



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA  
AFRO-BRASILEIRA  
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**JOSÉ MICAEL FERREIRA DA COSTA**

**INFLUÊNCIAS DO CLIMA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E GERAÇÃO  
HIDRELÉTRICA NO CONTEXTO DO SÃO FRANCISCO ESTENDIDO: UMA  
ANÁLISE MULTIDECADAL**

**ACARAPE - CEARÁ  
2017**

**JOSÉ MICAEL FERREIRA DA COSTA**

**INFLUÊNCIAS DO CLIMA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E GERAÇÃO  
HIDRELÉTRICA NO CONTEXTO DO SÃO FRANCISCO ESTENDIDO: UMA  
ANÁLISE MULTIDECADAL**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: **Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.**

Co-Orientador: **Me. Diógenes Passos Fontenele.**

**ACARAPE - CEARÁ**

**2017**

**Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira**  
**Direção de Sistema Integrado de Bibliotecas da UNILAB (DSIBIUNI)**  
**Biblioteca Setorial Campus Liberdade**  
**Catálogo na fonte**

**Bibliotecário: Gleydson Rodrigues Santos – CRB-3 / 1219**

---

C873i Costa, José Micael Ferreira da.

Influências do clima na gestão de recursos hídricos e geração hidrelétrica no contexto do São Francisco estendido: uma análise multidecadal / José Micael Ferreira da Costa. - Acarape, 2017.

110f : il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia De Energias - Semestral, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

Coorientador: Prof. Dr. Diógenes Passos Fontenele.

Inclui figuras, tabelas e referências.

1. Energia hidrelétrica - Brasil. 2. Variabilidade Climática. 3. Ciclo hidrológico I. Título.

CDD 333.91

---

JOSÉ MICAEL FERREIRA DA COSTA

**INFLUÊNCIAS DO CLIMA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E  
GERAÇÃO HIDRELÉTRICA NO CONTEXTO DO SÃO FRANCISCO  
ESTENDIDO: UMA ANÁLISE MULTIDECADAL**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

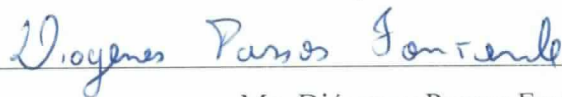
Aprovado em 18/12/2017.

BANCA EXAMINADORA



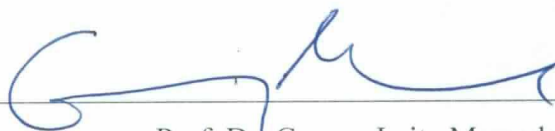
Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Me. Diógenes Passos Fontenele

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)



Prof. Dr. George Leite Mamede

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Dedico este trabalho a Jesus Cristo, por me amar e salvar. E a minha avó Teresa (*in memoriam*) por todo carinho a mim dedicados e pela guerreira que foi.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus a quem nos possibilita todas as coisas, por me sustentar até aqui, dando-me fôlego de vida e força para alcançar meus objetivos. A Ele, toda Honra e Glória!

Aos meus pais José e Zélia, os quais nunca mediram esforços para proporcionar o melhor em minha vida, sempre me ensinando os principais valores e me motivando a trilhar o melhor caminho. A vocês, minha eterna gratidão!

A todos de minha família, que sempre acreditaram em mim, os quais também me ajudam e motivam a chegar até aqui. Em especial agradeço aos meus tios, Dalva, Fatinha e Ricardo, os quais sempre me tratam como filho, e aos meus avós Margarida e Osmar, pelo exemplo de vida a mim repassados. A vocês, toda minha admiração!

A todos meus amigos e irmãos em Cristo, que suportaram tantas vezes minha ausência devido ao curso, mas que por mim intercederam e me deram apoio nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, prof. Cleiton, por toda confiança e ajuda ao longo desses anos de vivência, repassando com humildade seus ensinamentos e me extigando a dar o meu melhor.

Ao meu co-orientador, Diógenes, pela amizade construída e por toda atenção e paciência em me ajudar com este trabalho e demais afazeres na Funceme.

Às instituições UNILAB e FUNCEME, por me proporcionarem ambientes de conhecimento, vivência e aprendizado, os quais tem moldado minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa: Clima e Planejamento Energético (CLIFE), pelas experiências vividas e conhecimentos compartilhados, em especial ao Duarte Junior, pelo companheirismo ao longo deste árduo curso, e por toda ajuda (principalmente na programação).

Aos professores do curso de Engenharia de Energias, pelos ensinamentos e experiências repassadas.

Aos colegas de minha entrada (2012.2) os quais tive o prazer em conhecer e com alguns criar fortes laços de amizade (como a Cinthia, Eliane, Rodolpho, Kaio e outros).

À todos o meu muito obrigado! Que Deus os abençoe.

“Todo aquele que se dedica ao estudo da ciência chega a convencer-se de que nas leis do Universo se manifesta um Espírito sumamente superior ao do homem, e perante o qual nós, com os nossos poderes limitados, devemos humilhar-nos”.

*Albert Einstein*

## RESUMO

Objetiva-se com este estudo demonstrar as relações existentes entre o nexus clima-água-energia na Bacia do Rio São Francisco Estendido, através da análise de fenômenos climáticos multidecadais bem como simulações que auxiliam na Gestão dos Recursos Hídricos e cálculo da Energia Hidrelétrica gerada. A metodologia inicial consiste na análise das séries temporais de precipitação (1961-2016) e vazão (1931-2016) em algumas usinas pertencentes à Bacia do São Francisco, e a obtenção dos Espectros de Ondeletras Globais das séries de anomalias de vazão, OMA e ODP (1931-2016), almejando encontrar correlações entre ciclo hidrológico e variabilidades climáticas. Em seguida, foram feitas simulações no programa SIGA, desenvolvido pela Funceme, o qual possibilitou operar o sistema do São Francisco Estendido com base nas fases negativa (1965-1995) e positiva (1996-2016) da OMA, a fim de monitorar o atendimento às demandas e a garantia no abastecimento em 90% do tempo. O cálculo da Energia Hidrelétrica e engolimento das turbinas foi efetuado através de uma função não linear que se utilizou dos dados simulados no programa SIGA de vazão defluente e volume do reservatório (1965-2016), após calibração realizada com os dados observados (1993-2016). Os resultados demonstraram que há indícios de interferência dos fenômenos climáticos OMA e PDO no ciclo hidrológico, com períodos decadais e/ou multidecadais, que oscilam beneficiando (fase negativa da OMA) ou prejudicando (fase positiva da OMA) a Gestão Hídrica e a Geração Hidrelétrica. As demandas foram atendidas satisfatoriamente em ambos os períodos da OMA, inclusive para os Eixos Norte e Leste da Transposição, o que indica viabilidade na implantação deste projeto. No entanto, apenas o período úmido da OMA se mostrou favorável à Bacia do São Francisco, pois a garantia da Q90 assim como a Geração Hidrelétrica gerada nesse período se mostraram superiores, assim como o engolimento das turbinas foi menor. Estes resultados podem auxiliar em um Planejamento Hídrico e Energético mais eficazes.

**Palavras-chave:** Variabilidade climática. Ciclo hidrológico. Geração Hidrelétrica.

## ABSTRACT

The objective of this study is to demonstrate the relationship between the climate-water-energy nexus in the São Francisco River Basin, through the analysis of multidecadal climatic phenomena as well as simulations that aid in the management of water resources and the calculation of the generated hydroelectric energy. The initial methodology consists of the analysis of the time series of precipitation (1961-2016) and flow (1931-2016) in some plants belonging to the São Francisco Basin, and the obtaining of the Global Wavelet Spectra of the series of flow anomalies, AMO and PDO (1931-2016), aiming to find correlations between hydrological cycle and climatic variabilities. Then, simulations were made in the SIGA program, developed by Funceme, which made it possible to operate the São Francisco Extended system based on the negative (1965-1995) and positive (1996-2016) phases of the AMO, in order to monitor service to the demands and guarantee in the supply in 90% of the time. The calculation of the Hydroelectric Energy and swallowing of the turbines was done through a nonlinear function that was used of the simulated data in the SIGA program of defluent flow and reservoir volume (1965-2016), after calibration with the data observed (1993-2016). The results showed that there is evidence of interference of the AMO and PDO climatic phenomena in the hydrological cycle, with decadal and / or multidecadal periods, that oscillate benefiting (negative phase of AMO) or impairing (AMO positive phase) Water Management and Hydroelectric Generation. The demands were satisfactorily met in both periods of the AMO, including for the North and East Axes of Transposition, which indicates feasibility in the implementation of this project. However, only the wet season of the AMO was favorable to the São Francisco Basin, since the guarantee of Q90 as well as the Hydropower Generation generated in that period were higher, just as turbine swallowing was lower. These results can aid in more effective Water and Energy Planning.

**Keywords:** Climate variability. Hydrological cycle. Hydropower Generation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 1.1** - Nexus: Clima, Água e Energia.

**Figura 2.1** - Ilustração esquemática do posicionamento da ZCIT em (a) anos secos e (b) anos chuvosos no NNEB.

**Figura 2.2** - Série temporal da Oscilação Multidecadal do Atlântico. O índice SST (TSM) do Atlântico Norte, definido como a anomalia mensal média de SST sobre o Atlântico Norte (0°-70°N) menos a anomalia mensal média global de SST (barras vermelhas e azuis). A linha verde representa uma estimativa da média móvel (10 anos) do índice de SST do Atlântico Norte.

**Figura 2.3** - Fases da ODP. Fonte: Mantua / PDO-Internet page *apud* Xavier e Xavier (2004).

**Figura 2.4** - Série temporal da Oscilação Decadal do Pacífico. Associação da série de tempo da componente principal mostrando a gravação não suavizada (barras vermelhas e azuis) e a gravação com média móvel de 5 anos (linha preta).

**Figura 2.5** - Componentes Básicos de um Reservatório.

**Figura 2.6** - Caracterização dos níveis d'água (cotas) e volumes do Reservatório.

**Figura 2.7** – (a) Reservação para regularização de vazão em um curso d'água natural e (b) reservação de água para o atendimento ao consumo variável em uma rede de distribuição de sistema urbano de abastecimento.

**Figura 2.8** - Contexto dos Usos múltiplos da água.

**Figura 2.9** - Participação de renováveis na matriz energética nacional.

**Figura 2.10** - Participação de renováveis na matriz elétrica nacional.

**Figura 2.11** - Participação de renováveis na matriz elétrica nacional.

**Figura 2.12** - Diagrama unifilar das UHEs pertencentes à Bacia do Rio São Francisco.

**Figura 3.1** - Fluxograma contendo as etapas da metodologia adotada no trabalho.

**Figura 3.2** - Localização da Bacia do Rio São Francisco no Brasil.

**Figura 3.3** - Localização da transposição no NEB: (a) Eixos; (b) Trechos.

**Figura 3.4** - Esquemático da Rede simplificada do SFE, gerada no programa SIGA.

**Figura 3.5** - Representação esquemática do fluviograma e respectiva curva de permanência.

**Figura 3.6** - Componentes básicos de uma UHE.

**Figura 3.7** - Potência máxima e engolimento máximo, ambos em função da queda líquida.

**Figura 4.1** - Série histórica de precipitação em Sobradinho.

**Figura 4.2** - Série histórica de vazão naturalizada em Sobradinho.

**Figura 4.3** - Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias de vazão em Sobradinho.

**Figura 4.4** - Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias da OMA.

**Figura 4.5** - Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias da ODP.

**Figura 4.6** - Curva de permanência referente aos períodos de análise da OMA com base na série histórica de vazão em Sobradinho.

**Figura 4.7** - Q90 referente aos períodos de análise da OMA com base nas séries históricas de vazões das usinas analisadas.

**Figura 4.8** - Energia gerada na usina de Sobradinho com base nas séries históricas observadas de vazão defluente e volume do reservatório, para o período a partir de 1993.

**Figura 4.9** - Energia gerada na usina de Sobradinho com base nas séries modeladas de vazão defluente e volume do reservatório, para o período a partir de 1993.

**Figura 4.10** - Calibração entre a Energia gerada na usina de Sobradinho com base em dados observados e modelados, para o período a partir de 1993.

**Figura 4.11** - Energia gerada na usina de Sobradinho para ambas as fases da OMA, com base nos dados modelados de vazão defluente e volume do reservatório, para o período a partir de 1965.

**Figura 4.12** - Média da Energia gerada em cada um dos períodos de análise da OMA com base nos dados modelados para cada uma das usinas analisadas.

**Figura 4.13** - Engolimento máximo das turbinas da usina de Sobradinho para ambas as fases da OMA, com base nos dados modelados de altura líquida, para o período a partir de 1965.

## LISTA DE QUADROS

**Quadro 2.1** - Número total de turbinas.

**Quadro 2.2** – Engolimento das turbinas das usinas hidroelétricas da calha principal do rio São Francisco.

**Quadro 3.1** - Classificação de prioridades para simulação.

**Quadro 3.2** - Períodos, segundo as fases da OMA, para as simulações no SIGA.

**Quadro 4.1** - Resultados das Garantias nos períodos de análise da OMA com base nas simulações realizadas no programa SIGA.

**Quadro A1** - Demandas individuais e somadas do Eixo Norte da transposição do SF.

**Quadro A2** - Demandas individuais e somadas do Eixo Leste da transposição do SF.

**Quadro B1** – Polinômio Cota vs. Volume (Coeficientes de  $f_{cm}$ ).

**Quadro B2** – Polinômio Cota de jusante vs. Vazão de jusante (Coeficientes de  $f_{cj}$ ).

**Quadro B3** – Coeficientes de  $\eta$ .

**Quadro B4** – Constantes  $k_p$ .

**Quadro B5** – Polinômio engolimento máximo vs. queda.

**PRINCIPAIS ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ANA**- Agência Nacional de Águas

**BEN** - Balanço Energético Nacional

**DOL** - Distúrbios Ondulatórios de Leste

**ENOS** - El Niño- Oscilação Sul

**EPE** – Empresa de Pesquisa Energética

**FUNCEME** - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

**MI** - Ministério da Integração Nacional

**MME** - Ministério de Minas e Energias

**NEB** - Nordeste Brasileiro

**NNEB** - Norte do Nordeste Brasileiro

**LNEB** - Leste do Nordeste Brasileiro

**SNEB** - Sul do Nordeste Brasileiro

**OCDE** - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

**ODP** - Oscilação Decadal do Pacífico

**OMA** - Oscilação Multidecal do Atlântico

**ONS** - Organizador Nacional do Sistema Elétrico

**SIGA** - Sistema de Informação para a Alocação de Água

**SIN** - Sistema Interligado Nacional

**TSM**- Temperatura da Superfície do Mar

**ZCIT** - Zona de Convergência Intertropical

**ZCAS** - Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1 Problematização	14
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Geral	16
1.2.2 Específicos	16
<b>2 - REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>17</b>
2.1 Clima: A variabilidade climática do Nordeste Brasileiro (NEB)	17
2.1.1 Chuvas nas diferentes porções do NEB	17
2.1.1.1 Norte - Relação ZCIT x Gradiente de TSM	17
2.1.1.2 Leste - Distúrbios ondulatórios de leste x El Niño do Atlântico	19
2.1.1.3 Sul - Frentes Frias x ZCAS	21
2.1.2 ENOS x Precipitação no Rio São Francisco	22
2.1.3 Variabilidade Multidecadal: Relação entre OMA, ODP e Precipitação no NEB	24
2.1.3.1 OMA e a Precipitação no NEB	24
2.1.3.2 ODP e a Precipitação no NEB	25
2.2 Água: uso no NEB e na Bacia do Rio São Francisco	28
2.2.1 Resposta da vazão à variabilidade da precipitação: secas no NEB.	28
2.2.2 Operação de Reservatórios	30
2.2.2.1 Características Físicas de um Reservatório	30
2.2.2.2 Balanço Hídrico: Garantia e Riscos	34
2.2.3 Gestão dos Recursos Hídricos	37
2.2.3.1 Lei das Águas	37
2.2.3.2 Caracterização dos Usos Múltiplos dos Recursos Hídricos da Bacia	38
2.2.3.3 Transposição do Rio São Francisco	41
2.3 Energia: no Brasil e no NEB	43
2.3.1 Matriz Energética e Elétrica Nacional	43
2.3.2 Aproveitamento hidroelétricos do SIN na Bacia do Rio São Francisco	45
2.3.3 Relações da Geração de Energia Hidrelétrica	47
2.3.3.1 Água	47
2.3.3.2 Controle de Cheias e Usos múltiplos na Bacia	48
<b>3 - METODOLOGIA</b>	<b>50</b>
3.1 Caracterização da Área de estudo	51
3.1.1 NEB e Bacia do Rio São Francisco	51

	13
3.2 Base de Dados	55
3.3 Análise das Séries Temporais	55
3.3.1 Média Móvel	55
3.3.2 Regressão Linear, Teste de Mann-Kendall e Declividade de Sen	56
3.3.3 Espectro de Ondeleta Global (Wavelet)	59
3.4 O Sistema de Suporte à Decisão (SIGA)	60
3.4.1 Operação de reservatório utilizando o programa SIGA	61
3.4.2 Definição de Prioridades e Montagem da Rede São Francisco Estendido	62
3.4.3 Simulações	64
3.4.4 Curva de Permanência (Q90) e Garantias	65
3.5 Geração em Usinas Hidrelétricas de Energia (UHEs)	66
3.5.1 Potência e Energia	67
3.5.2 Altura de Queda Bruta e Líquida	70
3.5.3 Rendimento e Engolimento das Turbinas	71
3.5.4 Calibração e Testes utilizando o programa SIGA	73
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>74</b>
4.1 Clima	74
4.1.1 Análise das Séries Temporais de Precipitação e Vazão	74
4.1.2 Espectro de Ondeletas Global (Wavelet)	75
4.2 Água	78
4.2.1 Curva de Permanência e Q90	78
4.2.2 Garantias	79
4.3 Energia	81
4.3.1 Geração Hidrelétrica	81
4.3.2 Engolimento das Turbinas	85
<b>5 - CONCLUSÕES</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>88</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>103</b>

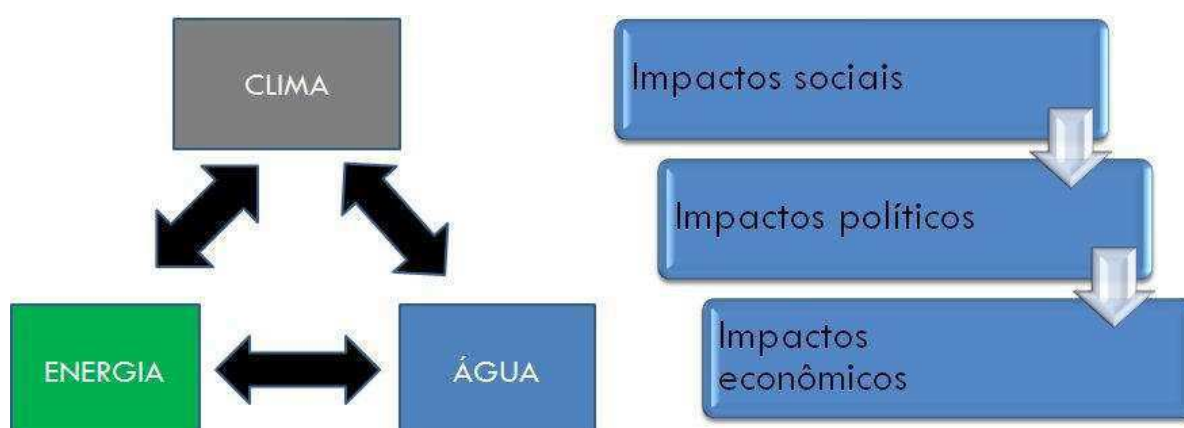
## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 Problematização

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. O aumento demasiado da população tecnologicamente ativa aumenta também o consumo por energia (ENEL, 2017). Isso reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis, eletrodomésticos e eletroeletrônicos (ENEL, 2017).

Todos esses bens e serviços exigem um acesso direto e/ou indireto à rede elétrica e pressionam ainda mais o consumo de energia elétrica. Associado ao consumo exacerbado de energia, um fator bastante comprometedor para a disponibilidade de energia e que a torna ainda mais escassa, são eventos climáticos capazes de modificar a dinâmica da produção de energia (SILVA, 2017).

Sistemas energéticos como o brasileiro, cujo planejamento e a geração eletroenergética apresentam correlação com os estoques de água existentes nos reservatórios das usinas hidrelétricas e as suas afluências, estão sujeitos a impactos advindos da variabilidade e das mudanças no clima, tanto na produção de energia, em suas diversas formas, quanto no seu consumo. Existe, portanto, uma relação de interdependência entre água e energia (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011; SCANLON et al., 2013), sendo o clima o elo que pode afetar e ser afetado nessa relação, conforme Figura 1.1.



**Figura 1.1** - Nexus: Clima, Água e Energia.

A recente crise energética brasileira mostrou a dependência da matriz energética do país e de seus recursos hídricos às condições climáticas. No Brasil, particularmente, de todas as variáveis climáticas, a precipitação e a vazão são as que melhor caracterizam a variabilidade climática sobre o Nordeste Brasileiro (NEB) e, provavelmente, as que impactam mais direta e significativamente em associação com a população, enquanto suas variações e mudanças resultam frequentemente, em repercussões econômicas nos meios ambiente, sociais e políticos (MEDEIROS, 2016).

Como as crises energéticas que têm ocorrido são de caráter imediato sendo urgente a garantia do suprimento da demanda é colocada em primeiro plano em detrimento das questões ambientais (NOBRE, 2001). Uma alternativa adotada para combater esta crise é a construção de termelétricas que, embora gerem benefícios imediatos, a longo prazo poderão causar danos ao clima (NOBRE, 2001) e sofrerem danos, pois segundo Lucena et al. (2009) o aumento da temperatura diminui a eficiência na conversão de energia das turbinas de gás natural.

Scanlon et al. (2013) mencionam que o acréscimo na demanda por energia aumenta também a demanda por água e leva a uma redução quantitativa deste recurso. Além disso, há uma tendência de aumento da demanda de água da irrigação no Brasil que pode levar à diminuição da segurança alimentar e maior vulnerabilidade para agricultores rurais, especialmente nas regiões semiáridas. Esses impactos se propagam nos diversos setores econômicos (DOMINGUES; MAGALHÃES; RUIZ; 2016), por exemplo, aumenta o custo de produção agrícola e da pecuária, eleva o custo dos insumos para o setor de alimentos e para o consumo das famílias.

A disponibilidade de água no Brasil depende em grande parte do clima. O ciclo anual das chuvas e de vazões no país varia entre bacias, e de fato a variabilidade interanual do clima, associada aos fenômenos de El Niño, La Niña, ou à variabilidade na temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico Tropical e Sul podem gerar anomalias climáticas, que produzem grandes secas, como em 1877, 1983 e 1998 no Nordeste, 2004-2006 no Sul do Brasil, 2001 no Centro-Oeste e Sudeste, e em 1926, 1983, 1998 e 2005 na Amazônia (Marengo & Silva Dias, 2006; Marengo, 2007; Marengo et al., 2008 a, b).

As condições climáticas de um conjunto de anos ou décadas depende tanto de variações climáticas naturais, como fenômenos interanuais e de baixa frequência ou das forças

antrópicas (SILVEIRA et al., 2014). Alguns autores como Alves (2012); Lázaro, (2011); Silveira et al. (2014) apontam os fenômenos de baixas frequências como alguns dos responsáveis pela variabilidade climática em escala decadal, principalmente na região tropical. Um exemplo disso é a relação da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), as quais são componentes associadas à variabilidade da TSM com a modificação do ciclo hidrológico (SILVA, 2017). Conhecer, então, o nexus existente entre clima, água e energia, demonstrando as interações entre os mesmos e os impactos na região do NEB, se mostra favorável a fim de se obter um melhor aproveitamento hídrico e energético.

As demais seções abordadas neste trabalho assumem a seguinte descrição: A seção 2 trata da revisão teórica da Literatura acerca dos temas centrais deste estudo; A seção 3 apresenta a Metodologia adotada para o desenvolvimento dos estudos de interesse; A seção 4 informa os resultados alcançados e as respectivas discussões e considerações acerca dos mesmos; A seção 5 aborda as conclusões acerca do estudo, destacando a relevância e ressaltando melhorias a serem adotadas, objetivando trabalhos futuros a serem desenvolvidos. Encerra-se com o Referencial Teórico utilizado, os Anexos e Apêndices.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

O objetivo principal deste trabalho é analisar o nexus existente entre clima, água e energia, com enfoque na Bacia do Rio São Francisco Estendido, visando identificar os impactos ocasionados pela variabilidade climática multidecadal na Gestão Hídrica e Geração Hidrelétrica.

### **1.2.2 Específicos**

- Analisar a variabilidade climática decadal e multidecadal, por meio do Espectro de Ondeleita Global (Wavelet);
- Simular as garantias de atendimento hídrico às múltiplas demandas;
- Obter a Curva de Permanência e a às vazões com garantia de 90% (Q90);
- Calcular a energia hidrelétrica gerada e o engolimento das turbinas mediante o uso de dados simulados;
- Identificar a variabilidade e/ou tendência das séries temporais;

## **2 - REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Clima: A variabilidade climática do Nordeste Brasileiro (NEB)**

#### **2.1.1 Chuvas nas diferentes porções do NEB**

##### **2.1.1.1 Norte - Relação ZCIT x Gradiente de TSM**

A porção norte do Nordeste Brasileiro (NNEB), compreendida pelos estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, o oeste da Paraíba, Pernambuco e Alagoas, e o norte-nordeste da Bahia, apresenta regime pluviométrico anual centrado nos meses de janeiro a abril (ANA, 2012).

Diversos autores (como MOLION e BERNARDO, 2002; FERREIRA *et al.*, 2005; GU e ADLER, 2009; CAVALCANTI, 2009) indicam que a variabilidade interanual da pluviometria sobre o NNEB está associada a variações no gradiente de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos próximos aos trópicos (Atlântico Tropical Norte e Sul), os quais afetam a posição e a intensidade da ZCIT sobre o Oceano Atlântico, modulando assim a pluviometria na região.

Em uma revisão sobre os principais padrões de variabilidade da TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico, Kayano *et al.* (2005), descreveram o quanto os oceanos desempenham um papel significativo na modulação da variabilidade climática, por meio dos processos dinâmicos e termodinâmicos envolvidos na complexa interação entre o oceano e a atmosfera. Isto ocorre essencialmente por meio do balanço de energia global no sistema Terra-atmosfera, que faz com que parte da energia solar absorvida pelo oceano (32%) retorna para a atmosfera por processos de transmissão de calor como radiação, condução e evaporação. Neste contexto, o oceano funciona como uma fonte de energia para a atmosfera (GONZALEZ, 2011).

Gonzalez (2011) também explica que, devido o fato dos oceanos tropicais receberem uma maior quantidade de energia solar, contribuem para a distribuição de energia para o restante do globo através da circulação geral da atmosférica ou oceânica. Como consequência das interações oceano-atmosfera que ocorrem durante a manifestação de episódios anômalos, pode ocorrer mudanças na circulação geral da atmosfera e, conseqüentemente, adversidades climáticas (secas, enchentes, altas temperaturas, etc.) em diversas regiões do globo (GONZALEZ, 2011).

Segundo Carvalho (2013), a ZCIT é um sistema sinótico, ou seja, que ocorre de forma semelhante nas proximidades da linha do equador. Para Molion e Bernardo (2000), a ZCIT é uma grande região de confluência dos ventos alísios de nordeste, oriundos do sistema de alta pressão ou anticiclone subtropical do Hemisfério Norte, e dos ventos Alísios de sudeste, oriundos da alta subtropical do Hemisfério Sul. O transporte de umidade e o aumento da convecção sobre o norte da América do Sul, em particular sobre o NEB, é favorecido pela junção da ZCIT com a confluência dos ventos e a convergência de massa em baixos níveis, que ocorrem especialmente na região do Atlântico tropical (CAVALCANTI, 2009).

A região em que a ZCIT atua pode ser identificada pela presença de aglomerados convectivos, que representam um dos principais mecanismos de aquecimento da atmosfera, ocasionados, principalmente, pela liberação de calor latente e pela interação entre radiação e nebulosidade. Desta forma, torna-se essencial a compreensão do comportamento da ZCIT para o entendimento da circulação geral da atmosfera e das características do regime pluviométrico na região equatorial (CARVALHO, 2013).

Dentre os Estados nordestinos, Maranhão (norte e centro), Piauí (norte e centro), Ceará, Rio Grande do Norte e os sertões da Paraíba e Pernambuco, são as mais influenciadas pela ZCIT organizada sobre o Atlântico Equatorial. Desse modo, o nível de precipitação mais elevado nessas áreas se dá dentre os meses de março e abril, período no qual esse sistema atua de forma mais regular (CAVALCANTI, 2009).

Os aspectos meteorológicos de grande escala podem acentuar ou inibir o desempenho da ZCIT, devido sua configuração ser inerente à circulação geral da atmosfera. Existe então uma variabilidade interanual da ZCIT causada pelo deslocamento da mesma em função da mudança nas regiões mais quentes do globo, pois a estrutura da ZCIT encontra-se sobre a região de máxima TSM (CAVALCANTI, 2009).

O gradiente meridional de TSM do atlântico tropical é a força dominante que conduz a posição da ZCIT e a precipitação no NEB. Durante os anos em que o gradiente meridional de TSM é negativo nos meses de março-abril-maio (MAM), isto é, anomalias frias no Atlântico Norte tropical e anomalias quentes no Atlântico Sul tropical, a ZCIT migra para o sul trazendo precipitação para o NNEB. Durante os eventos de La Niña, o gradiente de TSM meridional muitas vezes se torna negativo seguido por uma estação de chuva úmida nos

meses de MAM. O contrário ocorre geralmente durante os anos de El Niño (RODRIGUES e MCPHADEN, 2014).



**Figura 2.1** - Ilustração esquemática do posicionamento da ZCIT em (a) anos secos e (b) anos chuvosos no NNEB. Fonte: Cavalcante (2009).

### 2.1.1.2 Leste - Distúrbios ondulatórios de leste x El Niño do Atlântico

A porção Leste do Nordeste Brasileiro (LNEB), englobando as regiões do agreste e litoral dos estados de Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, tem seu período chuvoso nos meses de abril a julho (ANA, 2012). Os principais mecanismos causadores de chuvas durante a estação chuvosa do LNEB são a convergência dos ventos alísios de sudeste e a atuação de distúrbios atmosféricos que se propagam da África para oeste (HASTENRATH e HELLER, 1977; MOURA e SHUKLA, 1981; KOUADIO *et al.*, 2012).

Os distúrbios ondulatórios de leste (DOLs), conforme definido por Medeiros (2016), são perturbações de pequena amplitude observadas nos campos de vento e pressão à superfície, atuantes no LNEB, desde o Rio Grande do Norte até a Bahia (latitude de 5° a 13°S), atingindo, principalmente, os estados da Paraíba e Pernambuco no período de maio a agosto. Sua intensidade depende da TSM, do cisalhamento do vento e dos efeitos da orografia e da circulação de Brisas Marítima e Terrestre, de forma a intensificar ou dissipar este sistema (MEDEIROS, 2016).

Para Corrêa (2016), são ondas que se formam no campo da pressão atmosférica, ao longo dos Alísios, na faixa tropical do Globo, deslocando-se de leste para oeste. O mesmo autor ainda afirma que embora não seja fácil distinguí-las nas cartas sinóticas, essas ondas

são capazes de causar precipitações acentuadas ao longo de suas trajetórias. Normalmente, os DOLs se configuram em regiões de baixa pressão da onda (~850-700 hPa), onde apresentam cavados, e sua nebulosidade é caracterizada por nuvens geralmente convectivas, tornando o clima caracteristicamente chuvoso, associando-se frequentemente a tempestades (VAREJÃO-SILVA, 2005).

No entanto, as anomalias de TSM no Atlântico Tropical na forma de dipolo têm sido bastante relacionadas por diversos autores à variabilidade do clima do NEB. (SASAKI, 2014). Hastenrath e Heller (1977) demonstraram que a ocorrência de eventos de seca no NEB está diretamente relacionada com o padrão de Dipolo (ou gradiente) na TSM do Atlântico Tropical, que se inverte (dipolo invertido do Atlântico) em anos anormalmente chuvosos no NEB. Alguns anos depois, Moura e Shukla (1981) interpretam a relação entre o gradiente do Atlântico e as anomalias de chuva no NEB e esclarecem o mecanismo dinâmico que leva à seca no NEB baseado na circulação meridional, termicamente direta, promovida pela distribuição da TSM.

Posteriormente, com os avanços das pesquisas e a expansão para estudos voltados para às diferentes regiões do NEB, Kouadio et al. (2012) estudaram o efeito da temperatura da superfície do Oceano Atlântico Tropical em episódios de chuvas intensas no LNEB, relacionado às condições de grande escala e do acoplamento oceano-atmosfera. Os referidos autores concluíram que processos oceano-atmosféricos são responsáveis por fortes episódios de chuva sobre o LNEB, principalmente, na presença de anomalias positivas de TSM, na bacia do Atlântico Equatorial Sul, que levam à evaporação e aumento do calor latente. Estes fatores contribuem para a intensificação de DOLs nesta área (MOURA *et al.*, 2009).

De outro modo, anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul também produzem precipitação sobre o LNEB, enquanto anomalias positivas de TSM no Pacífico inibem a chuva no LNEB (MOURA *et al.*, 2009). Hounsou-gbo (2015) reafirma que elevadas anomalias positivas de precipitação no LNEB são correlacionadas com a TSM no Atlântico Tropical Sul. Nesta configuração, a intensificação do vento do sudeste, durante a primavera boreal e a anomalia positiva da temperatura da superfície do mar no Atlântico tropical do sul, induzem o transporte de água quente para o oeste através do ramo da Corrente Equatorial do Sul e as intensas chuvas sobre o ENEB durante junho-julho (HOUSOU-GBO, 2015).

### 2.1.1.3 Sul - Frentes Frias x ZCAS

As precipitações sobre a porção sul do Nordeste Brasileiro (SNEB), englobando os estados da Bahia (praticamente toda), norte de Minas Gerais, noroeste do Espírito Santo e às partes sul do Maranhão e Piauí e extremo sudoeste de Pernambuco, apresentam quadrimestres mais chuvosos de novembro a fevereiro, com os máximos pluviométricos durante dezembro e janeiro. Os principais mecanismos atmosféricos causadores das chuvas sobre a porção sul do Nordeste são frentes frias provenientes de altas latitudes do Hemisfério Sul e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (ANA, 2012).

Segundo Molion e Bernardo (2000), os índices pluviométricos no SNEB variam de 600 mm/ano (interior) a mais de 3.000 mm/ano (litoral) e seu período mais chuvoso está compreendido entre os meses novembro a fevereiro (NDJF), com o pico de chuva em dezembro para a estação de Caetitê (sul da Bahia) e entre os meses de dezembro a março (DJFM), com o pico em março, para a estação de Remanso (norte da Bahia). Tem como principal mecanismo de precipitação a estacionaridade dos sistemas frontais alimentados pela umidade proveniente do Atlântico Sul, que definem a ZCAS, sistemas pré-frontais, convecção local e brisas de mar e terra no litoral.

Um mecanismo importante de produção de chuva para o sul do Nordeste (SNEB) é a penetração de sistemas frontais (composto classicamente por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície), ou seus restos, entre as latitude 5°S e 18°S. Durante a fase de primavera-verão do Hemisfério Sul, os sistemas frontais se posicionam preferencialmente sobre a parte central do continente sul-americano, com seu eixo de inclinação variável no sentido NW-SE, criando uma zona de convergência de umidade que, posteriormente, foi denominada zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O deslocamento da ZCAS para 12°-15°S, e sua permanência com atividade intermitente, causa a estação chuvosa no período de novembro a março no SNEB (MOLION e BERNARDO, 2000).

A convecção na ZCAS pode também ocorrer devido a outras fatores. Em escala sinótica, por exemplo, a chegada de frentes frias vindas de latitudes mais altas pode interferir na atividade convectiva da ZCAS. Existe a possibilidade de a permanência da mesma ser um resultado da chegada de tais frentes frias. Desse modo, os maiores níveis de precipitações no

SNEB estão associados à penetração de frentes frias vindas de regiões subantárticas, que alcançam latitudes mais baixas nos meses de novembro a fevereiro ou instabilidades causadas pelo avanço desses sistemas, constituindo assim o segundo principal mecanismo da produção de chuvas no NEB, e o principal para o sul da Bahia (KOUSKY, 1979; MEDEIROS, 2016).

Conforme descrito por Medeiros (2016), as bandas de nebulosidade associadas aos sistemas frontais que penetram no NEB são na verdade, remanescentes de frentes frias que avançam sobre o SNEB nos meses de dezembro a fevereiro. A chegada de uma frente fria até o Brasil, que penetra pelo sul do País, induz a formação de linhas de instabilidade e outros fenômenos que acentuam a formação de precipitações convectivas e exercem efeitos à distância, inclusive nos climas tropical e equatorial, o que inclui o SNEB e o estado do Piauí.

### **2.1.2 ENOS x Precipitação no Rio São Francisco**

O fenômeno El-Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno de escala global relacionado a um forte acoplamento oceano-atmosfera, que se manifesta sobre o Oceano Pacífico, e causa variabilidade no tempo e no clima global em escalas interanuais, em diversas regiões dentre às quais se enquadra o Brasil (SOUSA, 2010). Historicamente, o NEB tornou-se conhecido por apresentar alguns anos com secas severas ou chuvas excessivas, às quais têm sido relacionados aos padrões anômalos de grande escala da circulação atmosférica global, associados ao fenômeno ENOS (ANDREOLI, 2004).

O ENOS consiste de duas componentes: uma oceânica e outra atmosférica. A oceânica é representada pelo El-Niño (La Niña), dada pela fase quente (fria) que é o aquecimento (resfriamento) anômalo das águas superficiais no Pacífico Leste (SOUSA, 2010). A componente atmosférica, por sua vez, é representada pela Oscilação Sul (OS), a qual é descrita por Aragão (2004) como sendo variações anômalas da pressão atmosférica tropical, atuando como resposta aérea do El-Niño, associada à mudança na circulação geral da atmosfera entre as regiões da Alta Subtropical do Pacífico Sudeste e a Baixa Pressão da Indonésia.

Há algum tempo, diversos pesquisadores vêm demonstrando maior conhecimento das fontes tropicais de calor, como o fenômeno ENOS, e suas implicações sobre o clima do NEB (HOREL e WALLACE, 1981; KOUSKY et al., 1984; ALVES e REPELLI, 1992; CHAVES e CAVALCANTI, 2001; COELHO e AMBRIZZI, 2002; HOERLING e KUMAR, 2002). Os

autores concordam que anomalias positivas de TSM associadas à fase quente do fenômeno ENOS (El Niño) no Pacífico Tropical são associadas a anomalias negativas de chuva no NEB.

Os eventos ENOS têm grande influência sobre os sistemas produtores de chuva já que afetam o posicionamento longitudinal dos ramos ascendentes da Célula de Walker. Em episódios de El Niño, seu ramo ascendente principal se posiciona sobre as águas aquecidas do Pacífico e causa subsidência e alta pressão sobre o Norte da América do Sul, bloqueando a ZCIT mais ao norte, os sistemas frontais do Hemisfério Sul (SFHS) e o ZCAS mais ao sul, promovendo secas severas na Região. Já os eventos de La Niña, parecem estar associados a intensificação dos ramos ascendentes da Célula de Walker sobre os continentes, aumentando os totais pluviais. (SOUSA, 2010).

Em outro estudo, Silva (2013a) considera a circulação anômala de Walker como uma das principais responsáveis pelas anomalias de TSM na região, onde eventos quentes (frios) no Pacífico Equatorial Leste estariam associados a anos anormalmente secos (chuvosos) no NEB. Aragão (1990) afirmou que existe grande probabilidade de ocorrer secas no NEB, em 70% dos casos associada aos episódios do ENOS moderados a forte. A influência deste fenômeno é mais forte ao NNEB, norte do estado do Maranhão e dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Paraíba e na região norte da Bahia.

Quanto às influências de variações do clima sobre a bacia hidrográfica do rio São Francisco, Galvínio (2000) observou que existe uma relação direta entre a precipitação e os índices de anomalias de TSM nas diferentes áreas dos Niños, mostrando os contrastes entre o Alto São Francisco (ASF), região ao SNEB, Médio São Francisco (MSF), região ao LNEB e Baixo São Francisco (BSF), região ao NNEB. Em anos de El Niño, ocorrem altas precipitações na sub-bacia do ASF, e conseqüentemente altas vazões, e baixas precipitações na sub-bacia do BSF. Em anos de La Niña, ocorre exatamente o contrário, ou seja, altas precipitações na sub-bacia do BSF e baixas sobre a sub-bacia do ASF (SILVA, 2013b).

De acordo com Santos *et al.* (2011), que realizou pesquisas sobre eventos extremos de chuva e alterações no regime hidrológico na bacia hidrográfica do rio São Francisco, detectou que o fenômeno ENOS tem influência significativa no padrão de anomalias positivas e negativas de chuva e mudanças do regime hidrológico da bacia em questão. No entanto, seus

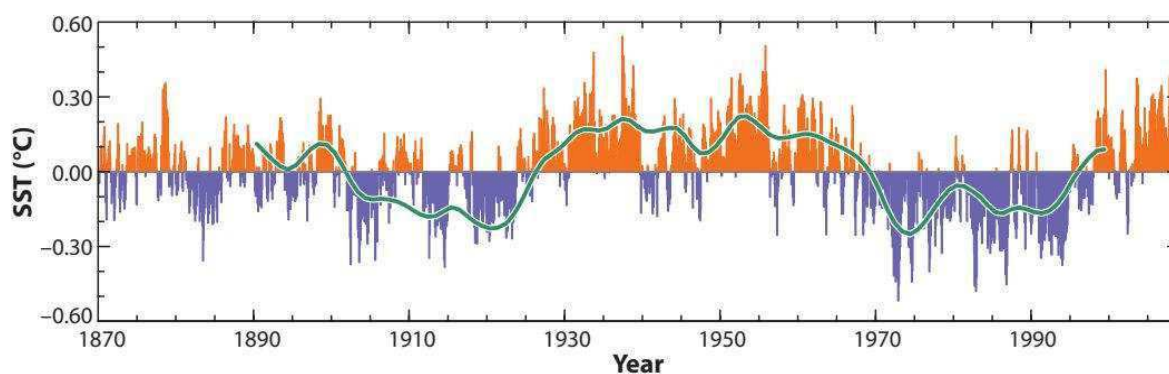
resultados também mostraram que não existe uma relação direta entre a intensidade do El Niño e a ocorrência de cheias ou secas severas.

### 2.1.3 Variabilidade Multidecadal: Relação entre OMA, ODP e Precipitação no NEB

#### 2.1.3.1 OMA e a Precipitação no NEB

Desde o início do presente século, diversos autores passaram a analisar a interação entre o norte do oceano Atlântico e o clima na América do Sul, região que inclui o Brasil (DELWORTH and MANN, 2000; KNIGHT *et al.*, 2005; SIQUEIRA e MOLION, 2008; SILVA, 2013b; KAYANO e CAPISTRANO, 2013; SANTOS, SIQUEIRA e MELO, 2016). Os mesmos observaram a existência de correlação (entre moderada e forte) com a precipitação sobre o NEB, bem como modificações na influência do ENOS a partir da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), derivada da expressão AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation).

De acordo com Siqueira (2012), a OMA é caracterizada pela alteração da TSM da região norte do oceano Atlântico, entre a região do Golfo do México e a Baixa da Islândia, em um período mais longo de tempo. Conforme Kerr (2000) *apud* Silva (2013b), a OMA é uma série contínua de longa duração multidecadal de temperatura do mar do Oceano Atlântico Norte, com fases frias e quentes que podem durar de 20 a 40 anos (Figura 2.2). O mesmo autor afirma que estas mudanças são naturais e vêm ocorrendo pelo menos nos últimos 1.000 anos.



**Figura 2.2** - Série temporal da Oscilação Multidecadal do Atlântico. O índice SST (TSM) do Atlântico Norte, definido como a anomalia mensal média de SST sobre o Atlântico Norte (0°-70°N) menos a anomalia mensal média global de SST (barras vermelhas e azuis). A linha verde representa uma estimativa da média móvel (10 anos) do índice de SST do Atlântico Norte. Fonte: Ting et al. (2009) *apud* Deser et al.,(2010).

Para Santos, Siqueira e Melo (2016), seu tempo de duração é muito longo se comparada, por exemplo, com o fenômeno ENOS (que dura em média, de 8 a 9 meses). A OMA se assemelha à Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) quanto às suas frequências, pois ambas são consideradas padrões de variabilidade de baixa frequência. As fases quentes da OMA ocorreram desde o final da década de 1920 até o final da década de 1960 e, desde meados da década de 1990, e fases frias ocorreram desde o início do ano 1900 até meados da década de 1920 e desde o início da década de 1970 até meados da década de 1990 (DESER *et al.*, 2010).

Quando a OMA está em sua fase quente (positiva), as secas tendem a ser mais frequentes ou prolongadas (KNIGHT *et al.*, 2005). Dentre às secas mais severas do século 20, duas ocorreram durante a OMA positiva, entre 1925 e 1965 (KNIGHT *et al.*, 2005). Quando a OMA é negativa (fria), há maior incidência de precipitação e, conseqüentemente, índices de cotas positivas na bacia hidrográfica do rio São Francisco. A região se beneficia com a ocorrência simultânea de El Niño e OMA negativa, já que o primeiro promove aumento de chuvas nas cabeceiras do rio e o segundo, aumento de chuvas em todo o NEB (SILVA, 2013b).

Deser *et al.* (2010) relata uma problemática a cerca do grau em que os efeitos antropogênicos podem contribuir para a recente fase positiva da OMA. Em particular, houve uma tendência geral de aquecimento, tanto terrestre, como oceânico associado ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa. Como a OMA é um registro baseado na temperatura da TSM, ele pode conter o sinal de aquecimento global antropogênico e assim confundir parcialmente o estado verdadeiro da mesma.

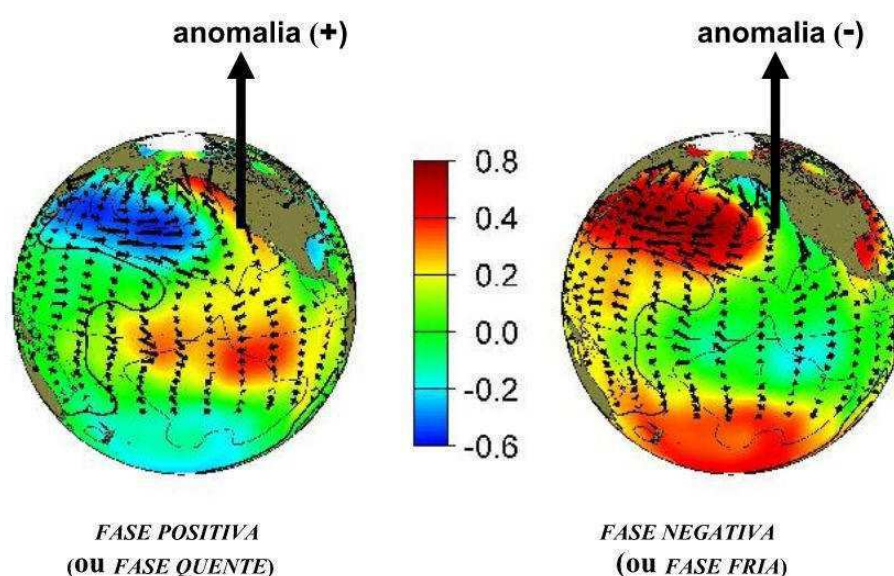
### **2.1.3.2 ODP e a Precipitação no NEB**

As variações de prazo mais longo do ciclo anual de precipitação no NEB podem estar relacionadas a fenômenos de escala temporal mais ampla, como variações interdecadais da temperatura da superfície do Oceano Pacífico, descrita inicialmente por Mantua *et al.*, (1997) e conhecida como Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).

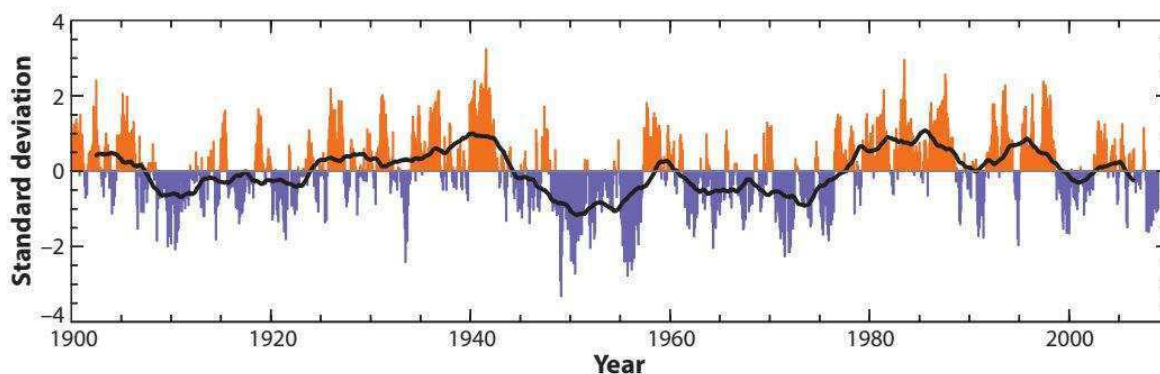
Zhang *et al.* (1997), separaram a variabilidade temporal do Oceano Pacífico em duas componentes, estando uma relacionada à escala de variabilidade interanual - ciclos do ENOS, e a outra, linearmente independente, incluindo toda a variabilidade interdecadal, na qual destaca-se a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Conforme Silva (2011), a ODP que deriva-se do termo “Pacific Decadal Oscillation” - PDO, comporta-se como uma “gangorra” entre a temperatura de superfície do mar (TSM) ao longo da costa oeste da América do Norte em respeito ao restante da bacia do Pacífico Norte.

O mesmo é descrito por Xavier e Xavier (2004), os quais também consideram o índice médio da ODP no intervalo novembro-março (considerados mais significativos) de cada ano hidrológico, como sendo: uma Fase Positiva (+) ou Quente (“warm”), caracterizada por anomalias positivas ao longo da Costa Oeste da América do Norte e negativas no resto da bacia do Pacífico Norte; e uma Fase Negativa (-) ou Fria (“cool”) quando o aquecimento/resfriamento nas duas áreas se inverte. A representação destes processos se encontram na Figura 2.3.

Uma segunda característica da ODP é sua grande persistência, ou seja, as fases quentes (positivas) ou frias (negativas) permanecem predominantes por anos seguidos, por vezes, ao longo de duas ou três décadas (multidecadais). Deser *et al.*, (2010) também demonstra, através do desvio padrão, essas anomalias conforme consta na Figura 2.4, a qual é possível ver às oscilações entre fases no decorrer das décadas.



**Figura 2.3** - Fases da ODP. Fonte: Mantua / PDO-Internet page *apud* Xavier e Xavier (2004).



**Figura 2.4** - Série temporal da Oscilação Decadal do Pacífico. Associação da série de tempo da componente principal mostrando a gravação não suavizada (barras vermelhas e azuis) e a gravação com média móvel de 5 anos (linha preta). Fonte: Deser *et al.*, (2010).

De acordo com Andreoli e Kayano (2005), durante a ocorrência da fase positiva/quente da ODP, há a tendência de episódios de El Niño mais intensos e frequentes. Já durante a fase negativa da ODP, há maior ocorrência de episódios de La Niña, que tendem a ser mais intensos e de maior frequência. Desse modo, a fase negativa da ODP torna-se favorável para a precipitação no NEB (SILVA e GALVÍNCIO, 2011). O autor também sugere que a ODP negativa incrementa os valores das anomalias de chuva, tanto durante El Niño, quanto La Niña. Há indícios de que a ODP tenha entrado em uma nova fase fria a partir do ano de 1999, fase que poderá perdurar pelos próximos 20 a 25 anos (SIQUEIRA, 2006).

Um estudo realizado por Bernardo e Molion (2004) demonstra que a variabilidade interanual da precipitação na Costa Norte e Costa Leste do NEB não apresenta uma relação forte com os índices clássicos definidos na literatura, como ENOS e PDO, indicando que os mesmos não possam causar impacto em todo o NEB.

De acordo com estudos promovidos por Silva, Galvêncio e Nóbrega (2011), no ASF não é notável uma associação entre as fases do ENOS e ODP, como notado em outras regiões do NEB, para dados de precipitação. No Submédio do São Francisco, a associação das mesmas fases de ENOS e ODP promoveram diminuição nas chuvas, quando na fase quente de ambos os eventos. Desse modo, as áreas do Nordeste do Brasil são mais sensíveis à associação do ENOS e ODP. Os mesmos resultados também foram encontrados para outros estudos sobre o NEB, como o proposto por Silva (2013b), onde seus resultados corroboram com os de

Galvêncio (2000), no qual apontam que em anos de El Niño há aumento de chuvas no ASF e diminuição no BSF. Ainda observaram aumento de cotas no ASF onde o aumento é maior quando em concordância com a fase da ODP.

## **2.2 Água: uso no NEB e na Bacia do Rio São Francisco**

### **2.2.1 Resposta da vazão à variabilidade da precipitação: secas no NEB.**

De modo geral, a variabilidade temporal das chuvas resulta na variabilidade da vazão nos rios. Desse modo, surgem situações de déficit hídrico natural, quando a vazão do curso d'água é inferior à necessária para o atendimento de determinados usos, ou situações onde o excesso de vazão produz enchentes e inundações (BARBOSA JÚNIOR, 2014).

A bacia do rio São Francisco drena regiões de precipitações superiores a 2.000 mm nas suas cabeceiras, em Minas Gerais (MG), até a zona semi-árida/árida da Bahia e de Pernambuco, com precipitações da ordem de 400 mm, as quais aumentam conforme se aproxima da foz, onde os valores médios anuais se encontram em torno de 1.300 mm (RAMOS e PRUSKI, 2003). No entanto, as várias intervenções a que têm sido submetido, o rio e seus afluentes mais importantes nos últimos anos resultaram em complexas mudanças no seu regime de vazão, com repercussões em sua zona costeira (MMA, 2004).

Quanto às vazões, segundo os dados do Projeto GEF São Francisco e do Plano Decenal da Bacia, as máximas mensais na estação de Traipu, na foz do rio, têm sido da ordem de 13.743 m<sup>3</sup>/s, e ocorrem em março e às mínimas mensais, da ordem de 644 m<sup>3</sup>/s, ocorrem em outubro (MMA, 2004). Observando-se uma vazão mínima, média e máxima anual de 1.768 m<sup>3</sup>/s, 2.980 m<sup>3</sup>/s e 5.244 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, o que corresponderia a uma descarga média anual da ordem de 94 bilhões de m<sup>3</sup> (MMA, 2004). Contudo, cerca de 72% dessa vazão advém do Estado de MG, 22% corresponde à contribuição advinda do Estado da Bahia e os restantes 6% se distribuem entre Pernambuco, Alagoas e Sergipe (PEREIRA, 2004).

Um estudo sobre o tempo e clima no NEB, publicado pela Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais - FUNCATE, pertencente ao Ministério da Integração Nacional Brasileiro, demonstrou a problemática da variação climática no NEB, ao que diz respeito aos regimes hidroclimatológicos (mais especificamente no regime das chuvas), identificando a existência da complementaridade entre as chuvas da região que gera a parte

principal dos escoamentos da bacia do São Francisco, à montante da barragem de Sobradinho ao norte de Minas Gerais (NMG) e as chuvas na região das bacias receptoras de estados do NNEB.

No estudo da FUNCATE (MI, 2000), foi constatado que a máxima vazão média da usina de Três Marias ocorre no mês de janeiro, um mês após a máxima precipitação média das localidades da bacia do São Francisco no NMG. Em Sobradinho, Itaparica, C. P. Afonso e Xingó, as máximas vazões médias ocorrem em fevereiro, um mês após a vazão em Três Marias. Também foi observado que as anomalias de precipitação se refletiram nas vazões de formas variadas, pois em somente 5 das 16 secas do NNEB (31% de coincidência de eventos, nos anos de 1942, 1952, 1954, 1958, e 1972) houve decréscimos significativos nas vazões de Sobradinho, Itaparica, C. P. Afonso, Xingó e, conseqüentemente, redução na vazão do Rio São Francisco.

Desse modo, a FUNCATE inferiu que as chuvas e a vazão na bacia do Rio São Francisco, no NMG e SNEB, ocorreram defasadas dos anos secos no NNEB em praticamente 2/3 (dois terços) dos anos analisados. Tal constatação indica que a complementaridade dos regimes hidrológicos é parcial, existindo casos nos quais as deficiências hídricas são concomitantes no NNEB e na bacia do São Francisco, principalmente na ocorrência de eventos fortes e/ou prolongados dos fenômenos oceânicos que causam variações na TSM.

Em um estudo mais recente publicado pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET no ano de 2017, foi constatado que a situação de seca registrada ao longo do primeiro semestre do referido ano é recorrente na região do Nordeste Brasileiro (NEB), principalmente no semiárido. A influência do forte El Niño proporcionou cenários de seca extrema a excepcional, abrangendo cidades de todos os nove estados: Maranhão, Bahia, Piauí, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte, sendo que o três últimos apresentaram os maiores números de municípios que decretaram situação de emergência.

Para o INMET (2017), o impacto de secas classificadas como de curto e longo prazos predominou em todos os estados durante o primeiro semestre do ano. Ao citarem a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme), afirmaram que segundo a mesma, o estado do Ceará foi um dos estados que apresentou maior avanço da estiagem, enfrentando cinco secas seguidas desde 2011, indicando que 75% do território do estado apresentou seca

extrema ou seca excepcional, atingindo regiões litorâneas, desde o Rio Grande do Norte até parte da Bahia. O volume de água armazenado nos principais reservatórios do Ceará ficou em 8,8%, o pior nível em mais de 20 anos. Das 184 cidades do estado, 126 ficaram em situação de emergência por conta da seca ou da estiagem, segundo o governo estadual.

Ainda segundo o estudo do INMET (2017), no decorrer dos meses do ano de 2016, a distribuição de chuvas foram bastante irregulares, com déficit negativo em praticamente toda a região do NEB. Dessa forma, os indicadores de seca mostraram expansão das áreas e agravamento na intensidade do quadro de seca em todos os estados da região. O INMET também informou que a Agência Nacional de Águas (ANA) autorizou a redução do volume de água liberado pelas comportas do reservatório de Sobradinho (BA) para 700 m<sup>3</sup>/s, caracterizando uma situação crítica, desde a sua criação, em 1979, quando fecharam a barragem no rio para sua formação.

Castigado por uma estiagem que perdura por cinco anos, desde 2012, o reservatório de Sobradinho passa a contar com quase metade do mínimo de água que sua barragem deveria liberar em 2017, conforme critérios estabelecidos pelo Ibama e pela ANA com restrições na navegação e na geração de energia. O período chuvoso na região começa em dezembro e segue até maio do ano seguinte. Sobradinho se encontra em 2017 com 7% de sua capacidade total de 34,1 bilhões de m<sup>3</sup> de água. Além de ser a principal fonte de água do Nordeste, o reservatório responde por 58% da geração de energia consumida na região (INMET, 2017).

## **2.2.2 Operação de Reservatórios**

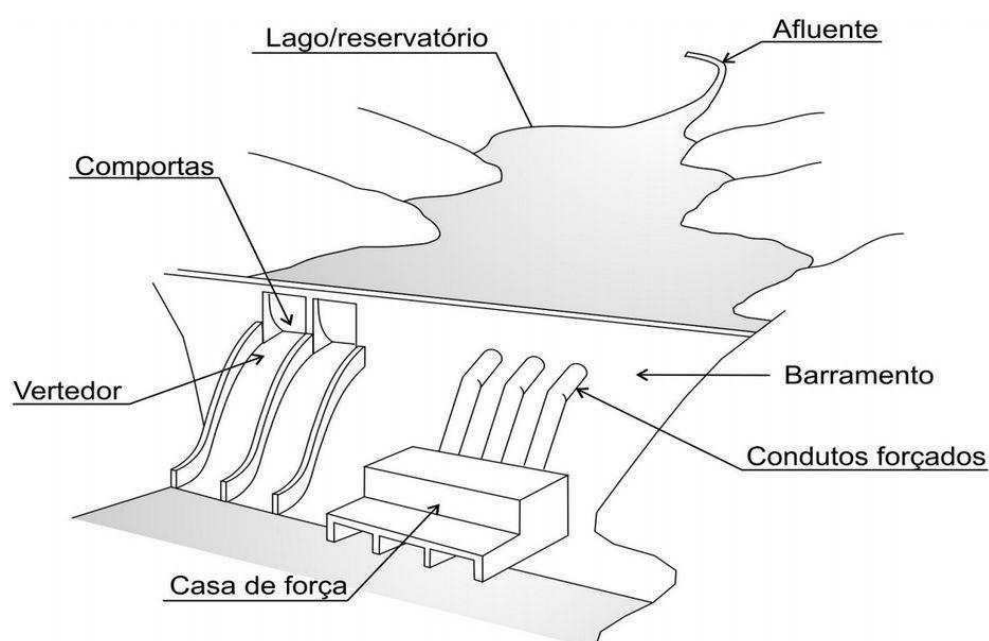
### **2.2.2.1 Características Físicas de um Reservatório**

A fim de reduzir a variabilidade temporal da vazão, recorre-se à sua regularização por meio da construção do reservatório de acumulação de água. A técnica de regularização das vazões naturais é, neste caso, um procedimento que visa a melhor utilização dos recursos hídricos superficiais. Para compensar as deficiências hídricas dos períodos de estiagem, o reservatório acumula parte das águas nos períodos chuvosos exercendo, assim, um efeito regularizador das vazões naturais. De outro modo, nos períodos chuvosos, o reservatório poderá produzir o amortecimento das ondas de cheia, proporcionando uma proteção para as áreas situadas a jusante do barramento (BARBOSA JÚNIOR, 2014).

Em geral, os reservatórios são formados por meio de barragens implantadas nos cursos d'água. Suas características físicas, em especial a capacidade de armazenamento, dependem sobretudo das características topográficas do vale no qual está inserido (LOPES e SANTOS, 2002).

Os principais elementos de um reservatório são (Figura 2.5):

- Barramento;
- Vertedor;
- Lago;
- Comportas;
- Casa de forças (no caso de ser uma usina de geração hidrelétrica);
- Afluente(s) de entrada de vazão (cursos d'água contribuintes ao reservatório).

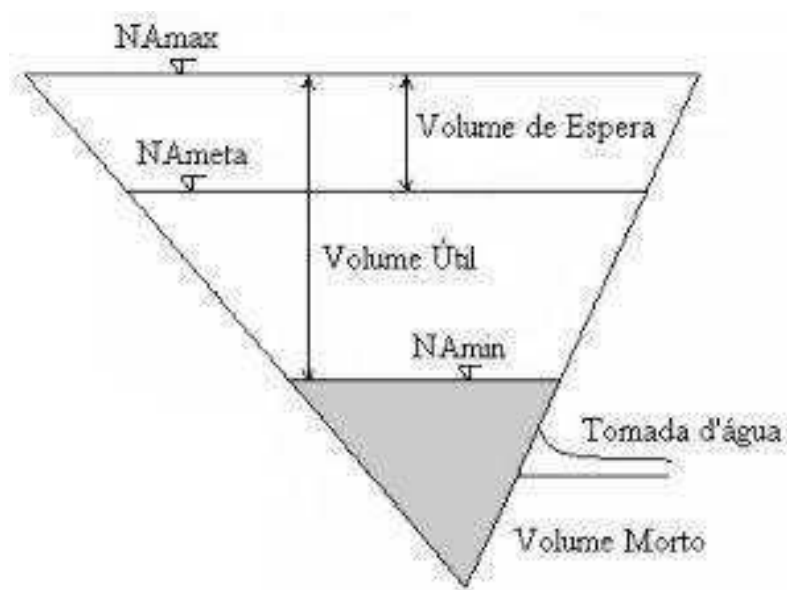


**Figura 2.5** - Componentes Básicos de um Reservatório. Fonte: Mees (2016).

A água uma vez ingressada no reservatório tem 3 (três) alternativas de efluência (saída):  
1) pelo descarregador de fundo ou turbina; 2) pelo vertedor durante eventos extremos; 3)

evaporação para a atmosfera. A evaporação cresce proporcionalmente à área da superfície de água do reservatório, podendo ter volumes anuais significativos caso a região seja de grande insolação, temperatura e vento, como é o caso do NEB (MEES, 2016).

Outras especificações importantes de um reservatório podem ser descritas, do ponto de vista físico, por seus níveis e volumes característicos. Desse modo, a Figura 2.6 representa todo o esquemático representativo do reservatório e seus respectivos volumes e cotas de interesse. Estes elementos são descritos nos itens a seguir, conforme especificados por Lopes e Santos (2002) e Meen (2016):



**Figura 2.6** - Caracterização dos níveis d'água (cotas) e volumes do Reservatório.

Fonte: Lopes e Santos (2002).

- **Nível d'água Mínimo Operacional**

O Nível d'água (NA) mínimo operacional corresponde ao nível mínimo (ou cota mínima) necessário para a operação adequada do reservatório e define o limite superior do volume morto e o limite inferior do volume útil do reservatório. Normalmente, o NA mínimo operacional encontra-se acima do limite superior da estrutura de tomada d'água (tomada d'água para casa de força, por exemplo) de modo a evitar a formação de vórtices nesta entrada e evitar o ingresso de ar no conduto forçado. A seguir, encontram-se algumas definições:

- **Nível d'água Máximo Operacional**

Relaciona-se ao NA máximo operacional permitido para operação normal do reservatório (sem vertimento), normalmente correspondente à cota da crista do vertedor (extravador) ou à borda superior das comportas do vertedor. O NA máximo operacional define o limite superior do volume útil do reservatório, o qual pode ser usado para uma maior geração de energia hidrelétrica no caso de usinas.

- **Volume Morto**

O volume morto corresponde à parcela do volume total do reservatório inativa ou indisponível para fins de captação de água. Ou seja, corresponde ao volume do reservatório compreendido abaixo do NA mínimo operacional, tornando-o inacessível para a geração de energia hidrelétrica em casos de usinas.

- **Volume Útil**

Representa o NA que compreende o volume disponível para operação do reservatório, ou seja, que poderá ser direcionado ao atendimento das diversas demandas de água, sendo este volume compreendido entre às cotas mínima e máxima operacional do reservatório. Deve ser considerado, portanto, as perdas por evaporação e por infiltração no solo, quando estas forem significativas.

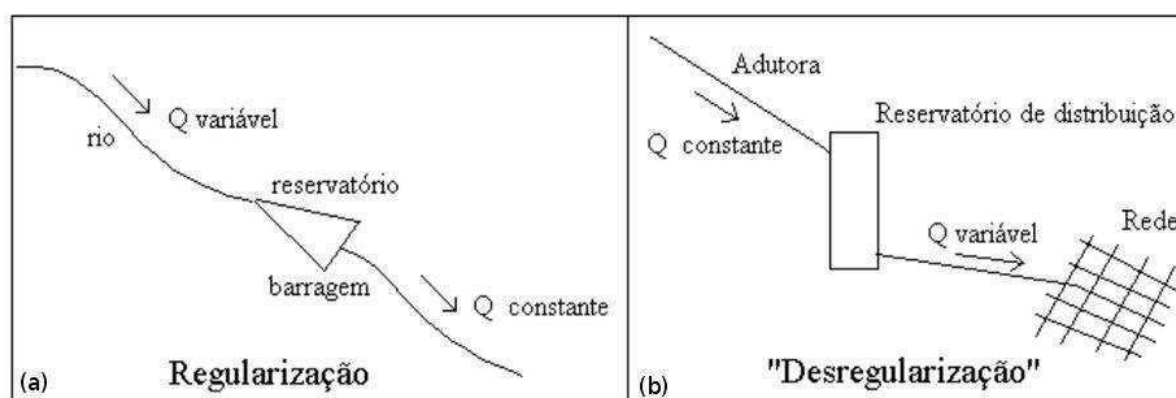
- **Volume de Espera**

O volume de espera, também considerado volume para controle de cheias, corresponde à parcela do volume útil do reservatório destinada ao amortecimento de ondas de cheia, visando ao atendimento às restrições de vazão de jusante do barramento. Estas restrições são, em geral, ditadas pela capacidade de escoamento do canal a jusante e pelo não comprometimento de infraestruturas existentes, como pontes, rodovias ou áreas urbanas em zonas de inundação. De acordo com a época do ano, o volume de espera torna-se variável uma vez que a probabilidade de ocorrência de precipitações intensas, bem como de vazões intensas, varia ao longo do período hidrológico. Este volume define o nível máximo operacional e o nível meta do reservatório.

- **Vazão regularizada e Desregularizada**

A vazão regularizada é a quantidade de água que pode ser fornecida por um reservatório com uma determinada segurança, considerado o período de dados da série histórica de vazões afluentes. Do ponto de vista teórico, a maior vazão que pode ser regularizada é a vazão natural média. Entretanto, a vazão regularizada também é função das condições de operação dos reservatórios, que depende diretamente dos seus usos múltiplos, que pode incluir a geração de energia, abastecimento humano, irrigação e o amortecimento de cheias, entre outros (ANA, 2006).

Conforme proposto por Barbosa Júnior (2014), a operação de um reservatório de acumulação que recebe vazões muito variáveis no tempo, e que se deseja retirar uma vazão constante ou não muito variável, é, de fato, um procedimento de regularização de vazão. Ao caso do reservatório de água de abastecimento que recebe uma vazão constante da adutora e entrega uma vazão variável para a rede de abastecimento, corresponderia a um procedimento de “desregularização”. A título de ilustração, a Figura 2.7 representa esquematicamente as situações apresentadas.



**Figura 2.7** – (a) Reservação para regularização de vazão em um curso d’água natural e (b) reservação de água para o atendimento ao consumo variável em uma rede de distribuição de sistema urbano de abastecimento. Fonte: Adaptado de Barbosa Júnior (2014).

### 2.2.2.2 Balanço Hídrico: Garantia e Riscos

O armazenamento de água em reservatórios é necessário para prover o melhor aproveitamento dos recursos hídricos frente aos diferentes propósitos: suprimento de água para abastecimento público e industrial, irrigação, geração de energia elétrica, navegação, etc.

Barragens e outras estruturas são importantes para reduzir danos causados pelas cheias. Neste contexto também se inserem outras questões como a qualidade da água, erosão e sedimentação, proteção da vida aquática, as quais devem ser consideradas no gerenciamento de rios e reservatórios (KAYSER, 2014).

Devido ao aumento das populações e da crescente demanda por água, faz-se necessário o contínuo monitoramento e gerenciamento das disponibilidades hídricas para viabilizar a sustentabilidade no uso da água. Neste contexto, o balanço hídrico é uma ferramenta importante para subsidiar a operação dos reservatórios de acumulação e evitar problemas de escassez, principalmente em casos de eventos climáticos adversos (ROCHA e CÉZAR, 2015). O conhecimento do tempo de esvaziamento para uma determinada retirada constitui-se em um importante elemento para planejar a operação desses reservatórios. No geral, procura-se, a partir do conhecimento dos estoques de água acumulados no final da estação úmida, conhecer o tempo de esvaziamento da reserva para uma determinada retirada (UETA, CYSNE e CAMPOS, 2007).

O balanço hídrico compara as disponibilidades de água com as demandas de água de uma bacia hidrográfica, para identificar as situações de escassez ou de pré-escassez de água e os conflitos entre os vários usos existentes no presente ou que possam vir a ocorrer num futuro próximo. Numa fase posterior da elaboração do plano, os resultados do balanço hídrico fornecem os elementos necessários à definição de políticas de planejamento e de gestão dos recursos hídricos, notadamente, no que diz respeito à operação das infraestruturas existentes, ao controle da demanda, às regras de concessão de outorgas ou à construção de novas infraestruturas (CBHSF, 2015).

Segundo Guandique e Morais (2015), para a determinação da quantidade de água disponível como vazão numa determinada área de drenagem outras variáveis precisam ser analisadas. Os principais componentes do balanço superficial atmosférico são: precipitação, evapotranspiração, temperatura, entre outros, os quais podem ser medidos *in situ* ou estimados de forma indireta. Habitualmente a precipitação e a temperatura são medidas de forma direta, enquanto que os demais componentes são estimados através de fórmulas semi-empíricas, tais como as evapotranspiração potencial e real.

Tais balanços são normalmente realizados com periodicidade, por exemplo, diária ou mensal (WAHNFRIED, 2005). Desse modo, o estudo desses fatores em uma bacia durante o

ano é fator determinante para verificar a necessidade de irrigação, a capacidade de abastecimento doméstico e industrial e a capacidade de diluição/ concentração de poluentes no corpo de água (GUANDIQUE e MORAIS, 2015).

Dentre os instrumentos previstos na Política Nacional pode-se destacar a outorga de direito de uso da água como importante ferramenta de suporte à gestão e ao gerenciamento de recursos hídricos. Estão sujeitos à outorga todos os usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo d'água. A aplicação do critério de vazão de referência é o procedimento adequado para a proteção dos rios, pois as alocações para derivações são geralmente feitas a partir de uma vazão de base de pequeno risco, gerando maiores garantias para a não ocorrência de falhas de atendimento (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Conforme proposto no Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de Outorga de Direitos de Uso de Recursos Hídricos, elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), nacionalmente duas abordagens têm sido usadas como critério para definição de vazões mínimas de referência: vazões mínimas com determinado tempo de recorrência e vazões de curva de permanência. A segunda abordagem, utilizada no NEB, consiste em ordenar as vazões da maior para a menor e identificar a vazão que é superada em uma grande porcentagem do tempo, a qual é usualmente denominada garantia.

O valor complementar à garantia, ou seja, o tempo em que esta não é satisfeita, é usualmente denominado de risco para a emissão de outorgas preventivas e de direito de uso de recursos hídricos. É preciso conhecer e/ou estimar as disponibilidades hídricas em determinada bacia hidrográfica e, por meio de critérios técnicos, verificar a possibilidade de atender às demandas dos diversos usuários da água (KAYSER, 2014).

A disponibilidade hídrica de reservatórios superficiais é comumente expressa por meio de sua capacidade de regularização de vazão associada a uma garantia de abastecimento ou garantia de oferta hídrica. A garantia de abastecimento, por sua vez, representa o percentual de tempo de simulação no qual certa vazão regularizada é atendida sem falhas (REIS, 2002). O nível de garantia adotado usualmente em estudos hidrológicos para fins hidroagrícolas no Brasil é de 90%, sendo de 95% para fins industriais e energéticos, e de 99 – 100% para fins de abastecimento humano (CEARÁ, 1992). Muitos órgãos reguladores do Nordeste adotam,

como critério de outorga, a disponibilidade de referência associada a uma confiabilidade, normalmente a vazão regularizada com 90% de garantia.

## **2.2.3 Gestão dos Recursos Hídricos**

### **2.2.3.1 Lei das Águas**

A gestão dos Recursos Hídricos passou a ser o operador conceitual através do qual se confrontam os objetivos de desenvolvimento econômico e de organização territorial, bem como aqueles relacionados à conservação da natureza ou à manutenção ou recuperação da qualidade ambiental. Desse modo, a tomada de consciência da necessidade de se praticar a gestão dos recursos naturais, particularmente da água doce, numa perspectiva integrada se consolidou mundialmente nos últimos vinte anos (MACHADO, 2003).

Ao constatar-se que os usos da água envolvem por vezes uma interação conflituosa entre um conjunto significativo de interesses sociais diversos, foi criada a Lei 9.433/97, conhecida como a Lei das Águas, a qual determina que a gestão hídrica deve contemplar os usos múltiplo, não favorecendo determinada atividade ou determinado grupo social, devendo por isso ser integrada, descentralizada e contar com ampla participação social (KELMAN, 2004).

A cobrança pelo uso do recurso hídrico, tanto para captação quanto para diluição de efluentes, é um dos principais instrumentos de gestão criados pela Lei, às quais possuem dois objetivos: (a) sinalizar que a água bruta é um bem econômico, onde cada usuário afeta a capacidade de uso dos demais usuários, induzindo à diminuição de desperdícios; (b) criar um fundo financeiro que dê sustentabilidade às ações de gestão e aos investimentos de interesse coletivo na própria bacia (por exemplo barragens, adutoras e estações de tratamento de esgoto) (KELMAN, 2004).

A Lei estabelece que a unidade de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é a bacia hidrográfica, que pode abranger vários Estados da Federação, no caso dos rios contidos nas grandes bacias hidrográficas, onde a Lei prevê a criação de um sistema nacional de outorga pelo direito de uso de água, tanto para consumo, como para a diluição de efluentes. Nos casos em que os rios não fluem para outros Estados, a Lei considera suficiente a existência do sistema estadual de outorga (PEIXOTO FILHO e BONDAROVSKY, 2000).

Dois instrumentos de gestão são previstos na Lei: os comitês de bacia, que funcionam como um parlamento, com a participação de governos, de usuários e da sociedade civil, não tendo figura jurídica; e as agências de água, executoras das decisões dos comitês, que poderão adquirir a personalidade jurídica que melhor se adaptem às condições locais (PEIXOTO FILHO e BONDAROVSKY, 2000).

Machado (2003) explica que a Lei das Águas consignou os vários sentidos da noção de gestão integrada (conforme descritos nos oito incisos do art. 7º), que estabelece o conteúdo mínimo do plano diretor, cujo objetivo é fundamentar e orientar a implementação da política nacional e estadual de recursos hídricos e seu gerenciamento: o Plano de Recursos Hídricos. O conteúdo mínimo desse Plano é constituído por:

- I - diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos;
- II - análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo;
- III - balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais;
- IV - metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis;
- V - medidas a serem tomadas, programas a serem desenvolvidos e projetos a serem implantados, para o atendimento das metas previstas;
- VI - prioridades para outorga de direitos de uso de recursos hídricos;
- VII - diretrizes e critérios para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos;
- VIII - propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos.

### **2.2.3.2 Caracterização dos Usos Múltiplos dos Recursos Hídricos da Bacia**

Na área dos recursos hídricos, a utilização da água é abordada mediante os usos múltiplos que se faz desse recurso natural. Uma ilustração do contexto desses diferentes usos se encontra demonstrada na Figura 2.8, onde vê-se a natureza indissociável entre os estes.



**Figura 2.8** - Contexto dos Usos múltiplos da água. Fonte: Gonçalves *et al.*(2006).

As águas represadas, seja pelo setor elétrico ou por companhias de abastecimento público, não são exclusivas apenas para o uso destes. Por isso, definem-se prioridades do uso da água às quais sua utilização são condicionadas por outorgas, limites, restrições e cobranças. Ramina (2014) afirma que tais prioridades e condicionantes estão relacionadas principalmente com os riscos de desabastecimento que cada um dos usos múltiplos da água tem condições de suportar. Assim, a agricultura irrigada tem apresentado maior resiliência aos riscos hidrológicos do que o abastecimento público, fazendo com que “em situações de escassez”, o uso prioritário dos recursos hídricos seja o consumo humano e a dessedentação de animais (Lei 9.433/97 Art. 1º).

Mees (2016), considera um grande avanço a igualdade de acesso ao recurso hídrico para todas as categorias de usuários, e também enumera alguns dentre os principais usos múltiplos da água, em função dos progressos sociais e industriais que vem atravessando a humanidade nos dias atuais:

- Abastecimento público:

É o uso mais nobre da água e se manifesta, basicamente, em todas as atividades do ser humano: manutenção da vida (água para beber), higiene pessoal e das habitações, combate a incêndios, entre outras. No caso de consumo coletivo, a regra é fornecer à comunidade um

sistema de abastecimento de água, que pressupõe a existência das seguintes unidades: captação da água bruta, adução, tratamento, reservação e distribuição.

- Consumo industrial:

Nesse caso, a água é utilizada dentro das seguintes condições: a) participando do processo (refrigeração e água para caldeira); b) integrando-se ao produto fabricado; c) entrando em contato com a matéria-prima; d) como elemento de higiene dos operários, limpeza de equipamentos, entre outros. Também, nas termelétricas a água é utilizada em grandes volumes de geração de vapor e controle térmico das instalações.

- Irrigação e dessedentação de animais:

É utilizada para irrigação das mais diversos tipos de cultivo de alimentos. Há que adotar-se medidas preventivas para culturas irrigadas que utilizam água de procedência duvidosa (água contaminada). No caso da dessedentação de animais, a qualidade da água deve ser avaliada antes de distribuída para consumo. Podendo ser necessário algum tipo de tratamento prévio à disponibilização para o consumo animal.

- Recreação:

O uso da água para recreação pode ser classificado de duas formas distintas:

a) Contato direto ou primário:

Impõe condições mais restritivas à qualidade da água; esportes como a natação, por exemplo, oferecem risco à saúde humana, se detectados na água elementos como óleo e graxas, teores elevados de matéria em suspensão e, principalmente, organismos patogênicos e metais pesados.

b) Contato indireto ou secundário:

Está associada a atividades em que o contato com a água é esporádico ou acidental e a possibilidade de ingerir água é pequena, como na pesca e na navegação (Resolução CONAMA 357/ 2005).

- Geração de energia elétrica:

As hidrelétricas utilizam barragens para regularizar a vazão e criar o desnível necessário à produção de energia. Essa barragem cria um lago a montante onde a profundidade aumenta e a velocidade do escoamento diminui.

- Transporte:

No Brasil, a grande densidade de cursos d'água existentes coloca a comunicação via aquática como um meio alternativo econômico de transporte, embora em alguns casos haja a necessidade de implantação de eclusas para o seu desenvolvimento, sendo este um tipo de uso menos exigente quanto aos índices de qualidade do enquadramento de corpos d'água estabelecidos pela resolução 357/05 do CONAMA.

- Preservação de flora e fauna:

Qualquer dos tipos de usos da água observados, anteriormente, deve pressupor que a utilização do ecossistema aquático não altere seus aspectos físicos, químicos e bacteriológicos, de forma a impactar a biota aquática. Os usos múltiplos das águas dos reservatórios de grandes hidrelétricas podem trazer possibilidades efetivas para o desenvolvimento socioeconômico local ou regional, com a geração de empregos e melhoria da qualidade de vida.

Além destes usos, Ramina (2014) também menciona outros usos específicos para a bacia do São Francisco, e mostra esquematicamente classes de usos que podem ser identificados na bacia hidrográfica do rio São Francisco (Figura 000), os quais são:

- Controle de cheias:

Proporcionado por regras específicas de operação, principalmente nos reservatórios das UHEs Três Marias e Sobradinho.

- Projeto de integração (transposição):

O projeto de integração do rio São Francisco, também conhecido como a “transposição do Rio São Francisco”, com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - trechos I, II, III, VI e V e ramal do Agreste Pernambucano. O projeto pertence ao Ministério da Integração Nacional, o qual se encontra em fase de construção e testes, que tem como objetivo abastecer reservatórios importantes fora da bacia do rio São Francisco. O projeto não é apenas um uso, mas sim uma alternativa para garantir usos múltiplos em regiões com menores reservas.

### **2.2.3.3 Transposição do Rio São Francisco**

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional é um empreendimento de infra-estrutura hídrica do Governo Federal, sob responsabilidade do Ministério da Integração Nacional – MI, destinado à busca de solução

para os graves problemas acarretados pela escassez de água na região, o qual tem por objetivo principal assegurar a oferta de água para uma população e uma região que sofrem com a escassez e a irregularidade das chuvas. Constantemente, ações emergenciais são aplicadas para atenuar a problemática, mas não mitigam os pontos centrais do problema, que são a pouca disponibilidade e a má distribuição de água na região.

O MI lançou em julho/2004 o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) o qual apresenta, de forma simplificada, um resumo dos estudos técnicos disponíveis no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) acerca do Projeto em questão. O Relatório informa que a região do Projeto encontra-se na área do Polígono das Secas, sendo que o Nordeste Setentrional (parte do Semi-Árido ao norte do rio São Francisco) é a área que mais sofre os efeitos de secas prolongadas, abrangendo parcialmente os Estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte. O empreendimento viabilizará o fornecimento de água para vários fins (abastecimento humano, irrigação, dessedentação de animais, criação de peixes e de camarão), numa área que, atualmente, possui cerca de 12 milhões de habitantes.

O RIMA (MI, 2004) também informa que dois sistemas independentes, denominados EIXO NORTE e EIXO LESTE, captarão água no rio São Francisco entre as barragens de Sobradinho e Itaparica, no Estado de Pernambuco. Compostos de canais, estações de bombeamento de água, pequenos reservatórios e usinas hidrelétricas para auto-suprimento, esses sistemas atenderão às necessidades de abastecimento de municípios do Semi-Árido, do Agreste Pernambucano e da Região Metropolitana de Fortaleza. As bacias hidrográficas que serão beneficiadas são:

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

De acordo com Castro (2011), a justificativa apresentada pelo MI para a necessidade de realização do projeto resume-se em dois fatos principais:

1- A região Nordeste, que possui apenas 3% da disponibilidade de água e 28% da população brasileira, apresenta internamente uma grande irregularidade na distribuição dos seus recursos hídricos, uma vez que o Rio São Francisco representa 70% de toda a oferta regional;

2- A discrepância na oferta hídrica, onde o semiárido da Bacia do São Francisco apresenta 2.000 a 10.000 m<sup>3</sup>/hab/ano de água disponível em rio permanente, enquanto que o semiárido do Nordeste Setentrional apresenta pouco mais de 400m<sup>3</sup>/hab/ano, disponibilizados através de açudes construídos em rios intermitentes e em aquíferos com limitações quanto à quantidade e/ou qualidade de suas águas.

De acordo com o projeto apresentado pelo MI, a integração do Rio São Francisco às bacias dos rios temporários do semiárido será possível com a retirada contínua de 26,4 m<sup>3</sup>/s de água, o equivalente a 1,4% da vazão garantida pela barragem de Sobradinho (1850 m<sup>3</sup>/s) no trecho do rio onde se dará a captação. Este montante hídrico será destinado ao consumo da população urbana de 390 municípios do Agreste e do Sertão dos quatro estados do Nordeste Setentrional. Nos anos em que o reservatório de Sobradinho estiver vertendo, o volume captado poderá ser ampliado para até 127 m<sup>3</sup>/s, contribuindo para o aumento da garantia da oferta de água para múltiplos usos (IPEA, 2010).

O benefício esperado da transposição será o atendimento das demandas hídricas da população habitante da região, que receberá parte da água do Rio São Francisco. No entanto, a transposição também poderá gerar impactos negativos, como por exemplo: o meio ambiente no ecossistema das bacias doadoras e receptoras, o desvio de parte da vazão do Rio São Francisco pelos dois eixos da transposição pode prejudicar a geração de energia elétrica nas usinas localizadas à jusante da represa de Sobradinho, assim como os conflitos de uso da água entre o projeto de transposição e os usos já existentes em toda a bacia (CASTRO, 2011).

## **2.3 Energia: no Brasil e no NEB**

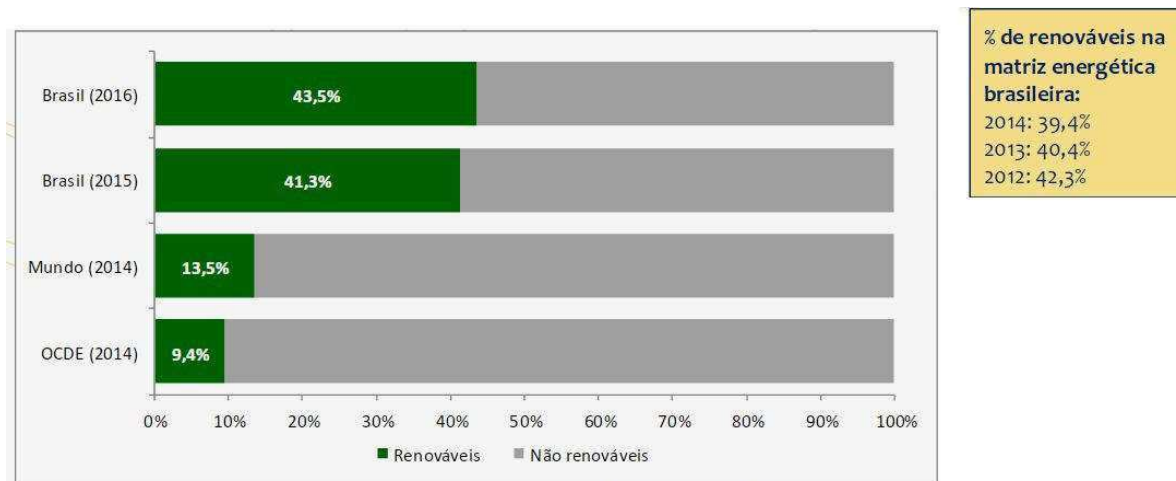
### **2.3.1 Matriz Energética e Elétrica Nacional**

A participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira mantém-se entre as mais elevadas do mundo (EPE, 2017). O Balanço Energético Nacional - BEN de 2017 (com base no ano de 2016) informa que as fontes renováveis correspondem a 43,5% da oferta interna de energia do país, o que representa um aumento de 2,2% se comparado ao ano anterior, conforme demonstrado na Figura 2.9. Isso se deu devido particularmente à queda da oferta interna de petróleo e derivados e expansão da geração hidráulica (EPE, 2017). As principais fontes renováveis são a biomassa da cana-de-açúcar e a hidráulica, com 17,5% e 12,6%, respectivamente, do total da oferta interna de energia (EPE, 2017).

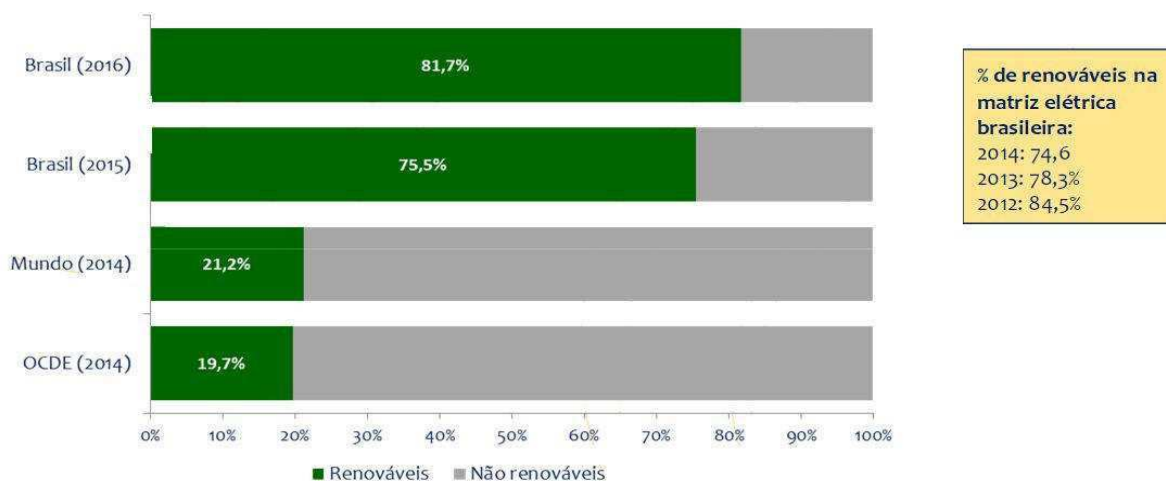
Quanto à participação na Matriz Elétrica Brasileira, o BEN relata que as fontes renováveis representam 81,7% (Figura 2.10), correspondendo a um aumento considerável de 6,2% em comparação ao ano anterior. Esse avanço adveio devido à queda da geração térmica a base de combustíveis fósseis e ao incremento das gerações eólica e hidráulica (EPE, 2017). Nesse quesito, o Brasil representa um valor aproximadamente quatro vezes maior que em relação ao restante do mundo, assim como aos países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico - OCDE, ambos no ano de 2014.

Dentre essa porcentagem de fontes renováveis, a fonte Hidráulica é a de maior porcentagem, com 68,1% (4,1% a mais em comparação ao ano de 2015) conforme consta na Figura 2.11. A segunda maior fonte continua sendo a Biomassa, responsável por 8% da geração elétrica nacional. Contudo, a que apresentou crescimento, assim como a fonte Hidráulica, é a fonte eólica que passou de 3,5% para 5,4% (EPE, 2017).

A perspectiva de expansão do setor elétrico brasileiro para 2024 segundo o Plano Decenal de Expansão da Energia (PDE 2024), é de que neste referido ano mais de 85% da matriz elétrica brasileira seja composta por fontes renováveis de energia (EPE, 2015). No entanto, todas as fontes renováveis mencionadas dependem de condições climáticas para regularem a disponibilidade de oferta. Assim, diante do exposto, o conhecimento de como as mudanças climáticas poderão ocorrer é fundamental para um melhor planejamento energético a longo prazo.



**Figura 2.9** - Participação de renováveis na matriz energética nacional. Fonte: EPE (2017).



**Figura 2.10** - Participação de renováveis na matriz elétrica nacional. Fonte: EPE (2017).



**Figura 2.11** - Participação de renováveis na matriz elétrica nacional. Fonte: EPE (2017).

### 2.3.2 Aproveitamento hidroelétricos do SIN na Bacia do Rio São Francisco

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (ONS, 2017a).

O Sistema Interligado Nacional - SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. O ONS controla a interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, efetua a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias (ONS, 2017a).

Ainda segundo o ONS (2017a), a integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade, enquanto que os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Os aproveitamentos do SIN (Usinas, Reservatórios) estão construídas geograficamente, muitas vezes, no leito de um mesmo rio, isso faz com que a operação da usina à montante interfira diretamente na operação das usinas à jusante, logo é preciso que o planejamento seja feito de maneira integrada (SILVA, 2017).

De acordo com Vergílio (2011), em geral são considerados 3 tipos de vazões que passam através das hidrelétricas: o engolimento, o vertimento e a defluência. O engolimento é a vazão de água que é retirada pelos condutos forçados da usina e que passa pelas turbinas para gerar energia elétrica. O engolimento também é conhecido como vazão turbinada, com um limite superior denominado engolimento máximo, que é a vazão que produz a potência máxima do conjunto de turbinas para uma dada altura de queda líquida (VERGÍLIO, 2011).

A Figura 2.12 representa o diagrama unifilar das usinas controladas pela ONS e pertencentes à bacia do Rio São Francisco, em modelo cascata, juntamente com a potência instalada de cada usina. O número de unidades geradoras em algumas das usinas, bem como o engolimento das turbinas se encontra exposto nos Quadros 2.1 e 2.2, respectivamente.

**Quadro 2.1** - Número total de turbinas.

Nome UHE	Engolimento (m <sup>3</sup> /s)
Três Marias	6
Sobradinho	6
Itaparica	6
PAM	23
Xingó	6

Fonte: ANA/GEF/PNUMA/OEA (2002) *apud* Lerner (2006).

**Quadro 2.2** – Engolimento das turbinas das usinas hidroelétricas da calha principal do rio São Francisco.

Nome UHE	Engolimento (m <sup>3</sup> /s)	Engolimento total (m <sup>3</sup> /s)
Três Marias	6 x 150	900
Sobradinho	6 x 710	4.260
Itaparica	6 x 457,4	2.744

Fonte: ANEEL (2015a e b) *apud* CBHSF (2015).



**Figura 2.12** - Diagrama unifilar das UHEs pertencentes à Bacia do Rio São Francisco.

Fonte: Adaptação de ONS (2017b).

### 2.3.3 Relações da Geração de Energia Hidrelétrica

#### 2.3.3.1 Água

As águas do rio São Francisco atende a diversos usos, dentre os quais se destaca a geração de energia elétrica. As usinas da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) geram 95% de toda a energia elétrica produzida no rio. A CHESF também é responsável pela distribuição dessa energia no Nordeste e, eventualmente, exporta excedentes de sua produção e recebe energia de outras regiões do País, por meio do SIN (MI, 2004).

As técnicas de manejos dos recursos hídricos devem ser escolhidas de modo a garantir o abastecimento e segurança hídrica (LIU et al., 2015). A escassez hídrica depende de fatores como consumo, gestão dos recursos e regime pluviométrico (LIU et al., 2015). Hidrelétricas e termelétricas contribuem com 98% da eletricidade gerada no mundo anualmente (VAN VLIET et al., 2016). Estas tecnologias de geração de energia dependem diretamente da disponibilidade hídrica e intercalam seus usos dependendo desta disponibilidade. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado (EPE, 2017).

As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN (ONS, 2017a). Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro (ONS, 2017a). No entanto, o uso das termelétricas para a geração elétrica é uma opção menos viável economicamente, se comparada à geração hidrelétrica, devido aos custos e impactos ambientais.

O nexo: água - energia, trata estes dois termos como fatores correlacionados e indissociáveis, abrangendo os aspectos referentes à interação entre ambos, tanto da “água para energia” quanto da “energia para a água” (ROTHAUSEN e CONWAY, 2011). O referido nexo requer estratégias e ações coordenadas para o desenvolvimento das hidrelétricas entre regiões geográficas, assim como a troca de análises entre aumento da demanda energética e uso sustentável da água (LIU et al., 2015).

### **2.3.3.2 Controle de Cheias e Usos múltiplos na Bacia**

O objetivo do controle de cheias é regularizar a vazão defluente das usinas hidroelétricas para evitar danos à jusante (PAZ, 2000). O controle de cheias em usinas hidroelétricas adota a alocação de espaços vazios de espera nos reservatórios como medida para evitar inundações à jusante dos reservatórios (CASTRO, 2003).

A operação das usinas, para fins de geração de energia elétrica, objetiva atender à demanda da forma mais eficiente e economicamente viável, o que implica gerar o máximo nas hidroelétricas, dentro de certos critérios, a fim de maximizar a geração de energia é

necessário manter o reservatório o mais cheio possível, para que as usinas trabalhem com produtividade elevada e mantenham alta reserva de energia acumulada. Já o controle de cheias, objetiva a segurança da população e do próprio sistema de geração através da alocação de um certo volume vazio de espera no reservatório para contenção de eventuais picos de vazões afluentes (BANZE, 2014; CASTRO, 2003).

Quando a concepção inicial desses reservatórios é geração de energia torna-se evidente a existência de um conflito, qual seja, a utilização do volume útil do reservatório para a geração de energia ou para o controle de cheias. Tendo em vista que a maioria dos aproveitamentos hidrelétricos não foi explicitamente projetada para o controle de cheias, o planejamento da operação deve procurar minimizar este conflito, através de uma alocação criteriosa e geralmente sazonal de espaços vazios nos reservatórios para o controle de cheias, denominados "volumes de espera" (BANZE, 2014).

A alocação dos volumes de espera nos reservatórios leva a um aumento do risco dos volumes dos mesmos não serem totalmente recuperados ao final da estação chuvosa, o que implica em uma redução das disponibilidades energéticas e um aumento do risco de geração térmica (PAZ, 2000). Este resultado vai contra o planejamento econômico ótimo dos sistemas hidrotérmicos, cujo objetivo é substituir, na medida do possível e de maneira racional, a geração de origem termoeletrica por hidroeletrica (CASTRO, 2003).

Castro (2003) conclui que o problema central do controle de cheias é, então, decidir qual volume de espera deve ser alocado, em cada reservatório, a cada instante de tempo, de forma a afetar o mínimo possível os objetivos de geração e, ao mesmo tempo, garantir uma certa confiabilidade ao sistema. Este é um problema estocástico, pois depende essencialmente das vazões afluentes, que são consideradas variáveis aleatórias (CASTRO, 2003).

Uma das críticas dirigidas ao Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional diz respeito ao fato de a captação de água nesse rio poder prejudicar a geração de energia das usinas hidrelétricas localizadas depois de Sobradinho. No entanto, com a captação média de águas do rio São Francisco para o sistema de integração, a redução na geração de energia será de apenas 2,4% do sistema da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) (IM, 2004). Contudo, o sistema de geração de energia elétrica do País é interligado, e essa pequena perda deverá ser facilmente compensada por usinas de outras bacias (IM, 2004).

### 3 - METODOLOGIA

O estudo foi realizado visando à região da Bacia do Rio São Francisco Estendido, compreendida entre: as usinas de Retiro Baixo, Sobradinho, Três Marias e Itaparica, bem como os eixos Norte e Leste da transposição. Após a definição da área de estudo, houve a obtenção de dados para os três nexus principais: clima, água e energia; cujos processos são apresentados no fluxograma abaixo (conforme demonstrado no esquemático da Figura 3.1):



**Figura 3.1** - Fluxograma contendo as etapas da metodologia adotada no trabalho.

- A primeira etapa se deu através da obtenção dos dados de anomalias referentes aos índices climáticos OMA e ODP, assim como o cálculo das anomalias de vazão natural das usinas em estudo, os quais foram aplicados à análise do Espectro de Ondeleta Global (Wavelet), para identificação da variabilidade decadal e/ou multidecadal.
- A segunda etapa foi a obtenção dos dados de Cota-Área-Volume do reservatório, Precipitação, Evaporação e Vazão Natural incremental para as usinas em questão,

bem como as demandas dos diferentes usos múltiplos dos Recursos Hídricos da Bacia, considerando também as demandas dos Eixos da Transposição. Estes dados foram introduzidos no programa computacional SIGA, desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - Funceme, o qual simula a operação dos reservatórios mediante o balanço hídrico.

- A terceira etapa realizou-se segundo às respostas das simulações realizadas no SIGA, pelo qual foi possível estabelecer as garantias de vazão para o período histórico, inclusive dos Eixos da Transposição, já considerando a ingresso destes como parte da gestão dos recursos da Bacia. Também realizou-se o cálculo da garantia Q90, considerando a série de Vazão Natural, para os diferentes períodos de análise.
- A quarta etapa ocorreu conforme a obtenção dos dados históricos observados das Vazões Vertidas e Turbinadas, bem como do Volume Útil da usina de Sobradinho, usados para o cálculo da Energia Hidrelétrica gerada, bem como do Engolimento das turbinas. Também foram coletados os respectivos dados através das respostas das simulações feitas no SIGA. Desse modo, realizou-se a calibração dos dados, comparando os resultados modelados e observados, visando viabilizar o uso do programa SIGA para os respectivos cálculos das demais usinas, em um período maior de tempo.
- A quinta etapa consistiu na aplicação das análises de tendências e variabilidade climática nas séries de Precipitação, Vazão e Energia Hidrelétrica, por meio de métodos clássicos como: Média Móvel, Regressão Linear e Mann-Kendall Sen.

### **3.1 Caracterização da Área de estudo**

#### **3.1.1 NEB e Bacia do Rio São Francisco**

A Região do NEB soma 1.561.178 km<sup>2</sup> e é composta de nove Estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Desse total, estão no chamado “Polígono das Secas” 1.085.187 km<sup>2</sup>, de onde se exclui o Maranhão e se acrescentam 120.701 km<sup>2</sup> do norte do Estado de Minas Gerais, para onde se estende o clima semiárido, ou seja, com precipitações abaixo de 600 mm/ano (ARAÚJO, 2001).

Com aproximadamente 2.700 km de extensão e descarregando uma média de 2.810 m<sup>3</sup>/s no Oceano Atlântico, o rio São Francisco é o terceiro maior rio do Brasil. Sua bacia hidrográfica drena uma área de 639.219 km<sup>2</sup>, e a população residente chega a 20 milhões de pessoas. A bacia abrange parte dos Estados de Minas Gerais, Bahia, Sergipe, Pernambuco, Alagoas, Goiás e do Distrito Federal (CBHSF, 2014).

Conforme o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - CBHSF, a bacia do São Francisco é dividida em quatro regiões fisiográficas:

- Alto São Francisco: Corresponde à região compreendida entre a nascente do rio principal, na serra da Canastra, Estado de Minas Gerais, e a confluência com o rio Jequitáí, ainda no mesmo Estado. É uma região onde predomina o clima úmido, havendo trechos de clima sub-úmido úmido e sub-úmido seco, sendo, portanto, uma importante região geradora de vazões. Nesta região está localizado o reservatório da usina hidrelétrica de Três Marias e a UHE Queimado.
- Médio São Francisco: É o trecho de maior extensão, com 1.152 km, entre a confluência do rio Jequitáí com o São Francisco e a barragem da usina hidrelétrica de Sobradinho, na divisa entre os Estados de Pernambuco e Bahia. Possui regiões de clima sub-úmido seco e semiárido. A vazão neste trecho sofre a influência da regularização causada pelo reservatório de Três Marias.
- Submédio São Francisco: Com 568 km, corresponde ao trecho entre a barragem de Sobradinho e a cidade de Belo Monte, em Alagoas. Caracteriza-se por ser uma região de clima árido a semiárido, pela vazão regularizada pelos reservatórios das usinas de Sobradinho e Itaparica e pela maior declividade do leito original do rio, o que resultou na construção de uma cascata de usinas hidrelétricas no trecho, que ainda é estudado para construção de novas usinas.
- Baixo São Francisco: Corresponde ao trecho a jusante de Belo Monte, até a foz no oceano Atlântico, na divisa dos Estados de Sergipe e Alagoas. Caracteriza-se por ser um trecho de rio encaixado e de vazões regularizadas pelos reservatórios das usinas de Sobradinho e Itaparica.





## 3.2 Base de Dados

Os dados mensais de anomalias dos índices climáticos OMA e ODP, foram extraídos dos sites da National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA e do Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean - JISAO, e se encontram disponíveis em: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.sm.long.data> (Série suavizada) e <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt>, respectivamente. O período analisado para ambas as séries históricas corresponde aos anos de 1931 a 2016.

Também foram utilizados os dados das séries históricas de vazões mensais naturalizadas (em metros cúbicos por segundo - m<sup>3</sup>/s), disponibilizados pelo ONS por meio do site: [http://apps05.ons.org.br/operacao/vazoes\\_naturais.aspx](http://apps05.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx). O período analisado corresponde aos anos de 1931 a 2016.

Os dados históricos mensais de precipitação e Etp, foram obtidos através do site do Instituto Nacional de Meteorologia - Inmet, para o período de 1961 a 2016, disponibilizados no site: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Os valores das demandas foram cedidos pela Funceme.

As informações gerais de Cota – Área – Volume dos reservatórios são disponibilizadas pelas empresas que gerenciam as usinas (Cemig - Três marias [[http://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/nossos\\_negocios/usinas/Paginas/Tr%C3%AAs\\_Marias\\_dados.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/nossos_negocios/usinas/Paginas/Tr%C3%AAs_Marias_dados.aspx)]; Chesf - Sobradinho (Ex), Itaparica e Retiro Baixo [<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>]).

Os dados utilizados de Vazões Vertidas e Turbinadas, assim como de Volume Útil, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas - ANA, encontram-se para o período de 1993 a 2016, no site: <http://sar.ana.gov.br/MedicaoSin>.

## 3.3 Análise das Séries Temporais

### 3.3.1 Média Móvel

Média Móvel Simples (MMS) ou Aritmética – é formada através do somatório de um conjunto de valores numéricos dividido pela quantidade de elementos somados. O conceito de Média Móvel é entendido porque quando entra um novo valor para o cálculo, o primeiro da

série anterior é retirado da soma e assim sucessivamente. As médias móveis têm a propriedade de tenderem a reduzir o total da variação que se apresentam em um conjunto de dados. No caso das séries temporais, essa prioridade é frequentemente usada para eliminar flutuações indesejadas e o processo é denominado de alisamento das séries temporais (SPIEGEL,1993).

Sejam os dados observados  $x_1, x_2, \dots, x_N$  de uma dada série temporal qualquer, tem-se que a média móvel de ordem  $N$ , é obtida pela sequência das médias aritméticas:

$$\frac{x_1+x_2+\dots+x_N}{N}, \frac{x_2+x_3+\dots+x_{N+1}}{N}, \frac{x_3+x_4+\dots+x_{N+2}}{N} \dots \quad (1)$$

As somas dos numeradores de (1) são denominados totais móveis de ordem  $N$  (SPIEGEL,1993).

### 3.3.2 Regressão Linear, Teste de Mann-Kendall e Declividade de Sen

Dados  $n$  pares de valores de duas variáveis,  $X_i, Y_i$  (com  $i = 1, 2, \dots, n$ ), se admitirmos que  $Y$  é função linear de  $X$ , podemos estabelecer uma regressão linear simples, cujo modelo estatístico é:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + u_i \quad (2)$$

onde:

$\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros,  $u$  é o erro associado,  $X$  é a variável explanatória e  $Y$  é a variável dependente.

O coeficiente angular da reta ( $\beta$ ) é também denominado coeficiente de regressão e o coeficiente linear da reta ( $\alpha$ ) é também conhecido como termo constante da equação de regressão. A análise de regressão também pode ser aplicada às relações não-lineares (HOFFMANN, 2016).

Sejam os dados observados  $x_1, x_2, \dots, x_k, x_j, \dots, x_n$  de uma determinada série temporal referente à um período aleatório. Para observar se as variações da série são independentes e identicamente distribuídas, considera-se o teste das seguintes hipóteses:

i)  $H_0$ : Não há tendência se as observações da série temporal são independentes e identicamente distribuídas;

ii)  $H_1$ : Há tendência se as observações da série possuem tendência monotônica no tempo, ou seja, uma das variáveis aumenta ou diminui sua tendência. Sendo assim, o teste estatístico de Mann-Kendall é dado por:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sinal}(x_j - x_k) \quad (3)$$

Onde:

$x_j$  e  $x_k$  - são valores sequenciais;

$n$  - é o tamanho da série temporal;

Sinal - é a função sinal, estabelecida como:

$$\text{Sinal}(x) = \begin{cases} +1 & \text{se } x > 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ -1 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

Para determinar a declividade  $\beta$  do Teste de Mann-Kendall, utilizou-se a Equação (4) dada por:

$$\beta = \text{Mediana} \left[ \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \right] \quad (4)$$

Onde:

$x_j$  e  $x_k$  - são os valores de  $x$  nos períodos  $j$  e  $k$ , com  $j > k$ .

Segundo Devore *et al.* (2006), existem parâmetros 0, 1 e 2 tais que para qualquer valor fixo da variável independente  $x$ , a variável dependente está relacionada a  $x$  por meio da Equação (5) do modelo:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

Para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Onde:

$y_i$  - a  $i$ -ésima observação da variável dependente;

$x_i$  - a  $i$ -ésima observação da variável independente;

$\beta_0$  - a interceptador;

$\beta_1$  - a inclinação;

$\varepsilon_i$  - o erro aleatório ou residual para a  $i$ -ésima observação, considerada normalmente distribuída com  $E(\varepsilon) = 0$  e  $V(\varepsilon) = \sigma^2$ ;

$n$  - o tamanho da amostra.

Sen (1968) desenvolveu o procedimento não-paramétrico para estimar a inclinação da tendência na amostra de  $N$  pares de dados:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (6)$$

Para  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

Onde:  $x_j$  e  $x_k$  - são os valores de  $x$  nos períodos  $j$  e  $k$ , com  $j > k$ .

A mediana dos  $N$  valores de  $Q_i$  será a declividade de Sen. Se houver apenas uma observação em cada período de tempo, então o número de pares de dados pode ser estimado conforme a Equação (7):

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (7)$$

Se houver várias observações em um ou mais períodos de tempo, então o número de pares de dados pode ser estimado pela Equação (8):

$$N < \frac{n(n-1)}{2} \quad (8)$$

Onde:  $n$  - o tamanho da série.

A mediana de inclinação ou estimador de declive de Sen é calculada como:

$$Q_{mediana} = \begin{cases} Q_{(N+1)/2} & \text{Se } N \text{ for ímpar} \\ \frac{[Q_{(N)/2} + Q_{(N+2)/2}]}{2} & \text{Se } N \text{ for par} \end{cases} \quad (9)$$

O sinal  $Q_{mediana}$  indica a inclinação da tendência. Para determinar se a inclinação mediana é estatisticamente diferente de zero, deve-se obter o intervalo de confiança de  $Q_{mediana}$  a probabilidade específica (GOCIC. M. & TRAJKOVIC, 2013). O valor de  $Q_{mediana}$  é então testado através de um teste bicaudal com grau de confiança de  $100(1 - \alpha) \%$ , sendo a declividade estimada obtida por meio de um teste não-paramétrico (ALVES, 2011).

### 3.3.3 Espectro de Ondeleta Global (Wavelet)

A Wavelet decompõe a série temporal no espaço de tempo e frequência simultaneamente, obtendo informações tanto da amplitude de qualquer sinal “periódico” dentro da série como esta amplitude varia com o tempo (VILANI e SANCHES, 2013).

Segundo Vilani e Sanches (2013), a transformada de Wavelet foi desenvolvida por Morlet na década de 80 (ROCHA, 2008 *apud* VILANI e SANCHES, 2013) que demonstrou as condições de ortogonalidade deste novo operador matemático oferecendo condições seguras para a aplicação da nova técnica. A ideia central da análise em Wavelet consiste em decompor um sinal a diferentes níveis de resolução, processo conhecido como multirresolução (VILANI e SANCHES, 2013).

A representação de multirresolução fornece uma moldura hierárquica simples para interpretação de informação do sinal. As diferentes resoluções e os detalhes de um sinal geralmente caracterizam diferentes estruturas físicas do mesmo. Assim, a Wavelet é uma função capaz de decompor e descrever outras funções no domínio da frequência em diferentes escalas de frequência e de tempo, ou seja, em três dimensões (tempo, escala e intensidade de energia) tornando-se ferramentas poderosas para a análise de sinais e compressão de dados (MAGALHÃES, 2007).

Há dois tipos de funções ondeletas, as Contínuas e as Discretas, cada qual útil para determinadas aplicações (BOLZAN, 2004). Para esse estudo, foi usada as ondeletas contínuas. As ondeletas contínuas são comumente utilizadas para visualizar a relação existente entre as componentes de diferentes frequências em função da escala temporal do sinal estudado, onde estas relações são comumente categorizadas como não-lineares. Fisicamente, em um sistema natural qualquer, é importante tentar buscar relações entre os diversos fenômenos físicos atuantes no sistema natural. Por isso, as ondeletas contínuas propicia um meio matemático adequado para esta busca através do diagrama. As ondeletas contínuas mais comuns são: a Morlet e a Chapéu Mexicano, dentre outras (BOLZAN, 2004).

A análises espectrais utilizando a Transformada de Ondeleta Morlet, pode ser feita conforme metodologia descrita em Weng e Lau (1994) e Torrence e Compo (1998). A análise de Wavelet pode ser aplicada utilizando-se o algoritmo elaborado por C. Torrence disponível em <http://paos.colorado.edu/research/Wavelets>.

### 3.4 O Sistema de Suporte à Decisão (SIGA)

O desenvolvimento do módulo de operação reservatórios está inserido num projeto maior de desenvolvimento de um sistema de informação em recursos hídricos no âmbito da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. Esse sistema, denominado Sistema de Informação para a Alocação de Água - SIGA, reúne, numa única ferramenta computacional, vários módulos, quais sejam: Módulo de Desenho de Rede de Fluxo; Módulo de Simulação Hidrológica; Módulo de Calibração de Modelos Hidrológicos; Módulo de Análise e Apresentação de Resultados; Módulo de Qualidade da Água (Rios e Reservatórios); Módulo de Simulação de Poluição Difusa; e o Módulo de Operação de Reservatórios (Alves *et al.*, 2006).

O SIGA surgiu de um esforço para aproximar soluções técnicas de decisões, para subsidiar a gestão e o planejamento com informações racionais e tempestivas. O SIGA é uma plataforma computacional que reúne modelos e ferramentas para apoio ao planejamento e à tomada de decisão na área de recursos hídricos. Composto por módulos integrados e concebido com base na programação orientada objeto. O SIGA apresenta versatilidade em suas aplicações a partir de interfaces de fácil aprendizado e uso e adaptações para perfis diferenciados de usuários (FUNCEME, 2015).

Iniciado em agosto de 2005, o projeto de desenvolvimento do SIGA é coordenado por pesquisadores da Funceme e conta com a colaboração do Departamento de Computação Gráfica da Universidade Federal do Ceará (UFC). Ao longo de seu desenvolvimento, o SIGA tem evoluído de acordo com solicitações, observações e sugestões de usuários a fim de se ajustar o melhor possível a aplicações e necessidades específicas (FUNCEME, 2015).

A versão mais recente do programa, a qual foi utilizada para este estudo, corresponde à versão [SIGA Setup - v1.5.0.8 RC](http://www.funceme.br/siga/dow/download) e encontra-se disponível gratuitamente na plataforma digital da Funceme (<http://www.funceme.br/siga/dow/download>). O manual completo, o qual consta todas as especificações do programa, bem como instruções de uso, interface gráfica, explanação de suas ferramentas e métodos de uso, assim como alguns artigos relacionados ao desenvolvimento do programa encontram-se disponível através do site: <http://www.funceme.br/siga/doc/documento/show/151>.

### 3.4.1 Operação de reservatório utilizando o programa SIGA

O módulo de operação de sistemas hídricos gera informações essenciais ao processo de tomada de decisão, incluindo alocação, na área de gestão e gerenciamento de recursos hídricos. Esse módulo faz o balanço de massa em cada elemento da rede considerando suas características físicas, a partir de diferentes cenários elaborados pelo usuário (FUNCEME, 2015). Um modelo de simulação da operação de reservatórios utiliza a solução da equação do balanço hídrico (BARROS *et al.*, 2008). A equação do balanço hídrico de um reservatório pode ser representada por:

$$V_{t+1}(i) = V_t(i) + Va_t(i) - Vd(i) - Vv(i) + (Pv_i - Ev_t) \frac{A_t + A_{t+1}}{2} + \sum_{j=N_i} Vv_t(j) \quad (9)$$

em que:  $V_i$  é o volume armazenado no reservatório,  $V_a$  o volume afluente ao reservatório,  $V_d$  o volume regularizado,  $V_v$  o volume vertido pelo reservatório,  $A$  a área superficial do espelho d'água do reservatório,  $E_v$  a lâmina d'água evaporada a partir da superfície,  $P_v$  a lâmina d'água precipitada a partir da superfície,  $t$  o índice que representa a discretização temporal,  $i$  o índice que representa os reservatórios do sistema e  $N_i$  o conjunto de reservatórios imediatamente a montante do reservatório  $i$ .

As seguintes restrições devem ser satisfeitas durante a simulação da operação dos reservatórios:

$$V_{min}(i) \leq V_{t+1}(i) \leq V_{max}(i)$$

$$V_a V_v V_d \geq 0$$

Diferentes métodos de solução podem ser aplicados para resolver o problema descrito acima. No SIGA, encontram-se disponíveis dois modelos: Simulador de Regras e Simulador de Prioridades. Esses modelos podem ser aplicados por meio de cinco diferentes análises: Simulador (Regras), Simulador – Janelas (Regras), Otimizador (Regras), Simulação (Prioridades) e Simulador – Janelas (Prioridades). O método utilizado neste estudo foi o de Simulador (Prioridades), onde se opera a rede tendo como referência valores de prioridades

para as águas dos reservatório e demandas do sistema pré-estabelecidas pelo usuário. Para o referido método, a cada intervalo de tempo simulado é feita a retirada de água dos reservatórios seguindo uma minimização da função objetivo (FUNCEME, 2015).

### 3.4.2 Definição de Prioridades e Montagem da Rede São Francisco Estendido

No método Simulador (Prioridades), todos os elementos devem ter prioridades para serem considerados no problema de alocação, quais sejam: Prioridade Única e Zona de Prioridades. Na regra de Prioridade Única, o usuário define uma prioridade para cada elemento da rede que deva ser considerado no problema de alocação durante todo o período de simulação. Tanto demandas como reservatórios podem assumir uma única prioridade ao longo de todo o período de simulação. Já a regra de Zona de Prioridades é válida somente para reservatórios, pois permite o zoneamento do reservatório em diferentes prioridades, para diferentes níveis de acumulação de água no reservatório, a fim de atender diferentes tipos de demandas (FUNCEME, 2015).

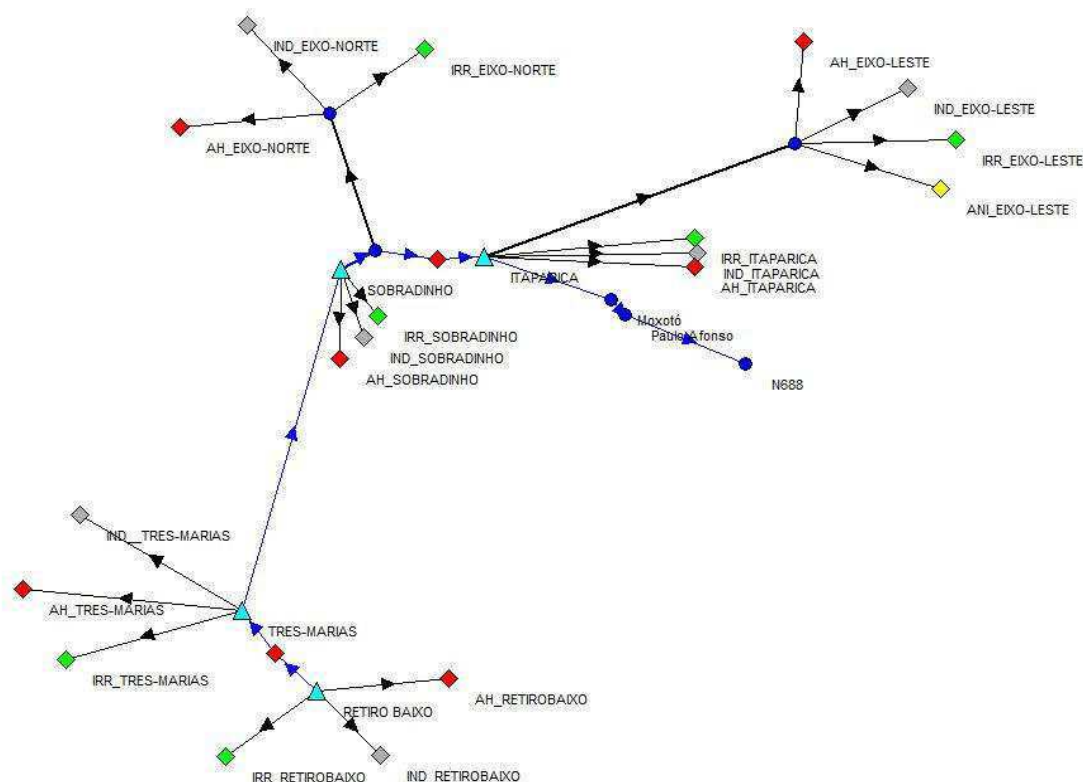
Para o presente estudo, utilizou-se a Prioridade Única para às demandas individuais dos Eixos da Transposição, como: Humana, Animal, irrigação e Indústria; Para os reservatório, foram utilizadas as Zonas de Prioridades, às quais foram geradas automaticamente pelo programa. Em ambos os casos, a fim de atender às demandas em ordem prioritária pré-estabelecida, foram definidas suas prioridades que vão de 1 (prioridade máxima) até valores maiores porém referentes a demandas menos prioritárias, conforme especificado no Quadro 1. Isso implica dizer que os reservatórios irão atender essas demandas conforme as prioridades adotadas.

**Quadro 3.1** - Classificação de prioridades para simulação.

DEMANDA	PRIORIDADE
Abastecimento Humano (AH)	1
Animal (ANI)	2
Irrigação (IRR)	3
Indústria (IND)	4

O Módulo para Desenho de Rede de Fluxo é responsável pela representação do sistema hídrico, objeto da análise do SIGA. Essa representação é feita utilizando-se dois tipos básicos de elementos de rede: nós e trechos. Os Nós são definidos como elementos com ou sem capacidade de acumulação de água, que representam início de um trecho de rede, junção de dois trechos, pontos de captação (demanda) ou lançamentos (águas de retorno), áreas de drenagem ou sub-bacias, reservatórios, lagos naturais, aquíferos, etc. Os trechos representam linhas de fluxo do sistema hídrico, definidos no sentido do escoamento de montante a jusante, e sempre possuem capacidade de acumulação de água (ALVES *et al.*, 2007).

Esses elementos, juntamente com os reservatórios e as demandas atribuídas, constituem a rede de fluxo hídrica, representativa do gerenciamento da Bacia. Vale ressaltar que as linhas de fluxo de cor azul, representam o fluxo natural do rio, enquanto que as de cor preta representam canais artificiais. Os reservatórios possuem cor azul clara. Quanto às demandas, adotou-se diferentes cores para diferenciação: vermelha (AH); amarelo (ANI); verde (IRR); cinza (IND). A montagem da Rede contendo as usinas de Retiro Baixo, Três Marias, Sobradinho e Itaparica, bem como os Eixos Norte e Leste da transposição do Rio São Francisco, e suas respectivas demandas, encontram-se esquematizadas na Figura 3.4.



**Figura 3.4** - Esquemático da Rede simplificada do SFE, gerada no programa SIGA.

### 3.4.3 Simulações

Inicialmente, foi requerido para que fossem realizadas as simulações, a entrada de dados para os elementos da rede (reservatórios e demandas). Para os reservatórios, o usuário necessita inserir as seguintes informações:

- volumes máximo (capacidade do reservatório), mínimo operacional (volume morto) e inicial (situação para a data inicial da simulação), todos em  $\text{hm}^3$ ;
- dados referentes ao vertedouro (comprimento da soleira (m), coeficiente de descarga);
- dados para definição da curva Cota-Área-Volume do reservatório;
- séries de Precipitação (em mm), Evaporação (em mm) e Vazão Natural Incremental ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Para a realização das simulações, os dados necessários referidos acima foram devidamente preenchidos, com exceção dos dados relacionados ao vertedouro, pois para o intervalo de simulação mensal, como foi o caso deste estudo, o modelo de operação de reservatórios considera que todo o volume que excede a capacidade máxima se torna vertimento dentro do referido mês (FUNCEME, 2015).

Quanto aos valores de demandas, por se tratar de um modelo de rede simplificada, fez-se necessário unir todas as demandas dos diferentes reservatórios pertencentes a cada um dos Eixos da Transposição, da seguinte forma: as demandas de um mesmo tipo (todas de classificação AH (Quadro 3.1), por exemplo) foram somadas e transformadas em uma única demanda, representativa daquele Eixo; assim, obtiveram-se valores gerais para todas as demandas existentes, como pode ser visto nos Quadros A1 e A2 do ANEXO A. Esses valores obtidos, assim como os valores de demandas referentes aos reservatórios das usinas, foram utilizados como padrão de valores para todos os meses dentre os anos de análises.

Os períodos selecionados para as simulações foram baseados nos índices climáticos da OMA, conforme verificado na Figura 2. A escolha se deu ao fato deste índice climático apresentar sinais de anomalias que perduram por maior tempo, se comparado às anomalias da ODP por exemplo, o que demonstra um período oscilatório favorável para a análise. Desse modo, foram escolhidos dois períodos característicos deste fenômeno, que condizem com os dados disponíveis de Precipitação, Evaporação e Vazão, os quais constam no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2** - Períodos, segundo as fases da OMA, para as simulações no SIGA.

Período	OMA	Fase	Anos	
			Início	Término
1	Negativa (-)	Fria	1965	1995
2	Positiva (+)	Quente	1996	2016

### 3.4.4 Curva de Permanência (Q90) e Garantias

A curva de permanência ou de duração de vazões relaciona a vazão (geralmente no eixo das ordenadas) e a porcentagem do tempo em que ela é superada ou igualada sobre todo o período histórico utilizado para sua construção (geralmente no eixo das abscissas). Num sentido estatístico, a curva de permanência representa uma curva de distribuição de frequências acumuladas de ocorrência das vazões em um rio (CRUZ e TUCCI, 2008).

A permanência de cada vazão observada é o percentual de vezes em que ela foi igualada ou superada (BENETTI, LANNA e COBALCHINI, 2003). Segundo Fennessey e Voguel (1990), a curva de permanência (CP) é calculada através dos dados históricos de vazões, os quais são ordenados de forma decrescente e associados a cada valor uma frequência de excedência, utilizando uma posição de plotagem empírica, tal como:

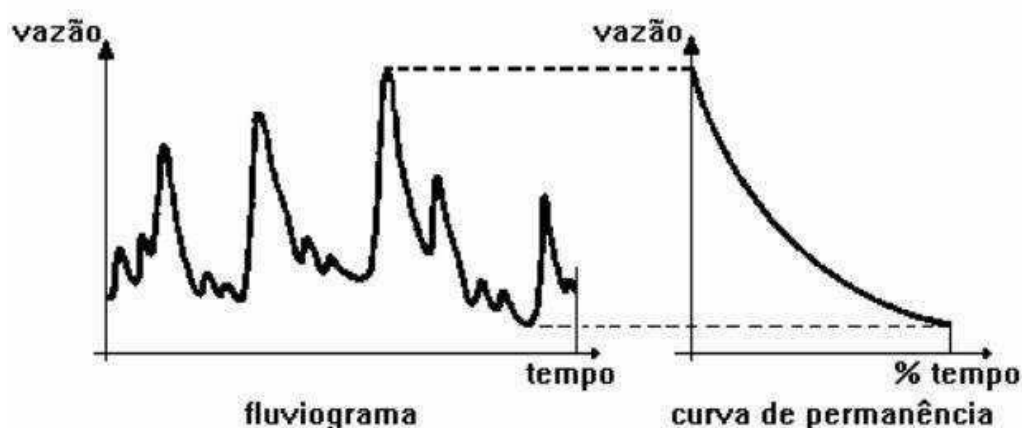
$$CP(\%) = \frac{m}{n} \cdot 100 \quad (10)$$

onde:

m - a ordem do valor ordenado;

n - o número de valores da série.

Conforme Cruz e Tucci (2008), a Figura 3.5 apresenta de forma esquemática a relação entre fluviograma e curva de permanência. Considerando cada vazão, tem-se que a área sob a reta horizontal, correspondente a esta vazão, representa volumes iguais em cada gráfico. A curva de permanência sintetiza a variabilidade das vazões, caracterizando a base de comportamento para a sustentabilidade de sistemas aquáticos.



**Figura 3.5** - Representação esquemática do fluviograma e respectiva curva de permanência.

Fonte: Quimpo e McNally (1983) apud Cruz e Tocci (2008).

Após a definição dos períodos de análise, fez-se então uso dos dados históricos de vazão naturalizados para a verificação da Curva de Permanência, a fim de encontrar a Q90, ou seja, a vazão que cada uma das usinas estudadas podem fornecer uma garantia de abastecimento em 90% do tempo aos usuários finais, objetivando atender às suas demandas. Desse modo, foram obtidas a Q90 para a série histórica completa (1931-2016) e para ambos os períodos propostos, conforme explicitado no Quadro 2. Do mesmo modo, com as simulações realizadas no SIGA, foi possível verificar as falhas no atendimento das demandas e com isso, mensurar as garantias para cada uma delas.

As garantias (G) se deram mediante à contagem das falhas no abastecimento das demandas, em comparação ao total de observações, da seguinte forma:

$$G = 1 - \frac{n^{\circ} \text{ falhas}}{n^{\circ} \text{ observações}} \quad (11)$$

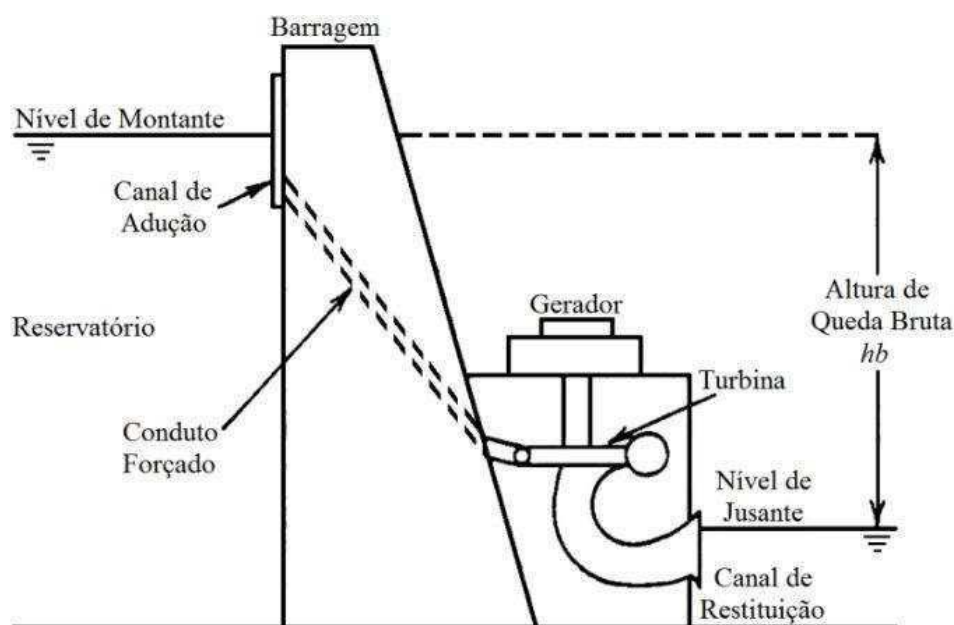
### 3.5 Geração em Usinas Hidrelétricas de Energia (UHEs)

Nesta sessão, pretende-se explicar a representação das usinas hidrelétricas para se solucionar o problema de planejamento de curto prazo onde, por exemplo no Brasil, as UHEs são modeladas individualmente deixando implícita a modelagem das unidades geradoras. Na sequência, são explicadas as equações associadas ao comportamento de uma unidade

hidrelétrica para apresentar a expressão que representa a UHE de maneira global, conforme proposto por Madera (2013).

### 3.5.1 Potência e Energia

A geração de energia elétrica em um aproveitamento hidrelétrico é dada através das unidades hidrelétricas. Em determinado instante de tempo, a quantidade de água armazenada no reservatório representa a fonte de energia potencial gravitacional acumulada, que é transformada em energia mecânica quando a água passa pela turbina, provocando assim o torque necessário no eixo do gerador capaz de converter essa energia mecânica em energia elétrica. Na Figura 3.6 encontram-se os componentes básicos de uma UHE tradicional.



**Figura 3.6** - Componentes básicos de uma UHE. Fonte: Madera (2013).

Desse modo, a energia potencial contida no volume líquido presente no reservatório pode ser dado por:

$$E_p = m \cdot g \cdot hb \quad (12)$$

em que,

$E_p$  - é a energia potencial da massa da água acumulada no reservatório (J);

$m$  - é a massa da água (kg);

$g$  - é a constante de aceleração gravitacional, cujo valor médio é de  $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ ;

$hb$  - é a altura de queda bruta (m).

No entanto, tem-se que a massa da água, em kg, é definida como o produto entre a densidade da mesma multiplicada pelo volume associado. Desse modo, a Equação (12) pode ser reescrita como:

$$E_p = G \cdot V \cdot hb \quad (13)$$

em que,

$G$  - é uma constante com valor  $9,81 \cdot 10^{-3} \text{ (kg/m}^2\text{s}^2\text{)}$  que representa o produto entre a densidade da água ( $1000 \text{ Kg/m}^3$ ), a gravidade ( $g$ ) e uma última constante com valor  $10^{-6}$  que converte a energia de (J) em (MJ).

Em geral, a taxa de variação da altura de queda bruta é desprezível em relação à taxa de variação do volume. E sabendo-se que a vazão representa o volume por um período de tempo, tem-se que a potência será:

$$pdu = G \cdot Q \cdot hb \quad (14)$$

em que,

$pdu$  - é a potência hidráulica disponível (ou potência de entrada da usina) associada à energia armazenada (MW).

$Q$  - é a vazão turbinada na UHE ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Independentemente do número de unidades hidrelétricas que esteja operando em certo instante de tempo, a vazão turbinada na UHE,  $Q$ , é sempre distribuída em partes iguais entre o número de unidades em operação. Desse modo:

$$q = \frac{Q}{n} \quad (15)$$

em que,

$n$  - é o número de unidades hidrelétricas em operação na UHE.

$q$  - vazão turbinada em apenas uma unidade geradora ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

O rendimento da unidade hidrelétrica (conjunto turbina-gerador -  $\eta$ ) também é uma variável importante para se avaliar a eficiência na UHE, e pode ser definido como:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m \quad (16)$$

em que,

$\eta_t$  - é o rendimento hidráulico da turbina;

$\eta_g$  - é o rendimento do gerador;

$\eta_m$  - o rendimento mecânico no acoplamento entre a turbina e o gerador.

Dado que  $\eta_g$  e  $\eta_m$  são iguais a um, o rendimento da unidade geradora corresponde ao rendimento hidráulico da turbina, logo:  $\eta = \eta_t$ . Deste modo, tem-se que a potência produzida em uma unidade hidrelétrica é dada por:

$$ph = G \cdot \eta_t \cdot hl \cdot q \quad (17)$$

em que,

hl - altura de queda líquida (m)

Desse modo, em princípio se estabelece que a potência gerada na usina é obtida através do produto entre a Equação (17) e n unidades geradoras. No caso de uma UHE possuir uma única unidade hidrelétrica, a produção de energia na usina é equivalente à produção na unidade. Contudo, se houver mais de uma unidade geradora em uma UHE, tem-se que a potência de saída na UHE corresponde a:

$$PH_{saída}(n) = G \cdot \eta_t \cdot hl \cdot Q \quad (18)$$

em que,  $PH_{saída}$  - é um vetor que possui n valores de potência gerada pela UHE (MW).

Como potência possui como unidade internacional o Watts, e é dada pela razão entre a energia em forma de trabalho (Joule) e o tempo (s), logo a energia se dá pelo produto entre potência e tempo. Assim, é possível calcular a quantidade de energia hidrelétrica gerada em cada UHE no decorrer de todo ano, e desse modo mensurar a produção diária, mensal ou anual da mesma.

### 3.5.2 Altura de Queda Bruta e Líquida

Usualmente, a altura de queda líquida têm sido representada por meio de polinômios de quarta ordem dependentes do volume armazenado (no caso do nível de montante) e da vazão defluente (no caso do nível de jusante).

O valor da cota de montante (como ilustrado na Figura UU) é dado pelo seguinte polinômio:

$$fcm = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot V^3 + a_4 \cdot V^4 \quad (19)$$

em que,

fcm - é o valor da cota de montante (m);

$a_0, \dots, a_4$  - são os coeficientes do polinômio que representa a cota de montante para o reservatório;

V - volume armazenado ( $\text{hm}^3$ ).

Por outro lado, o nível de jusante da usina é a cota do rio após a turbinagem (como ilustrado na Figura UU). O mesmo pode ser dado através do polinômio que relaciona a vazão defluente (vazão turbinada - Q mais a vazão vertida - S na UHE) com os respectivos coeficientes:

$$fcj = b_0 + b_1(Q + S) + b_2(Q + S)^2 + b_3(Q + S)^3 + b_4(Q + S)^4 \quad (20)$$

em que,

fcj - é o valor da cota de jusante (m);

S - é a vazão vertida na UHE ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$b_0, \dots, b_4$  - são os coeficientes do polinômio que representa a cota de jusante para o reservatório.

Desse modo, com base nas Equações (19) e (20), a altura de queda bruta (m) passa a ser:

$$hb = fcm - fcj \quad (21)$$

Contudo, nem toda essa altura está disponível na entrada da turbina, pois uma parte dela se perde quando a água passa pelo conduto forçado e demais elementos de adução. Assim, tem-se que a altura de queda líquida na unidade hidrelétrica é definida como a diferença entre  $hb$  e a perda hidráulica, como pode ser expressa por:

$$hl = hb - pl \quad (22)$$

em que,

$pl$  - perda líquida hidráulica (m).

### 3.5.3 Rendimento e Engolimento das Turbinas

As perdas hidráulicas, por sua vez, foram modeladas como uma função quadrática da vazão turbinada e uma determinada constante, do seguinte modo:

$$pl = k_p \cdot q^2 \quad (23)$$

em que,

$k_p$  - é uma constante que depende das características físicas do conduto forçado que conecta o reservatório com uma certa unidade hidrelétrica ( $s^2/m^5$ );

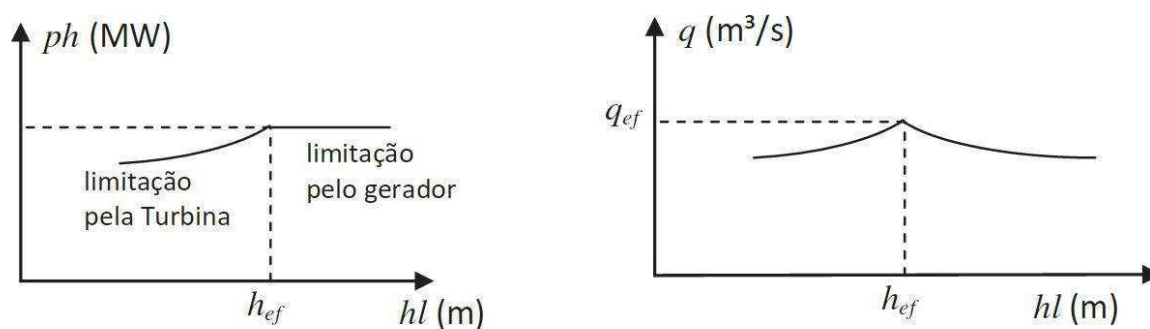
Quanto ao rendimento da turbina, para construir uma modelagem mais próxima à realidade do comportamento físico do rendimento hidráulico de uma turbina, duas variáveis devem ser levadas em consideração: a altura de queda líquida que a mesma está submetida e a sua vazão turbinada (FINARDI, 2003 *apud* MADERA, 2013). Deste modo, esse conjunto de dados é representado através da seguinte função quadrática côncava:

$$\eta_t = r_0 + r_1 \cdot q + r_2 \cdot hl + r_3 \cdot q \cdot hl + r_4 \cdot q^2 + r_5 \cdot hl^2 \quad (24)$$

em que,

$r_0, \dots, r_5$  - são os coeficientes do polinômio que representa o rendimento de uma dada unidade hidrelétrica.

Segundo Vergílio (2011), os conceitos de potência máxima e engolimento máximo estão interligados entre si. Para cada altura de queda, uma unidade geradora é capaz de produzir potência máxima mediante o engolimento máximo. A Figura 3.7 mostra um esquema de curvas de potência máxima e do engolimento máximo de uma turbina, em função da altura de queda líquida disponível.



**Figura 3.7** - Potência máxima e engolimento máximo, ambos em função da queda líquida.

Fonte: Vergílio (2011).

Percebe-se em ambos os casos, tanto para a potência máxima quanto para a turbinagem máxima, que existem um mesmo comportamento nas curvas anteriores à altura efetiva ( $h_{ef}$ ) e dois comportamentos distintos nas curvas após a mesma altura. Para a potência, passa a ter um valor constante na geração limitada pelo gerador e para a vazão turbinada, o engolimento máximo apresenta uma queda, enquanto a potência máxima se mantém.

Isso significa que quando a usina opera com uma queda líquida acima de seu valor efetivo, desperdiça-se água, pois a usina pode gerar a mesma energia com menos água. Vale ressaltar que o valor máximo, tanto para a potência quanto para o engolimento, se dá quando a altura de queda líquida se iguala à queda efetiva.

De acordo com Vergílio (2011), o engolimento máximo pode ser calculado de duas formas: através de um polinômio de engolimento máximo versus altura líquida ( $q_{max}=q(hl)$ ), ou através de uma representação simplificada. Para este trabalho, utilizou-se para o cálculo o polinômio, conforme a Equação X, baseado na metodologia proposta por Lerner (2006):

$$EN = a_0 \cdot hl^0 + a_1 \cdot hl^1 + a_2 \cdot hl^2 + a_3 \cdot hl^3 + a_4 \cdot hl^4 \quad (25)$$

em que:  $a_0, \dots, a_4$  - são coeficientes do polinômio que representa o engolimento das turbinas em função da altura líquida.

### 3.5.4 Calibração e Testes utilizando o programa SIGA

Inicialmente, para o cálculo da Potência de saída, conforme Equação (18), foi escolhida a UHE Sobradinho por esta usina possuir todos os dados observados necessários para a obtenção desta grandeza, bem como devido a relevância desta usina para o NEB. Para tanto, foram utilizados os valores dos respectivos coeficientes dos polinômios para cotas à montante e jusante, bem para a eficiência da turbina, conforme Quadros B1, B2 e B3 do ANEXO B, respectivamente. O valor de  $k_p$  requerido para o cálculo da Equação (23) encontra-se no Quadro B4, também do ANEXO B. Após o cálculo da Potência de saída da usina Sobradinho, fez-se o cálculo da Energia anual gerada (em GWh). A análise foi feita para o período de 1993-2016, devido a disponibilidade dos dados fornecidos pela ANA.

Tendo em vista que se fez necessário uma análise para um período maior de dados, foi feito então a simulação do gerenciamento do reservatório no programa SIGA, o qual retornou como variáveis de saída os dados de interesse, como vazão defluente e volume armazenado no reservatório. Desse modo, fez-se então o cálculo da Energia gerada em Sobradinho, do mesmo modo e para o mesmo período da análise feita com os dados observados.

Assim, foi possível realizar a calibração ao comparar ambos os resultados, a fim de se observar a confiabilidade do programa em simular e gerar tais resultados. Para uma análise mais quantitativa, realizou-se o cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) objetivando-se mensurar a correlação existente entre os dados modelados e observados.

Após esta análise, foram feitas as simulações no SIGA para os períodos propostos, conforme especificado no Quadro 2. Foram então obtidos os dados necessários para os cálculos e assim mensurar a Energia Hidrelétrica histórica gerada em Sobradinho, bem como em Itaparica e Três Marias, a fim de se obter respostas quanto às possíveis interferências da variabilidade climática multidecadal. Esta análise não pôde ser feita para a usina de Retiro Baixo devido a limitação dos dados referentes aos coeficientes necessários para os cálculos.

Em seguida, realizou-se o cálculo do engolimento total das turbinas para cada UHE estudada (Três Marias, Sobradinho e Itaparica) através da Equação (25), mediante o uso dos coeficientes especificados no Quadro B5 do ANEXO B, e comparados os resultados com os valores contidos no Quadro 2.2.

## **4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Clima**

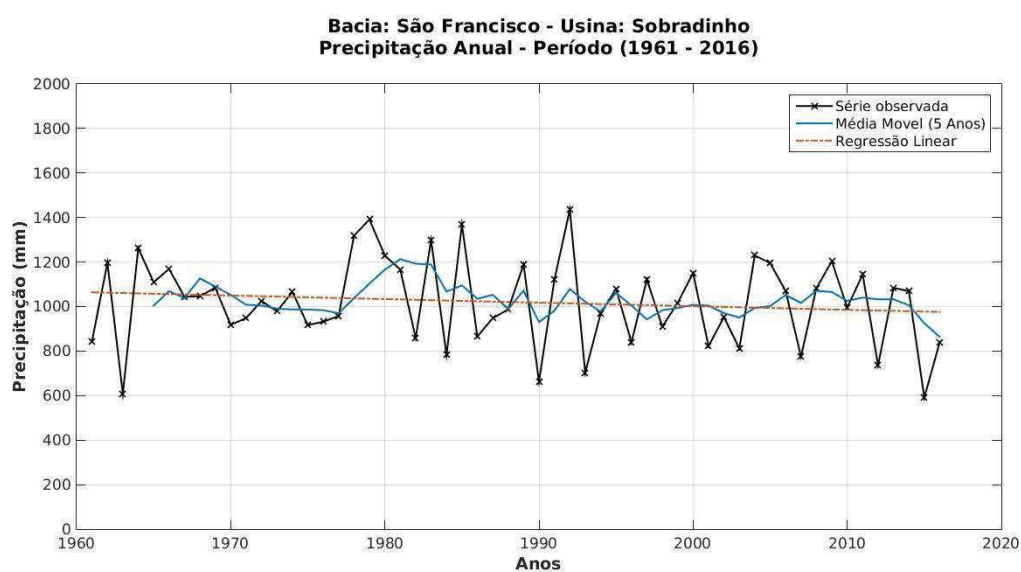
#### **4.1.1 Análise das Séries Temporais de Precipitação e Vazão**

Plotando-se os dados observados de precipitação para a usina de Sobradinho, conforme Figura 4.1, é possível observar, mediante a média móvel, que existem oscilações multidecadais não tão acentuadas, sendo o período próximo ao ano de 1980 o de anos mais chuvosos, seguido do período entre 2007 e 2010. Analisando-se então a plotagem da série de vazão natural (Figura 4.2), observa-se de acordo com a média móvel que as oscilações são mais acentuadas, podendo serem percebidas oscilações decadais e multidecadais, sendo os maiores picos de vazão nos anos de 1950 e 1985, o que caracteriza um período entre os picos de 35 anos.

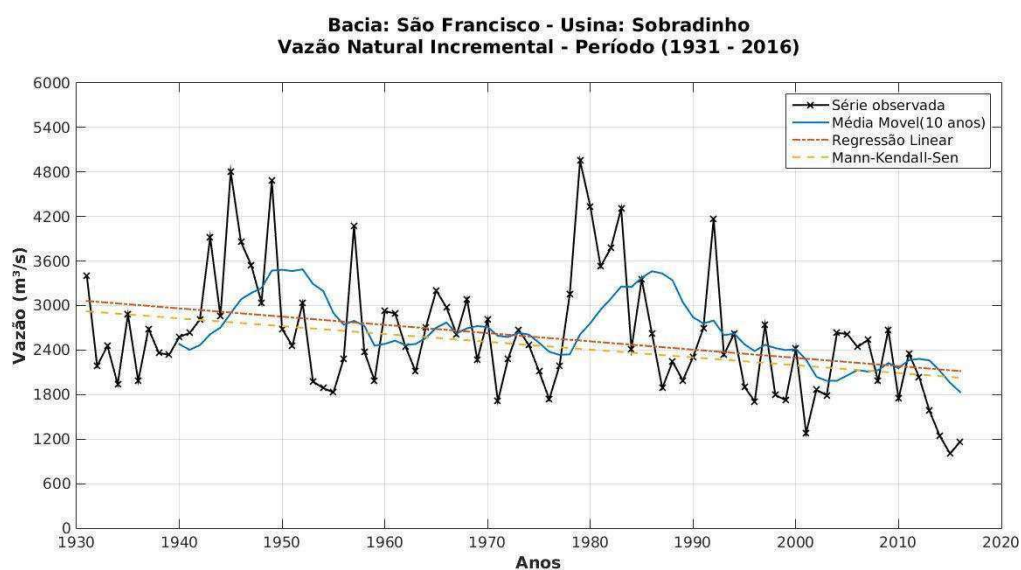
Ao comparar-se esses resultados aos períodos de fases positiva e negativa dos índices climáticos OMA e ODP (conforme Figuras 2.2 e 2.4), é possível sugerir que há interferências destes fenômenos no ciclo hidrológico do NEB. Inicialmente, considerando a vazão que possui observações a partir de 1931, e sabendo-se que no período compreendido entre os anos de 1935 a 1943 a OMA e PDO encontravam-se ambas em fase positiva (quente). Desse modo, houve indícios de que às vazões estavam reduzidas. Em seguida, no período de 1944 a 1963, a OMA estava em sua fase positiva (quente) e a ODP entrou em sua fase negativa (fria), o que pode ter ocasionado a elevação das vazões, com pico próximo ao ano de 1950.

De 1964 a 1976, ambos os índices climáticos entraram em suas fases negativas (frias) o que ocasionou redução das precipitações e incremento discreto das vazões nesse período. No entanto, dentre os anos de 1977 a 1995, com OMA (+) e ODP (-), houve precipitação acima da média histórica e picos elevados de vazão, principalmente nos anos de 1979 e 1992 para ambos os casos. De 1996 até os dias atuais, acredita-se que ambos os índices climáticos entraram em suas fases positivas (quentes), ocasionando assim precipitações e vazões abaixo da média histórica, como tem sido visto principalmente após o ano de 2010. No geral, os testes de tendência demonstram um decaimento quanto à precipitação e vazão durante o período histórico, principalmente devido a fase mais seca vivenciada nas últimas duas décadas.

Ao que parece, essa análise qualitativa traz então um indicativo de que nos anos em que a OMA e ODP encontram-se em fases opostas, ou seja, com ao menos um dos fenômenos em fase negativa/fria, houve incremento nas precipitações e vazões. Porém em coincidência de fases, houve a manutenção (fases negativas/frias) ou redução (fases positivas/quentes) dos níveis de precipitação e vazão em Sobradinho. A análise das demais usinas, conforme APÊNDICE A, é semelhante à usina de Sobradinho, demonstrando a interferência dos eventos climáticos nas demais regiões do NEB onde essas usinas se encontram inseridas.



**Figura 4.1** - Série histórica de precipitação em Sobradinho.



**Figura 4.2** - Série histórica de vazão naturalizada em Sobradinho.

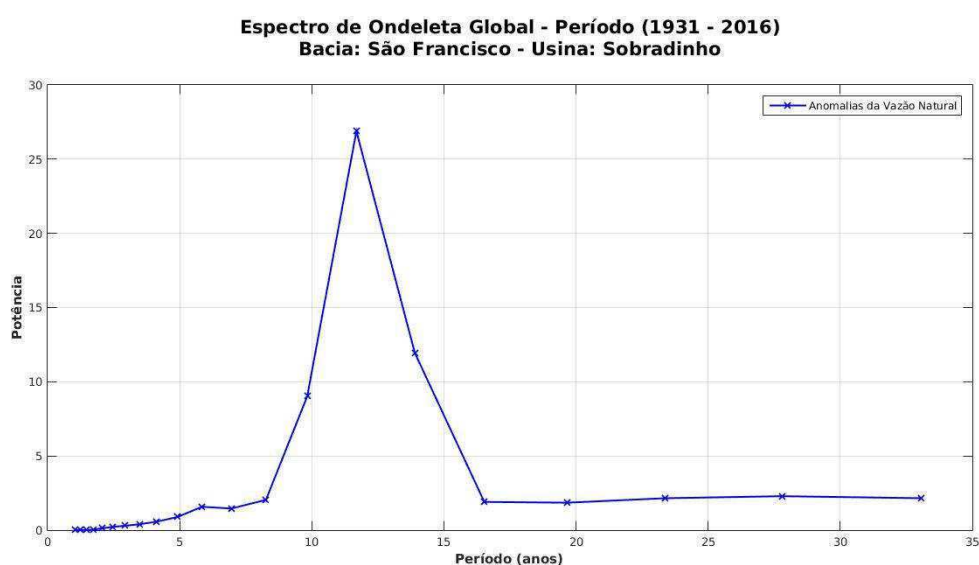
#### 4.1.2 Espectro de Ondeletas Global (Wavelet)

Com o intuito de mostrar as relações existentes entre clima e água, o espectro global que indica os maiores níveis de energia (Potência) dentre uma série de dados, foi utilizado. Foram plotados os espectros para as séries históricas de anomalias analisadas, referentes às vazões de Sobradinho (Figura

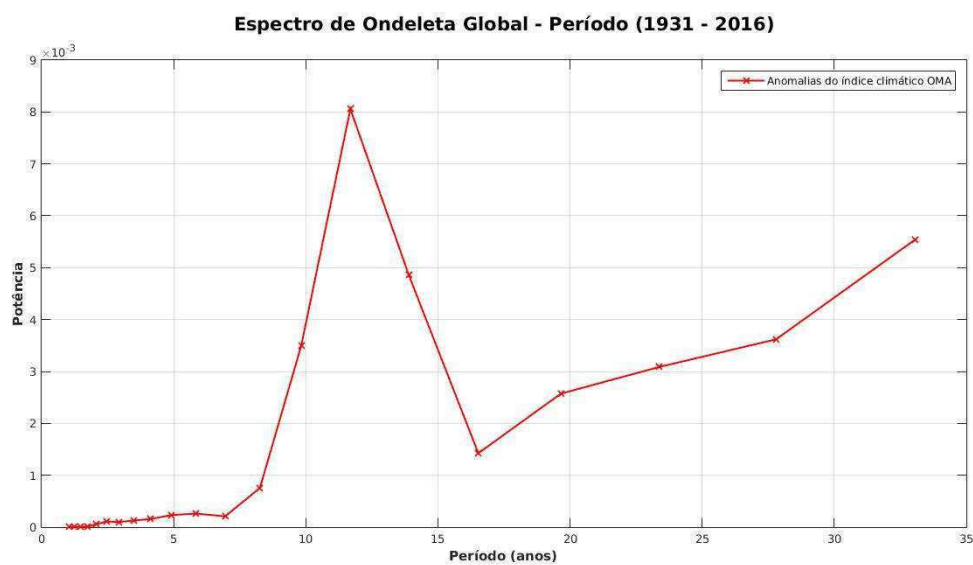
4.3) e das demais usinas (APÊNDICE B), bem como dos índices climáticos OMA (Figura 4.4) e ODP (Figura 4.5).

Os resultados demonstram que a potência está distribuída em várias escalas. Para o Espectro da vazão em Sobradinho, tem-se que as maiores potências se encontram entre os períodos de 8-17 anos, sendo o maior pico próximo ao período de 12 anos. Nos demais períodos, a potência se mostrou baixa e praticamente constante. O Espectro relacionado à OMA demonstrou o mesmo comportamento apresentado pelo Espectro de vazão em Sobradinho, com relação aos períodos de maiores potências e o pico. No entanto, ao chegar no período de 17 anos, a potência volta a crescer até atingir o segundo maior pico ao fim da série, no período próximo de 34 anos. Quanto ao Espectro relacionado à ODP, o mesmo possui o pico elevado no período de 12 anos, assim como nos Espectros anteriores. No entanto, este é o segundo maior pico, pois o primeiro se encontra ao fim da série, no período de 34 anos.

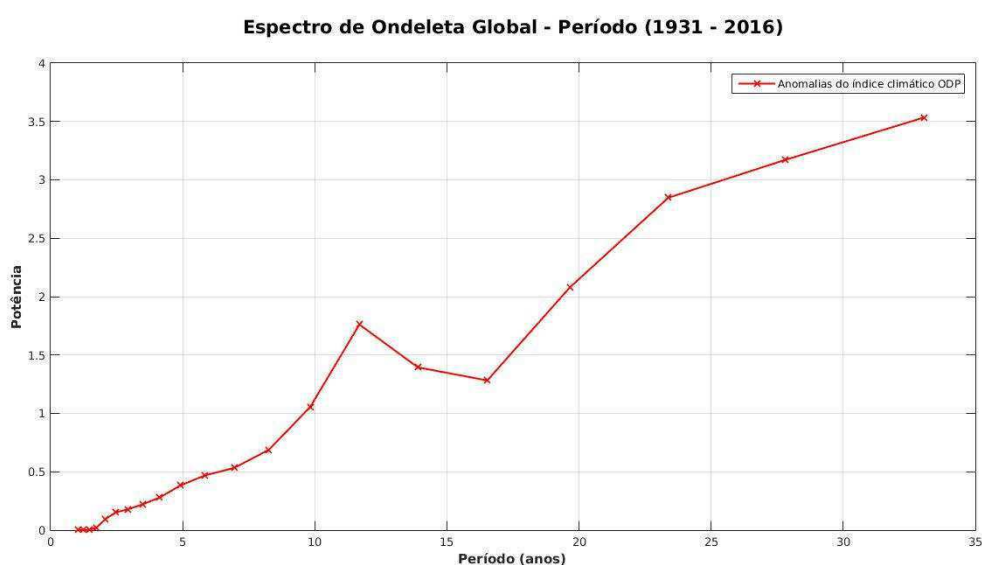
Esses comportamentos refletem então uma similaridade quanto aos picos de potência nos períodos de 12 anos, o que representa a variabilidade decadal (bem presente na série de vazão, como visto na Figura 4.2). A ODP varia decadalmente, com potência crescendo a partir do ano 7 até o pico no ano 12. No entanto, também possui oscilações que podem ser multidecais (em média, 40 anos), o que explica o pico maior ao fim da série. Já a OMA possui variações de baixa frequência ainda maiores (em média, períodos de 60 anos) que os da ODP, tornando suas oscilações multidecais. Contudo, mediante o período de análise (86 anos), não foi possível detectar esse tipo elevado de oscilação, fazendo com que o Espectro registrasse apenas as ondetas de frequências maiores (como as de 12 e 34 anos) mas de potências menores.



**Figura 4.3** - Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias de vazão em Sobradinho.



**Figura 4.4** - Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias da OMA.



**Figura 4.5** - Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias da ODP.

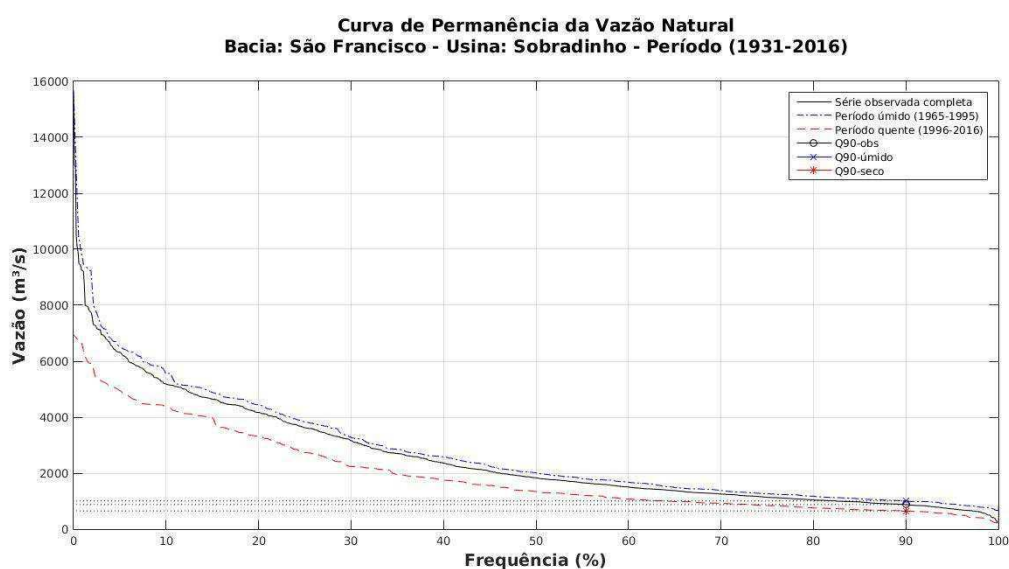
Assim, é possível inferir que existe relação entre as oscilações decadais de ambos os fenômenos climáticos (OMA e ODP) e a vazão em Sobradinho, mediante os picos de potência em torno do período decadal (12 anos). Ainda assim, vale ressaltar que a maior potência no Espectro da série de anomalias da OMA, para um período maior de análise, deveria ser em torno de 60 anos, conforme resultados alcançados por Dewes e Dias (2006).

## 4.2 Água

### 4.2.1 Curva de Permanência e Q90

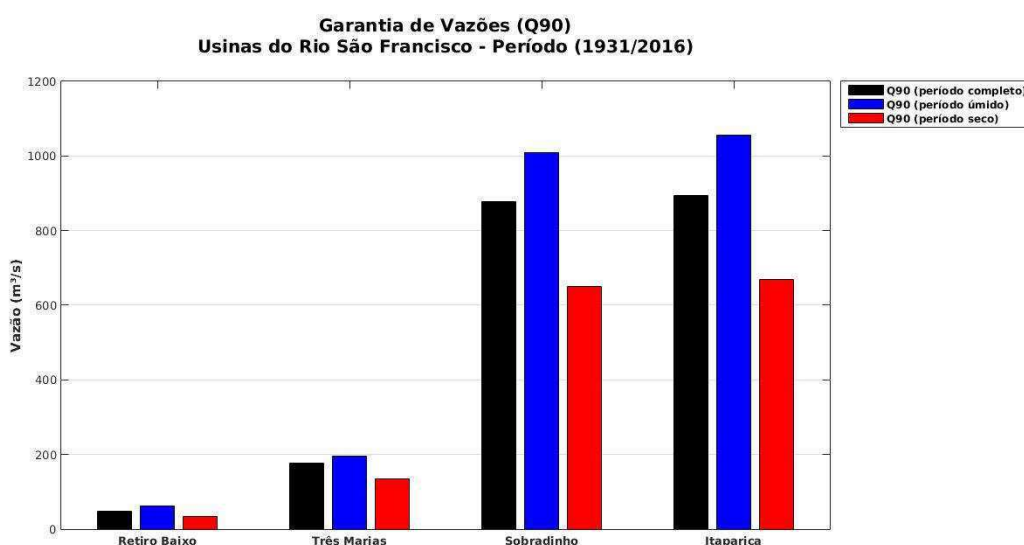
A curva de permanência traçada para a vazão da usina de Sobradinho, conforme Figura 4.6, e para as demais usinas (APÊNDICE C) demonstra que a frequência acumulada para cada um dos períodos de análise se mostraram diferentes entre si. Para o período considerado frio da OMA, a curva formada se mostrou favorável pois foi a série que apresentou os maiores valores de vazão. Enquanto que a série de dados referentes ao período considerado quente da OMA, se mostrou bem abaixo da curva do período frio. Isso indica que, no período considerado quente da OMA, houve reduções significativas da vazão em Sobradinho, demonstrando assim uma possível resposta ao fenômeno climático.

Ao se comparar as duas amostras de dados mencionadas à amostra de dados da série completa, observa-se que a série completa se mostrou no limiar entre as duas outras séries, ou seja, valores abaixo da amostra de período frio e acima da amostra de período quente, demonstrando assim a participação de ambas na modulação desta curva. Contudo, observa-se que ao início de cada curva a discrepância entre valores era maior, e foi diminuindo conforme se aumenta a frequência acumulativa, tornando os valores ao fim das séries próximos, o que se assemelha às vazões naturais do rio.



**Figura 4.6** - Curva de permanência referente aos períodos de análise da OMA com base na série histórica de vazão em Sobradinho.

Os valores de vazão que correspondem a uma garantia no abastecimento em 90% do tempo (Q90), foram obtidas através do percentil 90 de cada curva de permanência dos períodos analisados, para Sobradinho e demais usinas, conforme Figura 4.7. Os resultados apresentam de forma mais objetiva os valores das Q90, os quais em todas as usinas demonstraram resultados semelhantes, com a Q90 do período frio da OMA superior às demais. Logo, é possível perceber a relação existente entre o clima e a disponibilidade hídrica.



**Figura 4.7** - Q90 referente aos períodos de análise da OMA com base nas séries históricas de vazões das usinas analisadas.

#### 4.2.2 Garantias

As simulações realizadas no programa SIGA para o gerenciamento dos reservatórios e atendimento às demandas prioritárias, retornou como dados de saída: Demanda Atendida (DA) e a Escassez de Oferta (EO), ambas dependentes da Demanda Meta (DM). Quando a DM foi a DA, considera-se que não houve falha no abastecimento, no entanto, quando a DM não foi atendida totalmente (0%) ou parcialmente ( $0% < DM < 100%$ ), considerou-se que houve Escassez na Oferta e com isso falha no abastecimento. Com isso, foi possível estimar a Garantia no abastecimento das demandas para todas as usinas analisadas neste estudo, bem como os Eixos Norte e Leste da Transposição do Rio São Francisco, considerando-os como se já existissem neste período histórico.

Os resultados das Garantias às demandas para os dois períodos da OMA encontram-se no Quadro 4.1. O mesmo informa que houve uma garantia no abastecimento de todas as usinas, com exceção da usina de Retiro Baixo, que apresentou Garantia de 100% para o abastecimento Humano, mas 0% para a Indústria e Irrigação. Um possível motivo seria a baixa vazão liberada pelo reservatório, pois o mesmo não possui outros reservatórios à montante que o ajudem a elevar seus níveis de água, fazendo assim com que às liberações disponíveis fossem suficientes para atender apenas a demanda mais prioritária.

Outro resultado relevante são os referentes aos Eixos da Transposição que apresentaram resultados diferentes. Para o Eixo Norte, houve falhas no abastecimento nos dois períodos analisados, com a ressalva de que as garantias foram menores no período considerado quente da OMA, o que pode ser uma resposta às variabilidades climáticas. No entanto, todas essas garantias foram acima de 90%, o que é um resultado satisfatório para a viabilidade da implantação do projeto. Já o Eixo Leste não apresentou falhas em nenhuma demanda. Isso pode ter ocorrido devido às demandas serem menores, se comparadas ao Eixo Norte, e poderem ser atendidas por completo, já que recebem água do reservatório de Itaparica que libera elevadas vazões. Desse modo, as simulações indicam que a Transposição é favorável.

**Quadro 4.1** - Resultados das Garantias nos períodos de análise da OMA com base nas simulações realizadas no programa SIGA.

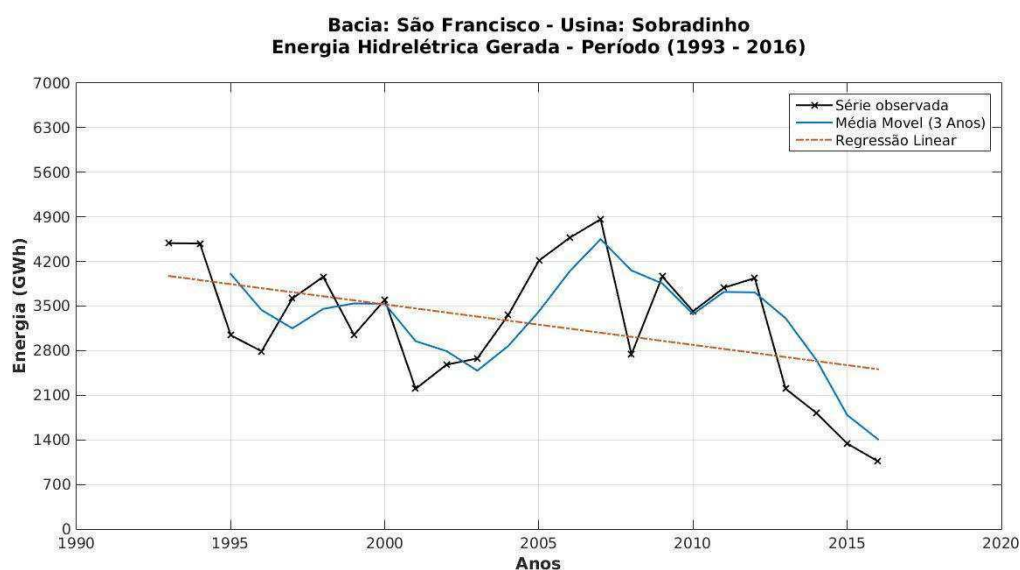
USINAS	PERÍODO	GARANTIAS DE ATENDIMENTO ÀS DEMANDAS (%)		
		HUMANA	IRRIGAÇÃO	INDÚSTRIA
Retiro Baixo	Úmido	100	0	0
	Seco	100	0	0
Três Marias	Úmido	100	100	100
	Seco	100	100	100
Sobradinho	Úmido	100	100	100
	Seco	100	100	100
Itaparica	Úmido	100	100	100
	Seco	100	100	100
Transposição EN	Úmido	98,81	97,62	98,81
	Seco	97,31	94,35	96,77
Transposição EL	Úmido	100	100	100
	Seco	100	100	100

## 4.3 Energia

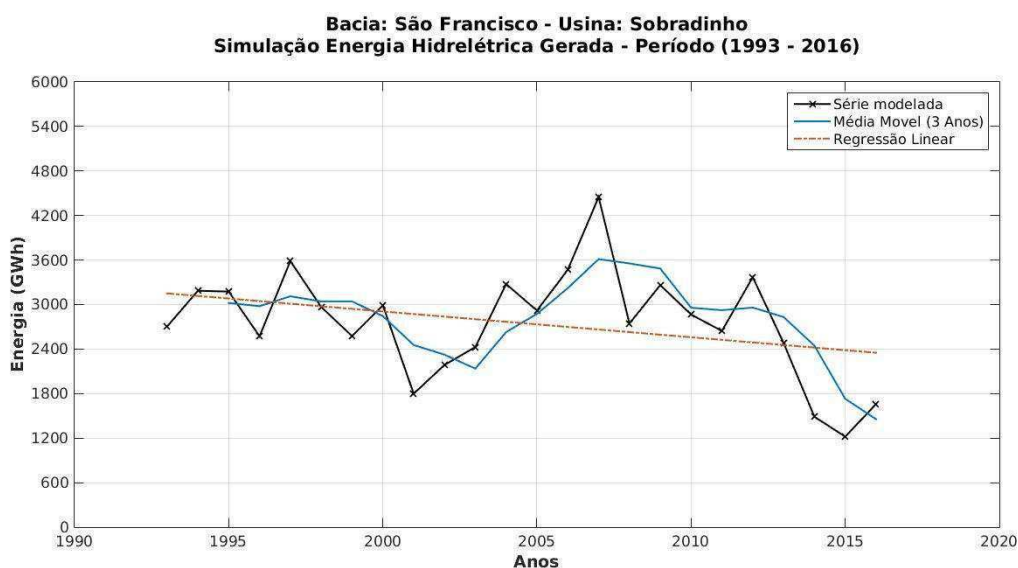
### 4.3.1 Geração Hidrelétrica

Inicialmente, o cálculo da Energia Hidrelétrica para a usina de Sobradinho foi feito para os dados históricos disponíveis a fim de se obter um padrão confiável de comparação para as simulações que haveriam de ser feitas. Desse modo, a Figura 4.8 representa a plotagem deste resultado. Em seguida, fez-se a plotagem da Energia Hidrelétrica gerada para a usina de Sobradinho através dos dados modelados pela simulação, conforme Figura 4.9. O teste de Mann-Kendall San não apresentou tendência significativa, provavelmente devido ao curto período de análise.

Para a Energia obtida por dados observados (Figura 4.8), tem-se um decaimento conforme demonstrado pela regressão linear que sugere uma redução na geração hidrelétrica ao longo dos últimos 20 anos. O maior pico ocorreu em 2007 e o menor no ano de 2016, após 4 anos consecutivos de queda. Do mesmo modo, a Energia obtida por dados modelados (Figura 4.9) apresentou comportamento semelhante, com o maior pico em 2007 e o menor em 2015, após 3 anos consecutivos de queda e um leve aumento no ano de 2016. Através da média móvel, é possível visualizar melhor esta variabilidade apresentada em ambas às séries. Nota-se principalmente as quedas na geração hidrelétrica apresentadas nos últimos anos, coincidindo com o período de seca que o NEB vem enfrentando.

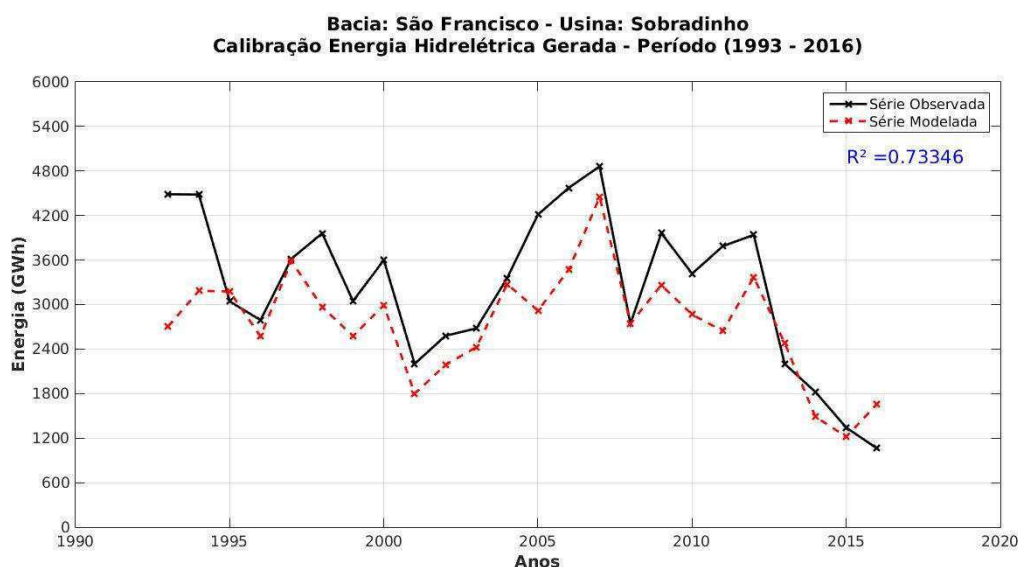


**Figura 4.8** - Energia gerada na usina de Sobradinho com base nas séries históricas observadas de vazão defluente e volume do reservatório, para o período a partir de 1993.



**Figura 4.9** - Energia gerada na usina de Sobradinho com base nas séries modeladas de vazão defluente e volume do reservatório, para o período a partir de 1993.

A fim de se realizar a calibração dos dados modelados, comparando-se os resultados de Energia gerada por ambos os métodos (observado e modelado), é possível visualizar conforme a Figura 4.10 a semelhança no comportamento das séries, tanto em relação a grandeza dos valores como a variabilidade dos mesmos. Uma análise quantitativa foi adotada para mensurar o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, através do coeficiente de determinação, também chamado de  $R^2$ , que varia entre 0 e 1. O resultado obtido foi de  $R^2 = 0,73346$ , o que demonstra uma boa confiabilidade dos dados modelados.

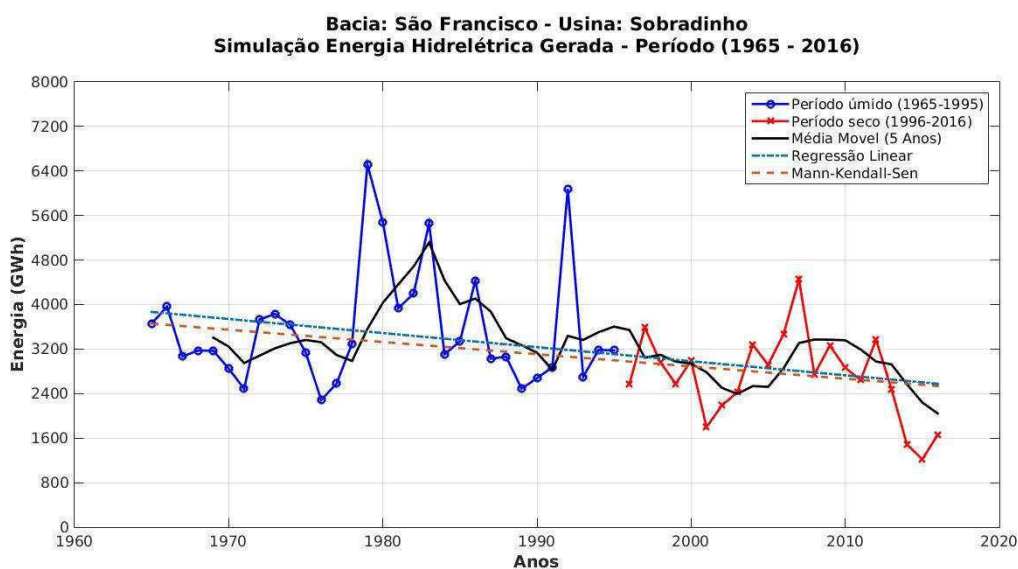


**Figura 4.10** - Calibração entre a Energia gerada na usina de Sobradinho com base em dados observados e modelados, para o período a partir de 1993.

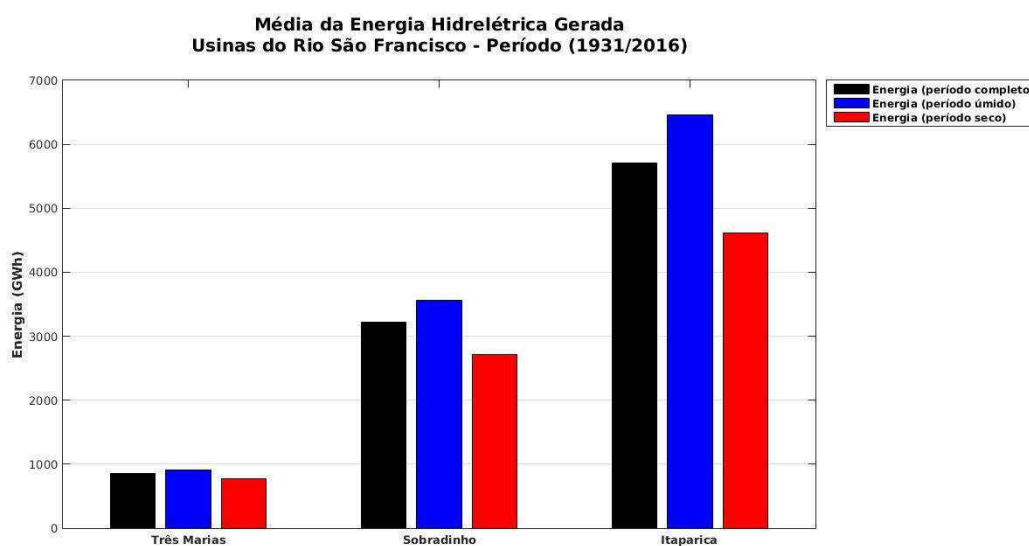
Mediante ao exposto, pôde-se então calcular a Energia Hidrelétrica gerada na usina de Sobradinho (Figura 4.11) e demais usinas (APÊNDICE D) através dos dados modelados e calibrados, para o período histórico a partir de 1965 os quais não possuem dados observados disponíveis para este cálculo.

Conforme observado na Figura 4.11, a Energia gerada no período considerado frio da OMA foi bem superior à Energia gerada na fase quente deste mesmo fenômeno climático. O pico da fase fria ocorreu no ano de 1979, o que condiz com os picos observados nas séries históricas de precipitação e vazão em Sobradinho (Figuras 4.1 e 4.2). Já o pico encontrado na fase quente foi em 2007, enquanto que os picos encontrados nas séries históricas foram em 2009. Em 2007, houve baixa precipitação e vazão próxima à de 2009.

Outra forma de análise adotada para uma visualização mais clara deste resultado foi a obtenção das médias de Energia gerada em cada período de análise da OMA, conforme Figura 4.12. Os resultados também demonstram uma maior geração de Energia Hidrelétrica no período em que a OMA encontrava-se em sua fase negativa/fria. Assim, é possível conjecturar que também há indícios de influência do fenômeno climático OMA na geração Hidrelétrica em Sobradinho.



**Figura 4.11** - Energia gerada na usina de Sobradinho para ambas as fases da OMA, com base nos dados modelados de vazão defluente e volume do reservatório, para o período a partir de 1965.

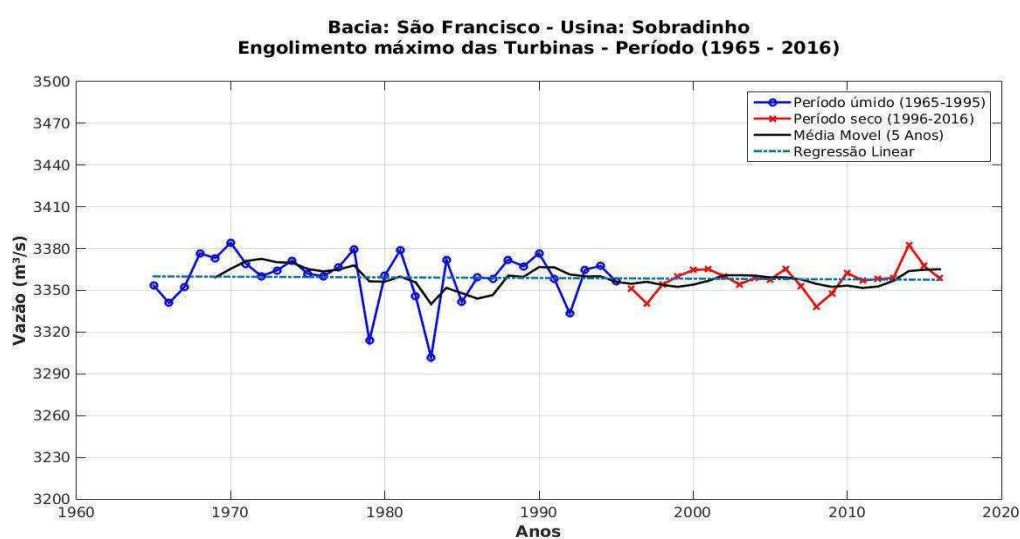


**Figura 4.12** - Média da Energia gerada em cada um dos períodos de análise da OMA com base nos dados modelados para cada uma das usinas analisadas.

### 4.3.2 Engolimento das Turbinas

Os engolimentos máximos apresentados pelas turbinas da usina de Sobradinho, nos períodos de fases distintas da OMA, constam na Figura 4.13. Para as usinas de Três Marias e Itaparica, seus resultados constam no APÊNDICE E. Nota-se que na Figura 4.13 os valores não possuem grandes variações, pois as amplitudes de maior e menor engolimento variam entre aproximadamente  $3300 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $3380 \text{ m}^3/\text{s}$ . No entanto, vê-se que os maiores valores se encontram na fase quente da OMA, com pico no ano de 2014, enquanto que os menores valores encontram-se no período de fase fria, nos anos de 1979 e 1983. Coincidentemente, esses anos correspondem aos anos de maiores precipitações e vazões em Sobradinho (Figuras 4.1 e 4.2). Em contrapartida, o ano de 2014 representa anos de baixas precipitações e vazões.

Desse modo, percebe-se que quanto maior os níveis nos reservatórios, menor a taxa de engolimento máximo. Uma hipótese que possivelmente explique isso, é: com os reservatórios mais cheios, os mesmos exercem maior pressão hidrostática e com isso águas com maiores velocidades chegando às turbinas. Com isso, diminui-se a necessidade de maiores vazões, para a geração de uma mesma quantidade de Energia Hidrelétrica. Outra observação é que todos os engolimentos das turbinas ao longo dos períodos de análise estão abaixo do limite máximo nominal das turbinas, conforme Quadro 2.2, que indica um engolimento máximo de  $4260 \text{ m}^3/\text{s}$  para Sobradinho.



**Figura 4.13** - Engolimento máximo das turbinas da usina de Sobradinho para ambas as fases da OMA, com base nos dados modelados de altura líquida, para o período a partir de 1965.

## 5 - CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste trabalho, é possível inferir que o fator climático impacta na gestão hídrica e geração hidrelétrica. Com a análise quantitativa das séries temporais, foi possível pressupor que existe alguma influência dos índices climáticos OMA e ODP com relação à precipitação e vazão, mantendo ou diminuindo quando em fases iguais ou aumentando em fases opostas. No entanto, vale ressaltar que outros fenômenos climáticos podem estar agindo e interferindo diretamente nessas variáveis hidrológicas, dificultando respostas mais concretas e conclusivas.

O exemplo disso é o fenômeno ENOS, que possui relações diretas com a OMA e ODP, segundo Silva (2013b). A análise quantitativa, por intermédio da análise do Espectro Global por Ondeletas, mostrou uma relação decadal (com picos em 12 anos) entre a vazão e os índices climáticos e ocultou a oscilação multidecadal da OMA, acreditando-se ser devido o curto período dos dados utilizados para a análise.

As análises referentes à gestão dos recursos hídricos, mostrou que as curvas de permanência apresentaram valores maiores para o período frio da OMA, assim como as Q90 de todas as usinas, o que demonstra uma relação direta entre as fases desse fenômeno climático e a disponibilidade de água nos reservatórios. Com as simulações, foi possível analisar as Garantias que foram satisfatórias para ambas às fases da OMA, inclusive para os Eixos da Transposição.

Vale ressaltar que essas simulações feitas não representam perfeitamente a realidade, e com isso podem haver falhas, que podem ser detectadas e corrigidas a fim de dar respostas cada vez mais concretas aos gestores dos recursos hídricos e energéticos, almejando assim um melhor planejamento.

A geração de Energia Hidrelétrica em Sobradinho se mostrou afetada pelo fenômeno climático OMA, demonstrando um elevado nível de geração na fase fria, e um decaimento acentuado na fase quente. Já o engolimento máximo das turbinas demonstrou ser maior na fase positiva da OMA e menor na fase negativa, ou seja, há um maior aproveitamento hidráulico das turbinas nos períodos de fase fria da OMA. Essas informações tornam-se relevantes no horizonte de planejamento energético a médio e longo prazo, pois assim torna-se possível procurar antecipadamente fontes alternativas de geração de Energia que

venham compensar as baixas nas hidrelétricas, e saber aproveitar de forma eficaz os momentos de alta.

Desse modo, é possível visualizar o panorama geral do nexo existente entre clima-água-energia, percebendo a interdependência destes através de suas conexões e influências, e analisando os impactos que estes fatores podem trazer à sociedade. Procurar entender esses processos e planejar-se para agir em momentos futuros adversos é primordial para a manutenção do desenvolvimento humano e garantia de qualidade de vida.

Propostas futuras seriam: quanto ao clima, realizar análises quantitativas e qualitativas mais detalhadas dos índices climáticos OMA e ODP, a fim de se mensurar as correlações existentes com o ciclo hidrológico do NEB; quanto à água, realizar simulações mais complexas com a rede do São Francisco Estendido, a partir do incremento de demais fatores de interesse (demandas) principalmente quanto aos Eixos da Transposição, permitindo assim obter resultados mais refinados e realistas; e para a Energia Gerada nas Hidrelétricas do São Francisco, realizar simulações com dados projetados em escalas de tempo de médio e longo prazo, objetivando assim um planejamento energético eficaz e capaz de se adaptar às variabilidades climáticas.

**REFERÊNCIAS**

ALVES, B. C. C. **Avaliação dos padrões de variabilidade e mudança climática no setor hidrelétrico brasileiro**. 2012. 98f. Dissertação (mestrado)- Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2012.

ALVES, B. C. C.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. Análise de tendências e padrões de variação das séries históricas de vazões do operador nacional do sistema (ONS). **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2011.

ALVES, C.M.A.; BARROS, F.V.F.; MENDONÇA JUNIOR, G.M. “Desenvolvimento do Protótipo do sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água – SIGA”. **VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 17-20 de outubro, Gravatá – PE, 2006.

ALVES, C.M.A.; BARROS, F.V.F.; MENDONÇA JUNIOR, G.M. “Implantação dos Módulos de Calibração Automática de Modelos Hidrológicos e de Modelagem de Poluição Difusa no Sistema de Informações para Gerenciamento da Alocação de Água – SIGA”. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 26 – 30 de novembro, São Paulo – SP, 2007.

ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. A Variabilidade Pluviométrica no Setor Norte do Nordeste e os eventos El Nino-oscilação Sul (Enos). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 7, n. 2, p. 583-592, 1992.

ANA - Agência Nacional de Águas. **A questão da água no Nordeste**. Brasília - DF: CGEE, 2012. 23 p.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. ANA, Brasília: 2013. 252f.

ANDREOLI, R. V. et al. A Influência da Temperatura da Superfície do Mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Variabilidade de Precipitação em Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113-122, 2004.

ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T. Enso-Related Rainfall Anomalies in South America and Associated Circulation Features During Warm and Cold Pacific Decadal Oscillation Regimes. **International Journal of Climatology**, 25: 2017–2030, 2005.

ARAGÃO, J. A. R. Fatos sobre tendência do El Niño e sua relação com as secas no NEB. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia – SBMET**. v.14, n1, p.2-8, 1990.

ARAGÃO, J. O. R. **A influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Dinâmica do Tempo e do Clima do Nordeste do Brasil**. Capítulo do Livro Oceanografia um cenário tropical. Org.: Eskinazi-Leça, E.; Neumann-Leitão; Costa, M.F.da. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

ARAÚJO, José Theodomiro de. O semi-árido e a transposição das águas do Rio São Francisco. **Revista do legislativo, Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, n. 31, p. 65-74, maio/ago. 2001.**, 2001.

ATLAS NORDESTE: **Abastecimento Urbano e Água. Alternativas de Oferta de Água pra as Sedes Municipais da Região Nordeste do Brasil e do Norte de Minas Gerais: resumo executivo**. Agência Nacional de Águas, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos; Consórcio Engecorp/Projetec/Geoambiente/Reverside Technology. Brasília, DF: ANA, SPR, 2006.

BANZE, F. E. **Avaliação do Conflito entre o Controle de Cheias e Geração de Energia: Caso da Barragem de Cahora Bassa- Moçambique**. 140f. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba, 2014.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. Elementos de hidrologia aplicada. **Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Ouro Preto**, 2014.

BARROS, F. V. F. et al. DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE OPERAÇÃO DE SISTEMA DE RESERVATÓRIOS NO SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA GERENCIAMENTO DA ALOCAÇÃO DE ÁGUA-SIGA. **IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2008, Salvador. Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Porto Alegre: ABRH, 2008.

BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 149-160, 2003.

BERNARDO, S. O.; MOLION, L. C. B. Índices Climáticos e a Precipitação na Costa do Nordeste do Brasil. Anais do XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Fortaleza- CE, 2004.

BOLZAN, M. J. A. Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 37-41 (2004).

CARVALHO, M. A. V.; OYAMA, M. D. Variabilidade da Largura e Intensidade da Zona De Convergência Intertropical Atlântica: Aspectos Observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 305-316, set. 2013.

CASTRO, C. N. Transposição do rio São Francisco: análise de oportunidade do projeto. Brasília: **Ipea**, 2011. 60 p. (Texto para Discussão n. 1.577).

CASTRO, M. A. A. **Estudo das técnicas de controle de cheias em usinas hidroelétricas com aplicação de novas abordagens**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

CAVALCANTI, I. F. A. *et.al.* Tempo e Clima no Brasil. São Paulo, **Oficina de textos**, cap. 2, p.23-39, 2009.

CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**. RP1A – Diagnóstico da Dimensão Técnica e Institucional, Vol.7. REV1 - ago 2015.

RAMINA, R. H. **Concepção de uma Estratégia Robusta para a Gestão dos Usos Múltiplos das Águas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2014.

CEARÁ. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará**. Secretaria de Recursos Hídricos. Ceará. 1992.

CHAVES, R. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric Circulation Features Associated with Rainfall Variability over Southern Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**. v.129, p. 2614-2626, 2001.

COELHO, C. A. S. UVO, C. B.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. **Theor. Appl. Climatol.** v. 71, p. 185-197, 2002.

CORRÊA, I. C. P. **Análise das variabilidades interanuais e interdecenais dos índices de aridez e efetivo de umidade do estado do Ceará**. 2016. 101 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – Paraíba, 2016.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre**, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.

DELWORTH, T. L. M. E. MANN. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere, **Clim. Dyn.**, 16, 661-676, 2000. doi:10.1007/s003820000075.

DESER, C. et al. Sea Surface Temperature Variability: Patterns and Mechanisms. **Annu. Rev. Marine. Sci.** 2010. 2:115–43. doi: 10.1146/annurev-marine-120408-151453.

DEVORE, R. et al. Approximation methods for supervised learning. **Foundations of Computational Mathematics**, v. 6, n. 1, p. 3-58, 2006.

DEWES, C. F.; DIAS, P. L. S. **ANÁLISE E VALIDAÇÃO DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA DO MODELO IPSL\_CM4**. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET, 2006.

DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M. Cenários de mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos na região Nordeste. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 42, n. 2, p. 229–246, 2016.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2017: Relatório Síntese, Ano base 2016. Brasil: EPE, 2017. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final\\_2017\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2017_Web.pdf)>. Acesso em: Nov. 2017.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. EPE. Brasília: MME/EPE, 2015.

FENNESSEY, N.; VOGUEL, R. M. Regional flowduration curves for ungauged sites in Massachusetts. In: **Journal of Water Resources Planning and Management**. Vol. 116, nº 4, p. 530-549. Jul/Aug. 1990.

FERREIRA, N. S. REPELLI, C. A.; ALVEZ, J. M. B.; SOUZA, E. B. Localiza um procedimento numérico para localização do eixo central da zona de convergência intertropical no atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n. 2, p. 159-164, 2005.

FUNCEME. **Manual do SIGA**. 2015. Disponível em: <<http://www3.funceme.br/siga/uploads/documentos/manual-siga.pdf>>. Acesso em: Ago. 2017.

GONZALEZ, R. A. **Efeitos do gradiente de TSM zonal entre as bacias do Pacífico e Atlântico no norte da América do Sul durante eventos ENOS**. 2011. 124f. Dissertação (Mestrado) -- INPA - UEA, Manaus, 2011.

GALVÍNCIO, J. D. **Impactos dos eventos El Niño na precipitação da Bacia do rio São Francisco**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Campina Grande. Universidade Federal da Paraíba (PB), 117p, 2000.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**. Vol. 100, Janeiro 2013, p. 172–182.

GONÇALVES, R.F. (Org.). **Uso Racional da Água em Edificações. Prosab-Finep Edital 4**. Rio de Janeiro: Abes, 2006, 332 p.

GU, G.; ADLER, R. F. Interannual variability of boreal summer rainfall in the equatorial Atlantic. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 175-184, 2009.

GUANDIQUE, M. E. G.; MORAIS, L. C. Estudo de variáveis hidrológicas e do balanço hídrico em bacias hidrográficas. **Ecologia de reservatórios e interfaces. São Paulo: Universidade de São Paulo**, p. 434-447, 2015.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. **Quart. J. Royal. Meteor. Soc.**, v. 103 (435), p. 77-92, 1977

HOERLING, M.; KUMAR, A. Atmospheric Response Patterns Associated with Tropical Forcing. **Journal of Climate**. v. 15, p. 2184-2203, 2002.

HOFFMANN, R. et al. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. Biblioteca Digital da Produção Intelectual - BDPI, Universidade de São paulo - USP. São Paulo, 2016.

HOREL, J. D.; WALLACE, J. M. Planetary-Scale Atmospheric Phenomena Associated with the Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, 1981.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Situação da Seca Observada nas Regiões Norte e Nordeste do Brasil em 2016**. Disponível em:<[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=trabalho\\_tecnico-02-2017](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=trabalho_tecnico-02-2017)>. Acesso em: Ago. 2017.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Brasil em Desenvolvimento: Estado, planejamento e políticas públicas** / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília : Ipea, 2010. 300 p. 3 v.

KAYANO, M. T.; RAO, V. B.; ANDREOLI, R. V. 2005. A review of short-term climate variability mechanisms. *Advances in Space Research*, 35:843-851.

KAYANO, M. T. and CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. *Int. J. Climatol*, 2013. doi: 10.1002/joc.3674

KAYSER, R. H. B. **Metodologia de Balanço Hídrico e Critérios de Outorga em Bacias Hidrográficas com uso intenso de Reservatórios de Pequeno Porte: Estudo de Caso na Bacia do Rio Quaraí**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS. Porto Alegre - RS, 2014.

KELMAN, Jerson. A Lei das Águas. *Revista Rio Águas*, n. 1, 2004.

KNIGHT, J. R., R. J. ALLAN, C. K. FOLLAND, M. VELLINGA, AND M. E. MANN; A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20708, 2005. doi:10.1029/2005GL024233.

KOUADIO, Y.K.; SERVAIN, J.; MACHADO, L.A.T. and LENTINI, C.A.D. Heavy Rainfall Episodes in the Eastern Northeast Brazil Linked to Large-Scale Ocean-Atmosphere Conditions in the Tropical Atlantic. *Advances in Meteorology*, v. 2012, Article ID 369567, 16 p., 2012. doi:10.1155/2012/369567

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v.7, n.9, p. 1140 - 1153, 1979.

KOUSKY, V. E.; KAYANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies, *Tellus*, v.36A, p.490-504, 1984.

LÁZARO, Y. M. C. **Mudança climática no nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata: avaliação dos modelos do IPCC e cenários para o século XXI**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

LERNER, Gerson Luiz Soriano; CARPIO, Lucio Guido Tapia. **Estudo de impactos na geração hidroelétrica ao longo do Rio São Francisco devido à transposição de suas águas utilizando modelo matemático de fluxos em Rede Acquanet**. 2006. Dissertação (Mestrado)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

LIU, J. et al. China's rising hydropower demand challenges water sector. **Scientific reports**, v. 5, 2015.

LOPES, J. E. G.; SANTOS, R. C. P. Capacidade de reservatórios. **São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2002.

MACHADO, C. J. S. Mudanças conceituais na administração pública do meio ambiente. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 24-26, 2003.

MADERA, R. D. Q. **Modelagem da Função de Produção de uma Usina Hidrelétrica com base nas características individuais das Unidades Geradoras**. 2013. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MAGALHÃES, H. O. Análise de sinais para engenheiros: Uma abordagem via Wavelet. 1. ed., Rio de Janeiro: **Brasport**, 2007. 268p.

MANTUA, N. J. et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production, **Bulletin of the American Meteorological Society**, Vol. 78, pp. 1069-1079, 1997.

MEDEIROS, R. M. **Análise de Aspectos Climático, Socioeconômico e Ambiental e seus Efeitos na Bacia Hidrográfica do Rio Uruçuí Preto e entorno**. 2016. 155 p. Tese (Doutorado em Meteorologia ) - Universidade Federal de Campina Grande, CAMPINA GRANDE – PB, 2016.

MEES, A. Qualidade de Água em Reservatórios. Unidade 1: Reservatórios. 2016. Disponível em: <[https://capacidade.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/74/2/Unidade\\_1.pdf](https://capacidade.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/74/2/Unidade_1.pdf)>. Acesso em: Ago. 2017.

MI – Ministério da Integração Nacional. **Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional**. Estudos de Inserção Regional, Relatório Geral - TOMO II, 2000.

MI - Ministério da Integração Nacional. **Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente do Projeto de integração do rio São Francisco com bacias hidrográficas do nordeste setentrional**, Brasília, Junho 2004. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/saofrancisco/rima/download.asp>>. Acesso em: Out. 2017.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Programa de Revitalização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. 2004.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **Dinâmica das chuvas sobre o Nordeste brasileiro**. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais Sociedade Brasileira de Meteorologia – SBMET CL00132, Rio de Janeiro, RJ, 1 CD-ROM, 2000.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOURA, A. D. SHUKLA, J. On the dynamics of the droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Science**, v.38, n.12, p.2653-2673. 1981.

MOURA, G. B. A. et al. Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 13, n. 4, p. 462-469, 2009.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias estratégicas**, v. 6, n. 12, p. 239–258, 2001.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O que é o SIN - Sistema Interligado Nacional**. Disponível em:<[http://apps05.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://apps05.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx)>. Acesso em: Dez. 2017a.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Mapas do SIN**. Disponível em: <[http://apps05.ons.org.br/conheca\\_sistema/mapas\\_sin.aspx#](http://apps05.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx#)>. Acesso em: Dez. 2017b.

PAZ, M. A. **Controle de Cheias em Usinas Hidroelétricas e o conflito com a Geração de Energia**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2000.

PEIXOTO FILHO, A. C.; BONDAROVSKY, S. H. Água, bem econômico e de domínio público. **Revista CEJ**, v. 4, n. 12, p. 13-16, 2000.

PEREIRA, S. B. **Evaporação no Lago de Sobradinho e Disponibilidade Hídrica no Rio São Francisco**. 2004. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG, 2004.

RAMOS, M.M. PRUSKI, F.F. **Subprojeto 4.3 – Quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na Bacia do São Francisco**. In: ANA; GEF; PNUMA; OEA. Projeto gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Viçosa, MG, 2003. 190 p. (Relatório final).

REIS, L. G. **Avaliação de critérios de outorga associados a políticas de operação de reservatórios na bacia do rio Moxotó, semiárido brasileiro.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado), 2002.

ROCHA, E. R. L.; CÉZAR, M. C. M. **Balanço Hídrico do Reservatório do Rio Descoberto.** XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. De 22 a 27 novembro de 2015, Brasília, DF.

RODRIGUES, A. C. L. et al. Um Modelo de Outorga para Bacias Controladas por Reservatórios: Aplicação do Modelo na Bacia Hidrográfica do Rio Piancó — PB. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 83-94, Out/Dez 2011.

RODRIGUES, R. R.; M. J. MCPHADEN. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast?, **Geophys. Res. Lett.**, 41, 1012–1018, 2014. doi:10.1002/2013GL058703.

ROTHAUSEN, S. G.; CONWAY, D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, v. 1, n. 4, p. 210–219, 2011.

SANTOS, E. P. et al. Eventos extremos de chuva e alterações no Regime Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Uma aplicação do índice RAI (Rainfall Anomaly Index). **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 8, n. 2, p. 315-330, abr./jun, 2011.

SANTOS, N. A.; SIQUEIRA, A. H. B.; MELO, M. L. D. Precipitação sobre a América do Sul e suas relações com a Oscilação Multidecadal do Atlântico e a Oscilação do Atlântico Norte. ISSN: 1980-055x. **Revista Brasileira de Climatologia**, Campina Grande, PB, Ano 12 – Vol. 18 – JAN/JUN 2016.

SASAKI, D. K. **Mudanças dos modos de variabilidade do Atlântico Tropical no Século XX.** 2014. 69 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2014.

SCANLON, B. R.; DUNCAN, I.; REEDY, R. C. Drought and the water–energy nexus in Texas. *Environmental Research Letters*, v. 8, n. 4, p. 045033, 2013.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, No. 324, p. 1379-1389, dez.1968.

SILVA, D. F. Influência Interdecadal (ODP e OMA) nas Cotas do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.06, n.06 (2013b) 1529-1538.

SILVA, D. F.; GALVÍNIO, J. D. Estudo da Influência da Oscilação Decadal do Pacífico no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 04 (2011) 665-676.

SILVA, D. F. ; GALVÍNIO, J. D.; NÓBREGA, R. S. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 19, p. 46-56, 2011.

SILVA, F. W. M. PROJEÇÃO DE ENERGIA NATURAL AFLUENTE (ENA) A MÉDIO PRAZO PARA O SETOR ELÉTRICO DO BRASIL. 2017. 101f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias e Sociobiodiversidade) - Programa de Pós-Graduação em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, Redenção-CE, 2017.

SILVA, F. S. **Ondas Atmosféricas Equatorialmente Confinadas e Eventos de Seca na Região Nordeste do Brasil**. 2013. 59 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2013a.

SILVEIRA, C.; FILHO, A. et al. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. **Estudo de modelos de projeção de médio prazo para a série de precipitações no estado do Ceará usando Transformada de Fourier**. Natal/RN, 2014.

SIQUEIRA, A. H. B. **Variabilidade do Clima da América do Sul e sua Relação com os Índices Oceânicos e Atmosféricos**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas. 77 f. Maceió, 2012.

SIQUEIRA, A. H. B. et al. Impactos do ENOS no Norte e Nordeste Brasileiros e sua relação com a Oscilação Decadal do Pacífico. In: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET**, 2006.

SIQUEIRA, A. H. B.; MOLION, L. C. B. **El Niño-Oscilação Sul e a Oscilação Decadal do Pacífico**. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador. Anais – IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008.

SOUSA, A. J. S. **Eventos Extremos de Precipitação no Leste da Amazônia**. 2010. 93 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, 2010.

SPIEGEL, M. R. Estatística. Tradução e Revisão técnica Pedro Consentino - 3a Ed. Pearson Makron Books-São Paulo, 1993.

TORRENCE, C.; COMPO, G.P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 79 (1): 61-78. 1998.

UETA, V.; CYSNE, A.P.; CAMPOS, J.N.B. **Eficiência de Acumulação de Reservatórios Anuais: Aplicação da Equação de Esvaziamento**, In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, Anais..., 2007.

VAN VLIET, M. T. et al. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. **Nature Climate Change**, 2016.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia Versão Digital 1. **In: Perturbações Atmosféricas**. Recife. 2005. p. 444-446.

VERGÍLIO, A. H. B. **Um Modelo de Pré-despacho Hidrotérmico para Mercados de Energia**. 2011. 157f. Dissertação (Mestrado) –Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011.

VILANI, M. T.; SANCHES, L. Análise de Fourier e Wavelets aplicada à temperatura do ar em diferentes tipologias de ocupação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.12, p.1340–1346, 2013.

WAHNFRIED, I. e HIRATA, R. Comparação dos Métodos de Estimativa de Recarga de Aqüíferos em uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). In: **ABRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos**. 15 – 25 p. 2005.

WENG, H.-Y.; LAU, K.-M. Wavelet, period-doubling and time-frequency localization with application to satellite data analysis. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 51: 2523-2541. 1994.

XAVIER, T.M.B.; XAVIER, A.F.S A ODP- “Oscilação Decadal do Pacífico” (PDO – “Pacific Decadal Oscillation”) e eventos no Atlântico intertropical e no Nordeste Setentrional do Brasil, Anais do XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Fortaleza-CE, 2004.

ZHANG, Y. WALLACE, J.M.; BATTISTI, D. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93, **Journal of Climate**, v.10, p.1004-1020, 1997.

## ANEXOS

## ANEXO A

**Quadro A1** - Demandas individuais e somadas do Eixo Norte da transposição do SF.

TRANSPOSIÇÃO - EIXO NORTE				
NOME	TIPO	DEMANDAS (m3/s)		
		HUMANA	IRRIGAÇÃO	INDÚSTRIA
1	Nó	0,36	1,36	0
2	Nó	1,88	4,67	0,19
Orós	Reservatório	1,24	3,45	0,05
Castanhão	Reservatório	0,64	9,03	0,02
Banabuiú	Reservatório	1,11	1,7	0,05
6	Nó	7,7	2,45	3,06
7	Nó	0,81	2,36	0,16
Coremas	Reservatório	0,81	3,23	0,01
Armando Ribeiro Gomes	Reservatório	2,58	6,61	0,24
10	Nó	0,85	3,19	0,11
Pacajús	Reservatório	0,4	0	0,18
Pacoti/Riachão	Reservatório	0,28	0	0,12
Gavião - RMF + Pecém	Reservatório	10	0	1,8
TOTAL				
EIXO NORTE	Nó	28,66	38,05	5,99

Fonte: Funceme.

**Quadro A2** - Demandas individuais e somadas do Eixo Leste da transposição do SF.

TRANSPOSIÇÃO - EIXO LESTE					
NOME	TIPO	DEMANDAS (m <sup>3</sup> /s)			
		HUMANA	ANIMAL	IRRIGAÇÃO	INDÚSTRIA
1	Nó	10,3	0	0	0
Barra do Juá	Reservatório	0,019	0	0,011	0
Poço da Cruz	Reservatório	1,938	0,003	3,378	0
Ramal do Agreste	Nó	4,8	0	0	0
5	Nó	0	4	0	0
Pão de Açúcar	Reservatório	0,323	0,001	0,027	0
Belo Jardim	Reservatório	0,112	0,002	0,021	0
Sistema Integrado Suape	Nó	0	0	1	0
9	Nó	4,2	0	0	0
Sistema Adutor Borborema	Nó	0	0,639	0	0
Poções	Reservatório	0,017	0,014	1,032	0
Camalaú	Reservatório	1,5289	0,037	0,007	0
Cordeiro	Reservatório	0,102	0,013	0,088	0
Sumé	Reservatório	0,028	0,021	0,458	0
Epitácio Pessoa	Reservatório	9,106	0,063	1,525	2
Acauã	Reservatório	1,8329	0,084	0,329	0
Trecho CVP II	Nó	10	0	0	0
TOTAL					
EIXO LESTE	Nó	44,31	2,00	7,88	4,88

Fonte: Funceme.

## ANEXO B

**Quadro B1** – Polinômio Cota vs. Volume (Coeficientes de fcm).

Nome UHE	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Três Marias	5,30E+02	6,08E-03	-4,84E-07	2,20E-11	-3,85E-16
Sobradinho	3,74E+02	1,40E-03	-5,35E-08	1,16E-12	-9,55E-18
Itaparica	2,76E+02	6,76E-03	-8,87E-07	7,07E-11	-2,24E-15

Fonte: Madero (2013) e Sipot (2001) *apud* Lerner (2006).

**Quadro B2** – Polinômio Cota de jusante vs. Vazão de jusante (Coeficientes de fcj).

Nome UHE	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
Três Marias	5,15E+02	1,61E-03	-2,55E-07	2,89E-11	-1,18E-15
Sobradinho	3,60E+02	1,96E-03	-2,97E-07	2,51E-11	-7,70E-16
Itaparica	2,52E+02	-	-	-	-

Fonte: Madero (2013) e ONS (2006) *apud* Lerner (2006).

**Quadro B3** – Coeficientes de  $\eta$ .

Nome UHE	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
Três Marias	3,59E-01	6,98E-03	7,00E-03	4,68E-05	-4,33E-05	-1,17E-04
Sobradinho	3,59E-01	1,43E-03	1,29E-02	1,77E-05	-1,81E-06	-3,99E-04

Fonte: Madero (2013).

Devido à não localização ou inexistência dos coeficientes para obtenção do Rendimento da turbina da UHE Itaparica, utilizou-se o Rendimento turbina-gerador (%) disponibilizado por Sipot (2001) *apud* Lerner (2006), equivalente a:  $\eta = 91\%$ .

**Quadro B4** – Constantes  $k_p$ .

Nome UHE	$k_p$ ( $s^2/m^5$ )
Três Marias	2,53E-05
Sobradinho	9,84E-07

Devido à não localização ou inexistência da constante  $k_p$  para obtenção das perdas hidráulicas da UHE Itaparica, considerou-se o valor de:  $k_p = 0$ , o que tornou  $pl = 0$  (sem perdas).

**Quadro B5** – Polinômio engolimento máximo vs. queda.

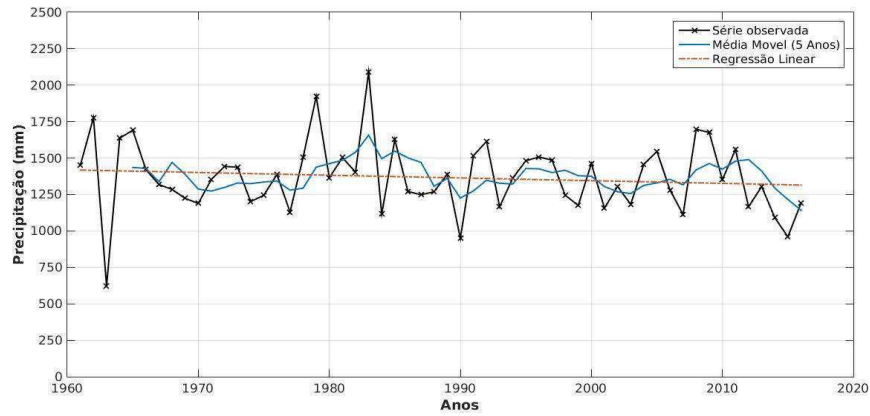
Nome UHE	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Três Marias	3,74E+02	9,12E+00	-	-	-
Sobradinho	1,73E+03	7,81E+01	-	-	-
Itaparica	1,46E+03	2,98E+01	-	-	-

Fonte: ONS (2006) *apud* Lerner (2006).

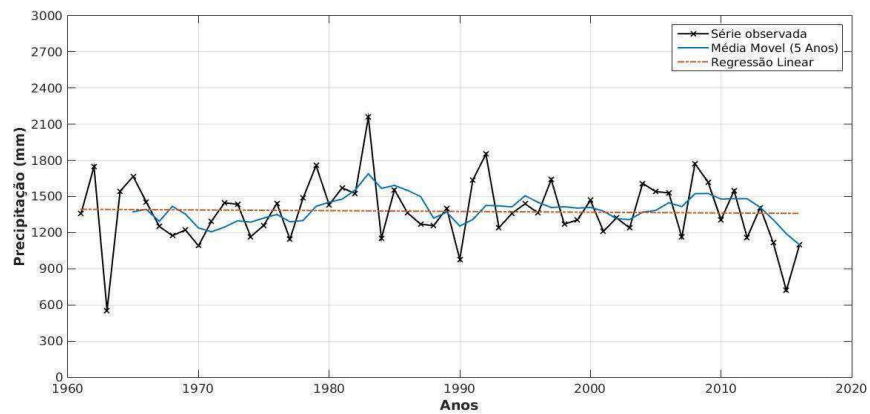
## APÊNDICES

## APÊNDICE A

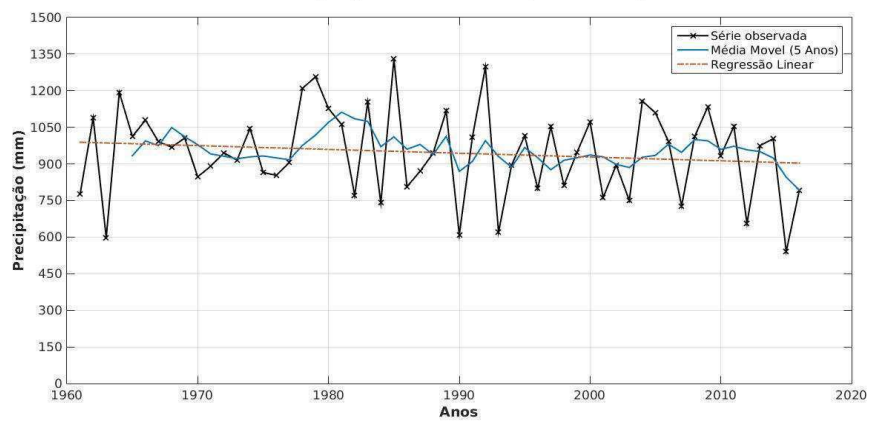
Bacia: São Francisco - Usina: Retiro Baixo  
Precipitação Anual - Período (1961 - 2016)



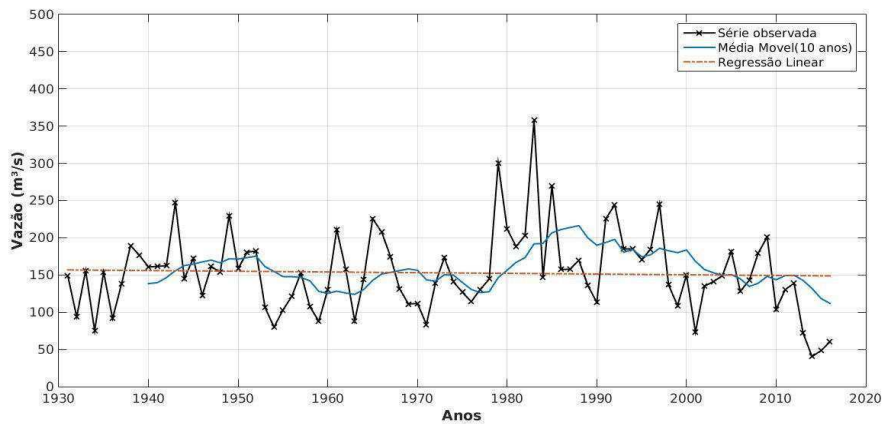
Bacia: São Francisco - Usina: Três Marias  
Precipitação Anual - Período (1961 - 2016)



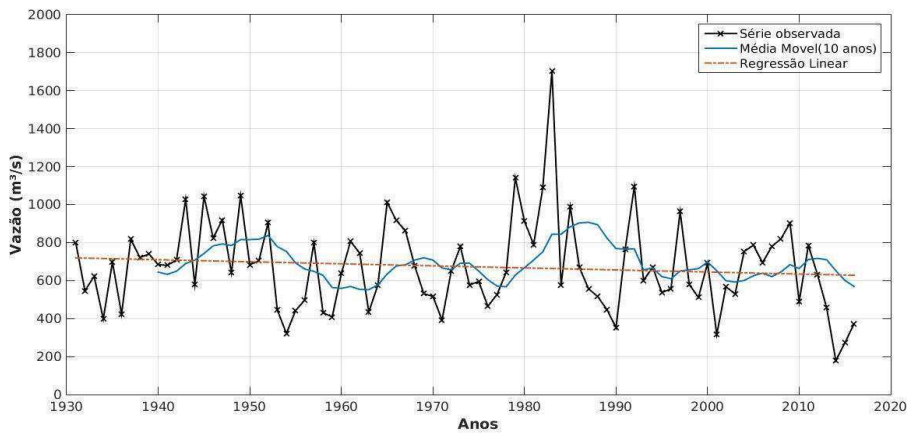
Bacia: São Francisco - Usina: Itaparica  
Precipitação Anual - Período (1961 - 2016)



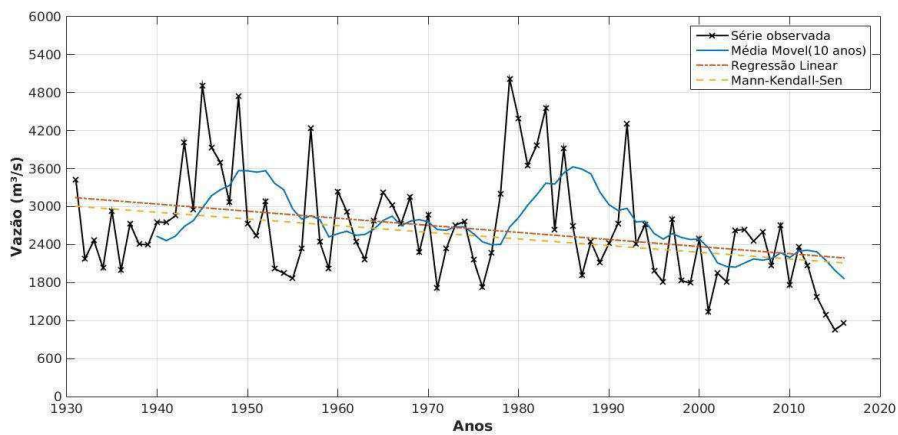
**Bacia: São Francisco - Usina: Retiro Baixo**  
**Vazão Natural Incremental - Período (1931 - 2016)**



**Bacia: São Francisco - Usina: Três Marias**  
**Vazão Natural Incremental - Período (1931 - 2016)**

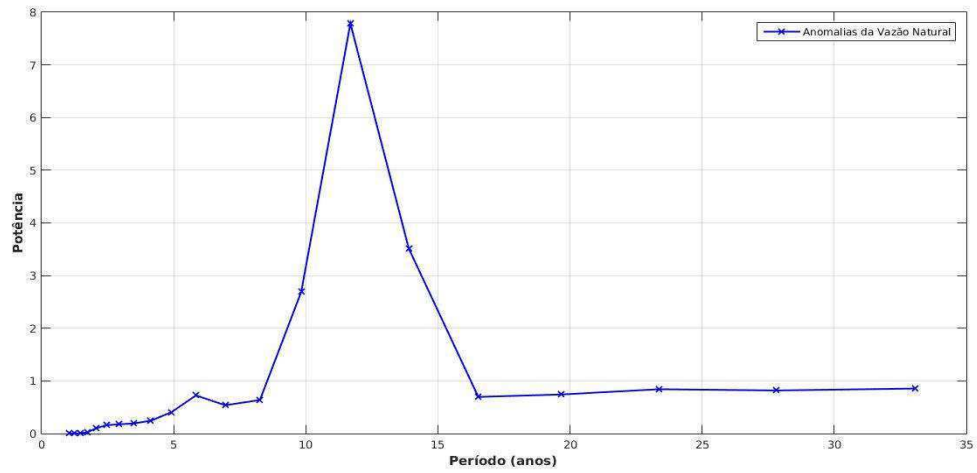


**Bacia: São Francisco - Usina: Itaparica**  
**Vazão Natural Incremental - Período (1931 - 2016)**

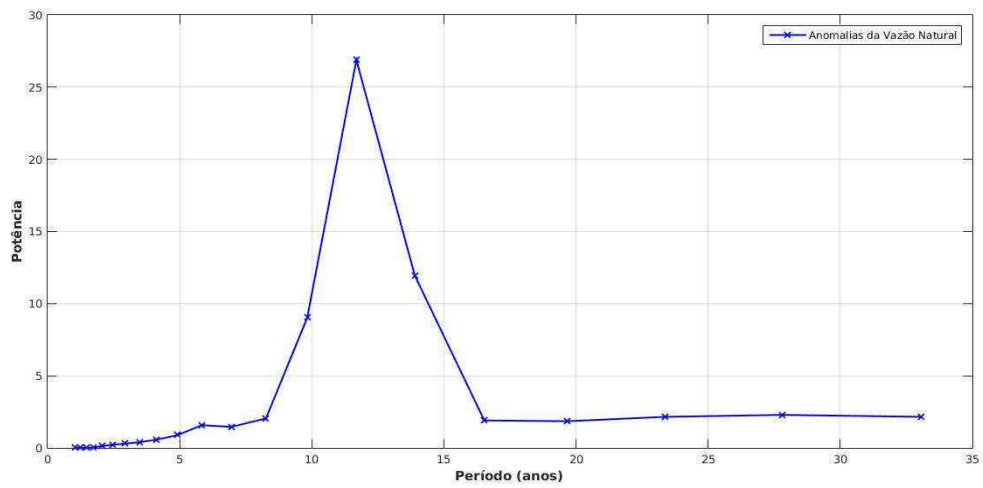


## APÊNDICE B

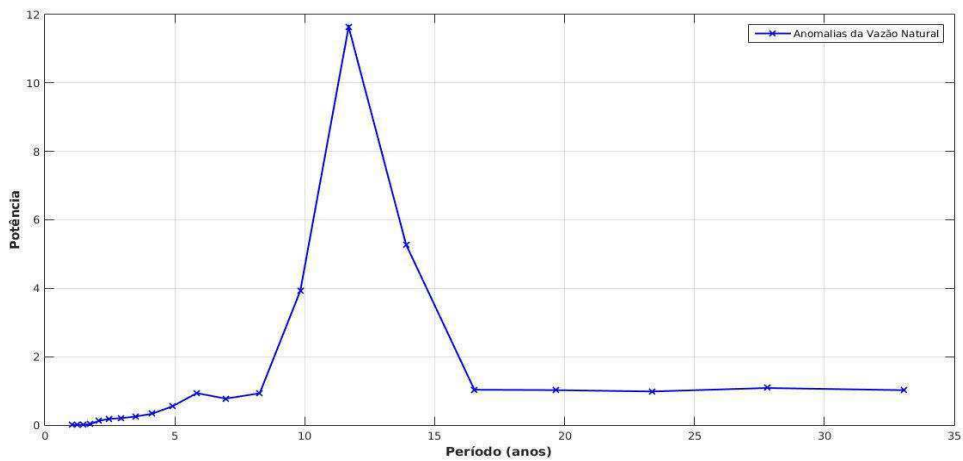
**Espectro de Ondeleta Global - Período (1931 - 2016)**  
**Bacia: São Francisco - Usina: Retiro Baixo**



**Espectro de Ondeleta Global - Período (1931 - 2016)**  
**Bacia: São Francisco - Usina: Sobradinho**

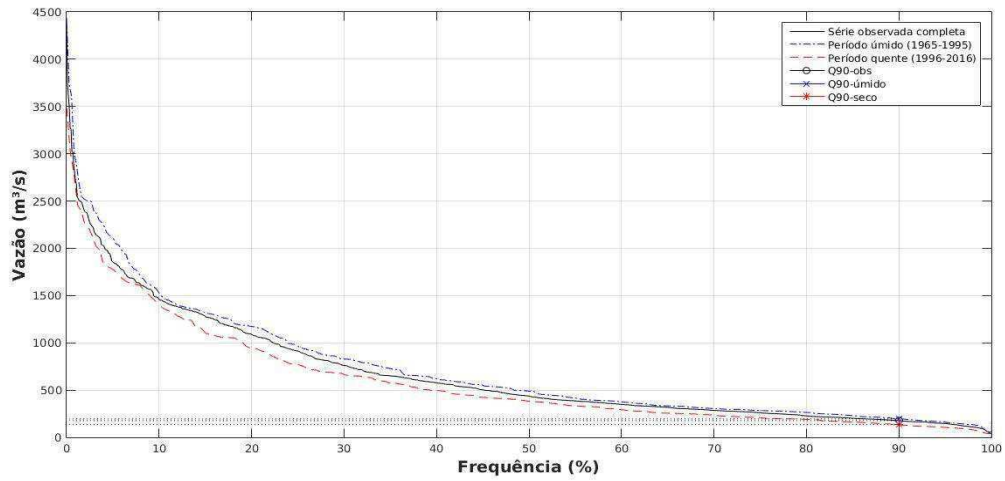


**Espectro de Ondeleta Global - Período (1931 - 2016)**  
**Bacia: São Francisco - Usina: Três Marias**

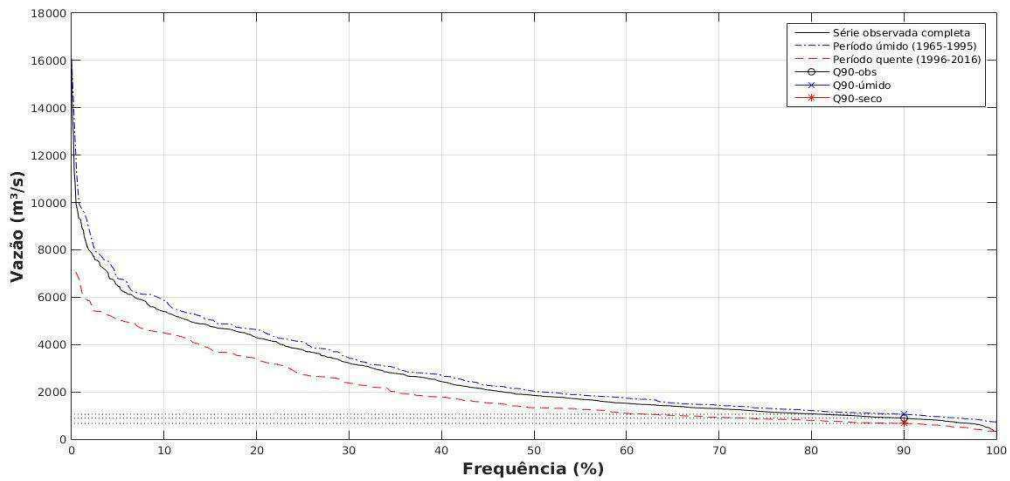


## APÊNDICE C

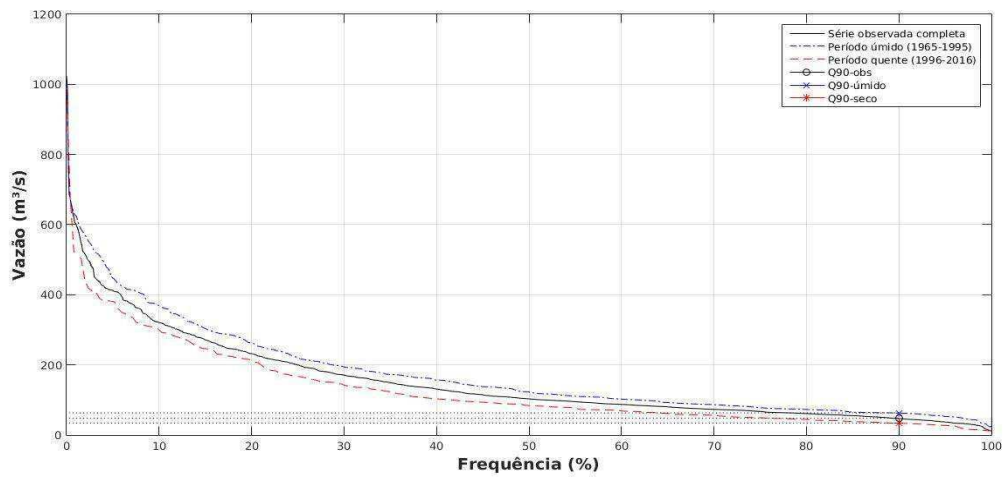
**Curva de Permanência da Vazão Natural**  
**Bacia: São Francisco - Usina: Três Marias - Período (1931-2016)**



**Curva de Permanência da Vazão Natural**  
**Bacia: São Francisco - Usina: Itaparica - Período (1931-2016)**

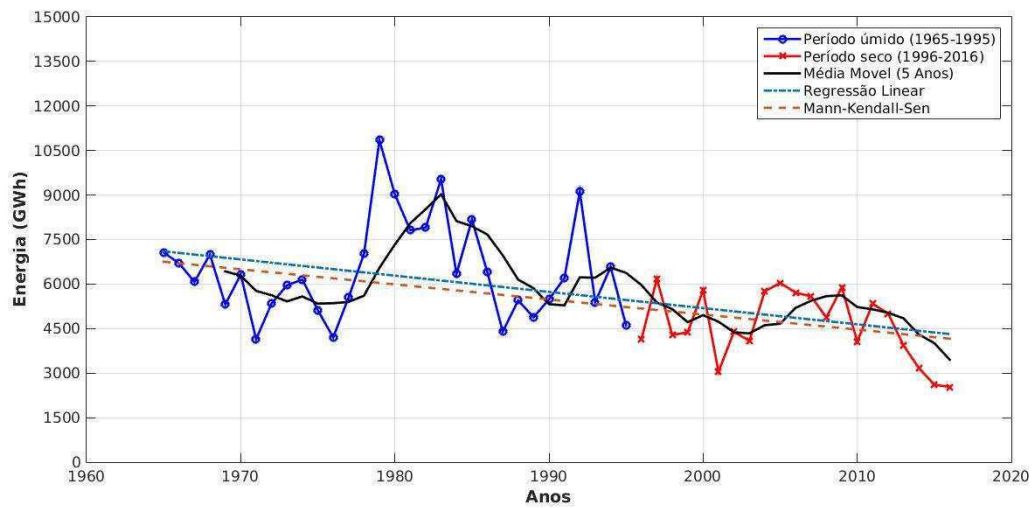


**Curva de Permanência da Vazão Natural**  
**Bacia: São Francisco - Usina: Retiro Baixo - Período (1931-2016)**

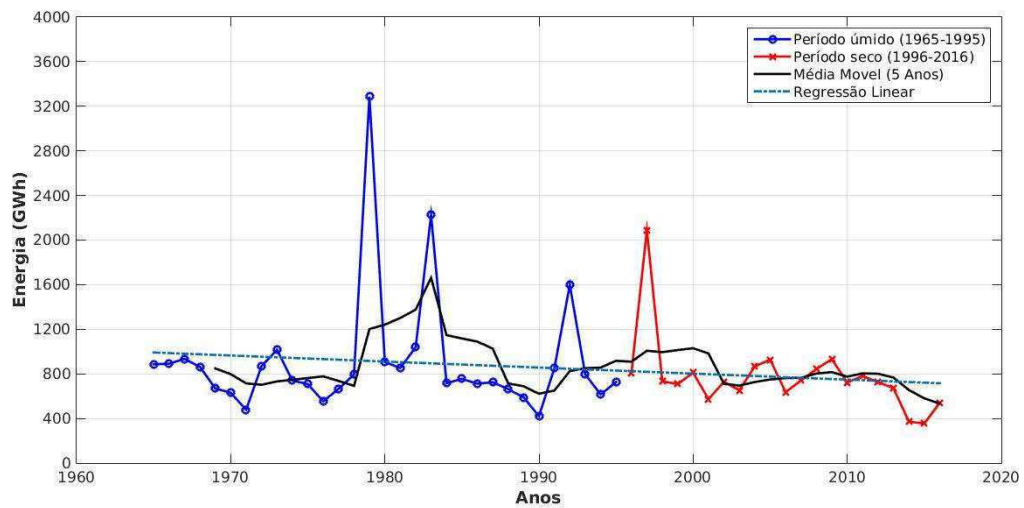


## APÊNDICE D

**Bacia: São Francisco - Usina: Itaparica**  
**Simulação Energia Hidrelétrica Gerada - Período (1965 - 2016)**

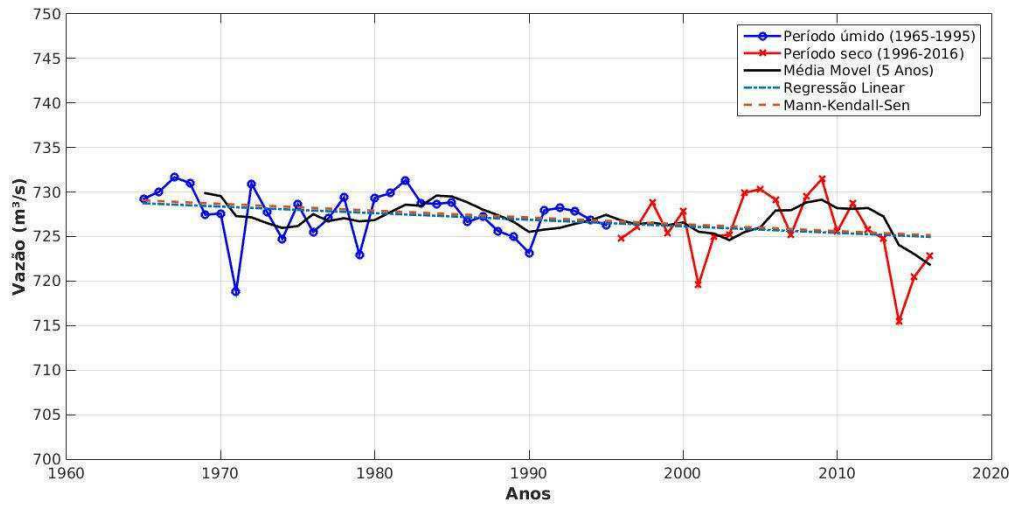


**Bacia: São Francisco - Usina: Três Marias**  
**Simulação Energia Hidrelétrica Gerada - Período (1965 - 2016)**



## APÊNDICE E

**Bacia: São Francisco - Usina: Três Marias**  
Engolimento máximo das Turbinas - Período (1965 - 2016)



**Bacia: São Francisco - Usina: Itaparica**  
Engolimento máximo das Turbinas - Período (1965 - 2016)

