetos conceituais e básicos, evidenciando a falta de projetos executivos, com foco na maneira como serão utilizados esses recursos hídricos exógenos.

Torna-se imperativo, portanto, o desenvolvimento de planos de operação otimizados para os reservatórios receptores, a fim de promover o uso mais eficiente, racional e integrado possível da água, em atenção ao que preconiza Brasil (1997) – Lei das Águas –, em seus princípios e objetivos.

Dentro desse contexto, destacam-se as Regiões do Alto e Médio Cursos do Rio Piranhas paraibano e a sub-bacia do Rio do Peixe – todas pertencentes à grande bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu. A primeira contém três importantes reservatórios: Engenheiro Ávidos (255,0 hm³), São Gonçalo (44,6 hm³) e Bartolomeu (17 hm³), em cujas imediações existem importantes municípios, como Cajazeiras, Sousa, Bonito de Santa Fé e vários outros, que dependem das águas desses reservatórios para abastecimento e desenvolvimento de atividades agrícolas, notadamente através de vultosos perímetros irrigados, como o de São Gonçalo (ANA, 2016).

Logo, é no contexto da transposição das águas do rio São Francisco, Eixo Norte, referente à parte de vazão que toca à bacia do Rio Piranhas-Açu, que este trabalho se insere pela aplicação de um Modelo de Otimização Multiobjetivo, baseado em Programação Linear Sucessiva, desenvolvido por (SANTOS et al., 2011).

A intenção é diagnosticar a atual situação do sistema hídrico delimitado pela citada área de estudo e propor alternativas ótimas de uso das águas do PISF através do estabelecimento de cenários que possam levar em conta o maior número possível de condicionantes, como o abastecimento de municípios, perímetros irrigados, volumes-meta de reservatórios, regras de operação integradas e outros. Isto se alinha diretamente com o que defende Ahmad et al. (2014), quando afirma que alguns países em desenvolvimento tendem a construir novas barragens em vez de adotar planos de gestão e otimização para enfrentar a crescente demanda.

Assim, partindo de uma análise de otimização multiobjetivo global, espera-se que este trabalho sirva como fonte de informações para os tomadores de decisão/gestores na elaboração de políticas de públicas que tenham como foco a segurança e a eficiência hídricas.

Espera-se ainda que se apresentem alternativas que levem à maximização da eficiência na utilização das águas da transposição do Rio São Francisco, à minimização das perdas e ao atendimento à condição estabelecida no Plano de Recursos Hídricos da bacia do Rio Piranhas-Açu de entregar uma vazão residual de 1,7 m³/s na fronteira entre a Paraíba e o Rio Grande do Norte, o que tende a minimizar os conflitos de natureza hídrica entre esses dois Estados e os efeitos indesejáveis do déficit hídrico como um todo.

2 - OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO GERAL

Analisar alternativas de entrada da vazão exógena proveniente do Projeto de Integração do rio São Francisco na bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, avaliando a sustentabilidade hídrica dos usos no estado da Paraíba através de um modelo de otimização multiobjetivo.

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar a infraestrutura hídrica e as principais demandas do sistema estudado;
- Avaliar o atendimento das demandas, o desempenho do sistema e dos reservatórios receptores considerando o cenário de entrada da vazão exógena do PISF proposto pelo Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu;
- Estudar alternativas de entrada da vazão exógena do PISF, avaliando o atendimento das demandas e o desempenho do sistema e dos reservatórios;
- Obter valores ótimos de vazão exógena em escala mensal como alternativa aos valores fixos recomendados pelo Plano de Recursos Hídricos.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

A situação físico-geográfica encontrada no semiárido nordestino normalmente se traduz em vários entraves ao desenvolvimento socioeconômico da região, haja vista que cidadãos e suas atividades econômicas, notadamente o abastecimento humano, a agricultura e a pecuária, sofrem diretamente os impactos da falta d'água em quantidade e qualidade adequadas (VIEIRA, 1996).

Habibi Davijani *et al.* (2016) alertam que o crescimento populacional mundial tem levado a um aumento drástico na demanda hídrica em vários setores da sociedade, como abastecimento humano, irrigação e indústria, e essa situação exige a aplicação de medidas eficazes para a gestão otimizada e eficiente dos recursos hídricos.

A análise de um sistema passa pela consideração de princípios científicos que definam, diferenciem, representem e otimizem sua estrutura e comportamento. Nesta acepção, o termo *sistema* se refere a uma série de componentes interligados, agindo sincronizadamente para gerar um determinado tipo de resultado.

Os modelos matemáticos são desenvolvidos para representar o comportamento dos sistemas. Uma das suas principais áreas de aplicação dá-se, especificamente, ao suporte à decisão no campo do planejamento e gerenciamento de recursos hídricos (LIMA e LANNA, 2005). Outrossim, Oliveira e Lanna (1997) afirmam que, basicamente, a análise de sistemas de recursos hídricos visa simular o comportamento da realidade e otimizar processos decisórios.

No mundo dos recursos hídricos, planejar e gerenciar pressupõem a busca pela eficiência hídrica, econômica e operacional, levando em conta, também, aspectos de caráter social, ambiental e institucional (SANTOS *et al.*, 2011; CHOONG e EL-SHAFIE, 2014).

Quando se trata de planejamento hídrico, é importante diferenciar dois tipos de uso da água, a saber: conflitante e complementar. O primeiro diz respeito a atividades que disputam o mesmo recurso, a exemplo da agricultura e abastecimento urbano; no segundo, as atividades geram recursos umas para as outras, beneficiando-se mutuamente, como é o caso da geração de energia hidrelétrica e regularização de vazão em rios (SANTOS *et al.*, 2011).

Surge daí a necessidade de um procedimento de análise minucioso com a finalidade de eleger critérios norteadores das tomadas de decisão (LOUCKS, 2000; CHOONG e EL-SHAFIE, 2014). Assim, problemas muito complicados de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos são comumente modelados de forma matemático-computacional, baseado em fundamentos de otimização e simulação (YEH, 1985; SIMONOVIC, 1992; WURBS, 1993; LABADIE, 2004; AHMAD et al. 2014; CHOONG e EL-SHAFIE, 2014).

Uma vez que, a rigor, nenhum processo físico pode ser completamente representado por uma equação matemática, é necessário optar pela perda na precisão da representação ou pelo aumento dos requerimentos computacionais em favor da robustez das funções matemáticas. Isto, de acordo com Overton e Meadows (1976), poderia esgotar recursos humanos e financeiros, inviabilizando a análise.

A ideia defendida por Overton e Meadows (1976), na década de 1970, tem mudado cada vez mais de aspecto com o surgimento de computadores cada vez mais potentes, dotados de extraordinária capacidade de processamento. Este fato mudou o padrão da modelagem de sistemas de recursos hídricos até então, de modo que atualmente é inconcebível a representação com foco em um único objetivo, mas, sim, em vários (ambientais, físico-operacionais, econômicos, políticos, sociais, etc).

Os modelos que fazem esse tipo de análise são denominados multiobjetivos, cuja solução é ótima sob todas as perspectivas consideradas, materializando-se em uma clara alusão ao conceito de desenvolvimento sustentável (WURBS, 2005). Devido a essa característica multiobjetivo, conflitos e disputas surgem em decorrência da operação dos sistemas e assim mais variáveis precisam ser levadas em conta para que possa haver um alinhamento ao novo nível de exigência imposto pela gestão (CHOONG; EL-SHAFIE, 2014).

Não obstante a importância que têm a simulação, a otimização e os métodos do gênero para o desenvolvimento de bases quantitativas para a tomada de decisões no campo do planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, há um lapso na implementação das medidas obtidas dos modelos, consideradas ótimas e potencialmente promotoras da eficácia do sistema como um todo. A causa disto, segundo Labadie (2004), é devida à desconfiança e à resistência dos operadores somadas à confusão causada pela grande variedade de métodos. Por outro lado, Teegavarapu e Simonovic (2001) afirmam que, entre outras, os mesmos operadores desejam modelos amplos, porém de fácil utilização, além da possibilidade de modificação e simulação de diversas situações em tempo real.

3.2 – OS MODELOS MATEMÁTICOS E A GESTÃO DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Mateus e Tullos (2017) utilizaram um modelo matemático hidrogeológico para avaliar parâmetros de confiabilidade, sensibilidade e vulnerabilidade de um sistema de 13 reservatórios multiuso na bacia do Rio Santiam, no Estado de Oregon, Costa Oeste dos Estados Unidos. No mesmo trabalho, discutiram ainda a eficácia de curvas de regras variáveis, cujo resultado foi uma diminuição na confiabilidade do cumprimento do requerimento das vazões ecológicas na época de estiagem, ao mesmo tempo em que as recargas dos reservatórios e o controle de inundações tiveram impactos insignificantes.

Zhang *et al.* (2017) analisaram a adaptação das regras de funcionamento fixas de um reservatório de irrigação na China, e um modelo de otimização foi utilizado para derivar regras de operação em intervalos de tempo de crescimento das culturas. Duas regras de operação alternativas foram consideradas pressupostas: uma baseada em dados históricos e outra baseada em dados de mudança climática. Um estudo de caso foi realizado no reservatório Dongwushi, e os resultados mostraram que: 1) as regras de funcionamento fixas não atendem as exigências de uma tendência de mudanças climáticas; 2) as regras de operação adaptativas podem minimizar os efeitos de perdas decorrentes das mudanças climáticas, bem como melhorar o armazenamento de água no solo, favorecendo, também, os escoamentos de base nas áreas de captação.

Yu *et al.* (2017) propuseram uma estrutura de avaliação de modelos operacionais baseados em regimes de fluxo para reservatórios com múltiplos objetivos. A área de estudo foi o Médio e o Baixo curso do Rio Yangtzé, que são significativamente afetadas pelas operações do reservatório Três Gargantas. Foram utilizados correspondências de histograma para descrever o fluxo em três anos típicos: chuvoso, normal e seco. Os resultados das operações ótimas indicaram a necessidade de um aumento da média mensal de escoamento no mês de outubro e uma diminuição no mês de fevereiro, a fim de atender um plano de operações ecológicas multiobjetivo para toda a área de estudo. O autor enfim chama a atenção para a necessidade de integração entre objetivos ecológicos e os regimes de fluxo derivados de operações de reservatórios multiobjetivos, com o objetivo de melhor proteger a saúde do ecossistema.

Nepomuceno (2018) desenvolveu um modelo para simulação de nitrogênio e fósforo em sistemas de recursos hídricos, levando em conta rios, reservatórios e áreas difusas sob a

ótica dos referidos parâmetros de qualidade. O referido modelo foi testado num sistema de recursos hídricos localizado na Região do Alto Curso do Rio Piranhas – PB, e os resultados indicaram que os recursos hídricos analisados são sensíveis à ação dos efluentes domésticos e agrícolas, principalmente nos períodos de seca, onde o volume dos reservatórios e vazões nos trechos dos rios são reduzidos.

3.3 – OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Um dos mais significativos avanços da engenharia de recursos hídricos, segundo Yeh (1985), se deve à introdução de técnicas de otimização, especialmente no que tange ao planejamento e gerenciamento dos sistemas.

A otimização traz consigo um forte apelo matemático e busca encontrar, através da resolução simultânea de vários sistemas de equações, uma solução que otimize (maximize ou minimize) um modelo matemático representante do sistema, chamado especificamente de função objetivo. Esta, aliás, é uma diferença básica entre otimização e simulação, haja vista que a segunda cuida apenas da resolução de um sistema de equações de cada vez. A otimização se baseia, portanto, num procedimento que exige altas capacidades de memória e processamento das máquinas computadoradas (SANTOS et al., 2011).

Expressões matemáticas da dinâmica e das diversas limitações físicas e operacionais dos sistemas hídricos são associadas à função objetivo, limitando-a e definindo, desse modo, o que se denomina de região viável das variáveis de decisão. No caso de reservatórios, por exemplo, as clássicas restrições dizem respeito a princípios de conservação de massa (equação da continuidade), a descargas máximas e mínimas, limitações técnico-operacionais de equipamentos hidromecânicos, obrigações contratuais, legais e institucionais (SANTOS et al., 2011).

Simonovic (1992) afirma que muitas dimensões podem ser representadas pela função objetivo, tais como custos, lucros, indicadores socioeconômicos, etc. A escolha da técnica mais adequada, no entanto, depende da estrutura e atributos matemáticos da função objetivo e de suas restrições (MATEUS e LUNA, 1986).

Diante da complexidade inerente aos processos de gerenciamento de sistemas de recursos hídricos, passando pela consideração de múltiplos decisores e objetivos, tendo que lidar com os conflitos de interesse naturalmente gerados pela diversidade de fatores

condicionantes, a análise multiobjetivo vem em socorro dos tomadores de decisão/gestores. Isto porque apresenta conceitos fundamentais para o tratamento e quantificação dos processos determinantes com múltiplos objetivos (BRAGA e GOBETTI, 2002). Sob a perspectiva multiobjetivo, não há necessariamente um ótimo global, mas sim, de forma geral, um conjunto de valores ótimos, satisfazendo distinta e simultaneamente múltiplos objetivos previamente estabelecidos.

O conjunto de soluções não dominadas leva em conta um grupo de funções objetivo, e a partir dele é gerado uma outra associação – a das soluções não-dominadas. Conceitualmente, uma solução dita *não-dominada* (também chamada de *não-inferior*) é uma solução multiobjetivo “ótima”, uma vez que não pode ser melhorada em um objetivo sem prejudicar pelo menos um outro, e, nesse contexto, não leva em consideração preferências de decisores, atendo-se a aspectos puramente físicos do problema.

Nesse caso, a articulação antecipada das preferências requer a opinião prévia dos decisores acerca dos objetivos e seus atributos, ao passo que a articulação progressiva das preferências indaga o decisor, a cada solução obtida, se o grau de atendimento dos objetivos é satisfatório, sendo repetido o processo em caso de negativa.

Bravo, Collischonn e Pilar (2005) consideram como técnicas mais utilizadas na obtenção do conjunto de soluções não-dominadas os métodos das ponderações, das restrições e os algoritmos genéticos.

Para eles, o método das ponderações é o mais utilizado nesse contexto de obtenção de soluções não-dominadas, todavia apresenta a necessidade de haver uma unidade comum entre os objetivos. Já o método das restrições, embora ofereça bons resultados e não necessite de uma unidade comum entre os objetivos, só pode considerar até três usos. Isto porque além desse valor o algoritmo de resolução apresenta elevada ineficiência, inviabilizando-o.

Os algoritmos genéticos, por sua vez, superam todos os inconvenientes anteriormente citados, contudo veem-se prejudicados quando da consideração das restrições, de manutenção das soluções viáveis no espaço amostral considerado, além do alto dispêndio de recursos computacionais até atingir uma solução (BRAVO; COLLISCHONN; PILAR, 2005; LABADIE, 2004).

Odan, Ribeiro Reis e Kapelan (2015) desenvolveram um método de operação em tempo real otimizado para um sistema de distribuição de água, cujas bases estão assentes na integração de três modelos: 1) Modelo de previsão de demanda em tempo real; 2) Modelo de

simulação hidráulica do sistema; e 3) Modelo de otimização. A otimização é caracterizada pela minimização do custo da energia consumida e pela maximização da confiabilidade do sistema de bombeamento. A nova metodologia foi testada e aprovada no sistema de distribuição de água do município de Araraquara, Estado de São Paulo, e os resultados demonstraram consideráveis níveis de economia de energia elétrica aliada à manutenção dos níveis de confiabilidade.

Liu *et al.* (2015) analisaram níveis de inundação limitados, partindo do princípio que estes são os parâmetros mais importantes na relação entre o controle de inundações e a conservação do equilíbrio do ecossistema da sua área de estudo. A ideia desenvolvida dizia respeito à criação de um parâmetro de limitação dos níveis de inundação que fosse variável, a fim de obter mais benefícios econômicos, sem, contudo, diminuir os padrões de segurança e prevenção originais. Os resultados culminaram no desenvolvimento de um modelo de otimização multiobjetivo, que levava em conta a maximização de vários benefícios, como controle de inundações, geração de energia hidrelétrica e disponibilidade para navegação. O referido modelo então foi testado no Reservatório das Três Gargantas, na China, e mostrou-se muito eficaz na definição de níveis de inundações limitados variáveis.

Habibi Davijani *et al.* (2016) desenvolveram um modelo multiobjetivo para a alocação ótima dos recursos hídricos ao abastecimento municipal, à irrigação e à indústria. A área de estudo foi o Deserto Central do Irã, numa bacia hidrográfica de baixo potencial hídrico com 55 mil km² de extensão. No setor agrícola, por exemplo, a função de produção de cada cultura foi determinada e, com base nelas, as áreas cultiváveis e o rendimento das culturas foram combinadas para compor a função objetivo. Em seguida, utilizando algoritmos meta-heurísticos, as funções objetivo foram maximizadas e os recursos hídricos associados, alocados otimamente entre os setores anteriormente citados. Os resultados indicaram que em todos os estágios de otimização relacionados ao setor agrícola um lucro econômico e social mais elevados puderam ser obtidos a partir do cultivo de produtos nas melhores condições de alocação de água.

Lalehzari *et al.* (2016) propuseram um modelo de otimização multiobjetivo para alocação de águas superficiais e subterrâneas no suprimento de demandas agrícolas no Irã. Os objetivos considerados foram a maximização do lucro líquido e a eficiência na utilização da água. Descarga subterrânea, parâmetros econômicos e evapotranspiração foram considerados como restrições da função objetivo. A aplicabilidade do modelo foi testada num campo experimental da planície de Baghmalek, província Khuzestan, no Irã, e os resultados

mostraram que a incorporação de técnicas de otimização multiobjetivo pode melhorar consideravelmente a precisão no manejo da irrigação, com destaque para o cultivo do arroz como sendo a mais interessante cultura em termos de produtividade e lucratividade.

Yang *et al.* (2016) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo adaptativo, a fim de obter regras de funcionamento multiobjetivas capazes de lidar com os impactos das mudanças climáticas. Um estudo de caso foi realizado no reservatório Danjiangkou (33,91 mil hm³), barrando o rio Hanjiang, o maior afluente do Rio Yangtze, na China. Os resultados demonstraram uma tendência de aumento no rendimento da geração de energia e na confiabilidade do abastecimento humano (18,7%).

3.3.1 – MÉTODO DAS PONDERAÇÕES

Este método de otimização multiobjetivo é muito utilizado por permitir a obtenção do conjunto de soluções não-inferiores completo, no que diz respeito às decisões e aos objetivos.

Os objetivos $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$ são representados por n funções objetivo, ao mesmo tempo em que são ponderados por pesos w_i , de tal modo que quando somadas geram uma função objetivo global, como:

$$\max \text{ ou } \min \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(x)$$

onde:

w_i é o fator de ponderação do objetivo i ;

$f_i(x)$ é a função objetivo i .

Os fatores de ponderação são variados de forma paramétrica até que se obtenha o conjunto de soluções não-dominadas, e a melhor solução terá um conjunto w_1, w_2, \dots, w_n que vai indicar a importância relativa de cada objetivo.

3.4 – PROGRAMAÇÃO LINEAR

Os modelos de otimização são geralmente baseados em algum tipo de programação matemática, sendo os mais comumente utilizados:

- Programação Linear (PL);
- Programação Não-Linear (PNL);

- Programação Dinâmica (PD); e
- Métodos Heurísticos (algoritmos genéticos, redes neurais, lógica fuzzy, etc.)

Segundo Rani e Moreira (2010), a Programação Linear (PL) é uma das técnicas de otimização mais populares no campo do gerenciamento de recursos hídricos, e o termo “linear” diz respeito à necessidade de existir relações lineares entre as variáveis, matematicamente traduzidas pelas equações que representam o problema (BELAINEH, PERALTA e HUGHES, 1999).

Nesse sentido, Ahmad *et al.* (2014) asseguram que a PL tem, entre outras, as seguintes vantagens:

- Condições de adequabilidade e solução de problemas de grandes dimensões;
- Atingem valores ótimos globais;
- Teoria da dualidade bem desenvolvida para análise da sensibilidade;
- Existência de pacotes computacionais prontos para a resolução de problemas.

Por isso, ainda que as relações entre as variáveis sejam não-lineares, vale a pena empregar a PL, pois, através de artifícios matemáticos de linearização, as funções associadas ao sistema podem ser linearizadas (SANTOS *et al.*, 2011).

Aplicações pioneiras de PL em recursos hídricos datam da década de 1960, pela obtenção de regras de operação determinísticas de um reservatório em 1962 (BARBOSA, 2002; BELAINEH; PERALTA; HUGHES, 1999; SIMONOVIC, 1992).

Um modelo de programação linear multiobjetivo foi desenvolvido por Mohan e Raipure (1992), para ser aplicado a um sistema de 5 reservatórios, na Índia, em que os objetivos do modelo eram maximizar o fornecimento de água para irrigação e da produção de energia hidrelétrica, levando em conta as limitações físicas, ambientais, bem como a garantia da continuidade do armazenamento.

Carvalho *et al.* (2000), também lançando mão de técnicas de otimização baseadas em Programação Linear, maximizaram a renda e a utilização dos recursos hídricos para o perímetro irrigado Gorutuba.

Needham *et al.* (2000) aplicaram um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista para obter procedimentos operacionais ótimos de controle de inundações

num sistema de três reservatórios nos rios Iowa e Des Moines, nos Estados Unidos. Os resultados mostraram que operar apenas o reservatório do rio Iowa não oferecia vantagens consideráveis, demonstrando a independência entre os componentes do sistema. Por outro lado, resultados de minimização de danos ao se proceder à operação independente dos reservatórios foram alcançados em 80% dos casos (8 dos 10 maiores casos de inundação na região já registrados).

Uma importante aplicação de PL para fins de otimização foi realizada por Righetto e Filho (2003) ao verificar a dimensão da oferta hídrica dos reservatórios Cruzeta e Armando Ribeiro Gonçalves, ambos localizados na bacia hidrográfica do Rio Piranhas, Rio Grande do Norte, quando dispusessem de vazão firme de fonte exógena.

Santos (2007) desenvolveu um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em Programação Linear, para o estudo da operação integrada de sistemas de reservatórios e perímetros irrigados. Um caso de estudo foi realizado num sistema constituído de dois reservatórios, Catolé II e Poço Redondo, ligados em série na bacia do Rio Piancó. Os resultados evidenciaram a aplicabilidade do modelo na seleção de regras operativas para a alocação ótima dos recursos hídricos, atendendo as demandas, os objetivos e as restrições físicas impostas.

Haddad *et al.* (2009) desenvolveram um modelo de otimização baseado em PL a fim de obter regras para o cultivo de áreas agrícolas com culturas múltiplas num sistema de reservatórios de irrigação no Irã. Tinha a intenção de maximizar o lucro anual do sistema, alocando otimamente recursos hídricos às áreas de irrigação. Os resultados indicaram que o referido modelo é uma valiosa ferramenta para as partes interessadas decidirem quanto e qual tipo de produto deve ser cultivado.

Yoo (2009) aplicou um modelo de otimização multiobjetivo baseado em PL a fim de maximizar a geração de energia hidrelétrica na barragem multiuso Yongdam, na Coreia do Sul. Foram analisadas ainda as correspondências entre os objetivos liberação para jusante e armazenamento e sua correlação com a maximização da geração de energia. Os resultados apontaram para uma produção anual máxima de energia da ordem de 184 GWH, o que corresponde a 86% de todo o potencial projetado para a barragem, evidenciando assim a eficácia da referida forma de abordagem.

Santos (2011) desenvolveu um modelo de otimização quali-quantitativo multiobjetivo, baseado em Programação Linear Sucessiva, para o planejamento e operação integrada de

sistemas de reservatórios e perímetros irrigados. O referido modelo foi testado em um sistema de dois reservatórios (Epitácio Pessoa e Argemiro de Figueiredo), na bacia do Rio Paraíba, cujos objetivos principais foram: 1) minimização do déficit do atendimento das demandas das adutoras; 2) minimização das concentrações de certos parâmetros de qualidade de água nos reservatórios e nós do sistema; 3) atendimento ao volume meta dos reservatórios e da vazão defluente mínima do reservatório Argemiro de Figueiredo; e 4) maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda da atividade agrícola no perímetro irrigado. Os resultados mostraram que os objetivos foram atendidos levando em conta as restrições e prioridades de atendimento pré-estabelecidas.

No mesmo sentido, Oliveira (2013) aplicou um modelo de otimização multiobjetivo, também baseado em PL, para propor soluções ótimas de utilização da água em reservatórios receptores da vazão exógena transposta pelo eixo leste do PISF.

Creaco e Pezzinga (2015) mostraram como a Programação Linear (PL) pode ser útil como mecanismo catalisador de busca da solução ótima em algoritmos genéticos multiobjetivos, através da delimitação mais eficaz da região viável. Um estudo de caso foi realizado em Santa Maria di Licodia (pequena cidade da Sicília, na Itália) para comprovar a eficácia do método e trata da minimização de fugas em redes de distribuição de água. Os autores consideraram mais especificamente o problema da localização ótima das válvulas de controle, onde elas deveriam estar fechadas, e a programação linear veio em auxílio à busca da configuração ideal das referidas peças acessórias. O resultado da incorporação da PL foi um algoritmo híbrido muito mais eficiente.

Heydari, Othman e Qaderi (2015) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo baseado em Programação Linear Inteira Mista para a operação sistemática de múltiplos reservatórios. O referido sistema atende a diversas demandas, como abastecimento humano e irrigação na planície de Teerã, no Irã. A modelagem do sistema se deu através dos nós e arcos pelo método de rede de fluxo, levando em conta os mananciais, suas demandas, derivações e as relações físico-hidráulicas entre tais elementos. Como variáveis de decisão, foram levadas em conta a descarga para jusante, volumes-meta dos reservatórios e as demandas hídricas supracitadas em cada período e em cada reservatório componente do sistema. A otimização foi feita em escala mensal com base num período histórico de 20 anos (1983 a 2003). No modelo, foram contempladas a configuração do sistema, a função objetivo, a formulação das restrições, bem como sua linearização, a definição de valores de penalização e prioridades para cada nó do sistema. Os resultados indicaram um desempenho bem acima da

média histórica de operações do sistema, diminuindo, por exemplo, as demandas hídricas dos aquíferos, em favor do maior aproveitamento das águas superficiais.

Singh (2015) desenvolveu um modelo de otimização baseado em PL para a alocação ideal dos recursos hídricos e terrestres disponíveis em um trecho de rio na Índia a fim de maximizar o lucro líquido anual. A intenção foi facilitar as análises para decisões de área de cultivo e planos de alocação de água, e o autor arremata dizendo que o referido modelo de gestão pode ser usado em qualquer parte do mundo para maximizar o retorno agrícola líquido, mitigando os problemas de extração de água na agricultura irrigada.

Brito (2019), através de um modelo de otimização multiobjetivo, analisou cenários otimizados para um período de 6 anos (tempo da grande seca de 2012 a 2017) na bacia do Alto Curso do Rio Paraíba, que contém 4 reservatórios estratégicos em série, receptores das águas exógenas do PISF. Os resultados apontaram para o fato de as demandas de abastecimento urbano e irrigação terem sido atendidas plenamente em todos os cenários. Apenas o caso da vazão máxima estimada para o canal de integração Acauã-Araçagi não se mostrou sustentável, ou seja, sua demanda não foi atendida na totalidade, evidenciando uma sobrecarga para todo o sistema, especialmente ao reservatório Acauã.

3.5 – ÍNDICES DE DESEMPENHO DE SISTEMAS HÍDRICOS

De acordo com Farias, Curi e Diniz (2017), devido à grande quantidade de dados de um sistema hídrico, a comparação direta entre distintas propostas de gestão é bastante complicada. Isto torna necessária a criação de parâmetros que expressem apenas as informações imprescindíveis – são os chamados indicadores de desempenho.

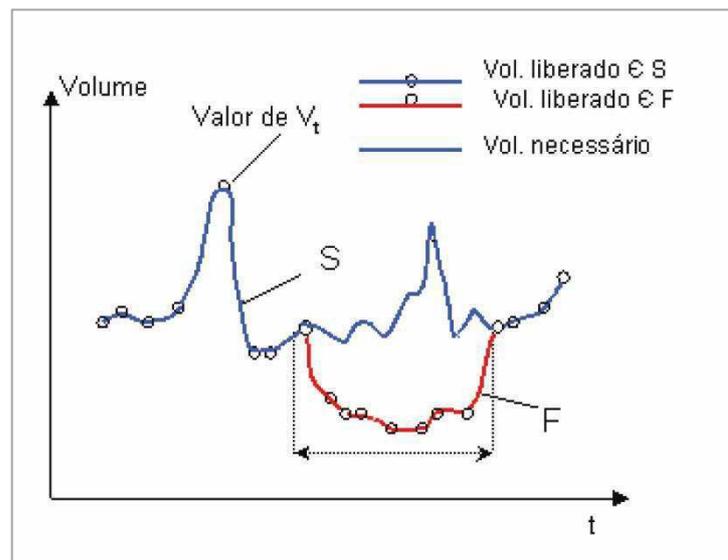
A operação de sistemas de recursos hídricos compostos por reservatórios de abastecimento de água associada à incerteza no que concerne às condições hidroclimáticas a que o mesmo está sujeito podem levar à ocorrência de falhas no atendimento às demandas hídricas. A dimensão das mencionadas falhas pode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

Celeste (2006) afirma que as falhas decorrentes da operação de sistemas de reservatórios são praticamente inevitáveis durante períodos hidrológicos críticos. As falhas, vistas sob vários aspectos, podem ser representadas pelos seguintes indicadores de desempenho: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Esses três indicadores, juntos,

podem ser usados para caracterizar o “risco” a que estão sujeitos a operação e o planejamento de um dado sistema hídrico.

Nesse contexto, Celeste (2006) sugere considerar “ V_t ” como sendo os possíveis valores do volume liberado do reservatório no tempo “ t ”, os quais podem estar contidos em dois conjuntos: “S” - o conjunto de todos os valores satisfatórios, isto é, quando o volume liberado do reservatório é igual ao volume necessário para atender à demanda; e “F” - o conjunto de todos os valores insatisfatórios, quando o volume liberado é menor do que o volume necessário para atender à demanda. A Figura 1 ilustra o raciocínio descrito.

Figura 1. Exemplo fictício de descarga em reservatório.



Fonte: Celeste (2006)

Assim, Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982) definiram confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade como:

a) **Confiabilidade**

A capacidade de o sistema hídrico operar sem falhas no atendimento às demandas por determinado período de tempo. Constitui-se numa ferramenta de auxílio aos gestores de recursos hídricos que apresenta a eficiência no atendimento aos requerimentos hídricos de um sistema.

$$Conf = \frac{Ns}{N} \quad (1)$$

Onde: Ns = Número de períodos de tempo com sucessos;

N = Número de períodos de tempo considerados.

b) Resiliência

A resiliência, muitas vezes chamada de elasticidade, descreve quão rapidamente o sistema retorna de uma falha caso esta tenha ocorrido. Como se vê ainda na Figura 1, pode-se entendê-la como a relação entre probabilidade de “ V_t ” \in F e “ V_{t+1} ” \in S e a probabilidade de “ V_t ” \in F, ou seja:

$$Res = \frac{Prob(V_t \in F \cap V_{t+1} \in S)}{Prob(V_t \in F)} \quad (2)$$

ou

$$Res = Prob\{V_{t+1} \in S / V_t \in F\} \quad (3)$$

c) Vulnerabilidade

A vulnerabilidade indica quão severa é a falha, caso ocorra, e pode ser definida (Figura 1) como a média do percentual de déficit hídrico do conjunto de todos os valores insatisfatórios (conjunto ‘F’). Matematicamente, fica definida como:

$$Vul = \frac{1}{n_f} \sum \left| \frac{V_t - V_d}{V_d} \right| \quad (4)$$

Onde: “ n_f ” é o número de eventos de falha;

“ V_d ” é a demanda necessária no tempo “ t ”;

“ V_t ” corresponde à vazão efetivamente disponibilizada no tempo “ t ”.

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

$$Sust = conf * res * (1 - vul) \quad (5)$$

Pela expressão acima, deduz-se que o parâmetro de sustentabilidade é tão maior quanto maiores forem a confiabilidade e a resiliência, sendo inversamente proporcional à vulnerabilidade.

Celeste (2006) utilizou o conceito de déficit máximo ($def_{máx}$) para dimensionar a máxima vulnerabilidade a que um determinado sistema pode estar sujeito. Matematicamente, o mencionado índice é definido como:

$$def_{máx} = \text{máximo} \left| \frac{V_t - V_d}{V_d} \right| \quad (6)$$

Onde: “ V_d ” é a demanda necessária no período de tempo analisado;

“ V_t ” corresponde à menor vazão efetivamente disponibilizada no intervalo de tempo considerado.

Esse índice dá, portanto, o tamanho da maior falha havida no sistema ao longo de todo o período tomado para análise.

3.5.1 - ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE E VULNERABILIDADE DE BACIAS

Inicialmente, é preciso definir alguns conceitos sobre potencialidades e disponibilidades hídricas no contexto das bacias hidrográficas.

A potencialidade de uma bacia hidrográfica representa a quantificação dos recursos hídricos sem a intervenção humana, em seu estado natural. Vieira (1996) a representa pelo escoamento natural médio, soma do escoamento superficial direto com o escoamento de base.

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

Índice de ativação da potencialidade – IAP

É a razão entre a disponibilidade e a potencialidade:

$$IAP = \frac{Disponibilidade}{Potencialidade} \quad (7)$$

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

Índice de utilização da disponibilidade – IUD

É definido pela razão entre a demanda e a disponibilidade.

$$IUD = \frac{Demanda}{Disponibilidade} \quad (8)$$

Índice de utilização da potencialidade – IUP

Define-se pela razão entre demanda e potencialidade. Pode-se obtê-la, também, através do produto entre IAP e IUD. Matematicamente, tem-se:

$$IUP = \frac{Demanda}{Potencialidade} \quad (9)$$

3.5.2 – ÍNDICES DE EFICIÊNCIA ASSOCIADOS AOS RESERVATÓRIOS

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

Com base no que escreveram Farias, Curi e Diniz (2017), são apresentados a seguir alguns índices de eficiência associados à operação de reservatórios, os quais, segundo os mesmos autores, fundamentam-se na equação do balanço hídrico:

- 1) “ η_{Vr} ” – é relação entre a variabilidade volumétrica do reservatório e o volume total afluente anual. Indica a variabilidade interanual do volume do reservatório e traduz-se matematicamente por:

$$\eta_{Vr} = \frac{Vr_{final} - Vr_{inicial}}{\sum Qa_t + \sum P_t} \quad (10)$$

Onde: “ $Vr_{inicial}$ ” é o volume inicial do reservatório;

“ Vr_{final} ” é o volume final do reservatório;

“ Qa_t ” é o volume afluente;

“ P_t ” é o volume precipitado.

Valores negativos deste índice revelam perda de volume, e positivos o acúmulo/ganho de água no reservatório.

- 2) “ η_E ” - é a relação entre o volume evaporado (E_t) (da superfície do reservatório) e o volume afluente:

$$\eta_E = \frac{\sum E_t}{\sum Qa_t + \sum P_t} \quad (11)$$

Este índice traduz informações, entre outras, sobre: i) a eficiência quanto ao armazenamento de água; ii) quando o reservatório tem baixa profundidade e grande área do espelho líquido; e iii) quão rapidamente a água deve que ser usada para minorar as perdas por evaporação.

- 3) “ η_P ” – é a relação entre a precipitação direta sobre a bacia hidráulica do reservatório (superfície do mesmo) e o volume afluente. Indica o percentual de precipitação direta sobre a bacia hidráulica do reservatório:

$$\eta_p = \frac{\sum P_t}{\sum Q_{a_t} + \sum P_t} \quad (12)$$

Pode indicar que o reservatório tem baixa profundidade e grande área do espelho líquido, bem como que a bacia de contribuição é pequena.

- 4) “ η_v ” – é a razão entre o volume vertido (QV_t) (sangria do reservatório) e o volume afluente:

$$\eta_v = \frac{\sum QV_t}{\sum Q_{a_t} + \sum P_t} \quad (13)$$

A interpretação deste índice diz respeito, também, à eficiência quanto ao armazenamento d’água. Em outras palavras, indica o quanto o reservatório pode desperdiçar, por vertimento, a água afluente ao sistema.

- 5) “ η_u ” – correspondência entre o volume de água utilizado (Qu_t) (descarregadores, tomadas d’água...) e o volume afluente:

$$\eta_u = \frac{\sum Qu_t}{\sum Q_{a_t} + \sum P_t} \quad (14)$$

Este índice estabelece o grau de eficiência quanto ao uso da água. Altos índices indicam que existem poucos desperdícios.

Uma relação entre todos os índices supracitados pode permitir a criação de diversos cenários, como os de demanda e hidroclimáticos. A referida relação pode ser expressa por (FARIAS; CURI; DINIZ, 2017; OLIVEIRA, 2013):

$$\eta_{Vr} + \eta_E + \eta_V + \eta_u = 100\% \quad (15)$$

3.6 – PROJETOS DE INTEGRAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Ferreira (2019) assevera que a transferência de água entre bacias com excedentes hídricos para regiões mais necessitadas é praticada desde que o homem construiu as primeiras grandes cidades, procedimento que é identificado como fundamental na organização do território e na estratificação social.

Até os dias de hoje, pode-se admirar numerosas obras hidráulicas construídas pelos romanos (na Itália), pelos incas (no Peru), através de seu complexo sistema de abastecimento humano e irrigação. Assim, os canais e aquedutos constituíam-se em peça-chave na organização e hierarquização dos espaços (FERREIRA, 2019).

A construção de modernas infraestruturas hidráulicas de grandes dimensões, contudo, deu-se a partir do século XIX, capitaneada por Estados Unidos e Europa, a fim de responder à enorme transformação nos campos do saneamento básico, produção de energia e desenvolvimento da agricultura irrigada. Nessa época, foram construídas infraestruturas de grandes dimensões para levar água de bacias excedentárias para bacias deficitárias (GIL, 2006).

O caso da transposição das águas do Rio Tejo para o Rio Segura, na Península Ibérica, é um dos casos emblemáticos concernentes ao tema e coincide com o início do debate sobre a transposição das águas do Rio São Francisco no Brasil. Nos Estados Unidos, também, grandes massas de água têm sido transferidas do Rio Colorado ao Estado da Califórnia (HANAK *et al.* 2011).

A China, por sua vez, possui em curso o maior projeto de transferência de água de toda a Ásia. A obra é financiada em parte pelo Banco Mundial e pretende transferir 44,8 bilhões de m³/ano do Sul, a partir do Rio Yangtzé, para as regiões áridas no Norte do país (WANG; LI, 2019).

No Brasil, no que concerne a transferência de águas, a possibilidade mais atraente sempre foi a transposição das águas do Rio São Francisco. Havia, inclusive, o plano de o referido rio ser reforçado pelas águas do Rio Tocantins (GUERRA, 1981).

4 – PISF E ÁREA DE ESTUDO: CARACTERIZAÇÃO

4.1 – DETALHES DO PISF

A primeira vez em que se ouviu falar sobre transposição das águas do Rio São Francisco foi ainda nos tempos do Brasil colonial, em 1818, sob a égide do Rei Dom João VI, na época do Reino Unido de Portugal e Brasil. O plano era levar água do Rio São Francisco ao Rio Jaguaribe, no Ceará. Em seguida, em 1847, um deputado provincial do Ceará apresentou nova proposta ao Imperador Dom Pedro II, a fim de aliviar os problemas causados pela seca, contudo não obteve apoio (FERREIRA, 2019).

Em 1877, foi criada uma Comissão Imperial para tratar o problema das secas no semiárido nordestino, propondo, entre outras ações, a construção de barragens e a transposição do Rio São Francisco. Todavia, devido à Proclamação da República, mais tarde, em 1889, os desdobramentos da referida comissão foram esquecidos (CAMPOLINA, 2014).

Desde então, mais de 1,5 século se passou até que o projeto de integração de bacias começasse a ser implementado, entre os anos de 2003 e 2006, no primeiro mandato de Luís Inácio Lula da Silva (CASTRO, 2011).

A região semiárida do Nordeste Brasileiro é reconhecidamente uma região pobre em recursos hídricos, contando com apenas 3% de toda a água disponível no país. No universo desses 3%, mais de 70% dizem respeito às águas do rio São Francisco, fato que impõe a necessidade de viabilizar a utilização para múltiplos fins dos recursos hídricos oferecidos pelo citado rio (BRASIL, 2000).

O enfoque principal do Projeto de Integração do rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) é assegurar oferta hídrica a 12 milhões de cidadãos da região semiárida dos Estados de Pernambuco, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte (CASTRO, 2011). Outrossim, Brasil (2004) acrescenta mais dois importantes objetivos ao PISF, a saber: (i) fornecimento complementar de água a açudes já existentes na região; e (ii) redução das diferenças regionais causadas pela oferta desigual da água entre bacias e populações.

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

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

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

O projeto é composto por dois eixos independentes: Norte e Leste, conforme mostra a Figura 2.

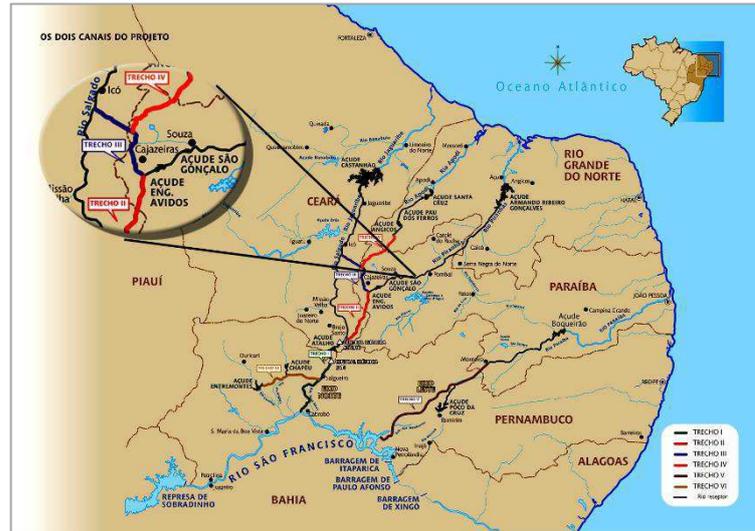
Figura 2. Eixos do PISF.



Fonte: Brasil (2004).

Os eixos principais (Norte e Leste) foram subdivididos em 6 trechos de obras, em cuja distribuição tocou ao Eixo Leste apenas o Trecho V, ficando os demais (I, II, III, IV e VI) a cargo do Eixo Norte, conforme mostra a Figura 3.

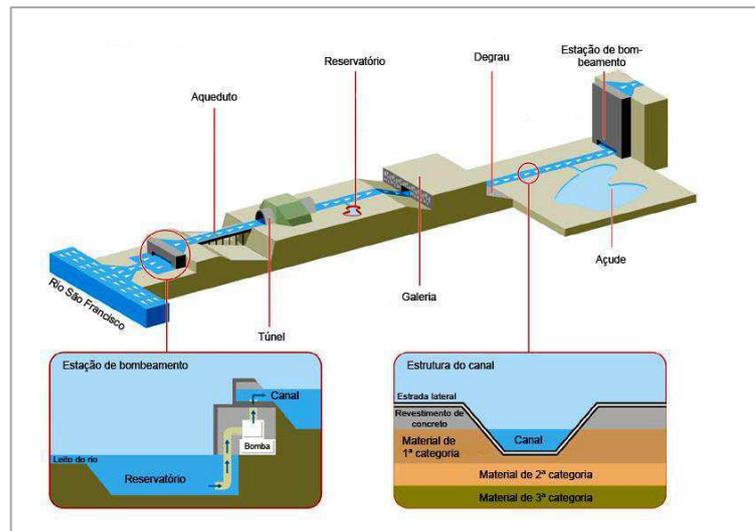
Figura 3. Trechos do PISF.



Fonte: Adaptado de Brasil (2004).

Ainda considerando o que diz Brasil (2000), a maioria do percurso que não se dá no leito natural dos rios ocorre em canais, lançando-se mão, a depender das condições topográficas, de estruturas como aquedutos e túneis – Figura 4.

Figura 4. Intervenções hidráulicas do PISF.



Fonte: Adaptado de Brasil (2004).

O Eixo Norte, como visto anteriormente, é formado por 5 trechos de obras. Considerando o enfoque deste trabalho, destaque especial será dado aos trechos I e II.

A captação de água para o Eixo Norte tem início entre o Reservatório de Sobradinho e a Ilha Assunção, perto do município de Cabrobó – PE (BRASIL, 2000).

No Trecho I, estão localizadas as principais estações de bombeamento, que precisam vencer um desnível geométrico de 165 m, desde a cota 325 m no leito do rio até a cota 490 m. São então percorridos, entre canais, aquedutos e túneis, mais de 140 km até o reservatório de Jati, que fica localizado no município de mesmo nome, no Estado do Ceará (BRASIL, 2000).

O Trecho II é, obviamente, a sequência do Trecho I, de modo que se inicia a jusante do Reservatório Jati e segue percorrendo a divisa entre os Estados do Ceará e da Paraíba. Sua principal função é atender a bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, e seu funcionamento se dá todo por gravidade, o que dispensa a necessidade de estações elevatórias (BRASIL, 2000).

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

O custo total inicialmente estimado para a construção do Eixo Norte do PISF, segundo Brasil (2004), era da ordem de 1,03 bilhão de dólares.

Depois de vários momentos de impasse, finalmente, em março de 2017, foi inaugurada a primeira fase da obra, pela chegada das águas do PISF ao Eixo Leste, inaugurando a maior obra de transposição hídrica do Brasil e da América Latina (FERREIRA, 2019). Para o Eixo Norte, a previsão, segundo Lima (2019), é que ainda no primeiro semestre de 2020 as águas do PISF possam abastecer todo o mencionado eixo.

4.2 – ÁREA DE ESTUDO

4.2.1 - GENERALIDADES

A área de estudo deste trabalho (sub-bacia do Rio do Peixe, Região do Alto Curso do Rio Piranhas e Região do Médio Piranhas Paraibano) está globalmente contida num contexto hidrogeográfico mais amplo, isto é, compõe em ordem crescente a bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu, a qual por sua vez integra a Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental (ANA, 2016).

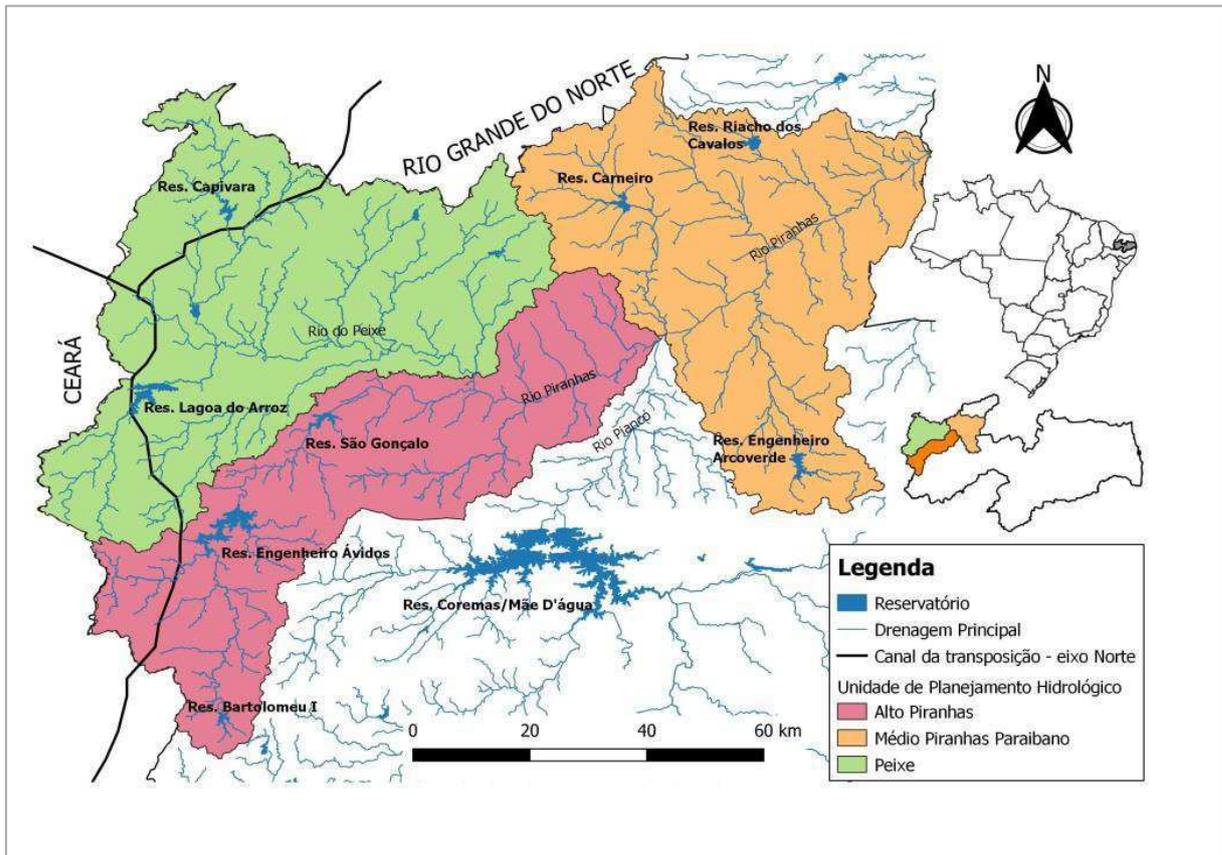
A Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (BHRPPA), com 43.683 km², tem seu território distribuído entre os Estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%), conforme mostra a Figura 5.

Figura 5. Localização da bacia hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu.



Fonte: ANA, 2016.

A fim de considerar de forma mais equitativa e detalhada fatores geomorfológicos, hidrográficos e hidrológicos semelhantes em sub-bacias adjacentes, (ANA, 2016) apresentou o conceito de *Unidade de Planejamento Hidrológico* – UPH, e dividiu a BHRPPA em 11 UPH's. É nesse contexto que surgem as UPH's Alto Piranhas, Médio Piranhas Paraibano e Peixe (Figura 6), as quais serão detalhadas a seguir.

Figura 6. Regiões do Alto Piranhas, Médio Piranhas Paraibano e Peixe.

4.2.2 – REGIÃO DO ALTO CURSO DO RIO PIRANHAS

De acordo com Paraíba (1996a), a Região do Alto Piranhas corresponde a uma das sub-bacias do Rio Piancó-Piranhas-Açu, estando localizada no extremo oeste do Estado e limitando-se hidrograficamente ao Sul e Leste com a bacia do Rio Piancó; ao Norte, com a bacia do Rio do Peixe; e, a Nordeste, com o Médio Curso do Rio Piranhas.

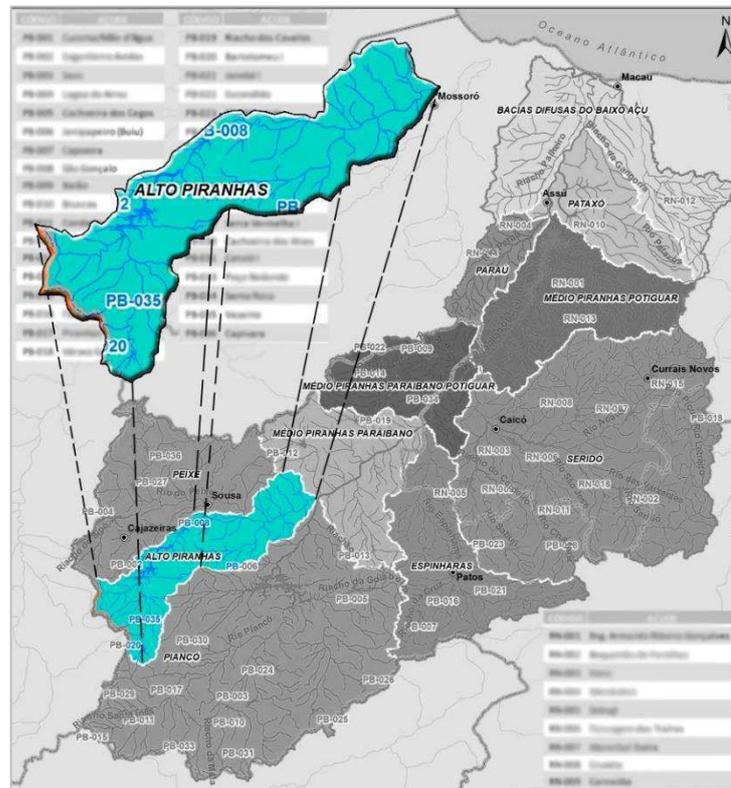
Ainda de acordo com o mesmo autor, o Rio Piranhas nasce na Serra da Arara, município de Bonito de Santa Fé, e o seu talvegue, na região do Alto Curso, chega a medir 178 km de extensão, desde a nascente até o exutório da bacia em Pombal.

Seus indicadores fisiográficos apontam para uma característica alongada, o que indica baixa susceptibilidade a enchentes. O Alto Curso do Rio Piranhas apresenta-se bastante declivoso, com inclinações médias da ordem de 9,1 m/km (0,91%). No que diz respeito à densidade de drenagem, a bacia do Alto Piranhas traz um valor de 1,4 km de riachos para cada 1 km² de área, o que implica numa eficiência de drenagem de razoável a média (PARAÍBA, 1996a).

Do ponto de vista climatológico, baseado na clássica formulação de Köppen, a referida área de captação é considerada de clima semi-árido quente - classificado como *Bsh* -, e quente e úmido com chuvas concentradas entre verão e outono – *Aw*'. A precipitação em anos médios fica em torno dos 900 mm/ano, podendo chegar, em anos chuvosos, à marca de 1400 mm/ano e, em anos secos, ao mínimo médio de 600 mm/ano (PARAÍBA, 1996a).

Segundo ANA (2016), a Região do Alto Piranhas contém 72 reservatórios superficiais que cumprem a função de regularização das vazões em períodos de estiagem. Dos 72 mananciais, destacam-se Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Bartolomeu, cujas capacidades são, nessa ordem, 293 hm³, 40 hm³ e 17 hm³. A Figura 7 situa geograficamente a bacia e os reservatórios.

Figura 7. Localização da Região do Alto Curso do Rio Piranhas.



Fonte: Adaptado de ANA (2016).

A gestão dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo é responsabilidade da União, uma vez que foram construídos com recursos financeiros do Departamento Nacional de Obras contra as Secas – DNOCS. O reservatório Bartolomeu, porém, é gerido pelo Estado da Paraíba através da AESA.

4.2.3 – REGIÃO DO MÉDIO CURSO DO RIO PIRANHAS PARAIBANO

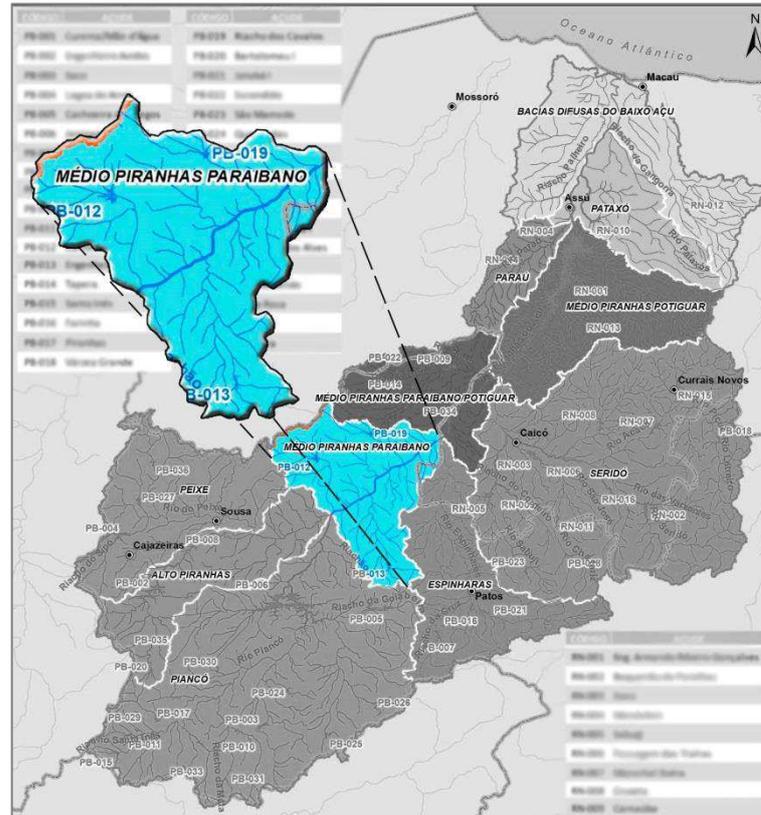
Segundo Paraíba (1996b), o Médio Piranhas paraibano nasce a noroeste do Estado da Paraíba, e estende-se até o Estado do Rio Grande do Norte. Limita-se ao Norte com o Estado do Rio Grande do Norte; ao Leste, com a sub-bacia do Rio Espinharas; ao Sul, com a bacia do Rio Piancó; e ao Oeste, com as sub-bacias Alto Piranhas e Peixe.

Ainda conforme o mesmo autor, a referida região situa-se entre os paralelos 6°02' e 7°03' de Latitude Sul, e os meridianos 37°09' e 38°00' de Longitude Oeste, ocupando uma área de 4.894 km².

Quanto ao relevo, a região se apresenta relativamente acidentada, com cotas variando entre 650 m e 180 m, situando-se totalmente no domínio cristalino. O clima predominante na região é do tipo semi-árido quente - classificado como *Bsh* -, e quente e úmido com chuvas de verão e outono – *Aw*' -, considerando a classificação de Köppen (PARAÍBA, 1996b).

A precipitação em anos médios fica em torno dos 800 mm/ano e é marcada pela alta irregularidade espaço-temporal. Por sua vez, a temperatura média anual é de 26,5 °C, a umidade relativa média do ar, da ordem de 50% e a evapotranspiração potencial ultrapassa os 2000 mm/ano, sendo que vegetação natural é a caatinga arbórea-arbustiva (PARAÍBA, 1996b).

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

Figura 8. Localização da Região do Médio Curso do Rio Piranhas.

Fonte: Adaptado de ANA (2016).

4.2.4 – SUB-BACIA DO RIO DO PEIXE

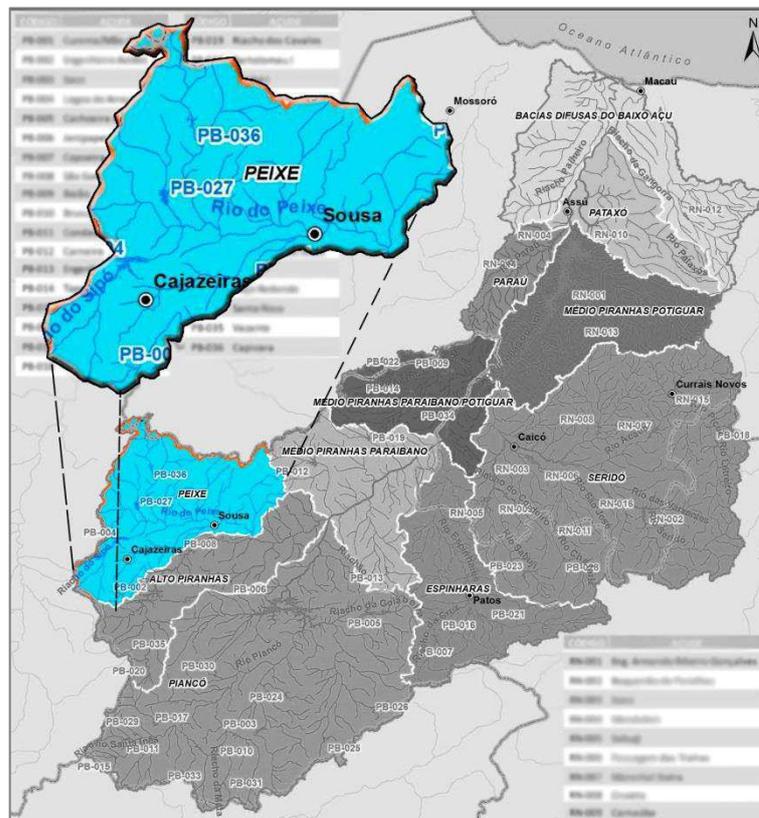
A área de captação natural do Rio do Peixe faz parte do conjunto de bacias hidrográficas que compõem a BHRPPA, situando-se ao extremo noroeste do Estado da Paraíba, na mesorregião do Sertão (PARAÍBA, 1996c).

Nascendo na Serra do Padre, município de Uiraúna, o Rio do Peixe percorre 106 km até o exutório de sua bacia em Sousa. Com área de 3475 km² e perímetro de 370 km, seus parâmetros fisiográficos permitem concluir que se trata de uma bacia levemente alongada, relativamente compacta e regular (Figura 9), atributos que se traduzem em susceptibilidade a cheias acima da média (PARAÍBA, 1996c).

O Alto Curso do Rio do Peixe apresenta-se intensamente declivoso, com mais de 29 m/km (2,9%), valores que caem para 1,8 m/km (0,18%) no seu curso médio e 0,87 m/km (0,087%) no seu baixo curso. No que concerne à densidade de drenagem, a sub-bacia do Rio do Peixe apresenta valores de 1,1 km de riachos por 1 km² de área, o que a faz ser considerada com eficiência de drenagem de razoável a média (PARAÍBA, 1996c).

A classificação climática de Koppen aponta para duas regiões distintas no interior da referida bacia: ao Norte, Leste e Noroeste há a predominância de um clima do tipo *Bsw'g*, que significa um clima seco, tipo estepe, cuja estação seca coincide com o inverno; e ao Sul e Sudoeste, ocorre um clima do tipo *Awig*, que quer dizer um clima tropical úmido, com inverno seco e variações de temperatura média mensal desprezíveis (PARAÍBA, 1996c).

Figura 9. Localização da sub-bacia do Rio do Peixe.



Fonte: Adaptado de ANA (2016).

Em anos médios, a precipitação fica em torno de 830 mm; em anos chuvoso, 1100 mm; e em anos secos, 600 mm (PARAÍBA, 1996c).

De acordo com ANA (2016), a UPH Peixe possui 122 reservatórios superficiais, que armazenam água nos períodos chuvosos para utilizá-la em períodos de estiagem, visando à redução dos déficits hídricos. Dos 122 açudes, 3 são tidos, pelo mesmo autor, como estratégicos, mas apenas 2 foram levados em conta nesta pesquisa por terem mais de 10 hm³ de capacidade, a saber: 1) Lagoa do Arroz (80 hm³) e 2) Capivara (37 hm³).

4.3 – DESCRIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS PARA A ÁREA DE ESTUDO

4.3.1 – REGIÃO DO ALTO CURSO DO RIO PIRANHAS

Açude Bartolomeu

O açude Bartolomeu, com 17,57 hm³ de capacidade e 292,25 ha de área de espelho d'água, está situado no município de Bonito de Santa Fé, sendo responsável pelo abastecimento da referida cidade.

Apesar de Bartolomeu não receber diretamente as águas do PISF, o mesmo ainda foi considerado neste trabalho, através de procedimentos de simulação, devido ao seu tamanho e influência exercida na dinâmica hídrica da Região do Alto Piranhas, ocupando a terceira posição em termos de capacidade armazenamento. Além disso, a própria Agência Nacional de Águas o considera, pelos mesmos motivos, um dos reservatórios estratégicos para a mencionada região (ANA, 2016).

Açude Engenheiro Ávidos

O reservatório Engenheiro Ávidos, com 293,62 hm³ de capacidade e 3085,31 ha de área de espelho d'água, está localizado no município de Cajazeiras, sendo responsável pelo abastecimento da referida cidade e dos distritos Engenheiro Ávidos e Gravatá.

No que diz respeito à irrigação, Engenheiro Ávidos conta com um perímetro irrigado público com área irrigável de 500 ha, das quais 100 ha já estão implantadas. Além disso, suas águas suprem uma demanda de irrigação difusa, realizada ao longo de suas margens e vales perenizados (ANA, 2016).

O Eixo Norte do PISF prevê um ponto de entrega na calha do Alto Curso do Rio Piranhas, a montante de Engenheiro Ávidos, com vazão de 1,7 m³/s, cuja captação ocorrerá pela construção de um canal de derivação no açude Capivara (CE) (ANA, 2016).

Açude São Gonçalo

O reservatório São Gonçalo, com 40,58 hm³ de capacidade e 661,55 ha de área de espelho d'água, está localizado no município de Sousa, sendo responsável pelo abastecimento

da mencionada cidade (cujo aporte hídrico já inclui o do Distrito de São Gonçalo) além dos municípios de Marizópolis e Nazarezinho.

A agricultura irrigada é uma das principais atividades da UPH Alto Piranhas, com destaque para as 3046 hectares do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), cujo aporte hídrico se dá todo a partir da barragem de São Gonçalo (ANA, 2016). Do total de área associada ao perímetro irrigado, 2404 hectares já foram implantadas, sendo responsável por uma demanda hídrica de 1400 l/s, de acordo com a Resolução Conjunta ANA/AESA-PB Nº76/2018 (ANA, 2018a).

Os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo estão ligados em série, nessa ordem, de montante para jusante, de modo que as águas do PISF recebidas diretamente pelo primeiro chegarão por, vertimento ou regularização, ao segundo.

4.3.2 – REGIÃO DO MÉDIO CURSO DO RIO PIRANHAS PARAIBANO

Açude Engenheiro Arcoverde

O reservatório Engenheiro Arcoverde, com 36,80 hm³ de capacidade, localiza-se no município de Condado, sendo responsável pelo abastecimento da referida cidade e do município de Malta. Como será visto mais adiante, por causa de sua alta vulnerabilidade e consequente susceptibilidade a falhas de atendimento, as demandas hídricas de abastecimento urbano do reservatório Engenheiro Arcoverde foram consideradas, neste trabalho, supridas pelas águas aduzidas da própria vazão fluente no leito do rio Piranhas.

Quanto à irrigação, Engenheiro Arcoverde contribui para a irrigação de 279 ha de área, correspondente ao perímetro irrigado associado ao reservatório. Isto, em termos de vazão, representa um valor em torno dos 400 l/s (ANA, 2016).

Açude Carneiros

Com 31,30 hm³ de capacidade, o reservatório Carneiros localiza-se no município de Jericó, sendo responsável pelo abastecimento dos municípios de Lagoa, Jericó, Mato Grosso, Bom Sucesso e Brejo dos Santos. Assim como em Engenheiro Arcoverde, a demanda de água para o abastecimento urbano que seria suprida por Carneiros foi atrelada à vazão fluente no leito do rio Piranhas (ANA, 2016).

De acordo com ANA (2016), no que concerne à irrigação, a demanda do referido açude é da ordem de 239 l/s, realizando a irrigação de 333 ha de área, distribuídas nos municípios anteriormente citados. Contudo, devido à alta vulnerabilidade do referido açude, essa demanda hídrica já foi incorporada àquela que será exigida da vazão escoante no rio Piranhas.

Açude Riacho dos Cavalos

Dezessete milhões e setecentos mil metros cúbicos é a capacidade do reservatório Riacho dos Cavalos, localizado no município de mesmo nome. É responsável pelo abastecimento da sede municipal em que se localiza, cuja demanda é de 16 l/s (ANA, 2016). Todavia, assim como em Engenheiro Arcoverde e Carneiros, a vazão para abastecimento urbano do município de Riacho dos Cavalos virá diretamente da vazão fluente no Rio Piranhas.

Quanto à irrigação, ocorre uma demanda de 54,8 l/s, para atender uma área de 109,6 ha, a qual, também, terá como fonte hídrica principal a vazão que escoar pelo rio Piranhas.

4.3.3 - SUB-BACIA DO RIO DO PEIXE

Açude Capivara

O reservatório Capivara possui capacidade para 37,55 hm³ de água e seu espelho d'água chega a ocupar 389,33 ha, quando está completamente cheio. Situando-se no município de Uiraúna, abastece 8 municípios (ANA, 2016), a saber: Uiraúna, Joca Claudino, Bernardino Batista, Poço Dantas, Poço José de Moura, Vieirópolis, Lastro e São Francisco.

Açude Lagoa do Arroz

O reservatório Lagoa do Arroz, com 80,39 hm³ de capacidade e 1305,64 ha de área de espelho d'água, é o maior reservatório desta sub-bacia e localiza-se também no município de Cajazeiras. É o responsável pelo abastecimento dos municípios Santa Helena, Bom Jesus, Cachoeira dos Índios e São João do Rio do Peixe (ANA, 2016, 2017).

Lagoa do Arroz tem associado a si o perímetro irrigado de Várzea da Ema, com 980 ha em potencial, das quais 300 ha já foram implantadas. Ao referido perímetro irrigado e à área de irrigação difusa correspondem 133 l/s para cada um, sendo a fonte hídrica do primeiro o próprio reservatório e a do segundo as águas que escoam ao longo do Rio Cacaré. Existe ainda uma área de irrigação difusa associada exclusivamente ao Lagoa do Arroz, cuja vazão demandada é de 89 l/s.

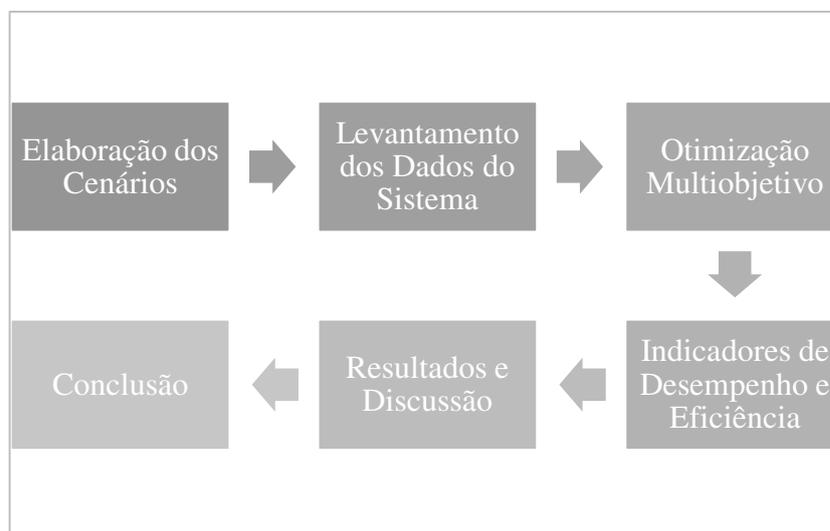
Diferentemente de Capivara, que barra diretamente o Rio do Peixe, Lagoa do Arroz barra o Rio Cacaré (que é um afluente do Rio do Peixe), por onde o Eixo Norte do PISF prevê um ponto de entrega a montante do mesmo reservatório no valor de 1,0 m³/s, cuja derivação se dará do ramal Apodi (ANA, 2016).

5 - METODOLOGIA

5.1 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A realização desta pesquisa baseou-se na obediência à sequência metodológica apresentada na Figura 10.

Figura 10. Fluxo metodológico.



Esta pesquisa desenvolve um estudo sobre alternativas de utilização otimizada da vazão exógena do PISF nas UPH's Alto Piranhas, Peixe e Médio Piranhas Paraibano. Para tanto, criaram-se cenários que se diferenciam pela forma através da qual as águas do PISF terão acesso à área de estudo, ora toda a vazão pelo Alto Piranhas, ora toda pelo Peixe; ora como recomendado por ANA (2016), ora pela otimização pura através do modelo de otimização multiobjetivo desenvolvido por (SANTOS et al., 2011).

Os reservatórios receptores diretos das águas do PISF e objetos diretos do processo de otimização foram Engenheiro Ávidos e São Gonçalo (os dois no Alto Piranhas) e Lagoa do Arroz (no Peixe).

Os reservatórios da área de estudo com capacidade superior a 10 hm³ (Bartolomeu I, Capivara, Engenheiro Arcoverde, Riacho dos Cavalos e Carneiros) foram levados em conta em função de sua importância na dinâmica hídrica da região, embora não sejam receptores diretos das águas da transposição. Estes foram, portanto, objeto do processo de simulação, a fim de verificar como se comportaram hidraulicamente entre os anos de 2011 e 2019, tendo sido, pois, alvo de análise ao longo de 9 anos.

5.2 – CONCEPÇÃO DOS CENÁRIOS

Cenário C1

O Cenário C1 apresenta a situação recomendada pelo Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piranhas-Açu, e por isso será considerado o cenário-base. Nessa configuração, dos 2,7 m³/s a que terá direito a referida área de captação, 1,7 m³/s deverá vir pela Região do Alto Curso do Rio Piranhas e 1,0 m³/s deverá ser entregue pela sub-bacia do Rio do Peixe (ANA, 2016). A Figura 11 ilustra a configuração do sistema para o Cenário C1.

Cenário C2

O Cenário C2 foi pensado para analisar o comportamento do sistema se toda a água da transposição (2,7 m³/s) entrasse pela Região do Alto Curso do Rio Piranhas. A Figura 12 ilustra a configuração do sistema para o Cenário C2.

Cenário C3

O Cenário C3 foi pensado para analisar o comportamento do sistema se toda a água da transposição (2,7 m³/s) entrasse pela sub-bacia do Rio do Peixe. A Figura 13 ilustra a configuração do sistema para o Cenário C3.

Cenário C4

No Cenário C4, o modelo determinou livremente as vazões de entrada para o sistema da área de estudo, e o esquema é mostrado na Figura 14.

Figura 11. Leiaute do sistema para o Cenário C1.

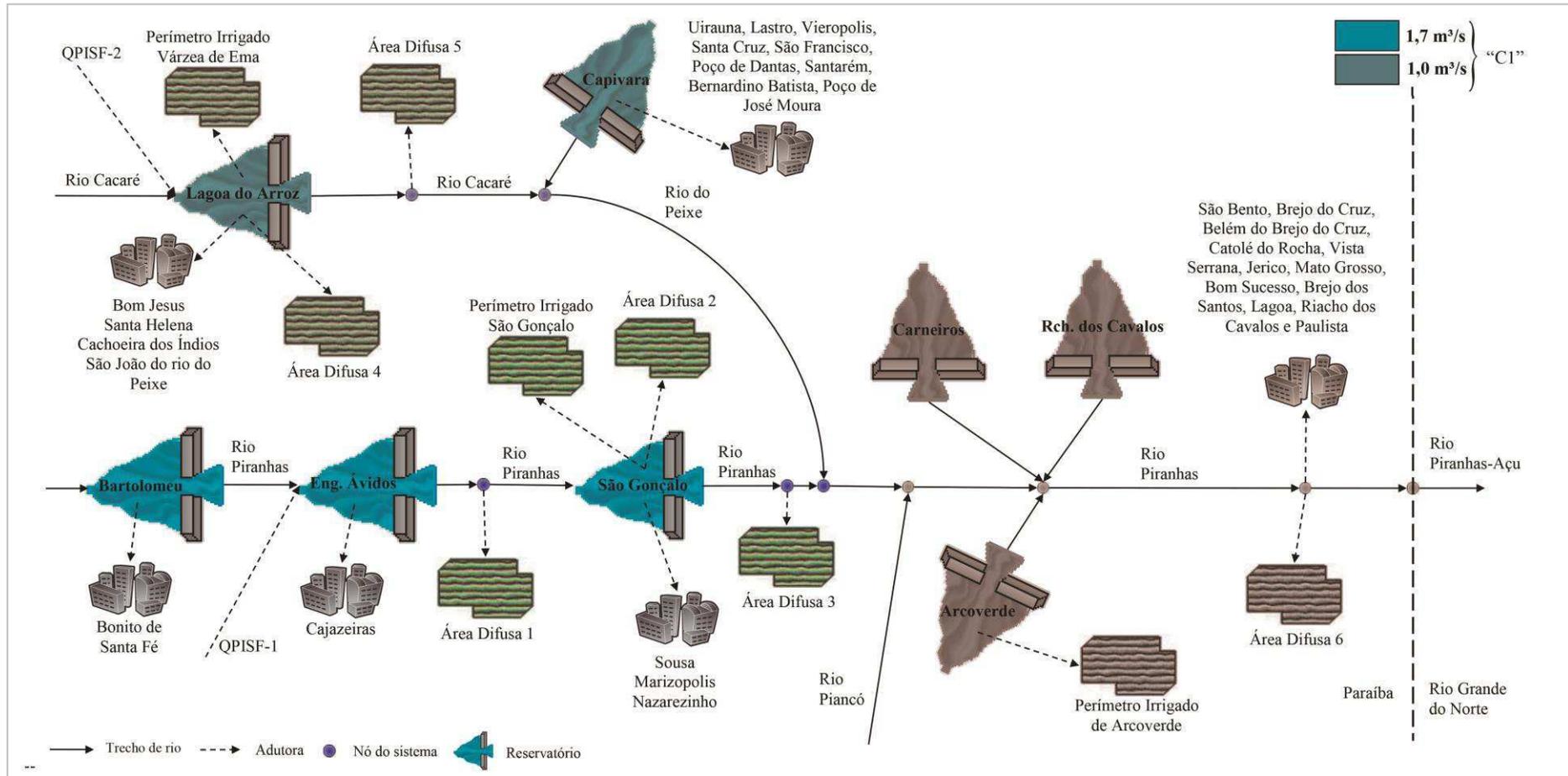


Figura 12. Leiaute do sistema para o Cenário C2.

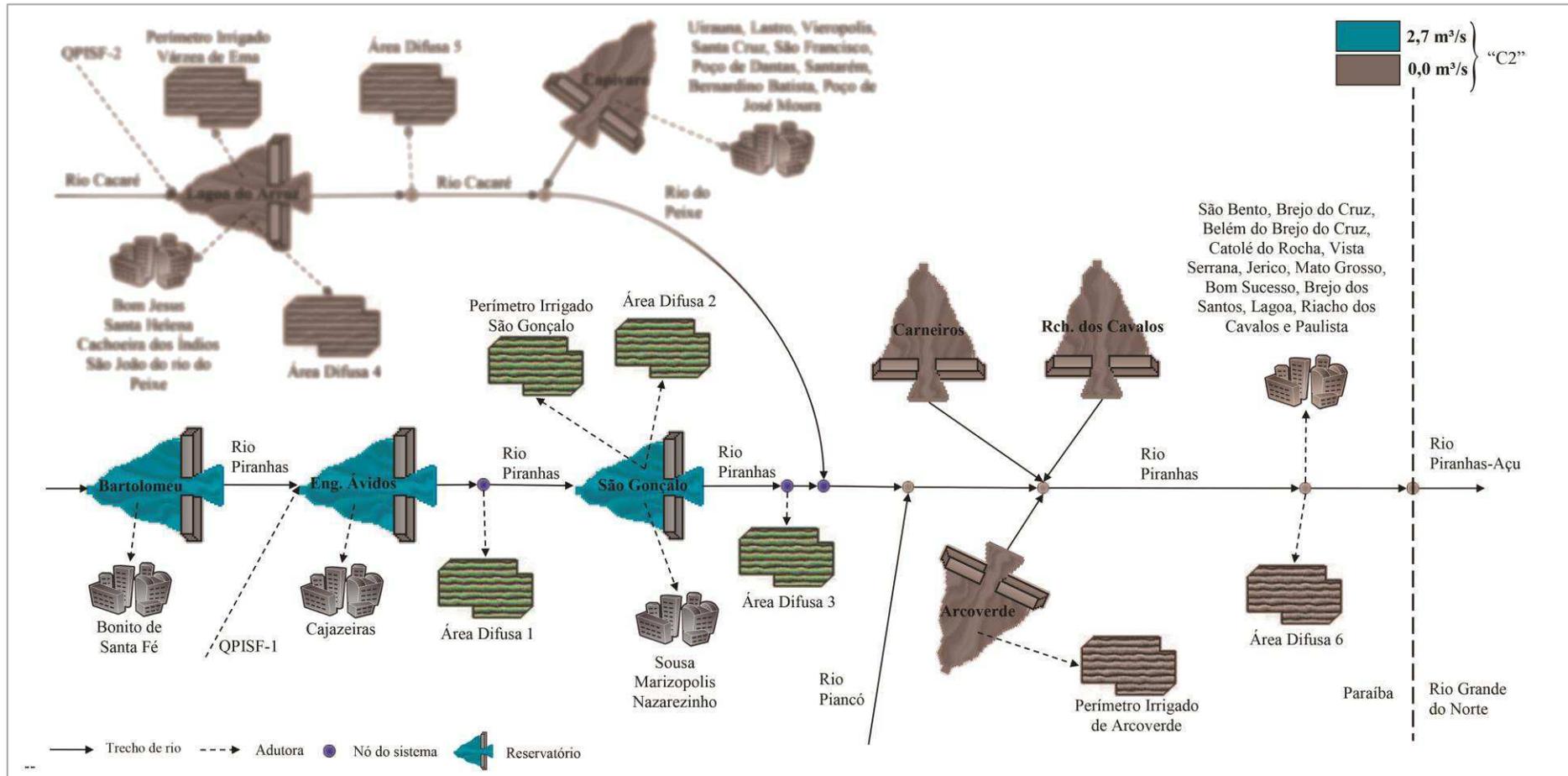


Figura 13. Leiaute do sistema para o Cenário C3.

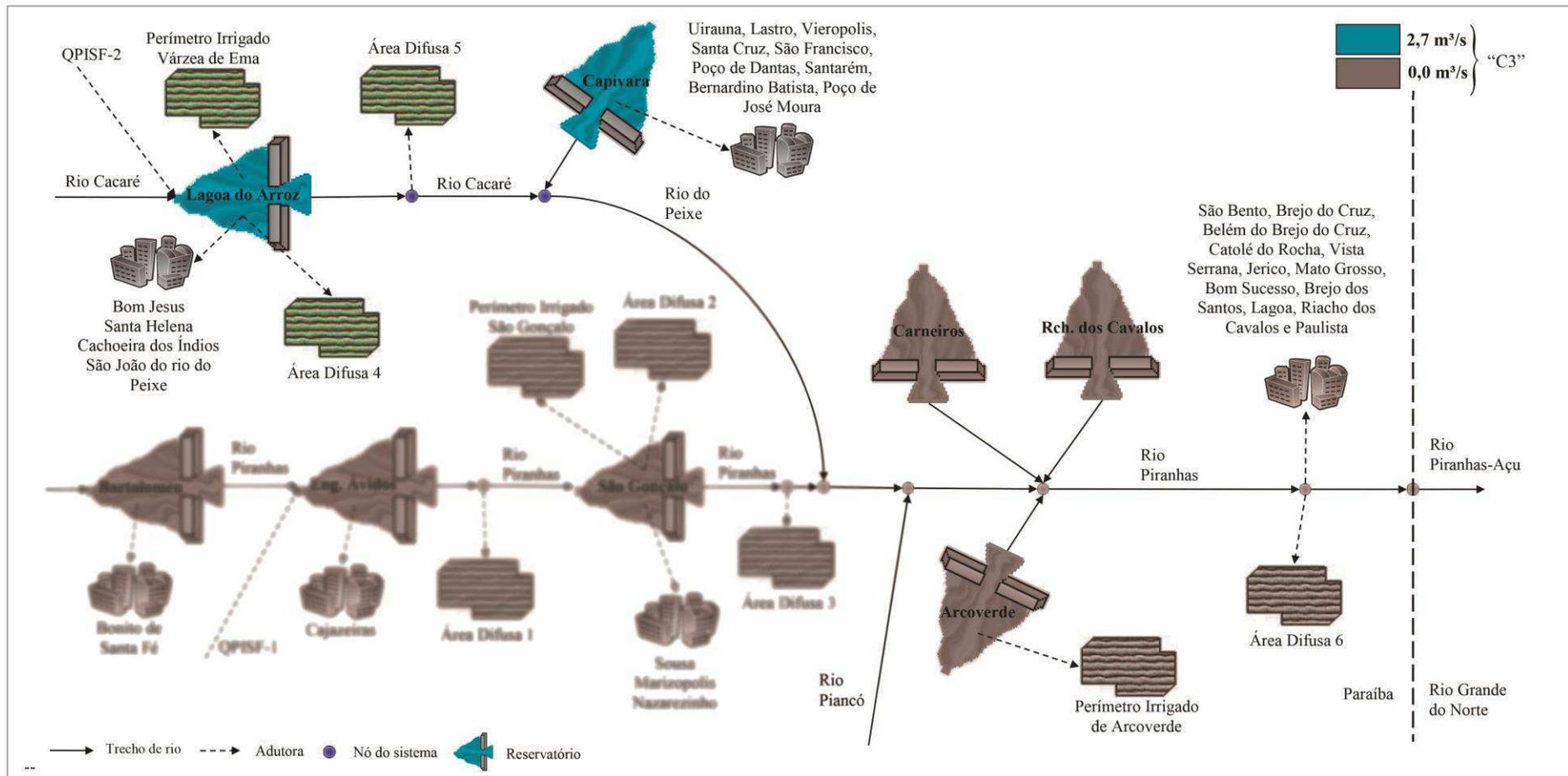
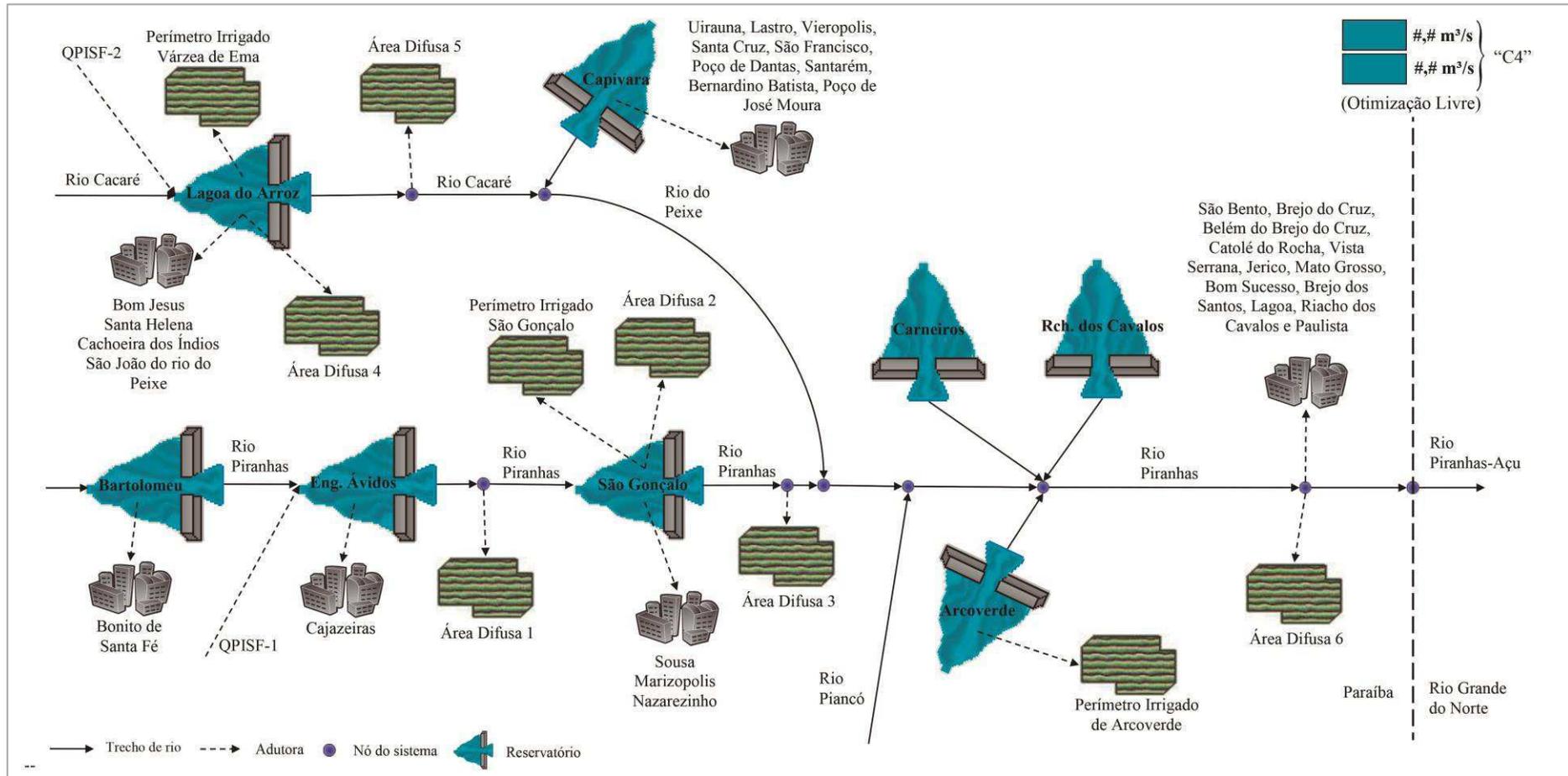


Figura 14. Leiaute do sistema para o Cenário C4.



5.3 – LEVANTAMENTO DOS DADOS DO SISTEMA

Precipitação

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

Para o cálculo da precipitação direta no reservatório, foram utilizados valores precipitados dos postos pluviométricos mais próximos dos reservatórios, conforme disposto na Tabela 1.

Tabela 1. Postos pluviométricos mais próximos aos reservatórios.

Reservatórios	Posto pluviométrico	Precipitação média (mm)
Arcoverde	Condado	781,0
Riacho dos Cavalos	Catolé do Rocha	849,1
Carneiros	Jericó	886,0
Capivara	Uiraúna	820,6
Bartolomeu I	Bonito de Santa Fé	896,4
Lagoa do Arroz	Cajazeiras	880,6
São Gonçalo	São Gonçalo	914,4
Engenheiro Ávidos	São José de Piranhas	979,3

Fonte: AESA, 2020a; ANA, 2016

Para a determinação das séries de vazões afluentes aos reservatórios e nós do sistema, utilizaram-se os postos pluviométricos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Postos pluviométricos utilizados para o cálculo da vazão afluente.

Reservatórios	Posto fluviométrico
Arcoverde	Condado e Malta
Riacho dos Cavalos	Catolé do Rocha
Carneiros	Jericó, Santa Cruz e Bom Sucesso
Capivara	Uiraúna
Bartolomeu I	Bonito de Santa Fé
Lagoa do Arroz	Cajazeiras
São Gonçalo	São Gonçalo, Cajazeiras e Aguiar
Engenheiro Ávidos	São José de Piranhas, Bonito de Santa Fé, São Gonçalo, Aguiar e Serra Grande
Região do curso do rio não controlado	
Sub-bacia do rio do Peixe	Santa Cruz, Cajazeiras, Uiraúna, Sousa e São João do Rio do Peixe
Região do Alto Curso do rio Piranhas	Sousa, São Gonçalo, Coremas, Pombal e Aguiar
Região do Médio Curso do rio Piranhas paraibano	Pombal, Condado, Malta, Vista Serrana, Paulista, Jericó, Catolé do Rocha, São Bento e Brejo do Cruz

Fonte: AESA, 2020a; ANA, 2016, 2017

Vazões Afluentes

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

Tabela 2. Parâmetros de calibração do modelo SMAP mensal.

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

Fonte: ANA (2016).

Evaporação

Para a determinação da evaporação nos reservatórios foram utilizados os dados do vetor de evaporação dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 Evaporação média mensal (em “mm”) dos reservatórios estratégicos.

Reservatórios	Vetor de Evaporação (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arcoverde	231	160	129	115	130	153	194	249	268	286	285	270
Riacho dos Cavalos	231	156	124	114	138	160	202	264	290	302	297	274
Carneiros	217	147	119	112	139	158	197	255	278	289	281	262
Capivara	182	126	105	107	138	157	200	242	259	269	246	233
Bartolomeu I	165	119	101	94	114	127	159	204	223	236	218	209
Lagoa do Arroz	178	125	103	106	137	157	200	240	257	267	241	229
São Gonçalo	182	127	106	105	134	150	189	231	247	259	241	229
Engenheiro Avidos	173	122	102	102	129	145	184	224	243	252	231	221

Fonte: ANA (2017)

As informações de evapotranspiração de referência para a determinação das vazões afluentes foram retiradas do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016), que apresenta o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. Para as áreas de estudo foi selecionada a estação climatológica de São Gonçalo por ser a mais representativa da região. Os dados de evapotranspiração de referência constam da Tabela 4.

Tabela 4. Evapotranspiração de referência média mensal, em “mm”.

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

Fonte: ANA (2016)

Demandas de abastecimento urbano

No cálculo do abastecimento urbano, foram considerados todos os municípios abastecidos pelos reservatórios estratégicos presentes na área de estudo. O Quadro 2 lista todos os referidos municípios.

Quadro 2. Relação de municípios considerados nas demandas de abastecimento urbano conforme sua fonte hídrica.

Fonte hídrica	Municípios
Res. Bartolomeu	Bonito de Santa Fé
Res. Engenheiro Ávidos	Cajazeiras
Res. São Gonçalo	Sousa, Nazarezinho, Marizópolis
Res. Capivara	Vieirópolis, Uiraúna, Poço Dantas, Poço de José de Moura, Joca Claudino (Santarém), Bernardino Batista, Lastro, São Francisco
Res. Lagoa do Arroz	Santa Helena, Bom Jesus, Cachoeira dos Índios, S. João do Rio do Peixe
Vazão fluente pelo rio Piranhas	Santa Cruz, São Bento, Brejo do Cruz, Belém do Brejo do Cruz, Catolé do Rocha, Vista Serrana, Riacho dos Cavalos, Jericó, Mato Grosso, Bom Sucesso, Brejo dos Santos, Paulista, Lagoa

Fonte: ANA (2016)

Em consonância com o que recomenda Farias (2009) a respeito da determinação da vazão de demanda máxima, torna-se necessário realizar estudos de projeção populacional e estimativa de consumo, para, a partir de então, determinar a vazão de projeto, no fim do seu período de alcance. Neste trabalho, o horizonte de projeto é o ano de 2029, equivalente portanto a um período de 10 anos, contados a partir do corrente ano.

Então, na análise do crescimento populacional, dados disponíveis no IBGE (censos e projeções populacionais) dos anos 1997, 2000, 2003, 2005, 2007, 2010, 2012 e 2019 foram utilizados. Para isto, utilizou-se o software LAB Fit, desenvolvido por Silva et al. (2004), o qual através de métodos de regressão linear múltipla permitiu a obtenção de uma curva representativa da evolução do número de habitantes em função do tempo. Logo, a partir dos referidos dados, foi possível realizar uma estimativa populacional, a fim de obter as demandas hídricas futuras através do consumo per capita de cada município abastecido.

Os dados de consumo *per capita* de cada município foram coletados no site do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Assim, as vazões requeridas de cada açude estratégico considerado na área de estudo são apresentadas na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5. Demandas hídricas para abastecimento urbano nos reservatórios estratégicos.

Fonte Hídrica	Demanda (l/s)									
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Res. Bartolomeu I	18,9	19,2	19,4	19,7	20,0	20,2	20,5	20,8	21,0	21,3
Res. Engenheiro Ávidos	122,1	122,7	123,3	123,9	124,5	125,1	125,7	126,3	126,8	127,4
Res. São Gonçalo	234,1	235,5	236,9	238,3	239,7	241,2	242,6	244,0	245,4	246,8
Res. Lagoa do Arroz	67,7	68,1	68,5	68,9	69,3	69,7	70,2	70,6	71,1	71,5
Res. Capivara	66,2	66,4	66,6	66,9	67,1	67,3	67,5	67,8	68,0	68,2
Rio Piranhas	209,1	210,6	212,2	213,7	215,3	216,8	218,4	220,1	221,7	223,3

Fonte: IBGE (2019); SNIS (2019)

Demandas para irrigação

No que diz respeito à irrigação, foram levadas em conta as informações constantes das resoluções conjuntas ANA/AESA-PB N° 75/2018, ANA/AESA-PB N° 76/2018 e ANA/IGARN-RN/AESA-PB N° 65/2019, além daquelas constantes do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó – Piranhas – Açú, encontradas em ANA (2016).

Na área de estudo, encontram-se três perímetros irrigados oficiais, a saber: São Gonçalo, Várzea da Ema e Arcoverde, cujos principais atributos encontram-se condensados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6. Informações sobre os perímetros irrigados.

Perímetro Irrigado	Área Irrigável ¹ (ha)	Área Implantada ¹ (ha)	Demanda (m ³ /s)	Fonte Hídrica
São Gonçalo	3046	2404	1,4 ²	Res. São Gonçalo
Várzea da Ema	980	300	0,133 ³	Res. Lagoa do Arroz
Arcoverde	279	279	0,40 ¹	Res. Arcoverde

Fonte: ¹ANA (2016), ²Resolução conjunta ANA/AESA N° 76/2018, ³Resolução conjunta ANA/AESA N° 75/2018.

Também foram levadas em conta as áreas difusas nos entornos dos reservatórios e ao longo dos trechos de rio. As resoluções citadas anteriormente apontam para seis áreas difusas, cujas demandas, extraídas dos mesmos documentos, são apresentadas na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7. Demandas hídricas das áreas difusas.

Área Difusa	Demanda (m ³ /s)	Fonte Hídrica
1	0,15 ¹	Rio Piranhas
2	0,16 ¹	Res. São Gonçalo
3	0,17 ¹	Rio Piranhas
4	0,133 ²	Res. Lagoa do Arroz
5	0,133 ²	Rio Cacaré
6	1,6 ³	Rio Piranhas

Fonte: ¹Resolução conjunta ANA/AESA N° 76/2018 (ANA, 2018a), ²Resolução conjunta ANA/AESA N° 75/2018 (ANA, 2018b), ³Resolução conjunta ANA/IGARN/AESA N° 65/2019 (ANA, 2019).

5.4 – DADOS ESTRUTURAIS DOS RESERVATÓRIOS

Os dados estruturais e operacionais dos reservatórios para entrada no modelo de otimização, segundo Santos *et al.* (2011), têm a ver com alguns atributos, tais como: 1) curvas cota-área-volume; 2) capacidades máxima e mínima; e 3) características hidráulicas das tomadas d'água, descargas de fundo e vertedouros.

Curvas Cota x Área x Volume

As relações cota-área-volume dos reservatórios tomados como estratégicos na área de pesquisa foram obtidas da Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba – AESA/PB, com resolução métrica na variável cota. Devido à grande quantidade de informações, todos os referidos dados encontram-se apresentados detalhadamente nos Anexos 1, 2 e 3, no fim deste relatório.

Volumes máximo, mínimo e inicial dos reservatórios

As informações sobre os volumes inicial, máximo e mínimo foram obtidas em AESA (2019) e (ANA, 2017). Na Tabela 8, apresentam-se os referidos valores, sendo o volume inicial referente ao mês de janeiro de 2020.

Tabela 8. Volumes dos reservatórios (hm³).

Reservatórios	Volume (hm ³)			
	Capacidade ¹	Morto ¹	Inicial (jan/2020) ²	%
Arcoverde	36,83	1,96	5,88	16%
Riacho dos Cavalos	17,70	0,91	1,35	8%
Carneiros	31,29	0,40	4,82	15%
Capivara	37,55	0,07	0,31	1%
Bartolomeu I	17,57	0,00	7,13	41%
Lagoa do Arroz	80,39	2,38	7,49	9%
São Gonçalo	40,58	2,04	12,68	31%
Engenheiro Ávidos	293,62	6,72	45,30	15%

Fonte: ¹ (AESAs, 2020b), ²(ANA, 2017).

Vertedores

Os vertedores dos reservatórios estratégicos considerados nesta pesquisa têm suas características (tais como: tipo, largura, cota da soleira e vazão máxima de projeto) apresentadas na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9. Atributos dos vertedores.

Reservatórios	Vertedor			
	Tipo ¹	Largura ² (m)	Cota da soleira ¹ (m) ¹	Vazão máxima de projeto (m ³ /s)
Arcoverde	Soleira espessa	118	100	340
Riacho dos Cavalos	Soleira espessa	140	88	400
Carneiros	Soleira espessa	100	142	285
Capivara	Soleira espessa	80	360	230
Bartolomeu I	Creager	70	97	400
Lagoa do Arroz	Soleira espessa	80	102	580
São Gonçalo	Creager	230	247	1800
Engenheiro Ávidos	Soleira espessa	160	317	1610

Fonte: ¹ANA (2017), ²PARAÍBA (1996a).

Descarregadores de fundo

As informações concernentes aos descarregadores de fundo (diâmetro, cota de entrada e vazão máxima de projeto) dos reservatórios estratégicos considerados constam da Tabela 10 seguinte.

Tabela 10. Características dos descarregadores de fundo.

Reservatórios	Descarregador de fundo		
	Diâmetro (m)	Cota de entrada (m)	Vazão máxima de projeto (m ³ /s)
Arcoverde	0,90	88	5,9
Riacho dos Cavalos	0,45	80,5	1,2
Carneiros	0,50	132	1,7
Capivara	0,40	326,25	1,94
Bartolomeu I	0,40	71	1,7
Lagoa do Arroz	0,80	86	5,3
São Gonçalo	2,60	234	50,9
Engenheiro Avidos	1,20	295	14,1

Fonte: ANA (2017)

5.5 – CRITÉRIOS OPERACIONAIS

Na operação do sistema, os cenários levaram em conta as seguintes premissas:

1. O período de estudo corresponde a nove anos, tendo sido iniciado o processo de otimização no mês de janeiro de 2011;
2. O volume de água inicial dos reservatórios foi considerado igual ao do dia 01 de janeiro de 2020;
3. O volume de água de cada reservatório, ao fim da otimização, deve ser maior ou igual ao volume inicial, garantindo, desse modo, a sustentabilidade hídrica das atividades econômicas;
4. O volume meta¹ dos reservatórios, em todos os meses, foi considerado igual à capacidade dos mesmos;
5. As capacidades das tomadas d'água destinadas ao abastecimento humano foram consideradas iguais às suas respectivas demandas;
6. As prioridades de atendimento foram: 1º) atendimento às demandas de abastecimento urbano dos municípios considerados; 2º) atendimento das demandas das áreas agrícolas; 3º) atendimento ao volume meta dos reservatórios.

¹Fração do volume máximo ao qual se atribui uma prioridade (ANA, 2017).

5.5.1 – MODELO DE SIMULAÇÃO

A fim de verificar as vazões liberadas por vertimento pelos reservatórios Capivara (UPH Peixe), Bartolomeu (UPH Alto Piranhas), Arcoverde (UPH Médio Piranhas), Carneiros (UPH Médio Piranhas) e Riacho dos Cavalos (UPH Médio Piranhas) os quais são tidos como reservatórios estratégicos para a área de estudo, foi realizada a simulação da operação de cada reservatório separadamente utilizando a equação da conservação de massa, a saber:

$$V_{r_{t+1}} = V_{r_t} + Q_{a_t} - R_t + Pr_t - Ev_{r_t} - Q_{v_t} \quad (16)$$

$$V_{r_{\min}} \leq V_{r_t} \leq V_{r_{\max}} \quad (17)$$

$$0 \leq R_t \leq D_t \quad (18)$$

$$0 \leq Q_{v_t} \leq Q_{v_{\max}} \quad (19)$$

Sendo:

- a) “ V_{r_t} ” é o volume do reservatório no início do ano t ;
- b) “ $V_{r_{t+1}}$ ” é o volume do reservatório no final do ano $t+1$;
- c) “ Q_{a_t} ” é a vazão afluyente ao reservatório durante o ano t ;
- d) “ R_t ” é o volume retirado de água do reservatório durante o ano t ;
- e) “ Pr_t ” é a precipitação direta sobre o espelho d’água do reservatório durante ano t ;
- f) “ Ev_{r_t} ” é o volume evaporado no reservatório durante o ano t ;
- g) “ Q_{v_t} ” é o volume vertido do reservatório durante o ano t ;
- h) “ $V_{r_{\min}}$ ” é o volume mínimo do reservatório;
- i) “ $V_{r_{\max}}$ ” é a capacidade máxima do reservatório;
- j) “ D_t ” é a demanda do reservatório durante o ano t ;
- k) “ $Q_{v_{\max}}$ ” é volume máximo de vertimento do reservatório.

As retiradas de água do reservatório foram efetuadas utilizando a chamada Política de Operação Linear Padrão (SLOP, da abreviação em inglês) (LOUCKS; STEDINGER; HAITH,

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, senão o excesso de água é acumulado no reservatório até que sua capacidade máxima seja atingida e o vertimento ocorra.

5.5.2 – MODELO DE OTIMIZAÇÃO QUANTITATIVO

Com o intuito de analisar a utilização ótima das águas nos reservatórios receptores da vazão do PISF na área de estudo (Alto Piranhas: Engenheiro Ávidos e São Gonçalo; Peixe: Lagoa do Arroz), foi utilizado o modelo de otimização multiobjetivo desenvolvido por Santos et al., (2011).

O modelo destina-se a otimizar os múltiplos usos de um sistema de recursos hídricos, promovendo a alocação ótima dos recursos naturais existentes (água e terras aptas ao plantio) entre os múltiplos usos de um sistema de recursos hídricos, quando operado de forma integrada, via uma análise multiobjetivo. O mesmo é baseado em programação linear sucessiva para a busca da solução ótima.

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

Neste trabalho, utilizou-se a sequência de prioridades como sendo, respectivamente: 1^a) atendimento das demandas de abastecimento urbano; 2^a) atendimento das demandas de irrigação; e 3^a) volumes-meta dos reservatórios.

Função objetivo

A função objetivo representa matematicamente os objetivos e preferências dos decisores a serem otimizadas. Logo, uma vez que todo o processo de otimização tem início sobre ela, a mesma precisa ser definida com muito cuidado (LABADIE, 2004).

De um modo geral, o modelo considera a função objetivo global como sendo a soma de várias outras funções objetivo locais, onde cada uma representa um objetivo que se pretende maximizar ou minimizar. O modelo desenvolvido por Santos et al., (2011) apresenta cinco funções objetivo, são elas: (i) Demandas nas tomadas d'água (DTQD); (ii) Vazão efluente dos reservatórios (VER); (iii) Volume-meta do reservatório (VMR); (iv) Receita líquida da agricultura irrigada (RL); e (v) Mão de obra da agricultura irrigada (MO). Contudo, para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas somente duas das cinco funções objetivo locais, a saber: 1) Demandas nas tomadas d'água (DTQD) e 2) Volumes-meta dos reservatórios (VMR).

A Equação 20 representa a função objetivo destinada à minimização do déficit do atendimento das demandas nas tomadas d'água dos reservatórios e dos nós do sistema.

$$DTD_d = \sum_t \left(\frac{Dt_{d,t} - Qt_{d,t}}{Dt_{d,t}} \right)^2 \quad (20)$$

sendo “ d ” a “ d -ézima” tomada d'água do sistema; “ $Dt_{d,t}$ ” a demanda requerida na tomada d'água “ d ” no mês “ t ”; e “ $Qt_{d,t}$ ” o volume mensal destinado ao atendimento da demanda na tomada d'água d no mês “ t ” ($Qt_{d,t} \leq Dt_{d,t}$).

A Equação 21 representa a função objetivo destinada a minimizar o déficit entre o volume de água do reservatório “ r ” no final do mês “ t ” ($VR_{r,t}$) e o volume meta estabelecido neste mês ($VRmeta_{r,t}$):

$$VM_r = \sum_t \left(\frac{VRmeta_{r,t} - VR_{r,t}}{VRmeta_{r,t}} \right)^2 \quad (21)$$

Desse modo, a função objetivo global (ou multiobjetivo) ficou matematicamente definida pela Equação 22:

$$\min f o = \sum_d \omega_{1,d} \cdot DTD_d + \sum_r \omega_{2,r} \cdot VM_r \quad (22)$$

Onde:

“ ω_i ” – coeficiente de ponderação que mede a relativa importância de cada objetivo;

As restrições da função objetivo apresentam-se na operação dos reservatórios pela consideração de critérios operacionais e agrônômicos e, mais genericamente, através de outros componentes do sistema.

Restrições

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

Os reservatórios podem ser conectados a outros elementos do sistema como a nós, descargas de fundo, vertedouros e tomadas de água (Figura 15), tendo o balanço hídrico baseado no princípio de conservação da massa, expresso pela Equação 23:

$$VR_{r,t} = VR_{r,t-1} + Qa_{r,t} - \sum_{a(r)} Qtr_{r,a,t} - Qtf_{r,t} - Qtf_{f,r,t} - Qv_{r,t} + P_{r,t} - Ev_{r,t} + Qn_{c,r,t} \quad (23)$$

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*;

“Qa_{r,t}” – vazão afluyente ao reservatório *r* ao longo do mês *t*;

“a_r” – índice que representa a *a-ésima* tomada d’água do reservatório *r*;

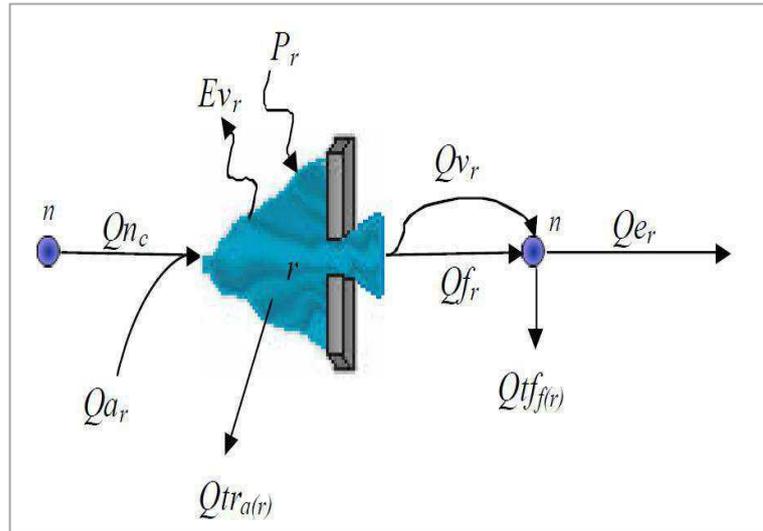
“f_r” – índice que representa a *f-ésima* tomada d’água de fundo do reservatório *r*;

“Qtr_{a,r,t}” – *a-ésima* vazão de tomada d’água do reservatório *r* no mês *t*;

“Qtf_{f,r,t}” – *f-ésima* vazão de tomada d’água de fundo do reservatório *r* no mês *t*;

“Qn_{c,r,t}” – vazão de entrada no reservatório *r* originada de contribuições da *c-ésima* calha (trecho) do rio a montante do reservatório *r* no mês *t*.

Figura 15. Esquema de consideração do balanço hídrico em um reservatório.



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

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

$$P_{r,t} = p_{r,t} \left(\frac{AR_{r,t} + AR_{r,(t-1)}}{2} \right) \quad (24)$$

$$E_{r,t} = e_{r,t} \left(\frac{AR_{r,t} + AR_{r,(t-1)}}{2} \right) \quad (25)$$

Sendo: “*p_{r,t}*” a taxa de precipitação para o reservatório “*r*” no mês “*t*”; “*e_{r,t}*” a taxa de evaporação para o reservatório “*r*” no mês “*t*”; “*AR_{r,t}*” a área do espelho d’água do reservatório “*r*” no final do mês “*t*”; “*AR_{r,(t-1)}*” a área do espelho d’água do reservatório “*r*” no início do mês “*t*”.

O volume a ser captado através das tomadas d’água está limitado pela sua capacidade máxima “*Qtmax_d*” e a cota de entrada do tubo da tomada d’água “*d*” no reservatório “*r*” “*Ht_{d,(r)}*”, descrito matematicamente pela expressões 26 e 27:

$$0 \leq Q_{t,d,t} \leq Q_{tmax_d} \quad (26)$$

$$Q_{t,d,t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq H_{t,d(r)} \quad (27)$$

Sendo: “*HR_{r,t}*” a cota do nível d’água do reservatório “*r*” no mês “*t*”.

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

$$0 \leq Q_{v,r,t} \leq Q_{vmax_r} \quad (28)$$

$$Q_{v,r,t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq H_{vert_r} \quad (29)$$

Sendo: “ Q_{vmax_r} ” o volume mensal máximo vertido que é projetado para o reservatório “ r ”; “ H_{vert_r} ” representa a cota da soleira do vertedor do reservatório “ r ”.

O volume liberado através da descarga de fundo “ $Q_{f,r,t}$ ” do reservatório “ r ” em cada mês “ t ” está limitado pela cota de entrada da tubulação de descarga de fundo “ H_{fe_r} ” e pelo volume máximo que pode ser aduzido pela descarga de fundo em cada mês “ t ” “ $Q_{fmax_{r,t}}$ ”, de modo que matematicamente tem-se:

$$0 \leq Q_{f,r,t} \leq Q_{fmax_{r,t}} \quad (30)$$

$$Q_{f,r,t} \geq 0, \text{ se } HR_{r,t} \geq H_{fe_r} \quad (31)$$

O volume máximo que pode ser aduzido pela descarga de fundo ($Q_{fmax_{r,t}}$) pode ser estimado pela Equação 32:

$$Q_{fmax_{r,t}} = C_{f_r} \cdot A_{f_r} \cdot \sqrt{2g(HR_{r,t} - H_{fs_r})} \quad (32)$$

Onde: “ C_{f_r} ” o coeficiente de vazão de descarga de fundo do reservatório “ r ”; “ A_{f_r} ” a área da seção transversal do tubo de descarga de fundo do reservatório “ r ” e “ H_{fs_r} ” a cota de jusante da geratriz inferior do tubo de descarga de fundo do reservatório “ r ”.

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

O volume de água do reservatório “ r ” está limitado por:

$$VR_{m_r} \leq VR_{r,t} \leq VR_{cap_r} \quad (33)$$

A sustentabilidade hídrica do sistema pode ser garantida fazendo-se com que o volume de água do reservatório no último mês de estudo seja igual ou superior ao volume inicial estabelecido para o mesmo.

Processo iterativo de otimização e análise de convergência

A programação linear é executada iterativamente, e os trechos segmentados do volume do reservatório ($V_{r,m,t}$) são ajustados em cada iteração, a fim de se obter o valor correto do volume armazenado.

Já na primeira iteração os valores de cada trecho segmentado podem estar corretos (SANTOS et al., 2011), o que significa o atingimento da solução ótima. Quando, porém, isto não ocorre lança-se mão da análise do erro relativo, dado matematicamente por:

$$erro_{fo} = \left| \frac{fo_l - fo_{l-1}}{fo_l} \right| \leq tol \quad (34)$$

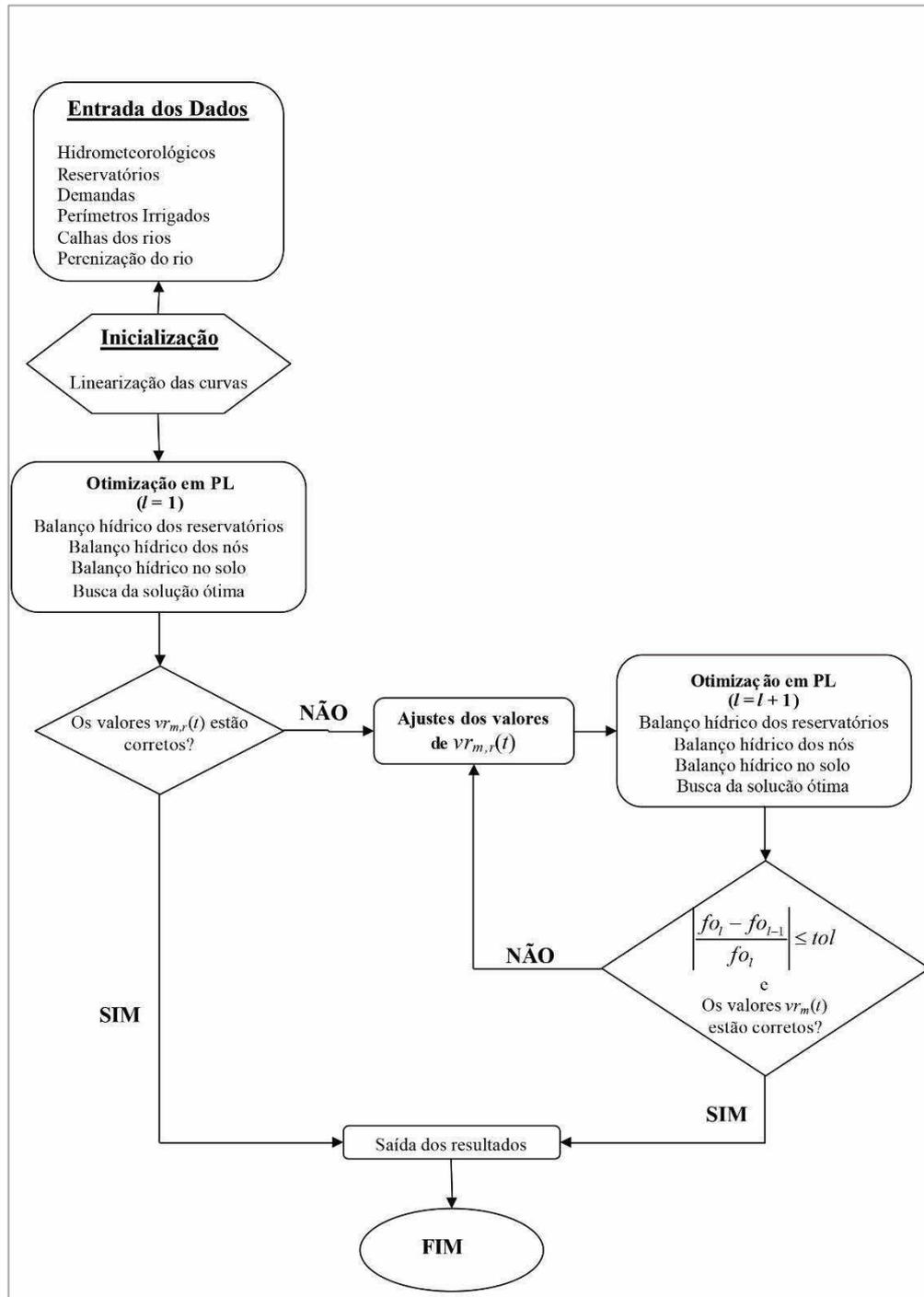
Onde:

“l” - número de vezes em que está sendo aplicado o processo de otimização;

“fo_l” – valor da função objetivo para a *l*-ésima otimização.

O erro relativo, neste caso, deve respeitar um nível de tolerância (tol) prévia e convenientemente estabelecido. A Figura 16 ilustra todo o procedimento de modelagem e obtenção dos resultados. Toda essa descrição é o mecanismo com o qual o modelo de otimização multiobjetivo de Santos et al., (2011), em todas as suas possibilidades analíticas, realiza os processos de otimização e análise de convergência. Nesta pesquisa, porém, foi utilizada apenas parte dos recursos da citada ferramenta que se alinhavam mais diretamente ao objetivo geral proposto, conforme mencionado anteriormente.

Figura 16. Fluxograma do modelo de otimização.



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

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

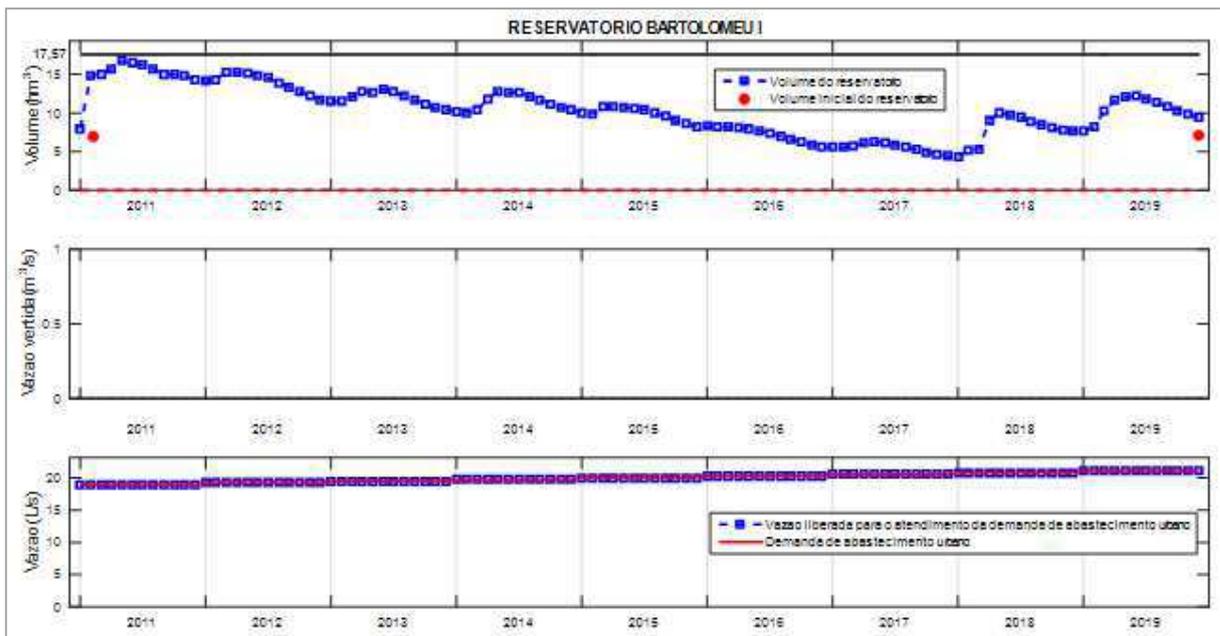
6.1 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Conforme expresso anteriormente, os reservatórios estratégicos não receptores diretos das águas do PISF (a saber: Bartolomeu I, Capivara, Engenheiro Arcoverde, Riacho dos Cavalos e Carneiros) foram objeto de um processo de simulação, a fim de avaliar o perfil hídrico de seu comportamento nos últimos anos. O período considerado para a simulação foi de 9 anos, compreendendo os anos de 2011 a 2019.

Além disso, para alguns deles, haja vista a sua alta vulnerabilidade, baixa confiabilidade e baixa resiliência, que será mostrado a seguir, as demandas de abastecimento urbano e irrigação serão supridas pela água a ser retirada diretamente da calha do Rio Piranhas.

A Figura 17 apresenta o volume de água, vazões de vertimento e o atendimento da demanda de abastecimento urbano do reservatório Bartolomeu I de 2011 a 2019.

Figura 17. Volumes de água, vazões de vertimento e demandas de abastecimento urbano do reservatório Bartolomeu I de 2011 a 2019.



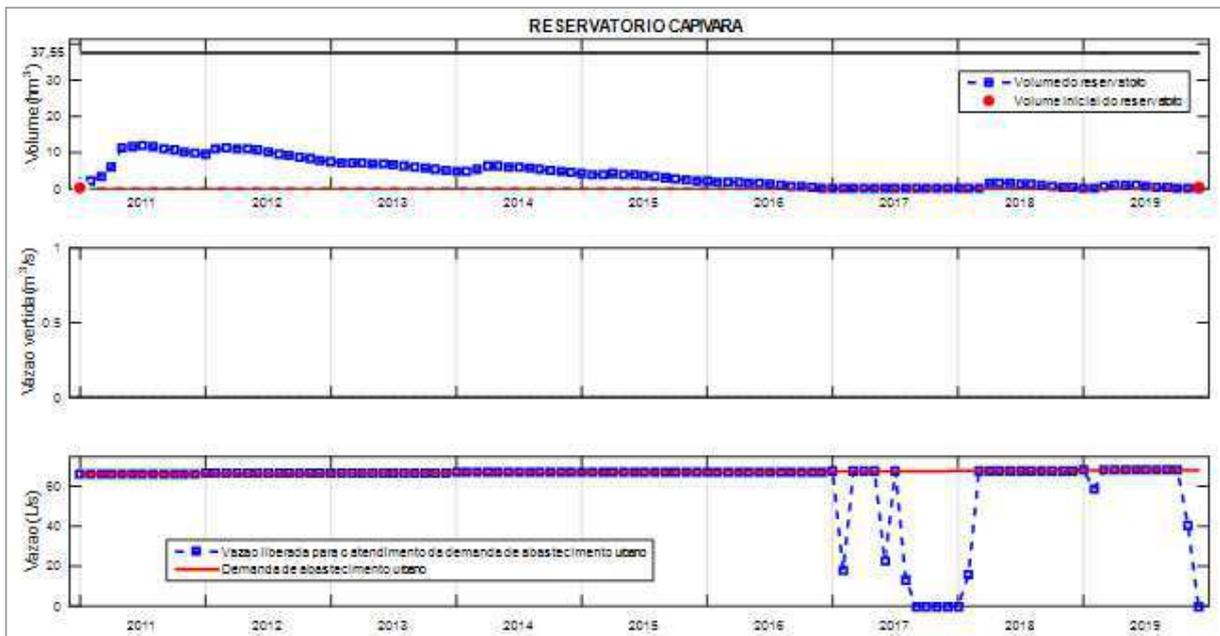
Observa-se que não houve vertimento no reservatório para o período analisado, embora o mesmo tenha chegado bem próximo da sua capacidade máxima durante a quadra chuvosa (fevereiro a maio) do ano de 2011. Em seguida, devido às recargas insignificantes de

2012 a 2017 (período de seca na região), a tendência global foi de esvaziamento interanual, que perdurou até o início da quadra chuvosa do ano de 2018, quando o reservatório atingiu o menor volume armazenado observado, em torno dos 5 hm³ (28% de sua capacidade máxima). De 2018 até o fim de 2019, houve uma discreta tendência de crescimento na acumulação interanual.

No que concerne ao atendimento das demandas de abastecimento urbano, pode-se verificar, ainda pela Figura 17, que não ocorreu nenhum evento de falha no referido atendimento ao longo do período considerado.

A Figura 18 apresenta o volume de água, vazões de vertimento e o atendimento da demanda de abastecimento urbano do reservatório Capivara de 2011 a 2019.

Figura 18. Volumes de água, vazões de vertimento e demandas de abastecimento urbano do reservatório Capivara de 2011 a 2019.



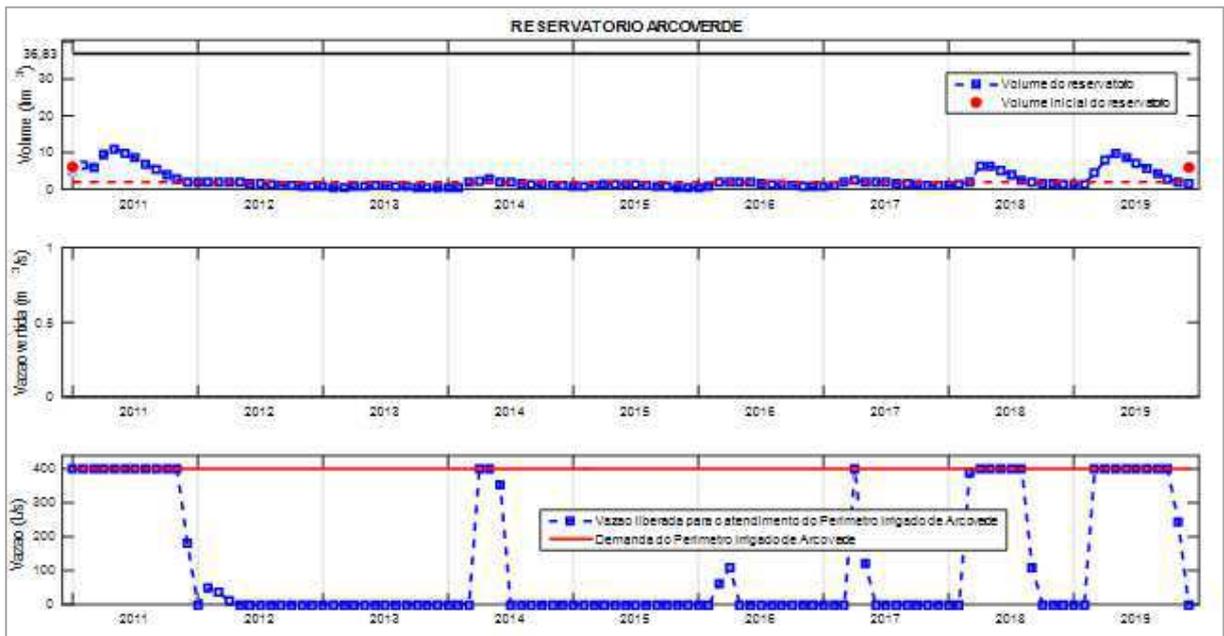
Do ponto de vista hídrico, o reservatório Capivara passou por uma situação desconfortável durante o período considerado para a simulação. Apenas durante a quadra chuvosa (fevereiro a maio) de 2011 o reservatório conseguiu obter o maior volume de água de toda a série – em torno dos 12 hm³ (32% de sua capacidade máxima). Conseqüentemente, vê-se que não houve nenhum evento de vertimento. Com recargas insignificantes, devido à seca na região, o volume de água manteve uma tendência de esvaziamento interanual, culminando

no seu completo esvaziamento no fim do ano de 2016, o que perdurou ao longo de todo o ano de 2017 e o início de 2018, quando houve uma pequena recarga, para, em seguida, voltar à situação de esvaziamento total nos meses restantes de 2018. Em 2019, novamente, houve um discreto sinal de recuperação, em função da recarga muito pequena que houve ao longo da quadra chuvosa do referido ano. Contudo, logo após o ciclo chuvoso, o reservatório voltou à situação caótica de esvaziamento total, onde permaneceu até o fim do período analisado.

Além disso, observaram-se falhas no atendimento da demanda de abastecimento urbano durante o ano de 2017, quando o reservatório entrou em colapso. Em 2018 e 2019, porém, com as mencionadas recargas havidas, apesar de pequenas, o reservatório voltou a atender, na maioria dos meses, as demandas de abastecimento urbano.

A Figura 19 apresenta o volume de água, vazões de vertimento e o atendimento da demanda do Perímetro Irrigado associado ao reservatório Engenheiro Arcoverde de 2011 a 2019.

Figura 19. Volumes de água, vazões de vertimento e demandas de irrigação para o reservatório Engenheiro Arcoverde de 2011 a 2019.



Assim como o reservatório Capivara, o volume de água do reservatório Engenheiro Arcoverde também atingiu o volume morto, não tendo conseguido chegar sequer à metade de sua capacidade máxima nesse tempo, não havendo, portanto, nenhum evento de vertimento. O maior volume armazenado no período foi de 15 hm³ (41%) no meio da quadra chuvosa de

2011, de onde praticamente só decresceu até o último trimestre de 2012, quando atingiu o volume morto. O cenário de escassez se manteve durante todo o ano de 2013, apesar de um pequeno sinal de recarga, cuja magnitude não foi capaz de retirá-lo sequer da zona morta (1,96 hm³). Em 2014, houve uma recarga um pouco maior do que aquela havida no ano anterior, mas logo o acumulado voltou à faixa do volume morto, onde permaneceu até o início de 2018, tendo experimentado pela primeira vez desde 2011 uma recarga considerável (que elevou o volume a 8 hm³). Apesar disto, ao fim de 2018, o reservatório voltou à marca do volume morto, tendo se recuperado à faixa dos 15 hm³ na quadra chuvosa de 2019. Este último foi um ano que terminou com o volume do açude na casa dos 8 hm³. Pela primeira vez, portanto, desde 2012, concluíra-se um ciclo anual fora da zona de armazenamento morta.

No que diz respeito ao atendimento da demanda hídrica do Perímetro Irrigado de Arcoverde, observa-se que em todos os anos houve eventos de falha, sendo que não houve nenhuma liberação de água para o atendimento da demanda nos anos de 2013 e 2015. Somente nos anos de 2011, 2018 e 2019 a demanda foi atendida em mais de 3 meses consecutivos.

Como foi dito anteriormente, as demandas de abastecimento urbano e irrigação associadas a este reservatório terão como fonte hídrica direta a vazão fluente pelo rio Piranhas, ou seja, as vazões requeridas para atendimento dos mencionados fins não virão de Riacho dos Cavalos, motivo pelo qual se analisaram apenas informações de volume acumulado e episódios de vertimento.

O reservatório Riacho dos Cavalos, como se vê na Figura 20, não apresentou nenhum evento de vertimento ao longo do período de simulação (2011 a 2019).

Figura 20. Volumes de água e vazões de vertimento para o reservatório Riacho dos Cavalos de 2011 a 2019.

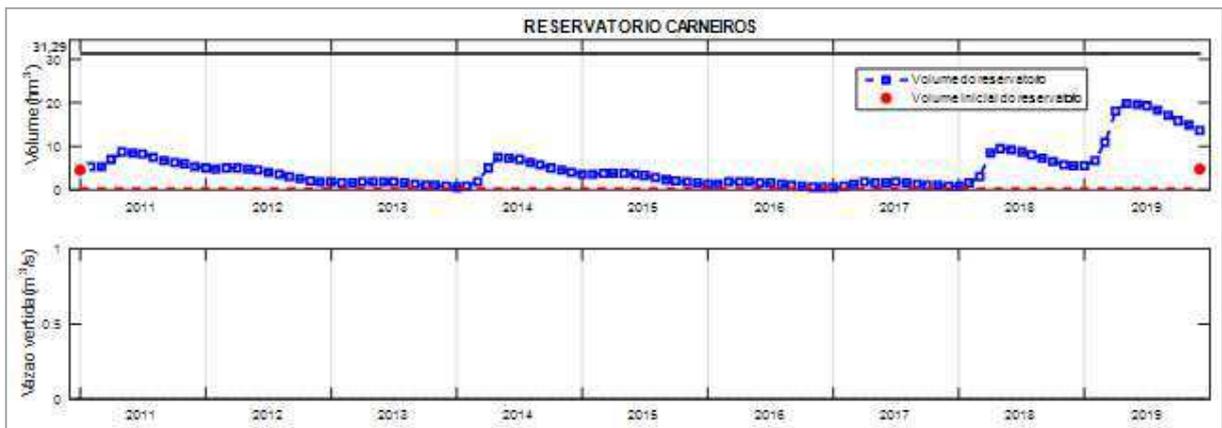


Em 2011, a quantidade de água armazenada chegou a atingir pouco mais da metade de sua capacidade e, desde então, a tendência global foi de queda até janeiro de 2014, quando o reservatório voltou a experimentar uma recarga significativa, que elevou o volume acumulado de novo acima dos 50%, em maio daquele ano. Novamente, viu-se um declínio gradual no volume acumulado, de 2014 até dezembro de 2016, quando o manancial entrou em colapso total, pela entrada na zona de volume morto (0,91 hm³). Essa situação de completa escassez permaneceu por todo o ano de 2017 e só melhorou a partir de março de 2018, com as recargas havidas, as quais elevaram o volume de Riacho dos Cavalos à marca dos 7,5 hm³ (42%). Ao fim de 2018, não obstante a tendência de baixa, o acumulado não atingiu o valor crítico da zona morta. No ano de 2019, o referido reservatório apresentou praticamente o mesmo padrão de acumulação ocorrido em 2018: recarga significativa na quadra chuvosa (fevereiro a maio) e o volume voltando a decrescer nos meses subsequentes até próximo dos 2,5 hm³.

Assim como no açude Riacho dos Cavalos, as demandas de abastecimento urbano e irrigação associadas ao reservatório Carneiros terão como fonte hídrica a própria vazão do Rio Piranhas, isto é, as vazões requeridas para atendimento dos citados fins não virão diretamente do reservatório Carneiros, motivo por que foram analisadas apenas informações de volume acumulado e episódios de vertimento.

A situação do reservatório Carneiros, como mostra a Figura 21, é semelhante à de Capivara e Engenheiro Arcoverde, ou seja, de intensa escassez hídrica. Isto não apenas porque o referido açude não apresentou qualquer episódio de vertimento, mas também pela quantidade de vezes em que seu volume armazenado esteve bem próximo à zona de acumulação morta (quando não esteve inserido nela), como se vê nos anos de 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017.

Figura 21. Volumes de água e vazões de vertimento para o reservatório Carneiros de 2011 a 2019.



Em 2011 e 2014 houve recargas consideráveis, as quais elevaram o acumulado do reservatório à faixa dos 10 hm³ (32%), sendo seguidas de períodos de acentuado declínio. Em 2018, após 24 meses de situação crítica, o reservatório volta a experimentar a faixa dos 10 hm³ (32%) e consegue entregar para o ano seguinte, 2019, uma condição um pouco mais confortável do que a que recebeu de 2017. Ainda em 2019, o manancial teve a melhor situação de toda a série simulada, ao longo da quadra chuvosa (fevereiro a maio), graças a uma significativa recarga hídrica, a qual elevou o acumulado a mais da metade de sua capacidade total (65%). Observa-se ainda, claramente, que entre 2018 e 2019 se formou uma tendência de alta interanual, com volumes armazenados cada vez maiores.

6.2 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

6.2.1 – CENÁRIO C1

Neste cenário, a otimização se deu com base na indicação contida no Plano de Recursos Hídricos da bacia do Rio Piancó – Piranhas – Açu, em que 2,7 m³/s de vazão exógena serão distribuídos entre as UPH's Peixe e Alto Piranhas, sendo que cada uma deverá receber 1,0 m³/s e 1,7 m³/s, respectivamente. Este será, portanto, o cenário-base.

A Figura 22 e a Figura 23 mostram que, ao longo de todo o período considerado na pesquisa, não houve falhas no atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano no cenário C1.

Figura 22. Atendimento das demandas de abastecimento urbano dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C1.

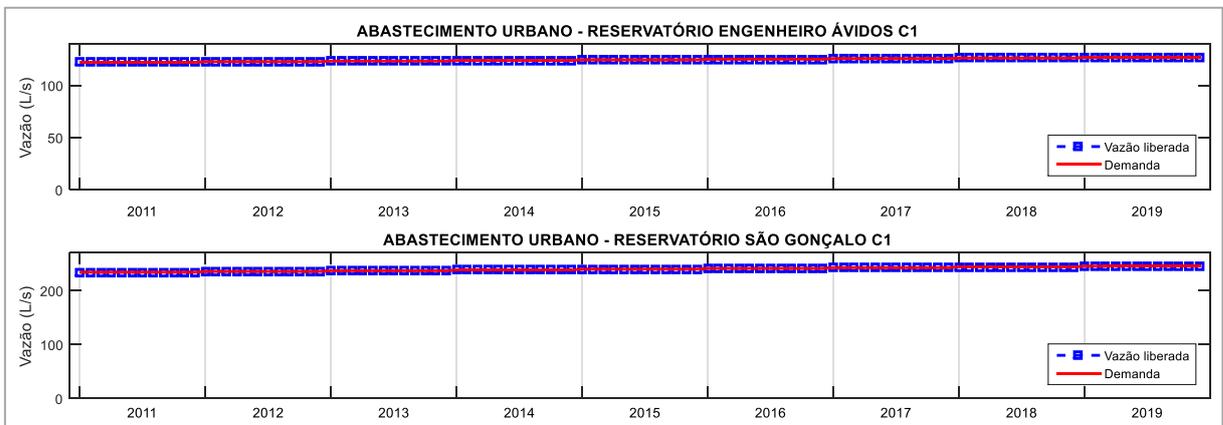
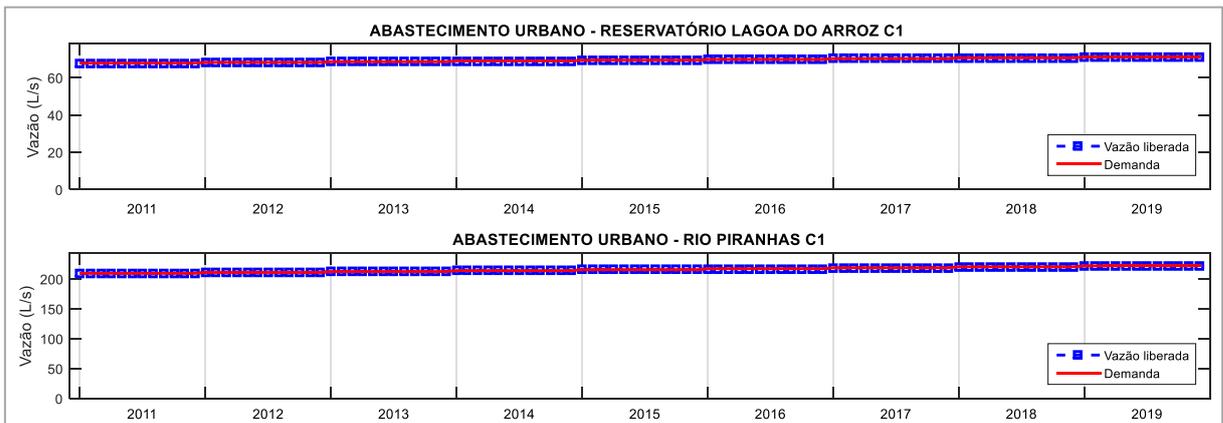


Figura 23. Atendimento das demandas de abastecimento urbano do reservatório Lagoa do Arroz e do rio Piranhas no Cenário C1.



A Figura 24 e a Figura 25 mostram que, ao longo de todo o período considerado na pesquisa, não houve falhas no atendimento das demandas de irrigação estabelecidas para as áreas difusas 1, 2, 3, 4 e 5 no cenário C1.

Figura 24. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C1.

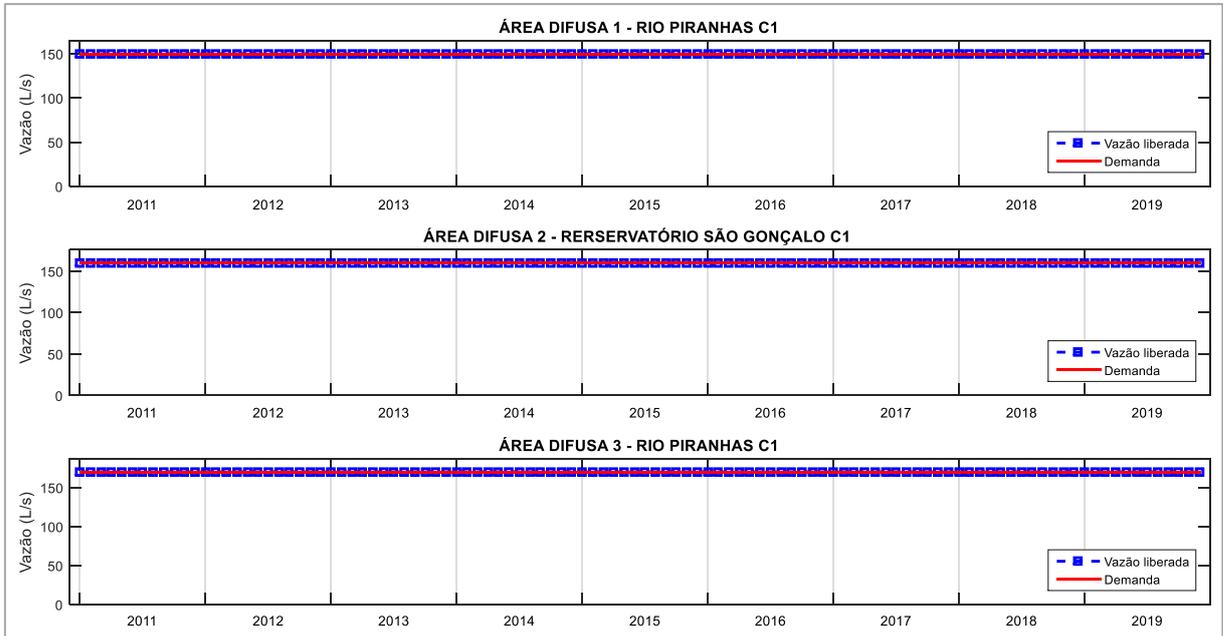
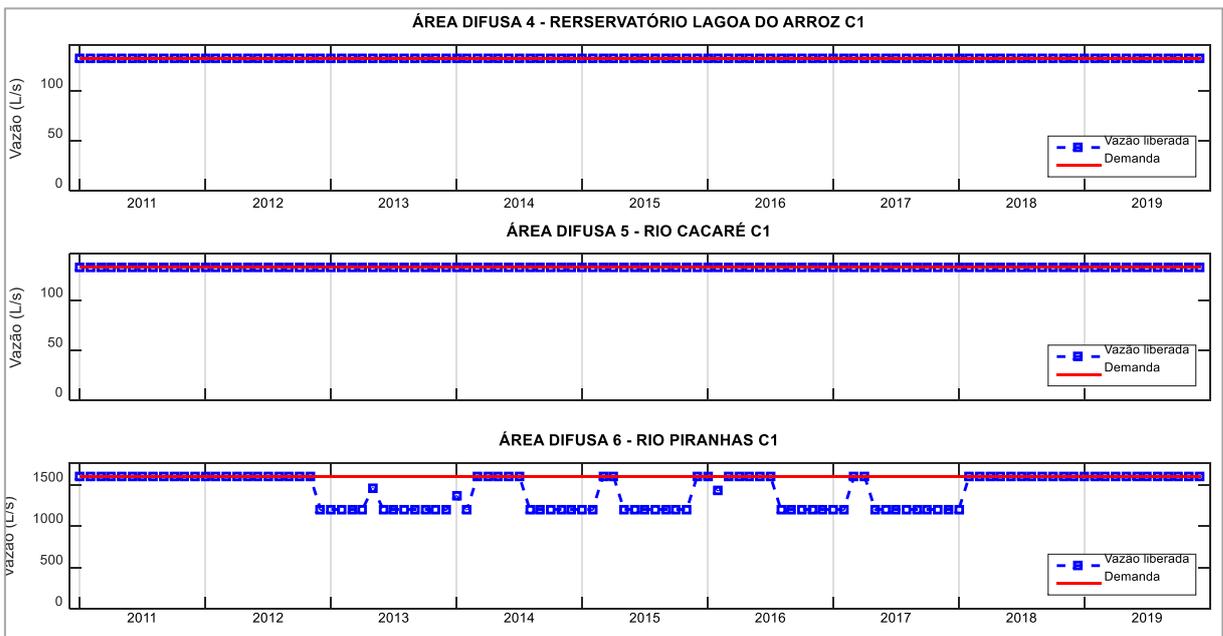


Figura 25. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C1.



Quanto ao atendimento da demanda da área difusa 6 (Figura 25), situada na Região do Médio Piranhas Paraibano, a qual representa a soma das demandas hídricas de irrigação ao longo do rio Piranhas da confluência com rio Piancó até a divisa com o estado do Rio Grande do Norte, observaram-se falhas no atendimento nos anos de 2012 a 2018 (período no qual houve seca na região). Assim, mesmo com a vazão exógena do PISF, não será possível contemplar tal demanda (1.600 L/s).

A Figura 26 apresenta o atendimento das demandas de irrigação estabelecidas para os perímetros irrigados no cenário C1.

Figura 26. Atendimento das demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C1.



Tem-se que no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, sua demanda hídrica só não foi atendida durante o mês de janeiro de 2018. Ainda na mesma figura, pode-se observar que o Perímetro Irrigado Várzea da Ema foi plenamente atendido ao longo de todo o período analisado.

A Tabela 11 apresenta os índices de desempenho do atendimento das demandas do sistema, tais como confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade, déficit máximo (máxima vulnerabilidade) e sustentabilidade.

Tabela 11. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário 1.

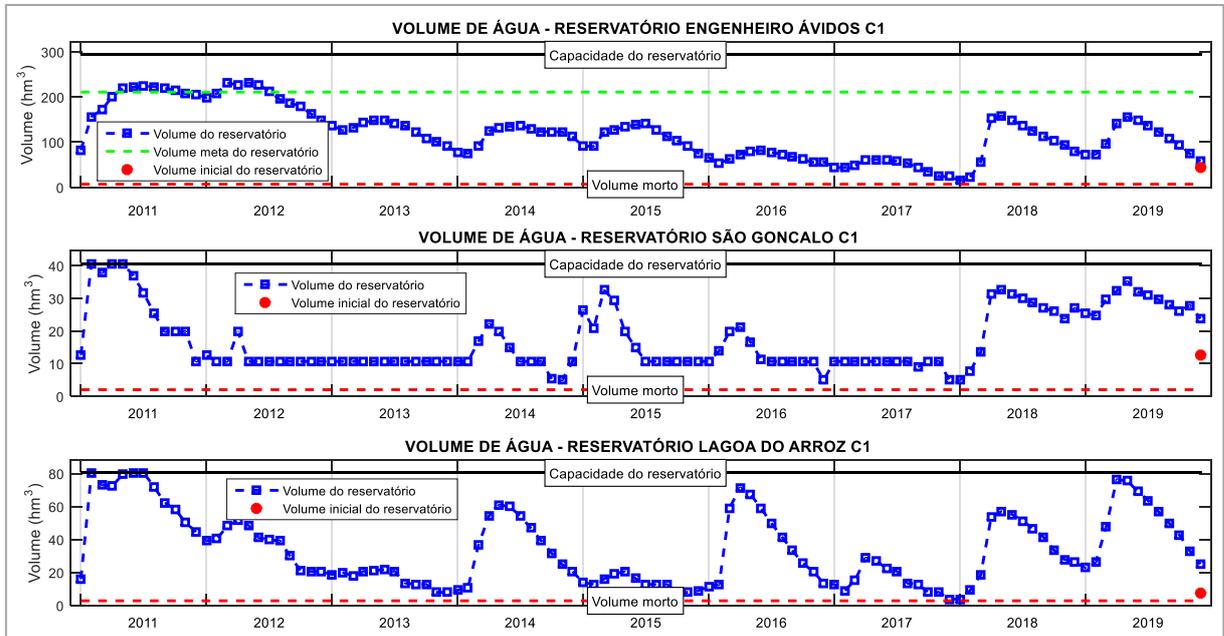
ELEMENTOS DO SISTEMA	ÍNDICES DE HASHIMOTO				
	CONF.	RES.	VUL.	DEF. MÁX	SUST.
Abast. Engenheiro Ávidos	1	-	-	-	1
Abast. São Gonçalo	1	-	-	-	1
Abast. Lagoa do Arroz	1	-	-	-	1
Abast. Rio Piranhas	1	-	-	-	1
P. Irr. São Gonçalo	0,99	1,00	0,07	0,07	0,92
P. Irr. Várzea da Ema	1	-	-	-	1
Área difusa 1	1	-	-	-	1
Área difusa 2	1	-	-	-	1
Área difusa 3	1	-	-	-	1
Área difusa 4	1	-	-	-	1
Área difusa 5	1	-	-	-	1
Área difusa 6	0,57	0,13	0,24	0,25	0,06

Como observado na Figura 22 e na Figura 26 só ocorreram falhas no atendimento das demandas de irrigação do Perímetro Irrigado de São Gonçalo e na Área difusa 6. Os índices de desempenho propostos por Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982) mostram que a magnitude média das falhas (vulnerabilidade) da demanda do Perímetro Irrigado de São Gonçalo foi de 7% do seu valor (98 L/s), fato ocorrido apenas no mês de janeiro de 2018. Quanto à Área difusa 6, a magnitude média das falhas foi de aproximadamente 24% (400 L/s), ocorrendo em média por cerca de 8 meses consecutivos. Tais falhas podem ser diminuídas com o aumento da vazão proveniente do rio Piancó (neste estudo foi considerado apenas a vazão de 600 L/s como preconizado pela Resolução conjunta ANA/IGARN/AESA Nº 65/2019).

A Figura 27 apresenta o volume de água dos reservatórios ao longo do período de estudo no Cenário C1. Nela, observa-se que o volume de água do reservatório Engenheiro Ávidos não atingiu sua capacidade máxima em nenhum momento no período analisado. Apenas em 2011 e 2012 o volume de água foi próximo ao volume meta estabelecido ao reservatório. A partir de 2012 o volume de água decresceu até atingir o volume morto em

2017. Em 2018 e 2019 por causa das boas chuvas ocorridas na região houve uma significativa melhora no volume de água do reservatório, porém permanecendo abaixo do volume meta.

Figura 27. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C1.



Com relação ao reservatório São Gonçalo, observa-se que o volume de água atingiu a capacidade de armazenamento do reservatório apenas no ano de 2011. De 2012 a 2017, praticamente o volume de água esteve abaixo da metade da capacidade de armazenamento do reservatório, com exceção do ano de 2015 no qual o volume de água chegou a 80% da capacidade de armazenamento. No fim de 2017, o volume de água chegou próximo ao volume morto do reservatório, sendo que em 2018 e 2019 houve uma melhora significativa no volume de água, chegando novamente a 80% da capacidade de armazenamento.

O reservatório Lagoa do Arroz, também atingiu sua capacidade de armazenamento no ano de 2011. Tem-se que o volume de água do reservatório apresentou oscilações ao longo do período estudado, porém em dezembro de 2017 o volume de água atingiu o volume morto, atingindo, posteriormente, 98% de sua capacidade máxima em maio de 2019.

Os volumes médios mensais evaporados diretamente dos reservatórios encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C1.

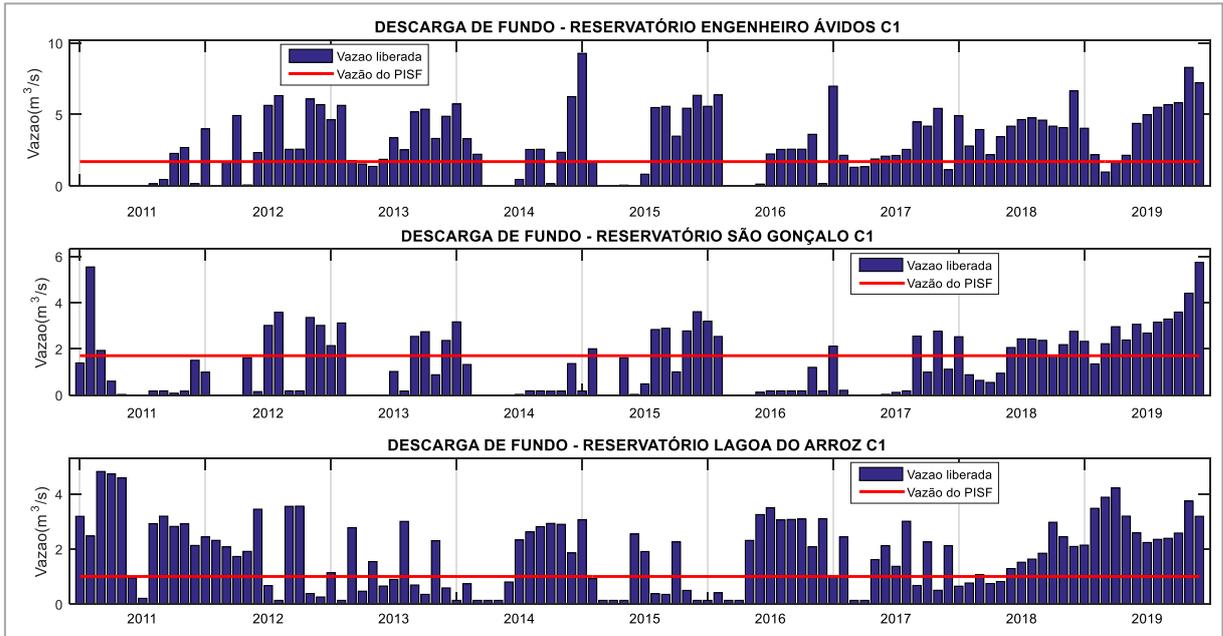
EVAPORAÇÃO MÉDIA (hm ³)	RESERVATÓRIOS		
	ENGENHEIRO ÁVIDOS	SÃO GONÇALO	LAGOA DO ARROZ
JAN	2,21	0,45	0,66
FEV	1,56	0,36	0,54
MAR	1,44	0,36	0,62
ABR	1,67	0,42	0,85
MAI	2,32	0,55	1,23
JUN	2,65	0,55	1,38
JUL	3,32	0,62	1,66
AGO	3,89	0,71	1,83
SET	4,01	0,72	1,76
OUT	3,94	0,73	1,59
NOV	3,40	0,67	1,22
DEZ	3,02	0,60	1,01
TOTAL	33,43	6,73	14,37

Pode-se ver pela Tabela 12 que o reservatório Engenheiro Ávidos, por ser o maior em capacidade de acumulação, apresenta os maiores volumes médios evaporados. Vê-se ainda que o reservatório São Gonçalo, sendo o menor em capacidade, também apresenta os menores valores em termos de evaporação.

Observa-se também, pela Tabela 12, que os maiores valores evaporados ocorreram entre os meses de agosto e dezembro, quando efetivamente se encerra a época chuvosa, com a consequente redução da nebulosidade (FRANCISCO; SANTOS, 2017; NUNES, 2015), o que favorece a maior exposição à energia solar – um dos principais promotores do fenômeno evaporativo. Por outro lado, percebe-se que os meses correspondentes à quadra chuvosa (de fevereiro a maio) (LUCENA, 2018), devido à constante presença de nuvens e à consequente diminuição da exposição à radiação do sol, registraram os menores volumes evaporados.

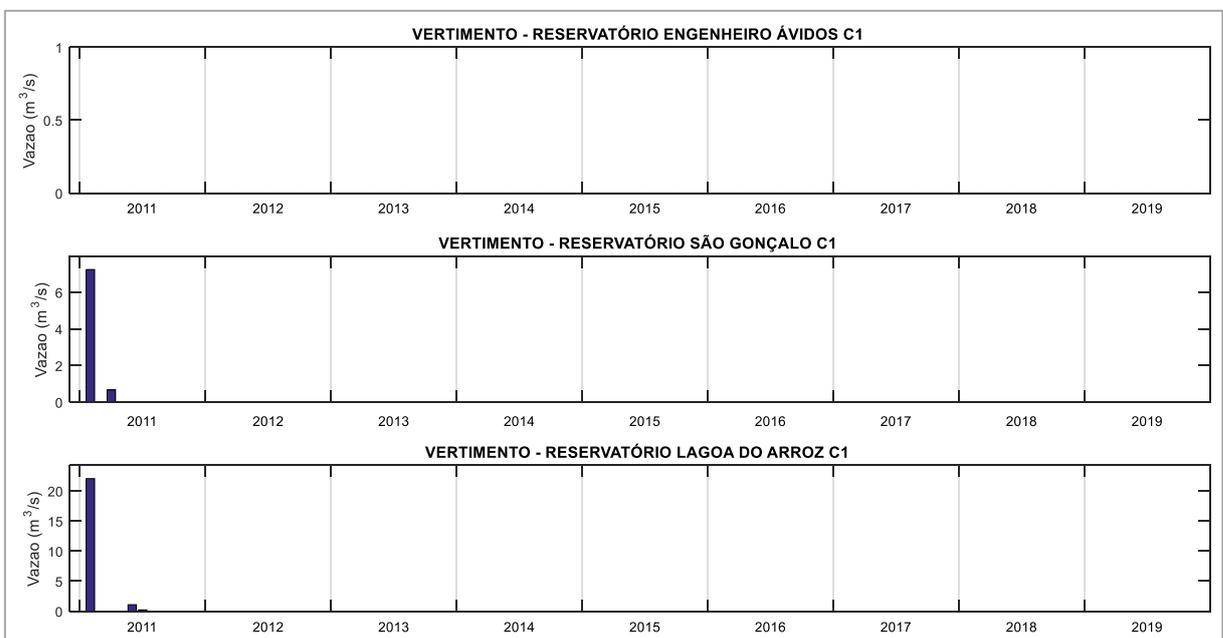
A Figura 28 apresenta as vazões liberadas por descarga de fundo pelos reservatórios do sistema no Cenário C1. Observa-se que as maiores liberações ocorreram no segundo semestre, sendo que em alguns meses não houve liberação devido ao atendimento das demandas a jusante dos reservatórios pelas boas afluências ao sistema fazendo que uma quantidade maior de água ficasse armazenada nos reservatórios, tendo sido liberadas posteriormente quando necessário.

Figura 28. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C1.



Pela Figura 29, pode-se observar que apenas os reservatórios São Gonçalo e Lagoa do Arroz apresentaram vertimentos. Tais eventos só ocorreram no ano de 2011, lembrando que de 2012 a 2017 a região sofreu com uma das piores secas dos últimos 50 anos.

Figura 29. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C1.



A Tabela 13 apresenta os índices de eficiência correspondentes aos reservatórios do sistema no Cenário C1.

Tabela 13. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C1.

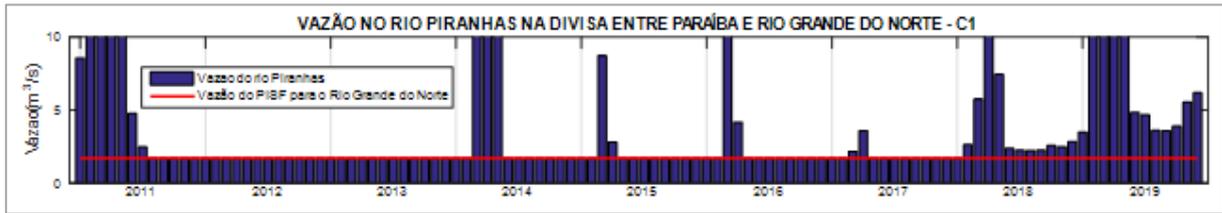
RESERVATÓRIOS	ÍNDICES DE EFICIÊNCIA				
	η_{Vr}	η_E	η_P	η_V	η_u
ENGENHEIRO ÁVIDOS	0,01	0,26	0,09	0,00	0,73
SÃO GONÇALO	0,01	0,06	0,03	0,02	0,90
LAGOA DO ARROZ	0,02	0,16	0,07	0,07	0,74

Observa-se que houve um pequeno ganho no volume de água dos reservatórios ($\eta_{Vr} > 0$). Isto aponta para o fortalecimento da sustentabilidade hídrica dos reservatórios, significando que a maior parte da água utilizada foi gerada dentro do próprio sistema, através das precipitações ali ocorridas e do consequente escoamento superficial derivado.

Com relação ao índice η_E , tem-se que 26% de toda vazão afluyente ao reservatório Engenheiro Ávidos foi perdida por evaporação direta do reservatório. Isto se deve ao fato que o reservatório tem uma grande área de espelho d'água, como também a maior capacidade de armazenamento. As perdas evaporativas dos reservatórios São Gonçalo e Lagoa do Arroz ficaram em torno de 6% e 16%, respectivamente, da vazão total afluyente aos reservatórios, indicando também uma maior eficiência na utilização das águas do reservatório São Gonçalo, que utilizou antes toda a água potencialmente evaporável.

Com relação ao índice η_u , tem-se que o índice é maior que 70%, o que indica que houve pouco desperdício de água nos reservatórios, com destaque para o reservatório São Gonçalo no qual o índice foi de 90%, ou seja, de toda vazão afluyente ao reservatório 90% dessa vazão foi utilizada para o atendimento das demandas do reservatório e a jusante dele.

A Figura 30 apresenta a vazão no rio Piranhas na divisa entre Paraíba e Rio Grande do Norte. Percebe-se que, na maioria dos meses, a vazão foi de 1,7 m³/s, como preconizada pelo Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu. Entretanto, em alguns meses a vazão foi maior que 1,7 m³/s (com destaque para o 1º semestre de 2011 e para os anos de 2018 e 2019 cuja vazão foi maior em todos os meses) devido a boas precipitações ocorridas na região nesses meses.

Figura 30. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C1.

Na Tabela 14, pode-se ver um resumo quantitativo dos volumes médios perdidos anualmente em decorrência do fenômeno evaporativo nos mananciais e no leito dos rios do sistema hídrico considerado na pesquisa. Percebe-se que em 2011 houve a maior perda média nos reservatórios (cerca de 82 hm³), sendo que em 2017 ocorreu a mínima, de 29 hm³. Vê-se ainda que em 2019 ocorreu a maior perda média por evaporação no leito dos rios (cerca de 25 hm³), e a média mínima foi de 10 hm³ no ano de 2016.

Tabela 14. Volume anual das perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C1.

ANOS	PERDAS HÍDRICAS (hm ³)	
	RESERVATÓRIOS	LEITO DOS RIOS
2011	82,07	15,28
2012	69,70	13,86
2013	48,68	13,75
2014	54,62	11,16
2015	46,34	14,40
2016	43,60	10,25
2017	28,93	12,08
2018	54,52	19,16
2019	62,23	24,69
MÉDIA	54,52	14,96

Em média, anualmente, o volume perdido por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios foi de 69,5 hm³, o que corresponde quase à totalidade das capacidades máximas dos reservatórios São Gonçalo e Carneiros (40,58 hm³ + 31,29 hm³ = 71,9 hm³).

A Tabela 15 mostra os índices de eficiência do sistema.

Tabela 15. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C1.

ÍNDICES DO SISTEMA			
IAP	IUD	IUP	η_{Perdas}
0,54	0,90	0,49	0,46

O Índice de Utilização da Potencialidade (IAP) demonstra que o sistema ainda seria capaz de expandir sua disponibilidade em 46%, em face de todas as potenciais afluências hídricas à área de estudo.

Quanto ao Índice de Utilização da Disponibilidade (IUD), vê-se que já se utiliza 90% dos recursos hídricos atualmente disponíveis, indicando que o sistema se encontra próximo da saturação em termos de alocação de demandas.

O Índice de Utilização da Potencialidade (IUP), por sua vez, indica que se utiliza menos da metade (49%) do potencial hídrico do sistema, o que resta praticamente alinhado com o IAP, o qual é a tendência do primeiro quando o IUD tende à unidade.

O índice global de perdas apresenta-se em 46%, indicando que daquilo que não é consumido pelos diversos elementos demandantes quase metade é perdida por evaporação.

6.2.2 – CENÁRIO C2

Neste cenário, considerou-se que toda a vazão exógena do PISF (2,7 m³/s) entrará pela Unidade de Planejamento Hidrológico (UPH) Alto Piranhas (vide Figura 12), através do ramal de entrega a montante do reservatório Engenheiro Ávidos.

Com base na Figura 31 e na Figura 32, pode-se ver que todas as demandas de abastecimento urbano no Cenário C2 foram plenamente atendidas em todo o tempo considerado para a pesquisa.

Figura 31. Atendimento das demandas de abastecimento urbano dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C2.

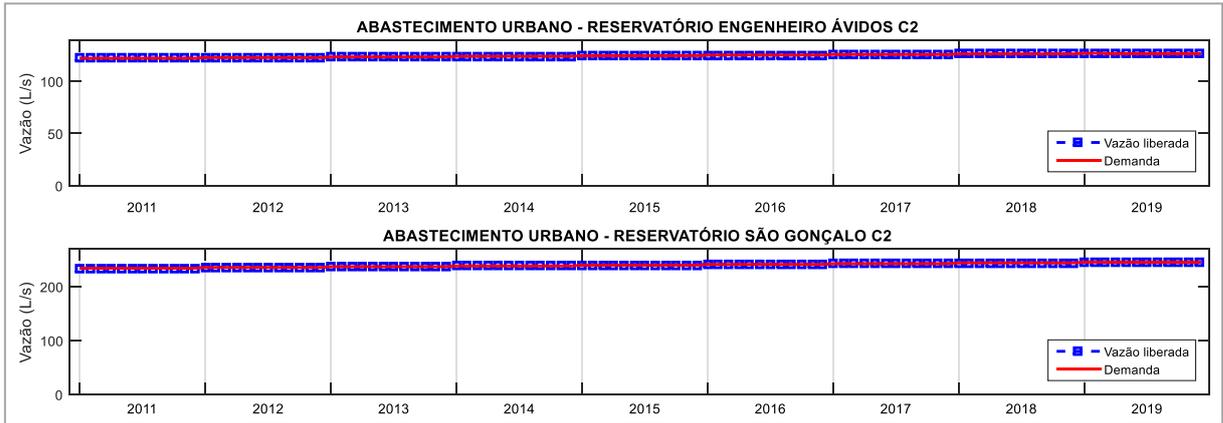
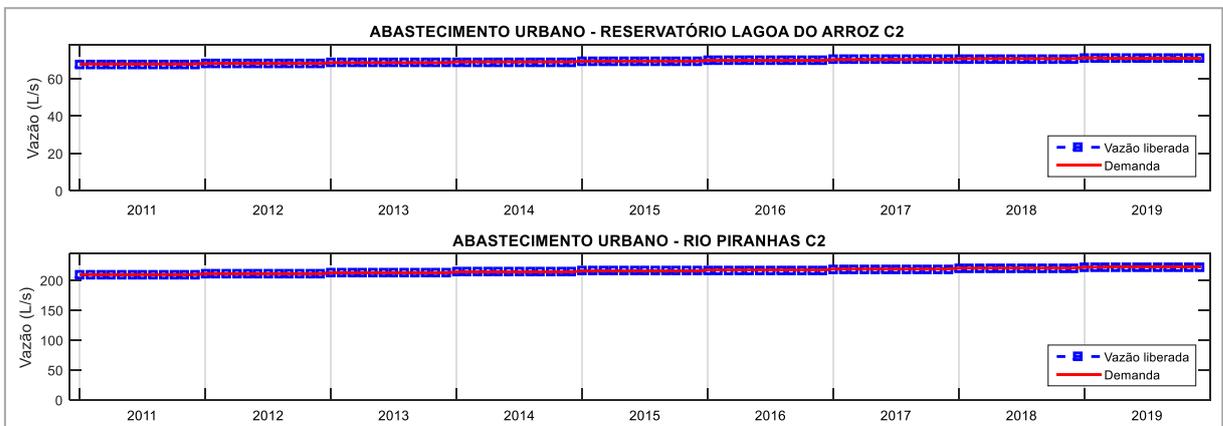
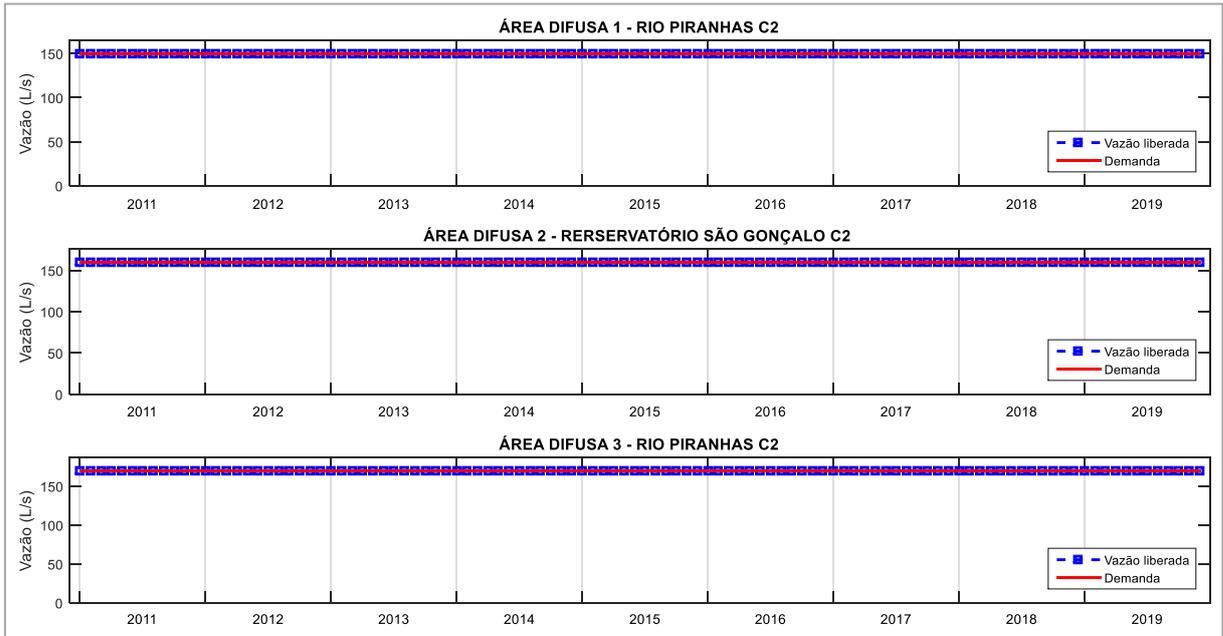
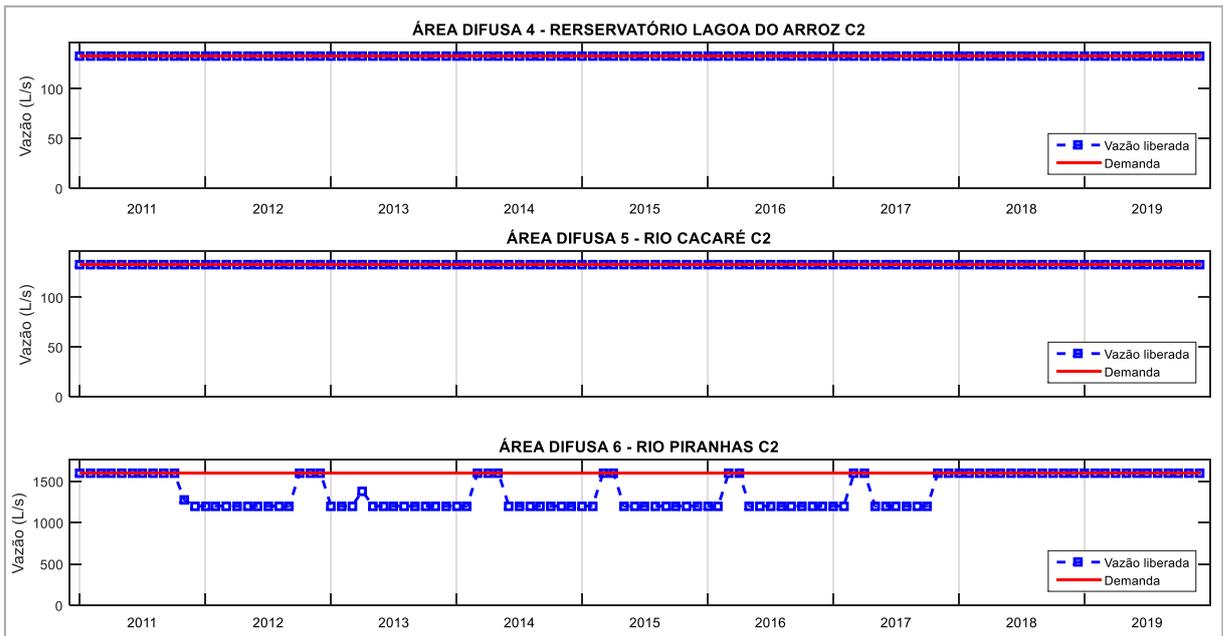


Figura 32. Atendimento das demandas de abastecimento urbano do reservatório Lagoa do Arroz e do rio Piranhas no Cenário C2.



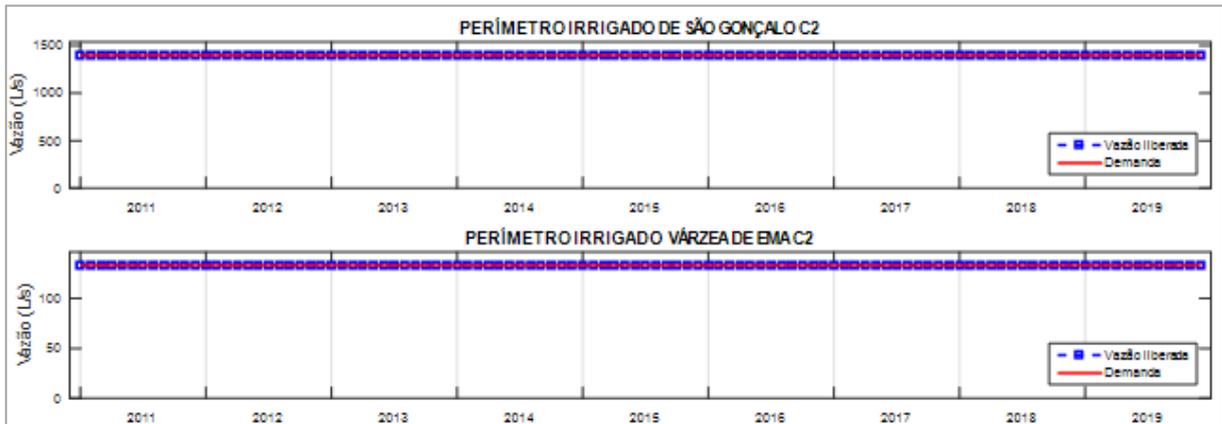
A Figura 33 e a Figura 34 mostram que as demandas hídricas de irrigação das áreas difusas 1, 2, 3, 4 e 5 foram completamente satisfeitas no Cenário C2.

Figura 33. Demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C2.**Figura 34.** Demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C2.

Contudo, ainda pela Figura 34, nota-se que a área difusa 6 apresentou novamente falhas no atendimento de sua demanda. Entretanto, as falhas iniciaram no ano de 2011, em comparação com a situação no Cenário C1.

A Figura 35 revela que a demanda dos perímetros irrigados de São Gonçalo e de Várzea da Ema foi plenamente atendida no Cenário C2.

Figura 35. Demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C2.



A Tabela 16 apresenta os índices de desempenho no atendimento das demandas do sistema, tais como confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade, déficit máximo (máxima vulnerabilidade) e sustentabilidade no Cenário C2.

Tabela 16. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário C2.

ELEMENTOS DO SISTEMA	ÍNDICES DE HASHIMOTO				
	CONF.	RES.	VUL.	DEF. MÁX	SUST.
Abast. Engenheiro Ávidos	1	-	-	-	1
Abast. São Gonçalo	1	-	-	-	1
Abast. Lagoa do Arroz	1	-	-	-	1
Abast. Rio Piranhas	1	-	-	-	1
P. Irr. São Gonçalo	1	-	-	-	1
P. Irr. Várzea da Ema	1	-	-	-	1
Área difusa 1	1	-	-	-	1
Área difusa 2	1	-	-	-	1
Área difusa 3	1	-	-	-	1
Área difusa 4	1	-	-	-	1
Área difusa 5	1	-	-	-	1
Área difusa 6	0,44	0,10	0,25	0,25	0,03

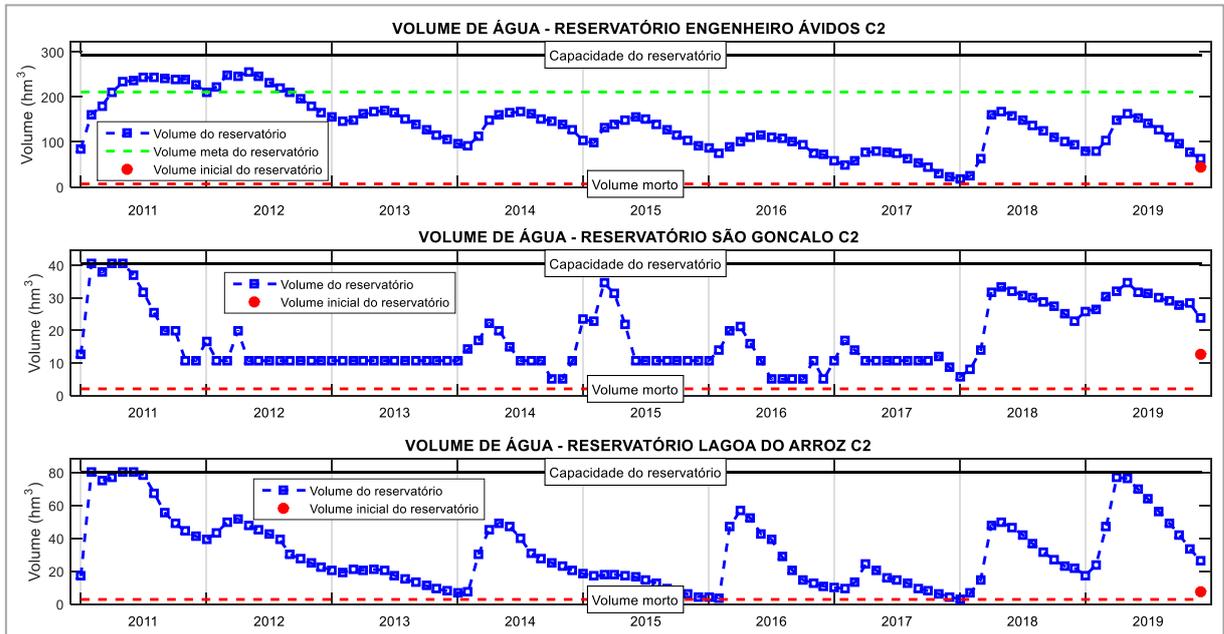
Observa-se, comparativamente ao Cenário C1, que praticamente todos os elementos mantiveram exatamente suas características, com exceção do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG) e da área difusa 6. O desempenho do PISG melhorou e atingiu o desejável, haja vista que não houve nenhum evento de falha neste Cenário C2, indicado pelo índice de confiabilidade que registrou 100% de atendimento da demanda.

Quanto à área difusa 6, viu-se, pela Figura 34, que o atendimento de sua demanda hídrica começou a falhar mais cedo e em maior número de vezes em relação ao Cenário C1, o que diminuiu o índice de confiabilidade. Observou-se também uma queda na resiliência, aumentando o tempo médio das falhas para 10 meses. Com relação à vulnerabilidade e o déficit máximo, não houve mudanças significativas em relação ao Cenário C1, ou seja, a magnitude das falhas ficou em torno de 400 L/s.

A Figura 36 apresenta o volume de água dos reservatórios ao longo do período de estudo no Cenário C2. Observa-se que o reservatório Engenheiro Ávidos, novamente, não atingiu a sua capacidade de armazenamento. Nos anos de 2011 e 2012, superou o volume meta e então, devido à grande seca por que passou todo o semiárido nordestino de 2012 a

2017, entrou numa tendência de diminuição do volume de água até chegar, ao fim de 2017, próximo ao volume morto. Nos anos de 2018 e 2019, devido ao retorno da normalidade das precipitações na região, houve importantes recargas que elevaram novamente o volume armazenado no açude.

Figura 36. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C2.



Quanto ao reservatório São Gonçalo, pode-se perceber pela Figura 36 que o mesmo atingiu sua capacidade máxima em 2011, mas se manteve numa tendência de baixa ao longo de todo o período que durou a última grande seca, com exceção para o ano de 2015, em que houve uma recarga significativa e pontual. A partir de 2018, com o retorno da normalidade climática, o mencionado reservatório voltou a registrar bons índices de acumulação.

O reservatório Lagoa do Arroz apresentou bons índices de acumulação no ano de 2011, quando atingiu a sua capacidade máxima. Contudo, a partir de 2012, com o início do longo período de estiagem, o açude entrou numa tendência de acumulação interanual cada vez menor, tendo chegado a colapsar completamente nos fins de 2015 e 2017, pelo atingimento da zona de volume morto. Em 2018 e 2019, houve recargas significativas em função do retorno à normalidade das precipitações na região.

A Tabela 17 contém os valores médios mensais evaporados diretamente dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz. Nela, percebe-se a

manutenção do mesmo padrão de comportamento observado no Cenário C1, com menores volumes evaporados na época chuvosa (quando, em geral, há uma maior cobertura de nuvens) (FRANCISCO; SANTOS, 2017) e maiores valores na época de cessação das chuvas, quando há maior exposição à energia solar, principal motor do fenômeno físico da evaporação.

Tabela 17. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C2.

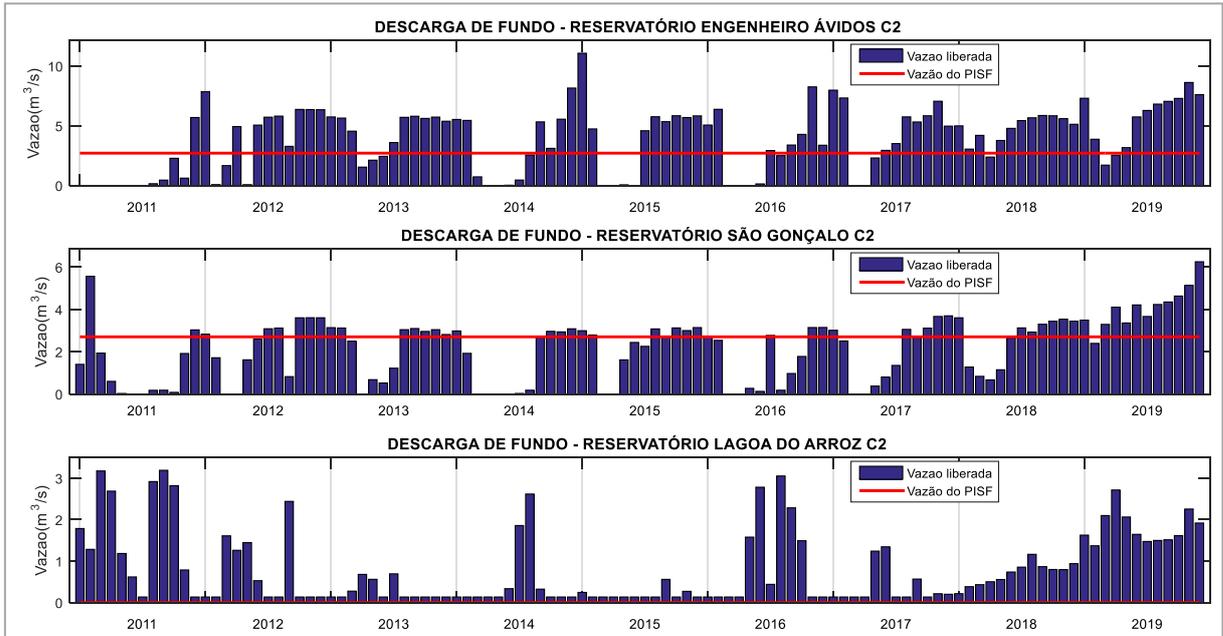
MESES	EVAPORAÇÃO MÉDIA (hm ³)		
	RESERVATÓRIOS		
	ENGENHEIRO ÁVIDOS	SÃO GONÇALO	LAGOA DO ARROZ
JAN	2,42	0,45	0,61
FEV	1,71	0,38	0,50
MAR	1,56	0,38	0,59
ABR	1,81	0,42	0,81
MAI	2,53	0,55	1,16
JUN	2,90	0,54	1,28
JUL	3,63	0,61	1,54
AGO	4,28	0,70	1,68
SET	4,43	0,72	1,56
OUT	4,35	0,72	1,40
NOV	3,73	0,64	1,12
DEZ	3,32	0,58	0,94
TOTAL	36,68	6,70	13,18

Os totais anuais evaporados de Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C2 foram, respectivamente, 36,68 hm³ (aumento de 9,7% em relação ao Cenário C1), 6,70 hm³ (variação negativa menor que 0,5% em relação ao Cenário C1) e 13,18 hm³ (diminuição de pouco mais de 8% quando comparado ao Cenário C1).

A Figura 37 apresenta os valores de vazão liberados para jusante através da descarga de fundo dos reservatórios no Cenário C2.

Observa-se nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo um aumento na frequência da vazão liberada por descarga de fundo dos reservatórios devido ao maior aporte (2,7 m³/s) da vazão do PISF na região. Em média, houve um aumento de 30% (reservatório Engenheiro Ávidos) e 60% (reservatório São Gonçalo) na vazão liberada em comparação ao Cenário C1. Com relação ao reservatório Lagoa do Arroz, como o reservatório não recebeu aporte da vazão do PISF, observou-se uma diminuição da vazão liberada da ordem de 56% (em média) quando comparado com o Cenário C1.

Figura 37. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C2.



Pela Figura 38, observa-se a mesma configuração em termos de vazões vertidas nos três reservatórios, com exceção de Lagoa do Arroz, onde os meses de maio e junho de 2011 neste Cenário C2 se apresentaram no lugar de junho e julho no Cenário C1, com pequena variação quantitativa.

Figura 38. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C2.



A Tabela 18 apresenta os índices de eficiência dos reservatórios para o Cenário C2.

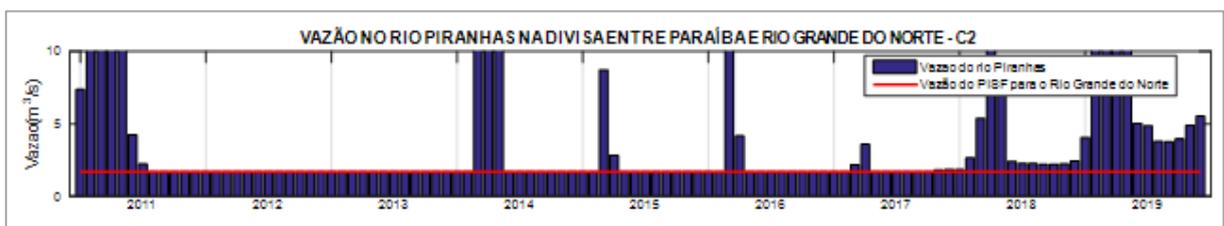
Tabela 18. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C2.

RESERVATÓRIOS	ÍNDICES DE EFICIÊNCIA				
	η_{Vr}	η_E	η_P	η_V	η_u
ENGENHEIRO ÁVIDOS	0,01	0,23	0,08	0,00	0,76
SÃO GONÇALO	0,01	0,05	0,02	0,02	0,92
LAGOA DO ARROZ	0,04	0,22	0,10	0,13	0,61

Vê-se que houve uma positiva variabilidade volumétrica interanual, que indica de um modo geral acumulação de água nos reservatórios, garantindo sua sustentabilidade hídrica e evidenciando o fato de que a maior parte da água utilizada foi proveniente do próprio sistema. Os reservatórios Engenheiro Ávidos e Lagoa do Arroz, por possuírem maiores áreas de espelho d'água, também apresentaram maiores índices de evaporação frente aos volumes totais afluentes a si, indicando ainda, no caso do açude São Gonçalo, quão rapidamente a água é consumida em detrimento do fenômeno evaporativo. O índice de utilização efetiva η_u para o reservatório São Gonçalo manteve-se alto, da ordem de 92%. Isto indica o alto rendimento na utilização eficiente dos recursos hídricos para o mencionado açude.

A Figura 39 mostra os gráficos de vazão na fronteira entre os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C2.

Figura 39. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C2.



Observa-se comportamento semelhante ao Cenário C1, com exceção dos dois últimos meses de 2017 e o primeiro de 2018, quando a intensidade do deflúvio superou discretamente o valor desejável de 1,7 m³/s. Este fato coincide com a retomada do atendimento pleno às demandas de irrigação da área difusa 6 (vide Figura 34), que, aliás, é a mais próxima da citada fronteira interestadual (vide Figura 11), sinalizando um ligeiro aumento da disponibilidade hídrica no exutório da área de pesquisa, indicando ainda que chegara ao fim um longo período

de escassez, haja vista as maiores quantidades acumuladas nos reservatórios e a maior liberação de água para jusante especificamente no fim de 2017.

A Tabela 19 apresenta as perdas hídricas no sistema havidas especificamente nos reservatórios e nos leitos dos rios.

Tabela 19. Volume anual médio de perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C2.

ANOS	PERDAS HÍDRICAS (hm ³)	
	RESERVATÓRIOS	LEITO DOS RIOS
2011	61,05	16,87
2012	57,54	18,26
2013	43,68	18,40
2014	43,51	15,41
2015	41,60	18,42
2016	33,88	14,28
2017	24,65	18,38
2018	41,02	21,94
2019	43,51	30,24
MÉDIA	43,38	19,13

Vê-se que o ano de 2011, por ter se apresentado como o de maior volume acumulado nos reservatórios, também obteve o maior valor médio anual de perdas. Da mesma forma, observa-se que 2017 foi o ano que apresentou menores perdas hídricas globais, porque também ali houve os menores valores acumulados, como se pode verificar nas Figura 36.

No que concerne às parcelas de perdas nos leitos dos rios, nota-se que o menor valor anual médio aconteceu em 2016. Essa época foi crítica em termos de armazenamento e disponibilidade hídrica para liberação a jusante, cujo efeito se sentiu na intermitência dos escoamentos no mesmo período, de modo que sem água nos rios para se submeter ao processo de evaporação, as perdas dessa natureza no mencionado componente foram consequentemente menores.

Ainda pela Tabela 19, observa-se que todo o sistema, no ano de 2019, tendo recebido uma condição mais favorável em termos de volumes armazenados e disponibilidade hídrica do ano anterior (2018), apresentou a maior perda anual média no leito dos rios, indicando a confluência dos gráficos de volume acumulado e descarga de fundo, representados nessa ordem pela Figura 36 e pela Figura 37, os quais também apontaram para a maior quantidade de água disponível nos leitos dos rios.

Os índices de eficiência do sistema são apresentados na Tabela 20. Nota-se que foram praticamente preservados os valores obtidos no Cenário C1, notadamente quanto à potencialidade.

Tabela 20. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C2.

ÍNDICES DO SISTEMA			
IAP	IUD	IUP	η_{Perdas}
0,53	0,91	0,48	0,47

O Índice de Ativação da Potencialidade (IAP) do sistema expressa a grande capacidade (47%) de expansão da disponibilidade hídrica da área de pesquisa, a qual poderia ser realizada, por exemplo, através de obras estruturantes de armazenamento, como a construção de novos reservatórios ou a recuperação dos já existentes.

Observou-se um pequeno aumento no Índice de Utilização da Disponibilidade (IUD), derivado de um ligeiro decréscimo na disponibilidade (evidenciado pelo IAP 1% menor) em relação ao primeiro cenário, tendo restado o Índice de Utilização da Potencialidade (IUP) em 48% e o índice global de perdas em 47%.

6.2.3 – CENÁRIO C3

Neste cenário, considerou-se que toda a vazão exógena do PISF (2,7 m³/s) entrará pela Unidade de Planejamento Hidrológico (UPH) Peixe (vide Figura 13), através do ramal de entrega a montante do reservatório Lagoa do Arroz.

Pela Figura 40 e pela Figura 41, observa-se o total atendimento das demandas de abastecimento urbano correspondentes aos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo, Lagoa do Arroz e também ao leito do rio Piranhas.

Figura 40. Atendimento às demandas de abastecimento urbano para os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C3.

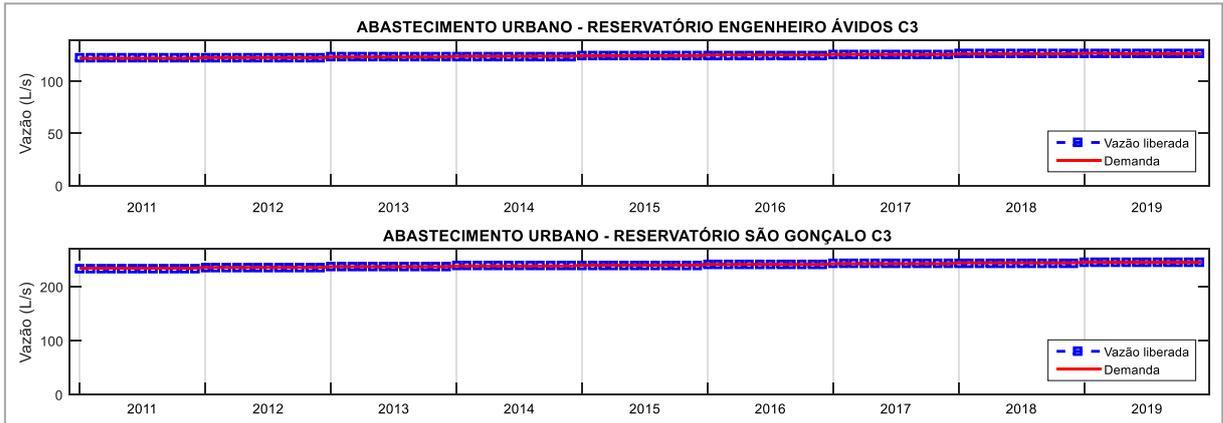
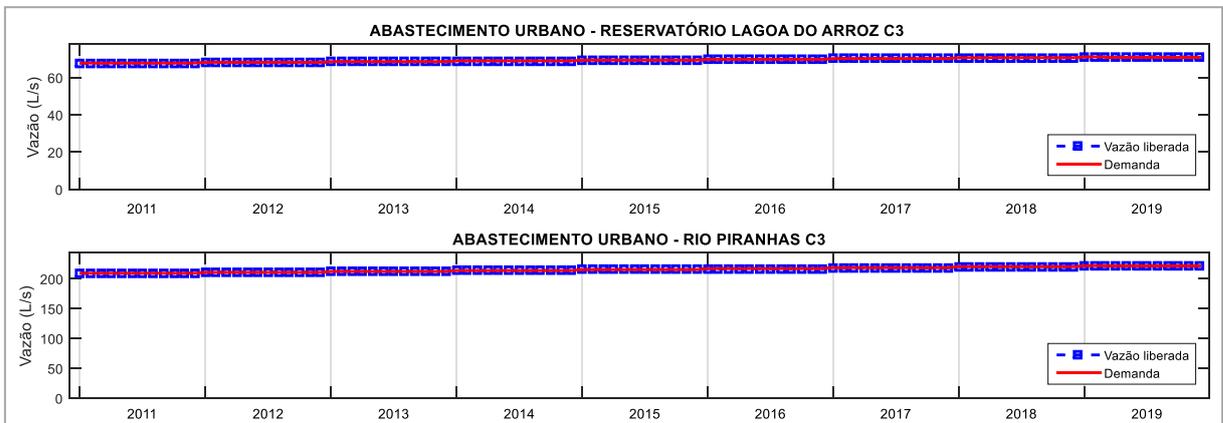
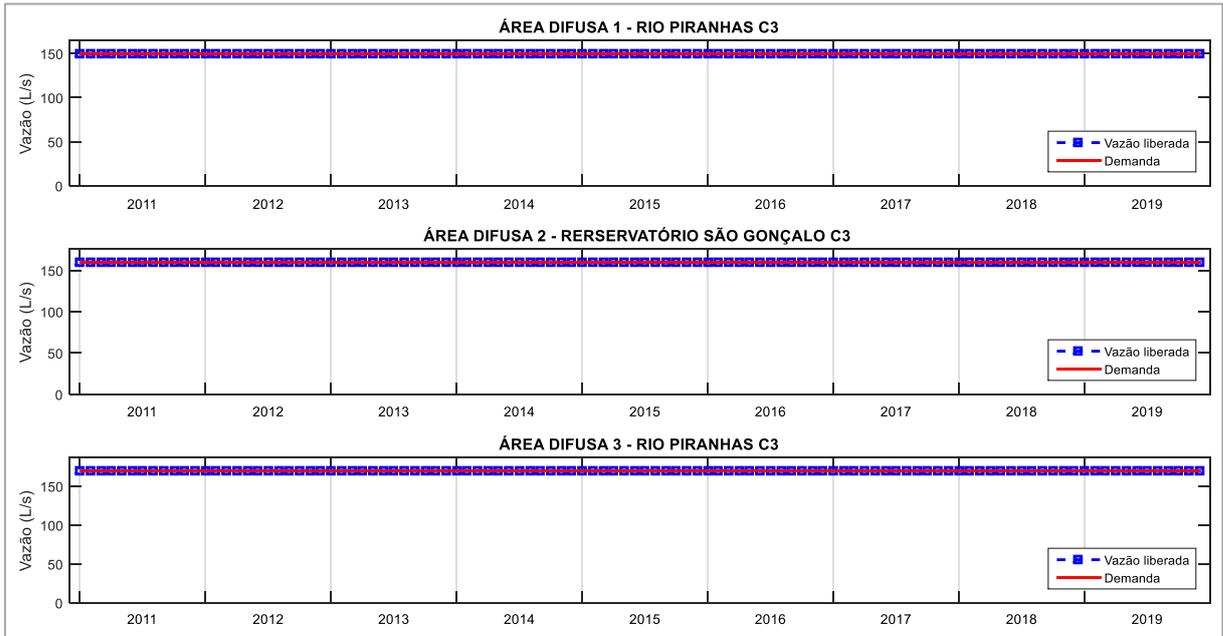
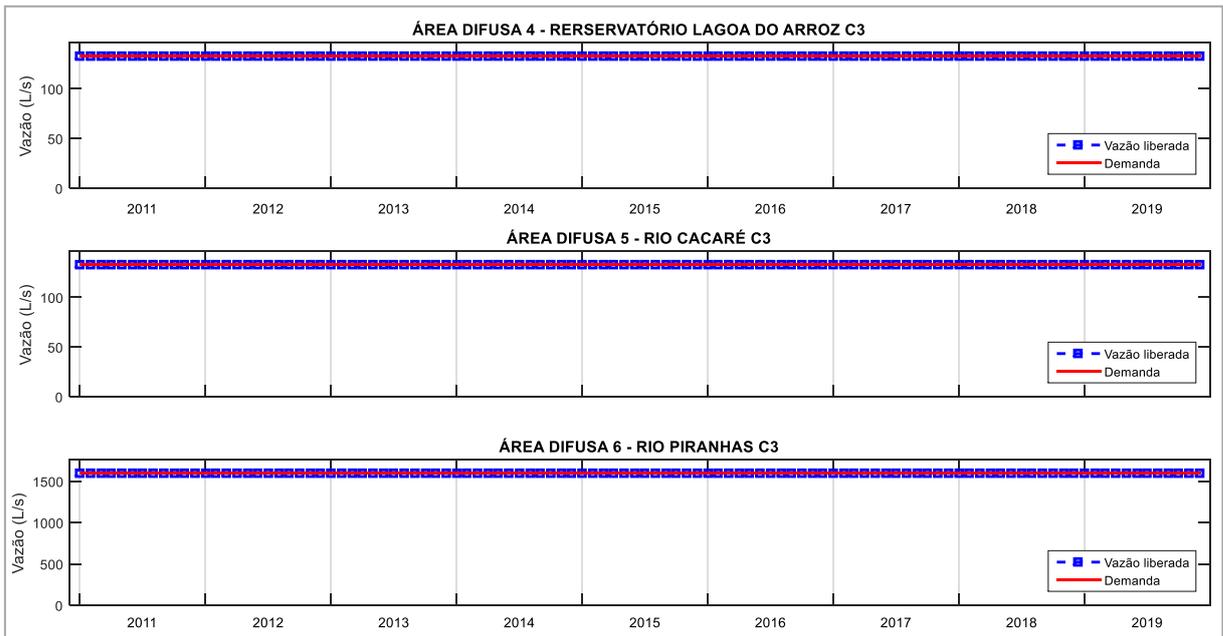


Figura 41. Atendimento às demandas de abastecimento urbano para o reservatório Lagoa do Arroz e o Rio Piranhas no Cenário C3.



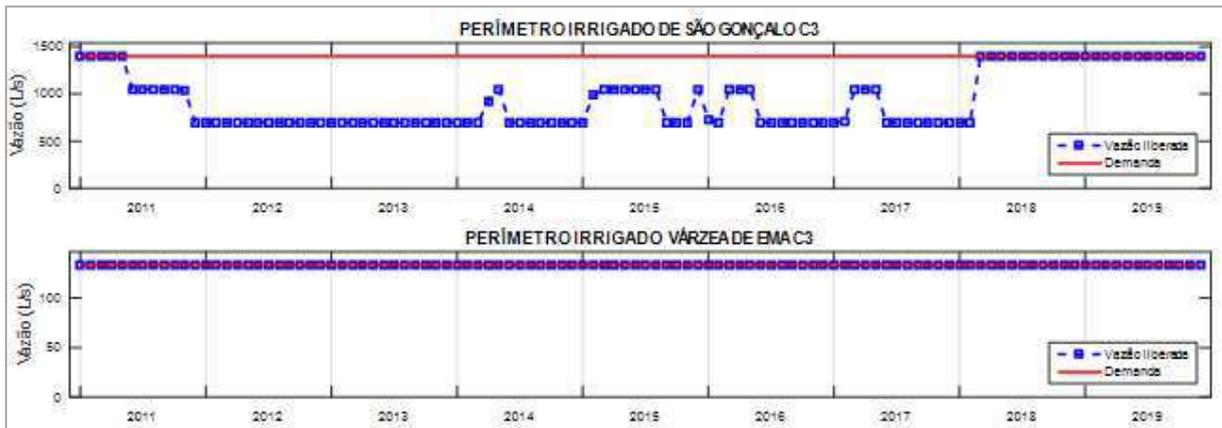
Na Figura 42 e na Figura 43, apresentam-se os resultados obtidos no Cenário C3 quanto ao suprimento das demandas hídricas de irrigação das áreas difusas de 1 a 6. Nelas, verifica-se o completo atendimento, sem nenhum evento de falha sequer.

Figura 42. Demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C3.**Figura 43.** Demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C3.

Diferentemente dos cenários anteriores, observa-se que a demanda hídrica da área difusa 6 foi completamente atendida.

No que diz respeito aos perímetros irrigados (Figura 44), no corrente cenário, a demanda hídrica do Perímetro Irrigado Várzea da Ema (PIVE) foi plenamente atendida.

Figura 44. Demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C3.



Já o Perímetro Irrigado São Gonçalo (PISG), apresentou maior número de falhas quando comparado com o Cenário C1. Durante 3/4 do tempo de toda a série, houve falhas de magnitudes variadas, tendo chegado o mencionado perímetro a receber metade da vazão necessária ao pleno desenvolvimento de suas atividades agrícolas (Figura 44).

A Tabela 21 apresenta os índices de desempenho no atendimento às demandas do sistema em termos de confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade, déficit máximo (vulnerabilidade máxima) e sustentabilidade.

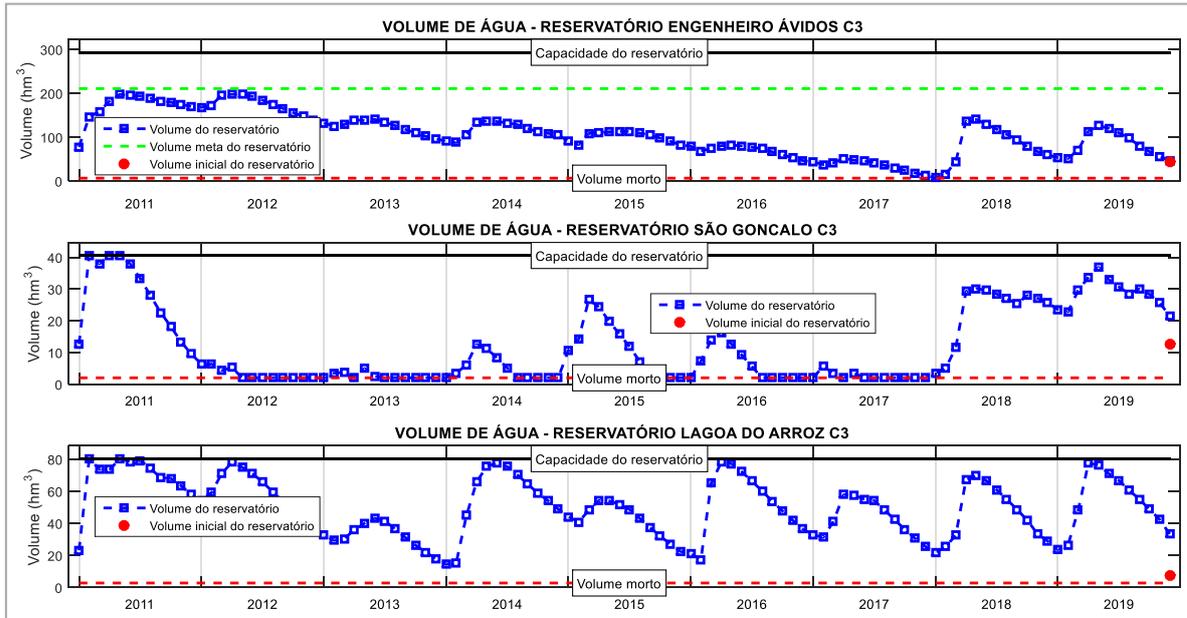
Tabela 21. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário C3.

ELEMENTOS DO SISTEMA	ÍNDICES DE HASHIMOTO				
	CONF.	RES.	VUL.	DEF. MÁX.	SUST.
Abast. Engenheiro Ávidos	1	-	-	-	1
Abast. São Gonçalo	1	-	-	-	1
Abast. Lagoa do Arroz	1	-	-	-	1
Abast. Rio Piranhas	1	-	-	-	1
P. Irr. São Gonçalo	0,25	0,01	0,43	0,50	0,002
P. Irr. Várzea da Ema	1	-	-	-	1
Área difusa 1	1	-	-	-	1
Área difusa 2	1	-	-	-	1
Área difusa 3	1	-	-	-	1
Área difusa 4	1	-	-	-	1
Área difusa 5	1	-	-	-	1
Área difusa 6	1	-	-	-	1

Tem-se que, sem vazão exógena do PISF na região da UPH Alto Piranhas, o atendimento da demanda do PISG fica totalmente comprometida com uma garantia de atendimento de apenas 25% e com uma baixa probabilidade de recuperação do estado de falhas (resiliência igual a 1%). A magnitude média das falhas ficou em torno de 43% do valor da demanda podendo chegar até a 50% do valor da demanda.

A Figura 45 apresenta o volume de água dos reservatórios ao longo do período de estudo no Cenário C3.

Percebe-se que o reservatório Engenheiro Ávidos manteve o mesmo padrão de acumulação dos cenários anteriores, com picos de armazenamento alcançados na época chuvosa, quando geralmente ocorrem significativas recargas, para em seguida experimentar um processo natural de depleção até que se inicie novamente um novo período de recargas, recomeçando, assim, o ciclo. Todavia, em termos quantitativos, o referido açude teve menos água acumulada no Cenário C3 em comparação com o Cenário C2, e teve praticamente os mesmos valores de volume em comparação com o Cenário C1.

Figura 45. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C3.

O reservatório São Gonçalo, praticamente repetiu o comportamento observado no ano de 2011. Entretanto, no período de 2012 a 2017 (época da grande seca), entrou em crise, permanecendo, na maioria das vezes, na zona de volume morto, tendo apresentado pequenas recargas nos anos de 2014, 2015 e 2016. Nos anos de 2018 e 2019, devido às boas chuvas na região, o volume de água do reservatório apresentou valores acima dos 50% da capacidade de armazenamento.

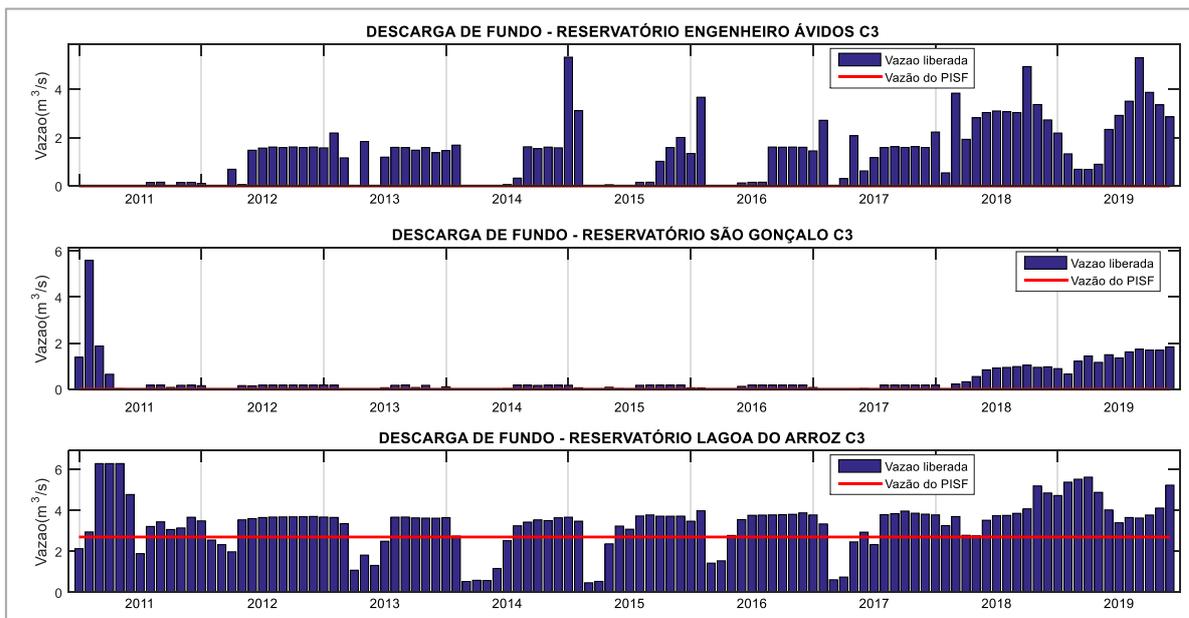
Com relação ao volume de água do reservatório Lagoa do Arroz, observa-se um aumento significativo nos valores, em comparação aos cenários anteriores, devido à vazão advinda do PISF ($2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) entregue a montante do reservatório. Observa-se ainda em vários anos (2011, 2012, 2014, 2016 e 2019) que o volume de água atingiu ou ficou próximo da capacidade máxima, situação não vista nos cenários anteriores.

Os volumes médios mensais evaporados diretamente dos reservatórios encontram-se na Tabela 22. Em termos quantitativos, percebe-se uma diminuição de $5,98 \text{ hm}^3$ (16%) na evaporação do reservatório Engenheiro Ávidos em comparação com o Cenário C2, e uma redução de $2,73 \text{ hm}^3$ (8%) em relação ao Cenário C1. Para o açude São Gonçalo, a queda na evaporação, percentualmente, foi ainda maior: $2,06 \text{ hm}^3$ (31%) se comparado aos dois cenários anteriores. Em Lagoa do Arroz, todavia, houve um incremento de 53% na evaporação anual média em relação ao Cenário C2, em decorrência da maior disponibilidade hídrica registrada; e 41% de aumento em comparação com o Cenário C1.

Tabela 22. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C3.

MESES	EVAPORAÇÃO MÉDIA (hm ³)		
	RESERVATÓRIOS		
	ENGENHEIRO ÁVIDOS	SÃO GONÇALO	LAGOA DO ARROZ
JAN	2,08	0,24	1,11
FEV	1,49	0,25	0,82
MAR	1,36	0,28	0,83
ABR	1,57	0,32	1,07
MAI	2,17	0,44	1,54
JUN	2,44	0,45	1,76
JUL	3,02	0,49	2,18
AGO	3,54	0,51	2,48
SET	3,65	0,47	2,46
OUT	3,56	0,46	2,35
NOV	3,07	0,39	1,94
DEZ	2,76	0,33	1,66
TOTAL	30,70	4,64	20,21

A Figura 46 apresenta as descargas de fundo nos reservatórios para o Cenário C3.

Figura 46. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C3.

Percebe-se que a vazão liberada por descarga de fundo no reservatório Engenheiro Ávidos se apresentou em menor intensidade quando comparada aos cenários anteriores.

Resultado semelhante foi observado também para o reservatório São Gonçalo, sendo que entre o fim de 2011 e 2017 a intensidade foi praticamente desprezível. O reservatório Lagoa do Arroz, por sua vez, obteve maiores valores da vazão liberada por descarga de fundo, devido à vazão exógena do PISF (Figura 46).

A Figura 47 mostra os eventos de vertimento nos reservatórios para o Cenário C3.

Figura 47. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C3.



Observa-se comportamento similar aos cenários anteriores, com vertimento nos reservatórios São Gonçalo e Lagoa do Arroz no ano de 2011.

A Tabela 23 apresenta os índices de eficiência dos reservatórios para o Cenário C3.

Tabela 23. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C3.

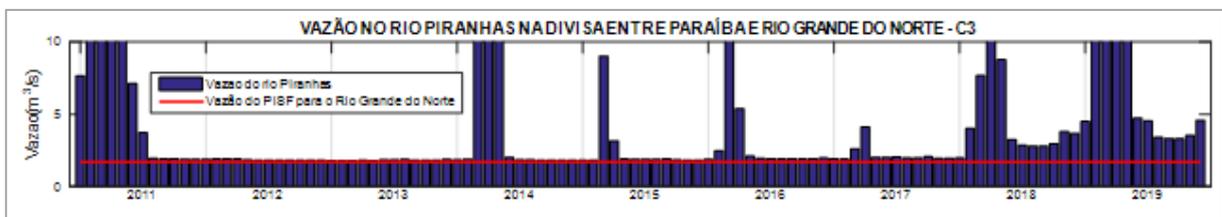
RESERVATÓRIOS	ÍNDICES DE EFICIÊNCIA				
	η_{Vr}	η_E	η_P	η_V	η_u
ENGENHEIRO ÁVIDOS	0,00	0,40	0,15	0,00	0,59
SÃO GONÇALO	0,02	0,07	0,03	0,04	0,87
LAGOA DO ARROZ	0,02	0,14	0,06	0,05	0,79

Observa-se um aumento nos índices de evaporação (η_E) nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo em comparação com os cenários anteriores. Tal índice diminuiu no

reservatório Lagoa do Arroz, revelando uma tendência de maior atividade e eficiência na utilização da água em detrimento do fenômeno evaporativo. Em relação ao índice de utilização da água (η_u) houve uma diminuição nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo e aumento no reservatório Lagoa do Arroz em comparação com os cenários anteriores, o que se alinha perfeitamente com o índice de evaporação e a sua interpretação. Tal comportamento se deve ao maior aporte hídrico no reservatório Lagoa do Arroz proveniente do PISF.

Pela Figura 48, compreende-se que a condição de disponibilizar na fronteira entre os Estados da Federação cortados pelo Rio Piranhas-Açu a vazão mínima de 1,7 m³/s foi completamente respeitada.

Figura 48. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C3.



Nota-se que o padrão de comportamento ao longo do tempo foi praticamente o mesmo, com exceção de alguns episódios que superaram discretamente os valores observados nos cenários anteriores, como em 2018, quando a mínima mensal foi de 2,6 m³/s contra 2,4 m³/s no mesmo período para as situações precedentes.

A Tabela 24 mostra os dados anuais médios de perdas hídricas nos reservatórios e leitos dos rios.

Tabela 24. Volume anual médio de perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C3.

ANOS	PERDAS HÍDRICAS (hm ³)	
	RESERVATÓRIOS	LEITO DOS RIOS
2011	24,93	7,96
2012	22,84	1,27
2013	14,93	1,50
2014	22,13	3,37
2015	17,77	2,22
2016	20,94	2,37
2017	18,16	1,89
2018	19,14	3,00
2019	21,04	5,42
MÉDIA	20,21	3,22

Pela mesma tabela, nota-se que, neste cenário, houve uma menor perda anual média por evaporação nos reservatórios se comparado aos casos anteriores. Isto se deve ao fato de as barragens da UPH Alto Piranhas terem experimentado menos volumes reservados, menores áreas de espelho d'água e, enfim, menos área exposta a fatores promotores do fenômeno evaporativo. O mesmo raciocínio é extensível à parcela de perda derivada do leito dos rios, que por sua vez está diretamente ligada à descarga de fundo dos reservatórios. O valor médio de 3,22 hm³ (Tabela 24) de perdas por ano no leito dos rios foi 83% menor que aquele observado no Cenário C2, e 78% menos intenso que no cenário primeiro.

Na Tabela 25, são apresentados os índices de eficiência do sistema para o Cenário C3.

Tabela 25. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C3.

ÍNDICES DO SISTEMA			
IAP	IUD	IUP	η_{Perdas}
0,53	0,88	0,46	0,47

O Índice de Ativação da Potencialidade (IAP) do sistema se apresentou idêntico ao do Cenário C2: 53%, o que significa que ainda é possível aumentar a disponibilidade hídrica em 47% e que de um modo geral a quantidade de água em circulação no sistema foi a mesma.

O Índice de Utilização da Disponibilidade (IUD) recuou para 88%, apontando para uma diminuição no seu desempenho da ordem de 3% em comparação com o cenário segundo. Isto evidencia a repressão de demandas em face da disponibilidade e reflete notadamente os casos de alta vulnerabilidade e baixa confiabilidade no atendimento das vazões requeridas ao

adequado funcionamento do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), bem como os baixos fluxos descarregados para jusante pelos reservatórios da UPH Alto Piranhas.

O Índice de Utilização da Potencialidade (IUP) foi reduzido em 2%, se comparado com o cenário precedente. A mencionada redução no IUP endossa o fato de que as demandas como um todo estiveram mais distantes das possibilidades globais do sistema, revelando um certo grau de ineficiência na alocação dos recursos hídricos no corrente cenário.

O índice global de perdas (η_{Perdas}) se manteve constante em 47%, como se vê também na Tabela 25.

6.2.4 – CENÁRIO C4

Neste cenário, o modelo de otimização multiobjetivo foi deixado livre para determinar, conforme cada situação mensal do sistema requeresse, a quantidade de água estritamente necessária para atender as diversas demandas existentes com o máximo nível de confiabilidade possível. Assim, não se induziu a mencionada ferramenta computacional a trabalhar sobre um valor de vazão pré-estabelecido, de modo que as intensidades de escoamento resultantes são aquelas tidas como ótimas, ideais ao pleno atendimento das várias unidades consumidoras, com o máximo de eficiência possível levando em conta também as condições climáticas.

Na Figura 49 e na Figura 53, observa-se o pleno atendimento de todas as demandas hídricas analisadas no sistema.

Figura 49. Atendimento das demandas de abastecimento urbano para os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo no Cenário C4.

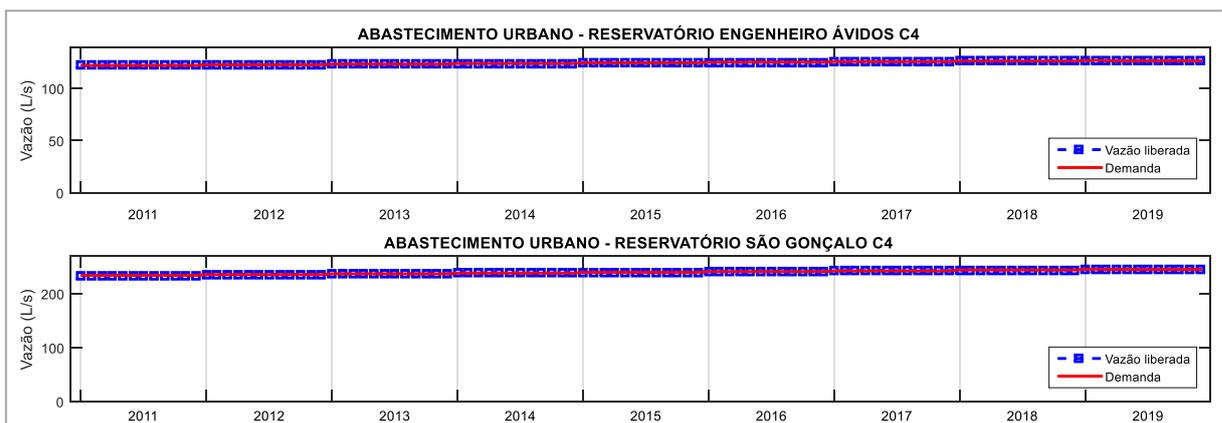


Figura 50. Atendimento das demandas de abastecimento urbano para o reservatório Lagoa do Arroz e o Rio Piranhas no Cenário C4.

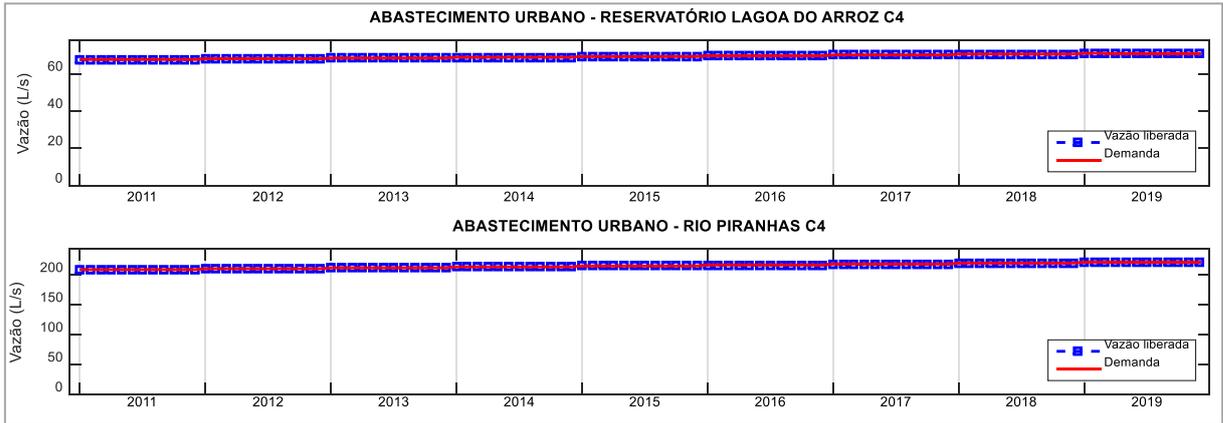


Figura 51. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 1 a 3 no Cenário C4.

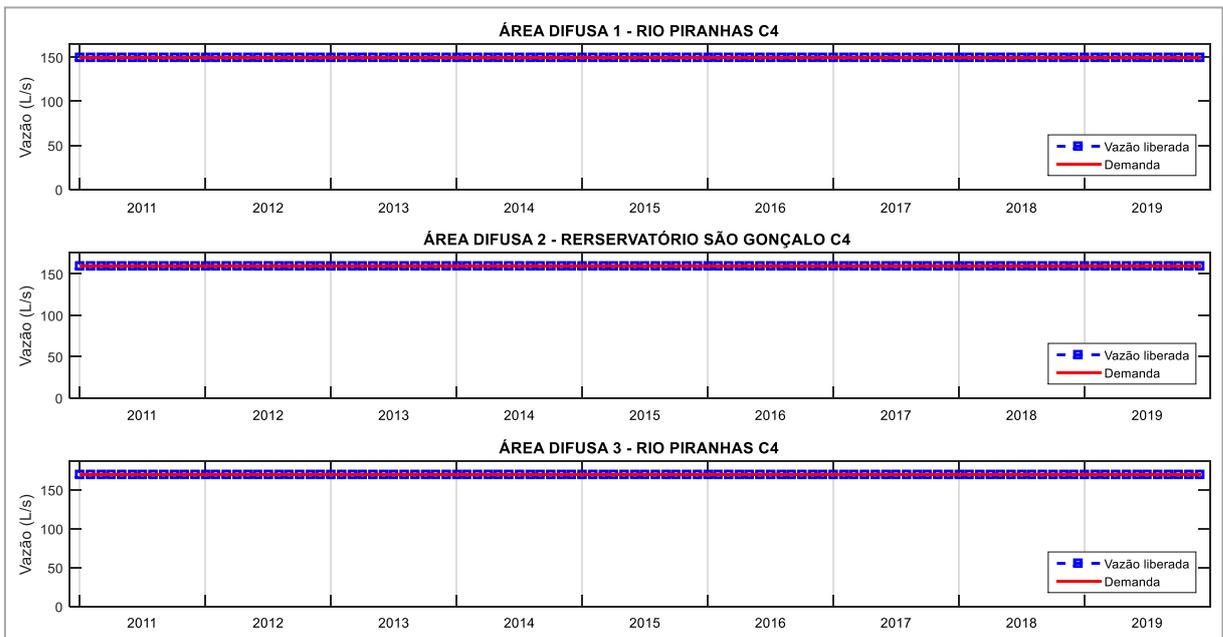
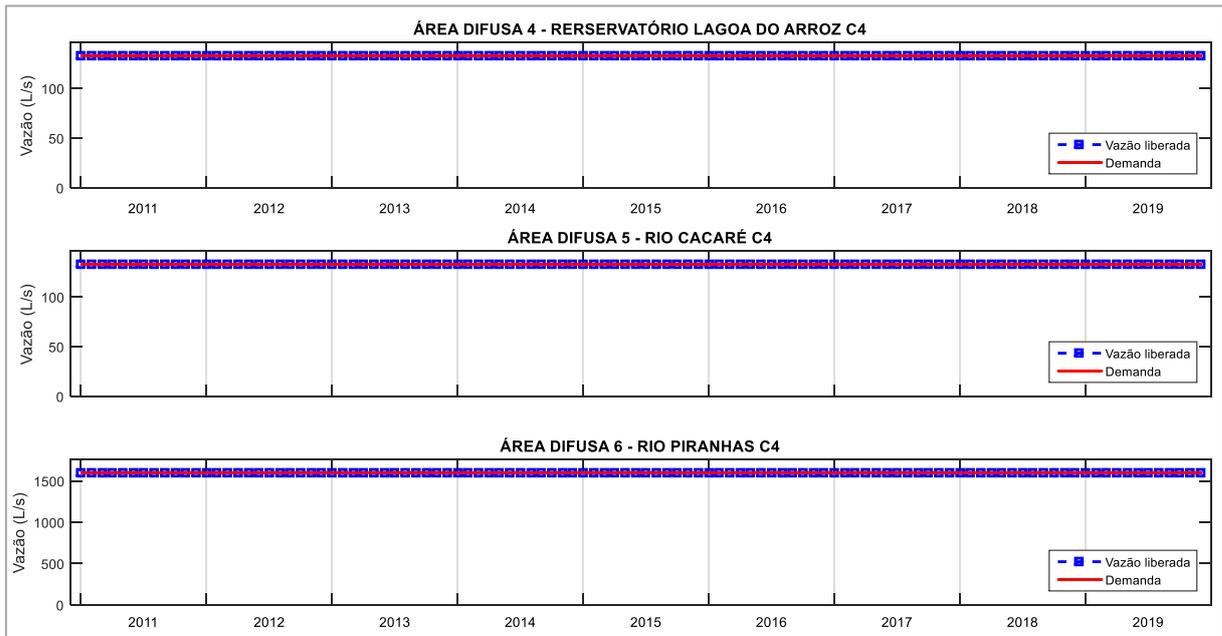
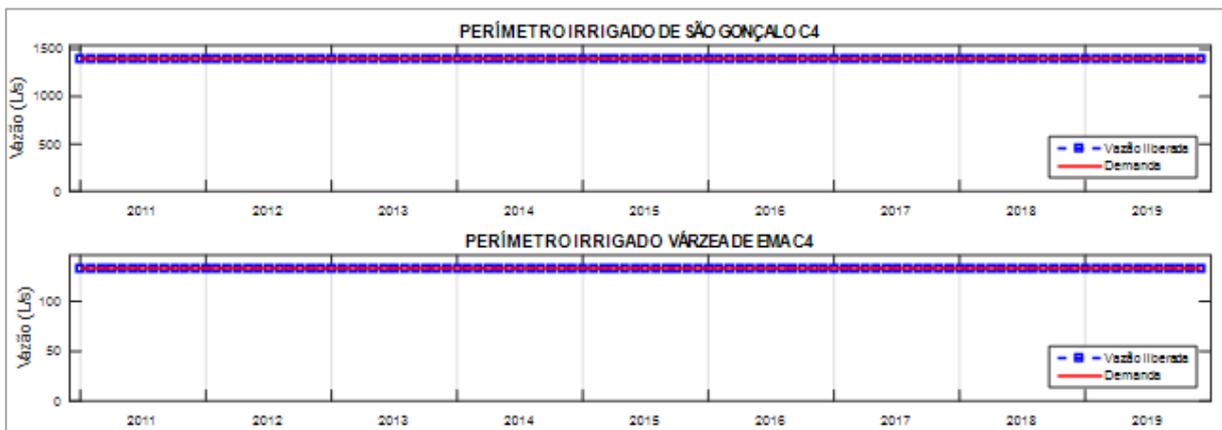


Figura 52. Atendimento das demandas de irrigação das áreas difusas de 4 a 6 no Cenário C4.**Figura 53.** Atendimento das demandas de irrigação dos perímetros irrigados oficiais São Gonçalo e Várzea da Ema no Cenário C4.

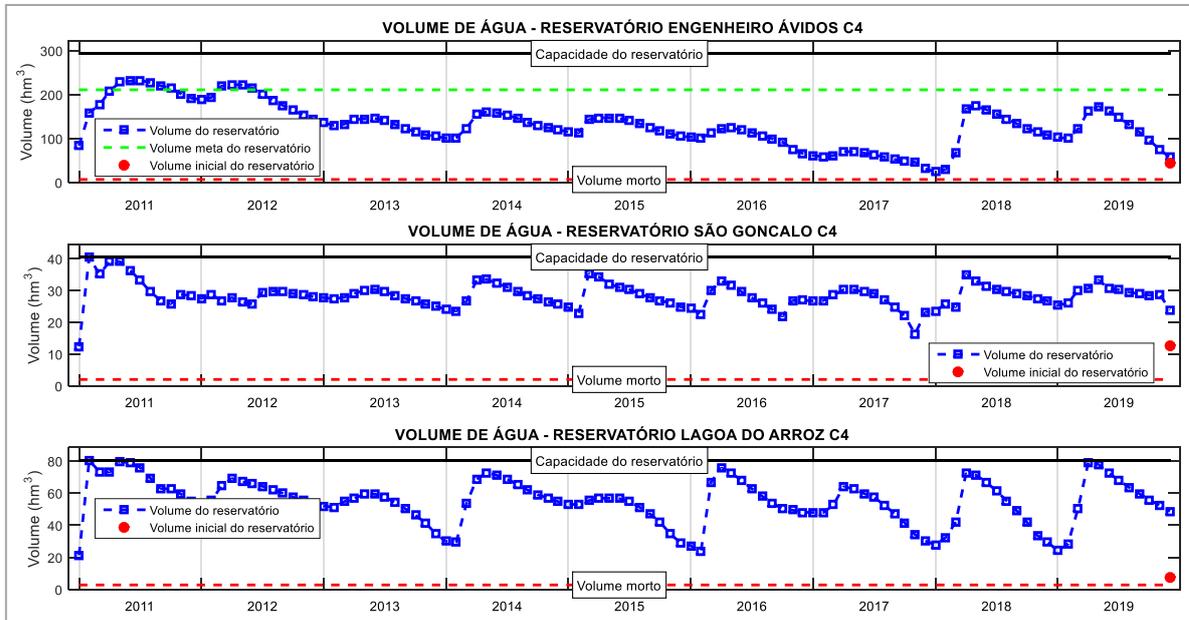
Na Tabela 26, apresentam-se os índices de Hashimoto, Stedinger, Loucks (1982) associados ao desempenho do atendimento das demandas do conjunto hídrico para o Cenário C4. Nela, nota-se que todos os elementos foram absolutamente atendidos em termos das suas demandas hídricas, não tendo se apresentado nenhum evento sequer de falha, com índices de confiabilidade e sustentabilidade máximos e vulnerabilidade nula.

Tabela 26. Índices de Hashimoto para os diversos componentes do sistema hídrico no Cenário C4.

ELEMENTOS DO SISTEMA	ÍNDICES DE HASHIMOTO				
	CONF.	RES.	VUL.	DEF. MÁX.	SUST.
Abast. Engenheiro Ávidos	1	-	-	-	1
Abast. São Gonçalo	1	-	-	-	1
Abast. Lagoa do Arroz	1	-	-	-	1
Abast. Rio Piranhas	1	-	-	-	1
P. Irr. São Gonçalo	1	-	-	-	1
P. Irr. Várzea da Ema	1	-	-	-	1
Área difusa 1	1	-	-	-	1
Área difusa 2	1	-	-	-	1
Área difusa 3	1	-	-	-	1
Área difusa 4	1	-	-	-	1
Área difusa 5	1	-	-	-	1
Área difusa 6	1	-	-	-	1

Através da Figura 54, percebe-se que os reservatórios de um modo geral apresentaram valores de água acumulados maiores em comparação com todos os cenários anteriores.

Figura 54. Volumes de água armazenados nos reservatórios para o Cenário C4.



O reservatório Engenheiro Ávidos apresentou melhores resultados nos volumes acumulados em comparação com o cenário-base desde o ano 2014 até o fim da série, em 2019. Destaque deve-se dar para o reservatório São Gonçalo, que manteve seu volume médio na marca dos 70% da capacidade máxima, situação quase três vezes maior que a sua segunda melhor situação, observada quando do cenário-base (Cenário C1). Em relação ao reservatório Lagoa do Arroz observou-se situação melhor do que nos cenários anteriores. Nenhum reservatório chegou à zona de volume morto.

A Tabela 27 apresenta os volumes médios mensais evaporados dos reservatórios neste quarto cenário. Observa-se preservada a tendência de as maiores intensidades de evaporação ocorrerem na segunda metade do ano, quando tem cessado o período chuvoso, o que implica numa diminuição da nebulosidade (FRANCISCO; SANTOS, 2017; NUNES, 2015), a qual, por sua vez, favorece uma maior incidência de radiação solar sobre os corpos d'água, promovendo mais intensamente o fenômeno evaporativo.

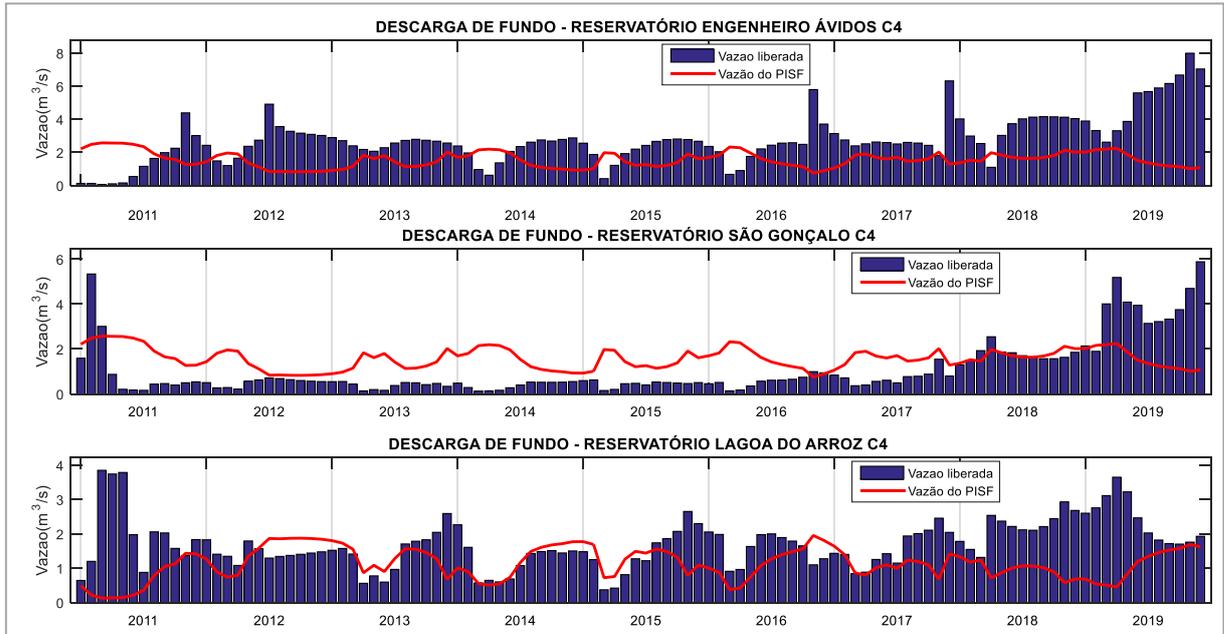
Tabela 27. Volumes médios mensais evaporados dos reservatórios no Cenário C4.

MESES	EVAPORAÇÃO MÉDIA (hm ³)		
	RESERVATÓRIOS		
	ENGENHEIRO ÁVIDOS	SÃO GONÇALO	LAGOA DO ARROZ
JAN	2,42	0,80	1,29
FEV	1,76	0,58	0,97
MAR	1,61	0,53	0,94
ABR	1,83	0,56	1,14
MAI	2,51	0,74	1,58
JUN	2,82	0,81	1,79
JUL	3,50	0,99	2,21
AGO	4,09	1,18	2,54
SET	4,23	1,22	2,57
OUT	4,17	1,24	2,53
NOV	3,61	1,13	2,15
DEZ	3,24	1,06	1,91
TOTAL	35,80	10,84	21,63

Comparativamente aos cenários anteriores, nota-se que houve mais evaporação, pela maior exposição de mais área de espelho d'água em decorrência da maior quantidade de água reservada. O reservatório São Gonçalo teve seu volume total mensal médio evaporado da ordem de 10,84 hm³, o que significa um incremento de 61% em relação ao cenário-base e de 134% em relação à pior situação – o terceiro cenário. Engenheiro Ávidos apresentou aumento em relação ao cenário-base e à sua pior situação (Cenário C3), respectivamente, de 7% e 16%. Para Lagoa do Arroz, os incrementos, também relativamente aos cenários base e segundo (pior situação), foram, nessa ordem, de 51% e 64%.

Pode-se observar pela Figura 55, que apresenta as vazões liberadas para jusante pelos reservatórios no Cenário C4, que houve uma maior regularidade na distribuição temporal das descargas de fundo do reservatório Engenheiro Ávidos com relação ao cenário-base. Percebe-se também que na maioria das vezes a vazão ótima requerida pelo sistema a título de vazão exógena para reforço da segurança hídrica foi superada.

Figura 55. Vazões liberadas pela descarga de fundo dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C4.



Para o açude São Gonçalo, observou-se também um maior equilíbrio na distribuição temporal das descargas (Figura 55) ao custo de uma correção quantitativa média de 19% nos valores de vazão disponibilizados (em comparação com o cenário-base). Vê-se ainda que as vazões liberadas raramente superaram os valores ótimos requeridos pelo sistema em termos de vazão exógena.

Quanto ao reservatório Lagoa do Arroz, também foi observado um maior saneamento das falhas em decorrência da maior estabilidade nos valores de vazão descarregados para jusante (Figura 55). No que concerne às vazões ótimas requeridas pontualmente em escala mensal pelo sistema, percebeu-se que as descargas as acompanharam medianamente, ora pela superação, ora por terem ficado abaixo.

A Figura 56 mostra os valores de vazão de vertimento nos reservatórios para o Cenário C4. O reservatório Engenheiro Ávidos não apresentou nenhum episódio de vertimento, e os reservatórios São Gonçalo e Lagoa do Arroz desta vez apresentaram apenas um único episódio de sangria no mês de fevereiro de 2011.

Figura 56. Vazões de vertimento nos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Lagoa do Arroz para o Cenário C4.

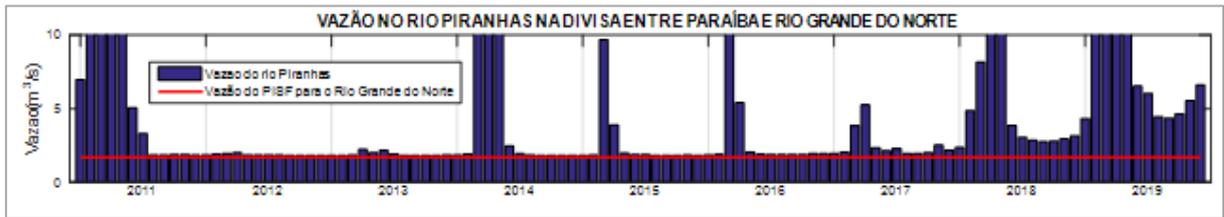


A Tabela 28 mostra os índices de eficiência dos reservatórios no Cenário C4. Nela, pode-se ver índices de variabilidade volumétrica interanual positivos, o que favorece a sustentabilidade hídrica dos mencionados açudes. Vê-se ainda que o índice de evaporação foi maior para os maiores mananciais, o que também indica, especificamente no caso do reservatório São Gonçalo, uma maior eficiência na utilização da água em detrimento da ocorrência do fenômeno evaporativo, e que os índices de utilização efetiva dos recursos hídricos ficaram acima dos 70%, revelando uma maior eficiência global do sistema.

Tabela 28. Índices de eficiência associados aos reservatórios no Cenário C4.

RESERVATÓRIOS	ÍNDICES DE EFICIÊNCIA				
	η_{vr}	η_E	η_P	η_V	η_u
ENGENHEIRO ÁVIDOS	0,01	0,28	0,10	0,00	0,72
SÃO GONÇALO	0,01	0,10	0,04	0,02	0,87
LAGOA DO ARROZ	0,05	0,22	0,09	0,07	0,70

A Figura 57 evidencia a situação qualitativa da vazão residual a ser disponibilizada na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte, que permaneceu a mesma, com praticamente os mesmos aspectos gráficos em relação aos cenários anteriores.

Figura 57. Vazão residual disponível na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte no Cenário C4.

A Tabela 29 mostra os valores anuais de perdas evaporativas nos reservatórios e nos leitos dos rios. Percebe-se que, em relação aos demais cenários, a presente situação mostrou maiores volumes totais anuais médios evaporados, por consequência dos também maiores volumes acumulados nos reservatórios. Entretanto, a componente de perdas no leito dos rios foi menor em relação aos cenários 2 e 1, nessa ordem, decrescentemente; e maior que no terceiro cenário.

Tabela 29. Volume anual médio de perdas hídricas por evaporação nos reservatórios e no leito dos rios para o Cenário C4.

ANOS	PERDAS HÍDRICAS (hm ³)	
	RESERVATÓRIOS	LEITO DOS RIOS
2011	84,06	17,98
2012	81,52	10,27
2013	67,67	9,62
2014	70,71	10,85
2015	66,72	9,78
2016	62,45	11,04
2017	50,11	11,56
2018	64,00	17,00
2019	67,21	28,12
MÉDIA	68,27	14,02

Como pode ser visto na Tabela 30, a qual apresenta os índices de eficiência do sistema para este quarto cenário, em comparação com os cenários anteriores, o Índice de Ativação da Potencialidade (IAP) de todo o arranjo diminuiu para 47%, indicando uma queda na disponibilidade hídrica média do sistema devido ao aumento das perdas hídricas, principalmente por evaporação nos reservatórios. Vale ressaltar que a vazão na divisa entre Paraíba e Rio Grande do Norte superior ao valor de 1,7 m³/s é considerada, também, uma perda hídrica do sistema.

Tabela 30. Índices de eficiência do sistema para o Cenário C4.

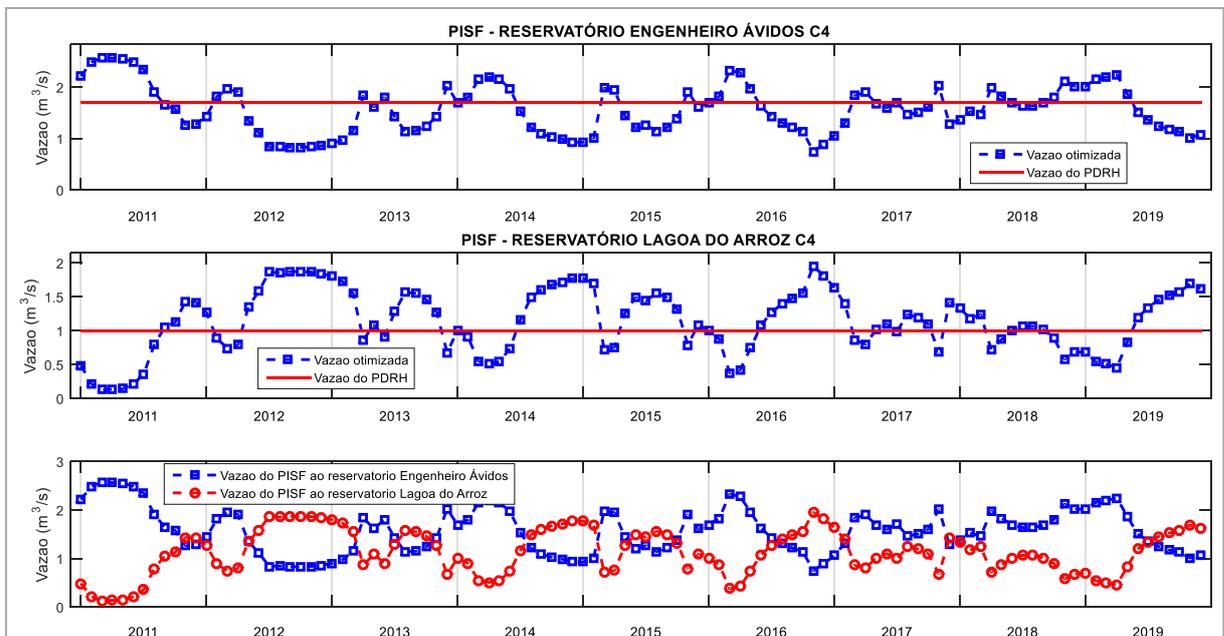
ÍNDICES DO SISTEMA			
IAP	IUD	IUP	η_{Perdas}
0,47	1,05	0,49	0,53

A citada redução na disponibilidade foi sensível também no Índice de Utilização da Disponibilidade (IUD), que, na média, superou a unidade, indicando que o valor total das demandas esteve acima da disponibilidade do sistema. Destaca-se o fato que neste cenário todas as demandas do sistema foram atendidas sem apresentar falhas, o que contribuiu, também, para o aumento do valor total das demandas.

As perdas hídricas, contudo, de um modo geral aumentaram para assegurar o pleno atendimento de todas as demandas do grupo de elementos demandantes, mas o balanço hídrico enquanto princípio físico universal de conservação de massa se manteve, haja vista que a soma entre IAP e η_{Perdas} em todos os cenários foi igual à unidade.

A Figura 58 apresenta uma comparação entre os valores de vazão estabelecidos pelo Plano de Recursos Hídricos da bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu (PHR-PPA) e os valores ótimos de vazão obtidos pela otimização multiobjetivo.

Figura 58. Vazão estabelecida pelo PRH-PPA *versus* vazão otimizada.



Observa-se pela mesma figura que as maiores vazões otimizadas no reservatório Engenheiro Ávidos ocorreram no 1º semestre com valores acima da vazão fixada pelo PHR-PPA (1,7 m³/s) enquanto que no 2º semestre as vazões ficaram abaixo da vazão fixada. Já no reservatório Lagoa do Arroz observa-se o contrário, as maiores vazões ocorreram no 2º semestre com valores acima da vazão fixada pelo PHR-PPA (1,0 m³/s) enquanto que no 1º semestre as vazões ficaram abaixo da vazão fixada.

A Tabela 31 apresenta os valores médios mensais da vazão de entrada nos reservatórios do sistema no cenário C4.

Tabela 31. Vazões médias mensais ótimas de entrada nos reservatórios no Cenário C4.

Meses	Vazão de entrada do PISF (m ³ /s)	
	Engenheiro Ávidos	Lagoa do Arroz
Jan	1,5	1,2
Fev	1,7	1,0
Mar	2,0	0,7
Abr	2,1	0,6
Mai	1,8	0,9
Jun	1,7	1,0
Jul	1,5	1,2
Ago	1,3	1,4
Set	1,3	1,4
Out	1,3	1,4
Nov	1,4	1,3
Dez	1,3	1,4

Tem-se que, em média, de fevereiro a junho as vazões de entrada no reservatório Engenheiro Ávidos foram iguais ou superiores a vazão estabelecida pelo PPH-PPA, conseqüentemente as vazões de entrada no reservatório Lagoa do Arroz no mesmo período apresentam-se inferiores ao estabelecido pelo PPH-PPA. Nos outros meses, as vazões de entrada no reservatório Engenheiro Ávidos foram inferiores à vazão estabelecida pelo PRH-PPA, enquanto no reservatório Lagoa do Arroz, no mesmo período, apresentaram-se superiores.

Como neste cenário todas as demandas foram atendidas plenamente, os valores médios da Tabela 31 podem ser utilizados como guias para a operação do sistema.

7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que o modelo de otimização utilizado nesta pesquisa constitui-se numa importante ferramenta para auxiliar na compreensão holística do conjunto hídrico tomado para estudo, de onde se podem derivar soluções ótimas sob a perspectiva multiobjetivo, respeitando restrições de caracteres físicos, jurídicos-administrativos e socioambientais. Da mesma forma, tornou-se possível avaliar a performance desde o mais elementar componente até o sistema como um todo, provendo o analista de recursos hídricos de valiosas informações em todas as camadas de operação do agrupamento hídrico.

A divisão em cenários foi bastante útil para simular situações prováveis, bem como a estabelecer extremos, limites de comparação e referenciais, a fim de contribuir para a assertividade das análises e para subsidiar a tomada da melhor decisão entre todas as possíveis. Concluiu-se, pois, que os cenários segundo e terceiro são extremos e, por isso, prejudiciais aos subsistemas que preteriram – Peixe e Alto Piranhas, respectivamente.

O Cenário C1 (aquele recomendado pelo instrumento de gestão da bacia) apresentou-se como o mais próximo da situação ideal, não obstante as falhas de atendimento observadas no PISG e na AD6, fato que demonstrou a necessidade de ajustes de gerenciamento para que a primeira situação se aproxime ainda mais da condição ótima.

O Cenário C4 se apresentou como a situação ótima, provando que é possível fazer o melhor uso, de forma racional e integrada, dos recursos hídricos de que dispõe o sistema. A mencionada possibilidade é tão maior quanto maior for a capacidade de os gerentes realizarem um monitoramento e controle eficaz e em menor escala de tempo, fazendo com que seja entregue em termos de vazão exógena para cada subsistema apenas o estritamente necessário ao consumo projetado para aquele determinado período ou época do ano.

Percebeu-se ainda que a UPH Alto Piranhas, notadamente impulsionada pelas elevadas demandas do reservatório São Gonçalo, é extremamente estressada do ponto de vista hídrico, e seus índices de desempenho revelaram que há demandas reprimidas e que as potencialidades estão praticamente esgotadas, estando, portanto, demasiada e urgentemente carentes de um socorro hídrico exógeno.

Quanto à UPH Peixe, notou-se estar um pouco menos sobrecarregada e que tem potencial para expandir suas disponibilidades através de obras estruturantes principalmente na porção setentrional da bacia, através da construção de novos ou da recuperação e ampliação

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

de antigos reservatórios e toda a sua estrutura hídrica, que podem figurar estratégicos na promoção do desenvolvimento global da região.

Quanto aos reservatórios, observou-se que têm um importante papel na administração geral do sistema, tendo se apresentado os reservatórios Engenheiro Ávidos e Lagoa do Arroz com bastante potencial hídrico a ser explorado, ao contrário do açude São Gonçalo cujos índices de eficiência apontam para o esgotamento de suas capacidades.

Percebeu-se que a proposta de distribuição da vazão exógena contida no Plano de Recursos Hídricos da bacia, embora atenua sobremaneira a situação de escassez hídrica, ainda necessita de ajustes para que falhas havidas em importantes componentes do sistema hídrico possam ser adequadamente corrigidas.

Os desdobramentos de uma possível situação em que apenas uma das vertentes recebesse o reforço hídrico exógeno são negativos, uma vez que no Cenário C2 (em que foi por hipótese preferida a UPH Alto Piranhas) toda a água ali disponível foi utilizada para sanar as falhas de atendimento daquela região, tendo ficado com maior prejuízo a área difusa 6. E no Cenário C3 (quando hipoteticamente a vazão exógena fluiu exclusivamente pela UPH Peixe) o PISG foi intensamente prejudicado, apresentando alta vulnerabilidade e baixa confiabilidade.

A confiabilidade na entrega da vazão residual na fronteira entre Paraíba e Rio Grande do Norte foi máxima em todos os cenários, demonstrando que é suficiente o valor de vazão que toca ao estado paraibano para o atendimento de suas demandas hídricas, conforme foi observado no quarto cenário. Contudo, por se tratar de uma restrição imposta ao modelo, a mencionada confiabilidade máxima pode ter ocorrido às custas das falhas de alguns importantes componentes do sistema nas três primeiras situações. Entretanto, notou-se que nos anos de 2018 e 2019 a vazão na fronteira sempre foi acima do estabelecido pelo PRH-PPA.

Desse modo, para pesquisas futuras, pode-se recomendar:

1. Verificação do valor da vazão entregue pelo PISF (2,7 m³/s), avaliando anos em que seria possível aumentá-lo como também aqueles em que poderia diminuí-lo;
2. A possibilidade e os impactos resultantes da inclusão da bacia do Rio Piancó enquanto receptora de uma parcela de vazão exógena do PISF;

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

3. A suficiência da vazão de 1,7 m³/s previamente disponibilizada ao Estado do Rio Grande do Norte para atendimento das demandas ao longo do Rio Piranhas-Açu em toda a sua porção potiguar até a foz no município de Macau - RN.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA. **Volume dos Açudes**. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website>>. Acesso em: 18 set. 2019.

AESA. **Meteorologia - Chuvas**. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/>>. Acesso em: 9 mar. 2020a.

AESA. **Volume Mensal**. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/volume-mensal/?tipo=anterior>>. Acesso em: 9 mar. 2020b.

AHMAD, A. et al. Reservoir optimization in water resources: A review. **Water Resources Management**, v. 28, n. 11, p. 3391–3405, 19 set. 2014.

ANA. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu. **Resumo Executivo**, p. 265, 2016.

ANA. Reservatórios do Semiárido Brasileiro - Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação. **Anexo B - Piancó-Piranhas-Açu**, p. 140, 2017.

ANA. Resolução conjunta ANA/AESA-PB n° 76, de 09 de outubro de 2018. **Resolução conjunta**, 2018a.

ANA. Resolução conjunta ANA/AESA-PB n° 75, de 09 de outubro de 2018. **Resolução conjunta**, p. 3, 2018b.

ANA. Resolução conjunta ANA/IGARN/AESA n° 65, de 09 de setembro de 2019. **Resolução conjunta**, 2019.

ARAGÃO, T. G. Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo AcquaNet. **Dissertação de Mestrado**, p. 125, 2008.

BARBOSA, P. S. F. Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**, p. 97–163, 2002.

BELAINEH, G.; PERALTA, R. C.; HUGHES, T. C. Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 125, n. 3, p. 154–161, 1999.

BRAGA, B.; GOBETTI, L. Análise Multiobjetivo. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**, p. 361–420, 2002.

BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Lei N° 9.433/1997**, 1997.

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

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

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

BRITO, V. DA C. Análise de Perdas de Água por Meio de Otimização para o Projeto de Integração do Rio São Francisco, Eixo Leste – Bacia do Rio Paraíba. **Dissertação de**

Mestrado, p. 108, 2019.

CAMPOLINA, B. O Planejamento Regional e Urbano no Brasil. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 1, n. 2, p. 345–348, 2014.

CARVALHO, D. F. et al. Otimização do Uso da Água no Perímetro Irrigado do Gorutuba, Utilizando a Técnica da Programação Linear. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 203–209, 2000.

CASTRO, C. N. Transposição do Rio São Francisco: Análise de Oportunidade do Projeto. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA**, 2011.

CELESTE, A. B. Determinação e Análise de Indicadores de Desempenho e de Sustentabilidade de Seis Açudes na Bacia do Rio Piancó-PB e de suas Potenciais Demandas. **Dissertação de Mestrado**, p. 119, 2006.

CHOONG, S. M.; EL-SHAFIE, A. State-of-the-Art for Modelling Reservoir Inflows and Management Optimization. **Water Resources Management**, v. 29, n. 4, p. 1267–1282, 2014.

CREACO, E.; PEZZINGA, G. Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks. **Environmental Modelling and Software**, v. 69, p. 308–318, 2015.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A. Análise de Alterações na Receita Líquida de um Perímetro Irrigado no Semi-árido sob Condições de Variações Hídricas e Econômicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 3, p. 39–53, 2005.

FARIAS, E. E. V. DE; CURI, W. F.; DINIZ, L. DA S. São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators. **Rbrh**, v. 22, n. 0, 2017.

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**, p. 142, 2009.

FERNÁNDEZ-ARROYO, J.; RODRÍGUEZ-MARÍN, F. Los procesos de enseñanza-aprendizaje relacionados con el agua en el marco de las hipótesis de transición. **Revista Eureka**, v. 14, n. 1, p. 227–243, 2017.

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

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. **Climatologia do Estado da Paraíba**. 1^a ed. Campina Grande - PB: EDUFPG, 2017.

GIL, F. V. Los conflictos sobre el trasvase del Ebro y del Tajo. **M+A. Revista Electrónica de Medioambiente**, v. 2, n. 1, p. 56–72, 2006.

GUERRA, O. A batalha das secas. **Memorial da Seca**, p. 163, 1981.

HABIBI DAVIJANI, M. et al. Multi-Objective Optimization Model for the Allocation of Water Resources in Arid Regions Based on the Maximization of Socioeconomic Efficiency. **Water Resources Management**, v. 30, n. 3, p. 927–946, 2016.

HADDAD, O. B. et al. Optimal Cultivation Rules in Multi-Crop Irrigation Areas. **Irrigation and Drainage**, v. 58, n. 1, p. 38–49, 2009.

CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HANAK, E. et al. Managing California's Water. p. 482, 2011.

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.

HEYDARI, M.; OTHMAN, F.; QADERI, K. Developing optimal reservoir operation for multiple and multipurpose reservoirs using mathematical programming. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://memoria.ibge.gov.br/sinteses-historicas/historicos-dos-censos/censos-demograficos.html>>. Acesso em: 15 set. 2019.

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. 93–101, 2004.

LALEHZARI, R. et al. Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 1, p. 1–10, 2016.

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

LIMA, L. **Ministro exalta autonomia do Dnocs e mantém data de Transposição**. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/politica/ministro-exalta-autonomia-do-dnocs-e-mantem-data-de-transposicao-1.2191136>>. Acesso em: 30 jan. 2020.

LIU, P. et al. Optimal design of seasonal flood limited water levels and its application for the Three Gorges Reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 1045–1053, 2015.

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

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

LUCENA, D. P. M. M. Simulações da implantação de ações de gestão no açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande – PB e região. **Dissertação de Mestrado**, 2018.

MATEUS, G. R.; LUNA, H. P. C. Programação Não Linear. p. 289, 1986.

MATEUS, M. C.; TULLOS, D. Reliability, sensitivity, and vulnerability of reservoir operations under climate change. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 4, p. 1–14, 2017.

MOHAN, S.; RAIPURE, D. M. Multiobjective Analysis of Multireservoir System. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, p. 356–380, 1992.

NEEDHAM, J. T. et al. Linear Programming for Flood Control in the Iowa and Des Moines Rivers. **Journal Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 3, p. 118–127, 2000.

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 de Mestrado**, p. 205, 2018.
- NUNES, T. H. C. A Gestão do Reservatório Epitácio Pessoa e Regras de Operação Otimizadas. **Dissertação de Mestrado**, p. 75, 2015.
- ODAN, F. K.; RIBEIRO REIS, L. F.; KAPELAN, Z. Real-time multiobjective optimization of operation of water supply systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 9, p. 1–11, 2015.
- 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 de Mestrado**, p. 129, 2013.
- OLIVEIRA, J. A.; LANNA, A. E. L. Otimização de um Sistema de Reservatórios Atendendo a Múltiplos Usos no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 123–141, 1997.
- OVERTON, D. E.; MEADOWS, M. E. Introduction and Modeling Concepts. In: **Stormwater Modeling**. Nova Iorque: Academic Press, 1976. p. 355.
- PARAÍBA. Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba: Bacia dos rios Piancó e Alto Piranhas. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba**, 1996a.
- PARAÍBA. Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba: Sub-bacia do Médio Piranhas. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba**, 1996b.
- PARAÍBA. Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba: Sub-bacia do Rio do Peixe. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba**, 1996c.
- RANI, D.; MOREIRA, M. M. Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. **Water Resources Management**, v. 24, n. 6, p. 1107–1138, 2010.
- RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; ALBUQUERQUE, J. P. T. **Considerações sobre a gestão dos recursos hídricos do açude Epitácio Pessoa – Boqueirão, na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba em cenário de vindouros anos secos**. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. **Anais...João Pessoa - PB**: 2012
- RIGHETTO, A. M.; FILHO, J. A. G. Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 19–29, 2003.
- SANTOS, S. et al. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I : Metodologia. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 49–60, 2011.
- SANTOS, V. DA S. Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos. **Dissertação de Mestrado**, 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**, p. 170, 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, 2004.

- SIMONOVIC, S. P. Reservoir System Analysis: Closing Gap between Theory and Practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, n. 3, p. 262–280, 1992.
- SINGH, A. Land and water management planning for increasing farm income in irrigated dry areas. **Land Use Policy**, v. 42, p. 244–250, 2015.
- SNIS. **SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Disponível em: <<http://app3.cidades.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em: 15 set. 2019.
- TEEGAVARAPU, R. S. V.; SIMONOVIC, S. P. Optimal Operation of Water Resource Systems: Trade-Offs Between Modeling and Practical Solutions. **Integrated Water Resources Management**, p. 257–263, 2001.
- VIEIRA, V. P. P. B. Recursos Hídricos e o Desenvolvimento Sustentável do Semi-árido Nordeste. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 91–107, 1996.
- WANG, M.; LI, C. An institutional analysis of China's South-to-North water diversion. **Thesis Eleven**, v. 150, n. 1, p. 68–80, 2019.
- WURBS, R. A. Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models. **Technical Report**, n. 282, 2005.
- YANG, G. et al. Multi-Objective Operating Rules for Danjiangkou Reservoir Under Climate Change. **Water Resources Management**, v. 30, n. 3, p. 1183–1202, 2016.
- YEH, W. W.-G. Reservoir Management and Operations Models: A State of the Art Review. **Water Resources Research**, v. 21, n. 12, p. 1797–1818, 1 dez. 1985.
- YOO, J. H. Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model. **Journal of Hydrology**, v. 376, n. 1–2, p. 182–187, 2009.
- YU, Y. et al. Assessment of multi-objective reservoir operation in the middle and lower Yangtze River based on a flow regime influenced by the Three Gorges Project. **Ecological Informatics**, v. 38, n. 1, p. 115–125, 2017.
- ZHANG, W. et al. Operating rules of irrigation reservoir under climate change and its application for the Dongwushi Reservoir in China. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 16, p. 34–44, 2017.

ANEXOS

Tabela 32. Anexo 1: Curva cota-área-volume do reservatório Engenheiro Ávidos.

Curva Cota-Área-Volume		
Cota (m)	Área (ha)	Volume (hm³)
290	49,910	1,194
291	68,791	1,783
292	94,291	2,593
293	124,520	3,683
294	161,127	5,104
295	202,384	6,918
296	247,195	9,161
297	298,354	11,883
298	386,230	15,238
299	454,332	19,450
300	523,104	24,331
301	598,656	29,928
302	687,017	36,347
303	775,647	43,652
304	881,628	51,923
305	1006,901	61,363
306	1135,649	72,056
307	1273,282	84,110
308	1412,929	97,543
309	1555,693	112,382
310	1708,897	128,697
311	1873,166	146,603
312	2046,249	166,200
313	2228,637	187,562
314	2435,448	210,863
315	2648,425	236,267
316	2867,400	263,855
317	3085,311	293,617

Tabela 33. Anexo 2: Curva cota-área-volume do reservatório São Gonçalo.

Curva Cota-Área-Volume		
Cota (m)	Área (ha)	Volume (hm³)
226	0,00039	0,000
227	0,16952	0,000
228	1,90504	0,009
229	5,94522	0,047
230	13,93765	0,142
231	28,28134	0,346
232	48,19130	0,729
233	65,61394	1,302
234	82,39189	2,043
235	100,81030	2,957
236	121,16183	4,063
237	147,81561	5,406
238	169,10011	7,001
239	185,62059	8,774
240	204,43528	10,719
241	282,39613	13,241
242	330,99795	16,302
243	383,82118	19,871
244	446,25195	24,017
245	514,95853	28,818
246	588,54109	34,325
247	661,55234	40,582

Tabela 34. Anexo 3: Curva cota-área-volume do reservatório Lagoa do Arroz.

Curva Cota-Área-Volume		
Cota (m)	Área (ha)	Volume (hm³)
77	0,099	0,0002
78	1,214	0,0063
79	4,004	0,0290
80	12,676	0,1090
81	23,994	0,2939
82	31,744	0,5734
83	37,846	0,9223
84	44,116	1,3315
85	52,063	1,8104
86	61,164	2,3753
87	73,478	3,0454
88	91,276	3,8622
89	118,164	4,8999
90	150,981	6,2460
91	182,389	7,9166
92	226,304	9,8879
93	317,456	12,7120
94	391,256	16,2581
95	477,328	20,5902
96	571,170	25,8279
97	668,082	32,0171
98	772,703	39,2061
99	893,201	47,5309
100	1025,957	57,1267
101	1161,651	68,0582
102	1305,643	80,3885

ANEXOS

Tabela 35. Anexo 4: Demandas de abastecimento urbano por município com base na projeção populacional para o ano de 2030.

MUNICÍPIOS	CONSUMO PER CAPITA (L/HAB/DIA)	PROJ. POPULACIONAL - 2020 (HAB)	CONSUMO (M ³ /ANO)	PROJ. POPULACIONAL - 2030 (HAB)	CONSUMO (M ³ /ANO)
Belém do Brejo do Cruz	118,28	6.990	301.761,81	7.059	304.756,95
Bernardino Batista	88,65	3.550	114.879,63	4.063	131.462,39
Bom Jesus	135,20	2.716	134.032,62	2.990	147.570,59
Bom Sucesso	116,60	4.665	198.533,97	4.447	189.242,26
Bonito de Santa Fé	134,00	12.192	596.314,59	13.888	679.246,66
Brejo do Cruz	132,37	14.227	687.386,89	15.992	772.645,21
Brejo dos Santos	109,20	6.533	260.373,66	7.036	280.453,14
Cachoeira dos Índios	137,80	10.467	526.449,65	12.375	622.410,59
Cajazeiras	169,60	62.191	3.849.889,51	65.159	4.033.605,73
Catolé do Rocha	138,40	31.011	1.566.555,93	33.661	1.700.424,16
Jericó	105,78	7.747	299.123,71	7.910	305.387,77
Joca Claudino (Santarém)	107,11	2.669	104.332,33	2.722	106.418,17
Lagoa	94,10	4.585	157.490,20	4.540	155.942,39
Lastro	145,72	2.670	141.987,84	2.488	132.314,45
Marizópolis	157,06	6.632	380.202,28	7.344	420.995,08
Mato Grosso	91,50	2.942	98.239,16	3.119	104.181,74
Nazarezinho	120,30	7.296	320.374,25	7.332	321.960,26
Paulista	148,84	12.296	667.993,80	12.855	698.357,16
Poço Dantas	133,58	3.783	184.454,80	3.765	183.546,16
Poço de José de Moura	132,38	4.905	237.025,76	5.223	252.347,16
Riacho dos Cavalos	154,50	8.034	453.074,69	8.114	457.571,68
S. João do Rio do Peixe	183,10	18.317	1.224.134,49	18.714	1.250.710,16
Santa Cruz	117,20	6.365	272.282,83	6.397	273.630,76
Santa Helena	116,60	5.914	251.678,43	5.856	249.204,95
São Bento	134,70	34.940	1.717.864,07	38.994	1.917.162,91
São Francisco	102,22	3.360	125.361,29	3.327	124.129,25
Sousa	261,60	69.991	6.683.013,24	74.191	7.084.099,05

ANEXOS

Uiraúna	118,70	15.283	662.132,08	15.894	688.604,15
Vieirópolis	123,74	5.403	244.030,15	5.913	267.059,48
Vista Serrana	132,91	3.828	185.713,77	4.304	208.807,08