



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E
REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

VANESSA CARDIM DE AGUIAR

**SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE RESERVATÓRIOS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DIANTE DE CENÁRIOS DE SECA
HIDROLÓGICA**

Recife

2019

VANESSA CARDIM DE AGUIAR

**SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE RESERVATÓRIOS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DIANTE DE CENÁRIOS DE SECA
HIDROLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A282s Aguiar, Vanessa Cardim de.
 Simulação do sistema de reservatórios do projeto de integração do rio
 São Francisco diante de cenários de seca hidrológica / Vanessa Cardim de
 Aguiar. – 2019.
 115 folhas, il., gráfs., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
 Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

 Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de
 Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de
 Recursos Hídricos em Rede Nacional, 2019.
 Inclui Referências e Anexos.

 1. Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. 2. Transposição de água
 entre bacias. 3. Otimização. 4. Sinergia hídrica. I. Cirilo, José Almir
 (Orientador). Ribeiro Neto, Alfredo. (Coorientador). II. Título.

UFPE

333.91 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-57

VANESSA CARDIM DE AGUIAR

**SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE RESERVATÓRIOS DO PROJETO DE
INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO DIANTE DE CENÁRIOS DE SECA
HIDROLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Aprovada em: 22/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

A minha querida vó materna, que partiu no ano de conclusão do mestrado, aos meus pais que sempre batalharam por minha educação e ao meu querido marido que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos. E às pessoas que de alguma forma contribuíram para essa conquista. Dedico.

AGRADECIMENTOS

Em especial ao meu querido orientador, José Almir Cirilo, por ter me concedido um tema tão importante e atual como o Projeto de Integração do Rio São Francisco, importante empreendimento que visa atender regiões desabastecidas de água, transformando a vida de milhões de brasileiros que precisam do recurso para sobreviver com dignidade. Tive sorte de ter sido orientada por um professor tão comprometido e dedicado com seus alunos e com a vida acadêmica e profissional, sempre dividindo com todos o seu conhecimento, contribuindo com o crescimento de cada um.

A minha mãe Anita, pelo seu esforço em dar uma boa educação aos seus filhos, além de todo amor e carinho, ensinando o melhor caminho a seguir. Ao meu pai Cristiano que me apoiou nos momentos mais difíceis. Aos meus irmãos Clarissa e André, que compreenderam minha distância no período em que estive ocupada trabalhando e estudando.

Ao meu marido Victor pelo seu apoio nas etapas do mestrado desde a inscrição até sua conclusão, pela paciência com minha ausência em viagens realizadas e nos finais de semanas que estive estudando e escrevendo.

A minha tia Anete, segunda mãe que sempre me apoiou em tudo que precisei e por cuidar tão bem de minha querida vó Decinha, que se foi a um ano fazendo muita falta, mas que acredito estar num lugar bem melhor.

Aos meus padrinhos Arnaldo e Nilza que me apoiaram desde o início do curso superior em Engenharia Civil e em toda minha vida, sendo padrinhos presentes e amáveis.

A minha cunhada Lidiane e aos meus sobrinhos Maria Alice e João que enchem minha vida de alegria com sorrisos e brincadeiras.

Aos meus sogros Zenaide e Manuel que são como pais e sempre nos apoiaram em tudo e ao meu cunhado Plínio com toda sua simpatia e paciência.

As minhas amigas Alessandra, Rebeka e Fabíola, que entenderam minha ausência em algumas ocasiões e sempre torceram e se orgulharam de mim, assim como eu me orgulho delas e mantemos a amizade até hoje. A minha querida diarista Sandra, que me ajudou no período em que estive estudando, mantendo meu ambiente de estudo limpo e arrumado.

Aos meus queridos amigos do trabalho: Arquimedes, quem me encaminhou o e-mail para a seleção do mestrado; Sheila, Daniela Gurgel e Tercia, vizinhas de mesa, pelas trocas diárias sobre assuntos relacionados ao trabalho e a vida em geral; a Josiane Holz, que separava um tempinho para conversarmos; a Sonali, minha chefe, pela dispensa para cursar o mestrado e por sua paciência nos dias em que estive ausente do trabalho; a Robson que me

aconselhou em muitos momentos com objetividade e clareza; a Douglas, com suas trocas sobre assuntos relacionados ao Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco; a Karina pelo apoio dentro e fora do trabalho; a Daniela Kyrillos, quem me indicou acertadamente procurar professor Almir Cirilo para ser meu orientador; a Meuser, sempre disposto a dividir seu conhecimentos profissionais e acadêmicos; a Heverton que sempre que pôde, realizou algumas tarefas de minha responsabilidade quando estive ausente do trabalho para estar na universidade e a Roberto sempre muito prestativo e paciente. Agradeço a Companhia Hidrelétrica do São Francisco – Chesf - onde trabalho há cinco anos, considerada uma empresa de grande importância para toda a sociedade.

As minhas amigas do mestrado: Andréia, Ana e Paloma por toda troca de assuntos na área de segurança alimentar e biologia; a Lourdes e Camylla, com quem dividi quarto em algumas viagens do mestrado; Ilana e Lorena pelas conversas nos momentos do almoço. Aos meus amigos: Pedro, Ericarlos, Bartolomeu, Joaquim, Davi, Renato e Tarciano, pelas trocas em assuntos relacionadas a vida profissional e acadêmica.

Aos meus professores da UFPE, em especial ao Professor Alfredo, que sempre apoiou muito a turma; a professora Suzana, com toda sua delicadeza e presteza, nas etapas do mestrado; as professoras Renata e Maria do Carmo, que nos deram total apoio no envio dos artigos para participação do nosso primeiro Simpósio em Recursos Hídricos. Aos demais professores, Jaime, Roberto, Sylvana, Sandro, Abelardo e ao coordenador do ProfÁgua, professor Jefferson Nascimento.

Agradeço ao Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Agora é encararmos o destino. E salvarmos o que resta. É aprendermos com o nordestino. Que pra seca se adestra. E termos como guias os indígenas. E determos o desmate. E não agirmos que nem alienígenas. No nosso próprio habitat. Que bem maior que o homem é a Terra. A Terra e seu arredor. Que encerra a vida aqui na Terra, não se encerra. A vida, coisa maior. Que não existe onde não existe água. E que há onde há arte. Que nos alaga e nos alegra quando a mágoa. A alma nos parte. (Lenine; Rennó, 2015).

RESUMO

A região Nordeste apresenta o clima semiárido em quase toda sua extensão e os efeitos da seca, ainda hoje, provocam fome, miséria e outros problemas sociais na região escassa em recursos hídricos e econômicos. Além disso, a má distribuição de corpos hídricos perenes tem feito com que as pessoas armazenem água de riachos e rios, em pequenos reservatórios durante o período úmido para posterior utilização nos períodos secos. Outro fator preocupante está relacionado à má gestão pública, que não apresenta projetos locais que venham a melhorar a vida dessas pessoas. Já não sem tempo, foi adotada como medida estrutural para atender as demandas da região semiárida, o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional – PISF que está sendo concluído após longas negociações e discussões com representantes dos governos dos estados, a União e a sociedade civil. Além do abastecimento humano e animal como prioridade, há expectativa de que o PISF possa promover o desenvolvimento social e econômico da região. Nesse contexto, busca-se no estudo avaliar a oferta hídrica que o projeto poderá assegurar aos principais reservatórios que irão abastecer as cidades contempladas com a transferência de água do rio São Francisco. Questões importantes carecem de melhor avaliação, principalmente no que se refere à sua eficácia. Uma forma de estudar a eficiência do projeto é o cálculo de sua sinergia hídrica, ou seja, verificar o aumento da capacidade de regularização dos reservatórios a partir da quantidade de água transportada da bacia do rio São Francisco. As simulações da disponibilidade hídrica nas bacias receptoras foram realizadas com o modelo chuva-vazão MODHAC e com modelo de operação do sistema de reservatórios para otimizar o aproveitamento das Fontes locais. A sinergia foi avaliada para os períodos de 1933 a 1991, 1933 a 2001 e 1933 a 2017, considerando uma operação fictícia do reservatório de Sobradinho e para o período de 1979 a 2017, com base na operação real. Todos os períodos foram simulados para as garantias de 90%, 95%, 99% e 100%. Com os resultados verificou-se que a operação pode ser otimizada para que as regiões sejam atendidas como o esperado no projeto inicial.

Palavras-chave: Transposição de água entre bacias. Otimização. Sinergia hídrica.

ABSTRACT

The Northeast region has a semi-arid climate in almost all its extension and the effects of drought still cause hunger, misery and other social problems in the region scarce in water and economic resources. In addition, poor distribution of perennial water bodies has caused people to store water from streams and rivers in small reservoirs during the wet season for later use in the dry periods. Another worrying factor is related to poor public management, which does not present local projects that will improve the lives of these people. No longer without time, was adopted as a structural measure to meet the demands of the semiarid region, the Project of Integration of the São Francisco River with the Northeast Basins - PISF that is being concluded after long negotiations and discussions with representatives of state governments, the Union and civil society. In addition to human and animal supply as a priority, the PISF is expected to promote the social and economic development of the region. In this context, the study seeks to evaluate the water supply that the project will be able to assure to the main reservoirs that will supply the cities contemplated with the transfer of water from the São Francisco River. Important issues need further evaluation, especially as regards their effectiveness. One way to study the project's efficiency is to calculate its water synergy, that is, to verify the increase in reservoir regularization capacity from the amount of water transported from the São Francisco river basin. Water availability simulations in the receiving basins were performed with the MODHAC rain-flow model and with the reservoir system operation model to optimize the use of local sources. The synergy was evaluated for the periods from 1933 to 1991, 1933 to 2001 and 1933 to 2017, considering a fictitious operation of the Sobradinho reservoir and from 1979 to 2017, based on the actual operation. All periods have been simulated for 90%, 95%, 99% and 100% guarantees. With the results it was found that the operation can be optimized so that the regions are served as expected in the initial project.

Keywords: Water transfer between basins. Optimization. Water synergy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Bacias/Municípios que deverão ser atendidos pelo PISF por Estado.	28
Figura 1 - Bacias que serão atendidas pelo PISF com os Eixos Norte e Leste.	30
Quadro 2 - Breve histórico da idealização e concretização do PISF.....	32
Quadro 3 - Obras de Transposição de bacias hidrográficas construídas e em construção em outras regiões do mundo.	36
Figura 2 - Mapa esquemático do PISF com os Eixos Norte e Leste e os Trechos I, II, III, IV, V e VI.....	41
Quadro 4 - Lista de Reservatórios Estratégicos que compõem o PISF.....	42
Figura 3 - Percentuais de Volumes Úteis dos reservatórios contemplados pelo PISF ao final de 2017.....	43
Gráfico 1 - Curvas de operação para as defluências otimizadas em Sobradinho.....	47
Gráfico 2 - Variação do volume simulado para o reservatório de Sobradinho de 1933-2017 considerando a operação hipotética.....	48
Gráfico 3 - Variação de Volume de Sobradinho para o período de 1979-2017 considerando a operação real.....	49
Figura 4 - Delimitação das sub-bacias e rede de drenagem aos reservatórios estratégicos do PISF analisados.	51
Figura 5 - Traçado do Polígono de Thiessen e estações pluviométricas adotadas no estudo.	53
Figura 6 - Esquema dos reservatórios no MODHAC.....	59
Quadro 5 - Parâmetros utilizados na calibração do MODHAC.	61
Figura 7 - Regionalização de Parâmetros do MODHAC para região semiárida do Nordeste.	62
Figura 8 - Modelagem da estação 37340000 – Piancó, período 1964-1981 (Parâmetros e ETP de Piancó).....	63
Figura 9 - Modelagem da estação 37340000 – Piancó, período 1982-1999 (Parâmetros e ETP de Piancó).....	63

Figura 10 - Modelagem da estação 37340000 – Piancó, período 1999-2006 (Parâmetros e ETP de Piancó).....	64
Figura 11 - Planilha de Otimização	66
Figura 12 - Parâmetros do Solver	67
Figura 13 - Diagrama Unifilar da captação do Eixo Norte, Trechos I e VI e reservatórios de Entremontes e Chapéu.	72
Figura 14 - Diagrama Unifilar do Trecho II e reservatórios de Engenheiro Ávidos, São Gonçalo, Curema e Mãe D'água – PB e Armando Ribeiro Gonçalves - RN.	76
Figura 15 - Diagrama Unifilar do Trecho III e reservatórios de Castanhão e Orós-CE.....	78
Figura 16 - Diagrama Unifilar do Trecho IV e os reservatórios de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi - RN.	80
Figura 17 - Diagrama Unifilar do Trecho V do Eixo Leste e os reservatórios de Barra de Juá e Poço da Cruz - PE e Poções e Epitácio Pessoa - PB.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas dos Trechos do PISF.....	39
Tabela 2 - Vazões máximas por eixo do PISF e estados.....	45
Tabela 3 - Vazões mínimas estabelecidas nos portais estaduais do PISF.	45
Tabela 4 - Áreas de contribuição e coordenadas dos reservatórios estratégicos do PISF.	52
Tabela 5 - Evapotranspiração Potencial (Normais Climatológicas) utilizada nas simulações.	54
Tabela 6 - Descrição dos parâmetros de calibração.	59
Tabela 7 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios de Entremontes e Chapéu.	74
Tabela 8 - Médias das entradas e saídas de vazões da planilha de otimização dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Armando Ribeiro Gonçalves	77
Tabela 9 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios Castanhão.	79
Tabela 10 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi.	81
Tabela 11 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios de Barra de Juá, Poço da Cruz, Poções e Epitácio Pessoa.	84
Tabela 12 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Entremontes e Chapéu (T-VI).....	85
Tabela 13 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Armando Ribeiro Gonçalves, Engenheiro Ávidos, São Gonçalo (T-II).....	86
Tabela 14 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para o reservatório de Castanhão (T-III).	87
Tabela 15 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi (T- IV).	87

Tabela 16 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Barra de Juá, Poço da Cruz, Poções e Epitácio Pessoa (T-V).	88
---	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AESA	Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
AERHs	Áreas de Elevado Risco Hídrico
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CB-T	Colorado Big Thompson
CERTOHO	Certificado de Avaliação da Sustentabilidade da Obra Hídrica
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Chesf	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EB	Estação de Bombeamento
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
FUNCATE	Fundação de Ciência, Aplicação e Tecnologias Espaciais
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPA	Instituto Agrônomo de Pernambuco
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
MDT	Modelo Digital do Terreno

MI	Ministério da Integração Nacional
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MNT	Modelo Numérico do Terreno
MODHAC	Modelo Hidrológico Auto Calibrável
NCWCD	Northern Colorado Water Conservancy District
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONGs	Organizações não governamentais
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PBHSF	Plano da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
PERH	Política Estadual de Recursos Hídricos
PISF	Projeto de Integração do rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PPA	Plano Plurianual
PROFÁGUA	Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RIMA	Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente
RH	Recursos Hídricos
RMR	Região Metropolitana do Recife
ROCR	Regra de Operação de Controle Rígido
ROVM	Regra de Operação com o Volume Mínimo
SIG/GIS	Sistema de Informação Geográfica/ Geographic Information System
SMHS	Snowy Mountains Hydroelectric Scheme
SOE-ANA	Superintendência de Operações e Eventos Críticos da Agência Nacional de Águas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Usina Hidroelétrica

UPH	Unidade de Planejamento Hídrico
UPs	Unidades de Planejamento
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
VU	Volume Útil
WWTP	Wanjiashai Water Transfer Project

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS DO ESTUDO	23
1.1.1	Objetivo Geral	23
1.1.2	Objetivos Específicos.....	23
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	CRISE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO E A BUSCA DE SOLUÇÕES	25
2.2	TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO	27
2.2.1	Breve Histórico	31
3	ESTUDO DE CASO	38
3.1	O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO	38
3.1.1	Trechos do Eixo Norte	39
3.1.1.1	<i>Trecho I</i>	39
3.1.1.2	<i>Trecho II</i>	40
3.1.1.3	<i>Trecho III.....</i>	40
3.1.1.4	<i>Trecho IV.....</i>	40
3.1.1.5	<i>Trecho VI.....</i>	40
3.1.2	Trecho do Eixo Leste	40
3.1.2.1	<i>Trecho V</i>	41
3.1.3	Reservatórios do Projeto de Integração do São Francisco.....	42
3.2	CONDICIONANTES DO SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO.....	44
3.2.1	Operação do PISF	44
3.2.2	Operação Hipotética do Reservatório de Sobradinho	46
3.2.3	Operação Real do Reservatório de Sobradinho	48
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	50
4.2	DADOS HIDROLÓGICOS	53
4.2.1	Dados de Precipitação.....	53
4.2.2	Dados de Evapotranspiração Potencial	54

4.3	ESTRUTURA DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	55
4.3.1	Modelo Hidrológico Auto-Calibrável - MODHAC	57
4.3.1.1	<i>Parâmetros Utilizados</i>	60
4.3.2	Otimização das Vazões Regularizáveis	64
4.4	SINERGIA HÍDRICA	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1	SIMULAÇÕES DO EIXO NORTE DO PISF	70
5.1.1	Trecho I e Trecho IV	71
5.1.2	Trecho II	75
5.1.3	Trecho III	78
5.1.4	Trecho IV	80
5.2	SIMULAÇÕES DO EIXO LESTE DO PISF	82
5.2.1	Trecho V	82
5.3	SINERGIA HÍDRICA DOS TRECHOS SIMULADOS	85
6	CONCLUSÕES	90
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS	92
	ANEXO A - POSTOS PLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DAS MÉDIAS PONDERADAS DE CADA RESERVATÓRIO	96
	ANEXO B – CURVAS E TABELAS DE COTA X ÁREA X VOLUME DOS RESERVATÓRIOS ESTUDADOS	106

1 INTRODUÇÃO

O Brasil dispõe de 12% da água doce do mundo, no entanto os recursos hídricos são distribuídos de forma desigual no seu território: enquanto o norte do país apresenta abundância de água, no Nordeste brasileiro predominam as regiões semiáridas (OCDE, 2015). No semiárido, espalhado em aproximadamente 90% da região Nordeste, vive cerca de 25 milhões de pessoas, quase 12% da população brasileira (BRASIL, 2017). A região é marcada pela seca hidrológica, que tem apresentado seus efeitos de formas variadas como a fome, pobreza, o desemprego rural e a consequente migração da população rural para os centros urbanos, acarretando outros problemas sociais.

De acordo com a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE (2017) os critérios técnicos e científicos estabelecidos para a delimitação do semiárido são: médias pluviométricas de até 800 mm/ano, índice de aridez de até 0,5 e percentual médio diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%.

A região semiárida abrange os estados de Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais. É cortada por apenas dois grandes rios perenes de porte, o rio Paraíba e o rio São Francisco (BRASIL, 2006). Estudos de engenharia mais antigos encontraram como solução a construção de açudes e a perfuração de poços para a má distribuição dos recursos hídricos. Dessa forma, o Nordeste brasileiro se tornou uma das regiões com maior índice de açudagem no mundo (ARAGÃO, 2008). A alternativa não resolve o problema de escassez hídrica em longo prazo, sendo necessárias outras soluções que visem abastecer a população durante todo o ano.

Com o baixo aproveitamento hídrico dos açudes foi necessário adotar medidas mais eficazes para atender as demandas da região e com isso, em janeiro de 2005 o Projeto de Transposição ou Projeto de Integração do Rio São Francisco com o Nordeste Setentrional – PISF foi aprovado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis - IBAMA junto ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. Além do abastecimento humano e animal como prioridade, o PISF é considerado um instrumento que poderá promover o desenvolvimento social, ambiental e econômico, atendendo a uma quantidade de aproximadamente 12 milhões de pessoas.

As mortes provocadas pela falta de água no passado mostram a face mais cruel da seca no semiárido nordestino, que causou também o êxodo da população que vivia na região rural para regiões urbanas como o Sudeste brasileiro. Já as cidades maiores, que estão inseridas no semiárido como Campina Grande, na Paraíba e Caruaru em Pernambuco, têm

suas demandas aumentadas devido ao crescimento populacional e o desenvolvimento econômico (CIRILO, 2008).

O parâmetro mínimo considerado para o bem-estar e o desenvolvimento de uma região, estabelecido pela Organização das Nações Unidas – ONU é de 1000 m³/hab/ano. Verificaram-se em diversos estudos disponibilidades de água por habitante, por ano, em regiões particularmente críticas como o leste da Paraíba, de 1030 m³/hab/ano, leste do Rio Grande do Norte, com 997 m³/hab/ano, Fortaleza, com 846 m³/hab/ano e leste de Pernambuco, com 819 m³/hab/ano (CIRILO, 2008).

Caruaru, com 360 mil habitantes, localizada no Agreste Central de Pernambuco, no auge da crise hídrica em 2016, teve o abastecimento limitado há um dia por mês (CIRILO, 2018). Com a implantação de novos sistemas, a situação de abastecimento da cidade melhorou. Porém, devido ao crescimento das cidades do seu entorno, a situação de abastecimento da região continua precária, uma vez que com a queda nas médias pluviométricas desde 2011, as chuvas ocorridas em 2018 não foram suficientes para a acumulação de água nos reservatórios.

A grande expectativa de minimizar a seca do Nordeste reincidiu sobre as águas do São Francisco. Campina Grande, 2ª maior cidade da Paraíba, com cerca de 410 mil habitantes, somente saiu do pré-colapso de abastecimento de água com a chegada das águas do São Francisco em 2017. As mudanças climáticas e as secas prolongadas dos últimos anos no Brasil podem reduzir o nível dos reservatórios ao ponto de tornar necessário o racionamento de energia (MOURINO, ASSIREAU, 2016).

Após anos de dependência exclusiva das águas do rio São Francisco para produção de energia elétrica, em 2002 com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA (Lei nº 10.438/2002) foi dado o primeiro passo importante para a produção de outras Fontes de energia no Brasil. A partir de 2014, o Brasil iniciou uma aceleração no processo de expansão da energia eólica em sua matriz energética, com incremento de 1 GW ao ano, elevando esse patamar e chegando a produzir 15,5 GW em março de 2019 (BEZERRA; 2019). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2019) cerca de 600 usinas eólicas foram implantadas no Brasil até agora e desse montante, 90% estão localizadas no Nordeste, representando 9% da potência instalada no país, terceira maior dentre as Fontes de energia.

A energia solar, ainda que tímida, foi outra Fonte que teve sua geração ampliada nos últimos anos e as usinas solares fotovoltaicas de grande porte agregaram 1,5% (551 MW) à matriz energética brasileira em 2019 (ANEEL, 2019). Considerando que o potencial

hidroelétrico do Nordeste se encontra próximo do seu esgotamento, já que no Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 (MME; EPE, 2017), não consta nenhum projeto de UHE situado no Nordeste. A tendência é o crescimento de Fontes de energia solar e eólica na complementaridade da matriz energética da região nordestina (BEZERRA; 2018).

De um modo geral, espera-se que no próximo período úmido, ocorram chuvas mais intensas para o enchimento dos reservatórios existentes. De acordo com Marengo (2011), na região semiárida os cenários de mudanças climáticas mais críticos sinalizam que o aumento da temperatura, resultaria no aumento da evaporação dos corpos hídricos e consequentemente na redução do escoamento e recarga dos aquíferos em até 70%. Os cenários apontaram também que a concentração do período chuvoso poderá diminuir, assim como a intensidade de precipitação.

Os benefícios que a Transposição do Rio São Francisco pode promover as bacias receptoras faz parte de várias pesquisas que avaliam se a transposição da água de um rio principal pode ocasionar, de fato, o aumento da capacidade de regularização dos reservatórios e se são adequadas para solucionar os problemas de regiões semiáridas. Estudos anteriores, realizados por Molinas (2005), Aragão (2008) e Guimarães (2016) apresentaram a eficiência do sistema.

Farias et al (2004) mediante a análise do reservatório de Castanhão (CE) simulado de forma integrada aos reservatórios de Atalho e Orós (CE), todos localizados na bacia do rio Jaguaribe, numa extensão de 60 anos (1930 a 1990), adotando o modelo de rede de fluxo para simulação das bacias hidrográficas, verificou que dada a adução de vazões exógenas, as bacias receptoras da Transposição do Rio São Francisco obtiveram ganhos de sinergia hídrica aos sistemas integrados de reservatórios. Concluíram que a oferta extra de água pode aumentar o aproveitamento das afluições naturais do rio e reduzir as perdas como evaporação e vertimentos de suas barragens.

Aragão (2008) realizou estudos referentes à operação e a avaliação da sinergia-hídrica advinda da transposição do rio São Francisco em quatro reservatórios da bacia do rio Paraíba. A autora simulou cenários de demandas hídricas que consideram apenas as demandas de abastecimento atual e cenários para demandas de abastecimento e irrigação dos perímetros considerando a transposição das vazões exógenas através do leito do rio ou através de adutoras. Além disso, considerou duas regras de operação dos reservatórios: a Regra de Operação Controle Rígido (ROCR), que só libera água a jusante do rio através de vertimentos e a Regra de Operação Volume Mínimo (ROVM) que permite manter o nível de um reservatório perto do mínimo. Concluiu que a sinergia hídrica positiva ocorreu nas

simulações de ambas as regras de operação baseadas nos cenários que incluem as águas transpostas através dos canais adutores e possibilita alocar um maior volume de água devido à redução das perdas de trânsito pelo leito do rio, por evaporação e por vertimento.

Diniz e Farias (2017) analisaram o desempenho de cenários de distribuição das águas em termos de perda hídrica na distribuição das águas transpostas do PISF para o estado da Paraíba através do Eixo Leste da transposição. Foram simuladas com o modelo Labsid AcquaNet e seus resultados demonstraram que a construção de adutoras pode diminuir a perda hídrica por infiltração e evaporação, aumentando o ganho social e consequentemente o aumento da população beneficiada.

A sinergia hídrica é a parcela de acréscimo de vazão regularizada pelo reservatório ou sistema de reservatórios, que ultrapassa o acréscimo decorrente da vazão aduzida trazendo um melhor aproveitamento das águas aduzidas naturalmente aos reservatórios, que sem adução de vazões exógenas, não eram aproveitadas e transformadas em vertimentos e evaporações (Farias *et al*, 2004). Para se determinar o ganho de sinergia hídrica de um sistema de reservatórios integrados é necessário quantificar todas as entradas e saídas de água, associadas a uma garantia de atendimento, bem como considerar os detalhes das características dos aproveitamentos como capacidade máxima de acumulação, a curva Cota-Área-Volume entre outras relações.

Para o estudo atual bem como o cálculo da sinergia hídrica do sistema de reservatórios do eixo Norte e Leste do PISF, inicialmente foi calculada as vazões naturais das áreas de contribuição de cada reservatório estratégico no Modelo Hidrológico Auto-Calibrável – MODHAC para o período de 1933 a 2017. O MODHAC é um modelo matemático que tem a finalidade simular a fase terrestre do ciclo hidrológico de uma bacia. É uma ferramenta desenvolvida para ser ajustada a bacias em qualquer clima (LANNA, 1997). Essa ferramenta foi utilizada também no projeto básico da Transposição do Rio São Francisco, para geração das séries pseudo-históricas, assim como nos estudos hidrológicos dos Planos Estaduais de Recursos Hídricos - PERH dos estados do Ceará e da Paraíba, no Plano Diretor das bacias hidrográficas do estado da Bahia (BRASIL, 2000). Além disso, foi utilizada no Projeto Atlas Nordeste de Abastecimento Urbano de Água (BRASIL, 2006) e no Relatório sobre os Reservatórios do Semiárido Brasileiro (BRASIL, 2017).

Após cálculo das vazões naturais, foi realizada no estudo atual, a simulação das vazões de regularização dos reservatórios, com base na operação real e na operação especial do reservatório de Sobradinho, utilizando uma planilha de otimização, considerando todos os ganhos e perdas, bem como os vertimentos. A otimização procura, através de métodos

matemáticos, maximizar ou minimizar uma função objetivo para o cálculo dos valores ideais para um conjunto de valores (variáveis de decisão), obedecendo restrições físicas, sociais, econômicas.

Por fim, fez-se o cálculo da sinergia hídrica do sistema integrado de reservatórios do PISF para os períodos de 1933-1991, 1933 a 2001, 1933 a 2017 com base na operação especial do Reservatório de Sobradinho e para o período de 1979 a 2017, com base na operação real desse reservatório, desde sua construção. Todos os períodos foram calculados para as garantias de 90%, 95%, 99% e 100%. A sinergia hídrica representa a parcela de acréscimo de vazão regularizada pelo reservatório ou sistema de reservatórios, que ultrapassa o acréscimo decorrente da vazão aduzida (Farias *et al*, 2004).

1.1 OBJETIVOS DO ESTUDO

O trabalho de dissertação parte de um objetivo geral para objetivos específicos da seguinte forma:

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as reais potencialidades de atendimento aos sistemas de reservatórios com o aporte de água do Projeto de Integração da Bacia do Rio São Francisco com o Nordeste Setentrional, verificando-se o ganho de sinergia hídrica por meio da atualização das séries históricas de dados hidrológicos até 2017.

1.1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, tem-se:

- Realizar novas simulações, comparando os resultados atuais com os resultados anteriormente obtidos no Projeto Inicial do PISF (2002);
- Identificar se as secas mais recentes influenciam nos resultados da simulação;
- Avaliar se com novas regras de operação do reservatório de Sobradinho, no rio São Francisco, quais os ganhos de atendimento para as demandas do projeto;
- Trazer contribuições para a mudança de regime de operação dos principais reservatórios da bacia do rio São Francisco, notadamente Sobradinho, quanto à efetiva utilização desses mananciais para os usos múltiplos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em 6 capítulos.

1. Introdução – Aborda a importância do tema, a justificativa para o estudo e os objetivos principais.
2. Referencial Teórico – Faz uma análise dos estudos anteriores sobre o tema crise hídrica e abastecimento das regiões semiáridas, reforçando a necessidade da adoção de medidas mitigadoras. Trata da Transposição do Rio São Francisco, listando as bacias receptoras e os municípios que serão atendidos. Cita um breve histórico sobre o Projeto de Integração do Rio São Francisco com o Nordeste Setentrional – PISF, desde sua idealização até o início da operação. Aborda as experiências internacionais que adotaram a transposição de águas como solução para conviver com as secas e desenvolver regiões, bem como as vantagens e desvantagens desse tipo de obra.
3. Estudo de Caso - Descreve o projeto do PISF, apresentando os trechos dos canais dos eixos Norte e Leste, os reservatórios estratégicos e as condicionantes de vazões para a operação do sistema integrado.
4. Materiais e Métodos – Apresenta a área de estudo, assim como sua delimitação, realizada em Sistema de Informações Geográficas e os dados hidrológicos utilizados nas simulações. Explica a metodologia que foi adotada para o estudo, destacando os modelos hidrológicos chuva-vazão e de operação de reservatório para realização das simulações.
5. Resultados e Discussões – Apresenta os resultados encontrados nas simulações para todos os trechos dos dois eixos do PISF. Desenvolve análise das perdas por evaporação e vertimento e o ganho de vazão proporcionado pela transposição do rio São Francisco nos reservatórios estratégicos. Realiza discussão sobre a sinergia hídrica calculada.
6. Conclusão – Apresenta síntese breve e conclusiva dos resultados e sugere possibilidades para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo encontra-se o referencial teórico com informações sobre a crise hídrica no semiárido e a busca por soluções, um breve histórico sobre o Projeto de Integração do rio São Francisco e alguns exemplos internacionais de obras de transposição. A interação entre esses assuntos é importante para destacar a relevância do tema e para compreender os desafios das regiões desabastecidas de água.

2.1 CRISE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO E A BUSCA DE SOLUÇÕES

O Projeto Atlas, elaborado pela ANA (BRASIL, 2006) teve como um dos objetivos diagnosticar a situação da oferta de água bruta no conjunto das sedes municipais do semiárido. As regiões consideradas para avaliação das disponibilidades hídricas foram divididas em Unidades de Planejamento - UPs (bacias hidrográficas e sub-bacias), onde se verificou que em 21% do total das UPs ocorrem vazões específicas muito baixas, inferiores a 1 L/s.km², 56% das UPs apresentaram vazões específicas entre 1 e 10 L/s.km² e 26% com vazões específicas mais elevadas, acima de 10 L/s.km². Essas vazões específicas baixas resultam em frequentes déficits de abastecimento de água à população.

As áreas com maior disponibilidade hídrica incluem algumas bacias do Maranhão e Piauí, áreas litorâneas da Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, litoral sul da Bahia e bacias de Minas Gerais, bem como a região do Rio Salgado, no Ceará. As áreas com disponibilidade hídrica intermediária incluem as bacias da margem esquerda do Rio São Francisco, a montante do reservatório de Sobradinho na Bahia, Alto e Médio Piranhas na Paraíba e bacias litorâneas do Ceará. As áreas críticas, com disponibilidade hídrica abaixo de 2 L/s.km² incluem a maior parte do Estado de Pernambuco, o Agreste Paraibano, Alto Jaguaribe no Ceará e as bacias do Seridó e Apodi, no Rio Grande do Norte (BRASIL, 2006).

A acumulação de água que tem como objetivo garantir essa disponibilidade hídrica é maior no estado do Ceará, que possui uma grande quantidade de reservatórios de regularização com capacidade superior à 10 hm³, destacando-se aqueles situados na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. Em seguida, os estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Paraíba, que possuem uma quantidade relevante de aproveitamentos hídricos com capacidade de armazenamento, destacando a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu (BRASIL, 2006). Em Pernambuco a capacidade de armazenamento superficial é mais reduzida, por conta da

menor dimensão de suas bacias hidrográficas e das características do relevo. Mesmo assim os reservatórios são vitais para o abastecimento de água da população.

Outro estudo apresentado no Atlas da ANA (BRASIL, 2006) são as delimitações das Áreas de Elevado Risco Hídrico - AERHs, caracterizadas pelas precipitações médias anuais inferiores a 700 mm, índice de aridez inferior a 0,35 e a ausência de aquíferos sedimentares e rios perenes. As AERHs estão distribuídas em 502 sedes municipais, espalhadas nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia e Alagoas.

Com a seca que se estende desde 2012, atingindo principalmente o Semiárido Nordeste, a Agência Nacional de Águas - ANA, ao final de 2017, desenvolveu um estudo que levantou a situação dos reservatórios da região, analisando seus problemas e potencialidades. Foi analisado o balanço hídrico dos mananciais com o objetivo de gerar subsídios e ferramentas para o planejamento racional do uso múltiplo dos recursos hídricos. Ao todo foram 204 reservatórios avaliados, que equivalem a 80% da capacidade de armazenamento na região, dos quais 148 suprem regiões urbanas e rurais, seis são Fontes de suprimento apenas para sedes urbanas e 50 são Fontes de água apenas para a população rural. Ainda do total de açudes analisados no estudo, 51 deles abastecem 50.000 ha de perímetros irrigados (BRASIL, 2017).

O acervo elaborado pela ANA concluiu que grande parte, se não a maioria dos reservatórios necessita de modernização e equipamentos que garantam as condições de funcionamento. Também foi constatada pela Agência a situação de desabastecimento nas regiões vizinhas a esses reservatórios, visto que, durante o período seco, alguns se encontravam abaixo do volume mínimo operacional, com trechos secos a jusante. Dos 204 reservatórios avaliados pela ANA, verificou-se que 85 possuem capacidade para abastecer novas demandas e os 119 reservatórios restantes operam no limite de sua capacidade (BRASIL, 2017).

Além da obra do PISF, outras construções foram desenvolvidas para atender as demandas das cidades das regiões semiáridas, como é o caso do Canal de Integração do Ceará, construído para levar a água do Reservatório de Castanhão, com capacidade de 4,45 bilhões de metros cúbicos para a cidade de Fortaleza e para o Cinturão das Águas, um conjunto de canais em obras que se destina à integração de bacias hidrográficas cearenses. Já em Pernambuco, com o atraso das obras do PISF, optou-se por construir obras de adução para o Agreste do estado por meio de outras transposições, captando água na Mata Sul pernambucana. Essas adutoras serão interligadas ao Sistema Adutor do Agreste, por sua vez em obras para se conectar ao Eixo Leste do PISF. Isso trará para o Agreste, a região apontada

no Brasil como aquela de balanço hídrico mais desfavorável, uma mudança notável quando todas as obras forem concretizadas, visto que a região poderá optar entre as Fontes hídricas de menor custo operacional ao longo de cada período do ano.

2.2 TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

O rio São Francisco tem sua nascente na Serra da Canastra em Minas Gerais e dispõe de uma extensão de aproximadamente 2.860 km, passando também pelos estados de Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe até encontrar o mar, entre os municípios de Piaçabuçu – AL e Brejo Grande - SE. Com uma área de drenagem de aproximadamente 640.000 km², abastece 505 municípios que utilizam suas águas para a agricultura, pesca, abastecimento humano, transporte, turismo, lazer, produção de energia hidroelétrica, entre outros usos. Sua capacidade de fornecer água para todas as demandas tem se limitado ao longo dos anos devido ao crescimento inverso entre a necessidade dos usuários, tanto na economia do país como na própria sobrevivência, e a disponibilidade hídrica para estes fins. Cerca de 50% do território da bacia do Rio São Francisco está localizado no semiárido, com registros críticos de estiagem (CBHSF, 2016).

Nos últimos anos a escassez de água tem sido o maior desafio para a gestão de recursos hídricos, que tenta desenvolver práticas de governança para amenizar os conflitos entre os múltiplos usuários. A demanda de água da bacia do rio São Francisco teve um aumento significativo de 87%, do ano de 2000 para 2016, como foi estimado no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025 (CBHSF, 2016). Esse aumento pode ser explicado pela expansão dos perímetros irrigados em toda bacia, chegando a 90% da vazão de retirada e consumida. A geração de energia, como um tipo de uso não consuntivo e a agricultura irrigada, como um tipo de uso consuntivo, são as atividades que mais mobilizam os recursos hídricos da bacia em relação aos outros setores de usuários (abastecimento urbano e rural, abastecimento industrial, navegação e criação animal).

Por sua vez, a transposição do Rio São Francisco visa o atendimento principalmente das cidades de elevado déficit hídrico no semiárido, fora da bacia. O Projeto de Integração do São Francisco – PISF terá, quando concluído, 477 km de extensão nos seus eixos principais, subdivididos em eixos Leste e Norte. Os pontos de captação de água no rio São Francisco para o projeto estão localizados no município de Cabrobó (Eixo Norte) e no Reservatório de Itaparica (Eixo Leste).

As bacias que irão receber água do rio São Francisco são mostradas na Figura 1: rios Apodi e Piranhas Açu (PB-RN); rios Salgado e Jaguaribe (CE); rio Paraíba (PB); e os afluentes ao rio São Francisco: rios Moxotó, Brígida, Terra Nova e Pajeú (PE). Se consideradas as obras complementares em construção (canais, adutoras, reservatórios interligados aos dois eixos ou aos rios alimentados por eles) o atendimento se multiplicará. No caso de Pernambuco, o Ramal e o Sistema Adutor do Agreste transportarão água do rio São Francisco para localidades situadas nas bacias dos rios Ipojuca, Capibaribe, Mundaú, Ipanema, Sirinhaém e Una. O projeto levará água para 390 municípios listados no Quadro 1, onde o Eixo Leste atenderá aos municípios de Pernambuco e Paraíba e o Eixo Norte atenderá aos municípios de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte.

Quadro 1: Bacias/Municípios que deverão ser atendidos pelo PISF por Estado.

(continua...)

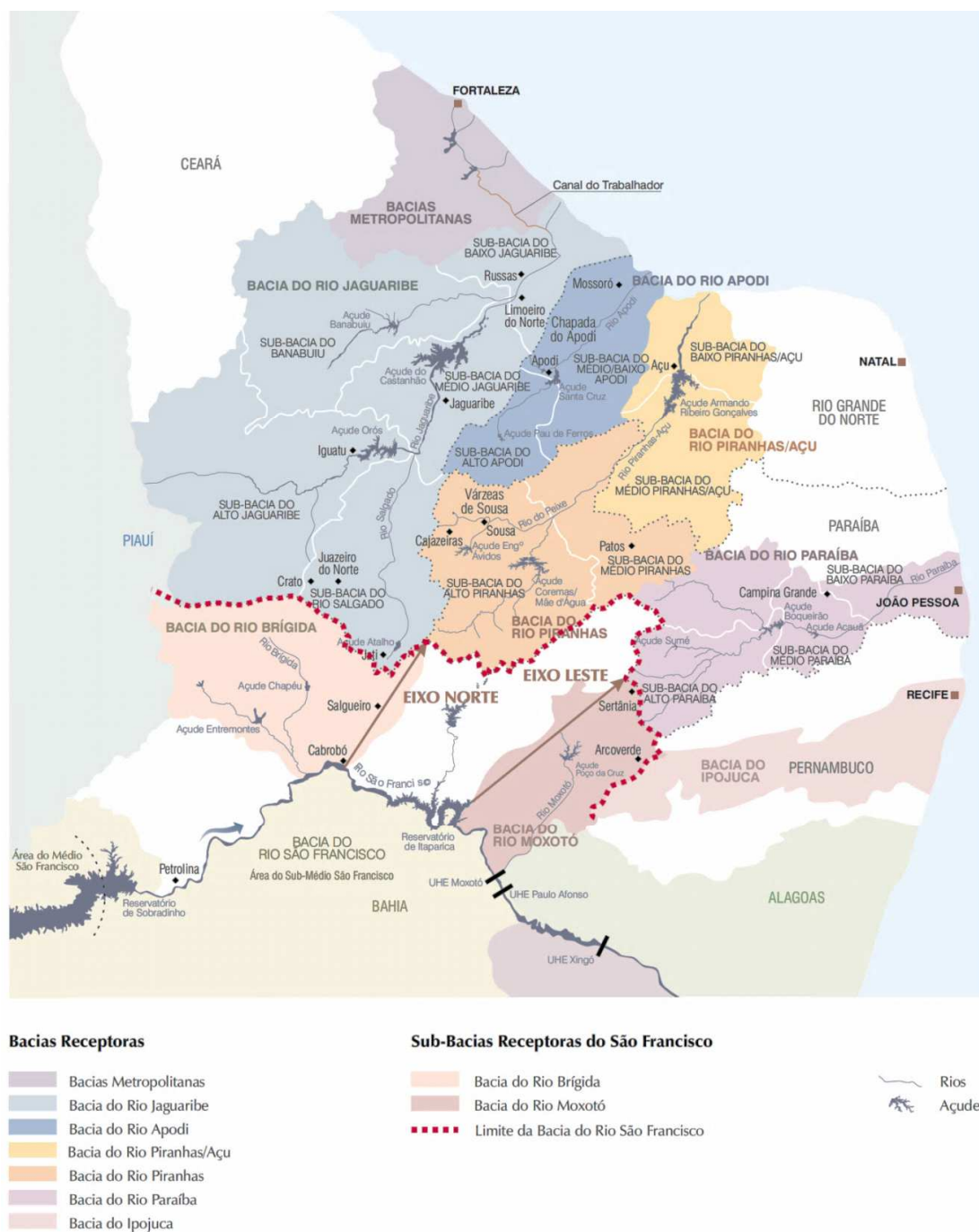
Bacias/Municípios que deverão ser atendidos pelo PISF
EIXO LESTE
Pernambuco
Bacias do Rio Moxotó/ Pajeú
Arcoverde - Itapetim - Afogados da Ingazeira – Manari – Betânia – Quixaba - Brejinho - Santa Cruz da Baixa Verde - Calumbi - Santa Terezinha - Carnaíba - São José do Egito - Custódia - Serra Talhada - Flores - Sertânia - Floresta - Solidão - Ibimirim - Tabira – Igaraci – Triunfo – Inajá - Tuparetama – Ingazeira.
Bacias do Agreste Pernambucano
Agrestina - Jupi - Águas Belas - Jurema - Alagoinha - Lagoa do Ouro – Altinho - Lagoa dos Gatos - Angelim - Lajedo - Barra de Guabiraba - Limoeiro - Belo Jardim - Machados - Bezerras - Orobó - Bom Conselho - Palmeirina - Bom Jardim - Pannels - Bonito - Paranatama - Brejão - Passira - Brejo da Madre de Deus - Pedra - Buíque - Pesqueira - Cachoeirinha - Poção - Caetés - Riacho das Almas - Calçado - Sairé - Camocim de São Félix - Salgadinho - Canhotinho - Salóá - Capoeiras - Sanharó - Caruaru - Santa Cruz do Capibaribe - Casinhas - Santa Maria do Cambucá - Correntes - São Bento do Una – Cumaru - São Caitano - Cupira - São João – Feira Nova - São Joaquim do Monte – Frei Miguelinho - São Vicente Ferrer - Garanhuns - Surubim - Gravatá - Tacaimbó - Iati - Taquaritinga do Norte - Ibirajuba – Terezinha - Itaíba - Toritama - Jataúba – Tupanatinga- João Alfredo – Venturosa - Jucati - Vertente do Lério – Vertentes.
Paraíba
Bacia do rio Paraíba
Amparo - Nova Palmeira – Alcantil –Oliveiros – Aroeiras - Ouro Velho - Barra de Santana – Parari - Barra de São Miguel - Pedra Lavrada – Bayeux – Picuí – Boa Vista – Pilar – Boqueirão - Pocinhos – Cabaceiras – Prata - Caldas Brandão – Puxinanã - Camalaú - Queimadas - Campina Grande - Riachão do Bacamarte – Caraúbas - Riachão do Poço – Caturité - Riacho de Santo Antônio - Congo - Salgado de São Félix – Coxixola - Santa Cecília - Cruz do Espírito Santo - Santa Rita - Cubati – Santo André – Fagundes - São Domingos do Cariri - Passagem - Frei Martinho - São João do Cariri -Gado Bravo - São João do Tigre - Gurinhém - São José dos Cordeiros - Gurjão - São José dos Ramos - Ingá - São Miguel de Taipu - Itabaiana - São Sebastião do Umbuzeiro - Itatuba – Sapé - João Pessoa - Seridó - Juarez Távora - Serra Branca - Juazeirinho - Serra Redonda - Juripiranga - Sobrado - Livramento - Soledade - Mari - Sumé - Massaranduba - Taperoá - Mogeiro - Tenório - Monteiro - Umbuzeiro - Natuba – Zabelê.
EIXO NORTE
Pernambuco
Bacia do rio Brígida
Araripina, Bodocó, Exu Granito, Ipubi, Moreilândia, Ouricuri, Trindade, Parnamirim.
Bacia do rio Pajeú e Terra Nova
Terra Nova – Cedro - Salgueiro, Serrita – Verdejante - São José do Belmonte – Mirandiba - Carnaubeira da Penha.

Paraíba
Bacia do rio Piranhas
Aparecida - Poço Dantas - Areia de Baraúnas - Poço de José de Moura - Assunção - Pombal - Belém do Brejo do Cruz - Quixabá - Bernardino Batista - Riacho dos Cavalos - Bom Jesus - Salgadinho - Bom Sucesso - Santa Cruz - Bonito de Santa Fé - Santa Helena - Brejo do Cruz - Santa Luzia - Brejo dos Santos - Joca Claudino - Cachoeira dos Índios - São Bentinho - Cacimba de Areia - São Bento - Cajazeiras - São Domingos - Carrapateira - São Francisco - Catolé do Rocha - São João do Rio do Peixe - Condado - São José da Lagoa Tapada - Jericó - São José de Espinharas - Junco do Seridó - São José de Piranhas - Lagoa - São José do Brejo do Cruz - Lastro - São José do Sabugi - Malta - São Mamede - Marizópolis - Sousa - Mato Grosso - Triunfo - Monte Horebe - Uiraúna - Nazarezinho - Várzea - Passagem - Vieirópolis - Patos - Vista Serrana - Paulista.
Ceará
Bacia do rio Salgado e Jaguaribe
Abaiara - Aurora - Baixo - Barbalha Barro - Brejo Santo - Caririçu - Cedro - Crato - Granjeiro - Icó Ipaumirim - Jaguaribe - Jardim - Jati - Juazeiro do Norte - Lavras da Mangabeira - Mauriti - Milagres - Missão Velha - Penaforte - Porteiras - Umari - Várzea Alegre
Bacias Metropolitanas e Baixo Jaguaribe
Alto Santo - Aquiraz - Aracati - Beberibe - Cascavel - Caucaia - Chorozinho - Eusébio - Fortaleza - Fortim - Guaiúba - Horizonte - Icapuí - Itaiçaba - Itaitinga - Jaguaretama - Jaguaribara - Jaguaruana - Limoeiro do Norte - Maracanaú - Maranguape - Morada Nova - Ocara - Pacajus - Pacatuba Palhano - Pindoretama Quixeré - Russas - São Gonçalo do Amarante - São João do Jaguaribe - Tabuleiro do Norte.
Rio Grande do Norte
Bacia do rio Apodi
Água Nova - Martins - Alexandria - Olho-d'Água do Borges - Antônio Martins - Paraná - Apodi - Pau dos Ferros - Areia Branca - Pilões - Baraúna - Portalegre - Caraúbas - Rafael Fernandes - Coronel João Pessoa - Rafael Godeiro - Doutor Severiano - Riacho da Cruz - Encanto - Riacho de Santana - Felipe Guerra - Rodolfo Fernandes - Francisco Dantas - São Francisco do Oeste - Frutuoso Gomes - São Miguel - Governador Dix-Sept Rosado - Serrinha dos Pintos - Grossos - Severiano Melo - Itaú - Taboleiro Grande - João Dias - Tenente Ananias - José da Penha - Tibau - Lucrécia - Umarizal - Luís Gomes - Upanema - Major Sales - Venha-Ver - Marcelino Vieira - Viçosa.
Bacia do rio Piranhas-Açu
Acari - Ouro Branco - Açu - Paraú - Afonso Bezerra - Parelhas - Almino Afonso - Patu - Alto do Rodrigues - Pedra Preta - Angicos - Pedro Avelino - Augusto Severo - Pendências - Bodó - Riachuelo - Caiçara do Rio do Vento - Santana do Matos - Caicó - Santana do Seridó - Carnaúba dos Dantas - São Fernando - Carnaubais - São João do Sabugi - Cruzeta - São José do Seridó - Currais Novos - São Rafael - Equador - São Vicente - Fernando Pedroza - Serra do Mel - Florânia - Serra Negra do Norte - Ipanguaçu - Tenente Laurentino Cruz - Ipuera - Timbaúba dos Batistas - Itajá - Triunfo Potiguar - Janduís - São Miguel - Jardim de Piranhas - Serrinha dos Pintos - Jardim do Seridó - Severiano Melo - Jardim de Angicos - Taboleiro Grande - Jucurutu - Mossoró.

Fonte: A Autora, 2019.

*Dados disponíveis no Ministério da Integração.

Figura 1 - Bacias que serão atendidas pelo PISF com os Eixos Norte e Leste.



Fonte: MI, 2000.

2.2.1 Breve Histórico

Por ser um rio perene e integrar vários municípios, a transferência das águas da bacia do rio São Francisco para outras bacias, até onde se tem conhecimento, foi idealizada desde a época que o Brasil era um império no século XIX, na qual intelectuais já enxergavam a transposição como uma solução para acabar com a seca do Nordeste. Há relatos de que Dom Pedro II, ao passar por uma das secas mais severas que o Nordeste já sofrera entre os anos de 1877 e 1879, vendeu joias e obras de artes para investir na transposição, já que o parlamento alegava não poder investir numa obra faraônica e de elevado custo.

Já no Brasil como república, em 1944, a discussão foi retomada pelo presidente Getúlio Vargas, mas só em 1985, o extinto DNOS – Departamento Nacional de Obras e Saneamento - desenvolveu um projeto inicial. Em 1999, os estudos foram continuados pelo então Ministério da Integração Nacional Nacional, no governo de Fernando Henrique Cardoso, no qual foi proposta a revitalização da bacia do Rio São Francisco (ação muito exigida pelos ambientalistas e pela população das chamadas “bacias doadoras”) e a construção dos canais de transposição. A proposta chegou a ser documentada, gerando os primeiros projetos, mas a obra não foi adiante, só retornando em 2007, no governo do presidente Luiz Inácio Lula da Silva.

Em 2005, o Ministério do Meio Ambiente - MMA e o CNRH, considerando os benefícios do projeto de transposição, a carência hídrica da região Nordeste Setentrional e a disponibilidade hídrica da bacia do Rio São Francisco, aprovaram o projeto apresentado, através da Resolução nº47, de janeiro/2005. O projeto aprovado, que chegou a ser considerado polêmico devido aos exaustivos e intensos diálogos entre os governos federais e estaduais e a sociedade civil representada por ONGs e em colegiados como o Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, teve as obras dos eixos Norte e Leste iniciadas em 2007 (MOLINAS e SARMENTO; 2009)

O Quadro 2 detalha, em um breve histórico, o andamento do projeto, desde sua idealização, consistência e elaboração de estudos até às aprovações da outorga e das licenças pelos órgãos gestores responsáveis.

Quadro 2 - Breve histórico da idealização e concretização do PISF.

Ano	Histórico	Responsável
1877	Idealização da Transposição do Rio São Francisco após a Grande Seca no Nordeste entre os anos de 1877 a 1879.	Império de Dom Pedro II.
1944	Discussão retomada sobre soluções para a disponibilização de água para o Nordeste Setentrional.	Presidência da República.
1985	Projeto Inicial que insere na política de águas o desenvolvimento e a integração da população assolada pela seca do semiárido nordestino.	Departamento Nacional de Obras e Saneamento – DNOS.
1994	Emissão de um Decreto declarando o interesse da União em estudos do potencial hídrico das bacias do semiárido nordestino.	Presidência da República / Ministério da Integração Nacional.
1999	Assinatura do documento “Compromisso pela Vida do São Francisco” propondo a revitalização do rio e a construção dos canais de transposição.	Presidência da República / Ministério da Integração Nacional.
Março/ 2000	Estudos de Inserção Regional – Tomo I e II – Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional – PISF.	Ministério da Integração Nacional Nacional.
Julho/ 2000	Criação da Agência Nacional de Águas – ANA	Ministério do Meio Ambiente – MMA/ Conselho Nacional de Recursos Hídricos- CNRH.
Junho/ 2000	Criação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – CBHSF	CNRH.
Julho/ 2004	Relatório de Impacto Ambiental – RIMA do Projeto de Integração do Rio São Francisco	Ministério da Integração Nacional Nacional.
Julho/ 2004	Aprovação da Obra pelo Comitê após à criação do Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – 2004-2013 – ANA.	CBHSF.
Janeiro /2005	Resolução nº47 01/2005 aprovando o aproveitamento hídrico do PISF, apresentado pelo Ministério da Integração Nacional Nacional.	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis – IBAMA / CNRH.
Março/ 2005	Análise do EIA/RIMA do PISF.	IBAMA
Abril/ 2005	Licença Prévia nº 200/2005 – IBAMA- Abrangendo as estruturas dos Eixos Norte e Leste da Transposição do Rio São Francisco.	IBAMA
Set./ 2005	Resolução nº 411 09/2005 – Outorga do Direito de Uso de Recursos Hídricos do Rio São Francisco para execução do PISF.	Agência Nacional de Águas – ANA
Nov./ 2005	Resolução nº412 09/2005 – Certificado de Avaliação da Sustentabilidade da Obra Hídrica – CERTOH – em favor do Ministério da Integração Nacional para o PISF.	ANA
Março/ 2007	Licença de Instalação nº438/2007 relativa aos trechos I e II do Eixo Norte e Trecho V do Eixo Leste do PISF – válida por 4 anos.	IBAMA
Junho / 2007	Obras do Trecho Norte e Leste iniciadas.	Governo Federal
Abril/ 2013	Nova Licença de Instalação nº925/2013 relativa aos trechos I e II do Eixo Norte e Trecho V do Eixo Leste do PISF válida até março /2019	IBAMA
Nov./ 2016	Licença de Instalação nº 01.16.01.005096-2- CPRH relativa aos trechos VII Ramal do Agreste	Agência Estadual de Meio Ambiente – CPRH
Março/ 2017	Inauguração do Eixo Leste na cidade de Monteiro (PB), que abastece os reservatórios de São José e Poções, chegando ao Reservatório de Boqueirão, principal manancial de Campina Grande	Ministério da Integração Nacional Nacional/ Governo Federal
Agosto /2018	Acionamento da 3ª. estação de bombeamento (EB-3) do Eixo Norte em Salgueiro (PE).	Ministério da Integração Nacional Nacional/ Governo Federal
Out./ 2018	Licença de Operação nº1464/2018 referente ao Eixo Leste do PISF	IBAMA

Fonte: A Autora, 2019.

Assim, o Eixo Leste vem atendendo o abastecimento de cidades da Paraíba, embora sua capacidade máxima de transporte ainda requeira bastante ampliação dos sistemas elevatórios para que seja atingida. Quanto ao Eixo Leste, existe a expectativa de que seja concluído ainda em 2019. O Ramal do Agreste, canal que abastecerá a estação de tratamento e o Sistema Adutor do Agreste, teve suas obras iniciadas em março de 2018, com projeção para ser concluído por mais dois anos. As obras do sistema adutor se estendem desde 2012 e a conclusão da primeira etapa depende fundamentalmente de recursos da União. Situação similar ocorre com as obras complementares dos demais estados, como o Cinturão das Águas do Ceará e o Canal das Vertentes Litorâneas da Paraíba.

2.3 EXEMPLOS INTERNACIONAIS DE OBRAS DE TRANSPOSIÇÃO.

O interesse em buscar água através da transferência de uma bacia hidrográfica para outra ocorre sempre que a disponibilidade hídrica da bacia denominada “receptora” se apresenta insuficiente para atender o crescimento da demanda, ou por regime hidrológico desfavorável, ou pela concentração populacional, atividades produtivas crescentes e ainda pela má gestão dos recursos hídricos. As experiências internacionais apresentam em seu contexto benefícios e malefícios que podem servir de exemplo para países como o Brasil, que estão adotando essa solução para atender as regiões carentes de água.

De acordo com Azevedo et al. (2005), nos estudos sobre Transferência de Água entre Bacias Hidrográficas, da série Água Brasil, que teve como apoiador o Banco Mundial, várias partes do mundo como nos Estados Unidos, Espanha e Egito, têm os aspectos econômicos e ambientais como maiores estimuladores para adoção de obras de transposição, principalmente quando as bacias que apresentam grande oferta de água estão distantes dos centros produtores e dos locais onde a demanda é maior. No entanto, o autor explica que as bacias doadoras podem ter suas finalidades prejudicadas e para minimizar os prejuízos deve haver uma análise criteriosa das eventuais perdas que essa bacia pode vir a sofrer, bem como as quantificações das demandas das bacias receptoras, uma vez que os benefícios globais do projeto devem superar os custos derivados dos impactos.

É importante notar que não existem projetos de transposição isentos de impactos quanto à sustentabilidade das regiões envolvidas, reforçando a necessidade de que regras de uso sejam instauradas e as demandas quantificadas antes do início da operação do sistema de transporte de água. Azevedo et al. (2005) pôde observar que as experiências internacionais de sucesso, dos projetos de transposição, apresentavam características importantes como

otimização no uso, aproveitamento dos recursos naturais existentes nas bacias receptoras, identificação precisa das demandas e dos usuários dispostos a pagar pelo suprimento.

No estado do Colorado, nos Estados Unidos, é comum a concepção de sistemas de transferência de água das regiões mais úmidas ao oeste, para as regiões com baixos índices de chuva ao leste. Um exemplo de obra de transposição é a do rio Colorado para o rio Big Thompson, que foi um empreendimento de sucesso graças aos cuidados com os aspectos de percepção dos especialistas e das estratégias dos organismos financiadores com obtenção de apoio político (PORTO, 2000). A obra tem 153 km de canais e leva água do oeste das Montanhas Rochosas do rio Colorado para o rio Big Thompson, em sua vertente leste (AUTOBEE, 1996). O projeto foi construído com o objetivo de atender os setores agrícolas e industriais do Nordeste do Colorado e posteriormente ao abastecimento urbano, produção de energia elétrica e recreação. Um dos motivos da eficiência na gestão do C-BT é a administração realizada pelo órgão público regional *Northern Colorado Water Conservancy District* – NCWCD, que administra o sistema desde sua construção em 1937.

O Projeto de Transferência de Água de Wanjiazhai – *Wanjiazhai Water Transfer Project* – WWTP, foi desenvolvido na Província de Shanxi, na China, com o objetivo de minimizar os problemas ocasionados pela escassez hídrica na região Norte do país, melhorar a qualidade de vida e abastecer centros industriais (QINGTAO; XINAN; LUDWIG, 1999). O canal principal transporta uma vazão de 48 m³/s do reservatório de Wanjiazhai, no rio Amarelo para um canal de derivação localizado no povoado de Xiatuzhai, de onde partem dois eixos, um ao sul levando 20,5 m³/s ao longo de um canal de 100 km no sentido meridional, e o outro ao norte, num canal de 167 km no sentido Setentrional, transportando uma vazão de até 22,2 m³/s (WATER TECHNOLOGY, 2004). Os impactos sociais e ambientais, além das medidas de mitigação, foram amplamente discutidos e os custos com eles foram inseridos no valor total do projeto. Das lições extraídas desse projeto destaca-se que as bacias receptoras devem ter seus leitos preservados para evitar a degradação, o pagamento pelo uso da água deve ser acertado detalhadamente entre os usuários para evitar conflitos e deve haver uma melhoria no gerenciamento dos recursos, uma vez que o crescimento da demanda pode acarretar problemas sociais e ambientais (AZEVEDO et al, 2005).

Na Austrália, o Sistema Hidrelétrico das Montanhas de Snowy – *Snowy Mountains Hydroelectric Schemer* – SMHS é um projeto que armazena e desvia a água do rio Snowy para os rios Murray e Murrumbidgee, abastecendo o sudeste do país e servindo para a irrigação e produção de energia elétrica (THEOBALD et al., 2015). O sistema é nacionalmente

importante para a economia e o desenvolvimento daquele país, sendo responsável por produzir 67% da energia renovável do Mercado Nacional de Eletricidade que fornece energia para os estados de Australian Capital Territory, New South Wales e Victoria (POWER TECHNOLOGY, 2008). De acordo com Azevedo et al. (2005) no início da construção do SMHS em 1949, as questões ambientais não eram levadas em consideração, então o projeto foi concebido sem Estudo e Relatório de Impacto Ambiental – EIA-RIMA, e a falta de controle pode ter ocasionado a diminuição da biodiversidade com a redução da vazão do rio e a erosão nas margens da bacia receptora com o aumento da vazão. Uma parceria entre o governo e as comunidades locais foi criada com o objetivo de promover e coordenar o uso consciente e equitativo da água (River Murray Urban Users, 2005).

Na Espanha funcionam cerca de 50 obras de transposição ou *trasvases* como são conhecidas no país, sendo a mais problemática a do Sistema Tajo - Segura, que transfere água por aproximadamente 300 km, da bacia do rio Tajo para a bacia do rio Segura ao sul do país, passando pela península Catilla -La Mancha, abastecendo as cidades de Almería, Murcia e Alicante e servindo para a agricultura de Murcia e Valencia (LAMELA, 2014). A obra apresentou vários aspectos negativos, como custo elevado e grave impacto ambiental e de acordo com Lamela (2014), os benefícios que foram gerados não compensam o investimento e os danos sócio-ambientais, uma vez que o destino do dinheiro incerto e os prejuízos para os moradores da região e para o ambiente atingiram cifras elevadas. Com os conhecimentos mais avançados, alguns efeitos poderiam ser mitigados utilizando estratégias de planejamento integrado entre os diversos usos (AZEVEDO, 2005).

O Projeto do *Canal El - Salam* no Sinai, Egito é um dos mais importantes daquele país, tendo sido construído para irrigar áreas improdutivas, na costa do mar Mediterrâneo, próxima à fronteira de Israel (AZEVEDO et al, 2005). Por trás do aumento da área irrigada, o objetivo maior do projeto é a redistribuição da população egípcia, gerando oportunidades de empregos aos jovens, protegendo as fronteiras orientais com o aumentando da produção e exportação de produtos agrícolas, expandindo o turismo da região e as atividades industriais e de mineração (DONIA, 2012). O projeto ainda não foi concluído em 2019.

A maior obra de transferência de água no Brasil ainda é o PISF, sendo compatível com obras de grande porte, construídas em várias regiões do mundo, conforme apresentado no Quadro 3. A extensão da obra de transposição do rio São Francisco é apresentada na primeira linha da tabela, seguida de obras de transposição localizadas em outros países.

Quadro 3 - Obras de Transposição de bacias hidrográficas construídas e em construção em outras regiões do mundo.

Obra	País	Duração	Comprimento
Transposição do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional – PISF	Brasil	2005 - Atual (~15 anos)	630 km de túneis e canais.
Projeto Colorado – Rio Big Thompson	Estados Unidos	1938 – 1959 (21 anos)	210 km de túneis e canais.
Sistema Hidrelétrico das Montanhas Snowy – Rio Murray – Murrumbidgee	Austrália	1949-1974 (25 anos)	225 km de túneis e adutoras.
Projeto de Transferência de Água de Wanjiashai- Rio Amarelo-Huang He	China	2001-2011 (10 anos)	311 km de canais.
Projeto Hídrico das Montanhas do Lesotho	Lesotho e África do Sul	1983-2002 (19 anos)	80 km de túneis.
Transposição do Rio Tejo- Rio Segura	Espanha	1933-1973 (40 anos)	297 km.
Projeto do canal El-Salaam- Água misturada do sistema de Esgoto com o Rio Nilo transferida para a cidade de Sinai.	Egito	Fase de Projeto	150 Km
Projeto Especial Chavimochic – Rio Santa para as áreas irrigadas de Chicama, Moche, Virúe e Chao.	Peru	1986-1996 (10 anos)	283 Km.

Fonte: A Autora, 2019.

No caso brasileiro, se considerados os usos também para atividades produtivas, a importância do projeto para os municípios carentes em recursos hídricos leva à necessidade de estudos aprofundados quanto à disponibilidade de água do rio principal para o atendimento das demandas, uma vez que as altas temperaturas e o alto índice de evaporação do semiárido trazem dúvidas quanto ao aproveitamento hídrico dos volumes de água que serão transportados aos reservatórios receptores. Estudos anteriores, realizados por Molinas (2005), Aragão (2008) e Guimarães (2016) apresentaram discussão sobre a eficiência do sistema. A atualização dos históricos de dados e informações para os períodos de secas hidrológicas mais recentes podem complementar as tomadas de decisão dos órgãos gestores de recursos hídricos, bem como a otimização da operação dos reservatórios.

Os benefícios que as transposições podem promover para as bacias receptoras faz parte de várias pesquisas que avaliam se em geral a transposição da água de um rio principal pode ocasionar, de fato, o aumento da capacidade de regularização dos reservatórios e se são adequadas para solucionar os problemas de regiões semiáridas. Farias et al (2004) consideram que, dada a adução de vazões exógenas, a Transposição do Rio São Francisco trará ganhos de sinergia hídrica para os sistemas integrados de reservatórios e concluíram que a oferta de água

extra pode aumentar o aproveitamento das aflúências naturais do rio e reduzir as perdas como evaporação e vertimento de suas barragens.

Farias e Diniz (2017) analisaram cenários de perda hídrica na distribuição das águas transpostas para a Paraíba através do Eixo Leste com simulações realizadas com o software Acquanet e seus resultados demonstraram que a construção de adutoras reduzirá a perda hídrica, aumentando o ganho social pelo aumento da população que será beneficiada.

Aragão (2008) estudou o comportamento da sinergia hídrica em quatro reservatórios da bacia do rio Paraíba (Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã) que receberão água do PISF através do eixo leste, considerando quatro cenários de demandas hídricas diferentes: somente abastecimento humano ou abastecimento humano e irrigação, por meio do leito natural do rio ou por meio de adutora. Além disso, os reservatórios foram simulados para dois tipos de operação dos , baseados nas seguintes regras: Regra de Operação de Controle Rígido (ROCR) na qual o reservatório só libera água para o rio a jusante por meio de vertimento, conservando seu volume para atender as demandas e a Regra de Operação com o Volume Mínimo (ROVM) que permite manter o volume do reservatório próximo ao mínimo, diminuindo as perdas por evaporação e vertimento. Aragão (2007) concluiu em seus estudos que o maior ganho sinérgico se deu para o cenário que considera as demandas por abastecimento humano e irrigação através de adutoras pela ROCR, que possibilita alocar um maior volume de água reduzindo perdas em trânsito, por evaporação e vertimento.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso inclui todo levantamento realizado no Projeto Básico do PISF, bem como a dimensão da estrutura do projeto composta por canais e reservatórios, sua localização geográfica e as condicionantes de operação de todo sistema.

3.1 O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

O Projeto Básico de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional, desenvolvido pelo Ministério da Integração Nacional e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE em 2000 foi executado pela empresa americana Harza, em parceria com a empresa brasileira Engecorps (São Paulo) e a organização Fundação de Ciência, Aplicação e Tecnologias Espaciais – FUNCATE (São Paulo). O projeto conta com dezenas de resumos executivos, divididos por trechos, que descrevem seus critérios, os sistemas de captação e bombeamento, adutores, tomadas d'água, estruturas de controle, barragens, vertedouros, topografia do terreno, geologia e geotecnia. Apresentam também os estudos hidrológicos e sedimentológicos, cadernos de desenhos e perfis, modelo hidrodinâmico, esquemas operacionais e os sistemas elétricos.

Para entender como funciona o sistema do PISF e compor o trabalho de dissertação, foram utilizados os resumos que dispõem da descrição do projeto. Nele foi possível listar as principais coordenadas geográficas da obra (Tabela 1) e delimitar a área de estudo. O Eixo Norte, subdividido em cinco trechos (I, II, III, IV e VI), se desenvolve a partir do Rio São Francisco, no município de Cabrobó – PE, passando também pelos estados de Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte. O Eixo Leste, com apenas um trecho (V), localiza-se nos estados de Pernambuco e Paraíba e desenvolve-se a partir do reservatório de Itaparica – PE em direção à cidade de Monteiro - PB.

Tabela 1 - Coordenadas dos Trechos do PISF.

COORDENADAS PRINCIPAIS DOS TRECHOS QUE COMPÕEM O PISF

	EIXO NORTE			
TRECHOS	COMPR.	PONTOS	LATITUDE	LONGITUDE
TRECHO I	140 km	Rio São Francisco - Cabrobó – PE	8° 32' 43.32"S	39° 27' 19.83"O
		Reservatório Jati – Jati - CE	7° 42' 24.60"S	39° 00' 22.30"O
TRECHO II	101 km	Reservatório Jati – Jati - CE	7° 42' 21.73"S	39° 00' 09.18"O
		Reserv.Caiçara – Cajazeiras - PB	7° 01' 51.40"S	38° 36' 12.13"O
		Vale do Rio Piranhas– PB	6° 50' 36.91"S	38° 18' 41,28"O
TRECHO III	60 km	Reserv.Caiçara – Cajazeiras - PB	7° 01' 51.40"S	38° 36' 12.13"O
		UHE Salgado II - CE	6° 51' 50.20"S	38° 57' 54.52"O
TRECHO IV	112 km	Reserv.Caiçara – Cajazeiras - PB	7° 01' 51.40"S	38° 36' 12.13"O
		Açude Angicos – Angicos - RN	6° 22' 3.97"S	38° 15' 57.85"O
TRECHO VI	103 km	Reservatório Mangueira - PE	8° 08' 59.01"S	39° 53' 48.48"O
		Reservatório de Entremontes- PE	8° 13' 46.27"S	39° 13' 25.45"O
	EIXO LESTE			
TRECHO V	216 km	Reservatório de Itaparica - PE	9° 8' 37.50"S	38°18'49.11"O
		Açude de Boqueirão – Monteiro -PB	7° 52' 36.06"S	37°2' 53.64"O

Fonte: A Autora, 2019.

3.1.1 Trechos do Eixo Norte

A seguir serão apresentados os cinco trechos do Eixo Norte, que alimentam alguns dos reservatórios estratégicos do PISF, localizados em Pernambuco, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte.

3.1.1.1 Trecho I

O canal do Trecho I parte do rio São Francisco, a montante da ilha de Assunção em Pernambuco e segue em direção ao Reservatório de Jati em Jati-CE, passando pela cidade de Salgueiro - PE. Tem aproximadamente 140 km de extensão e 170 m de elevação. É o principal trecho do Eixo Norte, onde se localizam as principais estações de bombeamento: EB-I/1, na captação do rio São Francisco em Cabrobó-PE, com capacidade máxima de 99 m³/s, com desnível de 35 m, a EB-I/2, em Terra Nova-PE, com capacidade de 99 m³/s e desnível de 55 m e a EB-I/3, em Salgueiro-PE com capacidade de 89 m³/s e desnível de 89 m. Esse trecho transfere água para os trechos II, III e IV e VI.

3.1.1.2 Trecho II

O Trecho II inicia no Reservatório de Jati CE, passa pelo reservatório projetado de Atalho no município de Brejo Santo – CE e segue para o Reservatório Caiçara em Cajazeiras – PB de onde caminha em direção ao município de São José das Piranhas - PB. Esse trecho teve seu traçado modificado, no estudo de viabilidade, em função do aproveitamento do desnível da Serra do Amaro - CE até o vale do Rio Salgado, no trecho III a oeste, e do vale do Rio Piranhas, no trecho II ao leste, além de aproveitar também o desnível existente nas barragens dos açudes de Engenheiro Ávidos e São Gonçalo. Sua função principal é o atendimento à bacia do Rio Piranhas (PB) também denominado Açu (RN) e a passagem para os trechos III e IV. Tem aproximadamente 101 km de extensão e 36 m de desnível de um ponto a outro.

3.1.1.3 Trecho III

O Trecho III inicia no reservatório Caiçara em Cajazeiras - PB e termina na câmara de carga da UHE Salgado II – CE. Com aproximadamente 60 km de extensão, tem a finalidade de atendimento a bacia do Rio Jaguaribe – CE e condução de água para o Trecho IV.

3.1.1.4 Trecho IV

O Trecho IV parte do Reservatório de Caiçara – PB e segue em direção ao Rio Grande do Norte, no reservatório público de Angicos- RN somando uma extensão de 112 km. Tem função de atendimento a bacia do Rio Apodi, seguindo para os Açudes de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi – RN.

3.1.1.5 Trecho VI

O Trecho VI parte do Reservatório de Mangueira – PE e seguirá em direção ao rio Brígida, atendendo aos reservatórios de Entremontes e Chapéu, somando uma extensão de 103 km.

3.1.2 Trecho do Eixo Leste

O Eixo Leste apresenta um único trecho que alimenta alguns dos reservatórios estratégicos do PISF, localizados em Pernambuco e Paraíba, como apresentado a seguir.

3.1.2.1 Trecho V

O eixo Leste apresenta-se em um único trecho (V), partindo do Reservatório de Itaparica - PE no Rio São Francisco em direção à Paraíba, completando 216 km de extensão até o ponto de entrega no Açude de Poções – PB chegando a uma elevação de 300 m da tomada d'água. Esse eixo visa o atendimento das demandas hídricas das cidades da Paraíba e de Pernambuco, conforme descrito anteriormente. Na Figura 2 é possível observar o caminho dos principais eixos e trechos do PISF.

Figura 2 - Mapa esquemático do PISF com os Eixos Norte e Leste e os Trechos I, II, III, IV, V e VI.



Fonte: MI, 2000.

3.1.3 Reservatórios do Projeto de Integração do São Francisco

O PISF é composto por uma série de reservatórios integrados. Foram selecionados os reservatórios estratégicos do projeto, com capacidade acima de 10 hm³, apresentados no Quadro 4, separados por eixos Norte e Leste. No decorrer da pesquisa será avaliada a função de cada um deles bem como as simulações hidrológicas para definição da vazão de regularização correspondente e análise da sinergia hídrica do sistema integrado.

Quadro 4 - Lista de Reservatórios Estratégicos que compõem o PISF.

Eixo/ Reservatório	UF	Bacia	Município	Capacidade (hm ³)
Eixo Norte				
Castanhão	CE	Médio Jaguaribe	Alto Santo	4551
Orós	CE	Alto Jaguaribe	Orós	1940
Atalho	CE	Salgado	Brejo Santo	108.3
Caiçara	PB	Brígida	Cajazeiras	10.5
Curema Mãe d'água	PB	Piancó	Coremas	1358.7
Engenheiro Ávidos	PB	Alto Piranhas	Cajazeiras	255
São Gonçalo	PB	Alto Piranhas	Sousa	44.6
Entremontes	PE	Brígida	Parnamirim	339.3
Chapéu	PE	Brígida	Parnamirim	188
Engenheiro Armando Gonçalves	RN	Piranhas/Açu	Açu	2400
Santa Cruz do Apodi	RN	Apodi	Apodi	599.7
Pau dos Ferros	RN	Apodi/Mossoró	Pau dos ferros	55.9
Eixo Leste				
Barra do Juá	PE	Pajeú	Floresta	71.5
Eng. Francisco Sabóia	PE	Moxotó	Ibimirim	504
Poções	PB	Alto Paraíba	Monteiro	29.9
Epitácio Pessoa	PB	Alto Paraíba	Boqueirão	411.7

Fonte: A Autora, 2019.

O Eixo Leste foi projetado para transferir 28 m³/s e o eixo Norte 99 m³/s quando o Reservatório de Sobradinho (BA) estiver acima de 94% do seu volume útil. A vazão disponível para qualquer situação hidrológica, ou seja, período seco ou úmido da bacia hidrográfica foi calculada em 26,5 m³/s, baseada no consumo populacional das populações que irão consumir essa água. A estrutura física do projeto é composta de canais, estações de bombeamento de água, pequenos reservatórios, açudes, com a finalidade de atender o abastecimento dos municípios beneficiados e usinas hidrelétricas para o auto-suprimento dos sistemas elevatórios, de modo a minimizar o custo de energia.

Os reservatórios têm como objetivo armazenar água em períodos chuvosos para compensar as necessidades em períodos de estiagem, exercendo a função de regularizador de vazões. Dessa forma, a vazão regularizada é a vazão necessária para atender os usos consuntivos de um reservatório, garantindo que este não seque. Muitas vezes a quantidade de água retirada é superior à quantidade ofertada pela natureza e em períodos de seca hidrológica essa oferta hídrica torna-se ainda mais comprometida.

O PISF surgiu com o objetivo de aumentar a capacidade de regularização dos reservatórios que estão com seus volumes comprometidos. De acordo com os dados dos reservatórios retirados da Sala de Situação do site da ANA, em dezembro/2017 os reservatórios como Castanhão, Atalho, Banabuiú, Lima Campos, Coremas Mãe D'água, Engenheiro Ávidos, Acauã e Engenheiro Francisco Sabóia estavam com seus volumes úteis abaixo de 5% (Figura 3). Esses são os principais mananciais das regiões a serem atendidas pelo PISF.

Figura 3 - Percentuais de Volumes Úteis dos reservatórios contemplados pelo PISF ao final de 2017.

Tabela Resumo - Dados dos Reservatórios

RESERVATÓRIO	ESTADO	BACIA	MUNICÍPIO	CAPACIDADE (hm³)	VOLUME (hm³)	VOLUME (%)	DATA DA INFORMAÇÃO
CASTANHÃO	CE	MÉDIO JAGUARIBE	ALTO SANTO	6700,0	188,6	2,81%	21/12/2017
ORÓS	CE	ALTO JAGUARIBE	ORÓS	1940,0	123,0	6,34%	21/12/2017
BANABUIÚ	CE	BANABUIÚ	BANABUIÚ	1601,0	SECO	SECO	21/12/2017
ATALHO	CE	SALGADO	BREJO SANTO	108,3	4,1	3,79%	19/12/2017
LIMA CAMPOS	CE	SALGADO	ICÔ	66,4	1,5	2,23%	20/12/2017
PRAZERES	CE	SALGADO	BARRO	32,5	4,5	13,82%	21/12/2017
CUREMA	PB	PIANCÔ	COREMAS	720,0	26,2	3,64%	21/12/2017
MÃE D'ÁGUA	PB	PAJEÚ	COREMAS	638,7	18,2	2,85%	20/12/2017
ENGENHEIRO ÁVIDOS	PB	ALTO PIRANHAS	CAJAZEIRAS	255,0	8,8	3,44%	19/12/2017
SÃO GONÇALO	PB	ALTO PIRANHAS	SOLSA	44,6	6,6	14,78%	22/12/2017
ACAUÃ	PB	ALTO PARAÍBA	ITATUBA	253,0	10,2	4,03%	07/12/2017
EPITÁCIO PESSOA	PB	ALTO PARAÍBA	BOQUEIRÃO	411,7	39,2	9,53%	21/12/2017
POÇÕES	PB	ALTO PARAÍBA	MONTEIRO	29,9	1,9	6,34%	04/12/2017
CAMALAU	PB	ALTO PARAÍBA	CAMALAU	48,1	6,8	14,06%	04/12/2017
ENGENHEIRO FRANCISCO SABOIA	PE	MOXOTÓ	IBIMIRIM	504,0	7,7	1,52%	20/11/2017
ENTREMONTES	PE	BRÍGIDA	PARNAMIRIM	339,3	SEM INFORMAÇÃO	SEM INFORMAÇÃO	-
CHAPÉU	PE	BRÍGIDA	PARNAMIRIM	188,0	SEM INFORMAÇÃO	SEM INFORMAÇÃO	-
BARRA DO JUÁ	PE	PAJEÚ	FLORESTA	71,5	3,9	5,38%	21/11/2017
ENG. ARMANDO RIBEIRO GONÇALVES	RN	PIRANHAS/AÇU	AÇU	2400,0	292,2	12,18%	21/12/2017
SANTA CRUZ DO APODI	RN	APODI	APODI	599,7	SEM INFORMAÇÃO	SEM INFORMAÇÃO	-
PAU DOS FERROS	RN	APODI/MOSSORÓ	PAU DOS FERROS	55,9	SEM INFORMAÇÃO	SEM INFORMAÇÃO	-
SOBRADINHO*	BA	SÃO FRANCISCO	CASA NOVA / SOBRADINHO	34117,0	6895,0	5,05%	21/12/2017
TRÊS MARIAS*	MG	SÃO FRANCISCO	TRÊS MARIAS	19528,0	6810,0	16,76%	21/12/2017
LUIZ GONZAGA (ITAPARICA)*	PE/BA	SÃO FRANCISCO	JATOBÁ/GLÓRIA	10782,0	7644,0	11,58%	21/12/2017

* Nos reservatórios das UHE's no Rio São Francisco a coluna "VOLUME (%)" representa a porcentagem do volume útil armazenado nos reservatórios.

** Fonte de dados: ONS, COGERH (CE), AESA (PB), DNOCS, APAC (PE) e SEMARH (RN).

*** Os dados de vazão e volume dos reservatórios apresentados no boletim são brutos e estão sujeitos a consistência.

Fonte: ANA, 2017.

Um dos questionamentos quanto ao projeto de transposição do Rio São Francisco, seria que a parcela de vazão vinda desta bacia poderia ser comprometida com as perdas no caminho dos canais, por evaporação ou vertimento dos açudes. Porém, o resultado mais

expressivo dos estudos realizados, tanto para o Eixo Norte quanto o Leste da Transposição, é que há um aumento das vazões regularizadas dos reservatórios, com o incremento de vazões exógenas às bacias receptoras, ou seja, um ganho sinérgico (Farias et al, 2004). Essa questão é o foco da pesquisa aqui apresentada.

3.2 CONDICIONANTES DO SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO

Algumas condicionantes da operação do PISF foram estudadas e serão detalhadas e apresentadas a seguir.

3.2.1 Operação do PISF

Conforme o Projeto Básico do sistema (MI, 2000) e Licenças de Instalação do IBAMA (2005), o Projeto de Integração do Rio São Francisco previu a transposição de suas águas com uma vazão máxima instantânea de 127 m³/s, através dos canais dos eixos Norte e Leste do sistema. No entanto essa captação máxima instantânea de vazão só será permitida, de acordo a Outorga Preventiva do PISF, conferida pela Resolução ANA nº 411, de 22 de setembro 2005, quando o Reservatório de Sobradinho, regularizador da vazão dos trechos do Submédio e Baixo do rio São Francisco, estiver acima do menor valor entre o nível correspondente ao armazenamento de 94% do seu volume útil e o nível correspondente ao volume de espera para controle de cheias.

Ainda com essas regras de operação, outras particularidades do sistema foram definidas em projeto e pelos órgãos gestores como ANA, IBAMA e o Ministério da Integração Nacional, responsável pelo projeto. A vazão transposta deverá atender as demandas do saneamento básico, a garantia de sustentabilidade mínima para a economia regional e principalmente o atendimento às populações urbanas e rurais sujeitas aos efeitos nefastos da seca, nos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte (MI, 2005).

Em vista às demandas identificadas para as diferentes bacias contempladas pelo projeto, o Ministério da Integração Nacional adotou a seguinte distribuição de vazão máxima instantânea apresentada na Tabela 2:

Tabela 2: Vazões máximas por eixo do PISF e estados.

Estado	Eixo Norte (m³/s)	Eixo Leste (m³/s)	Total (m³/s)
Paraíba	10	10	20
Ceará	40	-	40
Rio Grande do Norte	39	-	39
Pernambuco	10	18	28
Total	99	28	127

Fonte: MI, 2005.

De acordo com a Nota Técnica nº 390/2005/SOC, de 19 de setembro de 2005, da ANA, apresentada pelo Ministério da Integração Nacional, aprovando o aproveitamento hídrico do PISF, a vazão referente às demandas humanas das bacias receptoras, durante todo o tempo, será de 26,4 m³/s. Essa vazão foi identificada pela ANA com base nas taxas de crescimento da população, constantes no Censo Demográfico de 2000 e em consumos per capita utilizados pelo PROAGUA (BRASIL, 2005).

A ANA determinou também que na operação do sistema de captação de água do PISF sejam implantados portais estaduais para verificação das vazões liberadas nos reservatórios e aquelas efetivamente aduzidas, incluindo as perdas ao longo dos canais. Essas vazões são baseadas na vazão mínima de 26,4 m³/s. Para o cálculo de simulação e otimização da pesquisa, e devido ao fato de que o projeto está em fase inicial de operação, foram adotadas no presente estudo as vazões do cenário estabelecido para o ano de 2010, apresentado no Estudo de Sustentabilidade, Institucional, Administrativa, Financeira e Operacional do PISF elaborado pelo Ministério da Integração Nacional e encaminhado à ANA em setembro/2005 através do Ofício nº 366/MI. Os portais estaduais previstos e as vazões relacionadas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Vazões mínimas estabelecidas nos portais estaduais do PISF

(continua....)

Portais Estaduais	Nome	Trechos do PISF	Vazão (m³/s)
Eixo Norte			
PE01N	Terra Nova	Trecho I	0,29
PE02N	Trecho VI	Trecho I e VI	0,00
PE03N	Salgueiro	Trecho I	0,47
CE01N	Rio dos Porcos	Trecho II e III	11,41
CE02N	Rio Jaguaribe	Trecho III	0,00
PB01N	Rio Piranhas	Trecho II	1,28
PB02N	Peixe	Trecho I	0,00
RN01N	Rio Piranhas	Trecho II	2,95
RN02N	Rio Apodi	Trecho IV	0,00
Eixo Leste			
PE01L	Barra de Juá	Trecho V	0,00
PE02L	Açude Poço da Cruz	Trecho V	0,94

PE03L	Rio Ipojuca – Recife*	Trecho V	4,39
PB01L	Rio Paraíba	Trecho V	4,67
Total			26,40

Fonte: MI, 2005

* Não há na atual concepção possibilidade de lançamento no Rio Ipojuca e o alcance do atendimento se limita ao Agreste de Pernambuco.

3.2.2 Operação Hipotética do Reservatório de Sobradinho

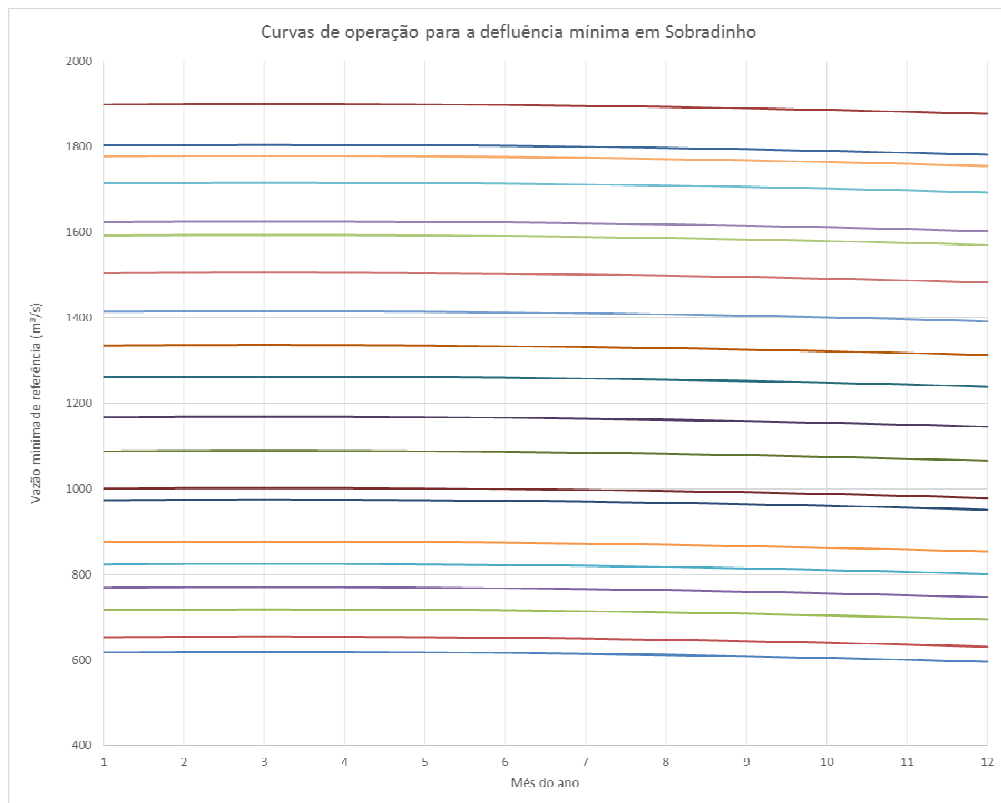
A retirada de água do rio São Francisco é garantida pela outorga concedida pela ANA (2005) de forma contínua para as necessidades de abastecimento humano e esta é condicionada à existência de volume excedente no reservatório de Sobradinho para atender a outros usos. Por outro lado, o acúmulo de água depende da operação dos reservatórios, que é feita pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Os conflitos relacionados à operação dos reservatórios do rio São Francisco têm-se agravado com a baixa das vazões médias aduzidas na bacia, no período de seca hidrológica que vem ocorrendo nos últimos anos, uma vez que usuários a montante do reservatório de Sobradinho e a jusante, no baixo São Francisco, sofrem com o nível baixo e as vazões reduzidas para captação de água. Por conta dessas questões, Cirilo (2018) buscou estudar séries de vazões na região do lago de Sobradinho desde 1929 até 2017, como se o lago existisse desde então.

Nessas condições, ignorando a operação realizada no reservatório, foi determinada a vazão máxima que poderia ser defluída constantemente pelo Reservatório de Sobradinho, considerando a sazonalidade para o atendimento da vazão ecológica, de modo que o volume útil do reservatório nunca fosse inferior a 5% de sua capacidade máxima de (34.116 hm³). Por sua vez, as defluências foram classificadas em função do volume útil acumulado no reservatório em cada mês do ano. Foram adotadas para o período chuvoso, entre janeiro e abril, defluências maiores.

Fazendo uso de técnicas de otimização baseadas em algoritmos genéticos, foram geradas curvas de Defluências Mínimas Mensais versus Percentual de Volume Acumulado com o objetivo de maximizar a vazão defluente, visando o atendimento dos usos a jusante e das condições ambientais da foz. Considerou-se que sempre que a capacidade máxima do Reservatório de Sobradinho for atingida, o excedente será liberado, ou por turbinamento para geração de energia, ou através dos vertedouros, quando a capacidade máxima das turbinas for atingida. Foram inseridas também na análise as séries de afluências naturais mensais, obtidas no site do ONS, as taxas de evaporação no lago e a retirada de 80 m³/s para irrigação, captados diretamente de Sobradinho. Dessa forma, busca-se maximizar o tempo em que o

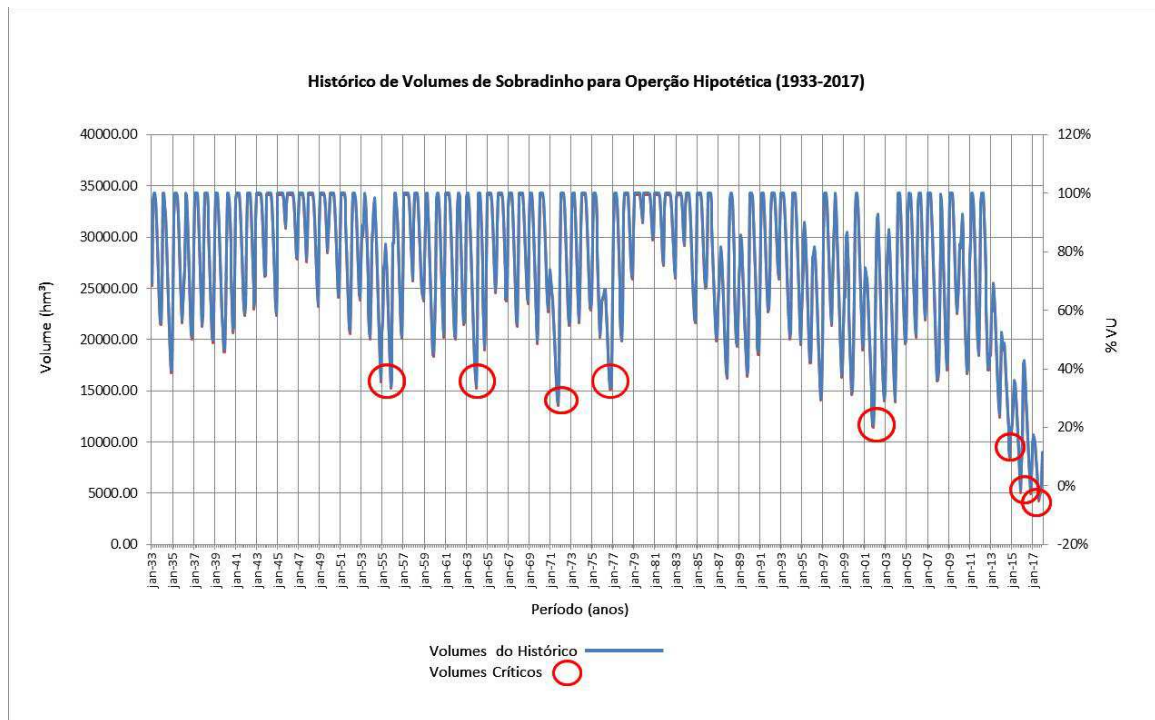
reservatório de Sobradinho se mantenha com volume útil acima de 94%, permitindo a transferência de água para a transposição em sua capacidade máxima. As regras de operação hipotética simuladas consideram as curvas indicadas no Gráfico 1 a seguir que de baixo para cima, se referem a percentuais de 5,10,15,20...100% de acumulação no reservatório. O Gráfico 2 representa a variação dos volumes de Sobradinho, considerando a operação hipotética otimizada por Cirilo (2018).

Gráfico 1 - Curvas de operação para as defluências otimizadas em Sobradinho.



Fonte: Cirilo, 2018

Gráfico 2 - Variação do volume simulado para o reservatório de Sobradinho de 1933-2017 considerando a operação hipotética.



Fonte: Cirilo, 2018

Percebe-se que os anos que apresentaram volumes críticos foram: 1955/1957 (período crítico de referência adotado pelo setor elétrico antes da seca atual), 1964, 1972, 1977, 2002 e 2014 a 2017. Essa redução no volume é influenciada pelos períodos críticos das afluições naturais apresentadas no histórico do ONS e da operação hipotética adotada.

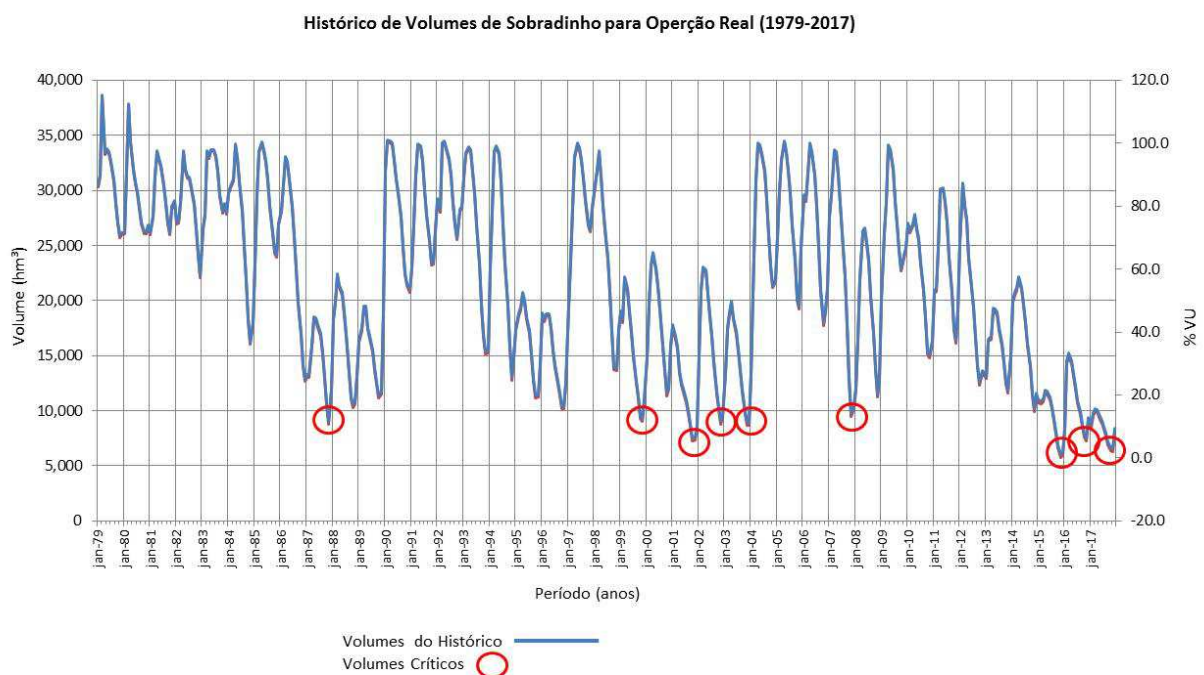
3.2.3 Operação Real do Reservatório de Sobradinho

A Chesf começou a operar o reservatório de Sobradinho desde que o sistema de controle foi concluído em 1979. A Bacia do Rio São Francisco vem apresentando um quadro hidrológico de baixa hidraulicidade desde o período úmido de 2012/2013, que tornou necessária a reavaliação, em caráter temporário, da vazão mínima de restrição a ser praticada pelos reservatórios de Sobradinho e Xingó (CHESF, 2017). Com isso, em abril 2013, a Chesf foi autorizada pela Agência Nacional de Águas - ANA e pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, a reduzir gradativamente, a vazão de restrição mínima de 1.300 m³/s para os patamares de 1.100 m³/s, 1.000 m³/s, 900 m³/s, 800 m³/s, 700 m³/s, 600 m³/s e 550 m³/s.

Tais reduções de vazão exigiram a adequação das estruturas e equipamentos que são utilizados para captar água do Rio São Francisco para os diversos fins, em especial o

abastecimento humano e irrigação, assim como adequação do trajeto da navegação. Cabe destacar que caso não fossem adotadas as medidas acima relatadas desde o início de 2013, o Reservatório de Sobradinho teria esgotado o seu Volume Útil – VU ainda no ano de 2014, o que teria conduzido à perda da capacidade de regularização para o atendimento dos usos múltiplos da água no trecho de rio situado a jusante deste aproveitamento. É apresentado na Figura 3 o gráfico da variação dos volumes do reservatório de Sobradinho, em (hm³) ao final de cada mês desde o início de sua operação até o final de 2017, destacando-se os volumes mínimos atingidos ao longo do tempo de operação. Nota-se que o volume acumulado nos últimos três anos está inferior a 15.000 hm³, ou seja, inferior a 33% de sua capacidade. Nos meses mais críticos chegou-se a 5% do volume útil.

Gráfico 3 - Variação de Volume de Sobradinho para o período de 1979-2017 considerando a operação real.



Fonte: Cirilo, 2018

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho, de forma sintetizada, consiste em:

- Caracterização geoespacial da área de estudo;
- Identificação, coleta e organização da base de dados hidrológicos;
- Simulação chuva-vazão para cálculo das afluências aos reservatórios;
- Cálculo das disponibilidades hídricas por meio da vazão regularizável otimizada para cada reservatório, considerando suas conexões (reservatórios a montante);
- Avaliação dos suportes de água e sinergia hídrica a partir de diferentes cenários de operação do reservatório de Sobradinho.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para delimitar a área de estudo foi gerado o Modelo Numérico do Terreno – MNT a partir da base de dados espaciais do projeto SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* - (NASA, 2000), que consiste em reproduzir dados a partir de um conjunto de pontos (x,y) e atributos que descrevem a variação da elevação da superfície (z). No site do Serviço Geológico dos Estados Unidos - United States Geological Survey – USGS – (www.usgs.us) foi atribuída a delimitação da região com o objetivo de envolver grande parte das bacias e reservatórios que fazem parte do Projeto de Integração do Rio São Francisco. Dessa forma as células de discretização do SRTM foram levantadas, com resolução espacial de 30 m. O modelo digital do terreno – MDT foi assim gerado e trabalhado, gerando-se um SIG/GIS (Sistema de Informação Geográfica/ Geographic Information System).

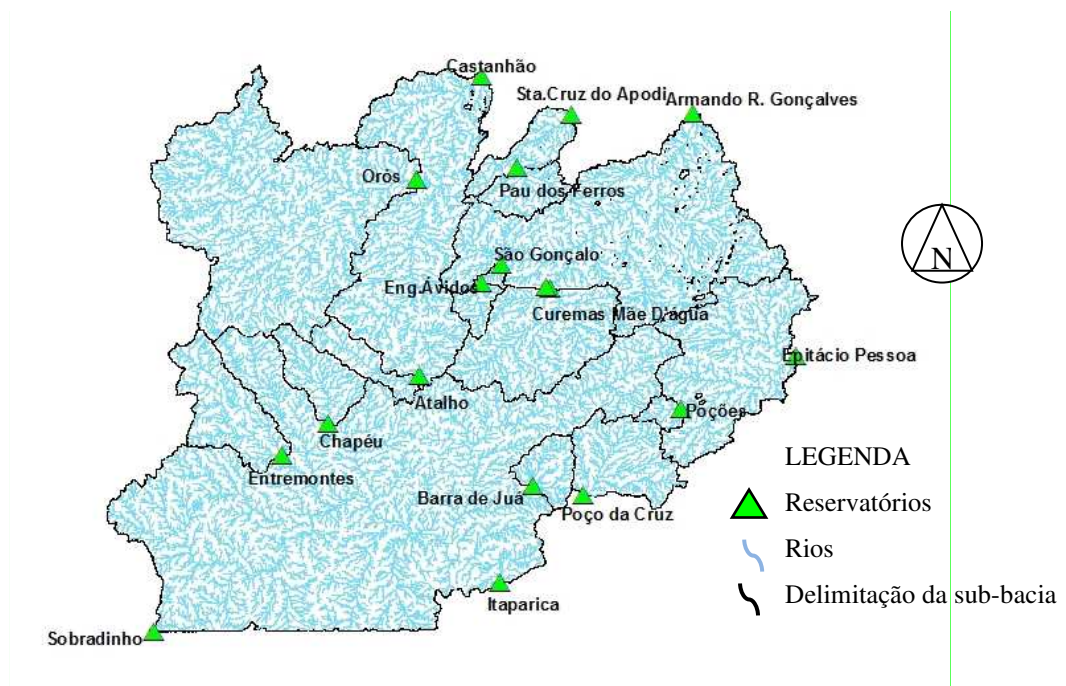
No software de geoprocessamento QGIS 2.6.1, <https://www.qgis.org/pt_BR/site/> foram unidas as células do SRTM geradas em um único mosaico e processadas outras operações que permitiram a unificação das informações das células para definição do mapa. Embora existam diversas versões mais recentes do QGIS, esta foi escolhida por apresentar estabilidade e atender aos objetivos desejados. O MNT foi gerado no Datum WGS-84, que representa todo o globo terrestre e em seguida, transformado para o Datum SIRGAS-2000, padrão de referência nacional. Após esta etapa, o MNT foi transformado de coordenadas geográficas para coordenadas planas (UTM) e escolhida a zona de referência. O PISF está localizado na zona de referência 24S do globo terrestre.

Após a junção dessas células, o processamento das camadas e a definição das coordenadas planas, foram determinados os fluxos de drenagem da imagem MDT *raster*.

Cada célula trabalhada no QGIS possui uma quantidade de *pixels* que por sua vez delimitará as áreas de drenagem definindo as bacias e sub-bacias. Para chegar a essa etapa foi necessário realizar, na operação *raster*, o preenchimento de depressões, definição das direções do fluxo de drenagem, definição da área acumulada, definição da drenagem e segmentação dos rios. A etapa seguinte consistiu em extrair da imagem *raster* os dados vetoriais de polígonos e linhas que definem a delimitação das sub-bacias e por fim a geração da rede de rios.

Após a geração da rede de drenagem, foram incluídos pontos representativos da localização dos reservatórios que fazem parte da área de estudo, retirados do Portal de Metadados Geoespaciais da ANA em arquivo formato *shapefile* (.shp), padrão de dados vetoriais (Figura 4). Para cada reservatório foi delimitada a área de contribuição a montante de seu exutório. As coordenadas dos reservatórios estratégicos do PISF e o valor de suas áreas de contribuição foram retiradas da Tabela de Atributos do QGIS como mostra a Tabela 4. As áreas de contribuição foram utilizadas para a simulação das afluições naturais aos reservatórios por meio do modelo de simulação hidrológica descrito em sequência.

Figura 4 - Delimitação das sub-bacias e rede de drenagem aos reservatórios estratégicos do PISF analisados.



Fonte: A Autora, 2019.

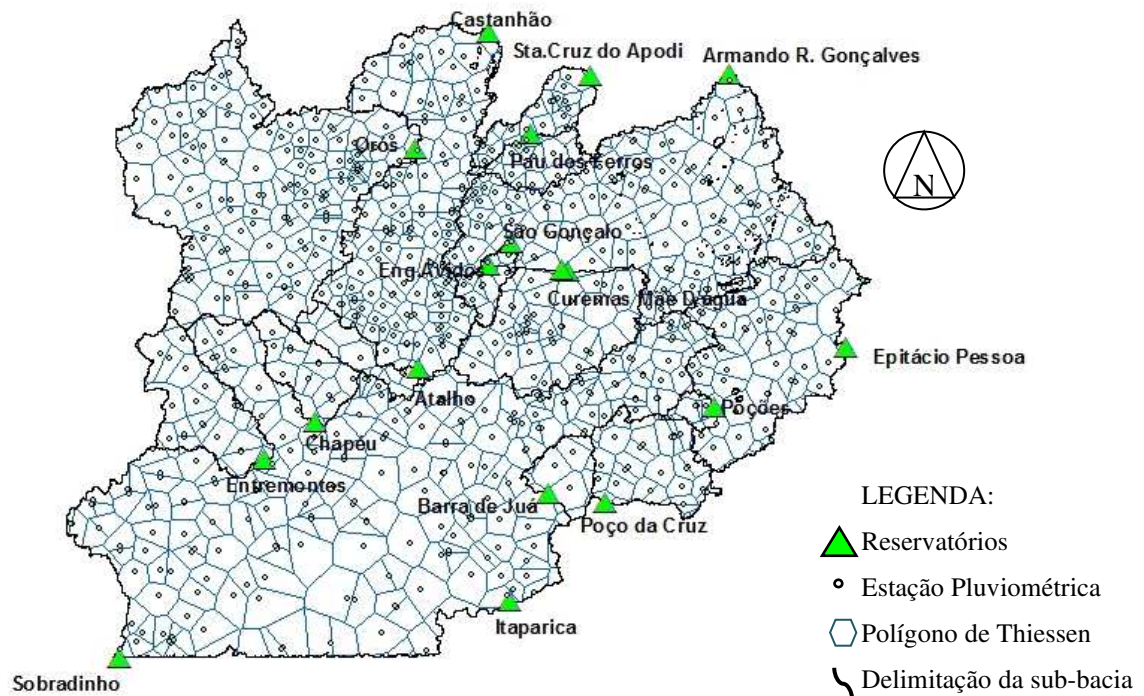
Tabela 4 - Áreas de contribuição e coordenadas dos reservatórios estratégicos do PISF.

Reservatórios	Área (km²)	Longitude	Latitude
Entremontes	5098.98	39° 53' 48,48" S	8° 13' 46,27" O
Chapéu	2931.93	39° 34' 01.92" S	7° 59' 38.80" O
Atalho	1973.39	38° 53' 40.56" S	7° 38' 29,80" O
Castanhão	24888.00	38° 27' 03,96" S	5° 29' 23,86" O
Orós	20011.00	38° 55' 30.00" S	6° 14' 17.27" O
Engenheiro Ávidos	999.65	38° 27' 13.32" S	6° 59' 10.86" O
São Gonçalo	1272.26	38° 18' 41.76" S	6° 50' 43.33" O
Curemas Mãe d'água	5587.00	37° 59' 07.44" S	7° 01' 27.05" O
Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves	18341.00	36° 53' 07.81" S	5° 40' 09.95" O
Pau dos Ferros	2043.95	38° 11' 29.41" S	6° 08' 45.49" O
Santa Cruz do Apodi	4373.63	37° 47' 58.20" S	5° 45' 53.60" O
Barra de Juá	1924.68	38° 04' 26.40" S	8° 26' 54.20" O
Engenheiro Francisco Sabóia (Poço da Cruz)	4709.34	37° 42' 18.72" S	8° 30' 31.54" O
Poções	647.17	36° 59' 53.88" S	7° 53' 20.08" O
Epitácio Pessoa (Boqueirão)	12196.33	36° 08' 22.56" S	7° 29' 14.35" O

Fonte: A Autora, 2019

Assim como no Portal de Metadados Geoespaciais da ANA, nos órgãos estaduais de recursos hídricos como Agência Executiva de Gestão das Águas – AESA/PB e Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME/CE, foi possível obter os arquivos padrão *shapefile* com os pontos dos postos pluviométricos que contribuíram com o estudo. Esses pontos foram disponibilizados no mapa da região hidrográfica delimitada no QGIS e em seguida Polígonos de Thiessen foram traçados para definição das estações que serão utilizadas para o cálculo das contribuições hidrológicas em cada reservatório (Figura 5). Ao todo, foram aproximadamente 800 estações pluviométricas identificadas para as regiões hidrográficas dos reservatórios do projeto, das quais foram selecionadas apenas as estações que apresentaram a extensão das séries históricas com duração razoavelmente longas.

Figura 5 - Traçado do Polígono de Thiessen e estações pluviométricas adotadas no estudo.



Fonte: A Autora, 2019.

4.2 DADOS HIDROLÓGICOS

Os dados hidrológicos utilizados na pesquisa serão apresentados a seguir.

4.2.1 Dados de Precipitação

A maior parte dos dados de chuva, com duração mensal, foi obtida de arquivo de séries de chuvas consistidas e homogeneizadas pela ANA, utilizados na elaboração do Atlas Nordeste para o período de 1933 a 2001 e em outros trabalhos de alunos da UFPE, entre eles Virões e Cirilo (2019). Buscou-se então complementar esses dados para os anos seguintes, até 2017, a partir da base de dados da ANA e das agências estaduais.

As séries históricas de chuva das estações pluviométricas selecionadas foram levantadas, parte no aplicativo Hidroweb (ANA) e parte disponibilizada pelos órgãos estaduais: AESA/PB e Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN/RN, FUNCEME/CE e Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC/PE.

As séries históricas dessas estações pluviométricas foram utilizadas para a definição das médias ponderadas da chuva em nível mensal sobre as bacias hidrográficas que contribuem com os reservatórios de interesse. As estações foram separadas por reservatório para facilitar o trabalho de levantamento de dados para o cálculo da média ponderada e posterior utilização na simulação chuva-vazão. As estações que constam de históricos de chuva para o cálculo das médias ponderadas em nível mensal são apresentadas no Anexo 1.

4.2.2 Dados de Evapotranspiração Potencial

Foram utilizados os dados de evapotranspiração potencial do Relatório de Operação Integrada dos Açudes (BRASIL, 2000) elaborado no projeto básico do PISF nas simulações dos reservatórios de Pau Ferros, Santa Cruz do Apodi, Chapéu e Entremontes. Os demais reservatórios tiveram seus dados de evapotranspiração potencial, selecionados a partir de um estudo de regionalização de parâmetros realizado por Virões e Cirilo (2019), que será detalhado mais adiante. As estações climatológicas que foram selecionadas estão próximas aos aproveitamentos analisados e os dados foram levantados do site do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Essas informações foram inseridas no modelo hidrológico Auto-Calibrável - MODHAC para simulação no formato exigido pelo sistema. Na Tabela 5 são apresentados os valores mensais de evapotranspiração utilizados no estudo.

Tabela 5 - Evapotranspiração Potencial (Normais Climatológicas) utilizada nas simulações. (Continua)

Evapotranspiração Potencial (mm)														
Reservatórios	UF	ETP	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Armando Ribeiro Gonçalves	RN	Apodi	162	136	118	106	126	147	185	202	227	233	215	201
Santa C. do Apodi	RN	Florânia	267	217	208	181	179	181	210	267	287	306	293	287
Pau dos Ferros	RN	Florânia	267	217	208	181	179	181	210	267	287	306	293	287
Atalho	CE	Média 4 est.	191	139	104	106	136	160	216	266	282	283	262	248
Castanhão	CE	Média 4 est.	191	139	104	106	136	160	216	266	282	283	262	248
Orós	CE	Média 4 est.	191	139	104	106	136	160	216	266	282	283	262	248
Barra de Juá	PE	São Gonçalo	187	131	120	113	142	154	191	227	238	245	244	214
Caiçara	PB	Ouricuri	191	139	104	106	136	160	216	266	282	283	262	248
Chapéu	PE	Ouricuri	228	191	190	169	163	184	205	261	308	314	312	271
Eng.Francisco Sabóia	PE	São Gonçalo	187	131	120	113	142	154	191	227	238	245	244	214
Entremontes	PE	Ouricuri	228	191	190	169	163	184	205	261	308	314	312	271
C.Mãe D'água	PB	Patos	187	131	120	113	142	154	191	227	238	245	244	214
Eng. Ávidos	PB	São Gonçalo	162	136	118	106	126	147	185	202	227	233	215	201
Epitácio Pessoa	PB	Campina Grande	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273

Poções	PB	Monteiro	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273
São Gonçalo	PB	São Gonçalo	191	139	104	106	136	160	216	266	282	283	262	248

Fonte: A Autora, 2019.

4.3 ESTRUTURA DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

A Hidrologia estuda os fenômenos naturais do ciclo da água e seus processos (precipitação, escoamento, infiltração e evaporação), os quais dependem de vários fatores que permitam sua análise qualitativa e quantitativa. Segundo Tucci (2005), o modelo hidrológico é a representação de um sistema com o objetivo de entendê-lo. Os modelos foram desenvolvidos como ferramentas para representar o ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica e prever condições não antes observadas. Dessa forma busca-se entender o comportamento do sistema físico para se adaptar da melhor forma às mudanças que venham a ocorrer, respeitando seus processos naturais (TUCCI, 2005). Para se antecipar eventos e reduzir os impactos, na construção de estruturas de barramento ou de acumulação de água que venham a modificar o fluxo de um rio, no controle de cheias, no dimensionamento de um reservatório de abastecimento, no cálculo das demandas por água para agricultura, indústria e eletricidade, deve-se procurar o melhor modelo que satisfaça seu objetivo.

Com a evolução dos modelos é possível hoje simular com maior velocidade, através de processos computacionais, as vazões de uma bacia hidrográfica, levando em consideração vários componentes do ciclo hidrológico (VIRÃES; CIRILO, 2019). Tucci (2005) classificou os modelos em físicos, matemáticos e analógicos. Os modelos matemáticos representam a natureza do sistema através de equações matemáticas, porém este tipo de modelo não representa fenômenos físicos. O modelo analógico é o resultado da analogia entre equações de diferentes fenômenos, permitindo, por exemplo, a representação de um sistema hidráulico por um circuito elétrico. Já o modelo físico representa o sistema através de um modelo reduzido utilizando a teoria da semelhança.

Tucci (2005) classificou e exemplificou os sistemas, segundo vários critérios encontrados na literatura em:

- Memória, quando a entrada afeta o estado presente do sistema;
- Linear, quando o sistema satisfaz as propriedades de superposição e homogeneidade;

- Contínuo, quando os fenômenos de um sistema são contínuos no tempo, como exemplo o registro de nível da água por um equipamento automático (limnômetro);
- Discreto, quando as mudanças de estado se dão em intervalos definidos, como exemplo a leitura de cotas realizadas por um observador, duas vezes ao dia;
- Concentrado, quando não se leva em conta a variabilidade espacial, utilizando como exemplo a precipitação média de uma bacia ao invés da variabilidade dessa precipitação no território;
- Distribuído, quando as variáveis e os parâmetros do modelo são representados no espaço e eventualmente no tempo;
- Estocástico, quando é levada em conta no modelo a probabilidade de ocorrência do evento simulado;
- Determinístico, quando se ignora a chance de ocorrência das variáveis envolvidas e o modelo segue uma lei definida;
- Conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos;
- Empíricos, quando se ajustam os valores calculados das variáveis temporais aos dados observados modificando parâmetros que regem as fórmulas do modelo.

A simulação é o processo utilizado pelo modelo que se limita a gerar uma saída, por exemplo, da série de vazões, correspondente às entradas como precipitação, evaporação, dados da bacia hidrográfica, como a área, e parâmetros que compõem a formulação do modelo. A simulação se divide em ajuste (fase na qual os parâmetros são estimados), verificação (fase na qual as saídas para outros eventos são simuladas com os parâmetros estimados) e previsão (fase em que se busca a saída para diferentes entradas, não ocorridas, após ajuste dos parâmetros). O resultado de saída, que depende das estimativas iniciais, verifica se o modelo está representando bem o sistema em diferentes condições (TUCCI, 2005).

Como foi dito, a otimização procura, através de métodos matemáticos, maximizar ou minimizar uma função objetivo para o cálculo dos valores ideais para um conjunto de valores (variáveis de decisão), obedecendo restrições físicas, sociais, econômicas. Como exemplo, considere-se a situação de definir qual a vazão regularizável que se pode captar de um reservatório para maximizar o benefício social do abastecimento, obedecendo restrições como volume mínimo em qualquer tempo e capacidade das estruturas de captação, adução e

tratamento da água retirada. Assim, o modelo de otimização busca atender aos objetivos pré-estabelecidos de um determinado sistema, maximizando ou minimizando a função objetivo (ARAGÃO, 2008). A capacidade máxima, o volume mínimo e as restrições de vazões defluentes de um reservatório podem ser condições de contorno para otimização de sua operação.

4.3.1 Modelo Hidrológico Auto-Calibrável - MODHAC

Para a simulação hidrológica dos reservatórios foi selecionado o Modelo Hidrológico Auto-calibrável MODHAC, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. No trabalho de dissertação foi utilizado o MODHAC 2000 versão 1.8.0.5. O modelo escolhido simula o processo chuva-vazão de uma bacia hidrográfica, tendo sido muito utilizado no semiárido nordestino e no sul do Brasil (LANNA, 1997). É classificado como um modelo do tipo concentrado, pois não considera as características fisiográficas da bacia e a variabilidade espacial do processo hidrológico e (VIRÃES; CIRILO, 2019).

O MODHAC não teve evolução enquanto software para aprimorar as entradas e saídas de dados, o que dificulta o trabalho do modelador, e apresenta muitos parâmetros a calibrar. Mesmo assim o modelo foi escolhido por conta do grande volume de estudos anteriores realizados com o mesmo, o que facilitou o aproveitamento, por exemplo, de informações sobre os parâmetros, já calibrados, de diversas áreas da região de estudo. Mais que isso, tornou-se possível comparar resultados com estudos anteriores citados acima.

O MODHAC tem a finalidade de simular a fase terrestre do ciclo hidrológico de uma bacia e foi utilizado no projeto básico da Transposição do Rio São Francisco, para geração das séries pseudo-históricas, assim como nos estudos hidrológicos dos Planos Estaduais de Recursos Hídricos - PERH dos estados do Ceará e da Paraíba, no Plano Diretor das bacias hidrográficas do estado da Bahia (BRASIL, 2000). Além disso, foi utilizado também no Projeto Atlas Nordeste Abastecimento Urbano de Água (BRASIL, 2006) e no Relatório sobre os Reservatórios do Semiárido Brasileiro (BRASIL, 2017).

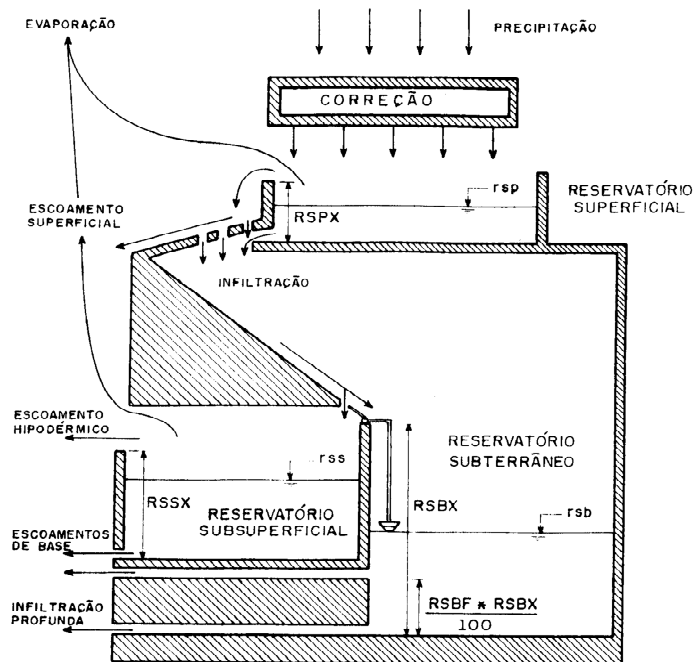
O modelo utiliza séries simultâneas de variáveis de chuva, vazão e evapotranspiração potencial e deve ter seus parâmetros calibrados. Para isso a concepção do modelo é desenvolvida com três reservatórios representando o armazenamento superficial, subsuperficial e subterrâneo (Figura 6). O armazenamento superficial representa a água armazenada superficialmente no corpo hídrico, o armazenamento subsuperficial representa a

água armazenada no horizonte vegetal do solo e o armazenamento subterrâneo representa a água armazenada nas camadas inferiores do solo (LANNA, 1997).

De acordo com Lanna (1997), o modelo matemático faz a interrelação dos diversos algoritmos, simulando os processos naturais do ciclo hidrológico a nível diário e mensal, com base nos fenômenos de precipitação, infiltração e evapotranspiração. Como se pode observar no esquema da Figura 9, inicialmente, a precipitação passa por um filtro de correção, que representa os erros de observação nos pluviômetros da bacia. Parte da água alimenta a evapotranspiração potencial e parte chega ao reservatório superficial. Caso a evapotranspiração não seja suprida, ainda haverá perda de água por esse processo nas próximas etapas. Caso a bacia esteja em processo de ressecamento, a outra parte percola para o reservatório sub-superficial e a evapotranspiração ainda retira uma parte, caso não esteja satisfeita.

Na bacia em processo de umedecimento, a evapotranspiração é suprida pela umidade e a água contida nos reservatórios superficial e sub-superficial infiltra e percola para o reservatório subterrâneo. Nesse processo, a outra parte da água que enche o reservatório superficial, extravasa e gera o escoamento superficial. A água contida nos reservatórios subterrâneo e sub-superficial percola, gerando o escoamento de base ou subterrâneo. O volume de água do reservatório superficial soma-se ao volume dos reservatórios subterrâneo e sub-superficial e com o enchimento de ambos será gerado o escoamento hipodérmico que se juntará ao escoamento superficial. No processo de ressecamento da bacia, a água dos reservatórios subterrâneo e sub-superficial irá formar o escoamento de base que se juntará ao escoamento superficial, que serão propagados até o exutório da bacia.

Figura 6 - Esquema dos reservatórios no MODHAC



Fonte: Lana, 1997.

Os vários algoritmos inter-relacionados no processo matemático simulado pelo MODHAC são processados com os valores dos parâmetros que precisam ser calibrados pelo usuário. Ao todo, são 15 parâmetros do MODHAC que devem ser ajustados por tentativa no início da simulação e outros posteriormente em uma calibração final (LANNA, 1997).

Tais parâmetros são apresentados e descritos na Tabela 6. Para o trabalho foram utilizados na simulação dos reservatórios estratégicos do PISF, parâmetros definidos no projeto básico e parâmetros regionalizados por Virões e Cirilo (2019) em sua dissertação de mestrado.

Tabela 6 - Descrição dos parâmetros de calibração.

(continua...)

Parâmetro	Descrição	Varição
RSPX (mm)	Capacidade Máxima do Reservatório Superficial	0 a 60* mm
RSSX (mm)	Capacidade Máxima do Reservatório Sub-superficial	20 a 300* mm
RSBX (mm)	Capacidade Máxima do Reservatório Subterrâneo	0 a 300* mm
RSBY	Efetivos no ajuste da curva de recessão do hidrograma	-
IMAX (mm)	Permeabilidade do Solo (infiltração máxima)	20 a 100 mm
IMIN (mm)	Infiltração Mínima	0 a 10 mm
IDEC	Coeficiente de Infiltração	0 a 1

ASP	Expoente da lei de esvaziamento do reservatório superficial	Valor baixo ou nulo
ASS	Expoente da lei de esvaziamento do reservatório sub-superficial	0,005
ASBX	Expoente da lei de esvaziamento do reservatório subterrâneo	0,001 a 0,1
ASBY	Efetivos no ajuste da curva de recessão do hidrograma	-
PRED	Correção da precipitação	999
CEVA	Parâmetro da lei de evapotranspiração do solo	0 a 1
CHET	Fração da evapotranspiração potencial (evaporação direta da Chuva)	-

Fonte: Lana, 1997.

* Para intervalos mensais, poderão ser encontrados valores superiores

Para este trabalho de dissertação foram utilizados no MODHAC, dados com intervalos mensais das variáveis de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada em arquivo texto, salvos nas extensões que o sistema pede: .plu, .etp e.vzo. Os parâmetros selecionados também estão em arquivo texto, salvos no formato .par. Com isso, foram criados os projetos de cada reservatório no MODHAC, separadamente, e o modelo foi executado. O resultado das séries de vazões naturais médias mensais afluentes aos reservatórios foi trabalhado posteriormente na planilha de otimização montada no Excel para o cálculo da vazão regularizada que será apresentada no próximo item.

4.3.1.1 Parâmetros Utilizados

Para a simulação do MODHAC no estudo atual, foram utilizados inicialmente os parâmetros regionalizados por Virões e Cirilo (2019). O autor desenvolveu em sua pesquisa, análises para a regionalização dos parâmetros na região do semiárido, que envolve toda área do presente estudo. Inicialmente o autor avaliou a extensão da validade dos parâmetros pré-calibrados nas estações fluviométricas do Atlas Nordeste na região do semiárido (BRASIL, 2006), avaliando sua aplicabilidade para as regiões próximas das áreas modeladas.

Virões e Cirilo (2019) organizou os dados de vazão, obtidos no programa Hidro (BRASIL, 2017) e na CPRM, selecionando os períodos mais adequados no ponto de vista qualitativo, as séries históricas de precipitação obtidas no projeto Atlas Nordeste (BRASIL, 2006), definindo as estações que seriam utilizadas após traçado o polígono de Thiessen no QGIS, estendidas para o período de 1933 a 2000, para as áreas de contribuição de cada estação fluviométrica e os valores de evapotranspiração obtidos através das médias mensais, também do projeto Atlas Nordeste (BRASIL, 2006). Os dados foram inseridos no MODHAC

e os resultados foram analisados comparando a vazão observada com a vazão calculada, perante indicadores estatísticos.

Os parâmetros que não obtiveram resultados aceitáveis para a regionalização foram analisados por Virões e Cirilo (2019) em uma segunda etapa nas bacias da área de estudo, surgindo assim novos parâmetros, que abrangessem uma área maior, onde se observasse maior homogeneidade dos parâmetros para o cálculo da vazão. A terceira etapa consistiu em gerar vazões para os períodos recentes e compará-las com as recentes vazões observadas.

De acordo com a regionalização de parâmetros realizada por Virões e Cirilo (2019) foi montado o Quadro 5, com alguns dos parâmetros utilizados na simulação do MODHAC para o presente estudo:

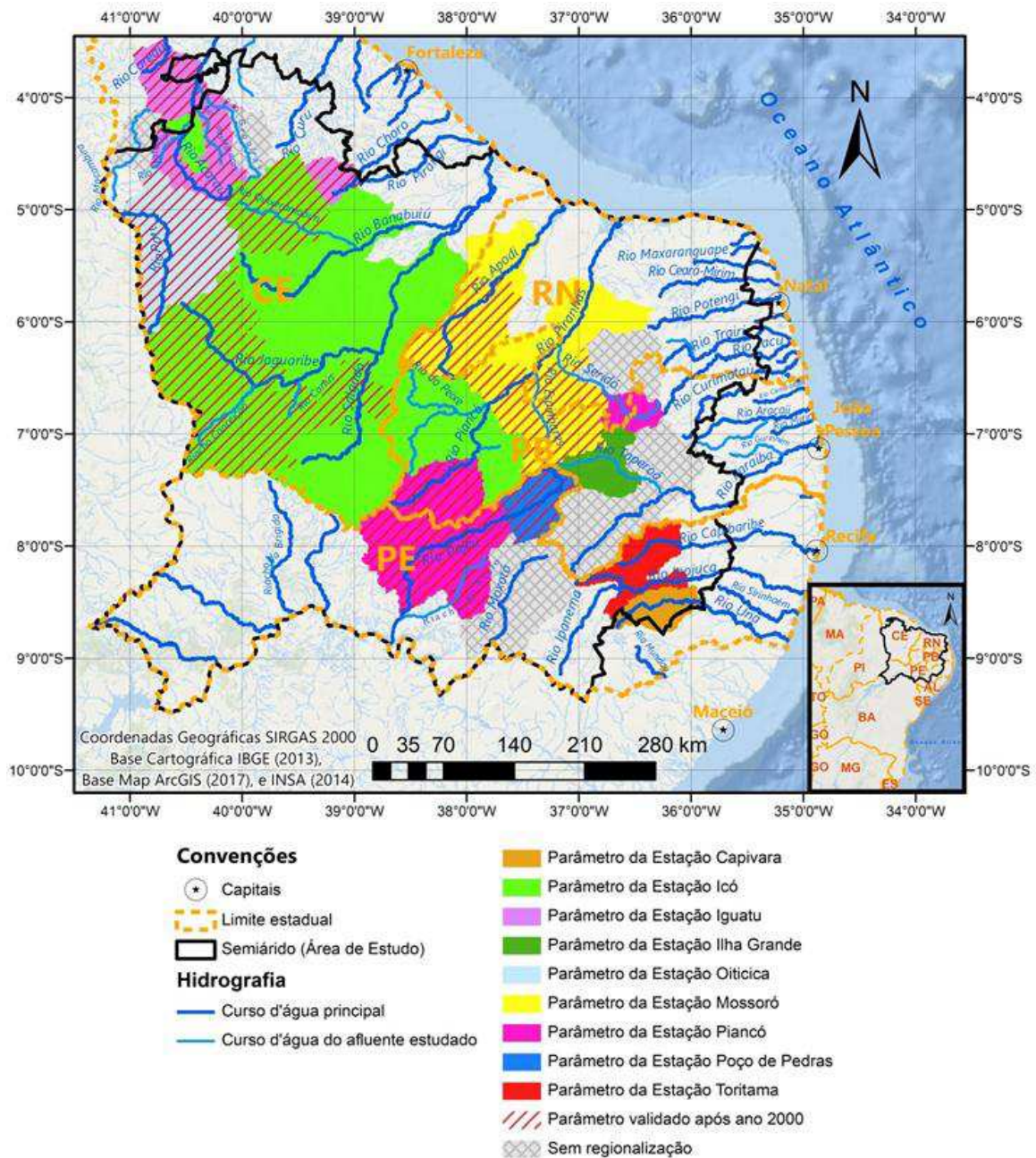
Quadro 5 - Parâmetros utilizados na calibração do MODHAC.

Estações		Mossoró	Piancó	Poço das Pedras	Poço Fumo	Floresta	Jacaré
Parâmetros	RSPX	121	49.82	50.67	127.3	89.94	40
	RSSX	519.3	530	135	102	143.4	300
	RSBX	19.67	0	0	0	0	20
	RSBY	145.8	0	0	0	0	20
	IMAX	78.91	181	57.2	114.6	35.02	24.18
	IMIN	0.4969	2	6.371	0.8392	38.61	7
	IDEC	0.2275	0.29	0.3287	0.02251	0.0898	0.7964
	ASP	1.668	0.01	0.07517	0.6639	0.7341	0.2525
	ASS	0.1017	0.08	0.002494	0.001685	0.004701	0.9555
	ASBX	0.4585	0	0	0	0	0.5
	ASBY	0.0379	0	0	0	0	0.5
	PRED	999	999	999	999	999	999
	CEVA	1	0.7459	0.9994	0.325	0.9998	0.1
	CHET	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8

Fonte: A Autora, 2019.

No total, Virões e Cirilo (2019) analisaram 170 estações fluviométricas para a regionalização dos parâmetros, o que resultou no mapa da Figura 7, com as áreas de drenagem e os parâmetros que obtiveram resultados aceitáveis, diferenciados por cores, conforme sua regionalização.

Figura 7 - Regionalização de Parâmetros do MODHAC para região semiárida do Nordeste.



Fonte: Virões e Cirilo (2019)

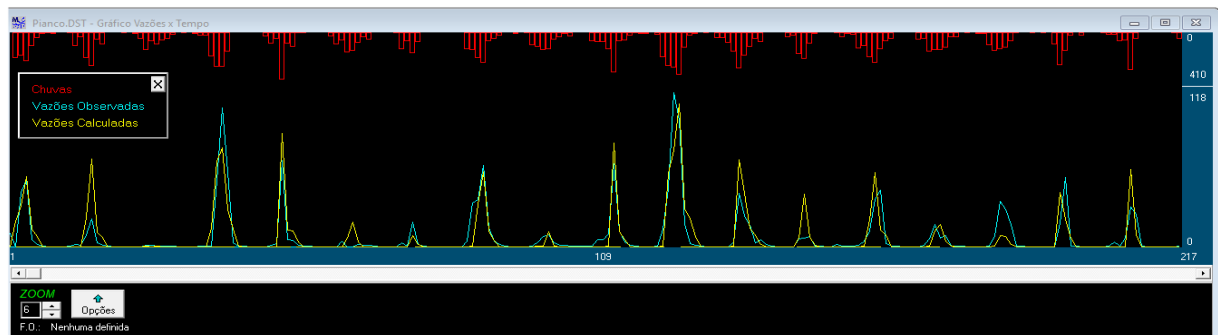
Os parâmetros regionalizados por Virões e Cirilo (2019) para a estação de Mossoró foram utilizados na simulação dos Reservatórios de Armando Ribeiro Gonçalves, Santa Cruz do Apodi, Pau dos Ferros, Atalho, Castanhão, Orós, Caiçara, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo. Já os parâmetros da estação de Piancó foram utilizados na simulação dos reservatórios de Barra de Juá, Coremas e Mãe D'água e os parâmetros da estação de Poço das Pedras foram utilizados na simulação dos reservatórios de Epitácio Pessoa e Poções.

Quanto aos parâmetros da estação de Poço Fumo foram utilizados na simulação do reservatório de Chapéu, os parâmetros da estação de Floresta foram utilizados na simulação do reservatório de Engenheiro Francisco Sabóia e os parâmetros da estação de Jacaré foram utilizados na simulação do reservatório de Entremontes.

Assim, utilizando o MODHAC com parâmetros calibrados, foram geradas séries de vazões mensais afluentes a cada reservatório tomando como base o período de 1933 a 2017, como se todas as barragens e reservatórios existissem.

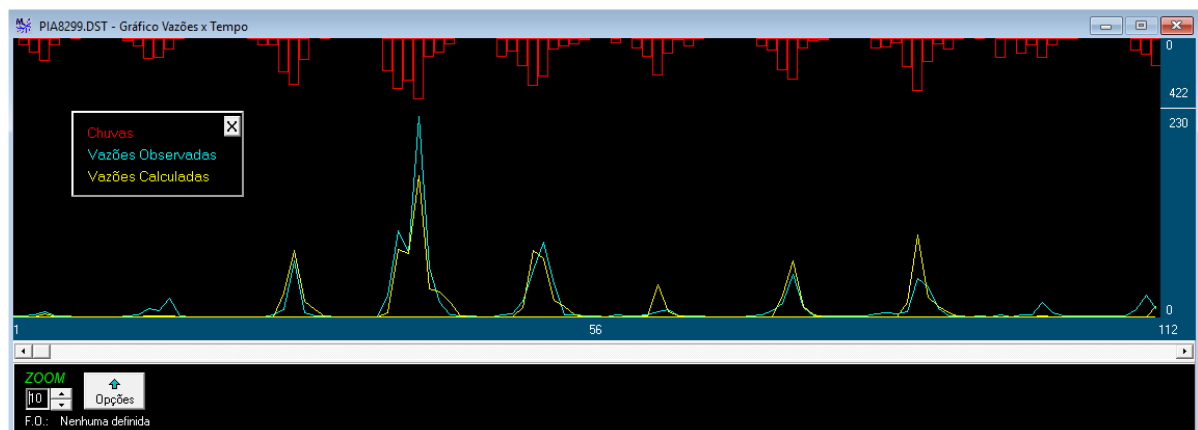
Uma das estações modeladas por Virões e Cirilo (2019) com o MODHAC, calibrada no Projeto Atlas Nordeste (BRASIL, 2006), que mais representou a bacia do rio Piranhas-Açu, com bons resultados, foi à estação de Piancó – PB. Para os períodos estudados: 1964 a 1981, 1982 a 1999 e 1999 a 2006 obteve-se resultados bem satisfatórios dos coeficientes estatísticos da modelagem. As avaliações dos resultados dos estudos realizados se caracterizaram como aceitável para os três períodos citados, conforme as Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 - Modelagem da estação 37340000 – Piancó, período 1964-1981 (Parâmetros e ETP de Piancó).



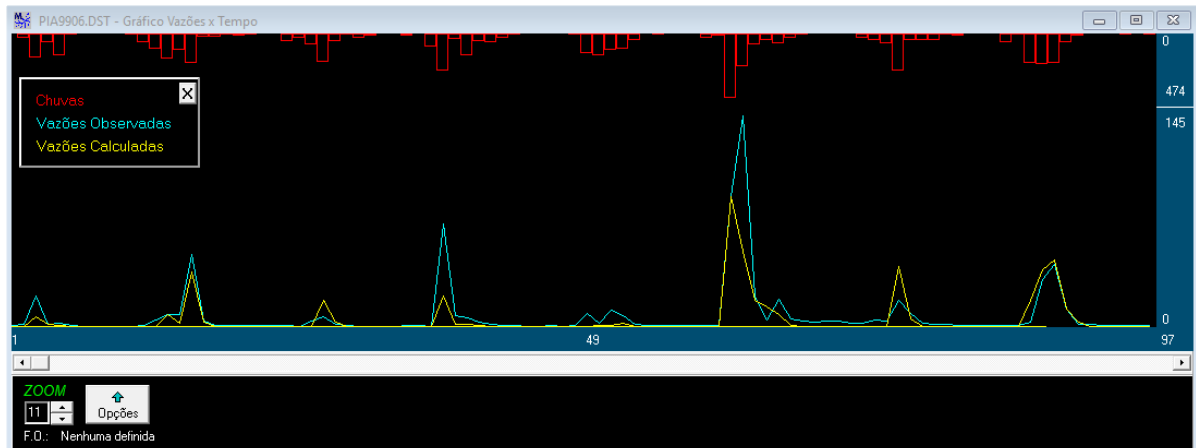
Fonte: Virões e Cirilo (2019)

Figura 9 - Modelagem da estação 37340000 – Piancó, período 1982-1999 (Parâmetros e ETP de Piancó).



Fonte: Virões e Cirilo (2019)

Figura 10 - Modelagem da estação 37340000 – Piancó, período 1999-2006 (Parâmetros e ETP de Piancó).



Fonte: Virões e Cirilo (2019)

4.3.2 Otimização das Vazões Regularizáveis

A variabilidade temporal da precipitação e da temperatura origina situações de déficit hídrico quando a vazão necessária para atender determinado uso é inferior, o que ocorre o contrário em período chuvoso, onde há excesso de vazão. A solução encontrada para reduzir a variabilidade de vazão é a regularização através de um ou mais reservatórios ou níveis concebidos dentro do próprio aproveitamento para armazenar água em períodos de estiagem.

Um reservatório é caracterizado por uma relação entre o nível de água, área inundada e o volume armazenado e essa relação é atribuída através de uma curva cota-área-volume, que deve ser desenvolvida com base na topografia do vale antes que o reservatório seja construído ou com base no levantamento de batimetria, depois que o reservatório está cheio (Collischonn, Dornelles, 2015).

A etapa seguinte à simulação das vazões afluentes a cada reservatório foi à avaliação das vazões regularizáveis por cada um destes aproveitamentos, utilizando técnicas de otimização para definir os valores máximos possíveis, obedecendo as devidas restrições.

O modelo de otimização foi criado em planilhas do aplicativo Microsoft Office Excel (2010), separando por aba o balanço hídrico de cada reservatório, considerando os sistemas com sua interação futura com os Eixos Norte e Leste. O balanço hídrico em cada um obedece à conservação da massa, com as afluências e retiradas, considerando como vertimento em cada mês, o excedente em relação à capacidade do reservatório.

As curvas cota-área-volume (Anexo 2) foram obtidas dos documentos Operação Integrada de Açudes do Projeto Inicial do Ministério da Integração Nacional (2000) e dos

órgãos estaduais responsáveis por operar os aproveitamentos hídricos como Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC e Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. Os volumes mensais vertidos por um ou mais reservatórios situados a montante, fazem parte da afluência ao reservatório à jusante.

Para cada reservatório foi calculada a vazão regularizável decorrente da retirada de água máxima possível com níveis de garantia de 90%, 95%, 99% e 100%. As técnicas de otimização foram aquelas presentes no suplemento *Solver* do Excel, que utilizam Programação Não Linear e Algoritmos Evolutivos. Admitiu-se então que essa vazão regularizável seja retirada do respectivo reservatório.

O modelo de planilha utilizado é apresentado na Figura 11. A primeira coluna conta com os meses e anos do período simulado, a segunda coluna é preenchida com a quantidade de dias de cada mês e a terceira coluna representa o cálculo dos volumes no início de cada mês. Nas colunas seguintes são inseridas, primeiramente, as entradas, ou seja, as vazões afluentes com base nas vazões naturais simuladas no MODHAC, as precipitações mensais e as contribuições provenientes da transposição. Em seguida, foram calculadas as áreas da lâmina d'água com base nas curvas CxAxV para facilitar o cálculo das evaporações mensais nos valores de saída. Além da evaporação, no que se refere as saídas dos reservatórios foram calculadas nas últimas colunas as retiradas máximas (demandas mensais baseadas na vazão de regularização) e os vertimentos. Todas as informações foram transformadas em volume de água em m³. Por fim, foram calculados os volumes ao final do mês, ou seja, a diferença entre as entradas e saídas de cada reservatório em estudo. Os volumes vertidos são os excedentes ao final do mês, ou seja, o volume que excede a capacidade máxima do reservatório, informado também na planilha.

Figura 11 - Planilha de Otimização

Reservatório					Vazões Regularizadas		
Operação	C (m)	V(hm³)	A(m²)	%VU	Garantias	s/pisf	c/pisf
Valores Mínimos :					Qr 90%		
Capacidade :					Qr 95%		
Área do Reservatório:	km²				Qr 99%		
Coef. de Evap:	%				Qr 100%		
Irrigação:	m³/s				Curva Área(m²) x Volume(m³) A(V):y = ax² + bx + c		
Q.Regularizada:	m³/s	(Qreg)²	m³/s	hm³			
Tolerância de erro:	%	V.mín			a	b	c
Q Méd	m³/s						
Q Máx	m³/s						
Q Min	m³/s						

Entradas										Saídas				Resultado	
Data	Nºdias	V.Inicial(hm³)	Qafl (mm*m³)	Vafl (m³)	P(mm)	VP (m³)	V 1/2*t (m³)	A 1/2*t (m²)	Q. SFR	Q.Mont	V.Ret(m³)	Etp (mm)	V.evp. (m³)	V.Vert(m³)	V.Final(m³)
jan/1933	31														
fev/1933	28														
mar/1933	31														
abr/1933	30														
mai/1933	31														
jun/1933	30														
jul/1933	31														
ago/1933	31														
set/1933	30														
out/1933	31														
nov/1933	30														
dez/1933	31														
jan/1934	31														
fev/1934	28														
mar/1934	31														
abr/1934	30														
mai/1934	31														
jun/1934	30														

Fonte: A Autora, 2019.

Para realizar a otimização foram necessários incluir as restrições, a função-objetivo e as variáveis de decisão, computadas nos parâmetros do Solver conforme a Figura 12. Considerou-se que cada reservatório inicia a simulação com 50 % de seu volume máximo. O Método de Solução escolhido foi o GRG Não Linear, com convergência de 0.0001.

Figura 12 - Parâmetros do Solver

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: ☒ Máx. ☐ Mín. ☐ Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

\$B\$8 >= 0
 \$C\$1037 <= \$B\$9
 \$E\$9 >= 0

☐ Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução
 Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolver Fechar

Fonte: A Autora, 2019

O objetivo da Planilha foi encontrar de forma otimizada, a vazão regularizada de cada reservatório estratégico do PISF. Tanto a função-objetivo como a variável de decisão foram representadas pela vazão regularizada que se deseja maximizar. As restrições de cálculo são:

- Vazão Regularizada ≥ 0 ;
- Volume Inicial $\geq$ Tolerância de Erro (0%, 1%, 5% e 10%);
- Volume mínimo ≥ 0 .

Foram otimizados valores de vazão regularizada para quatro períodos a se comparar: 1933 a 1991, 1933 a 2001 e 1933 a 2017 para uma operação hipotética do reservatório de Sobradinho e no período de 1979 a 2017 para a operação real adotada em Sobradinho. A escolha de tais períodos se justifica pela ocorrência de dois períodos críticos de seca, não considerados nos estudos do PISF: um no final do século passado (em torno de 1998/1999) e o atual, iniciado em 2011, que ainda perdura na maior parte do semiárido (apesar de terem ocorrido precipitações mais próximas da média em 2017 e 2018, elas aconteceram de forma irregular espacialmente, de forma que a maioria dos reservatórios ainda continua em estado crítico de acumulação neste início de 2019).

Como foi citado no Capítulo 3, as vazões fornecidas pela transposição dependem da situação volumétrica em que o reservatório de Sobradinho se encontra. Cirilo (2018) estudou a adoção de regras de operação do reservatório, baseadas nos atendimentos a montante e a jusante, considerando que o barramento, que começou a operar em 1978, já existisse desde 1933. Com essa premissa, desconsiderando a forma na qual o reservatório foi operado, o autor criou um conjunto de faixas de defluência para a vazão de saída mês a mês, considerando a maximização das vazões de saída para todo o período simulado de 1923 a 2017, de modo que o volume mínimo armazenado não fosse nunca inferior a 5%. Nas simulações foram consideradas como retiradas as estimativas atuais para irrigação na borda do lago e a jusante de Sobradinho e as vazões mínimas do PISF. Dependendo da acumulação em Sobradinho, as retiradas cresceriam para os eixos Norte e Leste até o limite de transporte dos canais.

Essas premissas foram utilizadas para avaliação da sinergia hídrica como um dos cenários. O outro foi aquele da operação real ocorrida em Sobradinho.

4.4 SINERGIA HÍDRICA

A sinergia hídrica representa a parcela de acréscimo de vazão regularizada pelo reservatório ou sistema de reservatórios, que ultrapassa o acréscimo decorrente da vazão aduzida (Farias *et al*, 2004). A sinergia hídrica traz um melhor aproveitamento das águas aduzidas naturalmente aos reservatórios, que sem adução de vazões exógenas, não eram aproveitadas e transformadas em vertimentos e evaporações (Farias *et al*, 2004).

Para se determinar o ganho de sinergia hídrica de um sistema de reservatórios integrados é necessário quantificar todas as entradas e saídas de água em volume (m³) associadas a uma garantia de atendimento, bem como considerar os detalhes das características dos aproveitamentos como capacidade máxima de acumulação, a curva Cota-Área-Volume (Anexo 2), entre outras relações.

A metodologia tem como ponto de partida a equação de balanço hídrico:

$$V_n = V_{n-1} + V_a + V_p - V_r - V_e - V_v \quad (1)$$

Onde: V_n é o volume armazenado no mês “n”; V_{n-1} é o volume armazenado no mês anterior, V_a é o volume afluente ao reservatório, V_p é o volume precipitado, V_r é o volume regularizado, V_e é o volume evaporado e V_v é o volume vertido, todos em m³.

O processo de simulação da operação de um reservatório consiste em aplicar mensalmente a Equação acima, considerando, que para um conjunto de reservatórios integrados como é o caso da transposição, o vertimento de um reservatório a montante entrará no cálculo da afluência de um reservatório que esteja a jusante. O vertimento de dado reservatório irá ocorrer sempre que sua capacidade máxima de volume for ultrapassada.

Quando um reservatório não consegue atender à vazão regularizada ele apresenta falhas de suprimento. Então a garantia de um reservatório (g) será calculada a partir do número de meses com falhas (nf) anotadas em relação ao número total de meses do período simulado (n).

$$g = \left(1 - \frac{nf}{n}\right) \times 100 \quad (2)$$

A solução das equações 1 e 2 estabelece a curva de garantia de determinado reservatório para uma faixa de valores de vazão regularizada. O nível de garantia adotado em estudos hidrológicos para o abastecimento humano e industrial é de 99 – 100%. Para fins hidroagrícolas, aqui no Brasil, é de 90% e para fins energéticos é de 95% (Farias *et al*, 2004). Dessa forma, conhecendo a capacidade de regularização de determinado reservatório, condicionando ganhos de vazões afluentes naturais e volume de água da precipitação direta no espelho d’água, bem como seus usos consultivos e suas perdas por evaporação e vertimentos, para o cálculo da sinergia hídrica, deve-se simular novamente o sistema adicionado com as vazões exógenas, captadas da bacia principal que atende a transposição.

Dessa forma, de acordo com o que foi descrito inicialmente, tem-se a equação da sinergia hídrica para o PISF:

$$\text{Sinergia Hídrica} = Q_{r2} - Q_{r1} - Q_{adv} \quad (3)$$

Onde Q_{r2} é a vazão regularizada com o aporte de água do PISF, Q_{r1} é a vazão regularizada sem o aporte de água e Q_{adv} é a vazão aduzida pelo PISF. A fórmula da sinergia hídrica será utilizada na etapa dos resultados para o cálculo dos ganhos sinérgicos de vazões dos trechos que contemplam os reservatórios beneficiados com o aporte de água do rio São Francisco.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vazão de regularização Q_{reg} de um reservatório é calculada com o objetivo de identificar a capacidade que um aproveitamento hídrico tem para atender as demandas dos usuários e da bacia como um todo. De acordo com a metodologia apresentada, os reservatórios do PISF foram simulados conjuntamente de forma que suas capacidades de regularização fossem calculadas simultaneamente, gerando uma grande quantidade de resultados numéricos em forma de planilhas e gráficos. Como foi visto, estas capacidades de regularização dos reservatórios foram calculadas nas planilhas de otimização. A seguir são apresentados os resultados dos valores calculados para simular a capacidade de regularização de cada reservatório sem e com aporte de água do São Francisco.

Outra análise que se apresenta é o percentual de sinergia hídrica que os reservatórios que compõem o PISF vão obter, com as águas transpostas da bacia principal, comparando a Q_{reg} com e sem as vazões transferidas do PISF. Como explicado anteriormente no Capítulo 3 desta dissertação, as simulações foram realizadas com base numa operação hipotética do Reservatório de Sobradinho, simulada por Cirilo (2018) começando no ano de 1933 até 2017, considerando a existência desse reservatório a partir daquele ano e a operação real realizada pela Chesf/ONS desde o início de atividades de Sobradinho em 1979.

Dessa forma, como descrito na metodologia do Capítulo 4, inicialmente foram inseridas na Planilha de Otimização as aflúências naturais calculadas no MODHAC para cada reservatório, adicionando a contribuição do volume de chuva dentro do reservatório e as perdas por evapotranspiração potencial e por vertimentos, para o cálculo da capacidade máxima de regularização com base na conservação da massa, a equação da curva Cota x Área x Volume e as restrições adotadas na ferramenta Solver do Microsoft Excel. Para o cálculo, foram adotadas garantias de 90%, 95%, 99% e 100%.

5.1 SIMULAÇÕES DO EIXO NORTE DO PISF

Inicialmente foram realizadas as simulações dos trechos do eixo norte do PISF, que fica mais a montante da bacia do rio São Francisco.

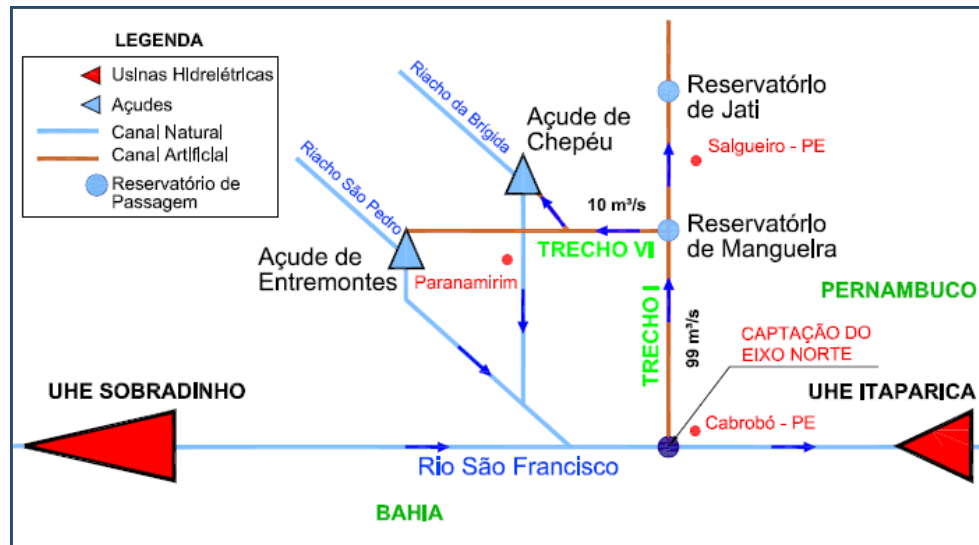
5.1.1 Trecho I e Trecho VI

O Trecho I do eixo Norte da transposição parte da captação da água do rio São Francisco, em Cabrobó – PE e segue por um canal construído para o Reservatório de Mangueira – PE, onde haverá uma saída para os reservatórios de Chapéu e Entremontes, formando o outrora denominado trecho VI da Transposição, atualmente Ramal Entremontes. Quando construído, esse ramal irá alimentar os reservatórios situados nos riachos de Brígida e São Pedro (Figura 13). De acordo com a regra de operação do PISF autorizada, a vazão transposta para o trecho VI /Ramal Entremontes será de 10 m³/s, quando o reservatório de Sobradinho estiver acima de 94% de sua capacidade.

Outra possibilidade que foi proposta pelo estado de Pernambuco para atender a esse trecho é a transferência de uma parcela adicional de 25 m³/s, do rio principal, quando o reservatório de Sobradinho estiver abaixo da capacidade de 94%. Ou seja, quando o eixo Norte da transposição estiver captando água do rio principal, em sua capacidade máxima (99 m³/s), o trecho VI do PISF estará recebendo um valor de 10 m³/s e quando o PISF estiver fora dessa faixa operacional o trecho irá receber um valor de 25 m³/s que será adicionada a vazão captada pelo eixo Norte.

Essa hipótese, aparentemente contraditória em relação à outorga concedida pela ANA, se explica: a vazão adicional seria transferência de outorga de outro projeto do estado, denominado Ramal do Sertão Pernambucano, registrando que toda essa região está inserida na bacia do São Francisco. O Eixo Norte apenas servirá, se consolidada a obra, como duto de passagem quando estiver sub-utilizado, evitando-se custos com os sistemas de adução previstos inicialmente no outro projeto.

Figura 13 - Diagrama Unifilar da captação do Eixo Norte, Trechos I e VI e reservatórios de Entremontes e Chapéu.



Fonte: A Autora, 2019.

As médias mensais dos volumes de entradas e saídas da planilha de otimização dos reservatórios de Chapéu e Entremontes, que compõem o trecho VI, para o cálculo das vazões regularizadas para os quatro percentuais de garantia, nos períodos de 1933 a 1991, 1933-2001 1933-2017 (operação hipotética de Sobradinho) e 1979-2017 (operação real de Sobradinho), com e sem a adição de água do PISF são apresentadas na Tabela 7.

Foram consideradas na simulação as seguintes parcelas da vazão transposta do rio São Francisco para os reservatórios do Trecho VI:

- Para uma vazão de captação de 25 m³/s, quando o reservatório de Sobradinho estiver abaixo de 94 % de sua capacidade, uma parcela 20 m³/s escoará para o reservatório de Entremontes e 5 m³/s vai para o reservatório de Chapéu;
- Para uma vazão de captação de 10 m³/s, quando o reservatório de Sobradinho estiver acima de 94% de sua capacidade, uma parcela de 8 m³/s será transferida para o reservatório de Entremontes e 2 m³/s para o reservatório de Chapéu.

Na Tabela 7 pode-se constatar os baixíssimos valores, quando não nulos, das vazões regularizadas por estes reservatórios considerando somente a vazão afluyente sem aporte externo. Embora sejam dois reservatórios de porte significativo para os padrões do estado, a irregularidade das precipitações e do escoamento resultante gera essa situação.

Verifica-se que há uma queda nos valores das vazões médias afluentes aos reservatórios de Entremontes e Chapéu entre os períodos de 1933 a 1991 e 1933 a 2001. Essa diminuição pode ser justificada pelo período crítico de baixa pluviosidade em toda região

semiárida, ao final do século XX. Para o período simulado de 1933 a 2017 e 1979 a 2017 também se nota a redução da vazão afluyente aos dois reservatórios do Trecho VI.

Outro ponto a se observar nos valores calculados nas simulações dos dois reservatórios é que conforme o percentual de garantia diminua, a capacidade de regularização aumenta e conseqüentemente, pelo maior uso, as médias de evaporação e vertimento diminuam.

Tabela 7 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios de Chapéu e Entremontes.

Vazões Médias das Entradas e Saídas do Reservatório de Chapéu e Entremontes (TVI- Eixo Norte PISF) – m³/s																						
Garantias			100%					99%					95%					90%				
Açudes	Capac. (hm³)	UF	Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas		
Entremontes	339.3	PE	Afl.	Plu.	Reg.	Evap	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap	Vert.	Afl.	Plu.	Reg	Evap	Vert.	Afl.	Plu.	Reg	Evap	Vert
1933-1991			0,89	0,24	0,01	0,97	0,19	0,89	0,23	0,03	0,95	0,19	0,89	0,22	0,08	0,90	0,18	0,89	0,21	0,14	0,85	0,18
1933-2001			0,76	0,22	0,00	0,89	0,16	0,76	0,22	0,01	0,88	0,16	0,76	0,21	0,05	0,84	0,16	0,76	0,20	0,09	0,80	0,15
1933-2017 (sem o PISF)			0,67	0,19	0,00	0,79	0,13	0,67	0,19	0,01	0,78	0,13	0,67	0,18	0,04	0,75	0,13	0,67	0,18	0,04	0,75	0,13
1933-2017 (com o PISF)			16,2	0,61	12,1	2,61	2,15	16,2	0,58	12,7	2,46	1,64	16,2	0,48	14,2	1,99	0,74	16,2	0,30	15,7	1,21	0,26
Incremento de Vazão 1933-2017			15,5		12,05			15,5		12,70			15,5		14,2			15,5		15,7		
1979-2017 (sem PISF)			0,71	0,21	0,00	0,87	0,19	0,71	0,21	0,00	0,87	0,19	0,71	0,21	0,03	0,85	0,19	0,71	0,21	0,05	0,83	0,19
1979-2017 (com PISF)			19,0	0,47	17,0	2,00	0,40	19,0	0,37	17,6	1,56	0,19	19,0	0,21	18,8	0,81	0,10	19,0	0,09	19,9	0,32	0,05
Incremento de Vazão 1979-2017			18,3		17,0			18,3		17,6			18,3		18,8			18,3		19,9		
Chapéu	188	PE	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap	Vert.
1933-1991			1,60	0,31	0,00	1,02	0,90	1,60	0,31	0,00	1,02	0,90	1,60	0,31	0,01	1,01	0,90	1,60	0,30	0,06	0,98	0,88
1933-2001			1,20	0,27	0,00	0,91	0,63	1,20	0,27	0,00	0,91	0,63	1,20	0,27	0,00	0,91	0,63	1,20	0,27	0,00	0,91	0,63
1933-2017 (sem o PISF)			1,05	0,25	0,00	0,85	0,51	1,05	0,25	0,00	0,85	0,51	1,05	0,25	0,00	0,85	0,51	1,05	0,25	0,00	0,85	0,51
1933-2017 (com o PISF)			4,95	0,41	3,11	1,48	0,74	4,95	0,38	3,33	1,33	0,66	4,95	0,28	3,83	0,93	0,54	4,95	0,22	4,18	0,70	0,48
Incremento de Vazão 1933-2017			3,90		3,11			3,90		3,33			3,90		3,83			3,90		4,18		
1979-2017 (sem PISF)			0,88	0,24	0,00	0,82	0,41	0,88	0,24	0,00	0,82	0,41	0,88	0,24	0,00	0,82	0,41	0,88	0,24	0,00	0,82	0,41
1979-2017 (com PISF)			5,46	0,25	4,41	0,88	0,46	5,46	0,23	4,57	0,77	0,42	5,46	0,19	4,80	0,62	0,37	5,46	0,19	4,85	0,60	0,36
Incremento de Vazão 1979-2017			4,58		4,41			4,58		4,57			4,58		4,80			4,58		4,85		
Incremento Total de Vazão 1933-2017			19,4		15,2			19,4		16,0			19,4		18,0			19,4		19,8		
Incremento Total de Vazão 1979-2017			22,9		21,4			22,9		22,2			22,9		23,6			22,9		24,7		

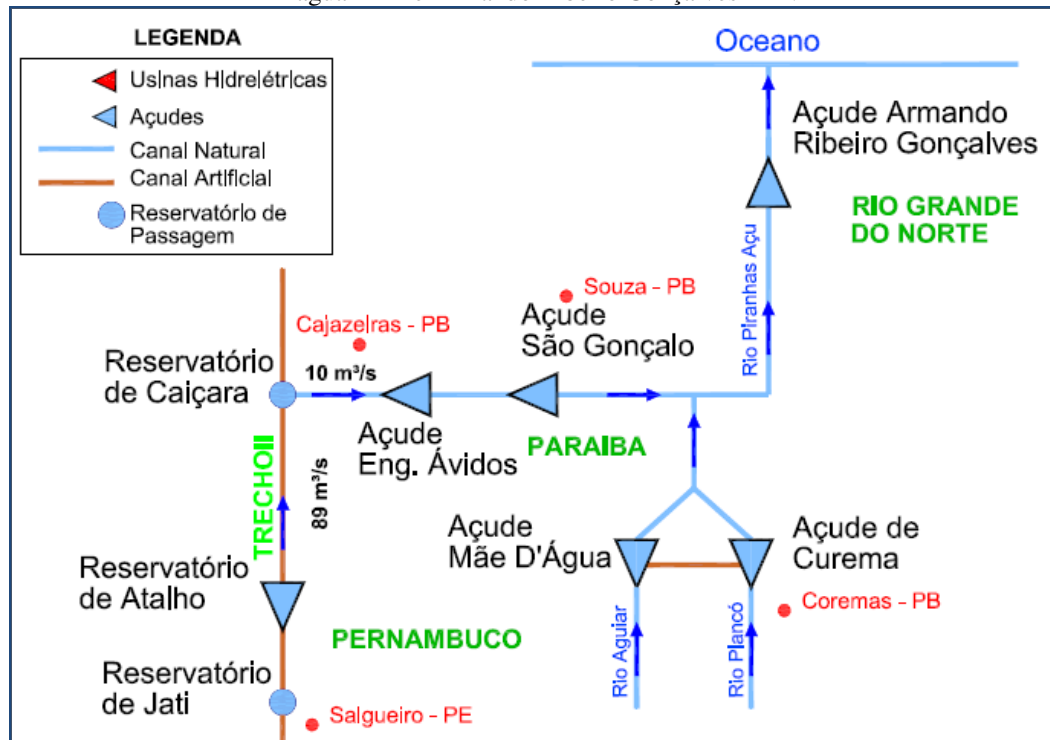
Fonte: A Autora, 2019.

5.1.2 Trecho II

O canal parte do reservatório de Atalho – CE, segue pelo túnel do Cuncas para o reservatório de Caiçara -PB, pivô de distribuição das vazões para os trechos II, III e IV (Figura 14). Anteriormente, no projeto inicial, havia sido previsto um reservatório chamado de Cuncas, a montante do túnel de mesmo nome, porém, aproveitando os desníveis topográficos da região para construção de hidroelétricas, foi projetado o reservatório de Caiçara-PB. O trecho II tem o objetivo de levar água do São Francisco para os reservatórios de Engenheiro Ávidos, São Gonçalo, na parte alta do rio Piranhas na Paraíba, e seguir para o reservatório de Armando Ribeiro Gonçalves no rio Piranhas-Açu no Rio Grande do Norte. O reservatório de Curemas Mãe D'água –PB fez parte da simulação deste trecho, pois está localizado na bacia do rio Piancó, importante afluente do rio Piranhas Açu e seus vertimentos contribuíram para o cálculo da capacidade de regularização do reservatório de Armando Ribeiro Gonçalves.

De acordo com regra de operação do PISF, as vazões transpostas para esse trecho são da ordem de 10 m³/s quando o reservatório de Sobradinho estiver acima de 94% de sua capacidade e 4.23 m³/s quando estiver abaixo desse percentual, respeitando a vazão estabelecida para os portais estaduais.

Figura 14 - Diagrama Unifilar do Trecho II e reservatórios de Engenheiro Ávidos, São Gonçalo, Curema e Mãe D'água – PB e Armando Ribeiro Gonçalves - RN



Fonte: A Autora, 2019.

Assim como no trecho VI, as médias mensais dos volumes de entradas e saídas da planilha de otimização dos reservatórios de Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Armando Ribeiro Gonçalves, que compõem o trecho II, para o cálculo das vazões regularizadas para os quatro percentuais de garantia, nos períodos de 1933 a 1991, 1933-2001 1979 -2017 e 1933-2017, com e sem a captação de água do PISF são apresentadas na Tabela 8. Como se pode observar, há uma redução nas vazões médias aduzidas e regularizadas entre o período de 1933 a 1991 e 1933 a 2001, justificado pelo período crítico de chuvas no semiárido nordestino ao final do século XX. No entanto houve aumento de vazão aduzida entre os períodos de 1933 a 2001 e 1933 a 2017, para os reservatórios de São Gonçalo e Armando Ribeiro Gonçalves. Como foi ressaltado anteriormente, a diminuição nos percentuais de garantia resulta no aumento da capacidade de regularização de vazão, com isso há diminuição nos valores médios vertidos e evaporados.

Tabela 8 - Médias das entradas e saídas de vazões da planilha de otimização dos reservatórios Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Armando Ribeiro Gonçalves

Vazões Médias das Entradas e Saídas do Reservatório Engenheiro Ávidos, São Gonçalo e Armando Ribeiro Gonçalves, (TH - Eixo Norte PISF) – m³/s

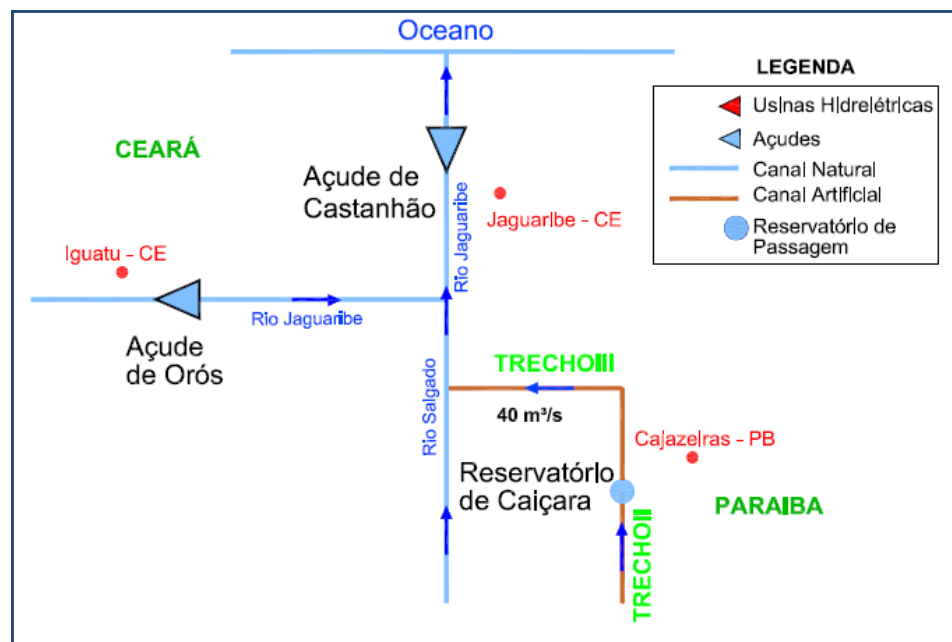
Garantias			100%					99%					95%					90%				
Açudes	Capac. (hm³)	UF	Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas		
Armando R, Gonçalves	2400	RN	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			38,5	3,44	15,9	7,27	18,7	38,2	3,31	17,1	7,01	17,6	37	3,04	19,9	6,34	14,7	35,8	2,82	22,3	5,79	12,4
1933-2001			36	3,31	15,9	7,14	16,2	35,7	3,18	17,2	6,8	15,1	34,9	2,83	20,3	6	12,6	34	2,58	22,9	5,36	10,8
1933-2017 (sem o PISF)			37,6	3,39	15,3	7,23	18,9	36,8	3,25	16,5	6,93	17,1	35	2,91	19,6	6,17	13,4	34,3	2,66	22	5,56	11,6
1933-2017 (com o PISF)			43	3,49	18,7	7,46	20,8	40,1	3,21	20,1	6,84	17	38,4	2,89	22,9	6,14	13,5	37,1	2,63	24,9	5,53	11,4
Incremento de Vazão 1933-2017			5,4		3,4			3,3		3,6			3,4		3,3			2,8		2,9		
1979-2017 (sem PISF)			29,1	3,27	15,3	6,78	18,4	29,1	3,19	15,9	6,61	17,7	29,1	2,81	19,1	5,78	14,2	29,1	2,52	21,1	5,07	12,8
1979-2017 (com PISF)			40,8	3,39	18,4	7,05	19,8	40,4	3,31	18,9	6,88	19	38	2,79	22,5	5,74	14,3	37,4	2,55	24,5	5,17	12,9
Incremento de Vazão 1979-2017			11,7		3,1			11,3		3			8,9		3,4			8,3		3,4		
Eng. Ávidos	255	PB	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			3,08	0,54	1,57	0,96	1,09	3,08	0,53	1,64	0,93	1,05	3,08	0,49	1,93	0,86	0,89	3,08	0,44	2,3	0,78	0,67
1933-2001			2,88	0,51	1,58	0,91	0,94	2,88	0,49	1,65	0,88	0,9	2,88	0,45	1,89	0,8	0,78	2,88	0,42	2,15	0,73	0,65
1933-2017 (sem o PISF)			2,54	0,66	0,35	1,17	1,72	2,54	0,65	0,39	1,16	1,69	2,54	0,62	0,64	1,1	1,49	2,54	0,51	1,35	0,91	0,98
1933-2017 (com o PISF)			8,64	0,73	1,5	1,29	6,95	8,64	0,71	1,66	1,27	6,79	8,64	0,61	3,18	1,09	5,27	8,64	0,49	4,22	0,88	4,47
Incremento de Vazão 1933-2017			6,1		1,15			6,1		1,27			6,1		2,54			6,1		2,87		
1979-2017 (sem PISF)			2,05	0,6	0,35	1,04	1,37	2,05	0,6	0,37	1,03	1,35	2,05	0,58	0,46	1	1,3	2,05	0,55	0,6	0,95	1,22
1979-2017 (com PISF)			6,5	0,71	0,71	1,23	5,81	6,5	0,7	0,82	1,22	5,75	6,5	0,65	1,32	1,14	5,28	6,5	0,61	1,77	1,06	4,89
Incremento de Vazão 1979-2017			4,45		0,36			4,45		0,45			4,45		0,86			4,45		1,17		
São Gonçalo	44,6	PB	Afl..	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			2,01	0,13	0,36	0,28	1,46	1,97	0,13	0,39	0,27	1,39	1,8	0,12	0,49	0,24	1,17	1,58	0,11	0,58	0,21	0,91
1933-2001			1,80	0,13	0,33	0,28	1,27	1,76	0,12	0,37	0,26	1,21	1,64	0,11	0,46	0,24	1,04	1,51	0,1	0,55	0,21	0,87
1933-2017 (sem o PISF)			2,56	0,14	0,33	0,28	2,09	2,53	0,13	0,37	0,27	2,03	2,33	0,12	0,45	0,25	1,78	1,81	0,11	0,52	0,21	1,24
1933-2017 (com o PISF)			7,78	0,19	0,85	0,39	7,43	7,63	0,18	2,01	0,38	6,88	6,1	0,18	2,44	0,37	5,38	5,31	0,17	2,45	0,35	4,72
Incremento de Vazão 1933-2017			5,22		0,52			5,1		1,64			3,77		1,99			3,5		1,93		
1979-2017 (sem PISF)			0,82	0,14	0,33	0,27	1,74	0,82	0,14	0,34	0,27	1,72	0,82	0,13	0,42	0,25	1,62	0,82	0,12	0,5	0,22	1,49
1979-2017 (com PISF)			6,63	0,19	0,97	0,38	6,3	6,57	0,19	1,37	0,38	6,14	6,1	0,18	2,47	0,37	5,46	5,71	0,18	2,47	0,37	5,09
Incremento de Vazão 1979-2017			5,81		0,64			5,75		1,03			5,28		2,05			4,89		1,97		
Incremento Tot. de Vazão 1933-2017			16,7		5,07			14,5		6,51			13,3		7,83			12,4		7,7		
Incremento Tot. de Vazão 1979-2017			22,0		4,1			21,5		4,48			18,6		6,31			17,6		6,54		

Fonte: A Autora, 2019.

5.1.3 Trecho III

O canal parte do reservatório de Caiçara – PB e segue para a usina hidrelétrica de Salgado II no rio Salgado – CE (Figura 15). O rio Salgado, por sua vez, deságua no rio Jaguaribe até encontrar o reservatório de Castanhão - CE. O reservatório de Orós-CE, localizado a montante do reservatório de Castanhão no rio Jaguaribe, também fez parte das simulações, de forma que seu vertimento contribuiu na vazão afluente a este reservatório. De acordo com regra de operação do PISF, as vazões transpostas para o trecho III serão da ordem de 40 m³/s quando o reservatório de Sobradinho estiver acima de 94% de sua capacidade.

Figura 15 - Diagrama Unifilar do Trecho III e reservatórios de Castanhão e Orós-CE.



Fonte: Autora, 2019.

A Tabela 9 a seguir apresenta as médias mensais dos volumes de entradas e saídas da planilha de otimização do reservatório de Castanhão, para o cálculo das vazões regularizadas para os quatro percentuais de garantia, tanto na simulação da operação hipotética dos períodos de 1933 a 1991, 1933-2001, 1933-2017 como para a simulação da operação real de 1979 a 2017, com e sem a captação de água do PISF.

Tabela 9 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios Castanhão.

Vazões Médias das Entradas e Saídas do Reservatório Castanhão, (TIH - Eixo Norte PISF) – m³/s

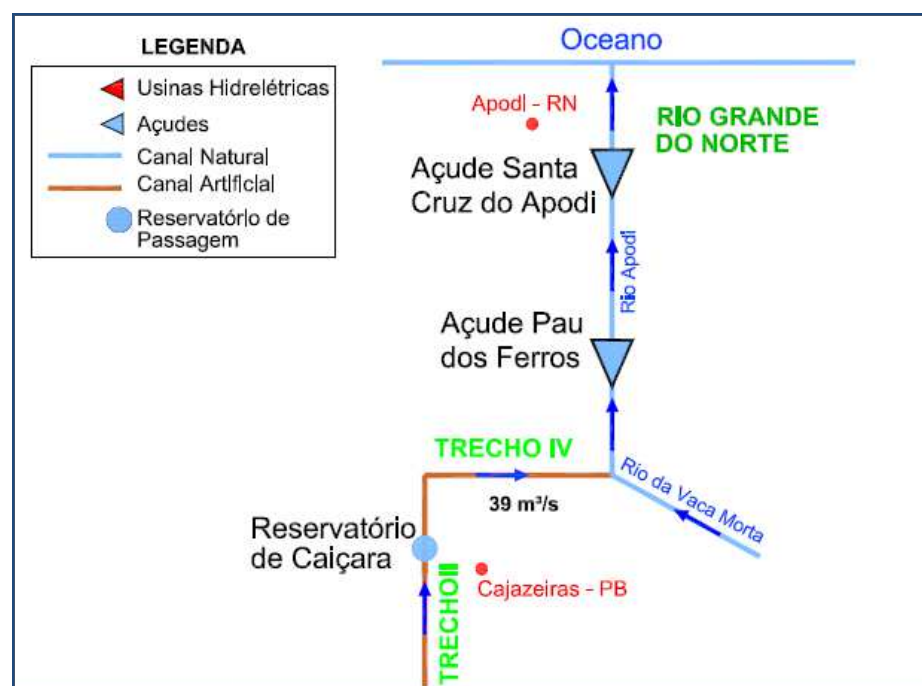
Garantias			100%					99%					95%					90%				
Açudes	Capac, (hm³)	UF	Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas		
Castanhão	4452	CE	Afl,	Plu,	Reg,	Evap	Vert,	Afl,	Plu,	Reg,	Evap	Vert,	Afl,	Plu,	Reg	Evap	Vert,	Afl,	Plu,	Reg	Evap	Vert
1933-1991			54.5	5.51	17.4	13	29.4	54.1	5.4	18.3	12.7	28.5	52.8	4.98	22	11.6	24.8	51.4	4.64	26	10.8	21.3
1933-2001			50.5	5.47	14.1	13.1	29.8	49.9	5.3	15.2	12.6	28.5	48	4.77	18.8	11.2	24.6	46.8	4.46	21.6	10.5	22
1933-2017 (sem o PISF)			52.5	5.53	14.1	13.4	30.3	51.7	5.34	15.4	12.8	28.8	50.6	4.89	19	11.7	25.7	49.5	4.52	23	10.7	22.5
1933-2017 (com o PISF)			71.5	5.91	31.2	14.4	32.0	73.7	5.76	32.9	14.0	32.9	72.6	4.94	41.1	11.9	26.6	71.5	4.38	46.5	10.4	22.8
Incremento de Vazão 1933-2017			19.0		17.1			22.0		17.5			22.0		22.1			22.0		23.5		
1979-2017 (sem PISF)			57.3	5.1	14.1	12.3	35.6	57.1	5.05	14.7	12.2	35.1	56.5	4.87	17	11.7	33.9	56.1	4.63	20.5	11.1	31.2
1979-2017 (com PISF)			72.3	5.1	28.5	12.4	36.7	72.1	5.0	29.2	12.2	36.2	71.5	4.8	32.0	11.6	34.2	71.1	4.5	36.6	10.9	31.5
Incremento de Vazão 1979-2017			14.9		14.42			14.9		14.49			14.9		15.0			14.9		16.1		

Fonte: A Autora, 2019.

5.1.4 Trecho IV

O canal parte do o reservatório de Caiçara – PB e segue para os reservatórios de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi localizados no rio Apodi – Rio Grande do Norte (Figura 16). As vazões vertidas do Reservatório de Pau dos Ferros, que fica a montante do Reservatório de Santa Cruz do Apodi, serão somadas as suas afluições locais. De acordo com regra de operação do PISF, as vazões transpostas para esse trecho são da ordem de 39 m³/s quando o reservatório de Sobradinho estiver acima de 94% de sua capacidade.

Figura 16 - Diagrama Unifilar do Trecho IV e os reservatórios de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi - RN.



Fonte: Autora, 2019.

As médias mensais dos volumes de entradas e saídas da planilha de otimização dos reservatórios de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi que compõem o trecho IV são apresentadas na Tabela 10, para o cálculo das vazões regularizadas para os quatro percentuais de garantia, na simulação da operação hipotética nos períodos de 1933-1991, 1933-2001 e 1933-2017 e na simulação da operação real do reservatório de Sobradinho no período de 1979 – 2017, com e sem a captação de água do PISF.

Tabela 10 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi.

Vazões Médias das Entradas e Saídas do Reservatório Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi, (TIV - Eixo Norte PISF) – m³/s																						
Garantias			100%					99%					95%					90%				
Açudes	Capac, (hm³)	UF	Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas		
Pau dos Ferros	54,8	RN	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			7,54	0,22	0,66	0,58	6,52	7,54	0,21	0,76	0,56	6,43	7,54	0,18	1,1	0,51	6,17	7,54	0,15	1,46	0,45	5,92
1933-2001			7,03	0,23	0,31	0,61	6,34	7,03	0,22	0,47	0,59	6,2	7,03	0,19	0,89	0,52	5,85	7,03	0,16	1,22	0,47	5,62
1933-2017 (sem o PISF)			6,21	0,23	0,14	0,58	5,71	6,21	0,23	0,2	0,59	5,66	6,21	0,21	0,48	0,55	5,43	6,21	0,18	0,87	0,49	5,12
1933-2017 (com o PISF)			23,3	0,24	2,0	0,58	21,0	23,3	0,2	2,5	0,6	20,5	23,3	0,2	3,6	0,5	19,6	23,3	0,20	4,60	0,40	18,9
Incremento de Vazão 1933-2017			17,1		1,88			17,1		2,31			17,1		3,12			17,1		3,77		
1979-2017 (sem PISF)			4,4	0,22	0,14	0,56	3,94	4,4	0,22	0,16	0,56	3,92	4,4	0,21	0,28	0,53	3,84	4,4	0,20	0,43	0,50	3,73
1979-2017 (com PISF)			13,7	0,23	2,0	0,55	11,4	13,7	0,2	2,5	0,5	11,0	13,7	0,2	3,1	0,5	10,5	13,7	0,20	3,70	0,40	10,1
Incremento de Vazão 1979-2017			9,34		1,86			9,34		2,34			9,34		2,83			9,34		3,24		
Santa Cruz do Apodi	599,7	RN	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			9,01	0,63	4,36	1,74	3,5	9,01	0,6	4,99	1,66	2,99	9,01	0,53	6,32	1,49	2,02	9,01	0,46	7,46	1,31	1,42
1933-2001			8,51	0,56	4,38	1,58	3,22	8,37	0,54	4,64	1,51	2,93	8,02	0,49	5,11	1,39	2,38	7,79	0,45	5,78	1,27	1,85
1933-2017 (sem o PISF)			7,82	0,68	1,69	1,84	5,09	7,77	0,67	1,96	1,81	4,8	7,53	0,55	3,95	1,5	2,96	7,23	0,49	4,53	1,34	2,4
1933-2017 (com o PISF)			23,1	0,70	4,62	1,90	17,4	22,6	0,7	5,0	1,9	16,6	21,2	0,62	8,43	1,70	12,7	21,0	0,5	12,3	1,5	9,0
Incremento de Vazão 1933-2017			15,3			2,9		14,9			3,1		14,2			4,5		13,8			7,8	
1979-2017 (sem PISF)			6,1	0,65	1,69	1,72	3,58	6,08	0,64	1,8	1,70	3,49	5,99	0,61	2,42	1,59	2,96	5,89	0,51	3,64	1,33	2,04
1979-2017 (com PISF)			13,6	0,7	2,0	1,9	10,4	13,1	0,7	3,5	1,70	8,8	12,6	0,60	3,9	1,70	8,10	12,2	0,60	4,90	1,60	7,00
Incremento de Vazão 1979-2017			7,48		0,30			7,05		1,73			6,24		1,45			6,34		1,23		
Incremento Tot. de Vazão 1933-2017			32,4		4,8			32,0		5,4			31,3		7,6			30,9		11,6		
Incremento Tot. de Vazão 1979-2017			16,8		2,2			16,4		4,1			15,6		4,3			15,7		4,5		

Fonte: A Autora, 2019.

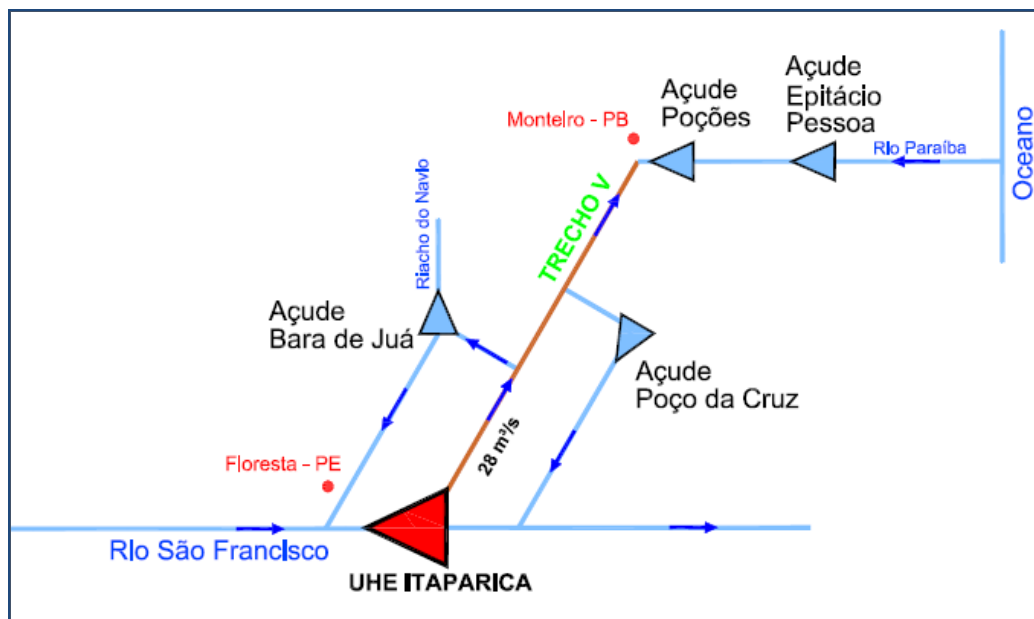
5.2 SIMULAÇÕES DO EIXO LESTE DO PISF

A seguir será apresentada a simulação do único trecho do eixo leste do PISF, que fica mais a jusante da bacia do rio São Francisco.

5.2.1 Trecho V

Os reservatórios do eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco também foram simulados da mesma forma que os reservatórios dos trechos do eixo Norte. De acordo com a regra de operação do PISF, as vazões transpostas para esse trecho serão da ordem de 28 m³/s, quando o reservatório de Sobradinho estiver acima de 94% de sua capacidade e 10 m³/s quando for menor. O eixo é composto apenas pelo trecho V, que tem captação no reservatório de Itaparica, no rio São Francisco e leva a água para os reservatórios de Barra de Juá no rio Pajeú e Poço da Cruz no rio Moxotó, ambos em Pernambuco e para os reservatórios de Poções e Epitácio Pessoa no trecho alto do rio Paraíba na Paraíba (Figura 17). As vazões vertidas do Reservatório de Poções somaram-se às afluentes ao reservatório de Epitácio, localizado a jusante.

Figura 17 - Digrama Unifilar do Trecho V do Eixo Leste e os reservatórios de Barra de Juá e Poço da Cruz - PE e Poções e Epitácio Pessoa - PB.



Fonte: A Autora, 2019.

As médias mensais dos volumes de entradas e saídas da planilha de otimização dos reservatórios do trecho V são apresentadas na Tabela 11, para o cálculo das vazões regularizadas para os quatro percentuais de garantia, nos períodos da simulação da operação hipotética de 1933-1991, 1933-2001 e 1933-2017 e a operação real de 1979-2017, com e sem a captação de água do PISF.

Tabela 11 - Médias das entradas e saídas de vazões dos reservatórios Barra de Juá, Poço da Cruz, Poções e Epitácio Pessoa

Vazões Médias das Entradas e Saídas dos reservatórios Barra de Juá, Poço da Cruz, Poções e Epitácio Pessoa. (TV - Eixo Leste PISF) – m³/s																						
Garantias			100%					99%					95%					90%				
Açudes	Capac. (hm³)	UF	Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas			Entradas		Saídas		
Barra de Juá	71,47	PE	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			1,29	0,17	0,24	0,59	0,65	1,29	0,17	0,28	0,57	0,62	1,29	0,16	0,38	0,54	0,56	1,29	0,14	0,52	0,49	0,49
1933-2001			1,17	0,17	0,17	0,58	0,61	1,17	0,16	0,22	0,56	0,58	1,17	0,15	0,3	0,52	0,53	1,17	0,14	0,4	0,49	0,48
1933-2017 (sem o PISF)			1,09	0,18	0,01	0,6	0,67	1,09	0,18	0,03	0,59	0,66	1,09	0,17	0,11	0,55	0,61	1,09	0,15	0,24	0,5	0,54
1933-2017 (com o PISF)			4,79	0,21	0,11	0,72	4,19	4,79	0,21	0,17	0,72	4,13	4,79	0,19	0,91	0,63	3,49	4,79	0,17	1,55	0,57	3,01
Incremento de Vazão 1933-2017			3,70		0,10			3,70		0,14			3,70		0,80			3,70		1,31		
1979-2017 (sem PISF)			0,97	0,16	0,01	0,52	0,64	0,97	0,16	0,02	0,51	0,63	0,97	0,15	0,05	0,5	0,62	0,97	0,15	0,11	0,47	0,59
1979-2017 (com PISF)			2,38	0,18	0,02	0,61	1,97	2,38	0,18	0,03	0,6	1,96	2,38	0,18	0,08	0,59	1,93	2,38	0,17	0,16	0,57	1,88
Incremento de Vazão 1979-2017			1,41		0,01			1,41		0,01			1,41		0,03			1,41		0,05		
Poço da Cruz	504	PE	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			1,88	0,45	0,62	1,6	0,08	1,88	0,43	0,69	1,54	0,07	1,88	0,39	0,86	1,4	0,04	1,88	0,36	1,04	1,28	0,01
1933-2001			1,62	0,47	0,41	1,68	0,12	1,62	0,45	0,48	1,62	0,1	1,62	0,39	0,71	1,4	0,05	1,62	0,35	0,88	1,26	0,03
1933-2017 (sem o PISF)			1,64	0,48	0,27	1,73	0,18	1,64	0,46	0,32	1,69	0,17	1,64	0,39	0,63	1,43	0,09	1,64	0,34	0,85	1,26	0,05
1933-2017 (com o PISF)			5,94	0,69	2,27	2,5	1,95	5,94	0,67	2,56	2,42	1,74	5,94	0,61	3,26	2,21	1,28	5,94	0,5	4,42	1,83	0,62
Incremento de Vazão 1933-2017			4,30		2,00			4,30		2,24			4,30		2,63			4,30		3,57		
1979-2017 (sem PISF)			1,58	0,41	0,27	1,57	0,3	1,58	0,41	0,29	1,56	0,29	1,58	0,39	0,4	1,49	0,26	1,58	0,37	0,58	1,4	0,21
1979-2017 (com PISF)			2,99	0,56	0,78	2,11	0,86	2,99	0,55	0,85	2,06	0,83	2,99	0,51	1,1	1,93	0,73	2,99	0,48	1,34	1,83	0,64
Incremento de Vazão 1979-2017			1,41		0,51			1,41		0,56			1,41		0,70			1,41		0,76		
Poções	29,9	PB	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			0,89	0,1	0,01	0,32	0,66	0,89	0,09	0,03	0,31	0,65	0,89	0,09	0,1	0,29	0,61	0,89	0,08	0,2	0,25	0,55
1933-2001			1,09	0,1	0,02	0,33	0,85	1,09	0,1	0,03	0,32	0,84	1,09	0,1	0,12	0,29	0,79	1,09	0,09	0,19	0,26	0,75
1933-2017 (sem o PISF)			1,1	0,11	0,02	0,32	0,88	1,1	0,11	0,03	0,32	0,87	1,1	0,1	0,08	0,3	0,84	1,1	0,09	0,17	0,27	0,79
1933-2017 (com o PISF)			7,01	0,12	3,96	0,39	5,59	7,01	0,12	4,02	0,38	5,58	7,01	0,12	4,14	0,38	5,57	7,01	0,11	4,14	0,33	5,53
Incremento de Vazão 1933-2017			5,91		3,94			5,91		3,99			5,91		4,06			5,91		3,97		
1979-2017 (sem PISF)			1,5	0,13	0,03	0,33	1,29	1,5	0,12	0,04	0,32	1,28	1,5	0,12	0,08	0,31	1,25	1,5	0,11	0,16	0,28	1,2
1979-2017 (com PISF)			6,65	0,15	2,19	0,41	4,12	6,65	0,15	2,19	0,41	4,12	6,65	0,14	3,91	0,37	2,37	6,65	0,14	4,14	0,37	2,16
Incremento de Vazão 1979-2017			5,15		2,16			5,15		2,15			5,15		3,83			5,15		3,98		
Epitácio Pessoa	535,7	PB	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.	Afl.	Plu.	Reg.	Evap.	Vert.
1933-1991			15,4	0,32	1,98	1,37	12,3	15,4	0,32	2,25	1,35	12	15,3	0,28	3,95	1,16	10,7	15,3	0,26	4,9	1,06	10,1
1933-2001			18,3	0,35	1,98	1,39	15,2	18,3	0,34	2,28	1,36	14,9	18,3	0,31	4,06	1,17	13,4	18,2	0,29	4,95	1,08	12,9
1933-2017 (sem o PISF)			17,2	0,35	1,98	1,37	14,3	17,2	0,35	2,2	1,35	14,1	17,2	0,32	3,3	1,24	13,2	17,1	0,3	4,55	1,1	12,3
1933-2017 (com o PISF)			19,1	0,35	6,68	1,36	14,4	19	0,34	6,89	1,34	14,2	18,9	0,32	8,09	1,22	13,2	18,8	0,29	9,29	1,09	12,3
Incremento de Vazão 1933-2017			1,90		4,70			1,80		4,69			1,70		4,79			1,70		4,74		
1979-2017 (sem PISF)			23,6	0,4	2,04	1,36	20,8	23,6	0,4	2,2	1,35	20,7	23,6	0,38	3,27	1,25	19,8	23,5	0,36	4,44	1,15	18,9
1979-2017 (com PISF)			33,2	0,4	6,73	1,36	21	33,3	0,4	6,89	1,34	20,9	32,7	0,38	7,97	1,24	19,7	33,6	0,36	9,14	1,15	18,9
Incremento de Vazão 1979-2017			9,60		4,69			9,70		4,69			9,10		4,70			10,1		4,70		
Incremento Tot. de Vazão 1933-2017			15,8		10,7			15,7		11,1			15,6		12,3			15,6		13,6		
Incremento Tot. de Vazão 1979-2017			17,6		7,4			17,7		7,4			17,1		9,3			18,1		9,5		

Fonte: A Autora, 2019.

5.3 SINERGIA HÍDRICA DOS TRECHOS SIMULADOS

Como foi visto a sinergia hídrica é a parcela de acréscimo de vazão regularizada pelo reservatório ($Q_{r2} - Q_{r1}$), que ultrapassa o acréscimo da vazão aduzida Q_{adv} . De acordo com a Equação 3, apresentada no Capítulo 4, foram calculadas as sinergias dos principais trechos do PISF. O cálculo foi realizado por trecho, pois a parcela de água vinda da bacia do rio São Francisco foi assim dividida, fazendo parte da entrada (afluência) e saída (defluência) de água dos reservatórios que compõem os mesmos, até chegar na foz. Os valores de sinergia hídrica para as diferentes garantias são apresentados na Tabela 12:

Tabela 12 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Entremontes e Chapéu (T-VI).

Garantias	Vazões dos reservatórios do Trecho VI do PISF (m³/s)							
	1933-2017				1979-2017			
	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia
100%	0,00	15,2	19,4	-4,2	0,00	21,4	22,9	-1,4
99%	0,01	16,0	19,4	-3,4	0,00	22,2	22,9	-0,7
95%	0,04	18,0	19,4	-1,4	0,03	23,6	22,9	0,6
90%	0,04	19,8	19,4	0,4	0,05	24,7	22,9	1,8

Fonte: A Autora, 2019.

Nota-se que para os reservatórios do trecho VI, no período de 1933 a 2017, simulado para a operação hipotética, houve um ganho sinérgico de 0,40 m³/s para uma garantia de 90 %. Para o período de 1979 a 2017, o trecho VI apresentou um ganho sinérgico de 0,6 m³/s para uma garantia de 95% e 1,8 m³/s para uma garantia de 90%. Nos demais casos o valor da sinergia hídrica calculado foi negativo (principalmente pelo aumento da evaporação), porém com a vazão aduzida da transposição, houve aumento da capacidade de regularização de até 18 m³/s para uma garantia de 95% (1933-2017) e 22,2 m³/s para uma garantia 99% (1979-2017). Com isso, observa-se que o ganho sinérgico aumenta à medida que o percentual de garantia diminui, pelo maior uso das águas.

Quanto ao regime de operação de Sobradinho, seria de se esperar maior ganho sinérgico com as regras de operação hipotética. Ressalte-se, porém, que a transferência de água pelo Ramal Entremontes será maior quando Sobradinho não estiver cheio, daí a inversão, visto que a operação real permitiria menor transferência de água para as demais bacias e maiores vazões para Chapéu e Entremontes.

De acordo com a Equação 3, apresentada no Capítulo 4, os reservatórios de Armando Ribeiro Gonçalves, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo apresentaram os seguintes valores de sinergia hídrica para as diferentes garantias (Tabela 13). Deve ser observado o ganho da vazão aduzida média com as regras propostas (de 4,38m³/s para 6,04m³/s, ou 27,5%). Esse aumento se deve a maior frequência do atendimento de Sobradinho para as vazões de transferências máximas.

Tabela 13 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Armando Ribeiro Gonçalves, Engenheiro Ávidos, São Gonçalo (T-II)

Garantias	Vazões dos reservatórios do Trecho II do PISF (m ³ /s)							
	1933-2017				1979-2017			
	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia
100%	15,98	20,75	6,04	-1,27	16,0	20,1	4,38	-0,3
99%	17,26	23,77	6,04	0,47	16,6	21,1	4,38	0,1
95%	20,69	28,52	6,04	1,79	20,0	26,3	4,38	1,9
90%	23,87	31,57	6,04	1,66	22,2	28,7	4,38	2,2

Fonte: A Autora, 2019.

Nota-se que para os reservatórios do Trecho II, no período simulado da operação hipotética de 1933 a 2017 houve um ganho sinérgico de 0,47 m³/s de vazão para uma garantia de 99%, 1,79 m³/s de vazão para uma garantia de 95% e 1,66 m³/s para uma garantia de 90%. Para o período simulado da operação real de 1979 a 2017, o trecho apresentou ganho sinérgico dos reservatórios de 0,1 m³/s para uma garantia de 99%, 1,9 m³/s para uma garantia de 95% e 2,2 m³/s para uma garantia de 90%. Para a garantia de 100% houve aumento da vazão aduzida com a transposição e a capacidade de regularização dos três reservatórios, no entanto o valor da sinergia hídrica calculado foi negativo. Isso se deve ao aumento do volume evaporado e vertido devido a menor vazão regularizada dos reservatórios.

Nota-se que, assim como na afluência ao reservatório de Castanhão nos períodos de 1933 a 1991 e 1933 a 2001, há redução da vazão média regularizada nas simulações de operação adotadas. Com o aporte de água do rio São Francisco houve um incremento de vazão de até 23,5 m³/s para a garantia de 90% adotada na simulação da operação hipotética do reservatório. De acordo com a equação 3, indicada anteriormente, o reservatório de Castanhão apresentou os seguintes valores de sinergia hídrica para as diferentes garantias (Tabela 14).

Tabela 14 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para o reservatório de Castanhão (T-III).

Vazões dos reservatórios do Trecho III do PISF (m³/s)								
Garantias	1933-2017				1979-2017			
	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia
100%	14.1	31.2	22.02	-4.9	14.1	28.5	14.9	-0.5
99%	15.4	32.9	22.02	-4.5	14.7	29.2	14.9	-0.4
95%	19	41.1	22.02	0.1	17	32.0	14.9	0.1
90%	23	46.5	22.02	1.5	20.5	36.6	14.9	1.2

Fonte: A Autora, 2019.

Observa-se que para este reservatório, com uma vazão média aduzida do PISF de 22.06 m³/s no período simulado de 1933 a 2017, não houve ganho sinérgico para as garantias de 100% e 99%. No entanto, para o período simulado da operação hipotética de 1933 a 2017, o trecho apresentou ganho sinérgico de 0,1 m³/s para uma garantia de 95% e 1,5 m³/s para uma garantia de 90%. Para o período que simula a operação real do reservatório de Sobradinho de 1979 a 2017, o trecho apresentou ganho sinérgico de 0,1 m³/s para uma garantia de 95% e 1,2 m³/s para uma garantia de 90%.

Nota-se que há redução nas afluições e nas capacidades de regularização dos reservatórios entre os períodos analisados de 1933-1991, 1933-2001 e 1933-2017 para a operação hipotética, justificada pelo período crítico de chuvas ao final do século XX e nos últimos anos. Na Tabela 15 em seguida são apresentados os ganhos sinérgicos, calculados com base na Equação 3 do Capítulo 4.

Tabela 15 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi (T-IV)

Vazões dos reservatórios do Trecho IV do PISF (m³/s)								
Garantias	1933-2017				1979-2017			
	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia
100%	1,83	6,6	17,1	-12,3	1,8	4,0	9,36	-7,2
99%	2,16	7,5	17,1	-11,8	2,0	6,0	9,36	-5,3
95%	4,43	12,0	17,1	-9,5	2,7	7,0	9,36	-5,1
90%	5,40	17,0	17,1	-5,6	4,1	8,5	9,36	-4,9

Fonte: A Autora, 2019.

Percebe-se que para os reservatórios do Trecho IV, não houve ganho sinérgico de vazão, em nenhuma das simulações das operações hipotética e real em nenhuma das garantias adotadas. No entanto, houve incremento total de vazão de 11,6 m³/s na capacidade de

regularização dos reservatórios de Pau dos Ferros e Santa Cruz do Apodi para a operação hipotética e 4,5m³/s para a operação real do reservatório de Sobradinho, no caso da garantia de 90%.

Observa-se que também há uma diminuição nas aflúências e vazões regularizadas entre os períodos de 1933-1991, 1933-2001 e 1933-2017 dos reservatórios de Barra de Juá e Poço da Cruz localizados em Pernambuco, no entanto essas reduções de vazão não ocorreram nos reservatórios de Poções e Eptácio Pessoa, localizados na Paraíba. Essas reduções estão associadas ao período crítico de chuvas ao final do século XX. Na Tabela 16 em seguida são apresentados os ganhos sinérgicos, calculados com base na Equação 3 do Capítulo 4.

Tabela 16 - Sinergia do PISF com as vazões de regularização calculadas na planilha de otimização para os reservatórios de Barra de Juá, Poço da Cruz, Poções e Eptácio Pessoa (T-V).

Vazões regularizadas e sinergia hídrica dos reservatórios do Trecho V do PISF (m ³ /s)								
Garantias	1933-2017				1979-2017			
	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia	Q_{r1}	Q_{r2}	Q_{adv}	Sinergia
100%	2,28	13,0	16,7	-6,0	2,4	9,7	12,5	-5,1
99%	2,58	13,6	16,7	-5,6	2,6	10,0	12,5	-5,1
95%	4,12	16,4	16,7	-4,4	3,8	13,1	12,5	-3,2
90%	5,81	19,4	16,7	-3,1	5,3	14,8	12,5	-3,0

Fonte: A Autora, 2019.

Nota-se que os reservatórios do Trecho V não apresentaram valores positivos de sinergia hídrica em nenhum dos períodos simulados e garantias adotadas. No entanto, o incremento total de vazão regularizada chegou a 13,6 m³/s na simulação da operação hipotética e 9,5 m³/s na simulação da operação real do reservatório de Sobradinho, para uma garantia de 90% dos reservatórios do Trecho V.

Há nítida influência do período de dados utilizado para avaliação das vazões regularizadas. Isso é consequência dos períodos secos observados no final dos anos 90 do século passado e do atual ciclo de secas que vem atingindo não somente o Nordeste Setentrional, mas também a bacia do São Francisco (mesmo com as chuvas mais próximas da média observadas a partir de 2017 não houve recuperação da maioria dos reservatórios).

A sinergia hídrica, da forma abordada, não retratou ganhos significativos em parte das situações avaliadas. Isso deve principalmente às altas taxas de evaporação, que não são atendidas sem Fonte de água externa porque os mananciais secam. Sarmento e Molinas (2003) obtiveram valores mais elevados, justificando-os por integração de reservatórios e pela retirada para o atendimento da Região Metropolitana de Fortaleza. Neste trabalho somente o

balanço hídrico direto foi considerado e se admitiu completa retirada da vazão regularizada em cada reservatório no processo de simulação.

O aumento das vazões regularizadas após a transposição será extremamente significativo, chegando à ordem dos 50% para garantia de 90%, se for praticada nova regra de operação de reservatórios que efetivamente beneficie os usos múltiplos, como o cenário hipotético aqui utilizado.

6 CONCLUSÕES

A sinergia hídrica calculada a partir de entradas e saídas dos reservatórios foi positiva para os maiores sistemas, como Castanhão e Armando Ribeiro Gonçalves. Quando considerados os reservatórios menores de forma individualizada as perdas por evaporação, principalmente, levam a sinergias negativas, o que é natural, pelo fato de que esses mananciais entram em colapso em períodos mais severos de estiagem na sua condição natural.

Como se pode observar a partir dos anos mais recentes, a situação em que a bacia do rio São Francisco e o reservatório de Sobradinho se encontram, dificulta o atendimento à captação máxima de suas águas para o PISF. Vale lembrar que as simulações das capacidades de regularização dos reservatórios do PISF no projeto básico tiveram como base os históricos de dados hidrológicos até o ano de 1991, sem considerar o período crítico de baixas médias pluviométricas em grande parte do semiárido ao final do século XX e na segunda década do século XXI. Dessa forma o projeto previa que o aporte d'água do São Francisco para os dois eixos da Transposição, atenderia em parte significativa do tempo sua capacidade máxima de transferência. A última ocorrência de enchimento de Sobradinho foi em 2007.. Ao longo desse período mais recente, o reservatório só não entrou em colapso por conta de sucessivas reduções de vazão defluente.

Assim foi aqui considerado um cenário hipotético com regras que limitem a geração de energia de forma sazonal, em função do estado em que se encontre a acumulação de água no reservatório. Entende-se que as novas formas de geração de energia, no presente especialmente a eólica, em breve também a solar, tragam a possibilidade de maior aproveitamento de água para os demais usos, priorizando-se o abastecimento humano e em seguida as atividades produtivas. Ao se implementar uma regra que beneficie os usos múltiplos de forma mais efetiva como apresentado na operação hipotética, o reservatório terá maior permanência em volumes acumulados e consequentemente durante maior parte do tempo atenderá aos requisitos de transferência de água para as outras bacias.

No âmbito do PROFÁGUA, o estudo atual descreve a potencialidade de um projeto que integra o rio São Francisco a reservatórios de diversos municípios, apresentando os limites da obra, calculando as demandas hídricas e caracterizando a rede. Assim, contribui para a gestão dos recursos hídricos, pois além de trazer informações atualizadas da situação hidrológica das bacias principais, sugere uma proposta de otimização na operação dos reservatórios a fim beneficiar o sistema de transferência de água.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho utilizou dados hidrológicos até o ano de 2017, dessa forma, recomenda-se que as séries históricas sejam atualizadas com o passar dos anos, considerando:

- Tipos de operação dos reservatórios sejam sugeridos, seguindo as resoluções vigentes da ANA;
- O nexo água – energia – produção de alimentos, incorporando tanto o uso da água na própria bacia quanto nas áreas beneficiadas pelo PISF sejam analisados de forma mais acurada;
- Elementos benefício-custo da transferência de água do PISF para atividades produtivas nas regiões beneficiadas sejam incorporados.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, T. G. **Transposição das águas do Rio São Francisco para a bacia do Rio Paraíba**: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo Acquanet. 2008. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp072844.pdf>. Acesso em: 08 set. 2018.
- AUTOBEE, R. **Colorado-Big Thompson Project**. Loveland, Co: Bureau Of Reclamation, 1996. 38 p. Disponível em: <https://www.usbr.gov/projects/pdf.php?id=97>. Acesso em: 12 jan. 2019.
- AZEVEDO, L. G. T. *et al.* **Transferência de água entre bacias hidrográficas**. Água Brasil, 7. Brasília: Banco Mundial, 2005. 93p. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/292191468239984065/pdf/416090PAPER0BR0SerieAgua701PUBLIC1.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- BARTH, F. T. *et al.* **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel/ABRH, 1987. 526 p.
- BEZERRA, F. D. Energia Eólica no Nordeste. **Caderno Setorial Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE**. Fortaleza, A. 4, n. 66, fev. 2019. p. 1-20.
- _____. Nordeste: Futuro Promissor para Energia Solar. **Caderno Setorial Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE**. Fortaleza, A. 3, n. 31, mai. 2018. p. 1-18.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Boletim de acompanhamento dos reservatórios contemplados pelo projeto de integração do Rio São Francisco**. Boletim Diário. Brasília: ANA, 2017.
- _____. _____. **Portal de metadados geoespaciais**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2019
- _____. _____. **Reservatórios do semiárido brasileiro**: hidrologia, balanço hídrico e operação: relatório síntese. Brasília: ANA, 2017.
- _____. _____. **Resolução ANA nº 411, de 22 de setembro de 2005**. Brasília: ANA, 2005.
- _____. _____. **Análise do pedido de outorga de direito de uso de recursos hídricos para o projeto de integração do Rio São Francisco com as bacias hidrográficas do nordeste setentrional**. Nota Técnica n.º 390 / 2005/SOC. Brasília: ANA, 2005. 59p.
- _____. _____. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Atlas Nordeste. **Abastecimento urbano de água**: alternativas de oferta de água para as sedes municipais da região nordeste do Brasil e Norte de Minas Gerais. Brasília: ANA, 2006. 80 p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de informações de geração**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2019

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Operação Integrada de Açudes**. Brasília: MI, 2000. Tomo II. 262 p.

CBHSF. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025 - Resumo Executivo. Alagoas: CBHSF, 2016. 300p.

CIRILO, J. A. Políticas Públicas de Recursos Hídricos para o Semi-árido. **Estudos Avançados USP**, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

_____. **Vulnerabilidade de Regiões Semiáridas em Situação de Mudanças Climáticas**. Relatório de Pesquisa para o CNPq. Recife: UFPE, 2018. 63 p.

COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336 p.

CORREIA, M. F.; DIAS, M. A. F. S. Variação do Nível do Reservatório de Sobradinho e seu Impacto Sobre o Clima da Região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, 2003. p.157-168.

FARIAS, E. E. V. de; CURI, W. F; DINIZ, L. da. S. Projeto de Integração do Rio São Francisco, Eixo Leste: análise de perdas e indicadores de desempenho. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, 2017. p. 1-13.

FARIAS, J. A. M. et al. Sinergia Hídrica em Sistemas Integrados de Reservatórios: Estudos de casos relacionados com a Transposição das águas do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Fortaleza, 2002. p. 1 - 18.

FERNANDES, R. de O. et al. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, 2016. p.1-11, 17.

LAMELA, A. **El agua en España**: Nuevos lagos sustentables. Madrid, LID Editorial Empresarial, 2014. 224 f.

LANNA, A. E. MAG1 – MODHAC2000: **Modelo Hidrológico Auto-Calibrável**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. Instituto Nacional do Semi-Árido. (Org.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande - PB: INSA, Cap. 13, 2011. p. 383-422.

_____. **Projeto Básico de Transposição de Águas do rio São Francisco para o Nordeste Setentrional**: R1 - descrição do Projeto. São Paulo, 2000. 128 p.

_____. SUDENE. **Proposição Nº 105/2017**: Proposta de critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Brasília: Ministério da Integração 2017. 3 p. Disponível em:

<http://www.sudene.gov.br/images/2017/arquivos/Proposio-n-105-2017--Minuta-de-Proposta-Delimitacao-do-semiarido-em-andamento-1.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2018.

_____. **Relatório de Impacto Ambiental - RIMA**: Projeto de Integração do Rio São Francisco. Brasília: Ministério da Integração, 2004. 136 p.

MOURINÕ, G. L. de; ASSIREU, A. T; PIMENTA, F. Regularization of hydroelectric reservoir levels through hydro and solar energy complementarity. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 21, n. 3, p.549-555, jul/set. 2016.

NORMAN, J. D; WARREN, F. Musgrave (Australia) - Capacity Sharing of Water Reservoir, **Water Resources Research**. v. 24, nº. 5, p. 649-658, 1998.

ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**. Paris: OECD Publishing, 2015. 301p.

PORTO, R. L. L. **Gestão de recursos hídricos em regiões semi-áridas**: experiências internacionais. São Paulo. 2000.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Constituição (2002). **Lei nº 10438, de 26 de abril de 2002**. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o programa de incentivo às Fontes alternativas de energia elétrica (PROINFA), a conta de desenvolvimento energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-a, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm. Acesso em: 18 jan. 2020.

Quede Água. Intérprete: Lenine. Compositores: O.L.M. Pimentel e Rennó, C. **Álbum: Carbona**. Rio de Janeiro: Universal Music Group:2015. 5min30s.

QGIS Development Team, [2017]. QGIS 2.6.1.Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**. Disponível em: https://www.qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 15 dez. 2017.

QGIS Development Team, [2017]. QGIS 2.6.1.Geographic Information System User Guide. **Open Source Geospatial Foundation Project**. Disponível em: https://www.qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 15 dez. 2017.

QINGTAO, X; XINAN, G; LUDWIG, H. The Wanjiazhai **Water Transfer Project China**: an environmentally integrated water transfer system. . Henan – China. *The Environmentalist*, 1999. p. 39-60.

RIVER MURRAY URBAN USERS. [on line]. <www.murrayusers.sa.gov.au>. 2005.

SARMENTO, F. J; MOLINAS, P. A. **A Gestão das Águas da Transposição do Rio São Francisco no Nordeste Brasileiro**. Paraíba: Iwra, 2003. 18 p.

THEOBALD, A. et al. A Synoptic Classification of Inflow-Generating Precipitation in the Snowy Mountains, Australia. **Journal Of Applied Meteorology And Climatology**. USA, p. 1713-1732. ago. 2015.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos - Associação Brasileira de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS / ABRH, 2005. 678 p.

USGS. Modelo Numérico de Terreno (MNT) gerado através do Shuttle Radar Topography Mission (NASA). United States. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em: 15 dez. 2017.

VIRÃES, M. V; CIRILO, J. A. Regionalization of Hydrological Model Parameters for the Semi-arid of the Northeast Brazil. **SciELO**. v. 24, p.1-17, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.241920180114>. Acesso em: 20 jan. 2019.

WATER TECHNOLOGY. **Shanxi Wanjiazhai Yellow River**. London. 2004. Disponível em: <https://www.water-technology.net/projects/shanxi/>. Acesso em: 20 dez. 2018.

ANEXO A - POSTOS PLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DAS MÉDIAS PONDERADAS DE CADA RESERVATÓRIO

(continua...)

Long.(O)	Lat.(S)	Nome	Código	UF	Orgão
-39.05000	-7.36670	Abaiara	739046	CE	FUNCEME
-39.45000	-6.11670	Acopiara	639021	CE	FUNCEME
-40.11670	-6.56670	Aiuaba	640019	CE	FUNCEME
-40.75000	-6.05000	Algodões	640041	CE	FUNCEME
-40.11670	-5.75000	Altamira	540110	CE	FUNCEME
-39.73330	-6.98330	Altaneira	639015	CE	FUNCEME
-38.30000	-5.51667	Alto Santo	538003	CE	FUNCEME
-38.88330	-6.66670	Amaniutuba	638071	CE	FUNCEME
-39.50000	-6.65000	Angico	639054	CE	FUNCEME
-39.96670	-6.71670	Antonina do Norte	639031	CE	FUNCEME
-38.61670	-6.05000	Aquinópolis	638058	CE	FUNCEME
-40.13330	-7.20000	Araripe	740008	CE	FUNCEME
-39.86670	-7.05000	Aratama	739047	CE	FUNCEME
-40.15860	-6.32640	Arneiroz	640003	CE	FUNCEME
-39.01670	-6.66670	Arrojado	639024	CE	FUNCEME
-39.86670	-6.86670	Assaré	639014	CE	FUNCEME
-38.96670	-6.93330	Aurora	638010	CE	FUNCEME
-38.71670	-6.73330	Baixio	638091	CE	FUNCEME
-39.66670	-6.35000	Baixio de Donana	639063	CE	FUNCEME
-38.91670	-5.31670	Banabuiu	538025	CE	FUNCEME
-40.36670	-6.86670	Barão de Aquiraz	640032	CE	FUNCEME
-39.31667	-7.31667	Barbalha	739016	CE	FUNCEME
-40.31670	-6.60000	Barra-Estação Ecológica	640014	CE	FUNCEME
-38.76670	-7.16670	Barro	738060	CE	FUNCEME
-38.38330	-5.86670	Bastiões	538050	CE	FUNCEME
-39.13330	-5.28330	Belém	539065	CE	FUNCEME
-39.25000	-5.80000	Betânia	539076	CE	FUNCEME
-39.84420	-5.65110	Boa Vista	539060	CE	FUNCEME
-40.06670	-5.55000	Bom Jesus	540047	CE	FUNCEME
-39.48330	-5.51670	Bonfim	539070	CE	FUNCEME
-38.91670	-7.16670	Brejinho	738051	CE	FUNCEME
-40.02430	-7.18330	Brejinho	740,040	CE	FUNCEME
-38.98330	-7.49110	Brejo Santo	738006	CE	FUNCEME
-40.15000	-6.18330	Cachoeira De Fora	640031	CE	FUNCEME
-39.33330	-7.36670	Caldas	739048	CE	FUNCEME
-38.80000	-6.78330	Canauna	638067	CE	FUNCEME
-38.50000	-6.00000	Comunidade Grossas	638072	CE	FUNCEME
-39.40000	-7.23330	Crato	739018	CE	FUNCEME
-38.53330	-6.20000	Crioulas	638073	CE	FUNCEME
-38.71670	-7.08330	Cuncas	738,007	CE	FUNCEME
-38.33330	-5.78330	Ema	538078	CE	FUNCEME

-39.30000	-5.50000	Encantado	539072	CE	FUNCEME
-38.70000	-7.05000	Engenho Velho	738,052	CE	FUNCEME
-38.35000	-6.05000	Ererê	638,092	CE	FUNCEME
-38.73330	-6.85000	Felizardo	638,068	CE	FUNCEME
-39.20000	-7.40000	Gameleiro de São Sebastião	739058	CE	FUNCEME
-39.21670	-6.88330	Granjeiro	639009	CE	FUNCEME
-38.96670	-6.81670	Iborepi	638070	CE	FUNCEME
-38.86390	-6.40940	Icó	638014	CE	FUNCEME
-38.63333	-6.50000	Icozinho	638002	CE	FUNCEME
-39.00000	-7.10000	Ingazeira	739004	CE	FUNCEME
-38.71670	-6.78330	Ipaumirim	638,013	CE	FUNCEME
-38.76670	-5.61670	Jaguaretama	538066	CE	FUNCEME
-38.61670	-5.65000	Jaguaribara	538054	CE	FUNCEME
-38.63170	-5.90190	Jaguaribe	538043	CE	FUNCEME
-39.13330	-7.40000	Jamacaru	739003	CE	FUNCEME
-39.00000	-7.68330	Jati	739054	CE	FUNCEME
-39.35000	-5.41670	Lacerda	539064	CE	FUNCEME
-39.06670	-6.46670	Lagedo	639055	CE	FUNCEME
-39.41670	-7.23330	Lameiro	739052	CE	FUNCEME
-38.95000	-6.75000	Lavras da Mangabeira	638000	CE	FUNCEME
-38.96667	-6.41667	Lima Campos	638004	CE	FUNCEME
-39.11667	-6.76667	Mangabeira	639011	CE	FUNCEME
-39.56670	-5.21670	Manituba	539068	CE	FUNCEME
-38.76667	-7.25000	Mararupa	738005	CE	FUNCEME
-40.40000	-6.15000	Marrecas	640038	CE	FUNCEME
-39.90000	-5.96670	Marruas	539075	CE	FUNCEME
-38.78333	-7.40000	Mauriti	738001	CE	FUNCEME
-39.19640	-5.69720	Milha	539011	CE	FUNCEME
-39.61670	-5.51670	Mineirolândia	539034	CE	FUNCEME
-39.13330	-7.25000	Missão Velha	739007	CE	FUNCEME
-39.63330	-5.75000	Mombaça	539001	CE	FUNCEME
-38.75000	-7.00000	Monte Alegre	738,050	CE	FUNCEME
-38.90000	-5.93330	Nova Floresta	538057	CE	FUNCEME
-38.04250	-7.48190	Nova Olinda	739,035	CE	FUNCEME
-40.60000	-6.06670	Novo Assis	640036	CE	FUNCEME
-38.91670	-6.25000	Orós	638085	CE	FUNCEME
-40.20000	-7.20000	Pajeú	740039	CE	FUNCEME
-39.03330	-6.31670	Palestina	639067	CE	FUNCEME
-40.70000	-6.21670	Parambu	640015	CE	FUNCEME
-39.46670	-5.15000	Passagem - Fogareiro	539066	CE	FUNCEME
-39.71670	-5.45000	Pedra Branca	539033	CE	FUNCEME
-39.06670	-7.81670	Penaforte	739060	CE	FUNCEME
-38.46670	-6.05000	Pereiro	638011	CE	FUNCEME
-39.41670	-5.81670	Piquet Carneiro	539005	CE	FUNCEME
-38.83330	-7.53330	Poço do Pau	738053	CE	FUNCEME
-39.68330	-6.46670	Poço Grande	639064	CE	FUNCEME

-39.41670	-7.11670	Ponta da Serra	739051	CE	FUNCEME
-39.11670	-7.53330	Porteiras	739010	CE	FUNCEME
-40.01670	-7.10000	Potengi	740009	CE	FUNCEME
-39.08330	-7.18330	Quimami	739057	CE	FUNCEME
-39.10000	-6.88330	Quitaius	639065	CE	FUNCEME
-40.70000	-5.90000	Quiterianópolis	540052	CE	FUNCEME
-38.75000	-7.50000	Quixabinha	738000	CE	FUNCEME
-39.18330	-6.23330	Quixelô	639072	CE	FUNCEME
-39.30000	-5.21670	Quixeramobim	539000	CE	FUNCEME
-39.33330	-6.43330	Quixoa	639060	CE	FUNCEME
-39.38330	-6.86670	Riacho Verde	639071	CE	FUNCEME
-39.31670	-6.20000	Riacho Vermelho	639059	CE	FUNCEME
-39.90000	-6.53330	Saboeiro	639033	CE	FUNCEME
-40.46670	-7.28330	Salitre	740,043	CE	FUNCEME
-40.46670	-7.28330	Salitre	740043	CE	FUNCEME
-39.53330	-7.16670	Santa Fé	739001	CE	FUNCEME
-40.58330	-5.86670	Santa Tereza	540045	CE	FUNCEME
-39.73330	-7.18330	Santana do Cariri	739005	CE	FUNCEME
-39.06670	-7.43330	São Felipe	739,049	CE	FUNCEME
-38.21670	-5.91670	São João	538,048	CE	FUNCEME
-40.45000	-5.85000	São João do Trissi	540048	CE	FUNCEME
-38.28330	-5.68330	São José do Fama	538,049	CE	FUNCEME
-39.50000	-5.33330	São Miguel	539,067	CE	FUNCEME
-39.63330	-6.60000	São Sebastião	639053	CE	FUNCEME
-38.66670	-6.21670	São Vicente	638,063	CE	FUNCEME
-39.01500	-5.57830	Senador Pompeu	539,037	CE	FUNCEME
-38.88330	-5.48330	Serrote Branco	538,052	CE	FUNCEME
-39.01110	-7.67750	Sítio Macapá	739066	CE	FUNCEME
-39.33330	-7.13330	Sítio Novo - Vila Padre Cicero	739,055	CE	FUNCEME
-38.90000	-5.65000	Sítio São Pedro	538,053	CE	FUNCEME
-38.83110	-6.96560	Sítio Tipi	638,086	CE	FUNCEME
-39.01670	-5.70000	Solonópole	539,023	CE	FUNCEME
-39.76667	-6.68333	Tarrafas	639023	CE	FUNCEME
-40.11670	-5.96670	Tauá	540,051	CE	FUNCEME
-40.28330	-6.01670	Tauá	640002	CE	FUNCEME
-38.40000	-6.01670	Tomé Vieira	638,062	CE	FUNCEME
-38.73330	-6.33330	Três Bodegas	638,065	CE	FUNCEME
-39.78333	-6.16667	Trussu	639005	CE	FUNCEME
-38.70000	-6.65000	Umari	638,008	CE	FUNCEME
-39.16670	-5.15000	Uruque	539,010	CE	FUNCEME
-39.30000	-6.80000	Várzea Alegre	639034	CE	FUNCEME
-39.11670	-6.46670	Várzea da Conceição	639018	CE	FUNCEME
-40.05000	-6.76670	Várzea Nova	640030	CE	FUNCEME
-39.26670	-6.25000	Vila Antonico	639068	CE	FUNCEME
-39.16670	-6.95000	Vila Feitosa	639,052	CE	FUNCEME
-39.21670	-7.16670	Vila São Gonçalo	739,056	CE	FUNCEME

-40.11670	-7.03330	Barreiros De Baixo	740041	CE	FUNCEME
-39.40000	-6.45000	Barro Alto	639003	CE	FUNCEME
-39.40000	-6.40000	Baú	639058	CE	FUNCEME
-39.34610	-6.78250	Boa Vista	639079	CE	FUNCEME
-40.51670	-6.65000	Bom Nome	640029	CE	FUNCEME
-40.16670	-5.76670	Caiçara	540109	PB	FUNCEME
-39.31670	-6.63330	Caipú	639006	CE	FUNCEME
-39.41670	-6.18330	Caixa	639046	CE	FUNCEME
-40.36670	-7.06670	Campos Sales	740006	CE	FUNCEME
-40.71670	-6.43330	Canabrava – Cocogi	640039	CE	FUNCEME
-39.28330	-7.03330	Caririaçu	739011	CE	FUNCEME
-39.50000	-6.53330	Cariús	639030	CE	FUNCEME
-39.51670	-6.81670	Cariutaba	639056	CE	FUNCEME
-40.13333	-6.88333	Carmelópolis	640006	CE	FUNCEME
-40.21670	-5.85000	Carrapateiras	540049	CE	FUNCEME
-39.03330	-6.40000	Cascudo	639057	CE	FUNCEME
-39.86670	-6.13330	Catarina	639013	CE	FUNCEME
-39.26670	-5.91670	Deputado Irapuan Pinheiro	539058	CE	FUNCEME
-39.46670	-7.03330	Dom Quintino	739050	CE	FUNCEME
-39.60000	-6.28330	Ebron	639049	CE	FUNCEME
-39.56670	-6.91670	Farias Brito-Sítio Escondido	639029	CE	FUNCEME
-39.56670	-6.18330	Fazenda Morada Nova	639075	CE	FUNCEME
-40.36670	-6.50000	Fazenda Nova	640012	CE	FUNCEME
-39.66670	-6.25000	Flamengo	639012	CE	FUNCEME
-39.56670	-6.05000	Guaribas	639048	CE	FUNCEME
-39.41670	-5.91670	Ibicua	539039	CE	FUNCEME
-39.30000	-6.36670	Iguatu	639035	CE	FUNCEME
-39.51670	-6.51670	Jucás	639002	CE	FUNCEME
-37.65000	-7.51670	Água Branca	737022	PB	AESA
-38.18330	-7.08330	Aguiar	738,025	PB	AESA
-37.06390	-7.56970	Amparo	737060	PB	AESA
-38.44810	-6.73530	Antenor Navarro	638,032	PB	ANA
-38.08470	-6.78640	Aparecida	638,031	PB	AESA
-36.94830	-7.12360	Areia De Baraúnas	736051	PB	AESA
-36.73220	-7.07640	Assunção	736050	PB	AESA
-36.33330	-7.75000	Barra de São Miguel	736025	PB	AESA
-37.53330	-6.18330	Belém do Brejo do Cruz	637,022	PB	DNOCs/AESA
-38.54830	-6.45360	Bernardino Batista	638,101	PB	AESA
-38.21667	-7.40000	Boa Ventura	738,012	PB	AESA
-36.23330	-7.26670	Boa Vista	736024	PB	AESA
-38.36667	-7.35000	Bom Jesus	738,023	PB	DNOCs
-37.93330	-6.45000	Bom Sucesso	637,040	PB	AESA
-38.51670	-7.31670	Bonito de Santa Fé	738,022	PB	DNOCs/AESA
-36.11667	-7.48333	Boqueirão	736023	PB	SUDENE
-37.50000	-6.35000	Brejo do Cruz	637,023	PB	DNOCs/AESA
-37.83330	-6.38330	Brejo dos Santos	637,042	PB	AESA

-36.28330	-7.60000	Cabaceiras	736022	PB	AESA
-38.67810	-6.92970	Cachoeira dos Índios	638,108	PB	AESA
-37.15000	-7.11670	Cacimba de Areia	737,052	PB	AESA
-37.05830	-7.21140	Cacimbas	736057	PB	AESA
-38.56670	-6.88330	Cajazeiras	638,028	PB	DNOCS
-37.79920	-6.96140	Cajazeirinhas	637,024	PB	AESA
-36.86670	-7.91670	Camalaú	736021	PB	AESA
-36.51670	-7.71670	Caraúbas	736020	PB	ANA
-38.34530	-7.03690	Carrapateira	738,069	PB	AESA
-38.61610	-7.11560	Carrapateira	3,843,036	PB	AESA
-37.61670	-7.13330	Catingueira	737,021	PB	DNOCS/AESA
-37.75000	-6.35000	Catolé do Rocha	637,025	PB	AESA
-38.51670	-7.55000	Conceição	738,020	PB	AESA
-37.61670	-6.90000	Condado	637,028	PB	AESA
-36.66667	-7.80000	Congo	736018	PB	
-36.61670	-7.61670	Coxixola	736017	PB	AESA
-36.35140	-6.86310	Cubati	636,073	PB	AESA
-38.19920	-7.53830	Curral Velho	738,077	PB	AESA
-37.10000	-7.28330	Desterro	737,018	PB	AESA
-37.10000	-7.28330	Desterro	737018	PB	AESA
-38.26610	-7.42280	Diamante	738,074	PB	AESA
-37.76670	-7.10000	Emas	737,053	PB	AESA
-38.46670	-6.96670	Engenheiro Ávidos	638,047	PB	AESA
-36.96670	-7.51670	Fazenda Bananeiras	736026	PB	AESA
-36.45390	-6.40390	Frei Martinho	636,066	PB	AESA
-38.00000	-7.38333	Garrotes	738,019	PB	AESA
-36.48333	-7.26667	Gurjão	736016	PB	AESA
-38.41667	-7.48333	Ibiara	738,018	PB	AESA
-38.14720	-7.17860	Igaracy	738,070	PB	AESA
-37.50000	-7.38330	Imaculada	737,017	PB	AESA
-38.20530	-7.36390	Itaporanga/Fazenda Veludo	738,073	PB	
-37.65310	-6.43530	Jenipapeiro do Carreiro	637,030	PB	SUDENE
-37.80000	-6.55000	Jericó	637,036	PB	AESA
-36.58000	-7.06830	Juazeirinho	736,015	PB	AESA
-36.70000	-6.98330	Junco do Seridó	636,046	PB	AESA
-37.83333	-7.53333	Juru	737,016	PB	AESA
-37.91670	-6.60000	Lagoa	637,043	PB	AESA
-38.17920	-6.51690	Lastro	738,078	PB	AESA
-36.95000	-7.36670	Livramento	736043	PB	AESA
-37.43330	-7.25000	Mãe D'água de Dentro	737,015	PB	AESA
-37.53330	-6.90000	Malta	637,031	PB	AESA
-38.16670	-7.70000	Manaira	738,015	PB	AESA
-38.34470	-6.84280	Marizópolis	3,833,636	PB	AESA
-37.71640	-6.54330	Mato Grosso	637,069	PB	AESA
-38.56530	-7.20310	Monte Horebe	738,068	PB	AESA
-37.11670	-7.88330	Monteiro	737014	PB	AESA

-37.12690	-7.88500	Monteiro/EMBRAPA	737,062	PB	AESA
-37.10830	-7.80080	Monteiro/INMET	82,792	PB	INMET
-38.33330	-6.91670	Nazarezinho	638,048	PB	AESA
-38.05000	-7.46670	Nova Olinda	738,014	PB	AESA
-36.42060	-6.67970	Nova Palmeira	636,072	PB	AESA
-37.76670	-7.21670	Olho D'água	737,011	PB	AESA
-36.25000	-6.98330	Olivedos	636,036	PB	AESA
-37.15080	-7.62060	Ouro Velho	737061	PB	AESA
-36.65310	-7.31780	Parari	736053	PB	AESA
-37.06667	-7.13333	Passagem	737,010	PB	AESA
-37.31310	-7.00080	Patos/EMBRAPA	737,055	PB	AESA
-37.63330	-6.60000	Paulista	637,041	PB	AESA
-38.06670	-7.41670	Pedra Branca	738,075	PB	AESA
-36.46670	-6.75000	Pedra Lavrada	636,037	PB	AESA
-37.92583	-7.21417	Piancó	737,006	PB	AESA
-36.36670	-6.51670	Picuí	636,038	PB	AESA
-36.06670	-7.06670	Pocinhos	736014	PB	AESA
-38.49530	-6.40390	Poço Dantas	638,115	PB	AESA
-38.51110	-6.57440	Poço De José De Moura	638,111	PB	AESA
-37.81670	-6.76670	Pombal	637,032	PB	AESA
-38.31890	-7.43640	Pombinho	738,058	PB	
-37.10000	-7.68330	Prata	737004	PB	AESA
-38.01670	-7.73330	Princesa Isabel	738,013	PB	AESA
-37.12810	-7.02940	Quixaba	737,063	PB	AESA
-37.65310	-6.43530	R.dos Cavalos/J. dos Carreiros	637,044	PB	AESA
-36.15000	-7.70000	Riacho Santo Antônio	736013	PB	AESA
-36.85000	-7.10000	Salgadinho	736,010	PB	AESA
-38.06310	-6.53080	Santa Cruz	638,110	PB	AESA
-38.64310	-6.72530	Santa Helena	638,105	PB	AESA
-38.55690	-7.62530	Santa Inês	738,076	PB	AESA
-36.92030	-6.96390	Luzia/Riacho Do Saco	0	PB	AESA
-36.93330	-6.86670	Santa Luzia	636,041	PB	AESA
-36.68330	-8.03330	Santa Maria da Paraíba	836001	PB	AESA
-37.44500	-7.08420	Santa Teresinha	737,003	PB	AESA
-38.33530	-7.55030	Santana de Mangueira	738,079	PB	AESA
-37.98970	-7.38330	Santana dos Garrotes	3,844,703	PB	AESA
-38.49000	-6.48920	Santarém/Joca Claudino	638,102	PB	AESA
-36.63110	-7.22140	Santo André	736005	PB	SUDENE
-37.72780	-6.88890	São Bentinho	637,071	PB	AESA
-37.45000	-6.48330	São Bento	637,045	PB	AESA
-37.94140	-6.81500	São Domingos de Pombal	637,070	PB	AESA
-36.43110	-7.63310	São Domingos do Cariri	736059	PB	AESA
-38.08333	-6.61667	São Francisco	638,051	PB	AESA
-38.31670	-6.83330	São Gonçalo	638,034	PB	INMET
-36.53333	-7.40000	São João do Cariri	736012	PB	AESA
-38.45190	-6.72530	São João R.Peixe/A.	3,833,413	PB	AESA

		Navarro			
-36.84720	-8.08000	São João do Tigre	836000	PB	AESA
-38.16190	-6.94220	São José da Lagoa Tapada	638,049	PB	AESA
-38.29970	-7.25250	São José de Caiana	738,071	PB	AESA
-37.32640	-6.84810	São José de Espinharas	637,034	PB	AESA
-38.50000	-7.11670	São José de Piranhas	738,011	PB	AESA
-38.49670	-7.11560	S.J Piranhas/Sítio Arapuá	738,011	PB	AESA
-38.09920	-7.74170	São José de Princesa	738,080	PB	AESA
-37.30920	-7.16360	São José do Bonfim	737,056	PB	AESA
-37.35140	-6.21330	São José do Brejo Do Cruz	637,035	PB	AESA
-36.80000	-6.77420	São José do Sabugi	636,069	PB	AESA
-36.81667	-7.38333	São José dos Cordeiros	736011	PB	AESA
-37.10000	-6.91670	São Mamede	637,037	PB	AESA
-37.01670	-8.15000	São Sebastião Umbuzeiro	837,000	PB	AESA
-38.33333	-6.61667	São Vicente	638,050	PB	AESA
-36.41670	-6.85000	Seridó	636,039	PB	AESA
-36.37720	-6.93560	Seridó/S.Vicente do Seridó	636,074	PB	AESA
-36.66667	-7.48333	Serra Branca	736009	PB	AESA
-38.31670	-7.25000	Serra Grande	738,010	PB	AESA
-36.36670	-7.06670	Soledade (Juazeiro)	736008	PB	AESA
-36.48640	-7.17690	Sol. Fazenda Pendência	736054	PB	AESA
-36.24670	-6.76640	Sossêgo	636040	PB	SUDENE
-38.23330	-6.75000	Sousa	638,036	PB	AESA
-38.30000	-7.01670	Sousa/São Gonçalo	383,363	PB	AESA
-36.93330	-7.65000	Sumé	736003	PB	DNOCS
-36.83330	-7.20000	Taperoá	736002	PB	AESA
-37.87690	-7.63440	Tavares	737,059	PB	AESA
-37.26670	-7.21670	Teixeira	737,002	PB	AESA
-36.62940	-6.94080	Tenório	636,070	PB	AESA
-38.59720	-6.57670	Triunfo	638,104	PB	AESA
-38.41670	-6.51670	Uirauna (Canaã)	638,035	PB	AESA
-36.99250	-6.77220	Várzea	636,068	PB	AESA
-38.27720	-6.54360	Vieirópolis	638,109	PB	AESA
-37.56830	-6.73860	Vista Serrana/Desterro De Malta	637,029	PB	AESA
-40.41720	-7.45830	Araripina - PCD-IPA	3749918	PE	FUNCEME
-37.08330	-8.41670	Arcoverde	837,042	PE	INMET
-37.05560	-8.43360	Arcoverde (IPA)	3,865,894	PE	IPA
-38.03310	-8.27080	Betânia	3,863,596	PE	APAC
-38.61667	-5.46667	Bom Jardim	538006	PE	APAC
-37.28470	-7.34780	Brejinho	3,845,646	PE	APAC
-37.16667	-8.61667	Buíque	837,009	PE	
-39.31667	-8.50000	Cabrobó	839002	PE	APAC
-37.56250	-8.27500	Carualina-Sertânia	837,053	PE	ANA
-37.24390	-8.60920	Catimbau	837,054	PE	ANA
-39.25000	-7.71670	Cedro	739041	PE	APAC
-39.33333	-7.71667	Cedro (Uruba)	739022	PE	APAC

-39.33333	-7.71667	Cedro (Urucuba)	739,022	PE	APAC
-37.64500	-8.08640	Custódia	837,011	PE	DNOCS
-39.72940	-7.51610	Exu	739042	PE	APAC
-39.73220	-7.53280	Exu (IPA)	3,850,059	PE	APAC
-37.79560	-7.94780	Flores (Fátima)	737,027	PE	ANA
-38.33280	-8.38310	Floresta (Fazenda Santa Paula)	3,863,736	PE	APAC
-39.61580	-7.71720	Granito	3,850,478	PE	APAC
-37.70000	-8.53330	Ibimirim	837,047	PE	IPA
-37.67860	-8.53830	Ibimirim - PCD	837,058	PE	APAC
-37.71170	-8.50890	Ibimirim (Açude Poço da Cruz)	3,874,054	PE	APAC
-37.51280	-7.83250	Iguaraci	737,044	PE	APAC
-37.37170	-7.83250	Iguaraci (Jabitaca)	737032	PE	SUDENE
-40.14690	-7.65220	Ipubi	3,759,374	PE	SUDENE
-37.30000	-7.38330	Itapetim	737,046	PE	EMATER
-37.18333	-7.36667	Itapetim (Itapetinga)	737031	PE	SUDENE
-39.28330	-7.58330	Jardim	738033	PE	APAC
-36.48333	-7.96667	Jataúba (Jatobá)	736028	PE	SUDENE
-40.08810	-7.88610	Ouricuri	3,759,789	PE	APAC
-39.57750	-8.08890	Parnamirim	839012	PE	APAC
-36.94500	-8.50140	Pedra	836,029	PE	APAC
-36.70000	-8.18333	Poção	836034	PE	SUDENE
-37.86667	-7.71667	Quixaba	737,035	PE	APAC
-38.15110	-7.82030	Santa Cruz da Baixa Verde	3,853,673	PE	APAC
-36.20000	-7.95000	Santa Cruz do Capibaribe	736030	PE	ANA
-40.61330	-8.15940	Santa Filomena	3,768,286	PE	APAC
-39.95420	-8.42330	Santa Maria da Boa Vista	3,860,813	PE	APAC
-39.16667	-7.76667	Santa Rosa	739031	PE	APAC
-37.46670	-7.38330	Santa Terezinha	737,047	PE	EMATER
-38.28860	-7.93060	Serra Talhada - IPA - PCD	738,045	PE	APAC
-37.28330	-8.08330	Sertânia	837,050	PE	APAC
-37.22390	-8.06440	Sertânia - IPA - PCD	3,865,159	PE	APAC
-39.55000	-7.61670	Sítio Dos Moreiras	739044	PE	APAC
-40.27610	-7.75970	Trindade	3,759,551	PE	APAC
-37.22140	-7.68670	Tuparetama (Fazenda Riacho)	3855359	PE	EMATER
-38.98333	-7.91667	Verdejante (Riacho Verde)	738036	PE	APAC
-36.63330	-6.43330	Acari - Particular	636,058	RN	EMPARN
-38.28330	-6.20000	Água Nova - Prefeitura	638,076	RN	EMPARN
-38.01670	-6.41670	Alexandria	638,037	RN	EMPARN
-37.78330	-6.15000	Almino Afonso (Ex-Sítio Milagres)	637,018	RN	EMPARN
-37.09060	-6.45110	Caicó	637,004	RN	ANA
-37.05000	-6.41670	Caicó - Penitenciária	637,052	RN	EMPARN
-36.58330	-6.55000	Carnauba dos Dantas	636,056	RN	EMPARN
-38.43330	-6.25000	Coronel João Pessoa	638,077	RN	EMPARN
-36.51670	-6.26670	Currais Novos	636,025	RN	EMPARN
-38.36670	-6.08330	Doutor Severiano	638,060	RN	EMPARN

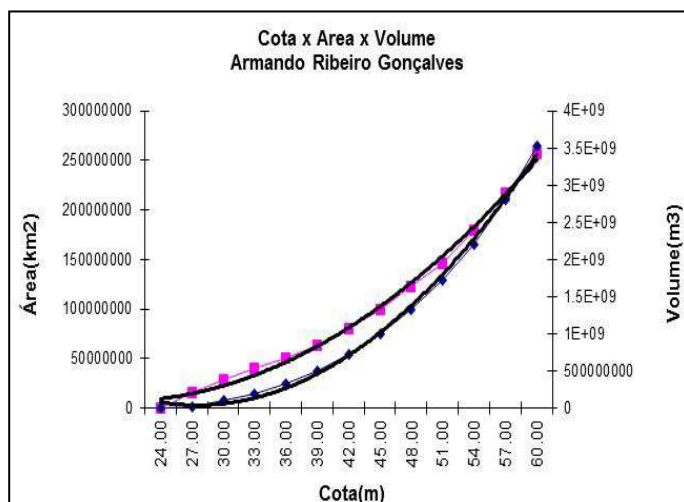
-37.88330	-6.21670	Antonio Martins	637,058	RN	EMPARN
-38.31670	-6.11670	Encanto - Prefeitura	638,075	RN	EMPARN
-36.71670	-6.95000	Equador	636,024	RN	EMPARN
-36.81670	-6.11670	Floriania (Flores)	636,005	RN	EMPARN
-38.11670	-6.08330	Francisco Dantas	638,074	RN	EMPARN
-37.85000	-6.16670	Frutuoso Gomes	637,056	RN	EMPARN
-37.15000	-6.35000	Ipueira	637,053	RN	EMPARN
-37.98330	-5.83330	Itaú	537,010	RN	EMPARN
-37.35000	-6.38330	Jardim de Piranhas	637,019	RN	EMPARN
-37.80000	-6.26670	João Dias	637,002	RN	EMPARN
-37.28330	-6.31670	José da Penha	638,078	RN	EMPARN
-37.01670	-6.03330	Jucurutu	637,011	RN	EMPARN
-36.58330	-6.08330	Lagoa Nova	636,012	RN	EMPARN
-38.40000	-6.41670	Luís Gomes	638,039	RN	EMPARN
-38.31670	-6.40000	Major Sales - Prefeitura	638,083	RN	EMPARN
-38.16670	-6.28330	Marcelino Vieira (Panatis)	638,040	RN	EMPARN
-37.91670	-6.08330	Martins	637,015	RN	EMPARN
-37.50000	-6.06670	Messias Targino - Prefeitura	637,054	RN	EMPARN
-36.95000	-6.70000	Ouro Branco (Manairama)	636,027	RN	EMPARN
-38.26670	-6.46670	Paraná	638,084	RN	EMPARN
-36.66667	-6.68333	Parelhas	636,018	RN	EMPARN
-38.21670	-6.11670	Pau Dos Ferros	638,041	RN	EMPARN
-37.98330	-6.03330	Portalegre	637,048	RN	EMPARN
-38.21670	-6.18330	Rafael Fernandes	638,081	RN	EMPARN
-37.96670	-5.93330	Riacho da Cruz	537,009	RN	EMPARN
-38.31670	-6.26670	Riacho de Santana (Ex- Fazenda Junco)	638,061	RN	EMPARN
-38.06670	-5.78330	Rodolfo Fernandes - Prefeitura	538,071	RN	EMPARN
-36.65000	-5.96670	Santana dos Matos	536,018	RN	EMPARN
-36.58330	-6.55000	Santana do Seridó	636,055	RN	EMPARN
-37.18330	-6.38330	São Fernando	637,017	RN	EMPARN
-38.15000	-5.96670	São Francisco do Oeste - Prefeitura	538,072	RN	EMPARN
-37.20000	-6.71670	São João do Sabugi	637,014	RN	EMPARN
-36.85000	-6.48330	São José do Seridó - Ass. Us. De Água	636,053	RN	EMPARN
-38.66670	-7.33330	São Miguel	738,055	RN	FUNCEME
-38.50000	-6.21670	São Miguel	638,043	RN	EMPARN
-36.91670	-5.80000	São Rafael	536,031	RN	EMPARN
-36.68330	-6.21670	São Vicente (Luiza)	636,010	RN	EMPARN
-37.40000	-6.66670	Serra Negra Do Norte	637,013	RN	EMPARN
-37.95000	-6.11670	Serrinha Dos Pintos - Prefeitura	637,057	RN	EMPARN
-37.95000	-5.78330	Severiano Melo - Prefeitura	537,045	RN	EMPARN
-36.78500	-6.59360	Sítio Volta	636,045	RN	ANA
-38.06670	-5.93330	Taboleiro Grande	538,033	RN	EMPARN
-38.18330	-6.46670	Tenente Ananias	638,045	RN	EMPARN

-36.71670	-6.13330	Tenente Laurentino (Umbuzeiro)	636,050	RN	EMPARN
-37.26670	-6.46670	Timbaúba Dos Batistas	637,059	RN	EMPARN
-37.16670	-6.01670	Triunfo Potiguar - Chá Cacimbas	637,060	RN	EMPARN
-37.15000	-5.98330	Triunfo Potiguar - Chá Velha	537,061	RN	EMPARN
-37.81670	-5.98330	Umarizal	537,020	RN	EMPARN
-38.48330	-6.31670	Venha Ver	638,082	RN	EMPARN
-37.95000	-5.98330	Viçosa - Prefeitura	537,048	RN	EMPARN

Fonte: A Autora, 2019.

ANEXO B – CURVAS E TABELAS DE COTA X ÁREA X VOLUME DOS RESERVATÓRIOS ESTUDADOS

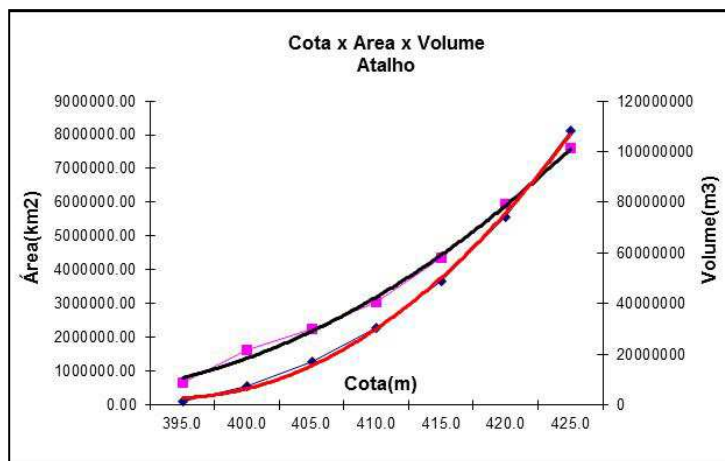
Reservatório Armando Ribeiro Gonçalves



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
24.00	0.00	0.000
27.00	1500.00	25.000
30.00	2900.00	99.100
33.00	4000.00	193.000
36.00	5017.00	328.940
39.00	6360.00	498.000
42.00	8000.00	721.400
45.00	9940.00	995.000
48.00	12288.00	1321.000
51.00	14600.00	1722.000
54.00	17970.00	2210.000
57.00	21730.00	2812.000
60.00	25616.00	3520.150

Fonte: MI, 2000.

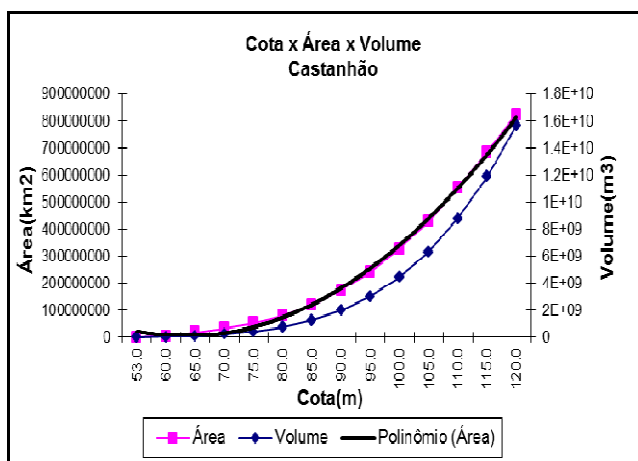
Reservatório de Atalho



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
395.0	64.00	1.600
400.0	162.00	7.250
405.0	226.00	16.950
410.0	305.00	30.225
415.0	434.00	48.700
420.0	593.00	74.375
425.0	762.0	108.3

Fonte: MI, 2000.

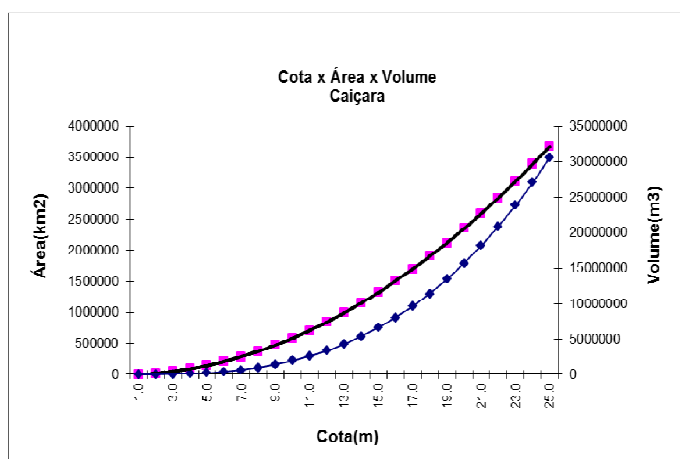
Reservatório de Castanhão



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
53.0	0.00	0.000
60.0	508.00	17.780
65.0	1845.00	76.610
70.0	3352.00	206.530
75.0	5326.00	423.480
80.0	8067.00	752.310
85.0	11934.00	1258.330
90.0	17437.00	1992.610
95.0	24058.00	3027.980
100.0	32809.00	4451.660
105.0	42911.00	6344.660
110.0	55183.00	8797.010
115.0	68402.00	11886.600
120.0	82311.00	15654.500

Fonte: MI, 2000.

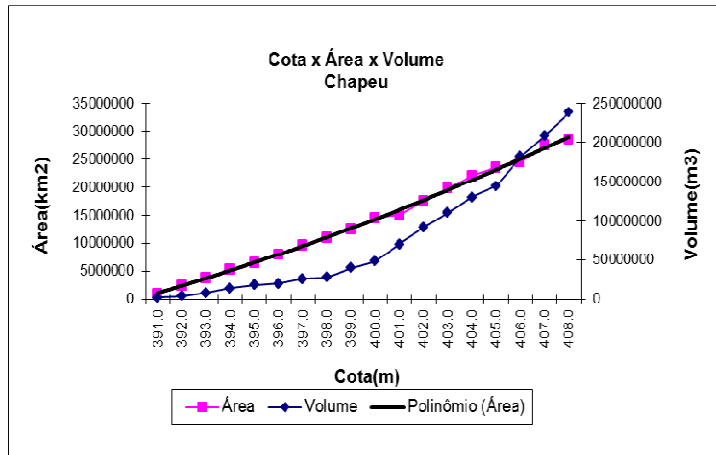
Reservatório de Caiçara



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
1.0	0.59	0.002
2.0	2.35	0.016
3.0	5.29	0.053
4.0	9.40	0.125
5.0	14.69	0.245
6.0	21.16	0.423
7.0	28.80	0.672
8.0	37.62	1.003
9.0	47.61	1.428
10.0	58.78	1.959
11.0	71.12	2.608
12.0	84.64	3.385
13.0	99.33	4.304
14.0	115.20	5.376
15.0	132.24	6.612
16.0	150.47	8.025
17.0	169.86	9.625
18.0	190.43	11.426
19.0	212.18	13.438
20.0	235.10	15.673
21.0	259.20	18.144
22.0	284.47	20.861
23.0	310.92	23.837
24.0	338.55	27.084
25.0	367.35	30.612

Fonte: MI, 2000.

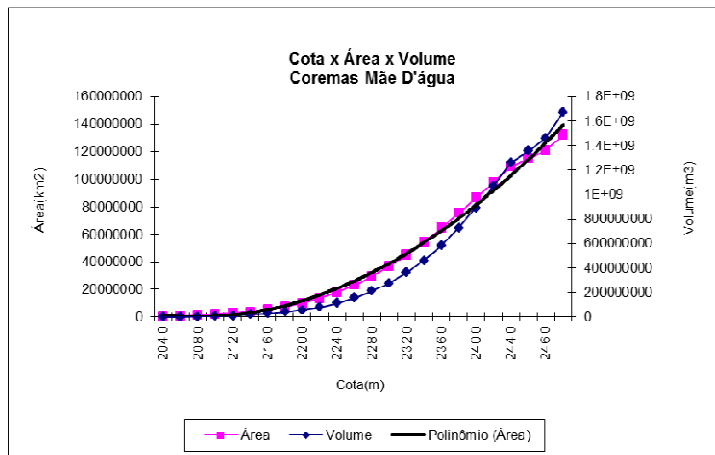
Reservatório de Chapéu



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
391.0	100.00	2.000
392.0	250.00	4.000
393.0	380.00	8.000
394.0	520.00	14.000
395.0	650.00	18.000
396.0	800.00	20.000
397.0	962.50	26.000
398.0	1100.00	28.000
399.0	1250.00	40.000
400.0	1450.00	48.000
401.0	1500.00	70.000
402.0	1750.00	92.000
403.0	1975.00	110.000
404.0	2200.00	130.000
405.0	2350.00	144.000
406.0	2450.00	182.000
407.0	2750.00	208.000
408.0	2850.00	238.000

Fonte: MI, 2000.

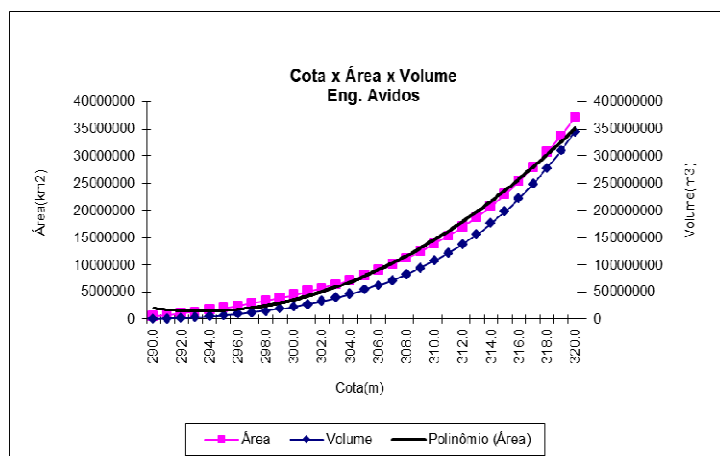
Reservatório de Coremas Mãe D'Água



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
204.0	30.00	0.000
206.0	60.00	0.000
208.0	120.00	3.000
210.0	200.00	6.000
212.0	290.00	12.000
214.0	400.00	19.000
216.0	560.00	28.000
218.0	750.00	42.000
220.0	1010.00	60.000
222.0	1360.00	84.000
224.0	1800.00	117.000
226.0	2330.00	159.000
228.0	2960.00	211.000
230.0	3690.00	279.000
232.0	4510.00	362.000
234.0	5450.00	463.000
236.0	6470.00	584.000
238.0	7550.00	729.000
240.0	8650.00	895.000
242.0	9780.00	1070.000
244.0	10940.00	1265.000
245.0	11520.00	1358.700
246.0	12100.00	1464.000
248.0	13270.00	1678.000

Fonte: MI, 2000.

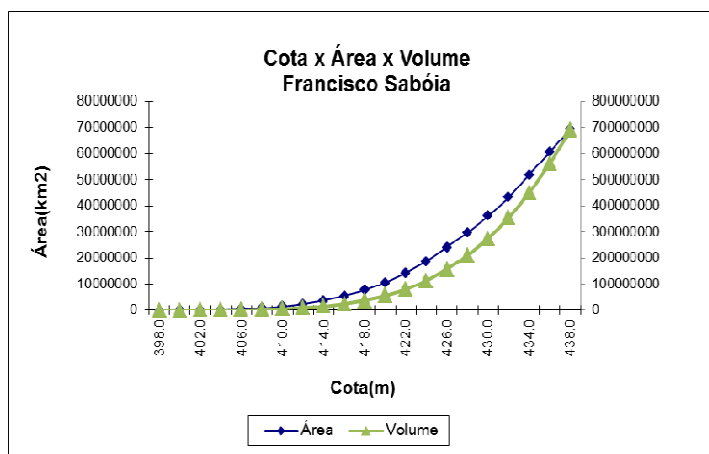
Reservatório Engenheiro Ávidos



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
290.0	56.02	0.160
291.0	81.29	0.853
292.0	109.26	1.892
293.0	139.93	3.269
294.0	173.37	4.984
295.0	209.72	7.043
296.0	249.17	9.461
297.0	291.97	12.260
298.0	338.45	15.469
299.0	388.97	19.126
300.0	443.98	23.275
301.0	503.98	27.968
302.0	569.53	33.265
303.0	641.25	39.232
304.0	719.84	45.943
305.0	806.02	53.483
306.0	900.61	61.940
307.0	1004.49	71.410
308.0	1118.57	81.999
309.0	1243.85	93.819
310.0	1381.39	106.989
311.0	1532.291	121.637
312.0	1697.734	137.896
313.0	1878.955	155.911
314.0	2077.251	175.830
315.0	2293.982	197.810
316.0	2530.568	222.016
317.0	2788.491	248.621
318.0	3069.294	277.804
319.0	3374.582	309.752
320.0	3706.019	344.661

Fonte: MI, 2000.

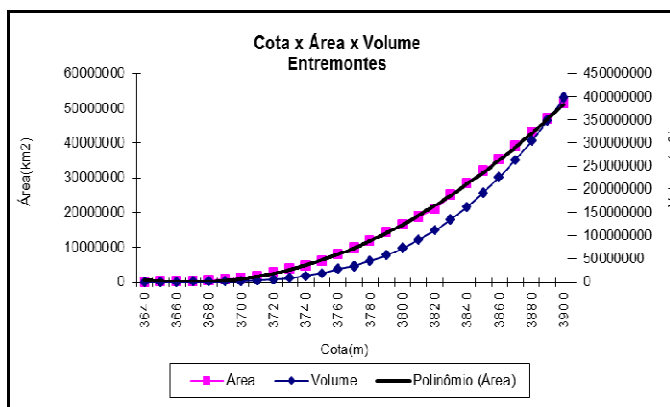
Reservatório Francisco Sabóia



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
398.0	0.00	0.000
400.0	1.23	0.012
402.0	11.78	0.142
404.0	29.40	0.554
406.0	51.95	1.368
408.0	84.25	2.730
410.0	146.28	5.035
412.0	231.95	8.817
414.0	360.08	14.737
416.0	530.75	23.646
418.0	755.23	36.505
420.0	1046.58	54.523
422.0	1417.28	79.152
424.0	1862.10	111.956
426.0	2402.58	154.602
428.0	2954.20	208.170
430.0	3603.70	273.749
432.0	4323.00	353.016
434.0	5174.75	447.994
436.0	6042.78	560.169
438.0	6948.30	690.079

Fonte: MI, 2000.

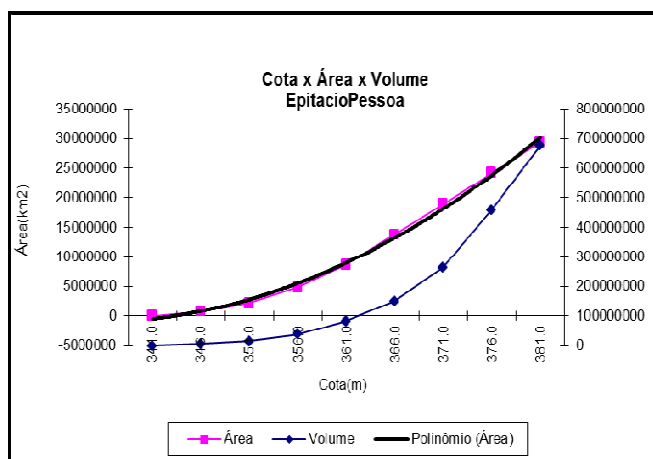
Reservatório Entremontes



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
364.0	0.00	0.000
365.0	3.50	0.018
366.0	8.70	0.079
367.0	9.80	0.221
368.0	44.00	0.540
369.0	66.80	1.094
370.0	110.80	1.982
371.0	167.90	3.376
372.0	262.10	5.526
373.0	376.40	8.717
374.0	468.80	12.941
375.0	611.20	18.341
376.0	792.20	28.358
377.0	978.50	34.210
378.0	1185.40	45.029
379.0	1438.50	58.149
380.0	1652.70	73.604
381.0	1875.50	91.246
382.0	2090.60	111.576
383.0	2503.20	135.044
384.0	2848.00	161.800
385.0	3183.20	191.956
386.0	3529.10	225.518
387.0	3893.80	262.632
388.0	4275.50	303.478
389.0	4683.30	348.298
390.0	5129.50	397.386

Fonte: MI, 2000.

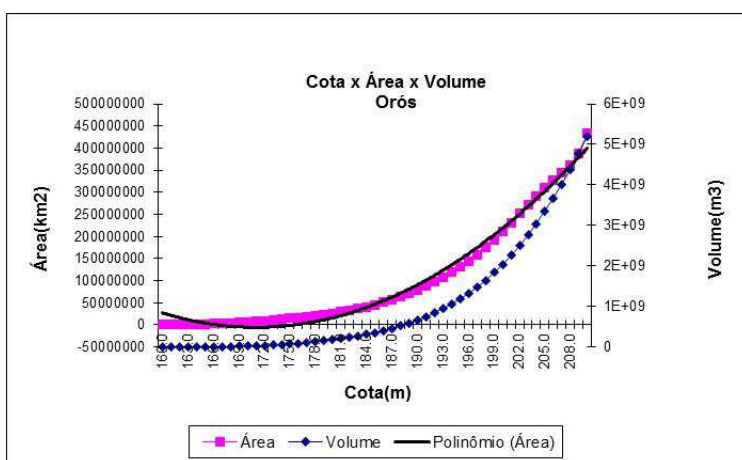
Reservatório Epitácio Pessoa



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
341.0	0.00	0.000
346.0	76.92	5.128
351.0	224.36	15.385
356.0	487.18	38.462
361.0	871.79	82.1
366.0	1378.21	151.282
371.0	1897.44	264.103
376.0	2416.67	458.974
381.0	2935.90	676.923

Fonte: MI, 2000.

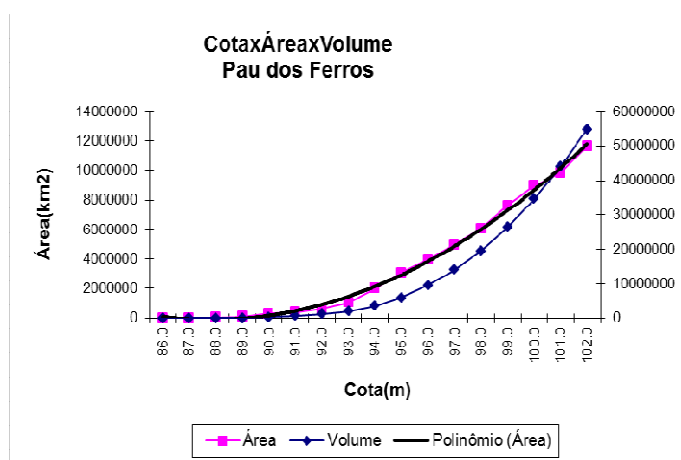
Reservatório de Orós



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
160.0	0.00	0.000
161.0	27.00	0.280
162.0	43.00	0.290
163.0	69.00	0.710
164.0	110.00	1.750
166.0	228.00	5.690
167.0	303.00	8.620
168.0	388.00	12.300
169.0	486.00	16.880
170.0	601.00	22.550
171.0	732.00	29.490
172.0	882.00	37.880
173.0	1049.00	47.880
174.0	1231.00	59.620
175.0	1426.00	73.220
176.0	1633.00	88.800
177.0	1851.00	106.480
179.0	2330.00	148.790
180.0	2598.00	173.850
181.0	2894.00	201.880
182.0	3225.00	233.220
183.0	3599.00	268.270
184.0	4021.00	307.480
185.0	4500.00	351.340
186.0	5040.00	400.370
187.0	5643.00	455.150
188.0	6312.00	516.280
189.0	7040.00	584.400
190.0	7854.00	660.220
191.0	8730.00	744.470
192.0	9681.00	837.970
193.0	10714.00	941.620
194.0	11838.00	1056.370
195.0	13067.00	1183.270
196.0	14414.00	1323.410
197.0	15898.00	1477.940
198.0	17510.00	1647.990
199.0	19268.00	1834.630
200.0	21154.00	2038.810
201.0	23141.00	2261.330
202.0	25183.00	2502.730
203.0	27218.00	2763.340
204.0	29177.00	3043.320
205.0	31004.00	3342.810
206.0	32690.00	3662.290
207.0	34325.00	4003.130
208.0	36189.00	4368.540
209.0	38866.00	4764.870
210.0	43426.00	5203.580

Fonte: MI, 2000.

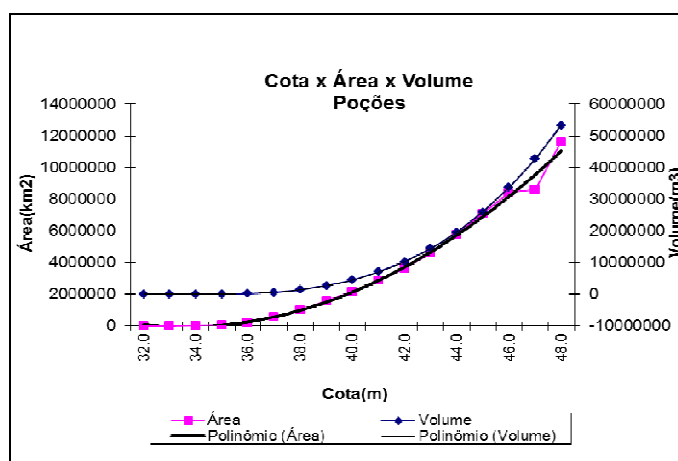
Reservatório de Pau dos Ferros



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm ³)
86.0	0.00	0.000
87.0	0.14	0.000
88.0	1.54	0.009
89.0	8.54	0.059
90.0	29.82	0.251
91.0	39.66	0.598
92.0	59.28	1.093
93.0	105.54	1.917
94.0	199.98	3.444
95.0	307.08	5.980
96.0	398.10	9.506
97.0	498.54	13.989
98.0	608.52	19.524
99.0	762.60	26.380
100.0	898.02	34.683
101.0	984.64	44.096
102.0	1165.36	54.846

Fonte: MI, 2000.

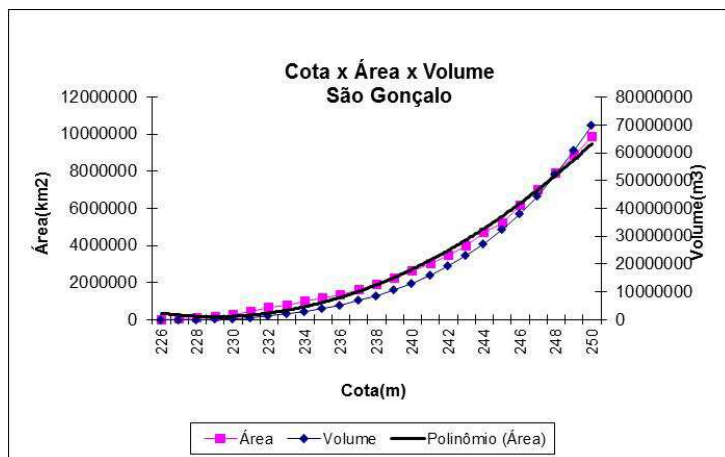
Reservatório de Poções



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm ³)
32.0	0.00	0.000
33.0	0.38	0.002
34.0	1.10	0.009
35.0	5.95	0.045
36.0	21.90	0.184
37.0	57.78	0.582
38.0	99.20	1.367
39.0	157.95	2.653
40.0	216.73	4.526
41.0	283.88	7.029
42.0	364.03	10.269
43.0	459.63	14.387
44.0	575.60	19.563
45.0	710.70	25.995
46.0	838.13	33.729
47.0	861.53	42.717
48.0	1160.30	53.326

Fonte: MI, 2000.

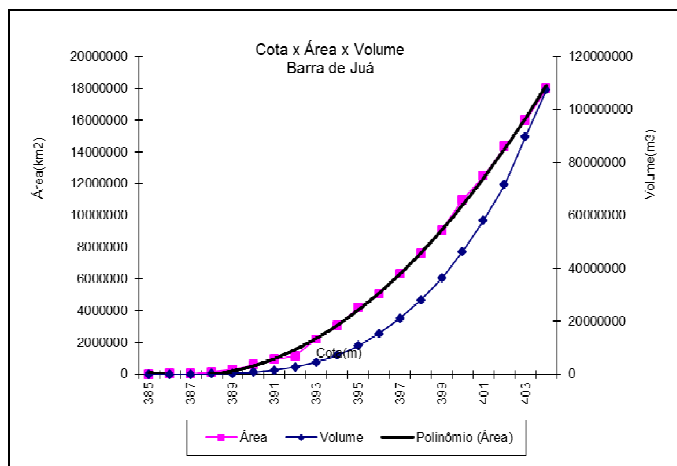
Reservatório de São Gonçalo



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm ³)
226.0	1.00	0.000
227.0	4.00	0.022
228.0	8.60	0.096
229.0	16.00	0.250
230.0	26.00	0.442
231.0	42.00	0.780
232.0	64.60	1.348
233.0	80.00	2.050
234.0	98.80	2.982
235.0	115.00	4.050
236.0	135.60	5.326
237.0	160.00	6.900
238.0	192.20	8.604
239.0	224.00	10.700
240.0	262.60	13.152
241.0	300.00	15.900
242.0	344.40	19.222
243.0	400.00	23.200
244.0	471.60	27.382
245.0	520.00	32.500
246.0	615.80	38.256
247.0	700.00	44.600
248.0	789.00	52.304
249.0	885.00	61.000
250.0	989.60	70.090

Fonte: MI, 2000.

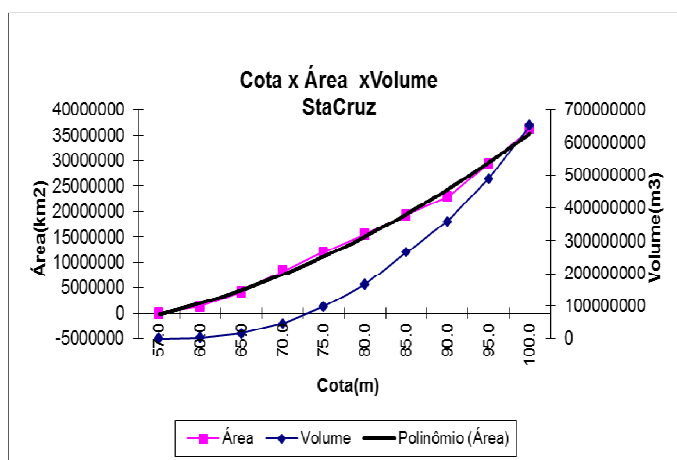
Reservatório Barra de Juá



Cota(m)	Área (ha)	Volume (m3)
385.0	0.40	0.0
386.0	1.10	0.0
387.0	2.10	0.0
388.0	13.10	0.1
389.0	30.00	0.3
390.0	56.70	0.7
391.0	91.40	1.5
392.0	114.50	2.7
393.0	219.90	4.5
394.0	303.50	7.1
395.0	418.20	10.7
396.0	503.90	15.3
397.0	633.30	21.0
398.0	759.40	28.0
399.0	909.00	36.3
400.0	1098.70	46.4
401.0	1246.90	58.1
402.0	1432.00	71.5
403.0	1600.00	89.8
404.0	1800.00	107.5

Fonte: MI, 2000.

Reservatório de Santa Cruz



Cota(m)	Área (ha)	Volume (Hm³)
57.0	0.00	0.000
60.0	123.76	1.856
65.0	415.63	15.341
70.0	825.00	46.356
75.0	1201.88	97.028
80.0	1543.13	165.653
85.0	1934.38	262.591
90.0	2281.88	357.997
95.0	2931.25	488.325
100.0	3620.00	652.106

Fonte: MI, 2000.