



UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA - UNILAB  
INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - IEDS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIOBIODIVERSIDADE E  
TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS - MASTS

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

PROJEÇÃO DE ENERGIA NATURAL AFLUENTE (ENA) A MÉDIO PRAZO  
PARA O SETOR ELÉTRICO DO BRASIL

REDENÇÃO/CE

2017

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

PROJEÇÃO DE ENERGIA NATURAL AFLUENTE (ENA) A MÉDIO PRAZO  
PARA O SETOR ELÉTRICO DO BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis. Área de concentração: Tecnologias e Sociobiodiversidade.

Orientador: Dr. Cícero Saraiva Sobrinho

Co-Orientador: Dr. Cleiton da Silva  
Silveira

REDENÇÃO/CE

2017

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Silva, Francisco Wellington Martins da.

S583p

Projeção de Energia Natural Afluente ENA a médio prazo para o setor elétrico do Brasil / Francisco Wellington Martins da Silva. - Redenção, 2017.

102f: il.

Dissertação - Curso de Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Mest. Sociobiodiversidade e Tec. Sustent, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Cícero Saraiva Sobrinho.

Coorientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

1. Energia elétrica - Produção - Brasil. 2. Energia Natural Afluente (ENA). 3. Modelo Auto Regressivo (WAR). 4. Bacias hidrográficas. 5. Subsistema Hidroelétrico. I. Título

CE/UF/BSCL

CDD 338.4762130981

---

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

PROJEÇÃO DE ENERGIA NATURAL AFLUENTE (ENA) A MÉDIO PRAZO  
PARA O SETOR ELÉTRICO DO BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis.

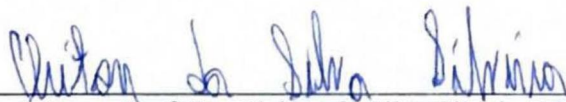
Área de concentração: Tecnologias e Sociobiodiversidade.  
Orientador: Dr. Cícero Saraiva Sobrinho  
Co-Orientador: Dr. Cleiton da Silva Silveira

Aprovada em: 29/08/2017.

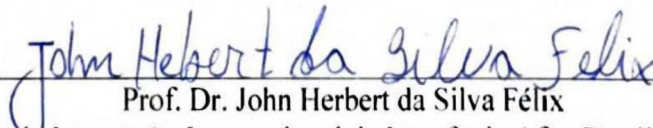
BANCA EXAMINADORA



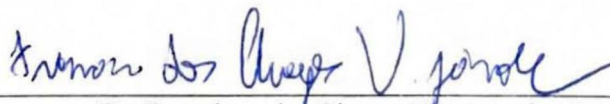
Prof. Dr. Cícero Saraiva Sobrinho (Orientador)  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (Co-Orientador)  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. John Herbert da Silva Félix  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Junior  
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)



Dedico esta dissertação a minha família, em especial ao meu tio José Chaves 'Ti Zeca' (*in memoriam*) que exerceu o papel de meu segundo pai.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar coragem e me ajudar em todos os obstáculos da vida e que se manifesta em mim nas coisas boas.

Aos meus pais Jacinta de Fátima e Francisco José pelo apoio e incentivo na minha vida.

Aos meus irmãos pela compreensão e por acreditarem no meu sucesso.

Ao meu Tio Zeca (*In memoriam*), que ajudou junto com meus pais a cuidar de mim e exerceu um importante papel na minha vida, seus conselhos foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus sobrinhos e afilhados, que proporcionam muita alegria na minha vida.

A minha namorada Natália, que me acompanhou em toda essa caminhada e com o seu apoio e mensagens de carinho me deu forças para continuar.

Ao Professor Orientador Dr. Cícero Saraiva Sobrinho por sua orientação e paciência.

Ao Professor Co-Orientador Dr. Cleiton da Silva Silveira por sua orientação, paciência e sobretudo por sua amizade.

Ao Duarte Junior pela imensa ajuda com programação na elaboração desse trabalho.

A todos que compõe o Grupo de Pesquisa Clima e Planejamento Energético-CLIFE/UNILAB pelas trocas de conhecimento.

À Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira- UNILAB pela oportunidade de me proporcionar uma Educação de qualidade.

Aos professores e funcionários do Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis-MASTS.

Aos meus colegas do MASTS, em especial à Rosalva, Marcyara e Jardenes pelo companheirismo e amizade.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos- FUNCEME por ter cedido arquivos de *shapifiles* das bacias hidrográficas do SIN;

A Marlene, Bernadete, Marcelo, Maria Oliveira, Leonardo Esteves, Ramilson Holanda, Julião Langa, Lamba Gomes, Filinto Bonte, Dargó Zsolt e a todos (as) que de alguma forma contribuíram para esse trabalho.

## RESUMO

O avanço tecnológico está diretamente relacionado ao desenvolvimento de uma nação, uma vez que o aumento da população tecnologicamente ativa cria a necessidade de bens que, direta e indiretamente, utilizam energia elétrica. Com isso o uso da energia torna-se uma necessidade primordial para o desenvolvimento. Nesse contexto, o presente trabalho de temática “Projeção de Energia Natural Afluyente (ENA) a médio prazo para o Setor Elétrico do Brasil” tem por objetivo geral analisar os padrões de variabilidade das séries de Energia Natural Afluyente (ENA) para o período de 1931 a 2014 por aproveitamentos hidroelétrico, por bacias hidrográficas e por Subsistema Hidroelétrico do Sistema Interligado Nacional (SIN) e projetar a ENA para os anos de 2015 a 2024 para as bacias hidrográficas. A ENA foi calculada utilizando duas variáveis: dados de vazões naturais afluentes - fornecidos pelo Operador Nacional de Sistema (ONS) entre os anos entre 1931 e 2014 – e dados de produtividade das usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN). Posteriormente, a série de ENA foi reagrupada por bacias e subsistemas, e para realizar a análise dos resultados, os dados foram padronizados e submetidos a alguns testes estatísticos, como Médias Móveis, Teste de Regressão Linear, Teste de Mann Kendall, Declividade de Sen e Transformadas de Ondeletras (Wavelet), bem como análise de variância das bandas de frequência. A série de ENA foi dividida em um período de 1931 a 2014 para verificação e um período de 2004 a 2014 para a calibração. O modelo Wavelets Auto Regressivo foi aplicado nas bandas de baixa e média frequência. O sinal das bandas foi analisado e a ENA foi projetada para os anos 2015 a 2024. Por fim, aplicou-se o método de máxima verossimilhança e análise de desempenho. Verificou-se que as bacias do Atlântico Sul, Atlântico Sudeste, Iguazu, Jacuí, Paraguai, Paraná, Paranapanema, Tietê e Uruguai, que predominantemente pertencem aos Subsistemas Sul e Sudeste/Centro-Oeste, apresentaram tendência positiva, segundo o método de Mann Kendall. As bacias do Amazonas, Grande, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco não apresentaram tendência significativa, enquanto as outras bacias examinadas - Atlântico Leste, Doce, Parnaíba e Tocantins - apresentaram tendência negativa de ENA. O modelo apresentou melhora nas projeções para a maioria das bacias. Observou-se uma relação direta da variabilidade de ENA com os fenômenos climáticos como a Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação Multidecal do Atlântico. A partir dessas análises pode-se entender a variabilidade de ENA e estudar os critérios de Intercâmbio de Energias entre as bacias e conseqüentemente entre os subsistemas para que possa ter um maior aproveitamento dos excedentes de energias e otimização de gastos. Portanto, a análise criteriosa do comportamento da ENA faz-se necessária para que medidas preventivas possam ser tomadas a fim de reduzir perdas na produção de Energia.

**Palavras-chave:** Energia Natural Afluyente (ENA). Bacias. Subsistemas. Modelo Auto Regressivo.

## ABSTRACT

Technological advancement is directly related to the development of a nation, since the increase of technologically active population creates the need for goods that directly and indirectly use electrical energy. Because of that, the usage of this type of energy becomes a primordial necessity for development. In this context, the present work having the title “MEDIUM-TERM PROJECTION OF NATURAL ENERGY (ENA) FOR THE ELECTRICAL SECTOR OF BRAZIL” aims to analyze the variability patterns of Inductive Natural Energy (ENA) series for the period between 1931 and 2014 by hydroelectric, basins and hydroelectric subsystems and to calculate the ENA of hydrographic basins for the years 2015-2024. The ENA was calculated using two key variables: the data about natural tributaries – provided by the National System Operator (ONS) from the years between 1931 and 2014 – and the productivity of the hydroelectric plants of the National Interconnected System (SIN). Subsequently, the ENA series were regrouped by basins and subsystems, and in order to carry out the analysis of the results, the data was standardized and subjected to some statistical tests, such as Moving Averages, Linear Regression Test, Mann Kendall test, Sen slope and Wavelet transformations, as well as analysis of variance of frequency bands. The series were divided into a period from 1931 to 2014 for verification and a period from 2004 to 2014 for the calibration. The Wavelets Auto Regressive model was applied in the low and medium frequency bands. The signal of the bands was analyzed and the ENA was projected for the years 2015 to 2024. Finally, the maximum likelihood and performance analysis method was applied. It was verified that the basins of the South Atlantic, Southeast Atlantic, Iguaçu, Jacuí, Paraguay, Paraná, Paranapanema, Tietê and Uruguay, which predominantly belong to the South and Southeast / Center-West Subsystems, showed a positive trend, according to the Mann Kendall method. The basins of Amazonas, Grande, Paraíba do Sul, Paranaíba and São Francisco did not present a significant trend, while the other basins that were examined – Atlantic East, Doce, Parnaíba and Tocantins – presented a negative trend of ENA. Wavelets Auto Regressive model shows improvement in the projections for most basins. It is also worth mentioning that a direct relation could be observed between ENA variability and climatic phenomena such as the Pacific Decadal Oscillation and the Atlantic Multidecal Oscillation. Based on these analyses, it is possible to understand the variability of ENA and study the criteria of Energy Exchange between the basins and consequently between the subsystems for the sake of facilitating a greater use of surplus energy and better optimization of expenses. Therefore, a careful analysis of the behavior of the ENA is necessary so that preventive measures can be taken in order to cure / reduce losses in the production of energy.

**Keywords:** Natural Energy Affluent (ENA). Basins. Subsystems. Auto Regressive Model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: REPARTIÇÃO DA OFERTA DE ENERGIA INTERNA.....	19
FIGURA 2: OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA.....	20
FIGURA 3: GERAÇÃO DE HIDROELETRICIDADE NO BRASIL DOS ANOS DE 1980 A 2013....	21
FIGURA 4: CAPACIDADE INSTALADA DE ELETRICIDADE NO BRASIL NOS ANOS DE 1980 A 2012 .....	22
FIGURA 5: VARIÁVEIS INTERVENIENTES NA OPERAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO.....	23
FIGURA 6: APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICOS DO SIN DIVIDIDOS POR BACIA. ....	24
FIGURA 7: SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.....	26
FIGURA 8: INTERCÂMBIO ENTRE SUBSISTEMAS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL EM 2010 (MW MÉDIO) .....	27
FIGURA 9: NEXO ÁGUA, CLIMA E ENERGIA: USO DA ÁGUA .....	29
FIGURA 10: DILEMA DO OPERADOR .....	31
FIGURA 11: ESQUEMA DO OCEANO PACÍFICO EM ANOS NORMAIS .....	37
FIGURA 12: ESQUEMA DO OCEANO PACÍFICO EM ANOS DE EL NIÑO .....	38
FIGURA 13: ESQUEMA DO OCEANO PACÍFICO EM ANOS DE LA NIÑA .....	39
FIGURA 14: ÍNDICE DA OSCILAÇÃO DECADAL DO PACÍFICO ENTRE 1900 A 2016 .....	41
FIGURA 15: ÍNDICE DA OSCILAÇÃO MULTIDECADAL DO ATLÂNTICO ENTRE 1856 A 2016 .....	42
FIGURA 16: ESQUEMA DA METODOLOGIA ADOTADA .....	46
FIGURA 17: BACIAS HIDROGRÁFICAS ESTUDADAS.....	46
FIGURA 18: SUBSISTEMA DO SIN .....	47
FIGURA 19: ESQUEMA DA USINA HIDROELÉTRICA .....	48
FIGURA 20: COMPARATIVO DA ENA MENSAL EM MW MED POR SUBSISTEMA PARA O PERÍODO DE 1931 A 2014.....	58
FIGURA 21: ENA MENSAL EM MW MED POR BACIA PARA O PERÍODO DE 1931 A 2014 ...	60
FIGURA 22: TESTE DE TENDÊNCIA.....	61
FIGURA 23: ANÁLISE DE TENDÊNCIA.....	63
FIGURA 24: ANÁLISE DE VARIABILIDADE.....	64
FIGURA 25: ANÁLISE DE VARIABILIDADE.....	65
FIGURA 26: ANÁLISE DE VARIABILIDADE.....	66
FIGURA 27: ANÁLISE EM ONDELETAS .....	67
FIGURA 28: ESPECTRO DE ONDELETAS .....	70

FIGURA 29: MAPA DA VARIÂNCIA DA BANDA DE ALTA FREQUÊNCIA (1 A 10 ANOS) .....	72
FIGURA 30: MAPA DA VARIÂNCIA DA BANDA DE MÉDIA FREQUÊNCIA (11 A 33 ANOS) ....	73
FIGURA 31: MAPA DA VARIÂNCIA DA BANDA DE BAIXA FREQUÊNCIA- RESÍDUO (34 A 84 ANOS) .....	74
FIGURA 32: PROJEÇÕES DE ENA PELO MODELO WAR PARA O PERÍODO DE 2015 A 2024 COM BASE NA BANDA DE MÉDIA FREQUÊNCIA .....	76
FIGURA 33: PROJEÇÕES DE ENA PELO MODELO WAR PARA O PERÍODO DE 2015 A 2024 COM BASE NA BANDA DE MÉDIA FREQUÊNCIA .....	78
FIGURA 34: PROJEÇÕES DE ENA PELO MODELO WAR PARA O PERÍODO DE 2015 A 2024 COM BASE NA BANDA DE MÉDIA FREQUÊNCIA .....	79
FIGURA 35 : PROJEÇÕES DE ENA PELO MODELO WAR PARA O PERÍODO DE 2015 A 2024 COM BASE NA BANDA DE BAIXA FREQUÊNCIA .....	81
FIGURA 36: PROJEÇÕES DE ENA PELO MODELO WAR PARA O PERÍODO DE 2015 A 2024 COM BASE NA BANDA DE BAIXA FREQUÊNCIA .....	83
FIGURA 37: RAZÃO DE VEROSSIMILHANÇA OBTIDA ENTRE O MODELO WARs E CLIMATOLOGIA PARA AS BACIAS DO SIN .....	83
FIGURA 38: ENA MENSAL EM MWMed POR BACIA PARA O PERÍODO DE 1931 A 2014 ...	98
FIGURA 39: ESPECTRO DE ONDELETAS .....	100
FIGURA 40: ANÁLISE DE VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS .....	102

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CÁLCULO DA VARIÂNCIA PARA AS BANDAS DA SÉRIE HISTÓRICA DE ENA DE 1931 A 2014 .....	68
TABELA 2: PRODUTIVIDADE (MW <sub>MED</sub> /M <sup>3</sup> /S).....	92
TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS POR SUBSISTEMAS SEGUNDO O PROGRAMA MENSAL DE OPERAÇÃO - PMO.....	96

## **LISTA DE SIGLAS**

- ANA-** Agência Nacional de Águas
- ARM-** Auto Regressive Model
- BEN -** Balanço Energético Nacional
- CPTEC-** Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- EIA-** Energy Information Administration
- ENA -** Energia Natural Afluente
- ENSO -** El Niño- South Oscillation
- FUNCEME-** Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
- IPEA-** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
- IEA-** International Energy Agency
- MME-**Ministério de Minas e Energias
- ODP -** Oscilação Decadal do Pacífico
- OMA-** Oscilação Multidecal do Atlântico
- ONS -** Organizador Nacional de Sistemas
- PMO-** Programa Mensal de Operação
- SIN –** Sistema Interligado Nacional
- TSM-** Temperatura da Superfície do Mar
- TO-**Transformada em Ondeletas
- TF-** Transformadas de Fourier
- ZCIT -** Zona de Convergência Intertropical
- ZCAS -** Zona de Convergência do Atlântico Sul



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Matriz energética brasileira.....	18
2.2	Caracterização do Setor Elétrico Brasileiro.....	22
2.3	Nexo: água, clima e energia.....	27
2.3.1	Modelo hidrotérmico.....	30
2.3.2	Escalas de planejamento.....	32
2.4	Variabilidade Climática das Séries Temporais.....	33
2.4.1	Variabilidade Sazonal.....	34
2.4.1.1	Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	35
2.4.2	Variabilidade Interanual.....	35
2.4.2.1	El Niño -Oscilação Sul (ENSO) e La Niña.....	36
2.4.2.2	Dipolo do Atlântico.....	39
2.4.3	Variabilidade Decadal.....	40
2.4.3.1	Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).....	40
2.4.3.2	Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA).....	41
2.5	Teste de Tendência e Variabilidade.....	43
2.6	Uso das Transformadas em Ondeletas.....	43
3.	METODOLOGIA.....	45
3.1	Região de Estudo.....	46
3.1.1	Aproveitamentos Hidroelétricos.....	46
3.1.2	Bacias Hidrográficas.....	46
3.1.3	Subsistemas Hidroelétricos.....	47
3.2	Cálculo da produtividade.....	47
3.3	Cálculo da Energia Natural Afluente-ENA.....	49
3.4	Dados Utilizados.....	50
3.5	Métodos estatísticos aplicado nas Séries históricas de ENA.....	50
3.5.1	Padronização das variáveis anuais e cálculo da anomalia média anual ...	51
3.5.2	Aplicação das Média Móveis.....	51
3.5.3	Regressão Linear, Teste de Mann-Kendall e Declividade de Sen.....	52
3.5.4	Uso da Transformada em ondeletas (wavelets).....	54
3.5.5	Modelo Wavelets Auto Regressivo (WAR).....	55
3.5.6	Avaliação do Modelo por meio do Método da Máxima Verossimilhança	56

4.	RESULTADOS .....	58
4.1	Variabilidade Sazonal da ENA .....	58
4.1.1	Análise por Subsistema .....	58
4.1.2	Análise por Bacia.....	59
4.2	Tendência e Variabilidade da ENA anual.....	61
4.2.1	Análise do Teste de Tendência, Médias Móveis por Subsistema.....	61
4.2.2	Análise do Teste de Tendência, Média Móveis por Bacias.....	62
4.4	Decomposição do sinal usando a Transformadas em Ondeletas (Wavelets)...	66
4.4.1	Análise do espectro de Wavelets por Subsistema .....	66
4.4.2	Análise da variância para as bandas da série histórica de ENA por Subsistema.....	68
4.4.3	Análise do espectro de Wavelets por Bacias .....	69
4.4.4	Análise da variância para as bandas da série histórica por Bacia.....	71
4.5	Projeções de Energia Natural Afluente (ENA) pelo modelo Wavelets Auto-Regressivo (WAR) para o período de 2015 a 2024.....	75
4.5.1	Projeção com base na Banda de Alta Frequência.....	75
4.5.2	Projeção com base na Banda de Média Frequência por Bacia .....	75
4.5.3	Projeção com base na Banda de Baixa Frequência por Bacia.....	79
4.5.4	Análise de desempenho do Modelo WARs.....	83
5.	CONCLUSÃO.....	84
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	86
7.	APÊNDICES .....	92

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade (ENEL, 2017). O aumento demasiado da população tecnologicamente ativa aumenta também o consumo por energia. 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 o consumo de energia elétrica.

Em um sistema de produção de energia elétrica com base hidrotérmica, como é o caso do Brasil, onde as hidroelétricas compõem a maior parcela de geração de eletricidade, é fundamental ter métodos para prever a oferta de energia para o bom gerenciamento do sistema. Diferentemente das termoelétricas, onde a produção de energia é constante, as hidrelétricas têm sua carga de produção variável de acordo com as condições climáticas. Para tanto, é necessário se dispor de métodos capazes de prever o quanto as hidroelétricas serão capazes de produzir energia em função das condições climáticas esperadas.

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). Não existe um consenso entre os pesquisadores com relação a previsibilidade do setor energético, com relação as projeções decadais. Mas 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 e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (são componentes associadas à variabilidade da temperatura na superfície do mar) com a modificação do ciclo hidrológico.

A análise do comportamento energético de médio prazo do Sistema Interligado Nacional (SIN), é fundamental para minimizar os impactos de eventos de secas e evitar crises energéticas graves no país. Nesse contexto, o exercício de cenarizar o futuro é, por certo, bastante desafiador para o planejador energético, mas absolutamente imperativo e

essencial ser realizado, uma vez que, pelas características intrínsecas do setor energético, as decisões precisam ser tomadas com bastante antecipação (EPE, 2014).

Assim, a Energia Natural Afluyente (ENA), produzida pelas usinas hidroelétricas a partir do produto entre a vazão natural afluyente aos reservatórios em níveis a 65% de seus volumes úteis operativos e sua produtividade<sup>1</sup>, é um importante parâmetro de observação.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo geral analisar os padrões de variabilidade das séries de Energia Natural Afluyente (ENA) para o período de 1931 a 2014; e projetar a ENA para os anos de 2015 a 2024, com base nesses padrões de variação, por aproveitamentos hidroelétrico, bacias hidrográficas, e por Subsistema Hidroelétrico do SIN. Tem como objetivos específicos:

- Mostrar como a ENA pode ser um parâmetro de planejamento hidroelétrico assim como as vazões naturais, precipitações e outras variáveis hidrológicas;
- Verificar a relação da ENA com fenômenos físicos que condicionam a variabilidade do clima;
- Documentar o comportamento Sazonal, Interanual e Decadal para as bacias e subsistemas do SIN;
- Apresentar uma metodologia que poderá ser aplicada por gestores de recursos hídricos em planejamento energético;

A presente dissertação está organizada em sete seções. A primeira, introdução, em que é apresentado o tema, objetivos e importância do estudo. A segunda seção, trata do referencial teórico, que discorre da matriz energética nacional, faz-se uma abordagem sobre a tríplice: água, clima e energia, o qual colabora com a dinâmica do planejamento hidroelétrico, a variabilidade climática que está relacionada com o regime pluviométrico e conseguinte com a disponibilidade de vazões nos reservatórios, além de uma abordagem sobre a aplicação de tendências e análises de ondeletas, bem como a caracterização do setor elétrico brasileiro de como ele é constituído. A terceira seção trata-se da metodologia abordada neste estudo onde faz-se uma apresentação da região de estudo, como é calculado a ENA, e a descrição dos métodos estatísticos aplicados nas séries temporais de ENA. Na quarta seção, apresenta-se os resultados obtidos das análises de tendências, projeções, etc. Na quinta seção, apresenta-se as conclusões do trabalho. A

---

<sup>1</sup> A produtividade de uma usina depende do rendimento da turbina, do rendimento do gerador e da altura líquida de queda, obtida pela diferença do nível a montante e o nível médio do canal de fuga do reservatório.

sexta seção apresenta a bibliografia adotada para fundamentação desse estudo e, por fim, os Apêndices para complementar os resultados obtidos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

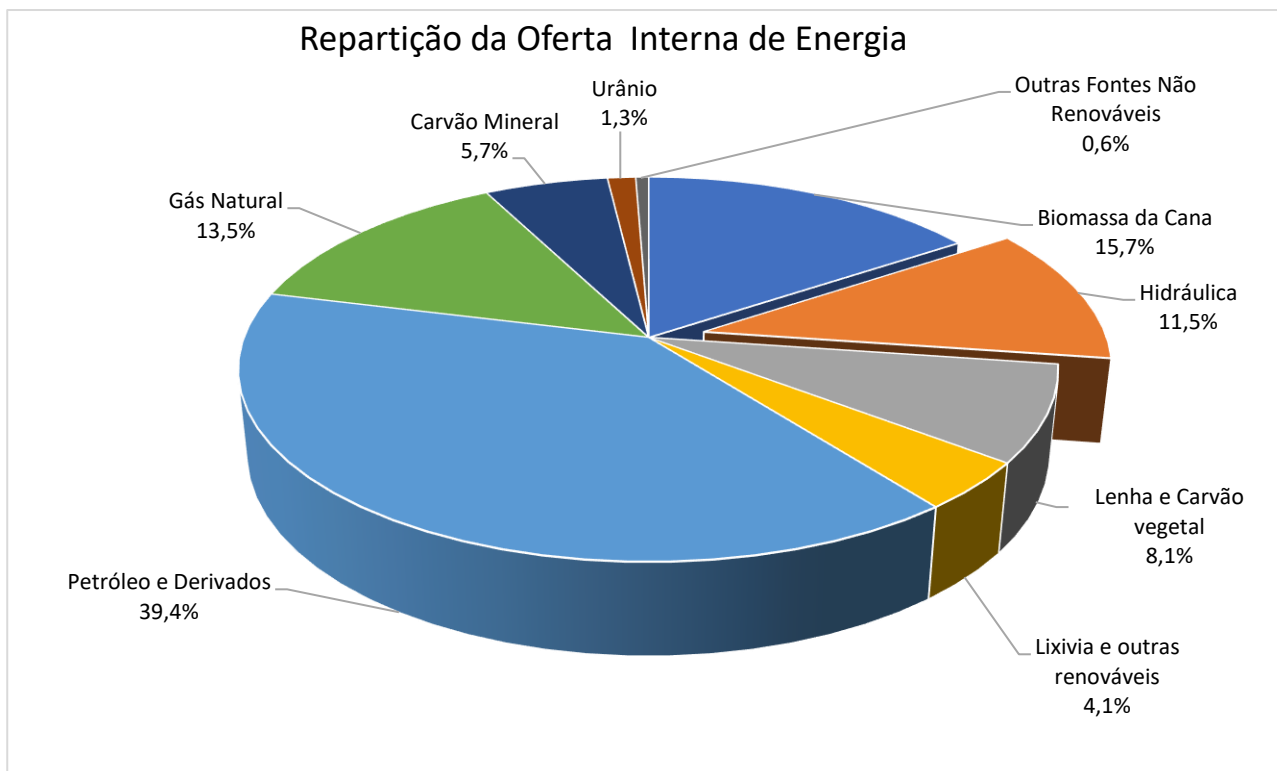
### **2.1 Matriz energética brasileira**

A energia é extremamente importante para o desenvolvimento econômico de uma nação. O mundo tecnológico e globalizado exige uma estreita dependência pelo uso do petróleo. E, pensar em não o utilizar (ou minimizar o uso) tornou-se uma tarefa muito difícil.

A busca por fontes alternativas que contribuam para minimizar os efeitos danosos ao meio ambiente e que forneçam utilidade, flexibilidade e economia para a sociedade tem sido um constante exercício para os meteorologistas, engenheiros e pesquisadores. Com o uso das tecnologias, torna-se mais difícil usar energias de maneira racional, de modo a equilibrar a sustentabilidade com o desenvolvimento econômico. As energias não renováveis, principalmente as oriundas do petróleo, como gás natural e gasolina, causam danos à natureza e contribuem com o aquecimento global. Como alternativa, busca-se, atualmente, a maior utilização de energias renováveis, como a biomassa (lenha, carvão vegetal, bagaço, material orgânico etc.), a eólica, a solar, a hidráulica e a maremotriz, essas fontes estão apresentando um forte desenvolvimento, especialmente por causa dos altos preços do petróleo e também pela poluição atmosférica causada pela queima de combustíveis fósseis.

A matriz energética brasileira é diversificada, composta por várias fontes, dentre elas as fontes renováveis que representam um percentual considerável na geração de energia elétrica para o país como as hidroelétricas.

De acordo com a Figura 1, levando em consideração a Repartição de Energia no Brasil, o Balanço Energético Nacional (BEN,2015) destaca que 39,4% da energia produzida no Brasil provém de fontes renováveis, desse total cerca de 11,5% é de fonte hidráulica.



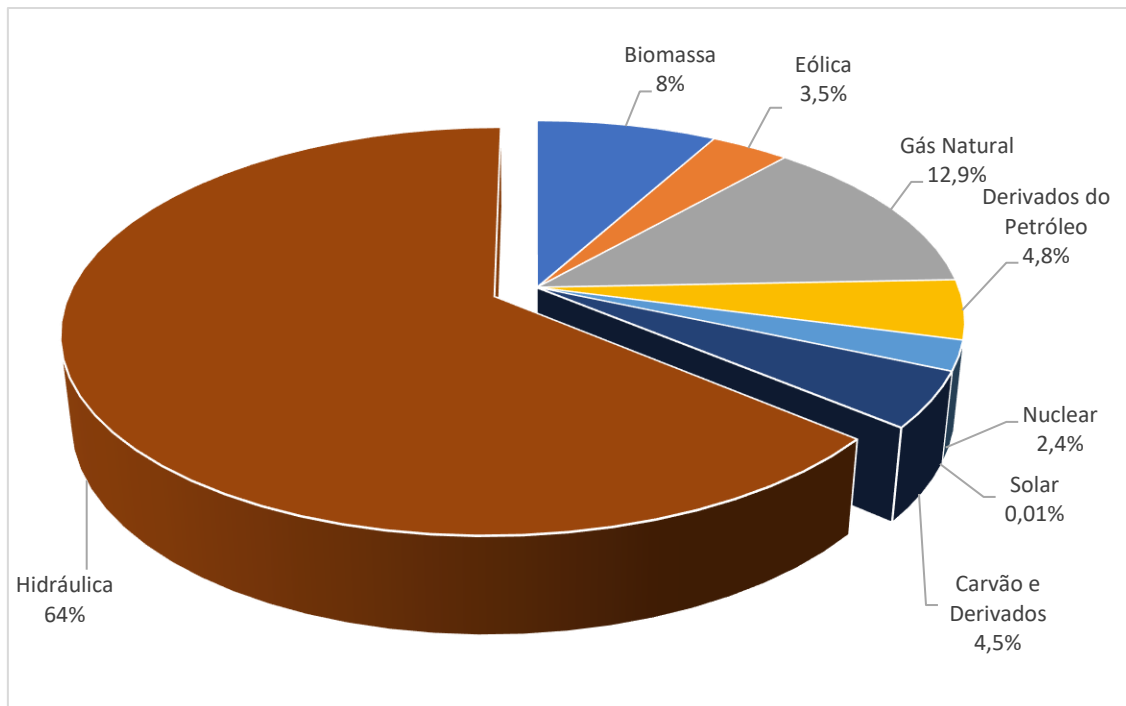
**Figura 1:** Repartição da oferta de energia Interna

FONTE: Balanço Energético Nacional, ano base 2015 (Adaptado)

Segundo o BNE (2016), o Brasil dispõe de uma matriz energética, no que se refere à produção de eletricidade, predominantemente renovável. Com destaque para a geração hidráulica que responde por 64,0% da oferta interna. A energia provida da biomassa, de parques eólicos e solares representam 8%; 3,5% e 0,01% respectivamente.

As fontes renováveis representam 75,5% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. (EPE, 2016).

As fontes não renováveis respondem a 24,5% da oferta interna de eletricidade com a contribuição de 12,5% do gás natural, 4,8% de derivados do Petróleo, 2,4% provida das usinas nucleares e os outros 4,5% do carvão e derivados. Ver Figura 2.



**Figura 2:** Oferta Interna de Energia Elétrica

FONTE: Balanço Energético Nacional, ano base 2016

Segundo os dados disponibilizados no *Independent Statistics Analysis*<sup>2</sup>(2016), representado graficamente na Figura 3, a produção de hidroeletricidade cresceu consideravelmente no Brasil até meados de 2011. O Brasil gerou 424,04 bilhões de Quilowatts-horas em 2011, no entanto em 2012 e 2013 houve uma queda, respectivamente, de 3 e 8,7% na geração de energia. Segundo *Independent Statistics Analysis*<sup>1</sup> (2016), muitas das instalações de geração de energia hidrelétrica do Brasil estão longe dos principais centros de demanda, resultando em elevadas perdas de transmissão e distribuição.

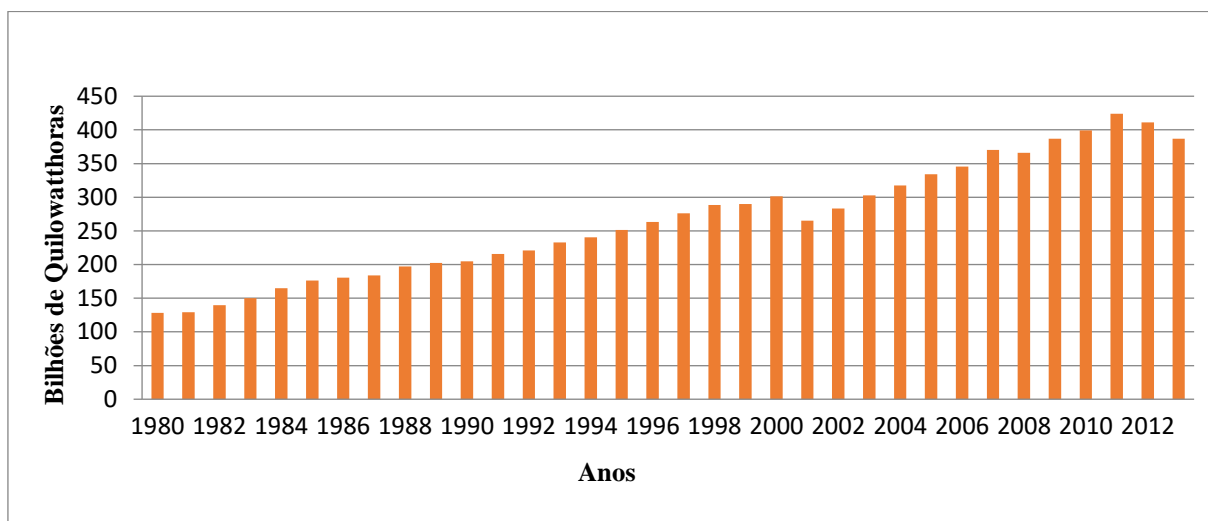
Acrescente-se a isso, o efeito adverso do clima também afeta a geração de energia elétrica. No Brasil, nos anos de 2000 e 2001, este foi um dos fatores causadores do racionamento nacional de energia. O Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável – CEBDS relata algumas possíveis causas disso. Dentre outros fatores decisivos para o período popularmente conhecido como “apagão”, a falta de investimento em expansão, geração e transmissão no setor elétrico,

<sup>2</sup> Disponível em:

<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=33&aid=12&cid=BR,&syid=1980&eyid=2012&unit=BKWH>.



principalmente, foi uma das causas na queda da produção de energia hidrelétrica no período, que variou de 28% a 46% comparado aos valores de 2000 (CEBDS, 201-).



**Figura 3:** Geração de Hidroeletricidade no Brasil dos anos de 1980 a 2013

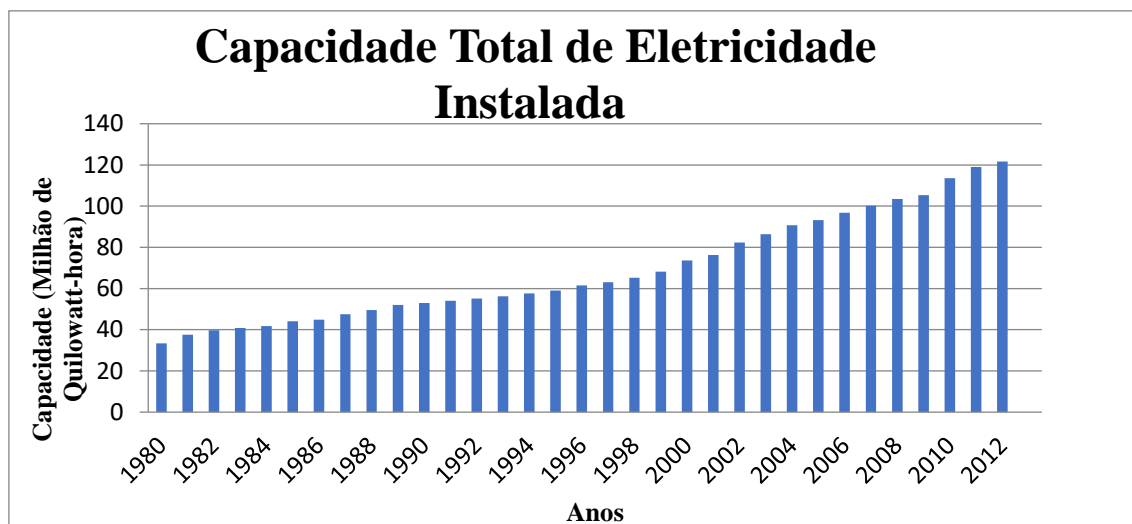
FONTE: Autor (Dados do IEA)

A Itaipu Binacional, a maior usina hidrelétrica do mundo por geração, localizada no rio Paraná, gerou 87,8 bilhões de kWh de eletricidade em 2014, uma queda de cerca de 11% em relação ao ano de 2013, segundo o *Energy Information Administration* (EIA). Para mitigar o risco e a escassez de oferta de energia como resultado do tempo seco e de condições adversas do clima, o Brasil se destaca na construção da terceira maior usina hidrelétrica do mundo: Belo Monte, que está inserida na Bacia Amazônica e após a conclusão ficará atrás apenas da represa de Três Gargantas, na China, e da barragem de Itaipu Binacional.

Segundo o Ministério de Minas e Energias, o Brasil gerou 590 bilhões de Quilowatt-hora (kWh) de eletricidade em 2014. As usinas de serviço público representaram 572 bilhões de kWh, os autoprodutores representaram 52,2 bilhões de kWh e o restante foi negociado ou contabilizado como perdas.

O setor industrial representou um consumo de 206 bilhões de kWh, o setor residencial consumiu 132 bilhões de kWh e o setor comercial consumiu 91 bilhões de kWh. A energia hidroelétrica respondeu por 65,2% da eletricidade total gerada no Brasil. (IEA,2017).

O gráfico da Figura 4 mostra a capacidade total de eletricidade instalada no Brasil. O país atingiu um recorde de capacidade de geração de energia hidroelétrica em 2012, como observa-se na Figura 4 com dados do *Independent Statistics Analysis*.



**Figura 4:** Capacidade Instalada de Eletricidade no Brasil nos anos de 1980 a 2012

FONTE: Autor (Dados do IEA)

Segundo o Ministério de Minas e Energias, o consumo total de energia elétrica para 2030 é estimado em 1.083,4 TWh, o que significa uma expansão de 4,0% ao ano desde 2005. Observe-se que a estratégia para atendimento dessa demanda contempla iniciativas na área de eficiência energética (adicionais a um progresso autônomo intrinsecamente considerado nas projeções) que supririam, em tese, uma parcela, cerca de 5%, dessa demanda. Assim, o requisito de produção seria de 1.030,1 TWh.

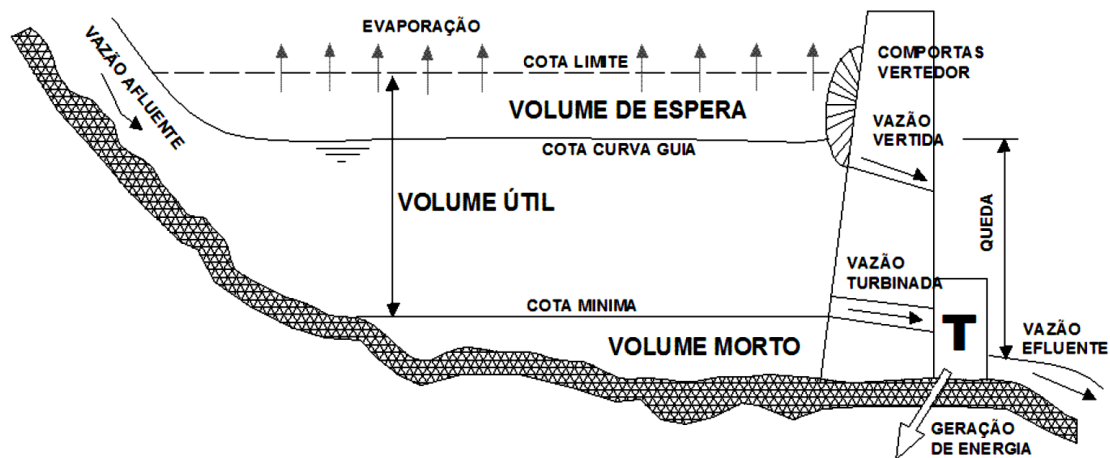
## 2.2 Caracterização do Setor Elétrico Brasileiro

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico<sup>3</sup> de grande porte com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial e têm forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2016).

<sup>3</sup> Baseia-se no equilíbrio entre as termoelétricas e as hidroelétricas (Pires e Holtz, 2001)

No Brasil, a energia elétrica é gerada por várias fontes como mostrado na Figura 2 com participação significativa das usinas hidroelétricas. Então o dimensionamento e operação dos reservatórios e a garantia do menor custo operacional faz-se necessário para que se tenha otimização e lucro na geração de energia e reflita em um menor custo ao consumidor final. A operação dos reservatórios do SIN é feita levando em consideração o volume de água em diferentes zonas. Uma das regras de operação mais utilizadas inclui a divisão do volume útil do reservatório. A distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal (BRAVO, 2008).

A Figura 5 mostra o esquema das cotas de volumes de água de um reservatório. Um reservatório pode ser descrito, do ponto de vista físico, por seus níveis e volumes característicos, definido por Lopes (2002) como: *volume operacional* que corresponde à cota mínima para a operação adequada do reservatório; *volume morto* que corresponde a parcela do volume inativo ou indisponível para fins de captação d'água; *volume útil* corresponde ao volume compreendido entre os níveis de água mínimo operacional e máximo operacional; *volume de espera* corresponde à parcela do volume útil do reservatório destinada ao amortecimento de ondas de cheias visando ao atendimento às restrições de vazões à jusante.



**Figura 5:** Variáveis intervenientes na operação de um reservatório.

FONTE: BRAVO, 2008

O balanço hídrico de um reservatório corresponde ao cálculo das entradas e saídas de água, durante um dado intervalo de tempo, a diferença entre estas duas parcelas corresponde ao volume de armazenamento do período (ROCHA, 2015). As entradas e

saídas de afluências é ajustada em função dos seus usuários. Então o volume de água do reservatório destinara-se ao uso para o abastecimento humano, para a criação de animais, para a indústria e para produção de alimentos, esses disputam diretamente com o uso da água para a produção de energia, dentre outros exemplos como o uso para a navegação, esportes e lazer.

Os aproveitamentos do SIN (Usinas, Reservatórios) estão distribuídos 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.

A Figura 6 a seguir mostra o diagrama unifilar das bacias do Grande e Paranaíba com modelo cascata.

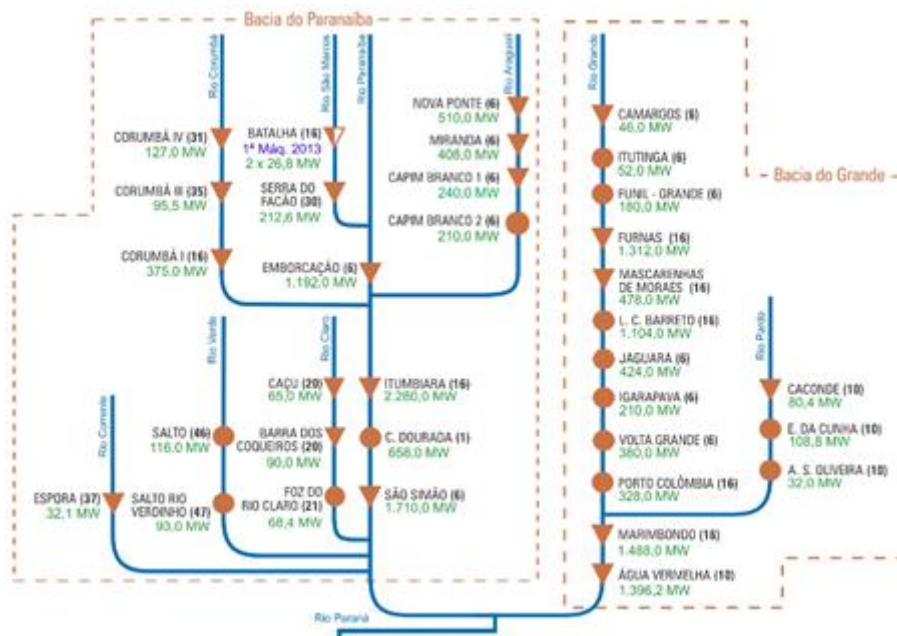





Figura 6: Aproveitamento hidroelétricos do SIN divididos por bacia.

FONTE: ONS, 2016

O símbolo  representa uma usina com reservatório, elas são construídas para o controle de cheias e com o objetivo de garantir recursos hídricos em períodos de estiagem.

O símbolo  representa uma usina a fio d'água que não dispõem de reservatório de água, ou têm dimensões menores ou irrelevantes, geralmente as usinas a fio d'água são adotados quando se deseja ou não se pode haver grandes impactos ambientais com áreas alagadas.

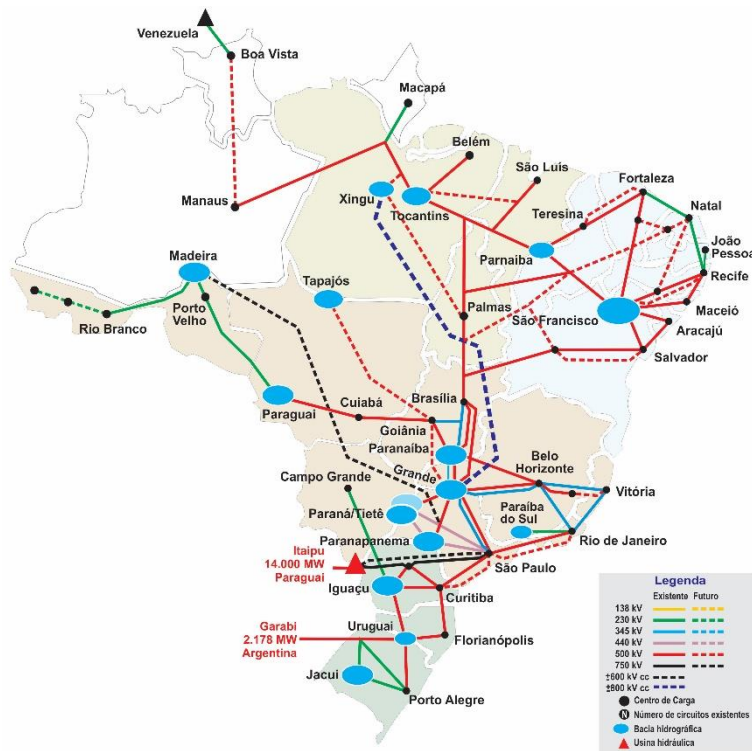
Enquanto o símbolo  representa uma usina em construção. O setor elétrico brasileiro é composto por uma rede interligada de aproveitamentos, as usinas hidroelétricas, produzindo energia elétrica através das vazões incrementais de cada aproveitamento

hidroelétrico. Pode-se entender como vazões incrementais como sendo a diferença entre vazão naturalizada do posto imediatamente à jusante pela vazão naturalizada do (s) posto (s) imediatamente à montante.

A Figura 6, mostrar algumas usinas a fio d'água no curso do Rio Grande (L. C. Barreto, Jaguará, Igarapava, Volta Grande e Porto Colômbia) que se beneficiam diretamente das usinas com reservatório que se encontram a montante delas (Furnas e Mascarenhas de Moraes) (MARQUES; DIAS; ANJOS, 2016). As usinas de Itutinga e Funil Grande produzem energia em função também do que se incrementa da usina com reservatório de Camargos. Alguns aproveitamentos hidroelétricos não produzem energia, pois, geralmente, são usinas de bombeamento ou usinas em construção.

O setor elétrico deve planejar e operar seus reservatórios e usinas levando em consideração as interligações elétricas entre as usinas pertencentes as diferentes bacias hidrográficas (Figura 7). Isto é, a coordenação deve ser também feita em relação ao sistema elétrico ultrapassando os limites das bacias hidrográficas. Isto porque as estiagens não ocorrem simultaneamente em todas as bacias e, quando falta água numa bacia, as outras podem suprir as falhas. Portanto uma usina conectada ao sistema interligado é bem mais útil, em termos de capacidade de atendimento ao mercado, do que uma isoladamente. Por isso, ao contrário do que ocorre num sistema termoeletrico, a remuneração de uma usina hidrelétrica não pode ser feita com base na energia que ela produz e sim com base em algum “fator participação” na produção agregada do sistema hidrelétrico com um todo. (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2006)

O SIN é dividido em quatro subsistemas: Região Sudeste/Centro-Oeste, Região Sul, Região Norte e Região Nordeste que se conecta por uma extensa malha de transmissão que possibilita a transferência de excedentes energéticos e permite a otimização dos estoques armazenados nos reservatórios das usinas hidroelétricas. Com a interconexão elétrica das usinas através do SIN, o fornecimento de energia torna-se mais eficiente e menos sujeito às eventuais restrições de oferta regionais, pois a energia gerada em uma região com abundância de água pode ser redirecionada de forma a equilibrar o sistema como um todo (ABRADEE, 2017).



**Figura 7:** Sistema Interligado Nacional

FONTES: ONS, 2016

O desenvolvimento da transmissão possibilitou o aproveitamento de recursos mais distantes dos centros consumidores e, ainda, com a interligação, o aproveitamento das diversidades hidrológicas existentes entre as bacias, notadamente entre as do Sul e as do Sudeste (MME, 2007). Ainda, segundo o Ministério de Minas e Energias (2007), a região Norte e Centro-Oeste concentra um grande potencial a desenvolver, apenas 9 e 31% do potencial, respectivamente, é explorado.

A Figura 8, ilustra o intercâmbio de energia elétrica entre os subsistemas em 2010. O Subsistema Sul recebeu um excedente de 1.703 MWmédio da usina binacional de Itaipú. Um excedente de 7.684 MWmédio é distribuído para o subsistema Sudeste/Centro-Oeste enquanto esse distribui um excedente de 3.682 MWmédio para o subsistema Norte e 13.996 MWmédio para o Subsistema Nordeste. O subsistema Norte também envia um excedente de 9.862 MWmédio para o subsistema Nordeste.



**Figura 8:** Intercâmbio entre subsistemas do Sistema Interligado Nacional em 2010 (MW médio)

FONTE: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS); elaboração EPE

O planejamento da operação é feito levando em conta as interdependências operativas entre as usinas, bem como a interconexão entre os subsistemas e a integração dos recursos de geração e transmissão no atendimento a carga total do sistema (RAMOS, 2011).

### 2.3 *Nexo: água, clima e energia*

De todos os recursos naturais a água é a mais utilizada pelo homem. É difícil pensar em desenvolvimento econômico e sustentável sem não a mensurar. A água é um bem precioso, o seu uso é muito importante para a nação, tendo diferentes destinos. A água é usada para gerar energia. A energia é usada para fornecer água para as populações em seus mais diversos aspectos e necessidades. É importante citar que por menor que seja o uso da água, isso trará algum prejuízo (ANA, 2015)

A insuficiência na oferta de água para os diversos usos ou falta de água de boa qualidade geram efeitos diretos no dia-a-dia da população e na economia do país e têm exigido grande atenção na busca de alternativas para o enfrentamento dos problemas (ANA, 2015). Muitos impactos socioambientais e econômicos, por exemplo, em setores: da agricultura (irrigação, criação de animais, produção de alimentos etc); do comércio (navegação etc); da indústria, além do abastecimento humano e, principalmente, para a geração de energia elétrica são causados pela falta de água.

O clima condiciona as variáveis do ciclo hidrológico em uma dada região e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para os reservatórios (SILVEIRA, 2014). Portanto influencia na produção de energia hidroelétrica do país. É importante que haja uma harmonia mútua entre clima, água e energia, e que nenhum desses parâmetros seja independente.

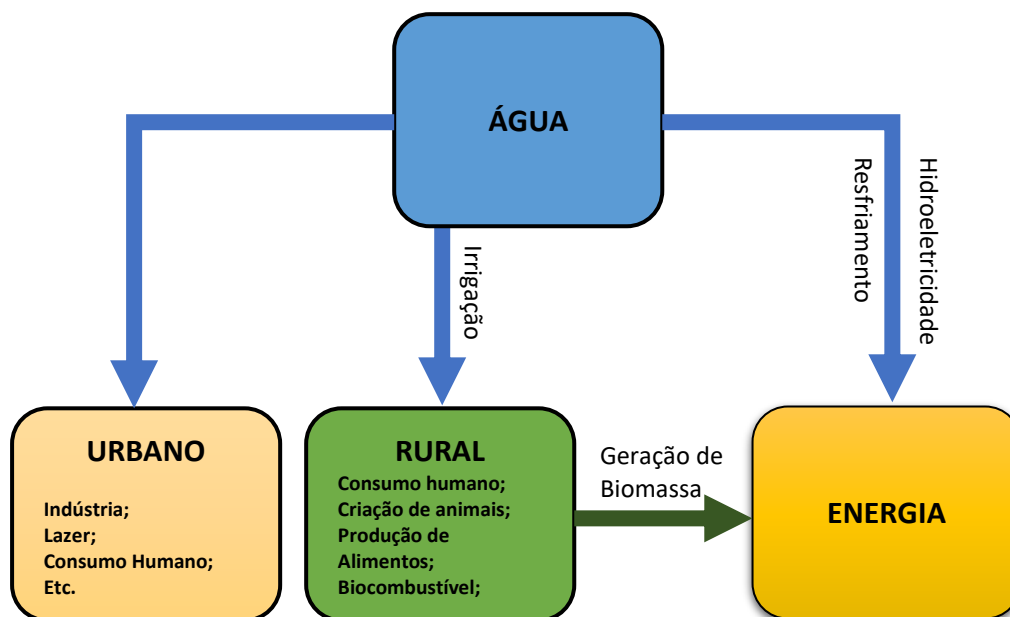
Segundo o *World Business Council for Sustainable Development* (2016), a água, a energia e as alterações climáticas estão intrinsicamente ligadas, se realmente queremos encontrar soluções sustentáveis, devemos assegurar que essa tríplice esteja organizada de maneira holística pois são peças do mesmo quebra-cabeça e, portanto, não é interessante observá-la de forma isolada. Tanto a água como a energia são essenciais para a equidade social, integridade do ecossistema e sustentabilidade.

Pode-se entender o conceito denexo entre Água, Clima e Energia por meio do esquema da Figura 9. A disponibilidade d'água está associada ao clima que está relacionada aos seus mais diversos usos. A demanda hídrica pode ser consuntiva, no caso de se utilizar a água para abastecimento público urbano ou rural, indústria, irrigação ou dessedentação animal, ou pode ser não-consuntiva, no caso, por exemplo, de uso da água para geração hidrelétrica, navegação ou lazer (ANA,2016).

Considerando à vazão de água retirada dos reservatórios em 2014 tem-se 15 % e 22 % é utilizada para o Abastecimento Urbano que inclui o uso na indústria e para o abastecimento da população urbana, respectivamente, segundo dados da Agência Nacional de Água (ANA).

Ainda fazendo uma análise nos dados da ANA, (2016) percebe-se que há uma parcela considerável de água utilizada para o uso rural que inclui o abastecimento da população rural (2%), criação de animais (6%) e o uso na irrigação (55%) para a produção de alimento seja para fins de consumo humano ou para a geração de energia de maneira indireta como por exemplo, a produção de cana-de-açúcar, milho, etc. utilizados para a produção de biocombustíveis.





**Figura 9:** Nexo água, clima e energia: Uso da Água

FONTE: Autor

De acordo com a Conjuntura dos Recursos hídricos no Brasil (2016) a demanda consuntiva total de água estimada para o Brasil foi de 2.275,07 m<sup>3</sup>/s em 2014, quando considerada a vazão retirada. O setor de irrigação foi responsável pela maior parcela de retirada (55% do total), seguido das vazões de retirada para fins de abastecimento humano urbano, industrial, animal e abastecimento humano rural. A vazão efetivamente consumida foi de 1.209,64 m<sup>3</sup>/s (ANA,2015)

A área irrigada em 2014 foi estimada em 6,11 milhões de hectares ou 21% do potencial nacional, que corresponde a 29,6 milhões de hectares. Observa-se expressivo aumento da agricultura irrigada no Brasil nas últimas décadas, crescendo sempre a taxas superiores às do crescimento da área plantada total (ANA, 2016).

Além desses usos, é preciso água para a geração de energia elétrica, que pode ser de maneira direta como o volume de água usada nas hidrelétricas<sup>4</sup>, ou de maneira indireta como a energia produzida a partir de biocombustíveis e/ou da

<sup>4</sup>A água captada no lago formado pela barragem é conduzida até a casa de força através de canais, túneis e/ou condutos metálicos, após passar pela turbina hidráulica, na casa de força, a água é restituída ao leito natural do rio, através do canal de fuga. Dessa forma, a potência hidráulica é transformada em potência mecânica quando a água passa pela turbina, fazendo com que esta gire, e, no gerador, que também gira acoplado mecanicamente à turbina, a potência mecânica é transformada em potência elétrica ONS, (2016)

biomassa<sup>5</sup>. Em algum estágio para a obtenção da biomassa ou para a produção de biocombustíveis usou-se água. Além da água que é utilizada nos processos de resfriamento nas usinas termoeletricas para a geração de energia elétrica e em outros processos industriais.

Quando se tem reduções na vazão dos rios, impactadas pela alteração do regime pluviométrico, ou mesmo pelo uso dos outros usuários ocasiona a diminuição do potencial de geração de energia elétrica por meio das hidrelétricas. Nessa situação, as centrais hidroelétricas são despachadas de forma que utiliza-se as termoeletricas para complementar a oferta de energia (IPEA, 2011) e assim suprir a demanda da sociedade.

### **2.3.1 Modelo hidrotérmico**

Segundo Pires e Holtz (2011) destacam a dependência das hidrelétricas em função das alterações climáticas (condições hidrológicas) ao contrário da energia termelétrica que apresenta uma disponibilidade avaliada em função da sua capacidade instalada e de fatores de indisponibilidade forçada e programada (manutenção).

Em países onde se predomina a produção de energia a partir de termelétricas as incertezas não têm muita importância, basta utilizar as térmicas em ordem decrescente de custo para garantir o abastecimento de energia com o menor custo possível ao consumidor. Porém em países com predominância de hidroelétricas, como é o caso do Brasil, as decisões tomadas hoje terão consequência no futuro pois o nível dos reservatórios e conseqüentemente a capacidade de geração de energia das usinas no futuro depende do volume de água utilizado no presente.

O objetivo do Operador Nacional do Sistema (ONS) é garantir que a energia elétrica seja oferecida sempre com o menor custo de operação daí surge a necessidade de se obter métodos, eficazes, para a previsão de demanda e oferta de energia. A partir desta previsão são tomadas medidas que garantam que toda a demanda projetada poderá ser atendida com garantia de custos mínimos.

Considerando que a disponibilidade de volume armazenado em um subsistema é limitada pela capacidade dos seus reservatórios, cujas aflúncias futuras são desconhecidas, então uma decisão de operação deve ser função das conseqüências futuras

---

<sup>5</sup> A biomassa é fornecida por matérias de origem vegetal, renováveis em intervalos relativamente curtos de tempo. Como por exemplo a lenha das florestas naturais, bagaço de cana, madeira cultivada especificamente para fins energéticos, resíduos das indústrias da serraria, aglomerados e celulose, além do biogás, obtido pela decomposição de dejetos (ONS, 2016).

desta decisão (RAMOS, 2011). A operação do sistema hidrelétrico depende do regime de chuvas, que é incerto. Para contornar as incertezas hidrológicas, a operação precisa incorporar mecanismos de projeção do comportamento hidrológico futuro (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2017).

A figura 10, mostra o dilema da tomada de decisão do ONS (a nível de operação) quanto à produção de energia por meio das hidroelétricas ou termoelétricas. Com a disponibilidade do volume de água no reservatório tem-se uma decisão a tomar: utilizar ou não a água para a geração de energia elétrica. Se, no presente, utiliza-se muita água dos reservatórios e, no futuro, ocorrer uma baixa pluviosidade, é provável que tenha-se que acionar as usinas termoelétricas para o atendimento da demanda de energia e ainda com risco elevado de não ser o suficiente, ocasionando-se um déficit e/ou gastos na compra de combustíveis fósseis para alimenta-las, tornando-se assim a energia ainda mais cara.



**Figura 10:** Dilema do Operador  
 FONTE: MOROMISATO, 2012

Por outro lado, se não utilizar a água, mantendo-se o nível dos reservatórios elevado e acionar as usinas termoelétricas preventiva (caso ocorra alta pluviosidade) haverá vertimento de energia no sistema, ocasionando-se um desperdício de energia que poderia ter aproveitada.

As incertezas associadas ao uso da água dos reservatórios trazem consequências para as decisões tomadas do operador sobre o uso das termoeletricas, já que isso pode influenciar nas condições futuras de oferta de energia e nos custos econômicos do SIN.

A geração termoeletrica é um componente importante na expansão econômica do sistema de geração, pois contribui com o atributo confiabilidade; a hidroeletrica a seu termo retribui o favor, contribuindo para a redução do fator de despacho das termoeletricas nos períodos de afluência favorável. O despacho imediato das térmicas passa a ser cada vez mais importante com a entrada de recursos não despacháveis de forma imediata no sistema: eólica, biomassa e usinas a fio d'água, como as de Santo Antônio, Jirau e Belo Monte. (PIRES e HOLTS, 2011)

Por ser um dos usuários da água, o setor de energia elétrica tem a responsabilidade e o dever de planejar a utilização deste recurso como insumo para a produção de eletricidade de forma racional, otimizada e colocando-se no contexto dos demais usuários do mesmo (MME, 2007).

O planejamento da operação de um sistema hidrotérmico é um problema de dimensão e de complexidade elevada, sendo, portanto, dividido em etapas de acordo com as decisões ao longo do tempo (MOTA, 2010). As escalas de planejamento podem ser analisadas no horizonte de longo, médio e curto prazo como descrito por Silveira (2014), Mota (2010), Ramos (2011).

### ***2.3.2 Escalas de planejamento***

Muitos estudos como o de Silveira (2014), Mota (2010), Ramos (2011), apresentam o planejamento do Setor elétrico em escalas de planejamento descrita em intervalos de tempos: curto prazo, médio prazo e longo prazo.

Em curto prazo o planejamento é em nível operacional que se refere a atividades repetitiva em algumas horas a alguns meses. Como por exemplo, a operação de sistemas de recursos hídricos em tempo real e também a operação de redes hidrológicas ou monitoramento (SILVEIRA, 2014).

No planejamento da operação de médio prazo tem-se um horizonte de estudo de alguns meses a alguns anos. Faz-se uma representação detalhada do processo estocástico de vazões afluentes aos reservatórios e as usinas hidrelétricas que compõem cada sistema são representadas de forma agregada (RAMOS, 2011).

No planejamento a longo prazo considera-se a operação com um horizonte de vários anos à frente, de três anos a algumas décadas, em virtude disso necessita que sejam

inseridos, em caráter estratégico, a variabilidade do clima e as mudanças climáticas (MOTA, 2010; SILVEIRA, 2014). Neste estágio trabalha-se com planejamento estratégico com políticas de longo prazo, associada a aplicação de infraestrutura capaz de suprir a demanda de energia. No planejamento estratégico encontra-se a política de longo prazo, no Brasil um dos exemplos dessa política são os “Planos Diretores de Recursos Hídricos” (SILVEIRA, 2014).

A sociedade, em geral, precisa se adaptar e reavaliar suas abordagens quanto ao uso da água, tendo como critério a adaptação a variabilidade climática. Segundo o *World Business Council for Sustainable Development* (2016), a adaptação pode vir a um custo de mitigação, como a construção de uma infraestrutura mais robusta e resiliente. E assim tornar-se capaz de lidar com um futuro incerto. A inserção de novas tecnologias associada à vontade política são alguns dos fatores que trazem soluções reais à medida que cria-se esforços para acompanhar as necessidades de uma população que cresce exponencialmente.

## **2.4 Variabilidade Climática**

A combinação das escalas temporal e espacial dos fenômenos meteorológicos gera a variabilidade climática, que se refere às flutuações das condições meteorológicas e, por extensão, das condições climáticas em torno da média climatológica (ANGELOCCI e SENTELHAS, 2010).

Muitos estudos como o de Carvalho et al (2002); Kodama (1982) e Lázaro (2015) relacionam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) com mudanças na pluviosidade nas bacias do SIN e modificando diretamente o regime de vazões.

Silva e Galvêncio (2011); Neto e Junior (2016) e Dantas (2012) mostram uma relação direta de fenômenos interanuais como o El Niño, La Niña modulados por fenômenos climáticos de baixa frequência, ou seja, em escala de tempo maior, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) Mantua et al, (1997); Silva, (2012), que exercem um papel importante na variabilidade de precipitação no Brasil. Andreoli e Kayano (2005) identificaram uma relação direta de episódio de El Niño na fase positiva da ODP e uma ocorrência maior de La Niña, na fase negativa da ODP. A relação entre OMA e ODP tiveram influências sobre a precipitação total anual da Amazônia Ocidental (SILVA, 2012). As chuvas e vazões de rios na Amazônia e no Nordeste apresentam variabilidades interanual e em escala de tempo

interdecadal, que são mais importantes que tendências de aumento ou redução (DANTAS, 2012).

As mudanças e a variabilidade climática ocorrem em múltiplas escalas de tempo e afetam a tomada de decisão sobre o uso dos recursos hídricos sobre uma série de decisões (CEBDS, 201-). Logo, a análise das séries históricas de uma determinada variável hidrológica pode servir como parâmetro de planejamento, levando em consideração as forçantes climáticas.

#### **2.4.1 Variabilidade Sazonal**

Na maior parte do Brasil existe uma sazonalidade bem marcada, com estações secas e chuvosas bem definidas, de forma que ao final do período seco podem-se observar vazões muito abaixo da média e, inclusive, escassez de água (ANA, 2015). Uma tempestade pode ocorrer durante um período de horas, causando cheias, enquanto uma seca poderá ocorrer ao longo de meses ou anos. Os efeitos de tais eventos podem ser influenciados por decisões tomadas tanto no nível operacional, como o caso da retenção ou liberação de vazão, quanto a nível do planejamento a médio prazo ou logo a prazo no que se refere à construção de novos reservatórios.

Para manter uma maior garantia de água ao longo do tempo é necessário a utilização de reservatórios, capazes de reservar água nos períodos úmidos para oferecer nos períodos mais secos (ANA, 2015). As vazões naturais representam

A ENA possui grades flutuações sazonais e anuais, os reservatórios das hidrelétricas cumprem o importante papel de acumular energia nos períodos de volume elevado para ser utilizada nos períodos de volume baixo (IPEA, 2011). Por exemplo, em uma determinada bacia onde é possível verificar uma produção de ENA maior nos trimestres Janeiro/Fevereiro/Março e Outubro/Novembro/Dezembro pode-se trabalhar com a estocagem de vazão para que em seguida possa-se produzir energia em um período mais escasso. Num período com produção de ENA menor, como no trimestre Abril/Maio/Junho e Julho/Agosto/Setembro, é possível aproveitar as vazões estocadas no trimestre mais abundante. Dessa forma, os reservatórios hidrelétricos permitem a oferta de uma quantidade adicional de energia hidrelétrica nos períodos de ENA baixa, aumentando a confiabilidade do suprimento hidrelétrico (IPEA, 2011).

O comportamento da variabilidade sazonal das bacias do SIN tem relação com alguns fenômenos como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) descritos por LAZARO (2015) e SILVEIRA (2014).

#### ***2.4.1.1 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)***

A ZCIT apresenta, no Atlântico, a convergência dos ventos alísios do Norte e Sul, com movimentos ascendentes, baixas pressões, nebulosidades e chuvas abundantes e segue, preferencialmente, as regiões em que a temperatura da superfície do mar - TSM é mais elevada (MARENGO, 2011). Devido sua importância para o regime de chuva no nordeste brasileiro e outras regiões equatoriais, a ZCIT tem sido assunto de muitos estudos (ROSARIO; NOBRE; MELO 2003). Perturbações advindas do oceano Atlântico Tropical, associadas à ZCIT ou na forma de ondas do leste alteram as condições de tempo nas regiões Norte e Nordeste (LÁZARO, 2015).

A ZCAS é uma persistente banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde o sul e leste da Amazônia até o sudoeste do Oceano Atlântico Sul (CARVALHO et al, 2002; KODAMA, 1982). A ZCAS é responsável por modificações na pluviosidade na bacia do Amazônia, bacia dos rios Paraná (Região Sudeste) e Prata. Lázaro (2015) descreve que o ar que vem do oceano Atlântico passa por vários ciclos de formação de nuvens e chuva, num processo de reciclagem que mantém o ar úmido no seu trajeto para o sul. Este escoamento para o sul promove uma conexão aérea entre o ciclo hidrológico da bacia Amazônica e o da bacia dos rios Paraná e Prata.

#### ***2.4.2 Variabilidade Interanual***

O Brasil possui um amplo sistema de produção e transmissão de energia elétrica, sobre o qual as influências climáticas de vários fenômenos meteorológicos interferem diretamente. Devido a isso, várias bacias possuem comportamentos sazonais distintos, o que possibilita que o SIN aproveite ao máximo os recursos energéticos existentes. A sazonalidade hidrológica própria de cada região permite identificar também as condições de vazão interanuais de cada bacia, ocasionado pela ocorrência de anos mais secos ou anos mais úmidos.

Em períodos de ENA desfavoráveis o acúmulo de energia ainda existente nos reservatórios, se comparado a possibilidade de despacho das termelétricas, torna-se inviável, nesse sentido o acionamento das termelétricas revela-se essencial. Por outro lado, nos períodos de ENA favorável, a cadeia produtiva dos produtores de combustíveis ficaria ociosa, caso não sejam encontrados usos alternativos, interrompíveis, ao combustível não utilizado nos períodos de ENA favorável (IPEA, 2011).

Assim, o conhecimento das variabilidades climáticas mensais, sazonais e outras escalas de tempo pode melhorar a gestão hidroenergética nas condições atuais, colaborando com a adaptação de sistemas às condições de mudanças (CEBDS, 201-). O formato adotado na gestão das incertezas quanto à ENA e quanto às condições do suprimento de combustíveis é fator crucial na decisão da melhor composição econômica (IPEA, 2011) para a utilização da energia gerada pelas hidroelétricas ou pela termoelétricas.

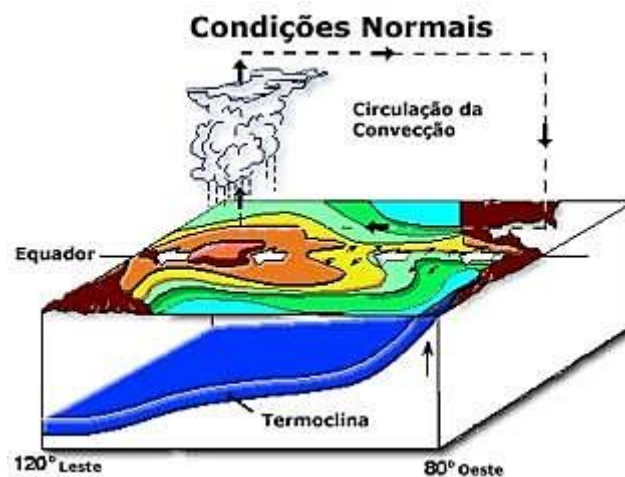
Alguns fenômenos de variabilidade interanuais como o El Niño – Oscilação Sul (ENSO) e La Niña, que ocorrem no Oceano Pacífico, podem alterar o regime de precipitação em algumas regiões do globo, inclusive na América do Sul (SILVA e GALVÍNCIO, 2011; NETO e JUNIOR, 2016; DANTAS, 2012; LÁZARO, 2015; SILVEIRA, 2014; ALVES, 2012).

#### **2.4.2.1 *El Niño -Oscilação Sul (ENSO) e La Niña***

Algumas influências climáticas de fenômenos como o El Niño e a La Niña podem comprometer a produção de energia no Brasil porque esses fenômenos interferem diretamente na variabilidade climática, ocasionando mudanças nos níveis de precipitação e conseqüentemente na disponibilidade de água para as bacias do SIN.

Segundo o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2017), em anos normais, os ventos alísios atuam nos baixos níveis da atmosfera e sopram na faixa equatorial no sentido Leste-Oeste. Estes ventos sopram do Nordeste, no Hemisfério Norte, e do sudeste, no Hemisfério Sul. Em condições normais, no Oceano Pacífico, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é mais baixa no setor leste, próximo à costa oeste da América do Sul, e mais elevada desde a parte central até o setor oeste, próximo ao continente australiano e a região da Indonésia. A água mais quente sobre o setor oeste do Oceano Pacífico Equatorial induz uma circulação conhecida por Célula de Walker. Ver a Figura 11.





**Figura 11:** Esquema do Oceano Pacífico em anos normais

FONTE: OLIVEIRA 2001

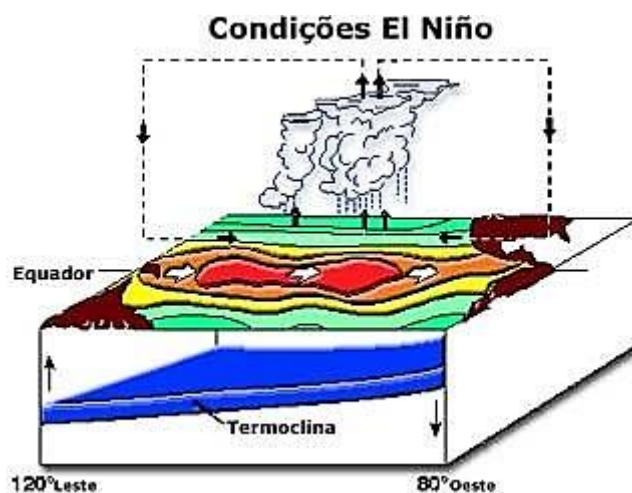
O El Niño é um fenômeno caracterizado pelas alterações dos padrões normais da TSM (aquecimento) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e o Pacífico Oeste, próximo à Austrália; altera o clima regional e global, mudando os padrões de vento em nível mundial e afetando, assim, os regimes de chuva em regiões tropicais e de latitudes médias (MARENGO et al, 2011).

Há um aquecimento da superfície do oceano ou temperaturas acima da média da superfície do mar (TSM), no Pacífico central e oriental. Sobre a Indonésia, as chuvas tendem a se reduzir enquanto as chuvas aumentam sobre o Oceano Pacífico tropical. Os ventos de superfície de baixo nível, que normalmente sopram de leste a oeste ao longo do equador ("ventos do Leste"), enfraquecem ou, em alguns casos, começam a soprar na outra direção (de oeste para leste ou "ventos de oeste") (NOAA, 2017).

As águas do Pacífico Central tornam-se mais aquecidas, ocasionando um deslocamento da Célula de Walker para leste, e fazendo com que, segundo Rodrigues (2012), uma força do ramo de ar descendente posicione-se sobre o continente sul-americano, provocando condições favoráveis de estiagem sobre a Amazônia. Alexandre (2012) descreve em seus estudos que o El Niño provoca um aumento na precipitação nas zonas noroeste e sudeste e uma diminuição nas zonas do extremo norte, leste e sul da bacia da região Norte do Brasil (bacia do rio Amazonas).

Por outro lado, pode ocorrer uma maior precipitação no sul do continente Americano. Nas zonas sul e leste da região Sudeste do Brasil, na região Sul do Brasil, inundações severas podem ser causadas em determinados anos nas regiões Sul e Sudeste (bacias dos rios Paraná, Paraguai e Uruguai) (ALEXANDRE, 2012).

Na região Nordeste do Brasil como um todo (bacias Norte e Nordeste do Atlântico, bacia do alto e médio São Francisco e norte das bacias do leste do Atlântico), o fenômeno de EL Niño contribui para secas severas em determinados anos. De uma forma geral o fenômeno La Niña provoca efeitos inversos nas regiões. Ver Figura 12.

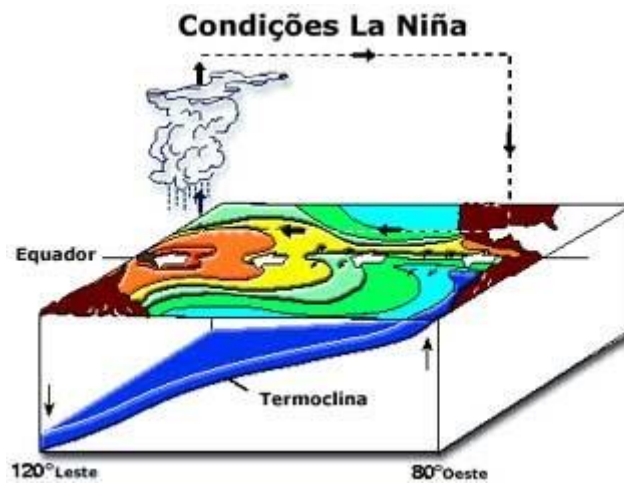


**Figura 12:** Esquema do Oceano Pacífico em anos de El Niño  
FONTE: OLIVEIRA, 2001

La Niña ou episódio frio caracteriza-se por um esfriamento anormal nas águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial; comumente, as anomalias climáticas associadas a La Niña são contrárias àquelas observadas em anos de El Niño, mas o mesmo não é estritamente linear (MARENGO *et al*, 2011). Em anos de La Niña, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), no Oceano Pacífico, diminui consideravelmente próximo à costa oeste da América do Sul e chega a ficar até 4°C abaixo dos valores normais (CPTEC, 2016).

Quando a pressão do ar é maior do que a média em Taiti e menor do que a média na Austrália, os ventos do Leste sopram mais intensamente do que o habitual. A água do oceano, mais fria do que o normal, se estende ao longo do Pacífico equatorial oriental e central, e os ventos continuam a empurrar a água para o oeste, aumentando novamente o nível do mar em torno da Indonésia. A água no Pacífico Ocidental aquece, o que aumenta a precipitação na região (NOAA, 2017).

Sobre a Indonésia, as chuvas tendem a aumentar enquanto a precipitação diminui sobre o Oceano Pacífico tropical central. Os ventos normais do Leste ao longo do equador se tornam ainda mais fortes (NOAA, 2017).



**Figura 13:** Esquema do Oceano Pacífico em anos de La Niña  
 FONTE: OLIVEIRA, 2001

#### 2.4.2.2 Dipolo do Atlântico

O Dipolo do Atlântico é o fenômeno oceano/atmosférico que inibe ou aumenta a formação de nuvens, aumentando os índices pluviométricos e o vento no Litoral norte/Nordeste Brasileiro (HASTENRATH.S & HELLER, L.,1997). Na escala interanual, o Padrão de Dipolo na TSM é o modo de variabilidade mais importante da variação climática sobre o Atlântico Tropical durante o outono (NOBRE, 1993).

Haas, *et al.* (2013) analisaram a influência de fenômenos meteorológicos, por exemplo, o Dipolo do Atlântico, de grande e média escala no desempenho e previsão dos Parques Eólicos da Tractebel Energia, localizados no Nordeste Brasileiro, e descrevem, ainda, que o Dipolo do Atlântico e o fenômenos El Niño podem agir conjuntamente para influenciarem na ZCIT. Deste modo, associações da fase negativas do Dipolo com El Niño tendem a reforçar os ventos, enquanto associações da fase positiva do Dipolo tendem a enfraquecê-los. Sousa, *et al.* (1994) avaliaram a variabilidade da precipitação em ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña em paralelo com atuação do dipolo negativo e dipolo positivo no Atlântico.

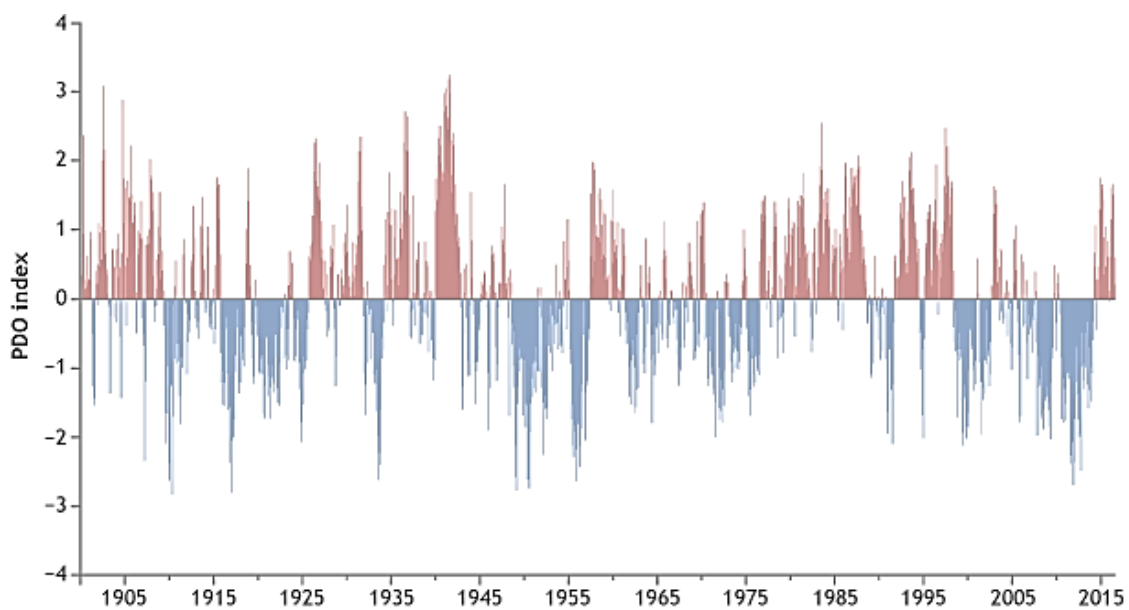
### **2.4.3 Variabilidade Decadal**

As influências da ODP e AMO estão relacionadas à variabilidade climática como estudado por Dantas *et al.* (2012). O autor verificou que há relação direta da ODP e da AMO com os índices extremos de precipitação e temperatura do ar da Amazônia Ocidental bem como nordeste brasileiro.

No período de 1930 a 1945, a fase quente da ODP e OMA se coincidiram. Em 1945, a ODP apresentou pontos mínimos. No período de 1945 a 1965, enquanto a ODP apresentou fase fria a OMA apresentou fase quente. No período de 1963 a 1970 há uma mudança de fases OMA e um enfraquecimento da fase quente da ODP, que é coerente com vazões anuais próximas a média histórica. No período de 1973 a 1980, a OMA atingiu pontos de mínimo na fase fria, coincidente com máximos de vazões, conforme série histórica.

#### **2.4.3.1 Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)**

Identificado pela primeira vez no final da década de 1990 (MANTUA, 1997), a ODP é um fenômeno que está relacionado com a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) semelhante aos eventos do El Niño e La Niña que, de acordo com o NOAA (2017), tem dois estados - quente e frio – e envolve vários outros aspectos do sistema climático. Segundo Mantua (1997), a ODP tem uma variação climática um pouco mais longa, com cerca de 20 anos a 30 anos de duração, por isso a ODP é um fenômeno climático com agregação de processos na sua maioria independentes.



**Figura 14:** Índice da Oscilação Decadal do Pacífico entre 1900 a 2016

FONTE: NOAA Climate.gov

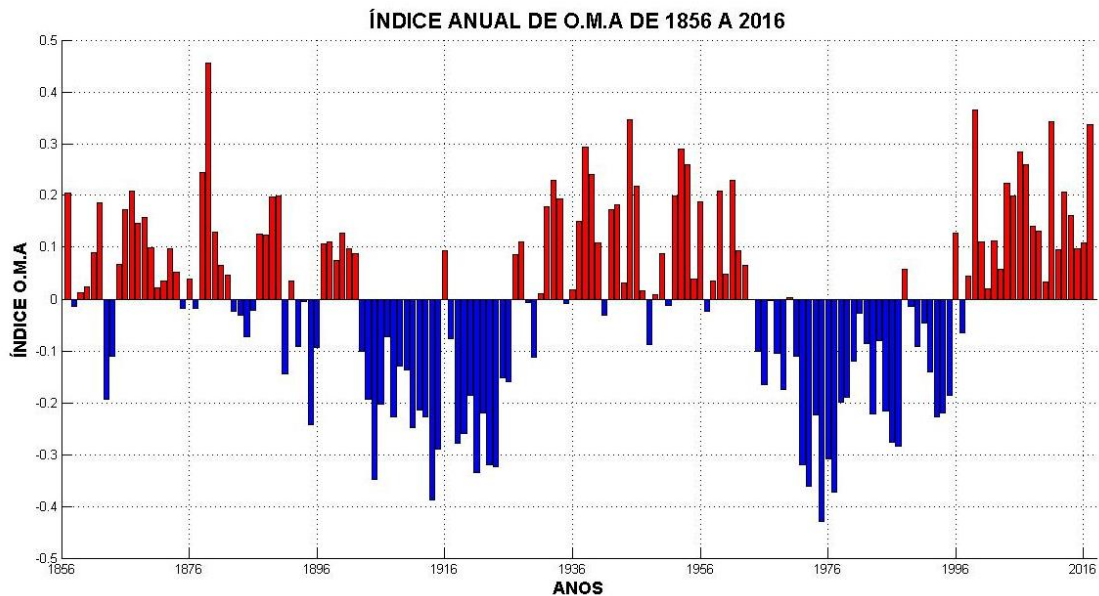
Observa-se na Figura 14 que a Oscilação Decadal do Pacífico, para o período registrado entre 1900 a 2016, apresenta uma oscilação periódica indicada por índices positivos (fases quentes) e por índices negativos (fases frias).

Durante a ocorrência da fase positiva da ODP há uma tendência de maior número de episódios de El Niño e mais intensos. Menor número de La Niña e menos intensas. Já durante a fase negativa da ODP há maior ocorrência de episódios de La Niña, que tendem a ser mais intensos e menor frequência de El Niños, os quais tendem a ser curtos e rápidos (ANDREOLI & KAYANO, 2005).

#### **2.4.3.2 Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA)**

Há uma série de oscilações naturais que podem influenciar o clima global do Atlântico Norte, como a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) (SCHLESINGER & RAMANKUTTY, 1994). A OMA é um modo de variabilidade natural que ocorre no Oceano Atlântico Norte e que tem sua principal expressão no campo da temperatura da Superfície do Mar (TSM). A OMA é identificada como um padrão coerente de variabilidade em TSMs do Atlântico Norte com um período que pode durar entre 60-80 anos (ALEXANDER, M. A *et al*, 2014).

A Figura 15 mostra o índice anual de OMA de 1856 a 2016. As partes em vermelho do gráfico mostram que a temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico Norte é mais quente do que a média, enquanto que as partes azuis mostram que a TSM do Atlântico Norte é mais fria.



**Figura 15:** Índice da Oscilação Multidecadal do Atlântico entre 1856 a 2016

FONTE: Autor (Dados: *NOAA.Climate.gov*)

O índice revela um período quente entre 1856 a 1896 e em cerca de 1930 a 1970, enquanto regimes mais frios ocorreram de 1902 a 1925 e entre 1970 a 1995. A partir de 1996 o índice OMA aumenta gradativamente novamente.

Os estudos de Silva (2012); Dantas (2012); Schlesinger e Ramankutty (1994) apontam que grande parte do Atlântico e até áreas do Pacífico Norte são afetados pela OMA. Alexander *et al.* (2014) examinam a estrutura espacial da TSM e anomalias atmosféricas durante as diferentes fases da OMA, com foco no setor atlântico incluindo algumas análises globais; e vinculando com os padrões de variabilidade na atmosfera e TSM. Dantas *et al.* (2012) verificam a influência das Oscilações Multidecais do Atlântico nos índices extremos de precipitação e temperatura do ar da Amazônia Ocidental.

## 2.5 Teste de Tendência e Variabilidade

As incertezas associadas a variabilidade climática permitem que possamos analisar tendência nas séries temporais. Para isso pode-se utilizar alguns métodos clássicos como Regressão Linear, Médias Móveis, Teste de Mann Kendall e de declividade de Sen para estimação de tendência.

Uma equação de regressão permite analisar por meio de uma variável dependente  $X_1$  em função de variáveis independentes  $X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ . Segundo Spiegel (1993), o emprego das médias móveis de ordens apropriadas pode eliminar as variações cíclicas e estacionas e irregulares, conservando-se dessa forma apenas o movimento da tendência. O teste estatístico de Man-Kendall é aplicado para um grande número de diferentes ordenações (permutações) aleatórias do conjunto de dados. O teste estatístico para os dados originais é, então, comparado com a distribuição do teste estatístico obtido dos dados permutados, obtendo-se o nível de significância para essa distribuição. A lógica por trás dessa abordagem é que no caso da hipótese nula, ou seja, de não existir uma tendência no conjunto de dados, cada ordenamento dos dados é igualmente provável (ALVES, 2013).

Gocic e Trajkovic (2013) estudaram os métodos não-paramétrico de Mann-Kendall e Sen para analisar tendência positiva ou negativa em dados meteorológicos. ALVEZ (2012) aplicou esses métodos para a análise de tendência de vazões e como ela se associa às mudanças climáticas. Costa *et al.* (2015) estudaram tendências na intensidade da chuva ocorrida durante o período menos chuvoso e chuvoso sobre a região semiárida do Nordeste do Brasil durante o período de 1961 a 2011.

É importante que se tenha conhecimento das séries temporais e seu comportamento ao longo dos anos. Assim, a avaliação de séries temporais é um importante instrumento para, através do comportamento passado, avaliar tendências futuras, especialmente no momento em que estudos de mudanças climáticas são mais frequentes (COSTA et al. 2015).

## 2.6 Uso das Transformadas em Ondeletas

As ondeletas são funções matemáticas que caracterizam os padrões de variação de uma série de dados, em diferentes componentes de frequência, permitindo a análise de cada componente em sua escala correspondente. A análise de ondeletas tem a localização

do tempo e da frequência em uma análise de sinal, pela decomposição ou transformação de uma série temporal unidimensional numa série difusa de tempo e frequência, simultaneamente. Assim, é possível obter informações da amplitude de quaisquer sinais periódicos dentro da série, bem como informações de como esta amplitude varia com o tempo (SILVEIRA *et al*, 2012).

As séries de Energia Natural Afluente dos aproveitamentos hidroelétrico do SIN possuem característica não estacionárias que, conforme Bolzan (2004), seus momentos estatísticos, média, variância, e etc, variam em quaisquer segmentos tomados desta série. A transformada em ondeleta é uma ferramenta conhecida pela característica de decompor funções e de reconstruí-las, apresentando uma resolução razoavelmente boa (RODRIGUES, 2015). Por meio das ondeletas é possível analisar uma periodicidade de eventos em escalas diferentes de variabilidade, pois a série não precisa ser necessariamente estacionária.

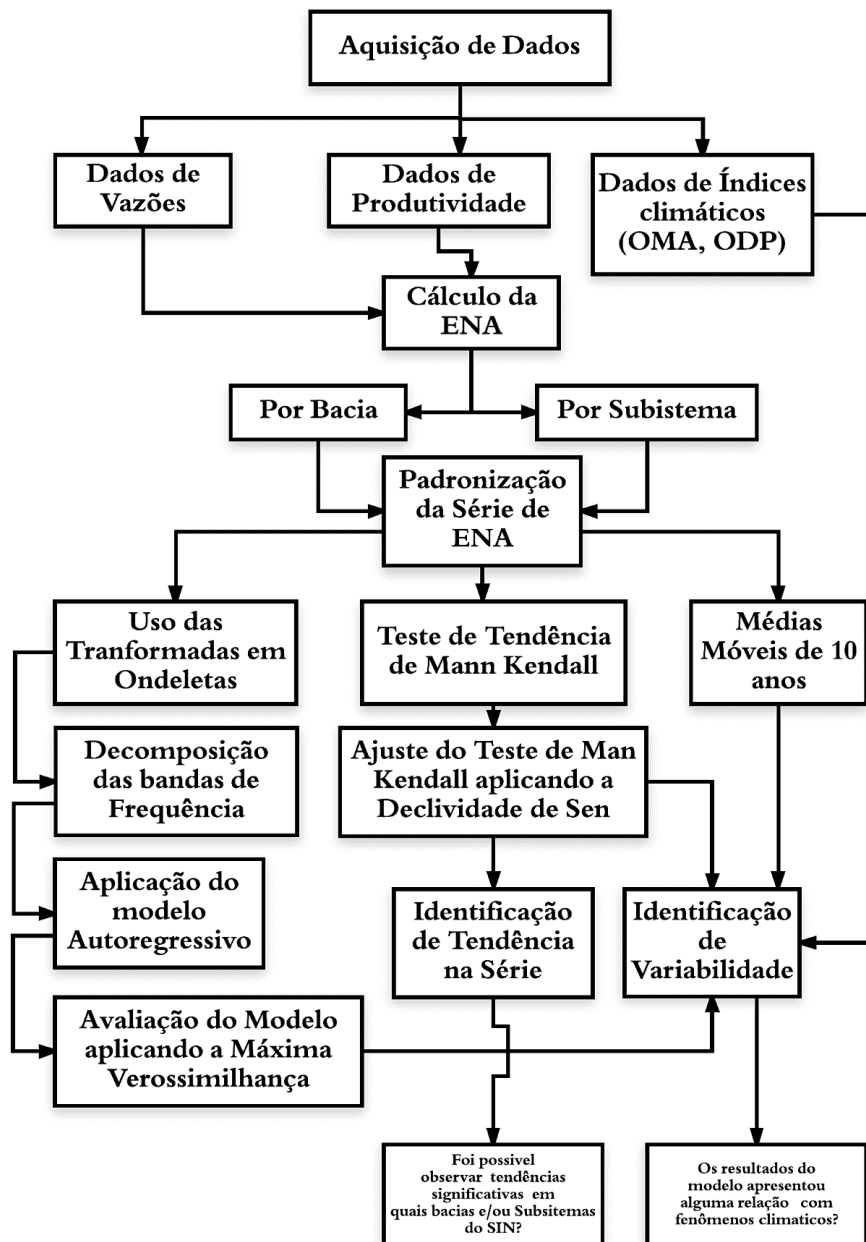
Muitos estudos usam a transformadas de Ondeletas como Bolzan (2004), que mostra uma análise em ondeletas aplicada em um sinal geofísico, número de manchas. Lázaro (2011) usa as transformadas em ondeletas para analisar a variabilidade plurianual da precipitação de chuvas sobre o Nordeste do Brasil, região Amazônica e região da bacia da Prata durante o século XX. Rodrigues (2004) usou uma metodologia para a realização de Análise de Variância (ANAVA) em séries temporais, utilizando as transformadas em ondeletas.

Sá *et al.* (1998) com o objetivo de melhor compreender a variabilidade do nível do alto rio Paraguai, aplicaram a técnica matemática que consiste na Transformada em Ondeletas aos dados da cota deste rio medida em Ladário, Mato Grosso do Sul. Silva (2008) usou as transformadas em ondeletas para a otimização do espaço computacional, tanto para armazenamento como para transmissão de imagens.



### 3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo compreende a utilização de dados de Energia Natural Afluente (ENA) dos aproveitamentos, bacias e subsistemas do SIN para análise de tendências e variabilidade climática nas séries a partir da aplicação de métodos clássicos (Média Móvel, Mann Kendall e Declividade de Sen, etc) e métodos modernos (Transformadas em Ondeletas - *Wavelets*). Bem como a aplicação de um modelo Auto Regressivo com base nas bandas de frequência reconstruídas pela Transformadas de Ondeletas. O esquema da Figura 16 ilustra, o procedimento metodológico aplicado neste estudo.



**Figura 16:** Esquema da Metodologia Adotada

FONTE: Autor

### 3.1 Região de Estudo

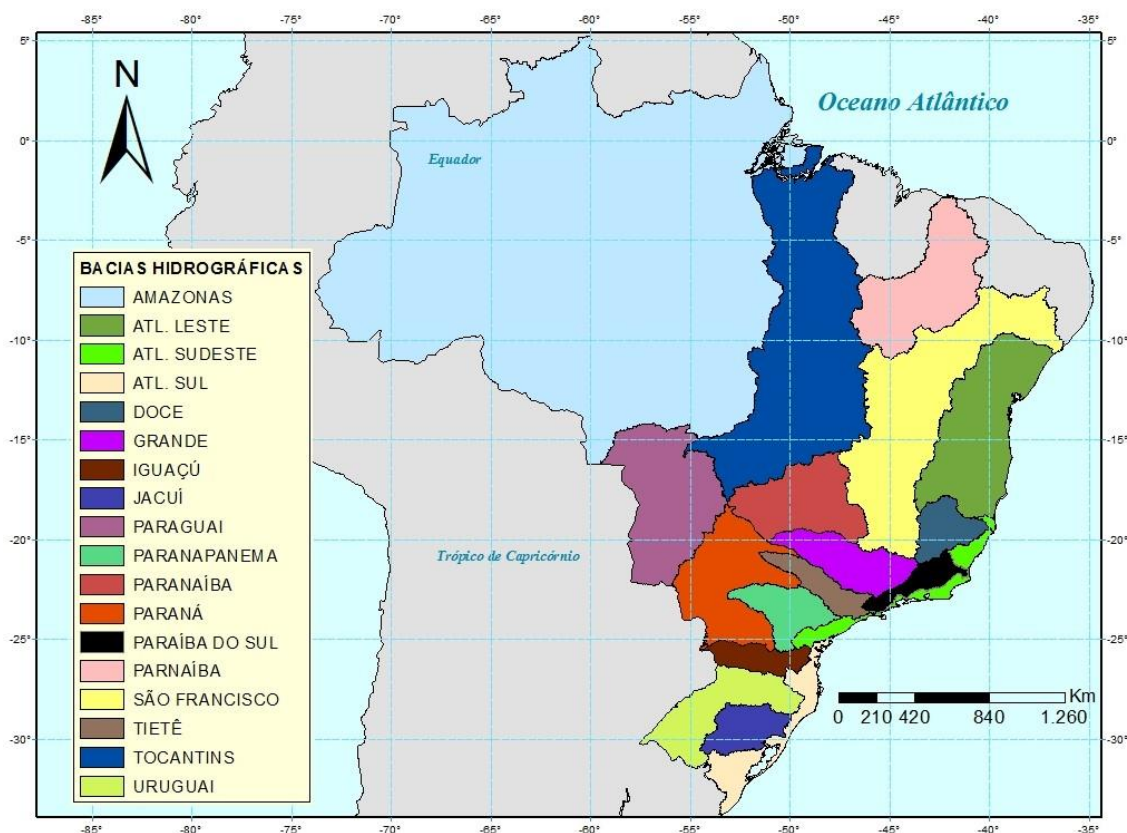
A região de estudo corresponde a 150 postos base considerados representativos, 18 bacias hidrográficas brasileiras e os 4 subsistemas hidroelétricos do Brasil.

#### 3.1.1 Aproveitamentos Hidroelétricos

As 150 usinas/reservatórios considerados neste estudo podem ser conferidas na Tabela 2- APÊNDICE A.

#### 3.1.2 Bacias Hidrográficas

A Figura 17 representa as bacias a saber: Grande, Paranaíba, Paranapanema, Paraguai, Parnaíba, São Francisco, Tocantins, Doce, Uruguai, Jacuí, Amazonas, Paraná, Tietê, Iguaçu, Atlântico Sudeste, Atlântico Sul, Paraíba do sul e Atlântico Leste.

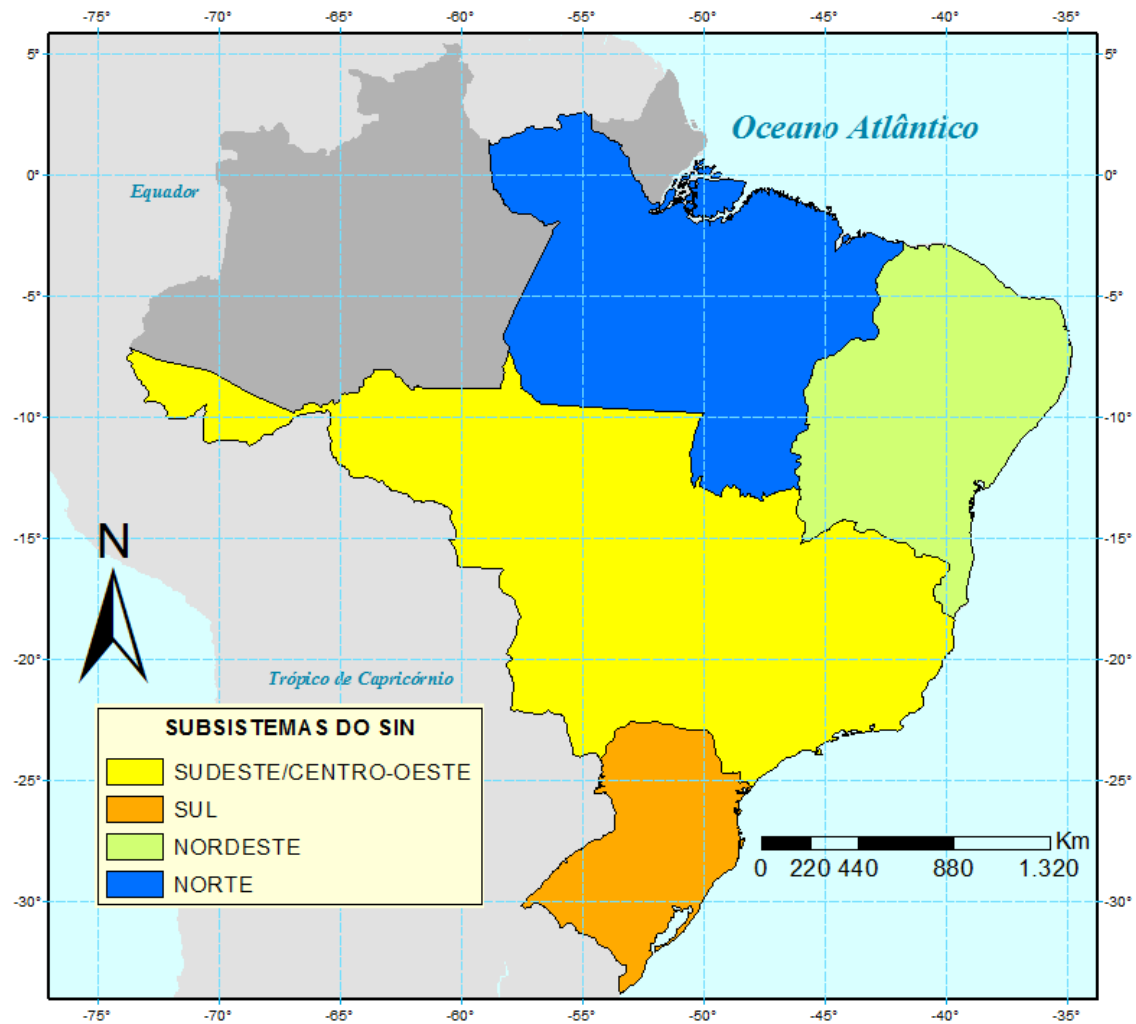


**Figura 17:** Bacias Hidrográficas Estudadas

FONTE: Autor (Arquivos Funceme)

### 3.1.3 Subsistemas Hidroelétricos

A Figura 18 apresenta a divisão geográfica dos 4 subsistemas do SIN: Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte segundo o ONS.



**Figura 18:** Subsistema do SIN

FONTE: Autor

## 3.2 Cálculo da produtividade de uma usina hidroelétrica

Para esse trabalho, não foram calculadas as produtividades dos reservatórios estudados, tais dados foram obtidos por meio do ONS e estão dispostos na Tabela 2-**APÊNDICE A**. No entanto, é importante que se conheça como é feito o cálculo dessa variável.

A produtividade (p) pode ser determinada como:

$$p = k.H.Q \quad (1)$$

Onde,

Q é a vazão em m<sup>3</sup>/s;

H é a altura de queda da usina;

k é  $9,8 \cdot 10^{-3} \cdot \text{rendimento Turbina-Gerador}$ .

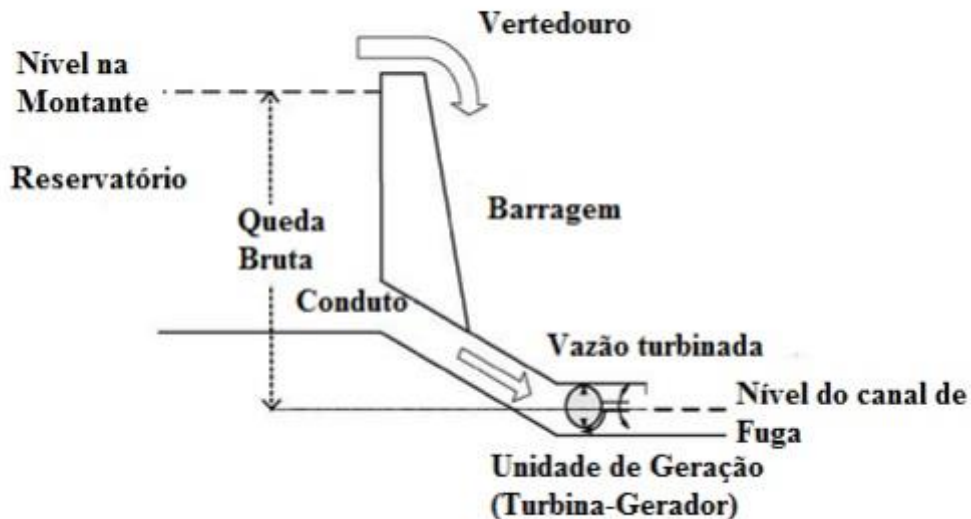
A altura H de queda da usina está relacionada à *altura de queda bruta* ( $h_b$ ) que pode ser obtida pela diferença de altura entre os níveis de água à montante do reservatório e do nível do canal de fuga à jusante definida por.

$$h_b = h_{m_t}(v) - h_{j_t}(Q, s) \quad (2)$$

Onde

$h_m$  é a cota do nível da água na montante e depende, basicamente, do relevo da região na qual o reservatório foi construído;

$h_j$  é a cota do nível da água na jusante ou no canal de fuga, depende da vazão defluente da usina.



**Figura 19:** Esquema da Usina hidroelétrica

FONTE: ARAÚJO, 2010

*Altura de queda líquida* ( $h_t$ ) é a *queda bruta* subtraída da *perda de carga* ( $h_a$ ) que, segundo Araújo (2010), é definido por:

$$h_t = hm_t(v) - hj_t(Q, s) - ha_{it}(Q, q) \quad (3)$$

Onde

$hm$  é a cota do nível da água na montante;

$hj$  é a cota do nível da água na jusante ou no canal de fuga;

$ha$  é a perda de carga nos condutos forçados representada como perda em altura;

$Q$  é a Soma das vazões turbinadas;

$s$  é a Vazão vertida;

$v_t$  é o Volume do reservatório.

### 3.3 Cálculo da Energia Natural Afluente-ENA

A partir das vazões incrementais mensais de cada aproveitamento hidroelétrico estimam-se as vazões naturais afluentes. A ENA é obtida, portanto, multiplicando-se a vazão natural de cada Posto Base por sua produtividade. A unidade de medida da ENA é geralmente em MWmed, que se refere à relação entre a energia gerada e o tempo de funcionamento das instalações.

A ENA é calculada a partir da energia produzida pelas vazões naturais afluentes e das produtividades equivalentes ao armazenamento de 65% do volume útil dos reservatórios dos aproveitamentos hidroelétricos. Os valores da ENA podem ser calculados em base diária, semanal, mensal ou anual e, também, por bacia e por subsistema, de acordo com os sistemas de aproveitamentos hidroelétricos existentes nas configurações de bacias hidrográficas e de subsistemas elétricos, com uso das seguintes expressões:

$$ENA_{bacia}(t) = \sum_{i=1}^n [Q_{nat}(i, t) \cdot p(i)] \quad (4)$$

$$ENA_{subsistema}(t) = \sum_{j=1}^m [Q_{nat}(j, t) \cdot p(j)] \quad (5)$$

Onde,

$t$  é o intervalo de tempo adotado para o cálculo da ENA;

$i$  é o aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

n é o número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

$Q_{nat}$  é a vazão natural do aproveitamento no intervalo de tempo considerado;

p é produtividade média do conjunto turbina-gerador do aproveitamento hidrelétrico, referente à queda obtida pela diferença entre o nível de montante, correspondente a um armazenamento de 65% do volume útil, e o nível médio do canal de fuga;

j é o aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos do subsistema considerado e;

m é o número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos.

### 3.4 Dados Utilizados

Utilizou-se dados de produtividade dos 150 aproveitamentos hidroelétricos dispostos na Tabela 2- **APÊNDICE A** obtidos através do ONS.

Foram utilizados também dados das séries históricas de vazões mensais naturalizadas, em metros cúbicos por segundo, dos respectivos aproveitamentos. O período da série histórica corresponde aos anos de 1931 a 2014.

Em seguida, calculou-se o produto entre os dados de vazões naturalizadas e de produtividade, no qual obteve-se o valor da ENA, somou-se todos os valores de ENAs dos postos, agrupou-os por bacias hidrográficas brasileiras de acordo com a classificação da Tabela 2- **APÊNDICE A** e usando a Equação (5) e, em seguida, por subsistema Equação (6) de acordo com a classificação da Tabela 3- **APÊNDICE B** definida pelo Programa Mensal De Operação – PMO, 2012.

Utilizou-se dados de índices climáticos, como o índice anual da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) e através do NOAA (*NOAA.Climate.gov*) e a ODP disponibilizados em <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> para os anos da série estudada de 1931 a 2014.

### 3.5 Métodos estatísticos aplicado nas Séries históricas de ENA

Aplicou-se nas séries históricas, no período estudado, o Teste de Man-Kendall no intuito de verificar se a ENA estava indicando alguma tendência de variabilidade positiva ou negativa.

As médias móveis foram utilizadas para suavizar o comportamento da série e torná-la mais fácil de interpretar de modo a identificar o comportamento interanual/decadal.

Foi usado também, nesse estudo, para caracterizar as variabilidades tanto no espaço como no tempo, a Transformada em Ondeletas (TO) ou Wavelets Transform (WT). As ondeletas foram utilizadas para a análise de variações de energia dentro da série, pela decomposição da mesma em tempo-frequência-espaço. Com ela pode-se determinar modos significativos de variabilidade e como eles variam no decorrer do tempo.

### ***3.5.1 Padronização das variáveis anuais e cálculo da anomalia média anual***

A análise da tendência das séries históricas de ENA foram feitas com base na padronizadas de acordo com a equação 7:

$$Z = \frac{X^j - \bar{X}}{\sigma} \quad (6)$$

Onde

Z é a variável padronizada;

$X^j$  é a variável anual de ENA para um ano j;

$\bar{X}$  é a ENA anual média da série histórica de 1931 a 2014 e

$\sigma$  é o desvio padrão da séries anuais.

O cálculo da anomalia padronizada foi feito a partir da divisão do valor da anomalia de ENA, em relação à média climatológica do período 1931 a 2014, pelo desvio padrão da série interanual de ENA do mesmo período, para um determinado ano. Assim, como definido em CPTEC (2014), a anomalia padronizada de ENA indica o número de desvios padrão associados a uma determinada anomalia de ENA anual.

### ***3.5.2 Aplicação das Média Móveis***

A média 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 entra um novo valor para o cálculo, o primeiro da série anterior é retirado e assim sucessivamente. Utilizou-se média móvel de 10 anos. 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  $x_1, x_2, \dots, x_N$  da série temporal de ENA no período de 1931 a 2014. Tem-se que a média móvel de ordem N, a que é obtida pela sequência das médias aritméticas:

$$\frac{x_1+x_2+\dots+x_N}{N}, \frac{x_2+x_3+\dots+x_{N+1}}{N}, \frac{x_3+x_4+\dots+x_{N+2}}{N} \dots \quad (7)$$

As somas dos numeradores de (7) são denominados totais móveis de ordem N (SPIEGEL,1993).

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

Sejam os dados observados  $x_1, x_2, \dots, x_k, x_j, \dots, x_n$  da série temporal de ENA no período de 1931 a 2014. Aplicou-se o teste de Mann-Kendall para tendência pois a série é independente. 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:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n Sinal(x_j - x_k) \quad (8)$$

Onde

$x_j$  e  $x_k$  são valores sequenciais de ENA;

$n$  é o tamanho da série temporal de ENA;

$Sinal$  é a função sinal.

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

Para determinar a declividade do Teste de Mann-Kendall, utilizou-se a equação descrita abaixo:



A declividade  $\beta$  é determinada por:

$$\beta = \text{Mediana} \left[ \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \right] \quad (9)$$

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

Segundo Devore (2006), existem parâmetros  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\sigma^2$  tais que para qualquer valor fixo da variável independente  $x$ , a variável dependente está relacionada a  $x$  por meio da equação do modelo:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (10)$$

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

Onde:

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

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

$\beta_0$  é a interceptador;

$\beta_1$  é a inclinação;

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

$n$  é o tamanho da amostra.

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

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (11)$$

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 pela equação (12).

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (12)$$

Se houver várias observações em um ou mais períodos de tempo, então o número de pares de dados pode ser estimado pela equação (13).

$$N < \frac{n(n-1)}{2} \quad (13)$$

Onde  $n$  é o tamanho da série.

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

$$Q_{\text{mediana}} = \begin{cases} Q_{(N+1)/2} & \text{Se } N \text{ for ímpar} \\ \frac{[Q_{(N)/2} + Q_{(N+2)/2}]}{2} & \text{Se } N \text{ for par} \end{cases} \quad (14)$$

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 (KAHYA e KALAYCI, 2004 *apud* ALVES, 2012).

### 3.5.4 *Uso da Transformada em ondeletas (wavelets)*

A Transformada em Ondeletas (TO) é definida matematicamente como sendo:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt \quad (15)$$

Em que os parâmetros  $a$  e  $b$  variam continuamente em  $\mathbb{R}$ , com  $a \neq 0$ , e  $a \in \mathbb{R}^+$  e  $b \in \mathbb{R}$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (16)$$

Onde

$\psi_{a,b}$  são as funções chamadas de *wavelets* filhas e são geradas a partir de dilatações e translações da *wavelets*-mãe  $\psi(t)$ ;

$\sqrt{a}$  corresponde a um fator de normalização da energia de cada ondeleta de forma a manter a mesma energia da ondeleta mãe;

$a$  parâmetros informações de escala;

$b$  parâmetro de translação.

Reunindo as duas propriedades, dilatação e translação, em um único protótipo de função base obteve-se as chamadas funções ondeletas, em que as dilatações e as translações são dadas por duas variáveis nomeadas  $a$  e  $b$ , respectivamente. Portanto, o termo ondeleta refere-se a um conjunto de funções com forma de pequenas ondas geradas por dilatações,  $\Psi(t) \rightarrow \Psi(2t)$ , e translações,  $\Psi(t) \rightarrow \Psi(t + 1)$ , de uma função base geradora simples  $\Psi(t)$ , a ondeleta-mãe (BOLZAN, 2004).

Em 1981, Morlet e Grossman desenvolveram uma função matemática que possuía energia finita, ou seja, ela possuía um início e um fim, além disso ela poderia dilatar e comprimir o sinal, eliminando o problema de janela temporal fixa que fora encontrada nas aplicações da transformada de Fourier, essa função matemática ficou conhecida como *wavelets* como descrito por Silva (2014).

Há diversos tipos de ondeletas, e algumas possuem características mais adequadas para determinadas aplicações. Foi considerado para este estudo a função *wavelet de Morlet*, dada pela Equação (17).

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (17)$$

com  $\omega_0 = 6$  e  $\eta = t/s$

onde

$t$  é o tempo;

$s$  é a escala da *wavelet* ;

$\omega_0$  é uma frequência não dimensional que representa uma onda modulada por um envelope Gaussiano.

Foram utilizadas três bandas: uma de alta frequência, de 1 a 10 anos; uma de média frequência, de 11 a 33 anos; e uma de baixa frequência, de mais de 33 anos. As ondeletas são funções ortogonais de modo que a correlação entre elas não é significativa. Assim, obteve-se a banda de baixa frequência (Resíduo), através da equação:

$$ENA_{bbf}(i) = ENA(i) - ENA_{baf}(i) - ENA_{bmf}(i) \quad (18)$$

Onde:

$ENA(i)$  é o valor da ENA média no ano  $i$ ;

$ENA_{baf}(i)$  é o valor da banda de alta frequência (1 a 10 anos) no ano  $i$ ;

$ENA_{bmf}(i)$  é o valor da banda de média frequência (11 a 33 anos) no ano  $i$ ;

$ENA_{bbf}(i)$  é o valor da banda de baixa frequência (a partir de 33 anos).

### 3.5.5 Modelo Wavelets Auto Regressivo (WAR)

Diz-se que  $X_t, t \in Z$  é um processo *autorregressivo de ordem p* e escreve-se  $X_t \sim AR(p)$ , se pode-se escrever o processo na seguinte forma (MORETTIN, 2008).

$$X_t = \phi_0 + \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (19)$$

Onde a estimativa da variável  $X_t$  para um tempo  $t$  depende de uma combinação linear de  $p$  termos da série observada, incluindo o termo aleatório  $\varepsilon(t)$  de ruído branco (erros de estimação com distribuição normal, média zero, variância constante e não-correlacionados). Os coeficientes  $\phi_i$  são parâmetros que ponderam os valores de  $X_t$ , do instante imediatamente anterior  $t-1$  até o mais distante  $t-p$ , sendo determinados através de técnicas de minimização do erro.

Com a decomposição das bandas a partir das transformadas em ondeletas fez-se a reconstrução do sinal aplicando um modelo auto-regressivo (AR) para as bandas de alta,

média e baixa frequência, considerando que as mesmas são ortogonais como descrito por (SILVEIRA, 2014). Dado pela equação 20:

$$z_i^p = \sum_{i=1}^b ARS_b(i) + ARS_{R(i)}(i) \quad (20)$$

Onde

$ARS_b$  representa o modelo autorregressivo de cada banda de alta e média frequência.

$ARS_R$  representa o modelo autorregressivo da banda de baixa frequência (resíduo).

Em seguida, é realizada a regressão linear dos dados descritos na seção 3.5.3.

A característica fundamental de um processo AR(1) se resume ao fato da observação atual estar correlacionada com a primeira observação anterior, ou seja, há uma correlação significativa na primeira defasagem (ou no primeiro lag), isto é, entre  $X_t$  e  $X_{t-1}$ . Como  $X_{t-1}$  também está relacionada com  $X_{t-2}$ , há indiretamente uma correlação na segunda defasagem, entre  $X_t$  e  $X_{t-2}$ . Entretanto, no caso de séries AR(1), essa correlação está implícita na primeira defasagem (JUNIOR e CATEN,2004).

Assim como Alves (2012), determinou-se o percentual da variância da série de ENA, que foi explicada por cada faixa de frequência ( $VarExp_i$ ) por meio da razão entre a variância da série reconstruída para uma dada banda  $i$  ( $\sigma_i^2$ ) e a variância da série histórica de ENAs ( $\sigma_{total}^2$ ), que também poderia ser o somatório das bandas  $i$ , sendo que elas são ortogonais, de acordo com a equação (21):

$$VarExp_i = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{total}^2} \quad (21)$$

### 3.5.6 Avaliação do Modelo por meio do Método da Máxima Verossimilhança

Para avaliar o modelo aplicou-se a estimativa da Máxima Verossimilhança em uma mostra aleatória  $X_1, X_2, \dots, X_n$  da série temporal de ENA cuja distribuição de probabilidade assumida depende de algum parâmetro desconhecido  $\theta$ . O principal objetivo foi encontrar um estimador pontual  $u(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , tal que  $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$  seja uma estimativa pontual "boa" de  $\theta$ , onde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são os valores observados da amostra aleatória.

Sejam  $X_1, X_2, \dots, X_n$  uma amostra aleatória de tamanho  $n$  da variável aleatória  $X$  com função de densidade (ou de probabilidade)  $f(x|\theta)$ , com  $\theta \in \Theta$ , onde  $\Theta$  é o espaço paramétrico. A função de verossimilhança de  $\theta$  correspondente à amostra aleatória observada é dada por:

$$L(\theta, x) = \prod_{i=1}^n f_{Y_i}(x_i|\theta) \quad (22)$$

O cálculo do desempenho na projeção, utilizando a projeção do WAR e a climatologia em comparação aos dados observados totais, é realizado conforme a equação 23:

$$Desempenho = \left( \frac{L(\theta)_{projeção}}{L(\theta)_{climatologia}} \right)^{1/n} \quad (23)$$

onde  $n$  é o número de anos da série histórica utilizada.

Quando  $Desempenho > 1$ , significa que houve uma melhora na previsão em relação à climatologia.

Quando  $Desempenho < 1$ , significa que houve uma piora na projeção.

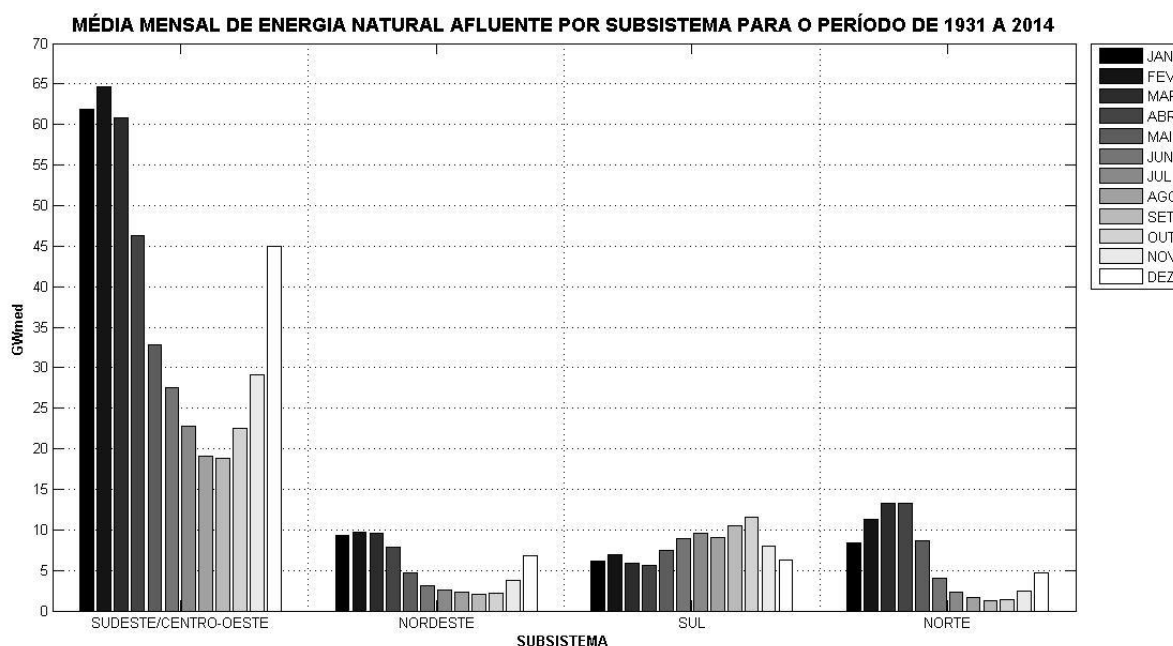
## 4. RESULTADOS

Para a caracterização da série histórica de ENA, produzida a partir das vazões naturais afluentes dos reservatórios e da produtividade de cada usina, serão apresentados, a seguir, os gráficos de climatologia; médias móveis; tendência (por meio do Teste de Man Kendall e declividade de Sen); testes das ondeletas- *Wavelets* (por Subsistema e por Bacia), mapas e tabelas para a análise do percentual de variância da série de ENA explicada por cada faixa de frequência e gráficos de projeções de ENA.

### 4.1 Variabilidade Sazonal da ENA

#### 4.1.1 Análise por Subsistema

A Figura 20 apresenta as médias mensais de ENA para os subsistemas Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste, Sul e Norte.



**Figura 20:** Comparativo da ENA Mensal em MWmed por Subsistema para o período de 1931 a 2014

FONTE: Autor

O Subsistema Sudeste/Centro-Oeste possui uma maior capacidade de produção de ENA. Observa-se um crescimento na produção de ENA a partir do mês de setembro,

atingindo seu valor máximo em fevereiro, a partir daí inicia um declínio até agosto, em setembro o ciclo continua.

As bacias do Subsistema Nordeste apresentaram médias mensais de ENA consideráveis entre os meses de dezembro a março. A partir de abril há um declínio dessas médias, apresentando produção mais baixa de ENA em setembro.

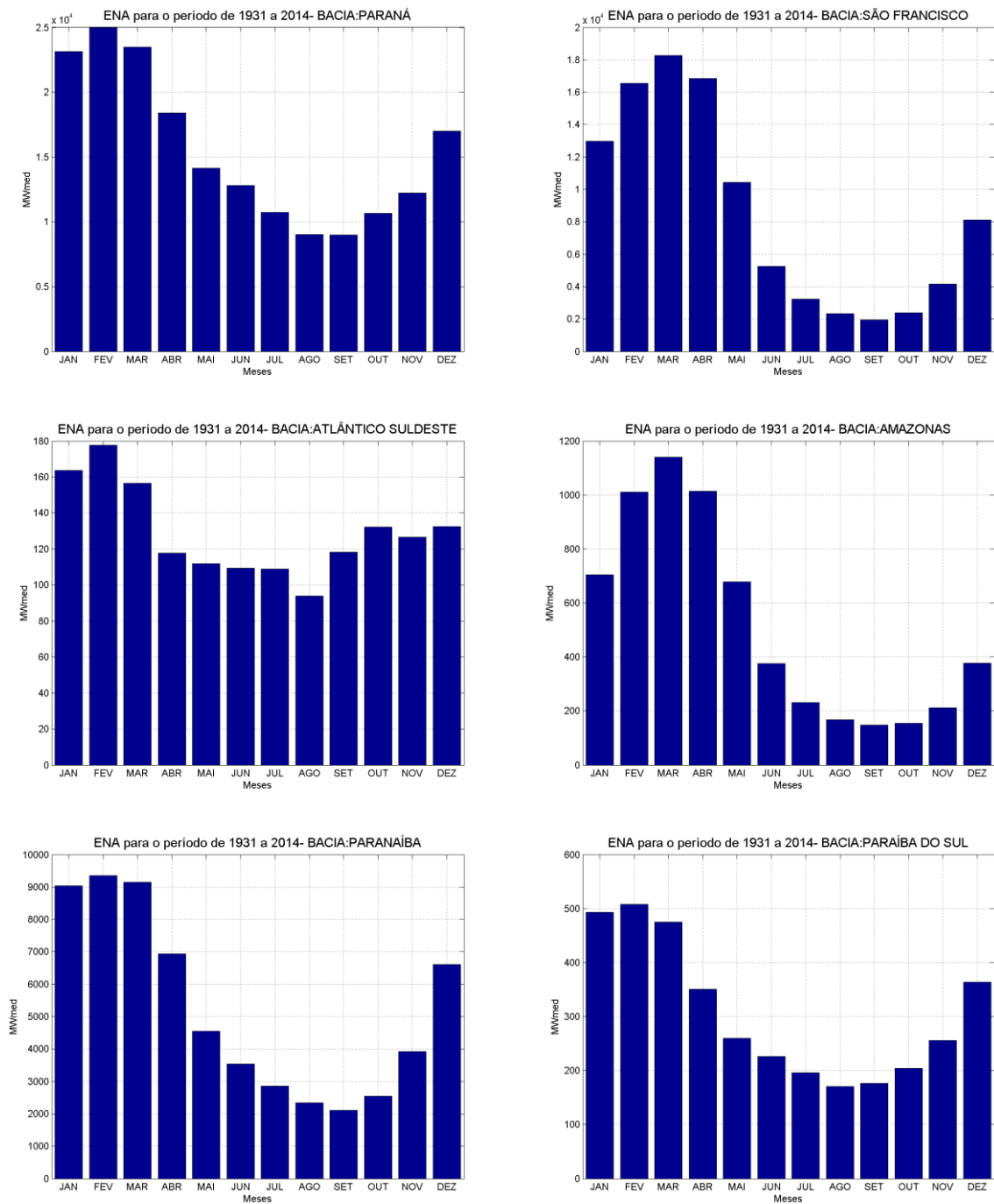
As Bacias do Subsistema Sul apresentaram variação de ENA um pouco irregular: de janeiro a fevereiro há um pequeno crescimento. De março a abril uma curta instabilidade, e a partir de maio observa-se um crescimento significativo, atingindo seu ponto máximo de produção de ENA em pouco mais de 11000 MWMed até outubro e em seguida apresenta um declínio brusco.

Observa-se que nas bacias do Subsistema Norte a produção de ENA cresce consideravelmente nos quatro primeiros meses do ano, aproximadamente em março e abril tem seu valor mais produtivo e a partir daí houve uma redução gradativamente nos meses subsequentes, começando um crescimento razoável em setembro.

Em outras palavras nos meses de Dezembro, Janeiro, Fevereiro, Março e Abril os Subsistemas Sudeste/Centro-Oeste, Norte, Nordeste apresentaram aumento de ENAs enquanto o Subsistema Sul apresentou uma redução no mesmo período. Nos meses de Maio, Junho, Julho, Agosto Setembro, Outubro e Novembro os Subsistemas Sudeste/Centro-Oeste, Norte e Nordeste apresentaram uma redução de ENA enquanto o Subsistema Sul aumentou. Desse modo pode-se entender como se dar a complementariedade entre os Subsistemas.

#### **4.1.2 *Análise por Bacia***

Os gráficos da Figura 21 apresentam a ENA mensal em Mega Watts Médio (MWmed) para o período de 1931 a 2014 para as bacias hidrográficas do SIN.



**Figura 21:** ENA Mensal em MWmed por Bacia para o período de 1931 a 2014

FONTES: Autor

Dentre as bacias estudadas verifica-se que a Bacia do Paraná e São Francisco apresentaram uma maior média mensal de ENA para o período de 1931 a 2014. A bacia do Paraná obteve uma maior disponibilidade de ENA no mês de fevereiro, chegando a aproximadamente  $2,5 \times 10^5$  MWmed e a bacia do São Francisco de pouco mais de  $1,8 \times 10^4$  MWmed em março. Enquanto que a bacia Atlântico Sudeste apresentou ENA mensal no período estudado de pouco mais de 90 MWmed em agosto. As bacias Amazonas,



Paranaíba e Paraíba do Sul apresentaram seus menores valores (pouco mais de 100 MWmed) de ENA em agosto e setembro.

Outras observações podem ser feitas para as demais bacias no APÊNDICE C.

## 4.2 Tendência e Variabilidade da ENA anual.

### 4.2.1 Análise do Teste de Tendência, Médias Móveis por Subsistema

Na Figura 22 são apresentados os resultados para os Testes aplicados nos dados históricos. Os valores acima de zero indicam os desvios positivos (anomalia positiva), em que a ENA anual superou a média histórica, e os valores abaixo de zero indicam os períodos de desvio negativo (anomalia negativa), em que a ENA foi menor que a média histórica.

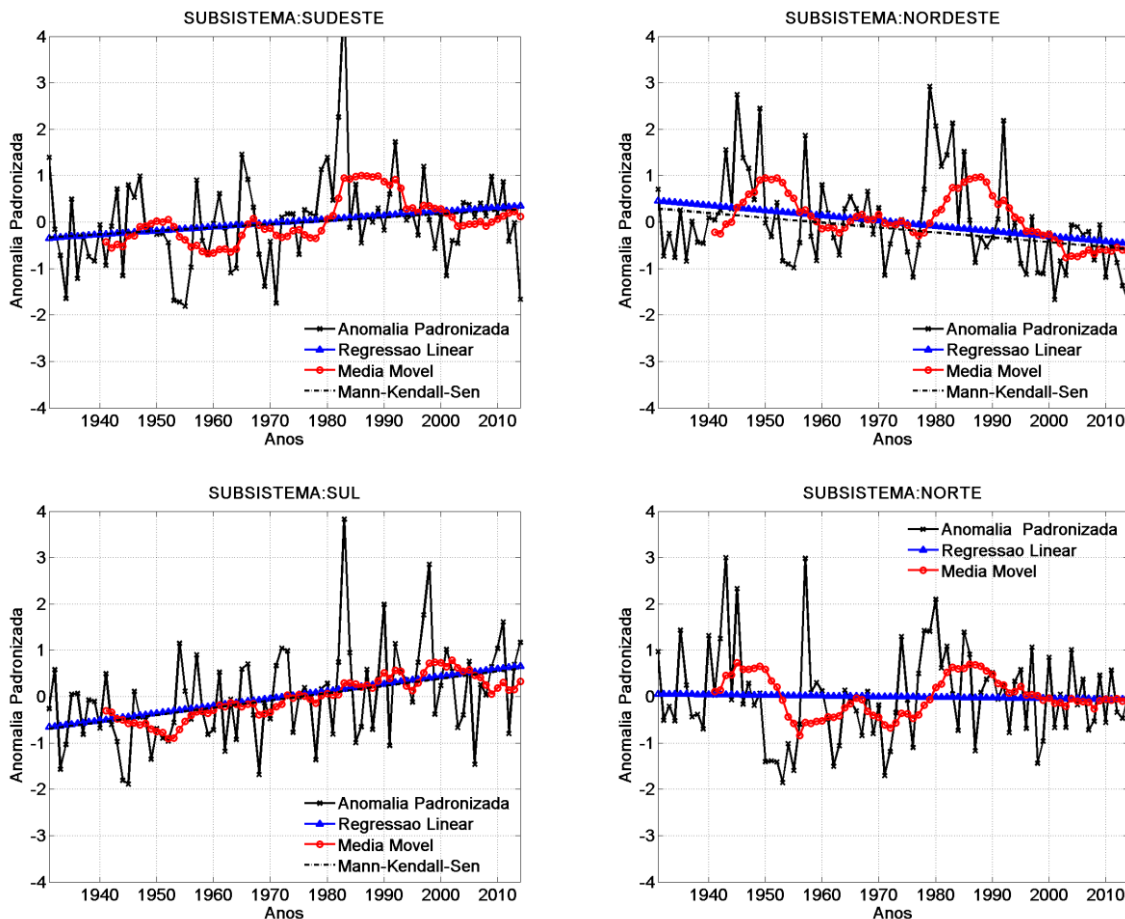


Figura 22: Teste de Tendência

FONTE: Autor

Analisando os resultados das médias móveis para os aproveitamentos do Subsistema Sudeste, observa-se uma variabilidade de baixa frequência com períodos longos de três décadas. O teste de Mann-Kendall apresentou tendência positiva na séries de ENA neste subsistema.

Nos aproveitamentos do Subsistema Nordeste observa-se, por meio das médias moveis, uma variabilidade decadal nos anos de 1940 a 1950 e 1980 a 1990. Dos anos de 1940 a 1980 a série apresentou um comportamento interanual. Nos períodos em que houve comportamento decadal a série apresentou uma variabilidade de baixa frequência com a tendência negativa.

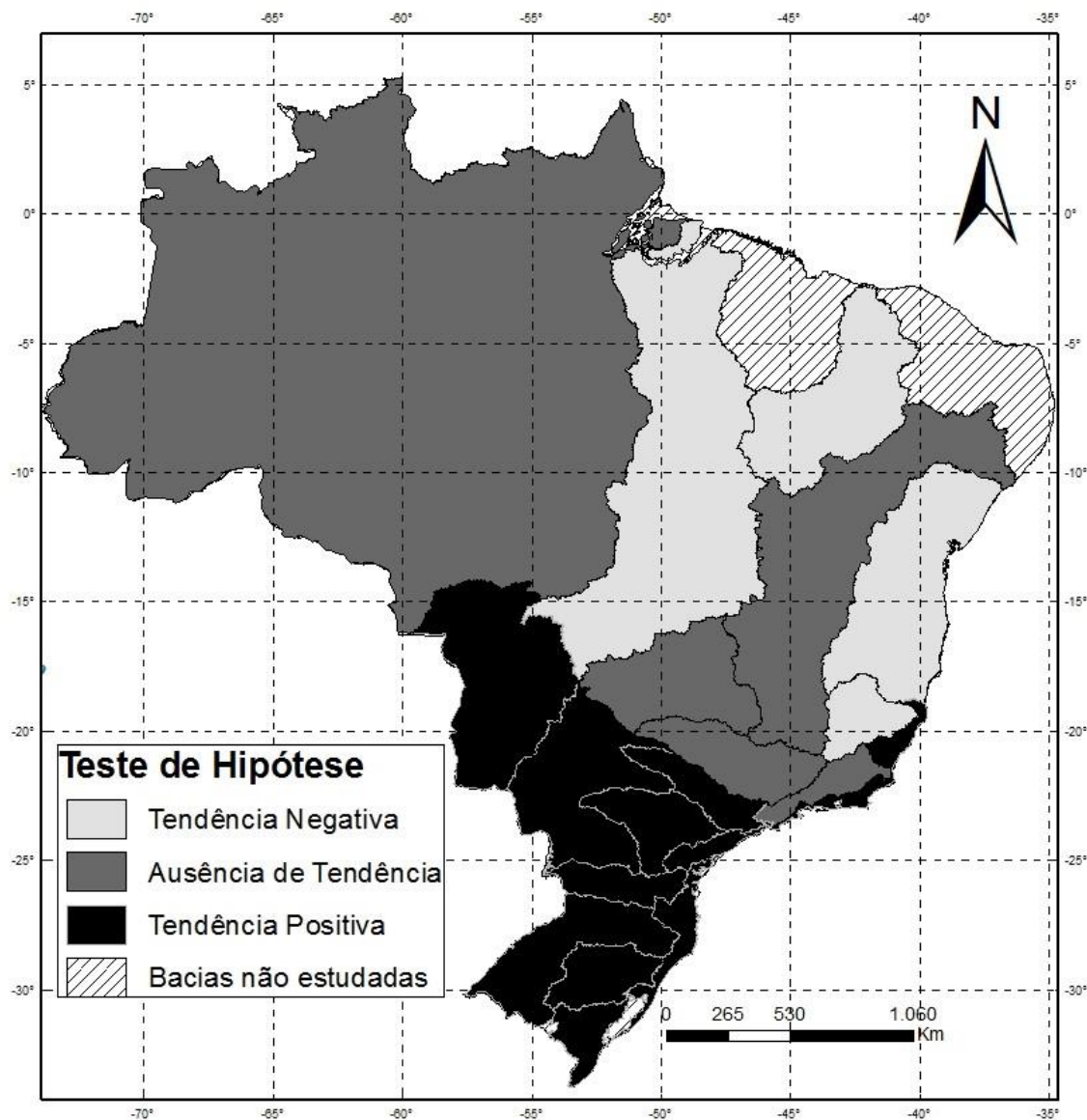
Os aproveitamentos do subsistema Sul apresentaram tendência significativamente positiva com comportamento interanual, na maior parte da série. O resultado para as médias móveis não apresentou variabilidade de alta frequência, apenas uma leve variabilidade de baixa frequência no período de 1940 a 1960. O resultado para a análise de tendências, utilizando o Teste de Mann-Kendall, mostra uma tendência de aumento da ENA.

Os aproveitamentos do Subsistema Norte apresentaram anomalia, na sua maioria, entre a faixa de -1 a 1 próximo a média climatológica. As médias móveis apresentaram uma variabilidade decadal de baixa frequência. As décadas de 40 e de 80 foram mais energéticas. A série não apresentou tendência.

#### **4.2.2 *Análise do Teste de Tendência, Média Móveis por Bacias***

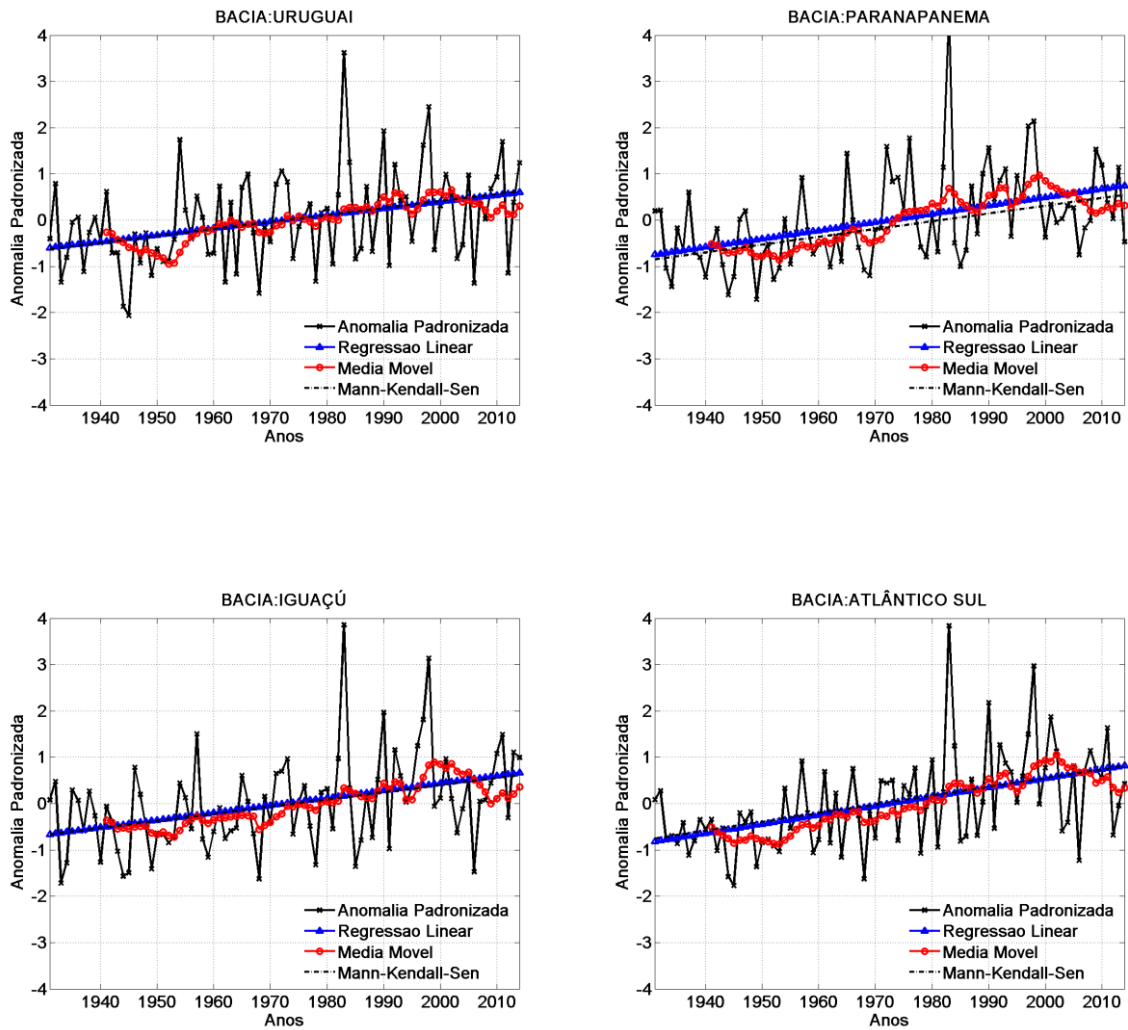
A Figuras 23 mostra os resultados para as 18 bacias estudadas, sendo que no teste de hipótese de Man Kendall o valor igual a zero indica a ausência de tendência significativa na série. Treze bacias apresentam tendência significativa, destas, nove registraram tendência positiva e quatro apresentaram tendência negativa.

O teste de Mann-Kendall apresentou tendência positiva para as Bacias Atlântico Sul, Atlântico Sudeste, Iguaçu, Jacuí, Paraguai, Paraná, Parapanema, Tietê e Uruguai. A maioria dessas bacias pertencem ao Subsistema Sul e Sudeste/Centro-Oeste. Para as bacias do São Francisco, Paranaíba, Atlântico Sul, Grande e Bacia do Amazonas o Teste de Mann-Kendall apresentou ausência de tendência e para as bacias Parnaíba, Tocantins, Doce e Atlântico Leste o Teste apresentou tendência negativa.



**Figura 23:** Análise de Tendência  
 FONTE: Autor (Arquivos Funceme)

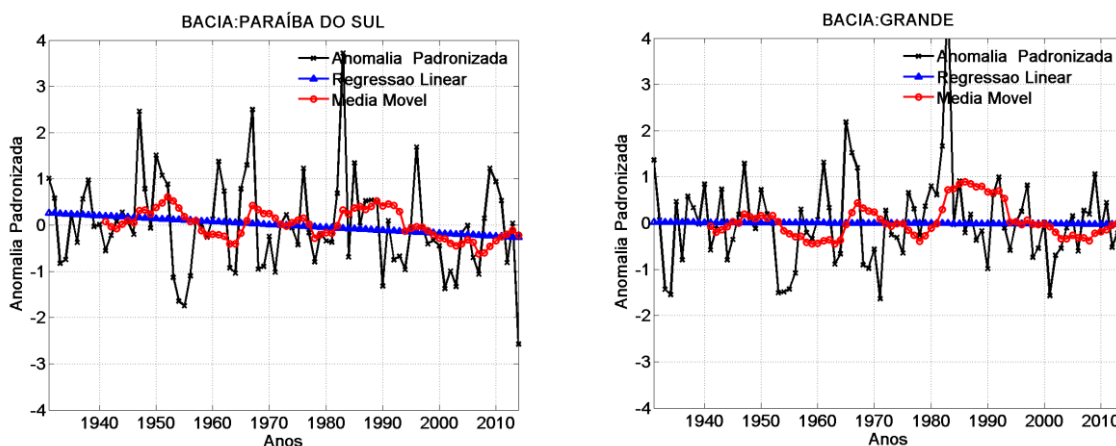
As médias móveis apresentaram variabilidade de alta frequência, com período curto na maioria da série para as bacias Uruguai, Paranapanema, Iguaçu e Atlântico Sul. Observa-se uma acentuada variabilidade interanual das ENAs médias.



**Figura 24:** Análise de Variabilidade

FONTE: Autor

As médias móveis sugerem uma variabilidade Decadal. Observa-se um comportamento correlacionado entre as Bacias do Grande e Paraíba do Sul, sugerindo uma possível relação com a OMA.

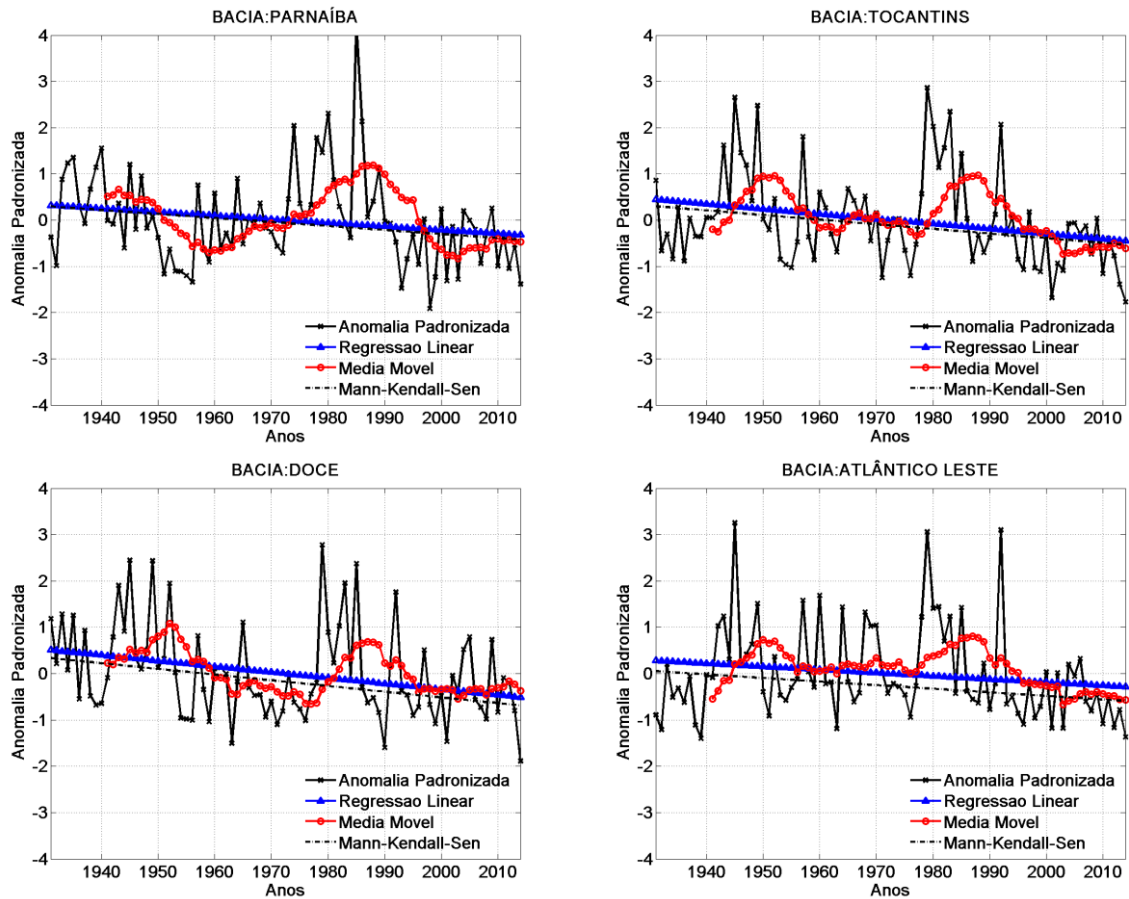


**Figura 25:** Análise de Variabilidade

FONTE: Autor

A média móvel apresenta uma variabilidade multidecadal de 30 anos para a bacia do Parnaíba. As bacias do Tocantins, Doce e Atlântico Leste apresentaram variabilidade decadal positiva em 1950. No período entre 1955 a 1975 e a partir de 1995, as bacias do Atlântico Leste, Doce e Tocantins apresentaram variabilidade interanual. Na década de 80 todas as bacias consideradas apresentaram variabilidade decadal positiva.

A bacia do Atlântico Leste apresentou comportamento semelhante. A série apresentou uma variabilidade de 20 anos. Entre os anos 1940 a 1960 e 1980 a 1990 apresentou variabilidade decadal. E entre 1960 a 1980 variabilidade interanual com frequência em períodos curtos.



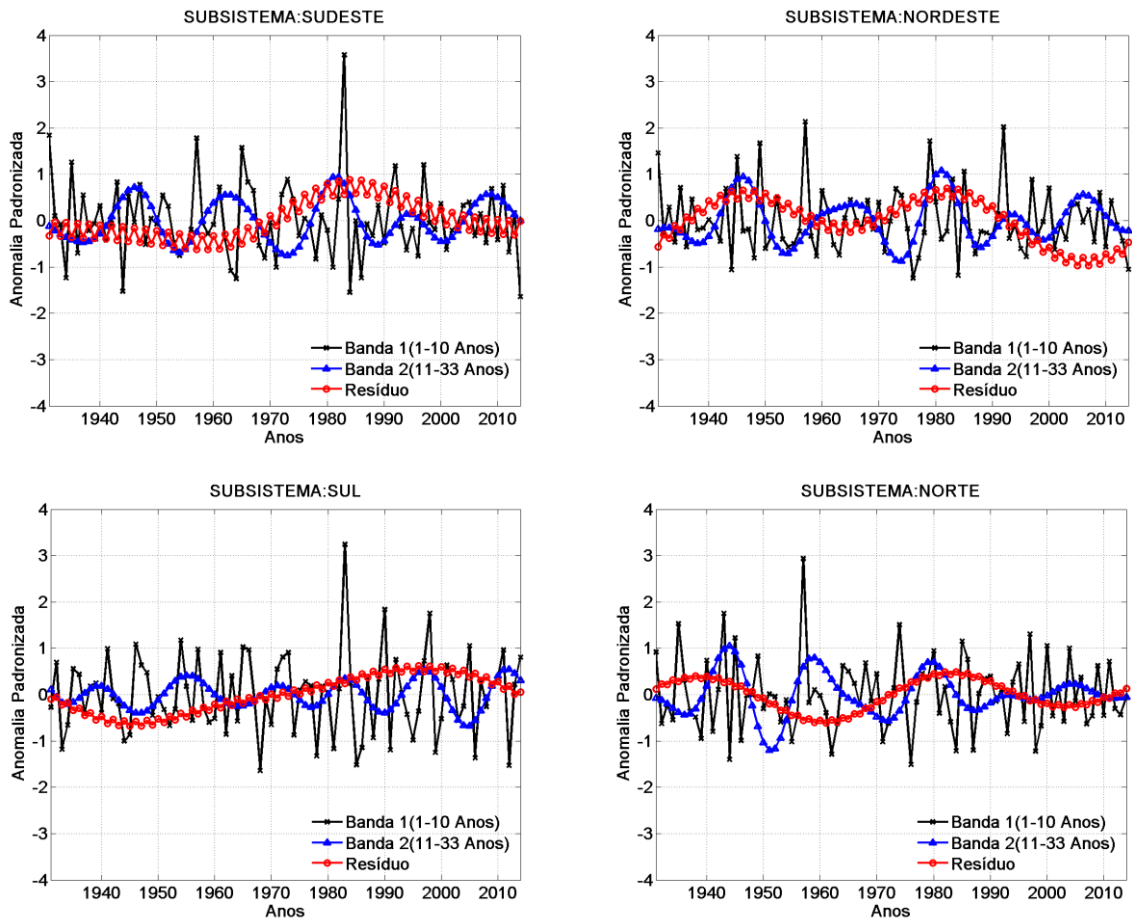
**Figura 26:** Análise de Variabilidade

FONTE: Autor

#### 4.4 Decomposição do sinal usando a Transformadas em Ondeletas (*Wavelets*).

##### 4.4.1 Análise do espectro de *Wavelets* por Subsistema

Na Figura 27 são apresentados os gráficos para a análise em ondeletas para os subsistemas a partir da decomposição das bandas de frequências:



**Figura 27:** Análise em Ondeletas

FONTE: Autor

O Subsistema Sudeste/Centro-Oeste apresentou variabilidade significativa na década de 80. A banda de baixa frequência (Resíduo) ficou constante até o período de 1960. E no período entre 1970 a 2000 apresentou sua fase mais energética, nesse período há uma correlação direta com a fase fria da OMA.

O uso das ondeletas mostrou para o Subsistema Nordeste que os anos entre 1940 a 1950 e em, aproximadamente, 1980 são os períodos responsáveis por um valor significativo na variabilidade da ENA, são os períodos mais energéticos. O subsistema Nordeste apresentou variação na banda de baixa frequência (Resíduo) de aproximadamente 30 anos. No período de 1931 a 1950, a série temporal mostra os valores do índice padronizado ENA coincidente com os períodos de ODP na fase fria.

No subsistema Sul, a banda de baixa frequência (Resíduo) apresentou oscilação em um longo período, mudando de fase por volta de 1970, com um pico considerável na década de 1990. O período entre 1970 a 2000 coincidiu com o período de OMA na fase fria.

O Subsistema Norte apresentou variabilidade significativa por volta de 1945 e 1980 nas bandas, nesses anos as três bandas estavam com pico coincidentes. A banda de média frequência (11 a 33 anos- Banda 2) mostrou uma redução gradativa da amplitude de variação no decorrer da série.

No Subsistema Norte e Sudeste, observa-se uma oscilação periódica na banda de baixa frequência com período de aproximadamente 30 anos. É possível que esse comportamento esteja relacionado com a Oscilação Decadal do Pacífico onde a fase quente coincide com os períodos menos energéticos e os períodos frios coincide com os períodos mais energéticos.

Observa-se, ainda, nos quatro gráficos, uma oscilação periódica na banda de média frequência com período entre 10 e 20 anos.

#### **4.4.2 *Análise da variância para as bandas da série histórica de ENA por Subsistema***

Os resultados da análise da transformada em ondeletas para os Subsistemas Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste, Sul e Norte são apresentados na Tabela 1 mostrando a distribuição das proporções da variância explicadas pelas bandas de alta (Banda 1) média (Banda 2) e baixa frequência (Resíduo).

**Tabela 1:** Cálculo da variância para as bandas da série histórica de ENA de 1931 a 2014

	<b>BANDA 1</b>	<b>BANDA 2</b>	<b>RESÍDUO</b>
SUDESTE/CENTRO-OESTE	67,60%	20,11%	17,08%
NORDESTE	48,75%	21,80%	23,22%
SUL	73,12%	08,62%	16,10%
NORTE	62,28%	21,16%	10,29%

FONTE: Autor

A variância mostrou que a banda de alta frequência (Banda 1) é responsável por 67,60% da variabilidade sazonal para os Subsistema Sudeste, enquanto que a banda de média frequência (Banda 2) é responsável por 20,11% e a banda de baixa frequência (Resíduo) é responsável por 17,08%.

Para o Subsistema Nordeste, a variância mostrou que a banda de alta frequência (Banda 1) é responsável por 48,75% da variabilidade sazonal, enquanto que a banda de



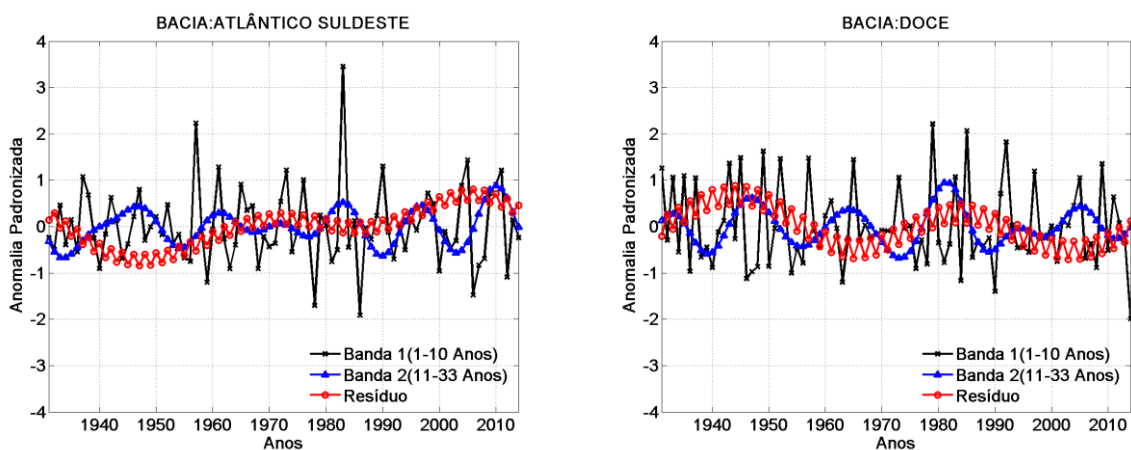
média frequência (Banda 2) é responsável por 21,80% e a banda de baixa frequência (Resíduo) é responsável por 23,22%.

Para o Subsistema Sul, a variância mostrou que a banda de alta frequência (Banda 1) é responsável por 73,12% da variabilidade sazonal para os Subsistema Sudeste, enquanto que a banda de média frequência (Banda 2) é responsável por 08,62% e a banda de baixa frequência (Resíduo) é responsável por 16,10%.

Para o Subsistema Norte, a variância mostrou que a banda de alta frequência (Banda 1) é responsável por 62,28% da variabilidade sazonal para os Subsistema Sudeste, enquanto que a banda de média frequência (Banda 2) é responsável por 21,16% e a banda de baixa frequência (Resíduo) é responsável por 10,29%.

#### 4.4.3 *Análise do espectro de Wavelets por Bacias*

A Figura 28 mostra os resultados das transformadas em ondeletas (*Wavelets*).



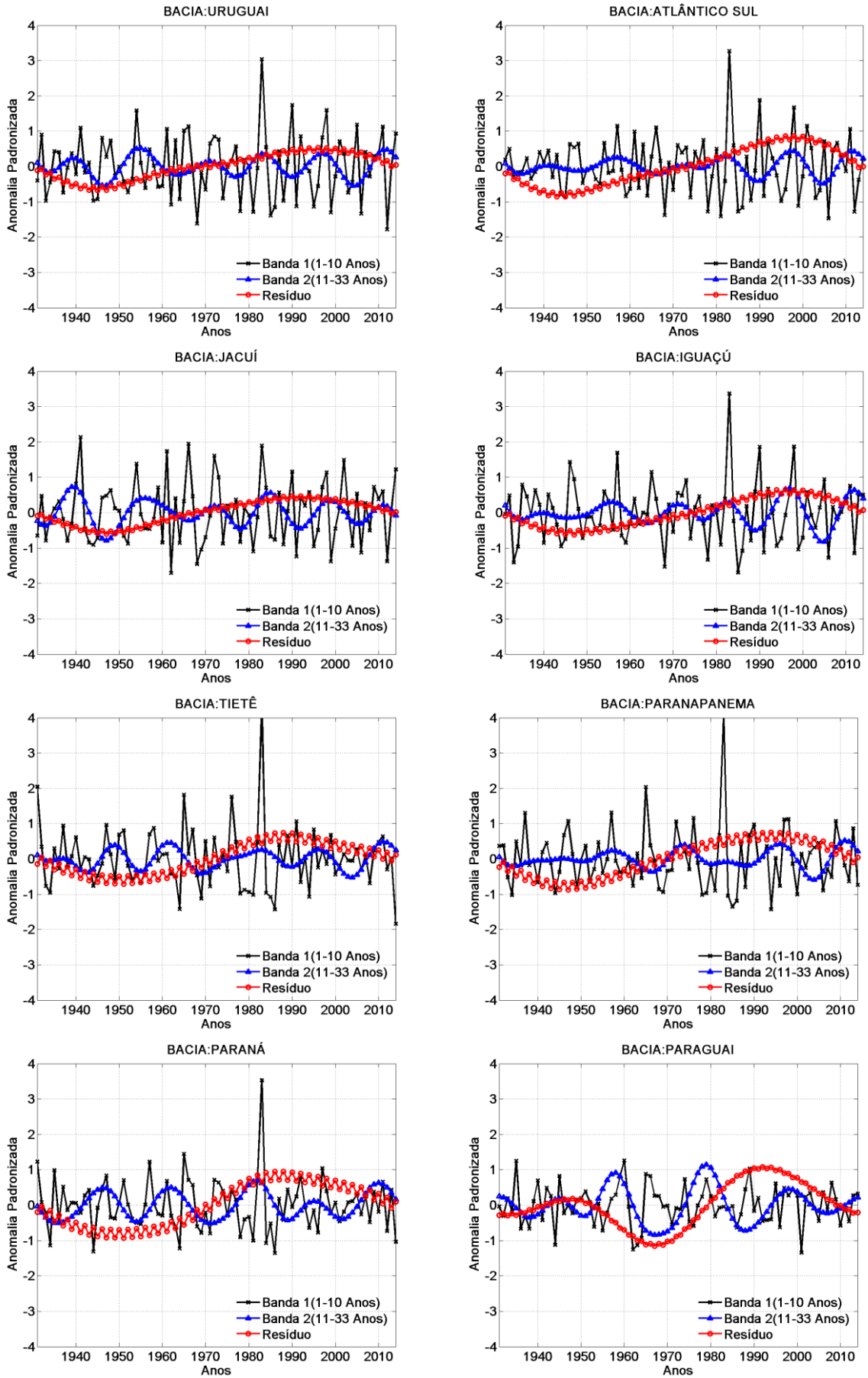


Figura 28: Espectro de Ondeletas

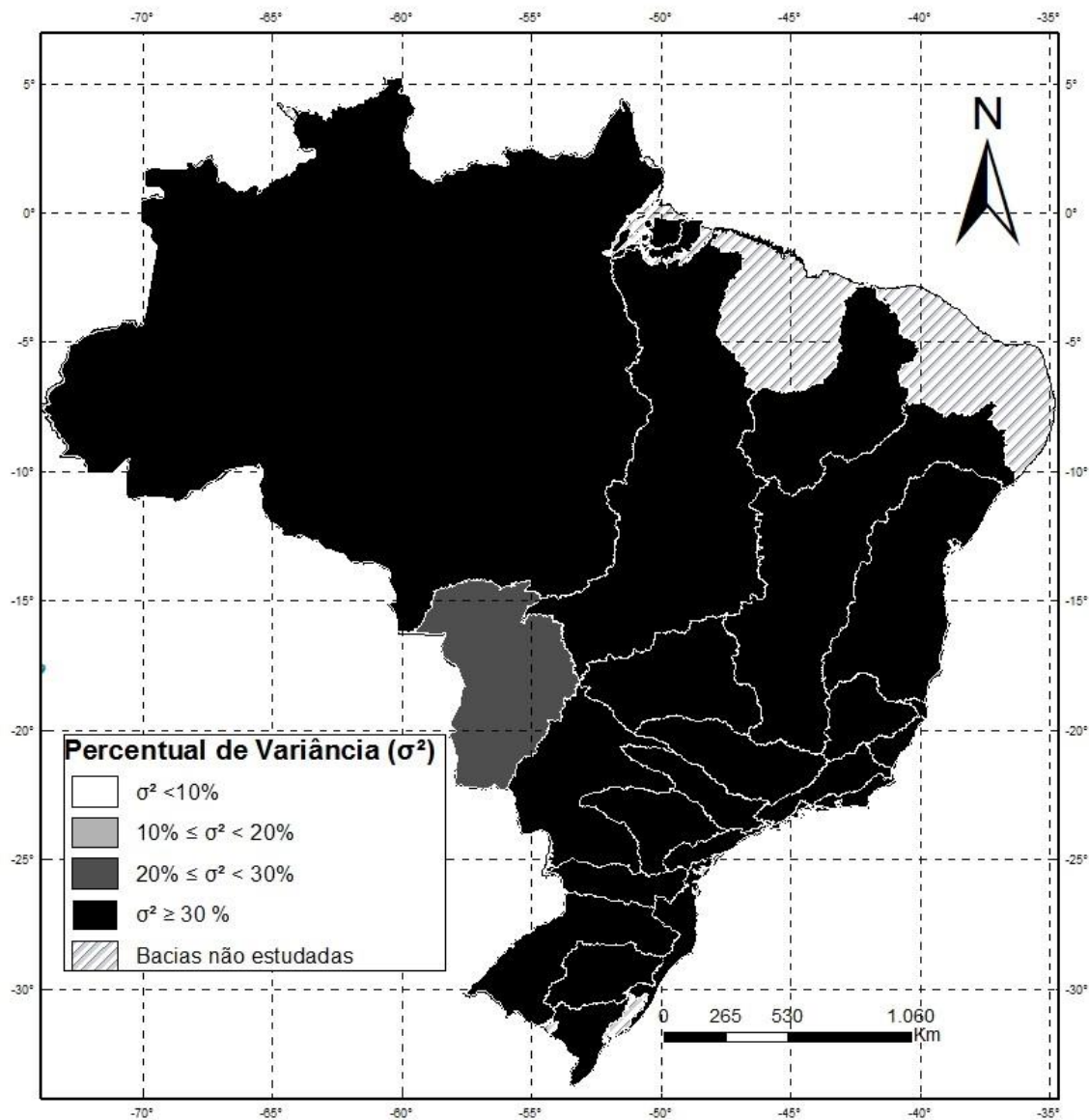
As bacias do Atlântico Sudeste e Doce apresentaram, na banda de baixa frequência (Resíduo), oscilação periódica de aproximadamente 30 anos. A bacia do Uruguai, Atlântico Sul, Jacuí e Iguaçu apresentaram oscilação bem correlacionadas nas bandas de baixa frequência (Resíduo), com inversão de fase por volta de 1970 assim como uma correlação das bacias do Tietê, Paranapanema e Paraná. Observa-se que essas bacias encontram-se basicamente no subsistema Sudeste/Centro-Oeste, Sul e Norte e sugerem uma forte interferência da Oscilação Multidecal do Atlântico, principais regiões onde esse fenômeno atua. A bacia do Paraguai apresentou uma fase energética entre anos de 1970 a 2000. A bacia do Paranapanema apresentou baixa amplitude na banda de média frequência (Banda 2 de 11-33 anos) até o ano de 1960 e em seguida apresentou oscilação periódica na banda de baixa frequência com período de 10 anos. Para a maioria das bacias as bandas de média frequência apresentaram oscilação periódica de em média 10 anos.

Outras observações podem ser feitas nos gráficos das demais bacias no APÊNDICE D.

#### **4.4.4 *Análise da variância para as bandas da série histórica por Bacia***

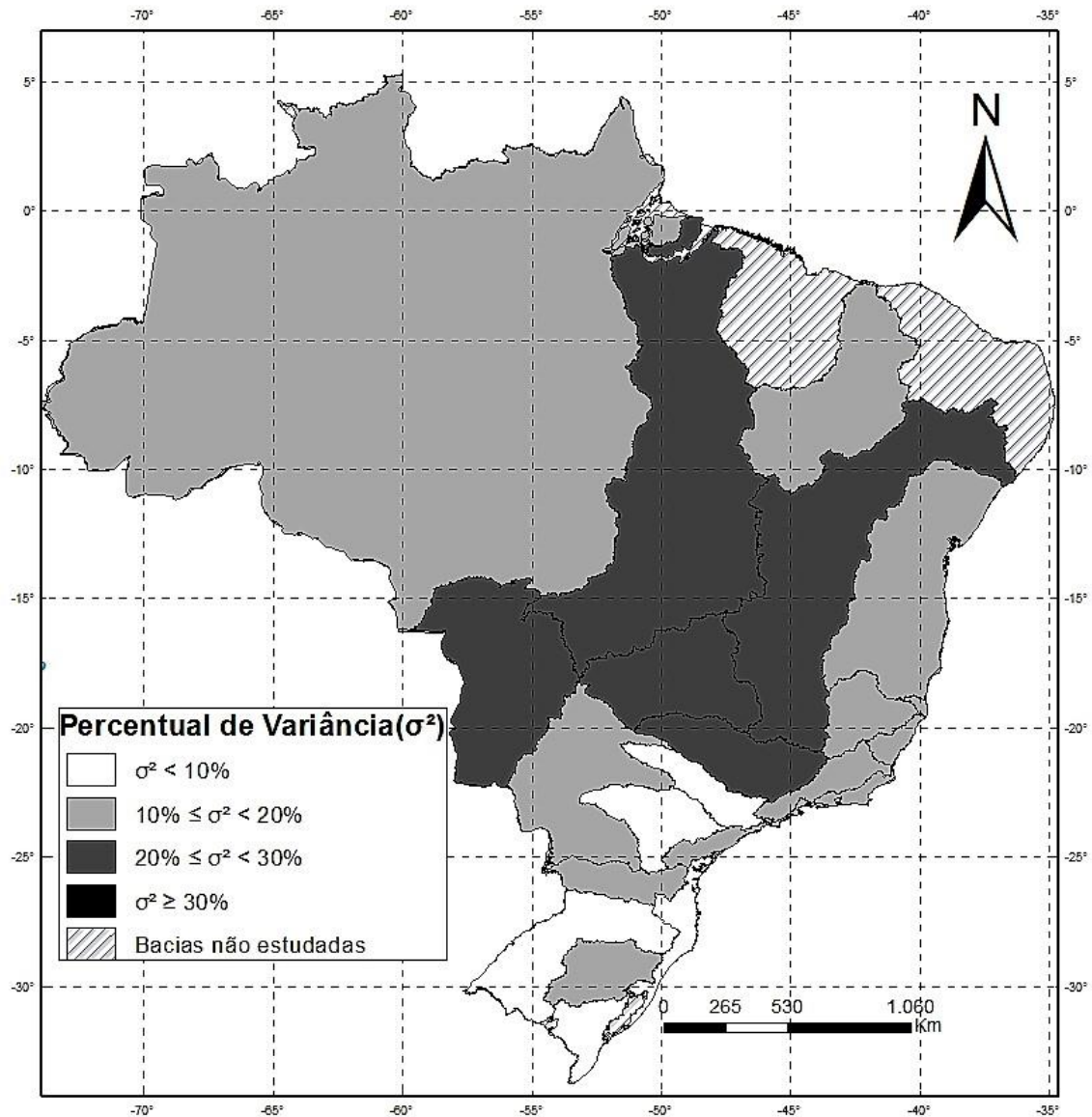
Os resultados da análise da transformada em ondeletas para as bacias analisadas são apresentados nas Figuras 29,30 e 31 na forma de mapas, mostrando a distribuição espacial das proporções da variância explicadas pelas bandas de alta, média e baixa frequências, respectivamente.

A Figura 29 mostra que a banda de alta frequência é responsável por uma da variância maior e igual a 20% e menor que 30% para a bacia do Paraguai. Enquanto todas as outras bacias apresentaram variância maior ou igual a 30%.



**Figura 29:** Mapa da variância da banda de alta frequência (1 a 10 anos)  
 FONTE: Autor (Arquivos Funceme)

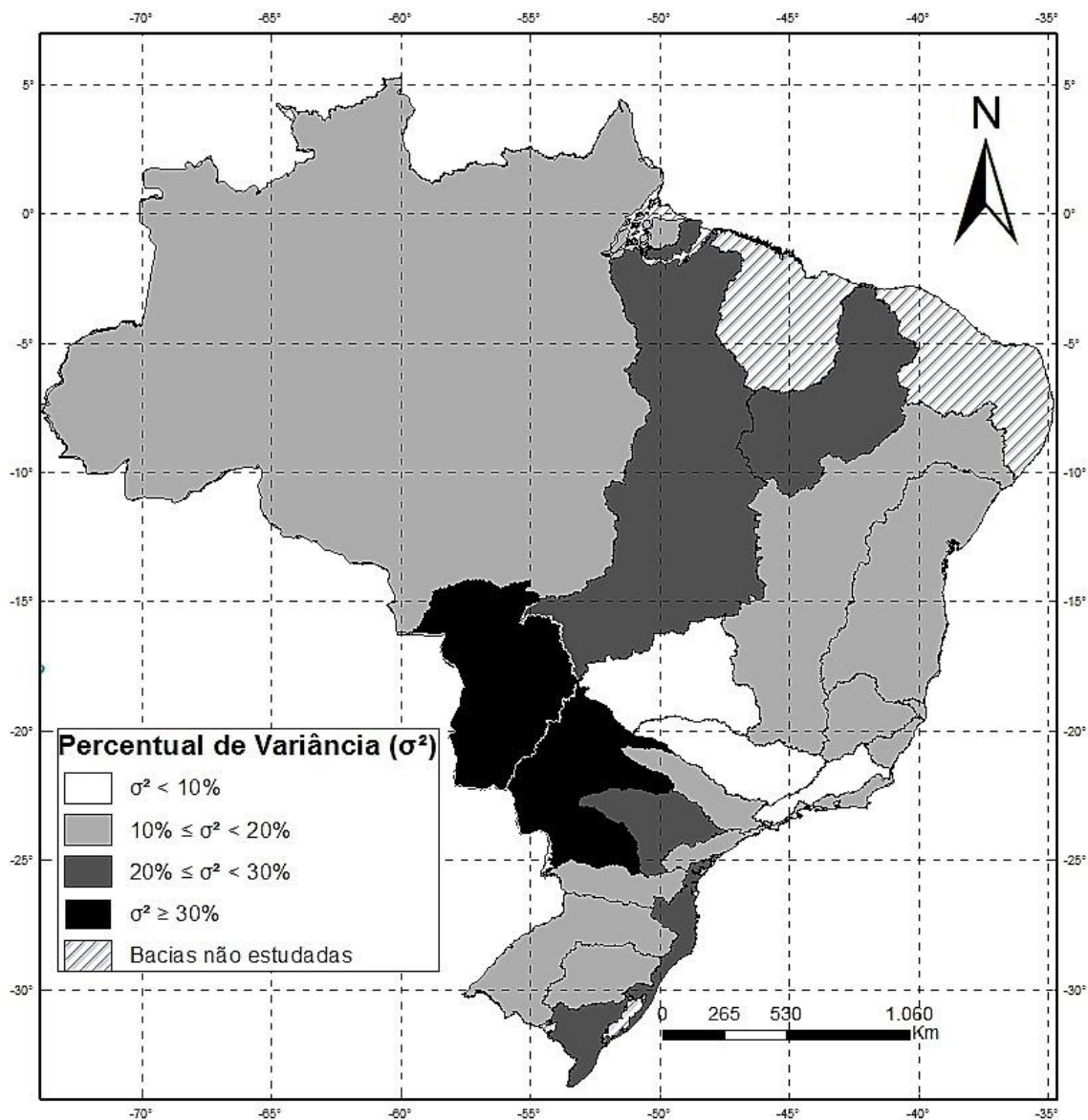
A Figura 30 mostra que a banda de média frequência é responsável por uma variância menor que 10% para as bacias do Tietê, Paranapanema, Uruguai e Atlântico Sul. Enquanto que para as bacias do Amazonas, Parnaíba, São Francisco, Doce, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Paraíba do Sul, Paraná, Iguazu e Jacuí a banda de média frequência é responsável por uma variância maior ou igual a 10% e menor que 20%. As bacias do São Francisco, Tocantins, Paraguai, Parnaíba e Grande apresentaram variância maior ou igual a 20% e menor que 30%. Nenhuma bacia apresentou variância da banda maior ou igual que 30%.



**Figura 30:** Mapa da variância da banda de média frequência (11 a 33 anos)

FONTE: Autor (Arquivos Funceme)

A Figura 31 mostra que a banda de baixa frequência é responsável por uma variância menor que 10% para as bacias do Paraíba do Sul, Grande e Paraíba. As bacias do Amazonas, São Francisco, Atlântico Leste, Doce, Atlântico Sudeste, Tietê, Iguçu, Uruguai e Jacuí apresentaram variância maior ou igual a 10% e menor que 20%. As bacias do Paraíba, Tocantins, Paranapanema e Atlântico Sul apresentaram variância maior ou igual a 20% e menor 30%. As demais bacias: Paraná e Paraguai apresentaram variância maior que 30%.



**Figura 31:** Mapa da variância da banda de baixa frequência- Resíduo (34 a 84 anos)

FONTE: Autor (Arquivos Funceme)

## **4.5 Projeções de Energia Natural Afluyente (ENA) pelo modelo Wavelets Auto-Regressivo (WAR) para o período de 2015 a 2024.**

### ***4.5.1 Projeção com base na Banda de Alta Frequência***

As projeções para a Banda de Alta frequência por Bacia não foram bem representadas pelos gráficos do modelo WAR, uma vez que para as projeções interanuais é mais adequado o uso da climatologia ou outros métodos para observar a sazonalidade.

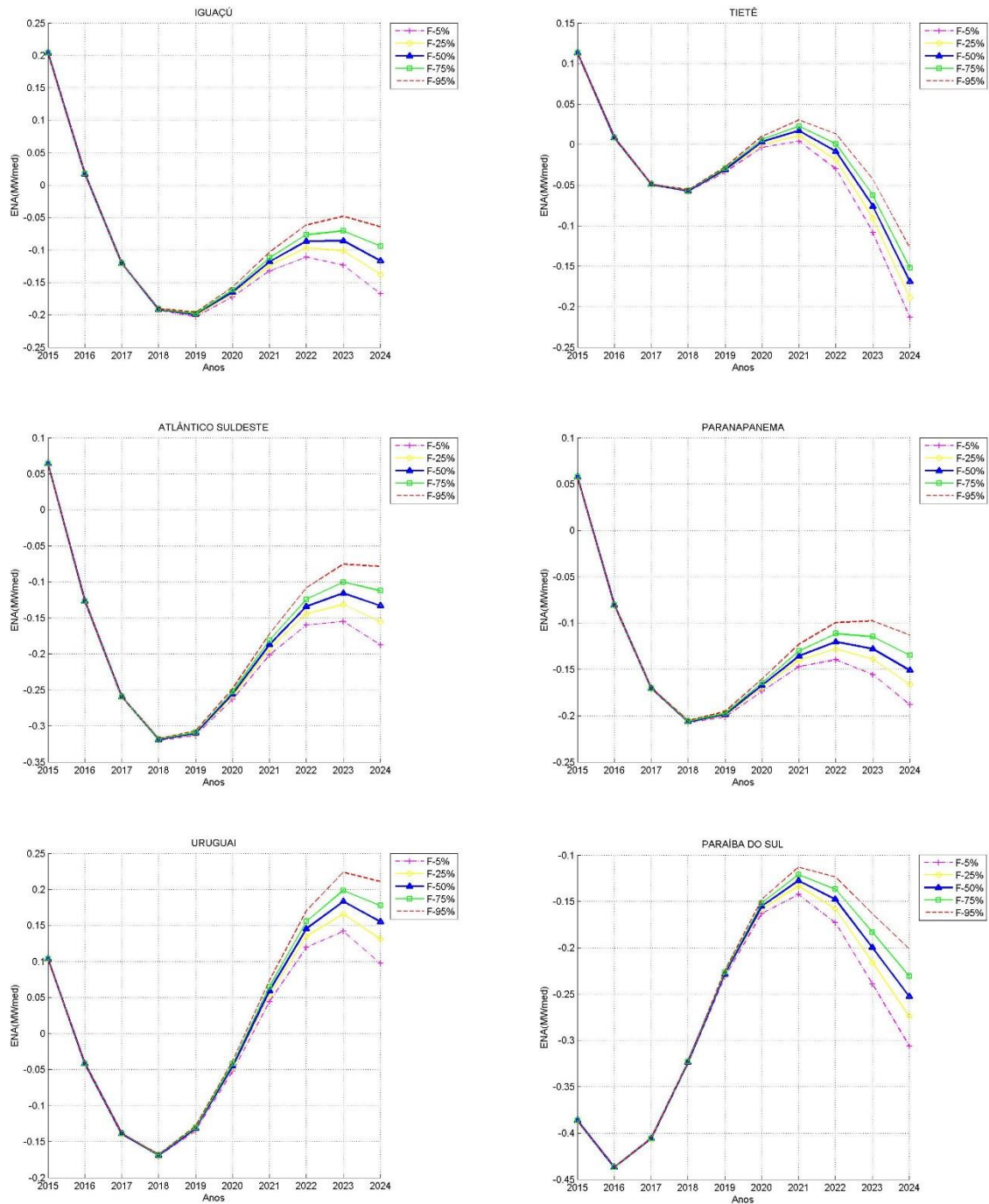
### ***4.5.2 Projeção com base na Banda de Média Frequência por Bacia***

As Figuras 32, 33 e 34, mostram as projeções de ENA pelo modelo WAR para o período de 2015 a 2024 para as bacias do SIN com base na banda de média frequência.

Para as bacias Iguaçu, tietê, Atlântico Sudeste, Paranapanema, Uruguai, Paraíba do Sul, o modelo indicou vazões abaixo da média histórica, provavelmente associado ao início da fase quente da PDO em meados de 2015.

A bacia do Uruguai indicou vazões abaixo da média histórica até meados de 2017 e a partir desse ano cresceu gradativamente atingindo valores acima da média histórica, essa tendência positiva pode ser identificada também na Figura 24.



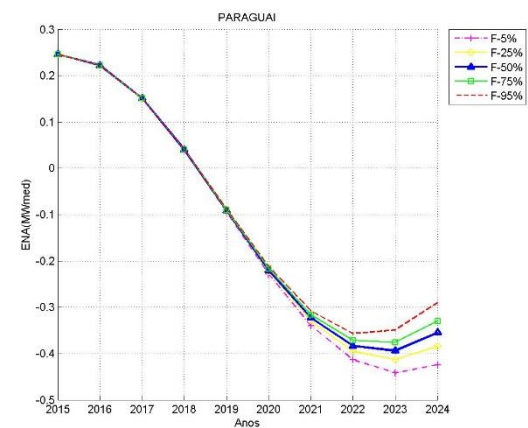
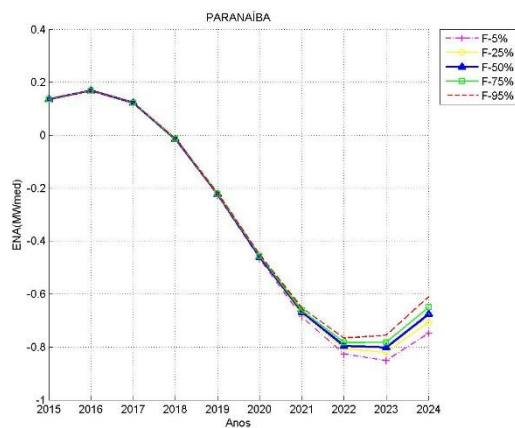
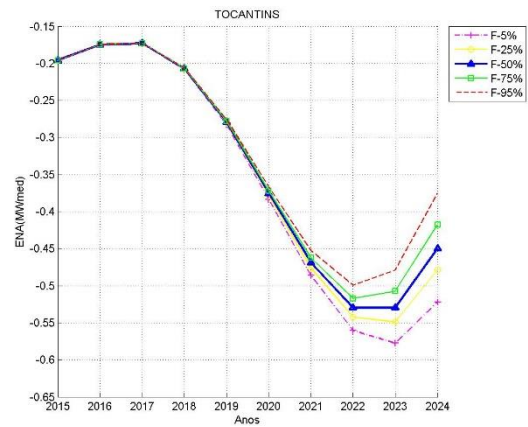
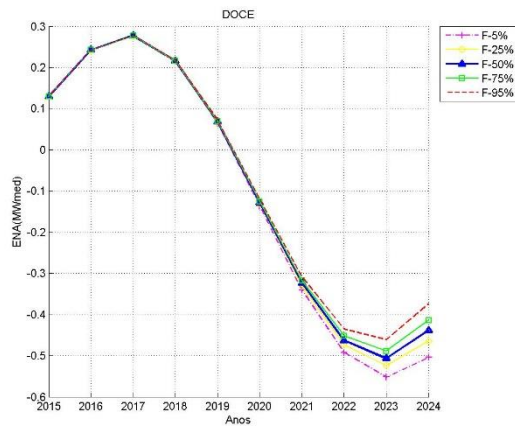


**Figura 32:** Projeções de ENA pelo modelo WAR para o período de 2015 a 2024 com base na Banda de Média Frequência

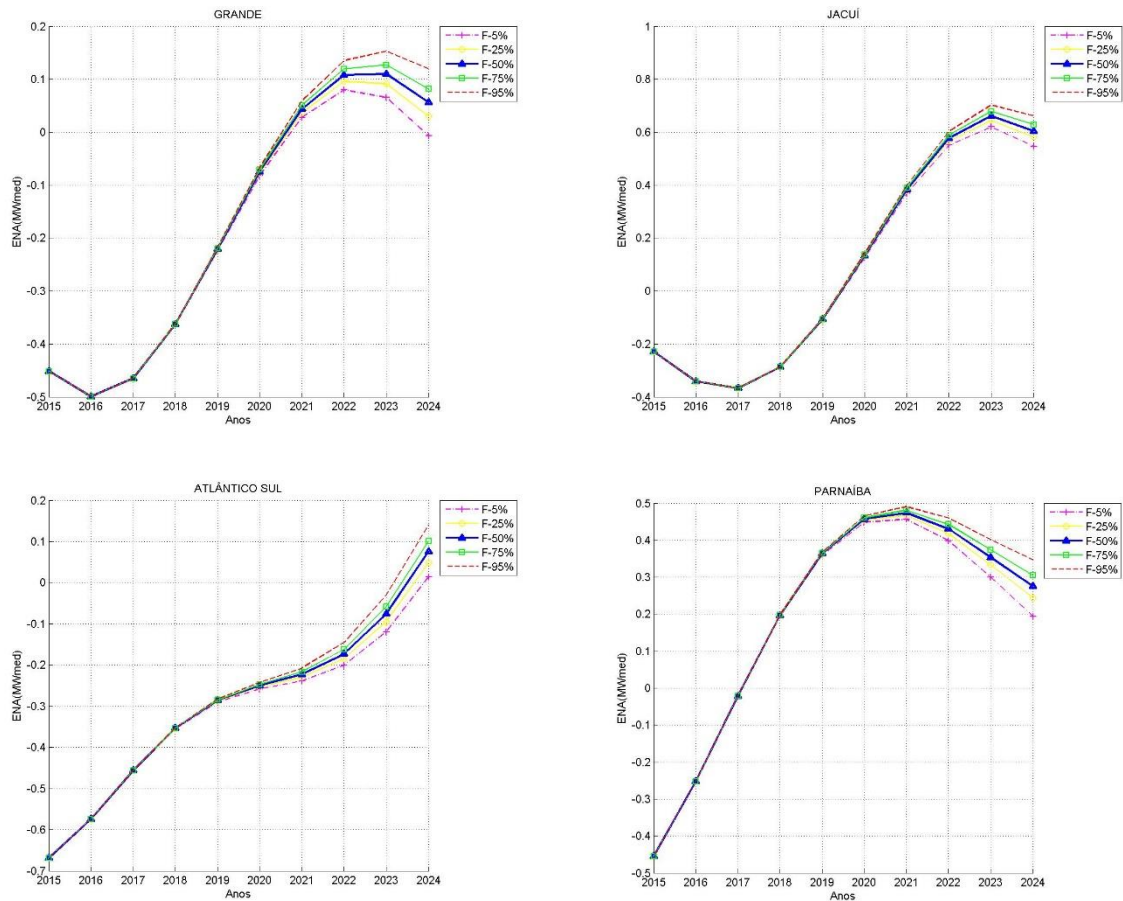
FONTE: Autor

As bacias do Doce, Paranaíba e Paraguai apresentaram, segundo o modelo, ENAs abaixo da média a partir do ano de 2018. A bacia do Tocantins apresentou ENA negativa no decorrer do tempo de projeção.





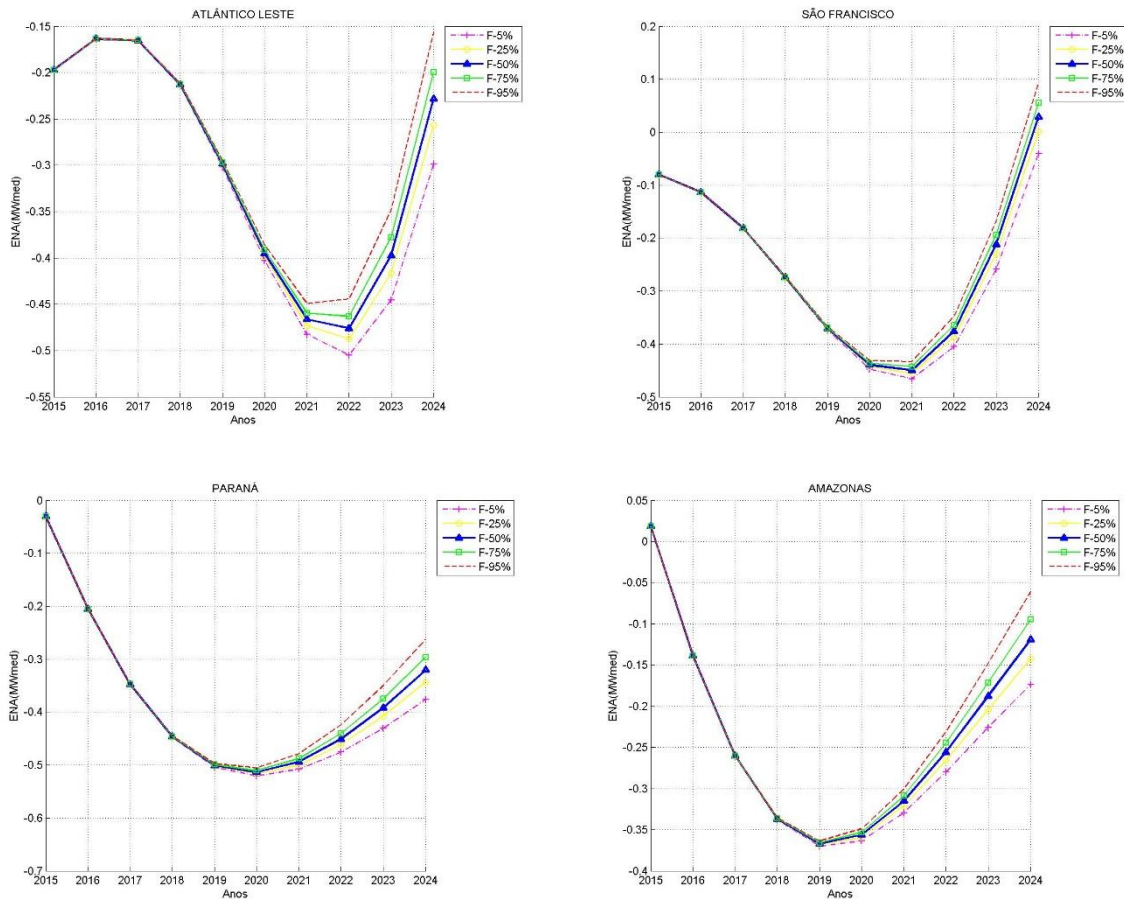
As bacias Grande, Jacuí, Atlântico Sul, Paranaíba apresentaram ENA acima da média histórica, um comportamento positivo, o que sugere um aumento de Energia Natural Afluente, tendo assim uma maior produtividade no setor nos subsistemas onde encontram-se as respectivas bacias.



**Figura 33:** Projeções de ENA pelo modelo WAR para o período de 2015 a 2024 com base na Banda de Média Frequência

FONTE: Autor

As bacias do Atlântico Leste, São Francisco, Paraná e Amazonas apresentaram, na maior parte dos anos, ENA abaixo da média histórica. Para a bacia do Amazonas e São Francisco, em meados de 2020 a ENA apresentou inversão da fase. A série de ENA cresceu gradativamente mas mesmo assim apresentou uma produção abaixo da média histórica no período estudado.



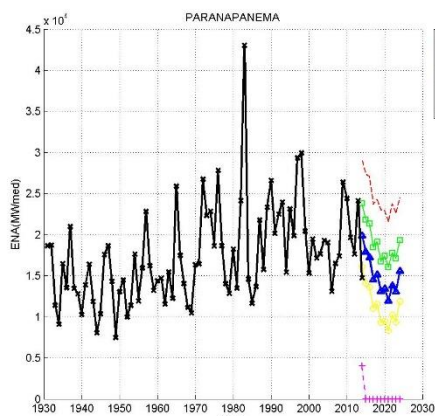
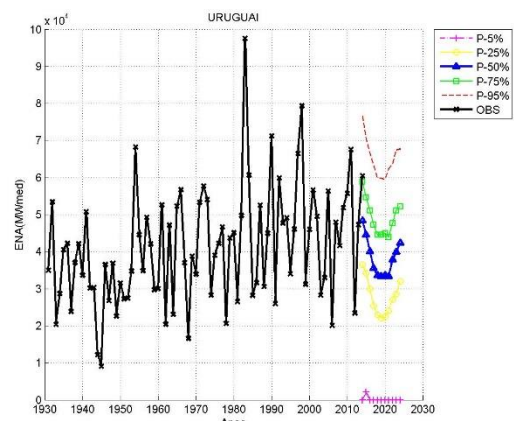
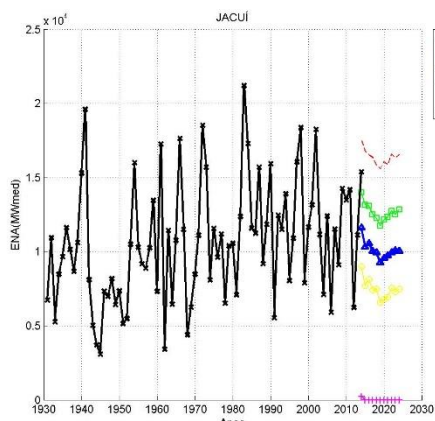
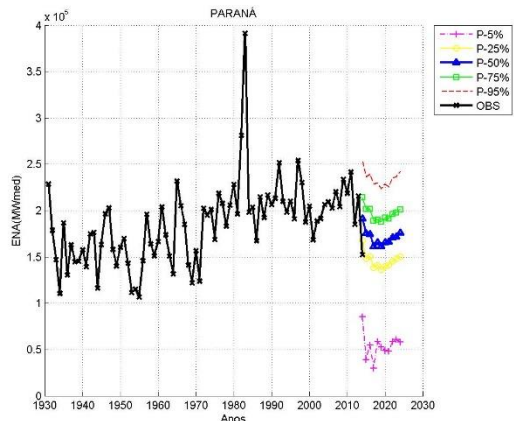
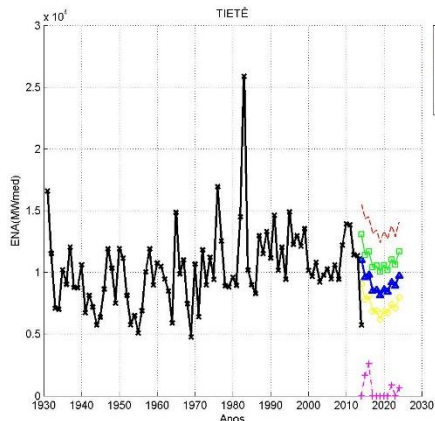
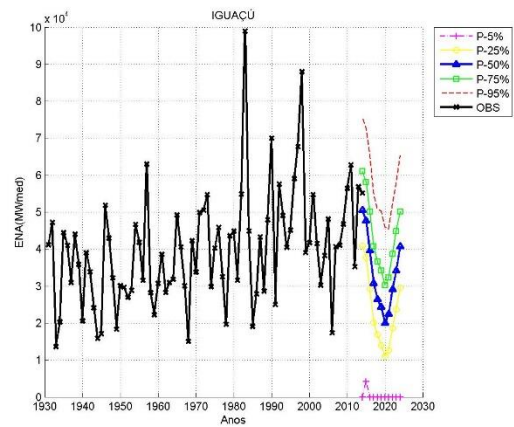
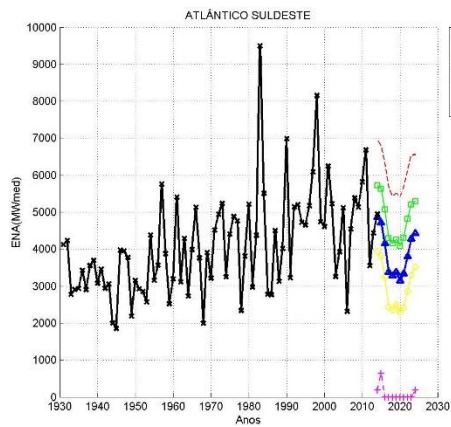
**Figura 34:** Projeções de ENA pelo modelo WAR para o período de 2015 a 2024 com base na Banda de Média Frequência

FONTE: Autor

#### 4.5.3 *Projeção com base na Banda de Baixa Frequência por Bacia*

As Figuras 35 e 36, apresentam as projeções de ENA por meio do modelo WAR para o período de 2015 a 2024 para as bacias do SIN com base na Banda de Baixa Frequência.

As bacias Paraná, Tietê, Iguaçu, Atlântico Sudeste, Paranapanema, Uruguai e Jacuí indicaram redução na ENA provavelmente associada a proximidade do aumento da temperatura média da Superfície do Atlântico Norte, causado por uma possível inversão da fase da Oscilação Multidecadal do Atlântico, que poderá ocorrer a partir de 2026. Levando em consideração esse mesmo parâmetro observados nessas bacias é possível que a partir de 2016 a série de ENA passe a ter um aumento considerado, desta vez associado a redução da temperatura da Superfície do Atlântico Norte.

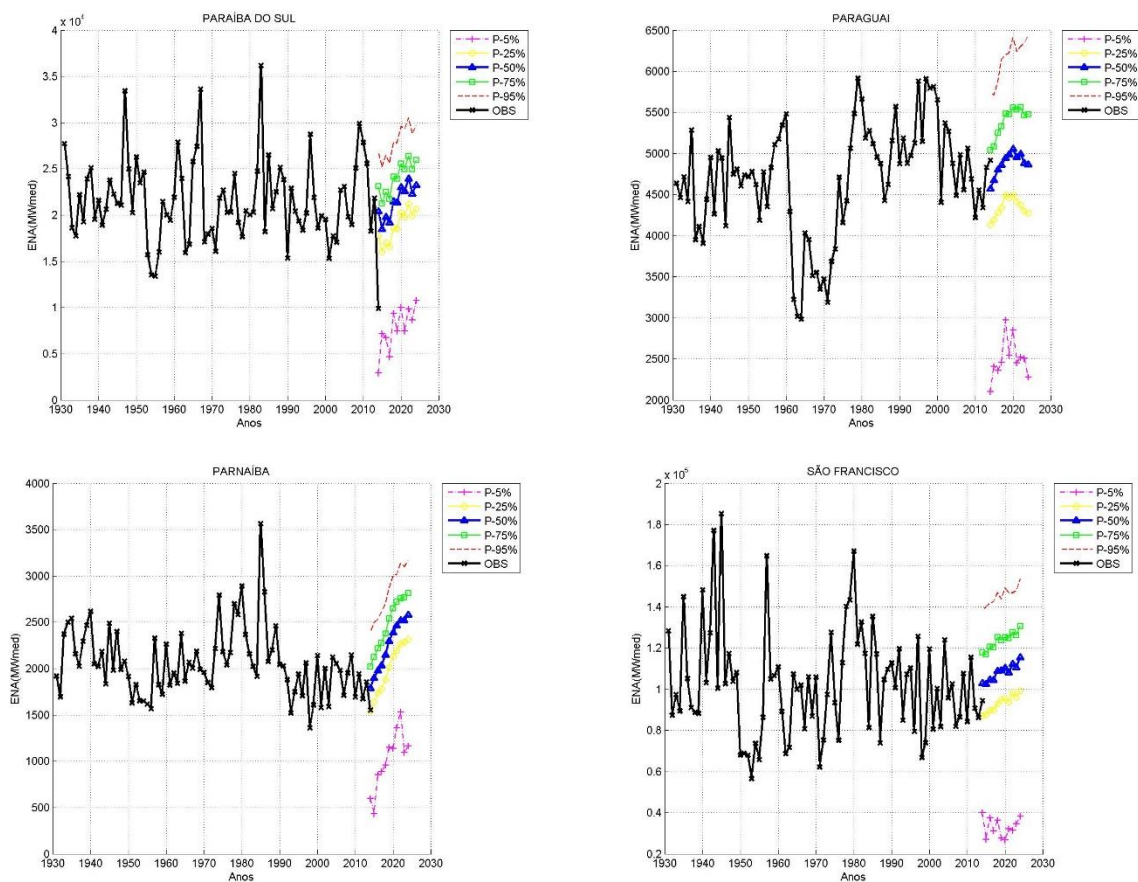


**Figura 35** : Projeções de ENA pelo modelo WAR para o período de 2015 a 2024 com base na Banda de Baixa Frequência

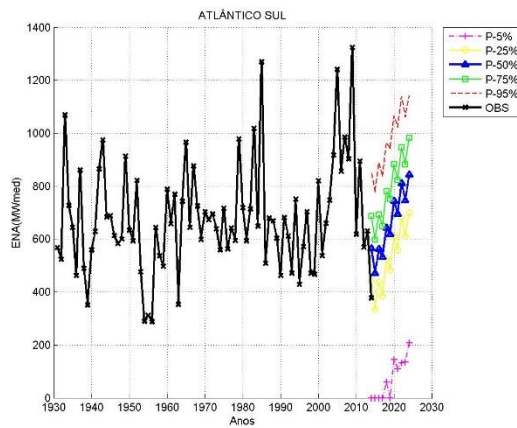
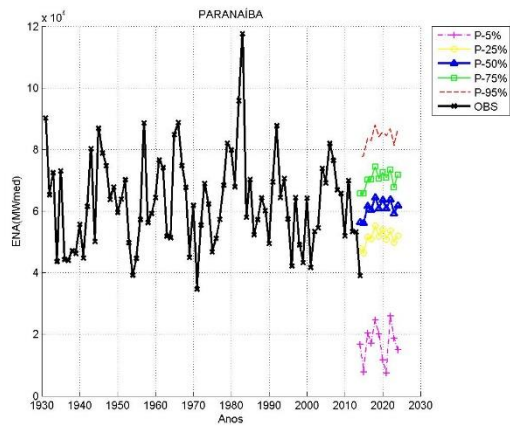
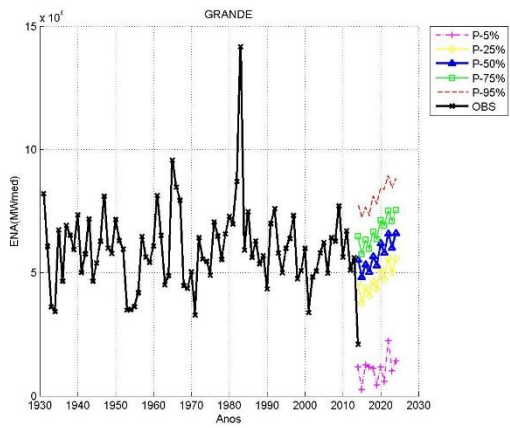
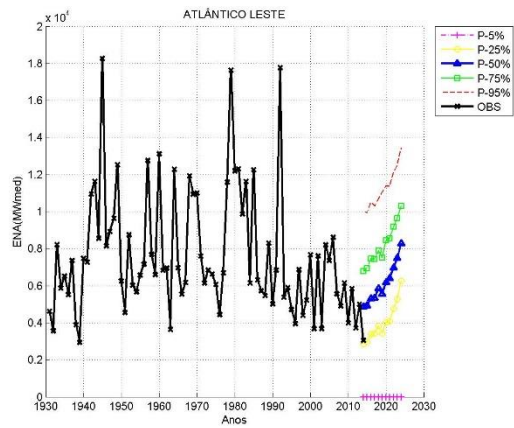
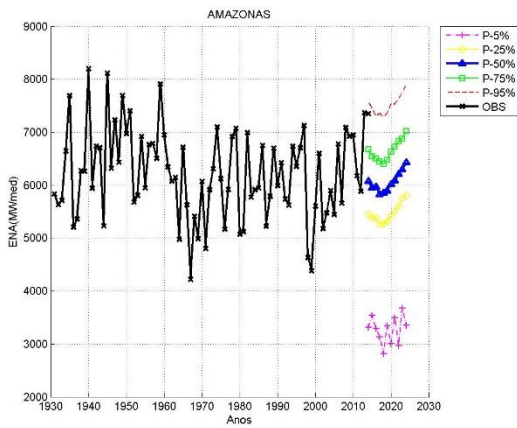
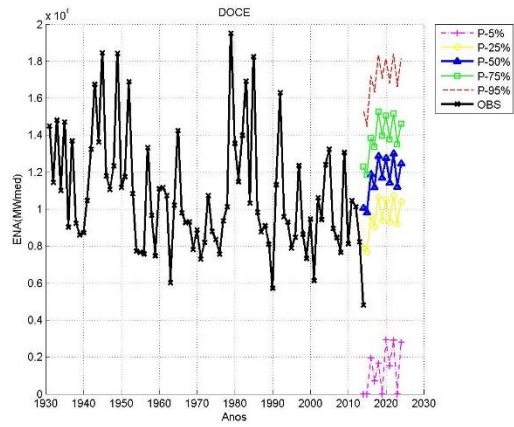
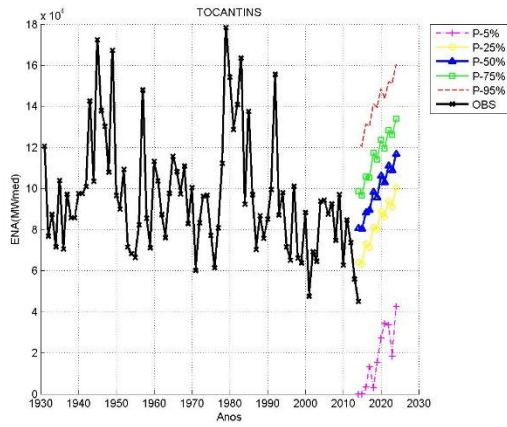
FONTE: Autor

As bacias Paraíba do Sul, Paraguai, Parnaíba, São Francisco, Tocantins, Doce, Amazonas, Atlântico Leste, Grande, Paranaíba e Atlântico Sul apresentaram aumento da ENA associada a Oscilação Decadal do Pacífico, que influenciará diretamente na produção ENA devido a inversão da fase fria para a fase quente, a partir de meados de 2015. Tendo, assim, a possibilidade de eventos de El Nino mais frequentes e isso por sua vez afetará o sistema hidrológico das bacias do Sudeste/Centro-Oeste.

A tendência positiva identificada na bacia do Paraguai (APÊNDICE E), é bem caracterizada pela banda de baixa frequência, especialmente a partir da década de 1980 quando está banda atinge valores máximos positivos.





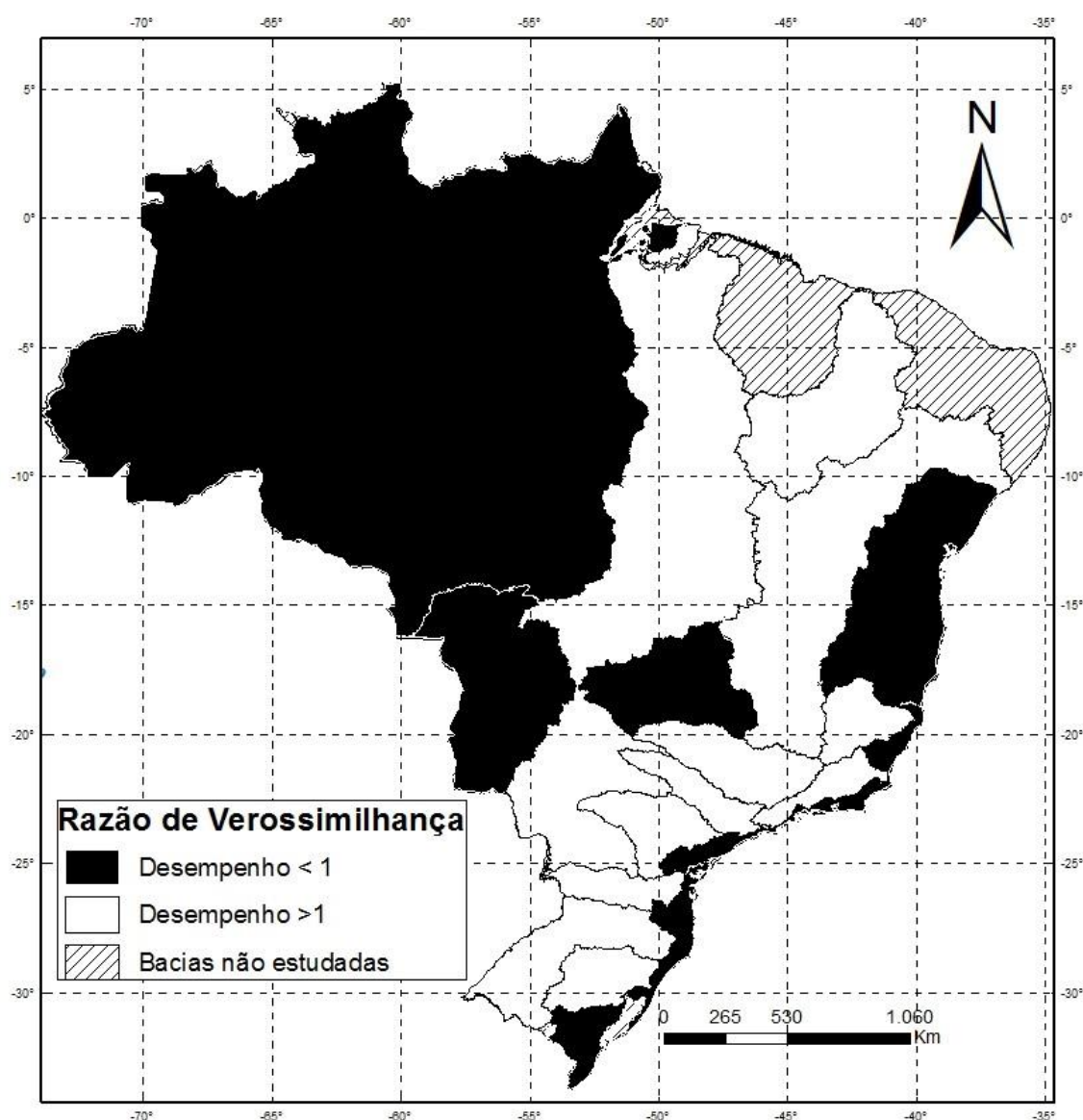


**Figura 36:** Projeções de ENA pelo modelo WAR para o período de 2015 a 2024 com base na Banda de Baixa Frequência

FONTE: Autor

#### 4.5.4 *Análise de desempenho do Modelo WARs*

A Figura 37 mostra a razão de verossimilhança de 10 anos obtida pela Equação (23). O modelo demonstrou uma melhora em relação à climatologia para as bacias do Grande, Paranaíba, Paranapanema, São Francisco Tocantins, Doce, Uruguai, Jacuí, Paraná tietê, Iguaçu e Paraíba do Sul. No entanto para as bacias do Paraguai, Parnaíba, Amazonas, Atlântico Sudeste Atlântico Sul e Atlântico Leste o modelo demonstrou uma piora na projeção em relação à Climatologia.



**Figura 37:** Razão de verossimilhança obtida entre o modelo WARs e climatologia para as bacias do SIN

FONTE: Autor (Arquivos Funceme)

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados de ENA mensal para as bacias do SIN mostram que há diferentes comportamentos sazonais, com regimes complementares entre si. Esses comportamentos permitem que o sistema hidroelétrico possa operar seus reservatórios usando ao máximo a disponibilidade dos recursos para a produção de energia, regularizar as aflúências (controle das cheias nos períodos úmidos e racionalização em períodos secos) bem como acionar as termoelétricas no caso da produção de energia hidroelétrica não suprir a demanda da sociedade.

O Subsistema Sul e Sudeste/Centro-Oeste indicaram tendência positiva, o Subsistema Nordeste apresentou tendência negativa enquanto que o Subsistema Norte apresentou sinais de variabilidade climática não significativa. Isso possibilita entender como se comportará os Subsistema em relação a produção de energia, considerando sua tendência de aumento ou redução.

Alexandre (2012) descreve os estudos de Stuck et al. (2006) que analisaram dados mensais de vazões e a capacidade do fenômeno ENSO, explicando, assim, a variabilidade do regime hidrológico dos rios da América do Sul. Os autores verificaram significativa relação entre as vazões e a variabilidade de ENSO na maior parte da América do Sul. Como a ENA é um produto direto das vazões naturais (que está relacionada a pluviosidade) essa mesma variabilidade pode ser observada nesse estudo.

Os padrões de variações identificados de ENA sugerem uma relação com a Oscilação Decadal do Pacífico, como é o caso da bacia do Atlântico Sudeste e a bacia do Doce, que apresentaram oscilação periódica de aproximadamente 30 anos, coincidindo-se os índices positivos (períodos quentes) com períodos de ENAs menos favoráveis e os índices negativos (períodos frios) com períodos de ENAs mais favoráveis.

Pode-se perceber que a climatologia é um dos métodos mais utilizado pelo os pesquisadores para a análise de variabilidade. No entanto nesse estudo observa-se que o modelo WAR apresentou uma melhora em relação a climatologia para a maioria das bacias, sendo essa metodologia de análise de projeções uma possibilidade de prever o comportamento da série e assim criar medidas que mitiguem riscos associadas a falta ou excesso de água.

Conclui-se, que medidas devem ser consideradas quando se fala no uso da água, como a combinação de tecnologias inovadoras e uma gestão efetiva. A sociedade, em geral, precisa de se adaptar e reavaliar suas abordagens quanto ao uso da água, tendo



como critério a adaptação da variabilidade climática. Os gestores são cada vez mais motivados a implementar ações com tomada de decisão baseada no gerenciamento de risco à medida que a percepção sobre variabilidade climática de longo prazo e os efeitos potenciais da mudança global do clima (CEBDS, 201-).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília-DF,2015.

ALEXANDER, M. A.; KILBOURNE, K. H.; NYE, J. A. **Climate variability during warm and cold phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) 1871–2008**, NY 11794, United States Journal of Marine Systems 133 (2014) 14–26.

ALEXANDRE, A. M. B. **Previsão de Vazões Mensais para o Sistema Interligado Nacional Utilizando Informações Climáticas**. Fortaleza-CE,2012.

ALVES, B. C. C. et al. **Análise de Tendências e Padrões de Variação das Séries Históricas de Vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS)**. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=154&SUMARIO=2255>. Acesso em: 15 maio. 2016.

ALVES, B. C. C. et al. **Avaliação dos padrões de variabilidade e mudança climática no setor elétrico brasileiro**. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3781/1/2012\\_dis\\_bccalves.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3781/1/2012_dis_bccalves.pdf). Acesso em: 15 jun. 2016.

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**. *Internacional Journal Climatology*, 25: 2017–2030. 2005.

ANGELOCCI, L. R; SENTELHAS, P. C. **Variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática**. Material didático de uso na disciplina LCE 306 – Meteorologia Agrícola. Departamento de Engenharia de Biossistemas - setor de Agrometeorologia, ESALQ/USP, 2010.

ARAÚJO, R. J. T. **Modelagem e Otimização na geração hidrelétrica de energia: uma abordagem com emprego de sistemas inteligentes**. Belo Horizonte, 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-ABRADEE. Disponível em: < <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/sistema-interligado> >. Acesso em: 21 abr. 2017.

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

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão**. RBRH — *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 13 n.1 Jan/Mar 2008, 181-196

CAMPOS, N.; STUDART, T. **Gestão das Águas- Princípios e Práticas**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity.** J. Climate, 17, p. 88-108, 2004.

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (Brazilian Business Council for Sustainable Development). **Estudo sobre adaptação e vulnerabilidade à mudança Climática: O caso do Setor elétrico Brasileiro,** Rio de Janeiro-RJ, (201-)

COSTA, M. S. et al. **Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil.** Universidade Federal do Rio Grande do, Natal – RN, Brasil, 2015.

CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 20 jul. 2016.

DANTAS, L. G. et al. **Oscilação Decadal do Pacífico e Multidecadal do Atlântico no Clima da Amazônia Ocidental.** Revista Brasileira de Geografia Física, vol. 03, p.600-611, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2011.** Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 20 fev. 2017. Rio de Janeiro – RJ, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Balanco Energético Nacional.** Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf). Acesso em: 22 ago. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia.** 2007b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICAS-EPE. **Estudos da demanda de energia: NOTA TÉCNICA DEA 13/14- Demanda de Energia 2050.** Rio de Janeiro, 2014.

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. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818112002032>. Acesso em: inserir.

HAAS, R. *et al.* **Influência de Fenômenos Climáticos no Desempenho de dois Parques Eólicos.** Rio de Janeiro-RJ, 2013

HASTENRATH. S.; HELLER, L. **Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil.** J. Royal Meteorologic Society, v.103, p. 77-92, 1977.

INEP: El NIÑO e La Ninã. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/lanina/pt>>. Acesso em: 26 jun. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA-IPEA. **Setor elétrico: desafios e oportunidades.** Brasília-DF,2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. **Informações sobre produtos de monitoramento climático mensal e trimestral das chuvas no Brasil na página do CPTEC/INPE.** Cachoeira Paulista, SP, 2014. Disponível em: [http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/Documento\\_produto\\_evolucao.pdf](http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/Documento_produto_evolucao.pdf). Acesso em: 30 abr. 2016.

*INTERNATIONAL ENERGY STATISTICS* (US, EIA). Disponível em:<<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12&cid=ww,BR,CH,&syid=1980&eyid=2012&unit=BKWH>>. Acesso em: 30 abr. 2016.

JUNIOR, F. DE J. M.; CATEN, C. S. **Estudo sobre o efeito da Autocorrelação de Modelos AR(1) no Controle Estatístico de Processo.** Florianópolis, SC, 2004.

JÚNIOR, L.N; NETO, J. L. S. **Contribuição aos Estudos da Precipitação no Estado do Paraná: A Oscilação Decadal do Pacífico – ODP.** Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista-São Paulo- SP, 2016.

KODAMA, Y., 1982: **Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ).** Part II: Conditions for generating the STCZs. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 581-610.

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.

LOPES, J. E. G.; SANTOS, R. C. P. **Capacidade de reservatórios.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária; São Paulo, 2002.

MANTUA, N.J., et al. **A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production.** *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1069-1079, 1997.

MARENGO, J. A et al. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro: Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas.** Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande, 2011.

MARQUES, A.; DIAS, M. V. S.; ANJOS, J. A. S. A. **Crise Hídrica: Reserva de Energias nos reservatórios.** Gramado, RS, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS-MME. **Balanco Energético Nacional – Resultados Preliminares** Empresa de Pesquisa Energética. EPE, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 15 maio. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS-MME. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 15 maio. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS-MME. **Matriz Energética Nacional:2030**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 15 maio. 2016.

MORETTIN, P. A. Econometria financeira. Edgard Blücher, 2008.

MORETTIN, P. A. **Ondas e ondeletas: da análise de Fourier à análise de ondeletas**. EDUSP, São Paulo, 1999.

NOAA-**Climate.gov**: Science & Information for a climate-smart nation. Disponível em: <<https://www.climate.gov/enso>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. **Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America**. Journal of Climate, v. 9, n.10, p. 2464-2479, 1996.

NÓBREGA, R. S. **Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP**. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v.29. p. 111- 120 2014.

OLIVEIRA, G. S. **O El Niño e Você: O fenômeno climático**. Editora Transtec-São José dos Campos, SP, 2001. 1169. Disponível em: <[http://enos.cptec.inpe.br/saiba/Oque\\_el\\_nino.shtml](http://enos.cptec.inpe.br/saiba/Oque_el_nino.shtml)>. Acesso em: 05 ago. 2015.

OPERADOR NACIONAL DE SISTEMA-ONS - **Atualização de Séries Históricas de Vazões** – 1931 a 2010. Operador Nacional do Sistema – ONS. Brasília. 36p, 2011b.

OPERADOR NACIONAL DE SISTEMA-ONS. Disponível em: [http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx). Acesso em: 15 maio. 2016.

OPERADOR NACIONAL DE SISTEMA-ONS. **Programa Mensal De Operação** - PMO Relatório de Previsão de Vazões e Geração de Cenários de Afluências, 2012. Disponível em: [http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx). Acesso em: 15 maio. 2016.

OPERADOR NACIONAL DE SISTEMA (NOS). **RE 3/119/2011- Relatório Anual de Avaliação das Previsões de Vazões - 2010**. Disponível em: [http://www.ons.org.br/download/operacao/hidrologia/pvannual\\_2010.pdf](http://www.ons.org.br/download/operacao/hidrologia/pvannual_2010.pdf). Acesso em: 05 ago. 2015.

PENA, R. F. A. **Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/geografia/oscilacao-decadal-pacifico-odp.htm>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

PIRES, A; HOLTZ, A. **CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA-CBIE**: Sistema Elétrico Brasileiro Expansão Hidrotérmica, Setembro, 2011. Plano Nacional de Energia (EPE) –2007/2016. Disponível em :<<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

Plano Nacional de Energia (EPE). Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2007a  
RAMOS, T. P. **Modelo Individualizado de Usinas Hidrelétricas Baseado em Técnicas de Programação Não Linear Integrado com o Modelo de Decisão Estratégica**. Juiz de Fora, MG, Brasil, 2011.

RAMOS, T. P. **Modelo Individualizado de Usinas Hidrelétricas Baseado em Técnicas de Programação Não Linear Integrado com o Modelo de Decisão Estratégica**. Dissertação de mestrado. DEPARTAMENTO DE ENERGIA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. Juiz de Fora - MG, Brasil, 2011

REBOUÇAS, A. da C; BRAGA, B; TUNDISI, J. G. **Águas Doces do Brasil**. 3ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.

ROCHA, E. R DE L; & CÉZAR M. DO C. M. (2015). **BALANÇO HÍDRICO DO RESERVATÓRIO DO RIO DESCOBERTO**. Disponível em: <[http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-471\\_balanco-hidrico-do-reservatorio-do-rio-descoberto](http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-471_balanco-hidrico-do-reservatorio-do-rio-descoberto)>. Acesso: 14 de jul. 2017

RODRIGUES, H.P. **Zona de Convergência do Atlântico Sul: Um Estudo Observacional e Numérico**. 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012,

RODRIGUES, L. L. M. **Análise de variância em séries temporais: uma abordagem usando ondaletas**. 2014. 100 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

ROSARIO, N.; NOBRE, P.; MELO, A.B. **Zona de convergência intertropical do atlântico: Um estudo comparativo entre simulações do MGCA CPTEC/COLA, observações e reanálises do NCEP. Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, INPE/CPTEC, Set. 2003. (INPE-10658-PRE/6120).

SÁ., L. D. A.; SAMBATTI S. B. M; GALVÃO G. P. **Ondeleta de Morlet aplicada ao estudo da variabilidade do nível do rio Paraguai em Ladário**. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.33, Número Especial, p.1775-1785, out. 1998.

SCHLESINGER; RAMANKUTTY. An Oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Revista in Nature* 367(6465):723-726.

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, p. 1529-1538, 2013.

SILVA, V. A. **Transformada wavelets – abordagem de sua aplicabilidade**. *Revista Científica Semana Acadêmica*. Fortaleza, ano MMXIV, Nº. 000059, 02/09/2014. Disponível em: <<http://semanaacademica.org.br/artigo/transformada-wavelets-abordagem-de-sua-aplicabilidade>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

SILVA, J. F. **Sistema de Armazenamento de Imagens Comprimidas Através da Transformada Wavelet**. 2008. 100 f. Dissertação(Mestrado em Engenharia elétrica)-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual paulista, Ilha Solteira-SP, 2008.

SILVEIRA, C. S. **Modelagem integrada de meteorologia e recursos hídricos em múltiplas escalas temporais e espaciais: aplicação no Ceará e no setor hidroelétrico brasileiro**. Fortaleza, 2014.

SILVEIRA, C. S., FILHO, F. A.S., LÁZARO, Y. M. C. **Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climática do IPCC-AR4 quanto a Sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual da Precipitação Sobre o Nordeste do Brasil, Bacia do Prata e Amazônia**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n.1, p.177-194. Jan/Mar, 2013.

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.

SOUSA, J. R. A.; ALMEIDA, R. M. B.; ROLIM, P. A. M. **Influência do DIPOLO DO ATLÂNTICO nas Precipitações do Leste da Amazônia/Litoral Norte Brasileiro** (Macapá-AP, Belém-PA e São Luis-MA), VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belo Horizonte/MG, 1994

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

TORRENCE C., COMPO, G. P., 1998. **A Practical Guide to Wavelet Analysis**. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 61–78.

TRENBERTH, K.E; SHEA, D.J. **Atlantic hurricanes and natural variability in 2005**. *Geophysical Research Letters* 33, L12704, doi:10.1029/2006GL026894, 2006.

## 7. APÊNDICES

### APÊNDICE A - TABELA DE PRODUTIVIDADE PARA OS RESERVATÓRIOS CONSIDERADOS

**Tabela 2: PRODUTIVIDADE (MWmed/m3/s)**

ID	CÓDIGO DE POSTO	BACIA	USINA/ APROVEITAMENTOS	PRODUTIBILIDADE CADASTRADA	PRODUTIBILIDADE ADOTADA
001	001	GRANDE	CAMARGOS	0,1971	0,1971
002	002		ITUTINGA	0,2447	0,2447
003	006		FURNAS	0,7726	0,7726
004	007		MASC. DE MORAES	0,3337	0,3337
005	008		ESTREITO	0,5627	0,5627
006	009		JAGUARA	0,4043	0,4043
007	010		IGARAPAVA	0,1525	0,1525
008	011		VOLTA GRANDE	0,2472	0,2472
009	012		P COLOMBIA	0,2038	0,2038
010	014		CACONDE	0,8146	0,8146
011	015		EUC DA CUNHA	0,7461	0,7461
012	016		LIMOEIRO (As. Oliveira)	0,2064	0,2064
013	017		MARIMBONDO	0,4939	0,4939
014	018		AGUA VERMELHA	0,4710	0,4710
015	211		FUNIL-GRANDE	0,3457	0,3457
016	248	PARANAÍBA	B. COQUEIROS	0,3247	0,3247
017			BATALHA	-	0,0000
018	032		CACH DOURADA	0,2826	0,2826
019	247		CACU	0,2408	0,2408
020	207		CAPIM BRANCO 1	0,5036	0,5036
021	028		CAPIM BRANCO 2	0,4018	0,4018
022	209		CORUMBA I	0,6106	0,6106
023	023		CORUMBA III	0,3621	0,3621
024	205		CORUMBA IV	0,6190	0,6190
025	024		EMBORCACAO	1,1027	1,1027
026	099		ESFORA	0,3995	0,3995
027	261		FOZ DO RIO CLARO	0,2480	0,2480
028	031		ITUMBIARA	0,6813	0,6813
029	206		MIRANDA	0,6143	0,6143
030	025		NOVA PONTE	1,0025	1,0025
162	294		SALTO	0,4113	0,4113
032	241		SLT VERDINHO	0,3657	0,3657
033	033		SAO SIMAO	0,6241	0,6241
136	251	SERRA FACAO	0,6429	0,6429	
035	047	PARANAPANEMA	JURUMIRIM	0,2935	0,2935
036	048		PIRAJU	0,2296	0,2296
037	049		CHAVANTES	0,6247	0,6247
038	249		OURINHOS	0,0944	0,0944
039	050		LUCAS GARCEZ	0,1497	0,1497
040	051		CANOAS 2	0,1289	0,1289
041	052		CANOAS 1	0,1509	0,1509
042	057		MAUÁ	-	0,0000
043	061		CAPIVARA	0,3712	0,3712



044	062		TAQUARUCU	0,2207	0,2207
045	063		ROSANA	0,1720	0,1720
046	259	PARAGUAI	ITIQUEIRA I	0,7642	0,7642
163	295		JAURO	0,9182	0,9182
048	278		MANSO	0,5145	0,5145
155	281		P.PEDRA	2,2012	2,2012
050	190	PARANAÍBA	B. ESPERANCA	0,3719	0,3719
051	270	TOCANTINS	SERRA DA MESA	1,0315	1,0315
052	191		CANA BRAVA	0,3990	0,3990
053	253		SÃO SALVADOR	0,2035	0,2035
054	257		PEIXE ANGICAL	0,2457	0,2457
055	273		LAJEADO	0,3248	0,3248
149	271		ESTREITO TOC	0,1789	0,0000
057	275		TUCURUI	0,5482	0,5482
058	155	SÃO FRANCISCO	RETIRO BAIXO	0,3261	0,3261
059	156		TRES MARIAS	0,4301	0,4301
060	158		QUEIMADO	1,6039	1,6039
061	169		SOBRADINHO	0,2410	0,2410
062	172		ITAPARICA	0,4479	0,4479
063	175		PAULO AFONSO	-	0,0000
064	173		MOXOTÓ	-	0,0000
065	176		COMPLEXO	1,0201	1,0201
066	178		XINGÓ	1,0846	1,0846
067	144		DOCE	MASCARENHAS	0,1889
068	148	AIMORÉS		0,2471	0,2471
069	141	BAGUARI		0,1623	0,1623
070	263	PORTO ESTRELA		0,4242	0,4242
071	134	SALTO GRANDE		0,7829	0,7829
072	149	CANDONGA		0,4664	0,4664
073	183	A. DIAS + SÁ CARVALHO		0,9375	0,9375
145	262	GUILMAN		1,0242	1,0242
075	102	URUGUAI	SÃO JOSÉ	0,1985	0,1985
076	103		PASSO SÃO JOÃO	-	0,0000
077	094		FOZ CHAPECO	0,4635	0,4635
078	286		QUEBRA-QUEIXO	1,0522	1,0522
079	092		ITÁ	0,9186	0,9186
080	217		MACHADINHO	0,9187	0,9187
081	215		BARRA GRANDE	1,3896	1,3896
082	216		CAMPOS NOVOS	1,6244	1,6244
083			GARIBALDI	-	0,0000
084	220		MONJOLINHO	0,5597	0,5597
085	093		PASSO FUNDO	2,2427	2,2427
086	114		JACUÍ	D.FRANCISCA	0,3432
087	113	ITAUBA		0,8259	0,8259
088	112	JACUI		0,8282	0,8282
089	111	PASSO REAL		0,3797	0,3797
090	110	ERNESTINA		-	0,0000
091	284	14 DE JULHO		0,3061	0,3061
092	097	MONTE CLARO		0,3601	0,3601
093	098	CASTRO ALVES		0,7585	0,7585
094		BALBINAS		-	0,0000

095		AMAZONAS	C. NUNES	-	0,0000
152	277		CURUA-UNA	0,1570	0,1570
161	291		DARDANELOS	0,8689	0,8689
098			FERREIRA GOMES	-	0,0000
164	296		GUAPORÉ	1,4108	1,4108
100			JIRAU	-	0,0000
101	145		RONDON II	0,5418	0,5418
102			JARI	-	0,0000
154	279		SAMUEL	0,2711	0,2711
160	287		SANTO ANTONIO	-	0,0000
105			TELES PIRES	-	0,0000
106	034		PARANÁ	ILHA SOLTEIRA	0,3901
130	244	ILHA SOLTEIRA EQUIVALENTE		-	0,0000
108	066	ITAIPU ART.		1,0647	1,0647
109	045	JUPIA ART.		0,1980	0,1980
110	046	P.PRIMAVERA ART.		0,1593	0,1593
111	160	TIETÊ	PONTE NOVA (alto Tietê)	-	0,0000
112	038		BARIRI ART.	0,1881	0,1881
113	118		BILLINGS	-	0,0000
114	119		BILLINGS + PEDRAS	-	0,0000
115	164		E. DE SOUZA - TRIBUT	-	0,0000
116	117		GUARAPIRANGA	-	0,0000
117	039		IBITINGA ART.	0,1872	0,1872
118	042		N.AVANHANDAVA ART.	0,2601	0,2601
119	109		PEDREIRA	-	0,0000
120	040		PROMISSAO ART.	0,2059	0,2059
121	104		TRAIÇÃO	-	0,0000
122	043		TRES IRMAOS ART.	0,3901	0,3901
123	073	IGUAÇU	JORDÃO NAT.	-	0,0000
124	072		FUNDÃO	0,8299	0,8299
125	222		SALTO CAXIAS	0,5930	0,5930
126	078		SALTO OSORIO	0,6307	0,6307
127	077		SLT SANTIAGO	0,8820	0,8820
128	071		STA CLARA PR	0,8133	0,8133
129	076		SEGREDO NAT.	1,0242	1,0242
130	331	ATLÂNTICO SUDESTE	H.BORDEN	5,6537	5,6537
131	116		PEDRAS	-	0,0000
132	196		ROSAL	1,6950	1,6950
133	115		CAP.CACH. (governador Parigot Sousa)	6,5259	6,5259
134	101	ATLÂNTICO SUL	SALTO PILAO	1,8158	1,8158
135		PARAÍBA DO SUL	ANTA (Nilo Peçanha)	-	0,0000
136	123		FUNIL	0,5327	0,5327
137	130		ILHA POMBOS NAT.	-	0,0000
138	120		JAGUARI	0,5046	0,5046
139	132		LAJES ART.	-	0,0000
140	121		PARAIBUNA	0,7003	0,7003
141	197		PICADA	1,1054	1,1054
142	122		SANTA BRANCA	0,3524	0,3524
143	125		STA. CECILIA	-	0,0000
144	203		SANTANA NAT.	-	0,0000

145	198		SOBRAGI	0,6252	0,6252
146	201		TOCOS	-	0,0000
147	188	ATLÂNTICO LESTE	ITAPEBI	0,7177	0,7177
148	254		PEDRA DO CAVALO	0,9204	0,9204
149	255		IRAPÉ	1,4906	1,4906
150	283		SANTA CLARA - MG	0,4584	0,4584

FONTE: Autor (Dados do ONS)

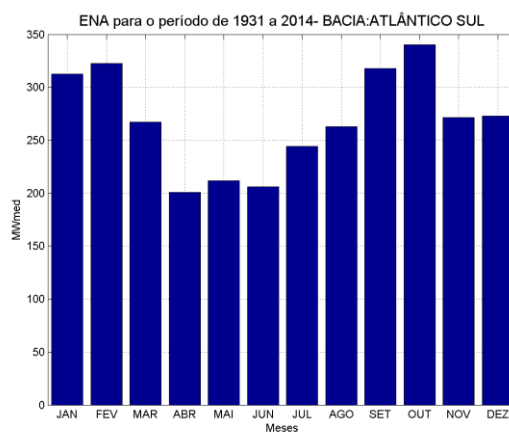
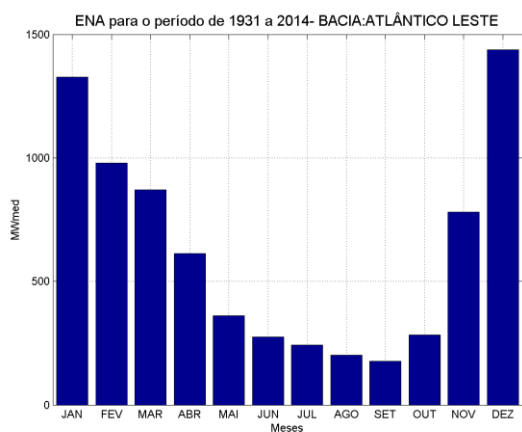
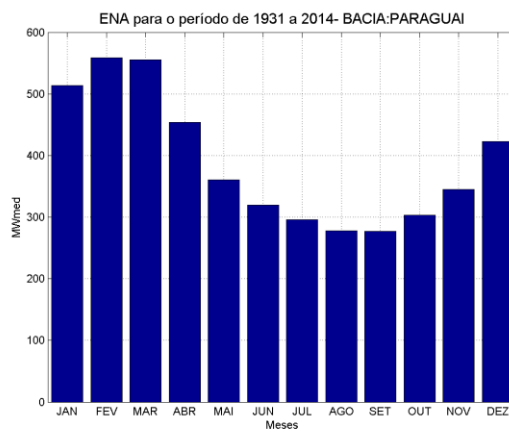
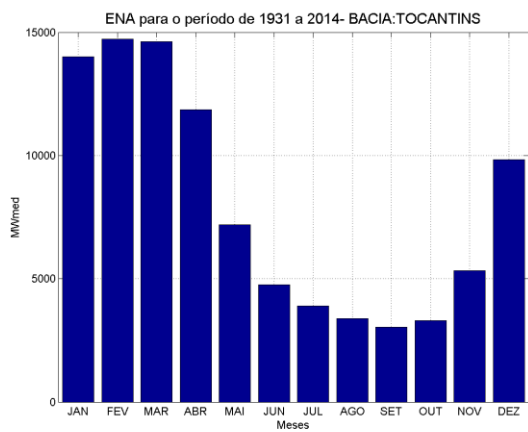
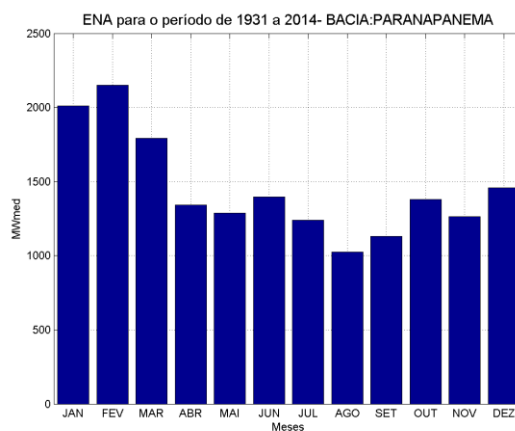
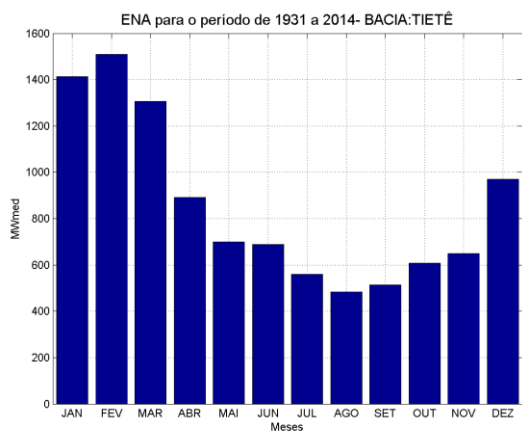
## APÊNDICE B - CLASSIFICAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS POR SUBSISTEMAS

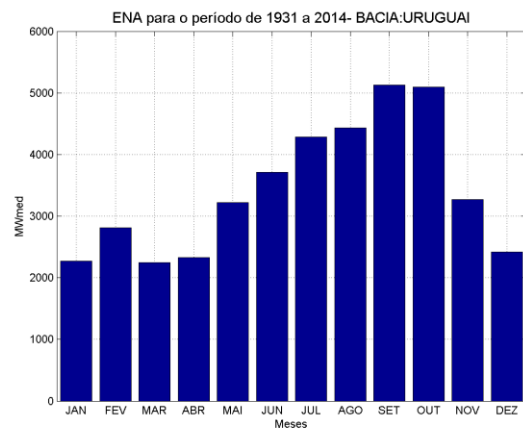
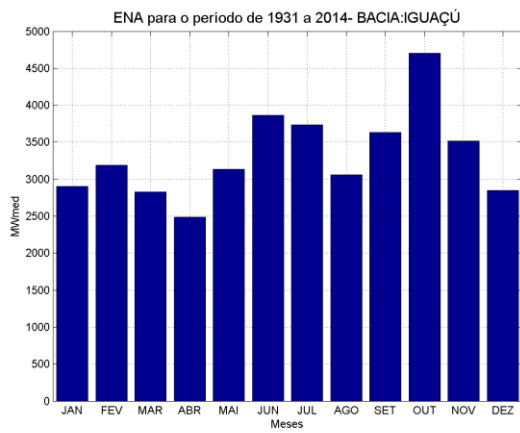
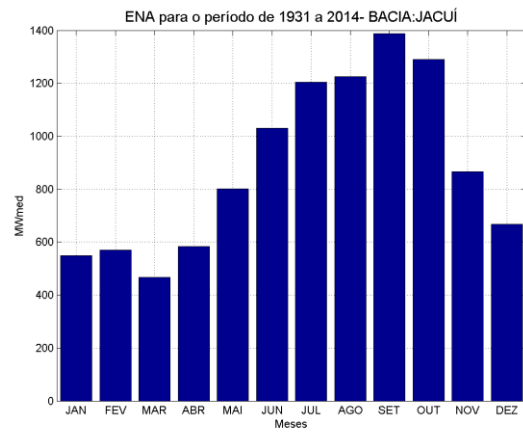
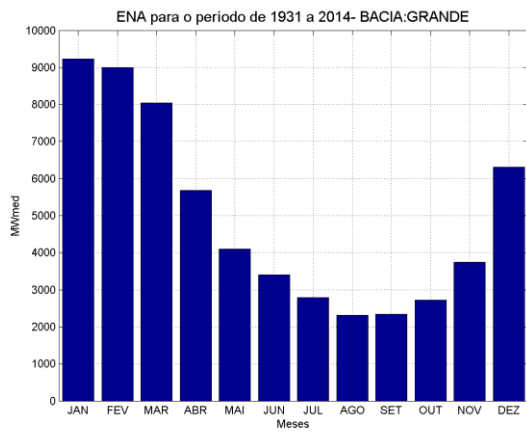
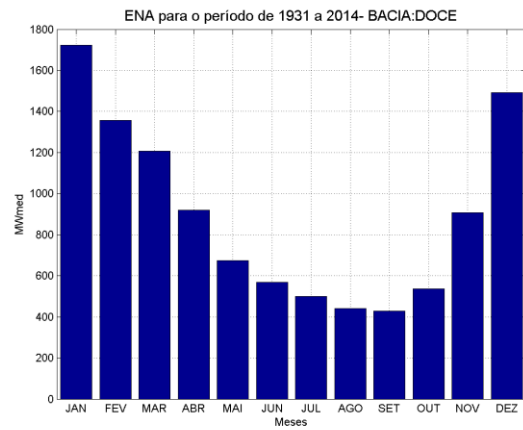
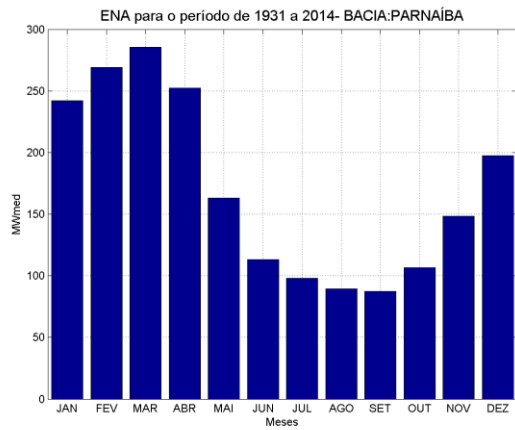
**Tabela 3:** Classificação dos aproveitamentos hidroelétricos por Subsistemas segundo o Programa Mensal De Operação - PMO

<b>SUBSISTEMA SUDESTE</b>			
<b>APROVEITAMENTO/ RESERVATÓRIO</b>			
001 CAMARGOS	248 B. COQUEIROS	245 JUIPIA NAT.	283 SANTA CLARA - MG
002 ITUTINGA	261 FOZ DO RIO CLARO	045 JUIPIA ART.	262 GUILMAN
211 FUNIL-GRANDE	294 SALTO	246 P.PRIMAVERA NAT.	183 A. DIAS + SÁ
006 FURNAS	241 SLT VERDINHO	046 P.PRIMAVERA ART.	CARVALHO
007 MASC. DE MORAES	099 ESPORA	266 ITAIPU NAT.	134 SALTO GRANDE
008 ESTREITO	237 BARRA BONITA NAT.	066 ITAIPU ART.	263 PORTO ESTRELA
009 JAGUARA	037 BARRA BONITA ART.	160 PONTE NOVA	149 CANDONGA
010 IGARAPAVA	238 BARIRI NAT.	161 E. DE SOUZA	141 BAGUARI
011 VOLTA GRANDE	038 BARIRI ART.	117 GUARAPIRANGA	148 AIMORÉS
012 P COLOMBIA	239 IBITINGA NAT.	119 BILLINGS + PEDRAS	144 MASCARENHAS
014 CACONDE	039 IBITINGA ART.	318 H. BORDEN	278 MANSO
015 EUC DA CUNHA	240 PROMISSAO NAT.	120 JAGUARI	295 JAURU
016 LIMOEIRO	040 PROMISSAO ART.	121 PARAIBUNA	259 ITIQUIRA I
017 MARIMBONDO	242 N.AVANHANDAVA NAT.	122 SANTA BRANCA	252 ITIQUIRA II
018 AGUA VERMELHA	042 N.AVANHANDAVA ART.	123 FUNIL	281 P.PEDRA
251 SERRA FACAO	243 TRES IRMAOS NAT.	125 STA. CECILIA	255 IRAPÉ
024 EMBORCACAO	043 TRES IRMAOS ART.	197 PICADA	279 SAMUEL
025 NOVA PONTE	047 JURUMIRIM	198 SOBRAGI	145 RONDON II
206 MIRANDA	048 PIRAJU	130 ILHA POMBOS NAT.	287 SANTO ANTONIO
207 CAPIM BRANCO 1	049 CHAVANTES	201 TOCOS	291 DARDANELOS
028 CAPIM BRANCO 2	249 OURINHOS	202 LAJES NAT.	296 GUAPORÉ
205 CORUMBA IV	050 LUCAS GARCEZ	303 FONTES	155 RETIRO BAIXO
023 CORUMBA III	051 CANOAS 2	203 SANTANA NAT.	156 TRES MARIAS
209 CORUMBA I	052 CANOAS 1	132 LAJES ART.	158 QUEIMADO
031 ITUMBIARA	061 CAPIVARA	131 NILO PEÇANHA	270 SERRA DA MESA
032 CACH DOURADA	062 TAQUARUCU	306 PEREIRA PASSOS	191 CANA BRAVA
033 SAO SIMAO	063 ROSANA	299 ILHA POMBOS ART	253 SÃO SALVADOR
247 CACU	034 ILHA SOLTEIRA	196 ROSAL	257 PEIXE ANGICAL
			273 LAJEADO
<b>SUBSISTEMA SUL</b>			
<b>APROVEITAMENTO/ RESERVATÓRIO</b>			
071 STA CLARA PR	078 SALTO OSORIO	098 CASTRO ALVES	220 MONJOLINHO
072 FUNDÃO	222 SALTO CAXIAS	284 14 DE JULHO	094 FOZ CHAPECO
073 JORDÃO NAT.	110 ERNESTINA	215 BARRA GRANDE	286 QUEBRA-QUEIXO
070 JORDÃO ART.	111 PASSO REAL	216 CAMPOS NOVOS	102 SÃO JOSÉ
074 FOZ DO AREIA	112 JACUI	217 MACHADINHO	103 PASSO SÃO JOÃO
076 SEGREDO NAT.	113 ITAUBA	092 ITÁ	115 CAP.CACH.
075 SEGREDO ART.	114 D.FRANCISCA	093 PASSO FUNDO	101 SALTO PILAO
077 SLT SANTIAGO	097 MONTE CLARO		
<b>SUBSISTEMA NORDESTE</b>			
<b>APROVEITAMENTO / RESERVATÓRIO</b>			
168 INCR.3M/SBD	172 ITAPARICA	178 XINGÓ	190 B. ESPERANCA
169 SOBRADINHO	176 COMPLEXO	188 ITAPEBI	254 PEDRA DO CAVALO
<b>SUBSISTEMA NORTE</b>			
<b>APROVEITAMENTO / RESERVATÓRIO</b>			
271 ESTREITO TOC	275 TUCURUI	277 CURUA-UMA	

FONTE: Autor (Dados do Programa Mensal De Operação – PMO)

## APÊNDICE C - VARIABILIDADE SAZONAL DE ENERGIA NATURAL AFLUENTE POR BACIA

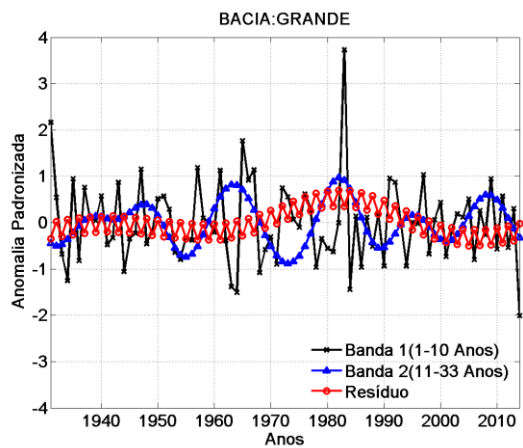
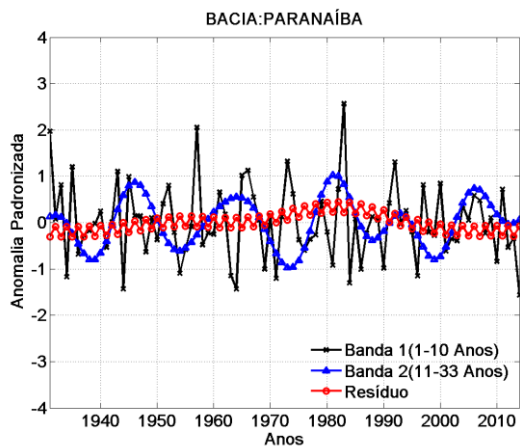
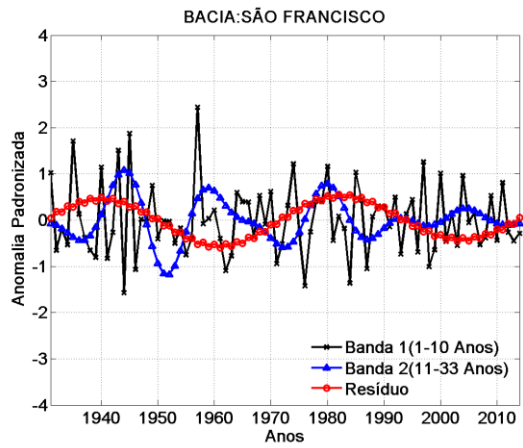
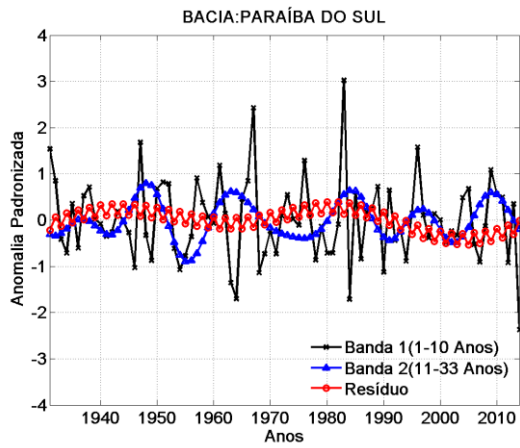
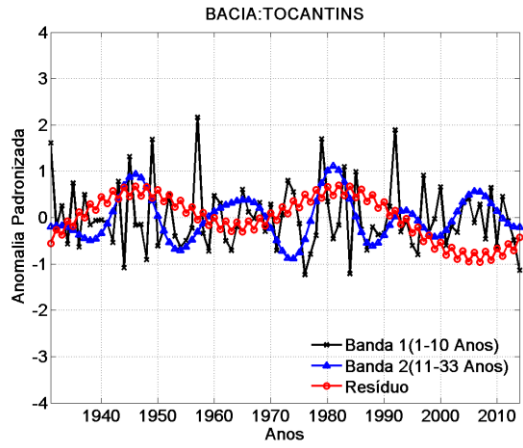
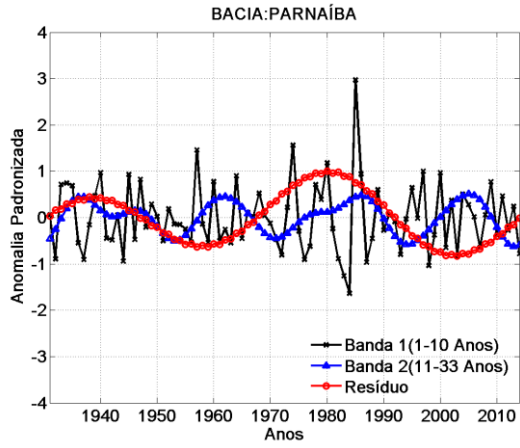


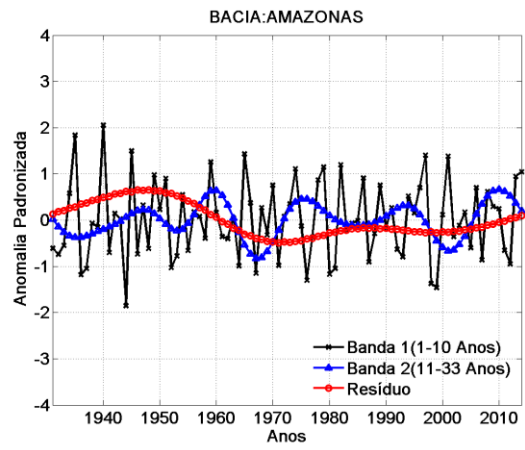
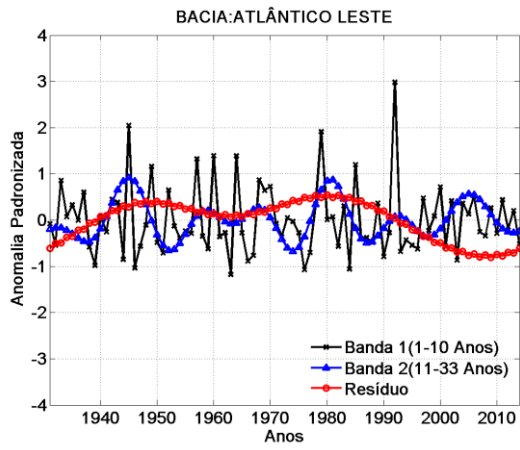


**Figura 38:** ENA Mensal em MWmed por Bacia para o período de 1931 a 2014

FONTE: Autor

## APÊNDICE D - ESPECTRO DE WAVELETS POR BACIAS



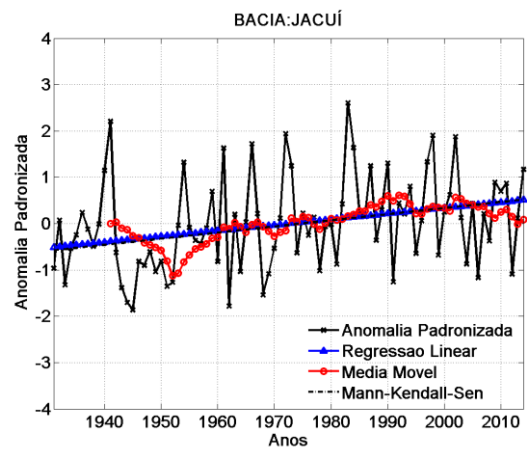
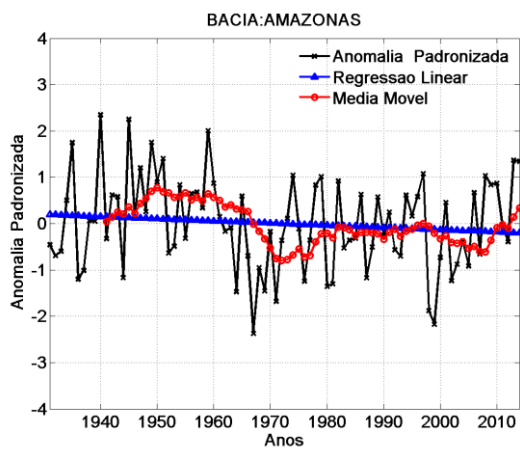
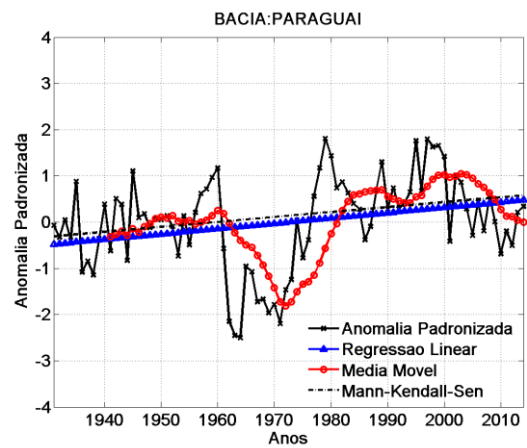
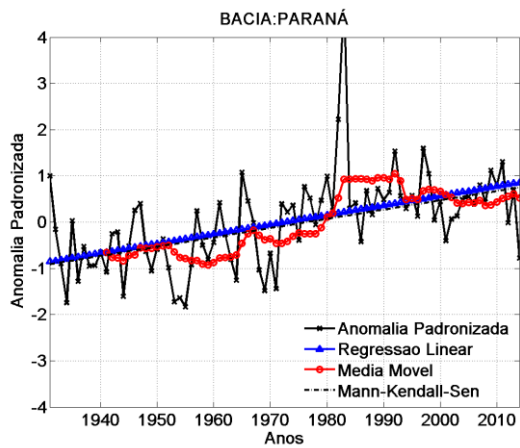
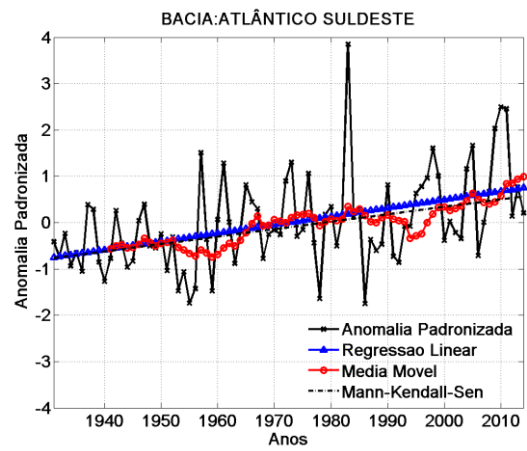
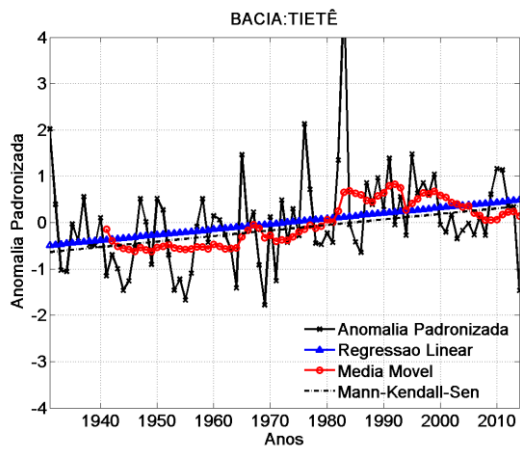


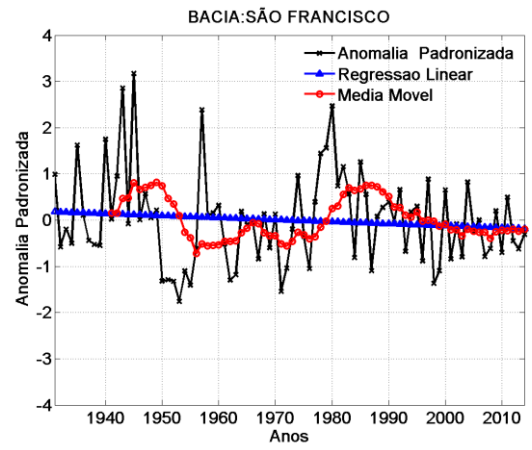
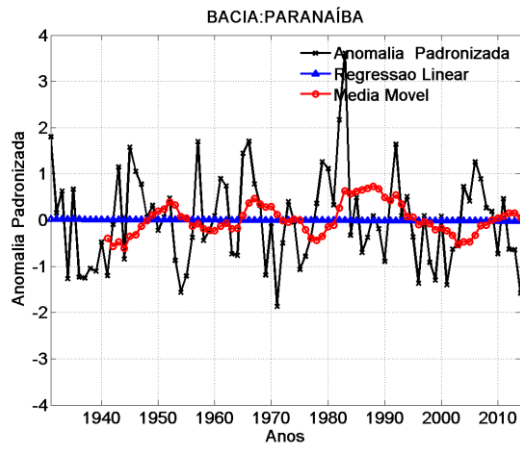
**Figura 39:** Espectro de Ondeletas

FONTE: Autor



## APÊNDICE E- TESTE DE TENDÊNCIAS E MÉDIAS MÓVEIS





**Figura 40:** Análise de Variabilidade e Tendências

FONTE: Autor