

**Pedro Siemsen Bulhões Carvalho da Fonseca**

**El Niño e a Geração Elétrica Brasileira**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA**

**MECÂNICA**

Programa de Graduação em

Engenharia Mecânica

**Rio de Janeiro, 03 de Dezembro de 2015**

**Pedro Siemsen Bulhões Carvalho da Fonseca**

**El Niño e a Geração Elétrica Brasileira**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

Projeto apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel pelo Programa de  
Graduação em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

**Orientador**

Carlos Valois Maciel Braga

**Rio de Janeiro, 03 de Dezembro de 2015**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



# EL NIÑO E A GERAÇÃO ELÉTRICA BRASILEIRA

**Projeto de Graduação**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Aluno: Pedro Siemsen Bulhões Carvalho da Fonseca**

**Matrícula: 0921064**

**Orientador: Carlos Valois Maciel Braga**

Rio de Janeiro, 03 de Dezembro de 2015



# EI NIÑO AND THE BRASILIAN ELECTRICAL POWER GENERATION

**Projeto de Graduação**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**  
**Aluno: Pedro Siemsen Bulhões Carvalho da Fonseca**  
**Matrícula: 0921064**  
**Orientador: Carlos Valois Maciel Braga**

Rio de Janeiro, 32 de Dezembro de 2015

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao professor Carlos Valois Maciel Braga pela orientação e pelas ideias ao longo de todo o presente projeto. Sua inquietação em relação à preservação do planeta para as gerações futuras é inspiradora.

Agradeço também à minha família, que esteve presente em todas as fases da minha formação, moldou meu caráter e me deu forças para continuar sempre em busca dos meus sonhos. Em especial, agradeço aos meus avós, fontes de inspiração ética e profissional, meus pais, que não mediram esforços na minha criação e me ampararam nos momentos mais difíceis, e meus irmãos, que, com amizade e companheirismo, fizeram da vida um caminho mais leve.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do presente trabalho com comentários, ideias e informações, em especial, Paula Nobre, Pedro Maciel e Marcus Temke.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que me ajudaram a superar esta etapa da minha vida, tanto na parte acadêmica, quanto emocional e crescer tanto na parte profissional, quanto pessoal. Sem a ajuda de vocês o desafio teria sido muito mais árduo.

## **RESUMO**

No presente trabalho é avaliado o comportamento climático brasileiro durante um período de ocorrência de evento do El Niño. É feito, também, um estudo para estimar as consequências energéticas de tal evento a partir de análises dos setores de geração e transmissão de energia elétrica. Um estudo sobre o El Niño é realizado para apresentar seu funcionamento e suas consequências. É mostrado como o homem vem causando profundos impactos na natureza e o que devemos esperar para o futuro caso nenhuma medida seja tomada. É feita uma avaliação do comportamento do setor energético para, a partir das consequências climáticas do El Niño, ser possível estimar os níveis dos principais reservatórios responsáveis pela geração elétrica no Brasil. Para tanto, é proposto um modelo de estimativa da quantidade de energia armazenada nos reservatórios a curto prazo. Levando em consideração as características do território brasileiro e das tecnologias disponíveis, propostas e recomendações serão apresentadas ao final do trabalho.

**Palavras-chave:** El Niño, Energia, Geração Elétrica, Reservatórios, Energia Armazenada

## **ABSTRACT**

In the present work the Brazilian the climatic behavior during the period of an El Niño event is evaluated. There is also a study to estimate the energetic consequences of such event through analysis of the generation and transmission sectors. A study about El Niño is conducted to show its operations and climatic consequences. It's shown how man is deeply impacting the nature and what to expect in the future, if no action is taken. An evaluation of the energy sector's behavior is made to be possible to estimate the level of major reservoirs in Brazil, considering the climatic consequences of El Niño. For such, a model to estimate the storage of energy in the reservoirs is proposed. Considering the characteristics of the Brazilian territory and the technologies available today, proposals and recommendations are presented at the end of this work.

**Keywords:** El Niño, Energy, Electrical Power Generation, Reservoir, Stored Energy

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Motivação.....	1
<b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
2.1. El Niño.....	4
2.2. Matriz energética brasileira .....	17
<b>3. Impacto do El Niño na geração elétrica brasileira.....</b>	<b>31</b>
3.1. Impactos climáticos nas regiões brasileiras .....	31
3.2. Consequências energéticas .....	39
<b>4. Proposta de soluções .....</b>	<b>52</b>
4.1. Curto prazo.....	52
4.2. Eventos futuros.....	53
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>55</b>
<b>6. Bibliografia .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da região onde é feita a medição da TSM - NOAA.....	5
Figura 2: Variação da TSM no Pacífico em set/2015 (NWS, 2015).....	6
Figura 3: Sistema de circulação atmosférica e oceânica no Pacífico Equatorial em condições normais (CPTEC, 2015).....	8
Figura 4: Sistema de circulação atmosférica e oceânica no Pacífico Equatorial durante o El Niño (CPTEC, 2015) .....	9
Figura 5: Histórico de variação da TSM na região Niño 3.4 (GGWS, 2015).....	10
Figura 6: Variação da TSM na região Niño 3.4 ao longo do milênio (Emile-Geay, 2013).....	16
Figura 7: Histórico da TSM na região Niño 3.4 a partir de 1850 com uma média móvel de 10 anos e sua linha de tendência para três diferentes bancos de dados (Emile-Geay, 2013).....	16
Figura 8: Matriz da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil (EPE, 2015) .....	19
Figura 9: Energia armazenada ao longo do tempo (CHIPP, 2013).....	20
Figura 10: Exemplo de complementariedade entre as fontes solar e eólica (BLASQUES, 2005).....	22
Figura 11: Potencial instalável de energia eólica total e por região brasileira (AMARANTE, 2001).....	19
Figura 12: Potencial anual médio de geração de energia solar por região brasileira (PEREIRA, 2006)..	24
Figura 13: Interligações do sistema elétrico nacional e principais bacias do Brasil (ONS, 2010).....	26
Figura 14: Energia armazenada nos reservatórios por região (ONS, 2015).....	28
Figura 15: Participação de diferentes fontes energéticas na matriz de energia elétrica ao longo do tempo (BEN, 2015).....	30
Figura 16: Impacto climático do El Niño em diferentes regiões do mundo (CPTEC, 2015).....	31
Figura 17: Mapa da precipitação média anual de 30 anos (1961-1990) no território brasileiro em mm/ano (INMET, 2015).....	33
Figura 18: Sazonalidade pluviométrica trimestral no Brasil (ANA, 2014).....	33
Figura 19: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região Norte (1961-1990).....	34
Figura 20: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região Nordeste (1961-1990).....	35
Figura 21: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região SE/CO (1961-1990).....	36
Figura 22: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região Sul (1961-1990).....	37

Figura 23: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal por região brasileira (1961-1990).....	38
Figura 24: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema Norte.....	44
Figura 25: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema Norte e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015.....	44
Figura 26: Comparação do ano projetado com outros anos na região Norte.....	45
Figura 27: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema NE.....	46
Figura 28: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema NE e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015.....	46
Figura 29: Comparação do ano projetado com outros anos na região NE.....	47
Figura 30: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema SE/CO.....	48
Figura 31: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema SE/CO e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015.....	48
Figura 32: Comparação do ano projetado com outros anos da região SE/CO.....	49
Figura 33: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema Sul.....	50
Figura 34: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema Sul e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015.....	50
Figura 35: Comparação do ano projetado com outros anos na região Sul.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da TSM entre Jan/1990 e Dez/1993 sendo destacado em vermelho um evento de El Niño (GGWS, 2015).....	6
Tabela 2: Histórico de El Niño e La Niña (NOAA, 2015).....	10
Tabela 3: Geração de energia para cada fonte em cada subsistema em agosto de 2015 (ONS, 2015).....	27
Tabela 4: Variação percentual da precipitação para ano de El Niño muito forte em relação a um ano médio, sem tal evento .....	42
Tabela 5: Situação dos principais reservatórios de acumulação em 27 Out. 2015 (ONS, 2015).....	43

## NOMENCLATURA

AEEE	Anuário Estatístico de Energia Elétrica
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ENA	Energia Armazenada
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
EPA	US Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GGWS	Golden Gate Weather Service
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IOS	Índice de Oscilação Sul
MME	Ministério de Minas e Energia
NHC	US National Hurricane Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	National Weather Service
ONI	Oceanic Niño Index
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

# **1. Introdução**

## **1.1. Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo estudar como as alterações climáticas geradas por eventos do El Niño podem impactar na geração elétrica no Brasil. Será dado foco para o período 2015/2016, quando está previsto um evento El Niño de forte intensidade. Ao final serão apresentadas propostas de soluções para curto prazo e eventos futuros.

## **1.2. Motivação**

A escassez de recursos hídricos vem afetando cada vez mais frequentemente a população brasileira. Se tratando de um país com um sistema elétrico baseado em geração hidráulica, faz-se necessária uma análise profunda das causas e consequências de uma crise hídrica. O Brasil possui a maior reserva de água doce, a maior bacia hidrográfica (Amazônica) e maior planície alagável (Pantanal) do planeta (CAMPOS, 2015) e seria seriamente afetado por uma seca prolongada. A falta de planejamento, infraestrutura, investimento, o desmatamento, a seca e o desperdício são alguns dos fatores que, imediatamente, são apontados como prováveis causas de uma crise iminente. Tendo tais fatores somados a um possível agravante (El Niño), os efeitos poderiam ser catastróficos.

Anomalias atmosféricas e oceânicas registradas em setembro de 2015 pelo órgão governamental meteorológico dos Estados Unidos (NWS) sugerem o início de um forte El Niño, que duraria até, pelo menos, a primeira metade de 2016 (NWS, 2015). Eventos de El Niño geram grande impacto no comportamento climático ao redor do globo, desde fortes chuvas, que geram alagamentos e enchentes, até secas duradouras em diferentes regiões. Devido as dimensões do Brasil e sua grande diversidade de biomas, não é trivial e nem acurado analisar o

impacto do El Niño no país como um todo. Para abordar o assunto será necessário uma análise por região, para ser, então, aplicado em uma conclusão mais geral. O fato de ser possível contornar os problemas compensando as consequências energéticas em uma região prejudicada com benefícios gerados em outra também será debatido. Análises bem feitas e pertinentes em conjunto com acontecimentos observados no passado são, provavelmente, os melhores meios de se criar perspectivas para repensar as estratégias e construir um futuro a favor da sociedade.

No Capítulo 2 é apresentada uma introdução aos fenômenos do El Niño e La Niña e suas consequências. Dados históricos e atuais são analisados para pôr em perspectiva a magnitude do evento que já se iniciou. Uma análise para determinar se há influência do homem na frequência e magnitude dos eventos de El Niño também é realizada. Na segunda parte do capítulo será apresentada a matriz energética brasileira, como ela é organizada e quais são os principais meios de geração utilizados no país. Os possíveis gargalos da geração elétrica brasileira também são discutidos.

Já no Capítulo 3 é mostrado como o impacto do El Niño no clima pode afetar a geração de energia no Brasil. Os dados do Capítulo 2 são analisados de um ponto de vista mais geral fazendo relações entre o ambiente e a geração elétrica em território nacional. Uma metodologia de estimativa dos níveis dos reservatórios em relação a precipitação é desenvolvida e aplicada às principais bacias do Brasil.

No Capítulo 4 são apresentadas propostas de soluções para os possíveis problemas já descritos. Se faz necessária uma resolução a curto e longo prazo, dado que existem problemas emergenciais, porém possivelmente não sustentáveis por um longo período.

Por fim, no Capítulo 5, é feita uma conclusão de como o país será afetado no âmbito energético e quais seriam as possíveis medidas a serem tomadas. É abordado o questionamento

de estarmos a beira de uma possível crise ou de uma situação passageira. É feita uma reflexão se será possível evitar que tais assuntos entrem novamente em pauta no futuro.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1. El Niño**

O El Niño é uma oscilação no sistema oceano-atmosfera gerada por um aumento de temperatura da superfície do mar (TSM) na região do Pacífico Equatorial. As anomalias de temperatura superficial do Oceano Pacífico foram notadas pela primeira vez no século 17 por pescadores na costa oeste da América do Sul. Essas variações de temperatura foram batizadas de El Niño em referência ao Menino Jesus (Niño Jesus) por ocorrerem mais frequentemente em dezembro, época do Natal. Com duração típica de 9 a 12 meses e eventos ocorrendo em média a cada 2 - 7 anos (NOAA, 2015), o El Niño pode impactar profundamente o clima em todo o planeta (MARK, 1983).

Enquanto o El Niño representa a variação positiva de temperatura superficial no Oceano Pacífico, o efeito chamado de La Niña, seria o seu equivalente para a variação negativa de temperatura. Essa variação na TSM entre a costa oeste do Peru e o leste da Austrália é conhecida como El Niño - Oscilação Sul (ENOS) em sua terminologia mais técnica. O ENOS representa de forma mais genérica a interação oceano-atmosfera, pois está associado a variação na TSM e sua influência nos ventos alísios do Pacífico. Além disso, o ENOS pode ser quantificado pelo Índice de Oscilação Sul (IOS) representado pela diferença de pressão no nível do mar entre o Pacífico Central e o Pacífico Oeste, sendo esta uma consequência de mudanças na TSM.

Uma forma de identificação do El Niño utilizada pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) é o “Oceanic Niño Index” (ONI). Para a medição é registrada a média de 3 meses na região conhecida como Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W),

representado na Figura 1, e comparada com a média histórica dos últimos 30 anos. Eventos de El Niño são definidos como anomalias de 0,5°C acima da média histórica medidas em 5 “eventos consecutivos” e a La Niña é o seu equivalente para 0,5°C abaixo. “Eventos consecutivos” são caracterizados por um desvio da TSM superior a 0,5°C medido em meses seguidos (GGWS, 2015), como destacado em vermelho na Tabela 1.



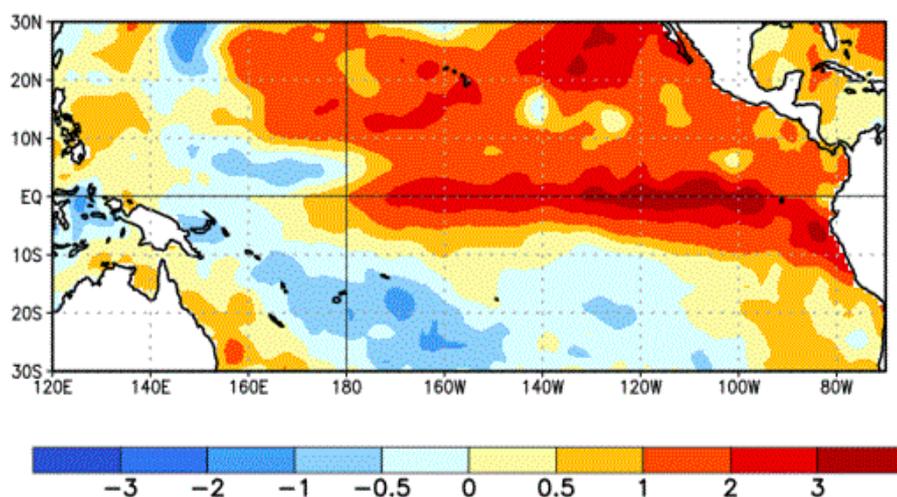
**Figura 1: Representação da região onde é feita a medição da TSM - NOAA**

Um exemplo de como ocorre a definição de um evento de El Niño está representado na Tabela 1. Entre 1990 e 1994 foi observado um evento de El Niño, entre Dezembro de 1990 e Janeiro de 1992 (em destaque), porém não foi o único período em que temperaturas acima de 0,5 °C foram registradas. Entre Setembro e Dezembro de 1992, foram registrados 4 eventos consecutivos de temperatura acima de 0,5 °C, mas não foi o suficiente para ser considerado um evento de El Niño.

**Tabela 1: Variação da TSM entre Jan/1990 e Dez/1993 sendo destacado em vermelho um evento de El Niño (GGWS, 2015)**

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>1990</b>	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	<b>0,6</b>
<b>1991</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>	<b>1,4</b>	<b>1,6</b>	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>
<b>1992</b>	<b>0,5</b>	0,2	0	-0,1	-0,1	0	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,6
<b>1993</b>	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4

A Figura 2 mostra como é afetada a superfície do Oceano Pacífico durante um evento de El Niño. Sua magnitude em extensão é notável sendo registradas anomalias da costa oeste da América do Sul à costa leste da Austrália. Tal registro foi feito em Setembro de 2015 pela National Weather Service (NWS), órgão meteorológico dos EUA, e pode ajudar a entender como funciona o surgimento de um El Niño.

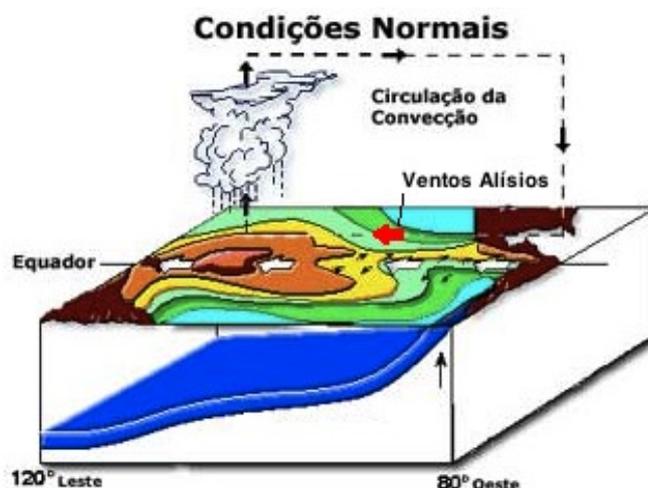


**Figura 2: Variação da TSM no Pacífico em set/2015 (NWS, 2015)**

Para compreender o El Niño é necessário entender o funcionamento do sistema de circulação dos ventos atmosféricos. Estes são extremamente importantes para a distribuição da temperatura na superfície dos oceanos e as correntes marítimas. As massas de ar do sistema global de circulação se deslocam das regiões polares em direção às regiões mais próximas ao equador. Essa movimentação se deve ao fato de que as regiões equatoriais recebem uma maior

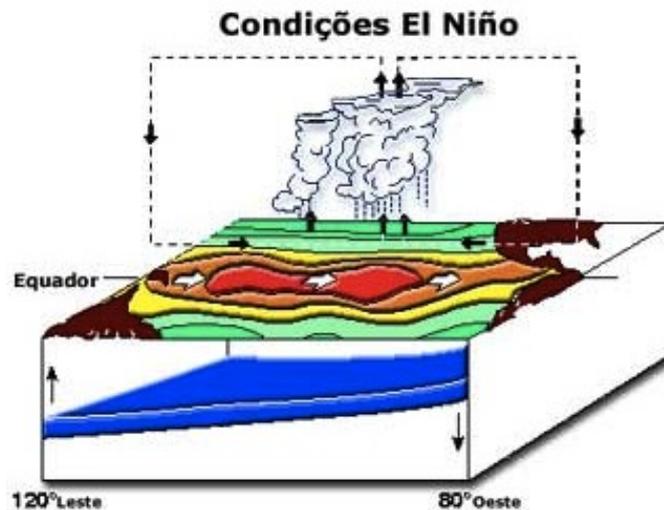
incidência solar. Como consequência dessa incidência, tais regiões apresentam maiores temperaturas e, portanto, menores pressões atmosféricas. Sendo assim, os ventos tendem a fluir das regiões de alta pressão (trópicos) para as regiões de baixa pressão (equador). Já o Efeito Coriolis (“força inercial causada pela movimentação de rotação”) é responsável pelo sentido de rotação dos ventos ao redor do globo (PENA, 2015). Os Ventos Alísios (vide destaque da Figura 3) são, por conseguinte, ventos regulares responsáveis pela circulação atmosférica e marítima da Terra.

No Pacífico Equatorial os Ventos Alísios sopram de leste para oeste gerando uma corrente na superfície do oceano em direção à Oceania. Como consequência, ocorre um afloramento de águas mais profundas na costa na América do Sul, acarretando em águas mais frias nesta região. Em períodos normais, isto é, sem a ocorrência de El Niño ou La Niña, a água superficial, aquecida pela incidência solar, circula para o oeste do oceano, levada pelos Ventos Alísios. Tal região, devido à alta temperatura superficial oceânica, possuiu um elevado índice evaporativo, o que acarreta na geração de nuvens. Tem-se então uma elevação do ar na região ocidental do Pacífico e, por fim, uma circulação de volta para a América do Sul através de ventos em regiões mais elevadas. A Figura 3 apresenta o funcionamento do sistema de integração oceano-atmosfera como descrito.



**Figura 3: Sistema de circulação atmosférica e oceânica no Pacífico Equatorial em condições normais (CPTEC, 2015)**

No caso do El Niño é observada uma alteração no funcionamento do sistema. Em uma situação extraordinária ocorre um enfraquecimento dos Ventos Alísios e a água na superfície no Pacífico para de fluir em direção ao oeste. Conseqüentemente, águas mais profundas param de aflorar na costa da América do Sul e a temperatura do Pacífico Equatorial Oriental se eleva como demonstrado na Figura 2. A região com maior formação de nuvens é deslocada para o centro do oceano e a célula de circulação é desfeita gerando anomalias de comportamento climático em todo o mundo (OLIVEIRA, 2001). A Figura 4 apresenta a representação do esquema de circulação no Pacífico Equatorial durante o El Niño.



**Figura 4: Sistema de circulação atmosférica e oceânica no Pacífico Equatorial durante o El Niño (CPTEC, 2015)**

Os Ventos Alísios podem, ocasionalmente, vir a soprar com maior intensidade em determinada época. Ocorre, então, o evento oposto ao El Niño, conhecido como La Niña. Ao soprarem mais fortes, os Ventos Alísios fazem com que a água superficial do Oceano Pacífico seja levado com mais intensidade em direção à Oceania. Em consequência disso, uma porção maior de águas profundas é trazida à superfície nas proximidades da América do Sul. Tem-se, portanto, um resfriamento da TSM na Região 3.4 (OLIVEIRA, 2001).

### **Ocorrências passadas**

O centro de monitoramento do NOAA monitora instrumentalmente dados oceânicos desde 1950 e a Tabela 2 apresenta os eventos de El Niño e La Niña registrados até os dias de hoje. Os eventos são classificados pelo órgão americano como fraco, com uma variação da TSM de 0,5 a 0,9°C, médio, entre 1,0 e 1,4°C, forte, entre 1,5 e 1,9°C e muito forte, >2°C.

Tabela 2: Histórico de El Niño e La Niña (NOAA, 2015)

El Niño				La Niña		
Fraco	Moderado	Forte	Muito Forte	Fraco	Moderado	Forte
1951-52	1963-64	1957-58	1982-83	1950-51	1955-56	1973-74
1952-53	1986-87	1965-66	1997-98	1954-55	1970-71	1975-76
1953-54	1987-88	1972-73		1964-65	1998-99	1988-89
1958-59	1991-92			1967-68	1999-00	
1968-69	2002-03			1971-72	2007-08	
1969-70	2009-10			1974-75	2010-11	
1976-77				1983-84		
1977-78				1984-85		
1979-80				1995-96		
1994-95				2000-01		
2004-05				2011-12		
2006-07						

A Figura 3 apresenta o histórico de variação da TSM em relação à média dos últimos 65 anos na região Niño 3.4.

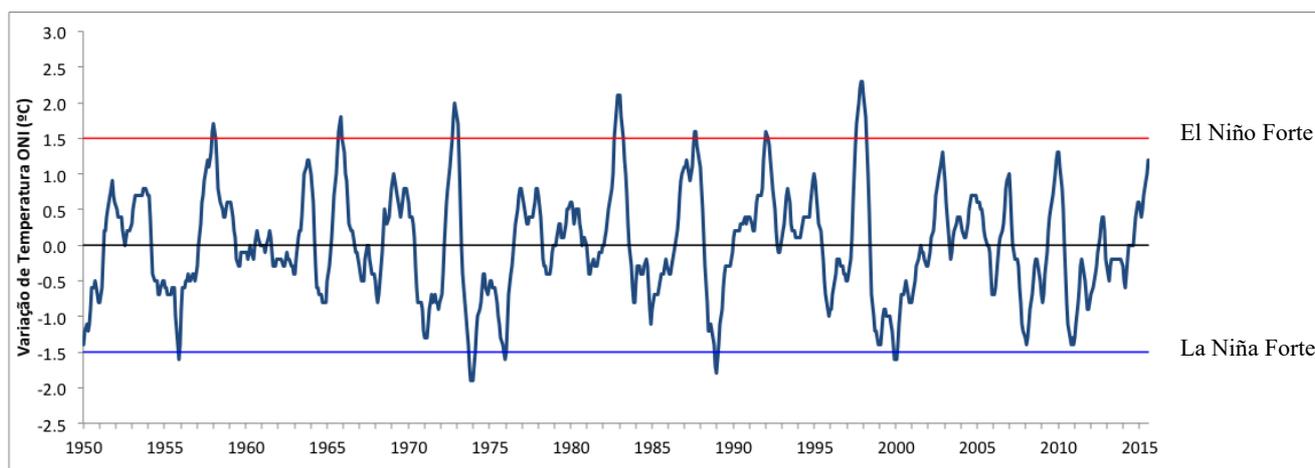


Figura 5: Histórico de variação da TSM na região Niño 3.4 (GGWS, 2015)

É importante destacar os El Niños de 1982-83 e de 1997-98 que ultrapassam a variação de 2°C e são, portanto, considerados El Niños muito fortes. Além disso, um outro fato notável na Figura 3 é o aumento da intensidade dos eventos de El Niño ao longo do tempo. Esse fato levanta a questão da influência humana nos eventos de El Niño e La Niña, apesar de sabido que tais eventos ocorrem a milhares de anos. Caso os eventos estejam sofrendo uma alteração de intensidade ou frequência com o aumento de emissões de gases do efeito estufa, poderemos estar caminhando para um cenário provavelmente catastrófico, onde eventos cada vez mais extremos poderão ser registrados.

Tal questão é levantada em um momento em que são registrados alguns acontecimentos históricos ao redor do mundo. Registros recordes de temperatura dos últimos 100 anos em cidades da região Sudeste do Brasil (PEGORIM, 2015), alagamentos e enchentes na região Sul do Brasil devido à fortes chuvas (SILVA, 2015) e o maior furacão já registrado no pacífico, o Patricia (NHC, 2015). Segundo o Centro Nacional de Furacões dos Estados Unidos (NHC), o Patricia teve uma intensificação extremamente rápida e fora do comum, tendo um registro equivalente apenas ao Furacão Linda de 1997 (mesmo ano em que foi registrado o maior El Niño até o presente momento). Outro registro histórico foi o da incrível superpopulação de flores rosas no Deserto do Atacama, considerado o lugar mais seco do mundo. O raro evento acontece a cada 5 ou 7 anos, sempre coincidindo com o El Niño, porém esse ano foi considerado pelos moradores da região, o mais espetacular das últimas décadas. A causa do florescer extraordinário foi a precipitação local. Choveu o equivalente a 14 anos em apenas um único dia (FRITZ, 2015). A Foto 1 mostra o extraordinário evento ocorrido no norte do deserto no final de Outubro de 2015.



Foto 1: Raro evento de superpopulação de flores no Deserto do Atacama

Para ser possível avaliar o impacto das emissões danosas ao meio ambiente será necessário voltarmos à épocas anteriores à Revolução Industrial (meados do século XIX), quando a concentração de gases do efeito estufa aumentaram significativamente (EPA, 2014). Segundo Painel Intergovernamental de mudanças climáticas publicado pelas Nações Unidas, é extremamente improvável que o homem não tenha qualquer interferência no aquecimento global notado nas últimas décadas. Além disso, se as projeções para 2100 se confirmarem, a velocidade do aquecimento terá sido a maior dos últimos 50 milhões de anos (SOLOMON, 2007).

### **Evidência dos corais**

A partir da década de 50, inúmeras formas de medição das condições oceânicas foram criadas e aprimoradas. A maior parte dos dados ambientais medidos instrumentalmente antes

de 1950 foram dados atmosféricos e dados oceânicos anteriores a referida data são considerados imprecisos. Tendo isso em vista, é possível afirmar que os dados oceânicos existentes, medidos instrumentalmente, não são o suficiente para conseguir avaliar a influência das emissões de gases do efeito estufa. O assunto é vastamente discutido por muitos cientistas. Alguns acreditam que o homem já influencia as variações da TSM e eventos relacionados, como é o caso do El Niño/La Niña (FAIRBANKS, 1997).

Muito antes de se começar a coletar dados de temperatura ou umidade, já existiam os mais diversos meios naturais de armazenamento de tais informações. Amostras de gelo obtidas nos Polos, anéis das árvores e evidências retiradas de corais são exemplos de fontes de dados referentes às condições climáticas, tanto oceânicas quanto atmosféricas. Nas regiões de clima tropical, a única grande fonte de informação do paleoclima são as amostras retiradas de fósseis de corais (UCAR, 2015). Essas amostras, chamadas de testemunhos, são retiradas por cilindros infiltrados transversalmente à direção do crescimento do coral, sendo, então, possível observar as características do mesmo ao longo de seu desenvolvimento.

Os registros obtidos de amostras de corais são úteis, pois estes são extremamente sensíveis às variações de temperatura do oceano. A medida que os corais crescem, camadas compostas de calcita são acrescentadas a sua estrutura. Essas camadas apresentam texturas, colorações e composições diferentes ao longo das estações. Tais variações permitem as análises a respeito do clima. Como os corais podem viver centenas de anos, é possível alinhar análises de corais de diferentes épocas para criar um histórico da variação climática ao longo de milênios (RUSSEL, 2014). A forma de medição se baseia na combinação de análises de isótopos de oxigênio com as de radiocarbono.

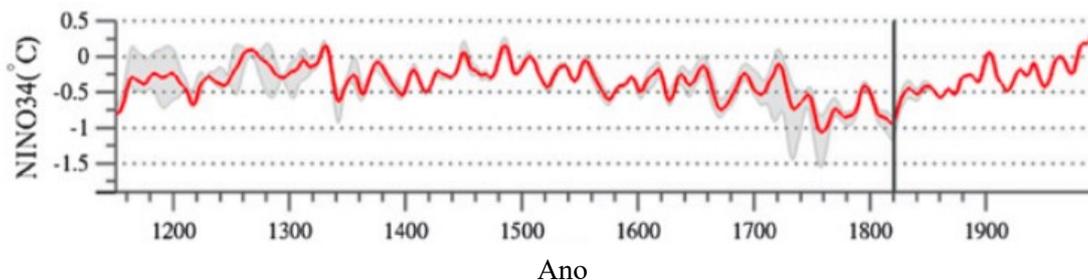
O radiocarbono, ou C14, é um isótopo radioativo do carbono com um número de massa 14. Tal isótopo é absorvido ao longo da vida por diferentes seres vivos, entre eles, os

corais. Sua concentração permanece constante até o momento da morte do respectivo ser vivo. Após a morte do organismo, a troca de  $C^{14}$  com a biosfera é interrompida. Por ser um isótopo instável, a concentração de  $C^{14}$  começa a decair de acordo ao longo do tempo com a Lei de Decadência Radioativa. Tal decaimento ocorre a uma taxa conhecida. É preciso, então, comparar o conteúdo de  $C^{14}$  da amostra obtida com uma amostra mais moderna. A radioatividade residual no momento da análise de uma amostra permite, portanto, datar quando e por quanto tempo um organismo permaneceu vivo. O decaimento do isótopo de carbono é denominado  $\Delta^{14}C$  (GODWIN, 1962).

Isótopos de oxigênio são encontrados em compostos gasosos, líquidos e sólidos nas mais diversas condições, o que os torna muito úteis para o estudo do paleoclima. O oxigênio possui três isótopos estáveis:  $^{16}O$ ,  $^{17}O$  e  $^{18}O$ , sendo a razão  $^{18}O/^{16}O$  a mais utilizada devido à maior diferença de massa e grande abundância desses elementos. Essa razão, denominada de  $\delta^{18}O$ , varia quando presente em nuvens, chuvas ou oceanos. Isso ocorre porque os isótopos  $^{16}O$ , por serem mais leves, possuem uma taxa evaporativa maior que o  $^{18}O$ , e, portanto, se encontram em maiores concentrações em nuvens e chuvas. Como existe forte relação entre as taxas evaporativas e as temperaturas superficiais oceânicas de determinada região, é possível relacionar a razão  $\delta^{18}O$  com a temperatura superficial do mar. A razão  $\delta^{18}O$  pode ser obtida, por exemplo, de testemunhos de corais que sofrem influência da composição da água de seu microhabitat para a construção de sua estrutura. É possível, então, determinar as mudanças paleoambientais de parâmetros oceânicos como temperatura, salinidade e disponibilidade de nutrientes, entre outros. Sendo assim, a variação na concentração isotópica da matéria orgânica pode refletir eventos que afetaram uma determinada região em um determinado instante (RODRIGUES, 2013).

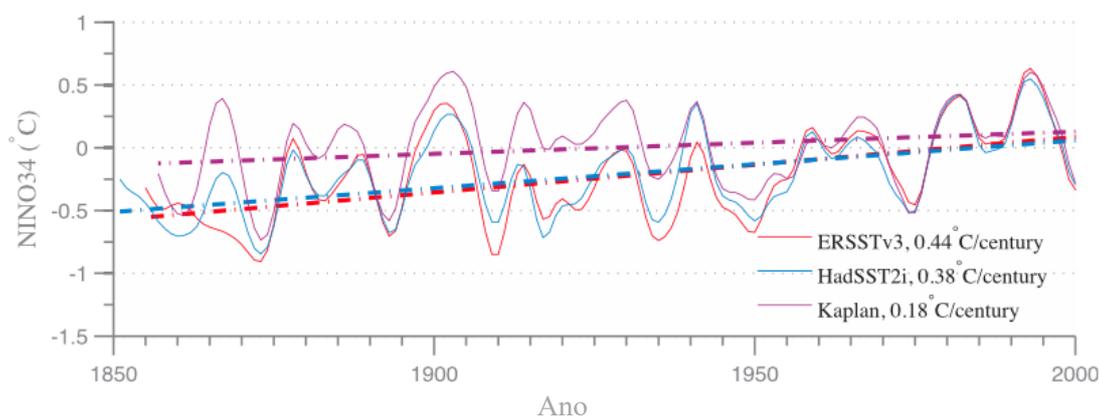
Tudhope (2001) utiliza em seu estudo análises de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\Delta^{14}\text{C}$  em corais para reconstruir as atividades do ENOS. Apesar do avanço em estudos envolvendo o ENOS, o entendimento do sistema ainda é considerado pobre. É constatado por meio de análises de corais localizados próximos à Papua-Nova Guiné, que o ENOS existe há, pelo menos, 130 mil anos, passando, inclusive, por eras glaciais. Porém, é essencial o entendimento de como ele passou a se comportar nos últimos anos para ser possível prever a variação da intensidade e frequência dos eventos. Tudhope mostra que seu comportamento tem mudado com o passar do tempo. É possível observar um aumento significativo de amplitude no ENOS em evidências mais modernas de corais (a partir do século XX). Inclusive, os eventos mais significativos de que se tem registro ocorreram nas últimas décadas.

Em outro estudo, Emile-Geay (2013) apresenta uma reconstrução do histórico de variação da TSM ao longo do último milênio. Para diminuir as incertezas foram reunidas inúmeras informações de diferentes bancos de dados e aplicadas diferentes metodologias, resultando em uma rede de evidências. Como a dificuldade de encontrar fósseis de corais anteriores ao século XVII é grande, outras fontes de evidências foram acrescentadas, como evidências em amostras de gelo, anéis das árvores e sedimentos. Mesmo com uma grande compilação de dados, as incertezas na reconstrução da TSM na época preinstrumental são notáveis. Quanto maior o número de evidências, menor a incerteza do dado mensurado e, portanto, mais precisa é a informação. A Figura 6 apresenta o histórico de um dos bancos de dados utilizados no estudo com uma média móvel de 20 anos e uma incerteza representada pela área sombreada no gráfico. A linha vertical representa o ano de 1820, quando o número de evidências já torna-se capaz de apresentar dados significativamente mais confiáveis.



**Figura 6: Variação da TSM na região Niño 3.4 ao longo do milênio (Emile-Geay, 2013)**

É perceptível o aumento da variação de temperatura a partir de 1820, sendo o momento presente o de maior variação da TSM registrada. Porém, como há grande incerteza nos dados medidos em evidências datadas em épocas distantes, é válida uma análise de dados mais atuais e confiáveis. No mesmo estudo, Emile-Geay apresenta um gráfico que reúne os três maiores bancos de informações com uma média móvel de 10 anos e uma linha de tendência linear, que está representado na Figura 7.



**Figura 7: Histórico da TSM na região Niño 3.4 a partir de 1850 com uma média móvel de 10 anos e sua linha de tendência para três diferentes bancos de dados (Emile-Geay, 2013)**

É possível observar, portanto, uma variação positiva ao longo dos anos para todos os conjuntos de dados. Tal fato reforça a ideia de que, a partir do início das emissões de gases do

efeito estufa, o Oceano Pacífico apresenta um aumento de sua temperatura superficial. Esse aumento significa uma intensificação em eventos do El Niño, o que justifica eventos ao redor do mundo de proporções nunca antes vistas e uma projeção de agravamento para o futuro.

## **2.2. Matriz energética brasileira**

A disponibilidade de energia é um dos pilares do desenvolvimento econômico e social em qualquer região do mundo. O crescimento populacional acompanhado da redução de níveis de pobreza geram uma crescente demanda por energia elétrica e um desafio para a maioria das nações. Nas últimas décadas pode-se observar uma crescente demanda por fontes energéticas menos danosas ao meio ambiente devido a uma maior conscientização global (CASTRO, 2015).

Enquanto alguns países precisariam de grandes mudanças em sua estratégia de geração elétrica para suprir as demandas sem agravar o prejuízo ambiental, o Brasil é hoje referência internacional em geração de energia limpa. Segundo a Agência Internacional de Energia, em 2014, o setor elétrico brasileiro emitiu 6 vezes menos CO<sub>2</sub> que o americano e 5 vezes menos que o europeu para produzir 1 MWh. Com mais de 70% de participação de fontes renováveis em sua matriz energética, o Brasil supera, em muito, a participação média de renováveis no mundo, que chega a 21,2% (EPE, 2015).

Apesar de possuir a segunda maior capacidade instalada de geração Hidrelétrica no mundo (RODRIGUES, 2013), o Brasil apresenta, hoje, problemas de segurança energética. O fato de possuir grande participação de geração hidrelétrica na matriz energética de geração elétrica, como apresentado na Figura 8, torna o país mais dependente do meio ambiente. As hidrelétricas têm a grande vantagem de poder estocar energia, acumulando água nos reservatórios, mas é dependente de fatores climáticos.

Outro destaque no cenário elétrico brasileiro é a geração eólica. Com menos impacto ambiental que as hidrelétricas, que necessitam de grandes áreas alagadas, a geração eólica tem seu crescimento como consequência de inovações tecnológicas. Essas inovações resultam em menores custos de investimento (CASTRO, 2015). De 2009 a 2014 a energia eólica apresentou o incrível crescimento de 812% de capacidade instalada de geração elétrica, sendo hoje responsável por mais de 4% da geração nacional (EPE, 2015) e com expectativa de aumento para 7% até 2020 (TOLMASQUIM, 2012).

A grande participação de energias dependentes do comportamento climático resulta em um aumento no risco de imprevisibilidade. Com uma grande importância estratégica para o crescimento econômico e social do país a produção de energia pode vir a se tornar um gargalo no desenvolvimento caso não haja um fluxo contínuo de investimentos e uma diversificação no sistema (MONTROYA, 2013). Para compensar o risco da imprevisibilidade ambiental é necessário uma complementariedade do setor por fontes mais confiáveis, como as usinas termelétricas (UTES). Em 2014, sua participação ultrapassou 30%, com destaque para o gás natural que representou pouco mais que 30% dessa fatia (EPE, 2015). O rápido crescimento da geração elétrica a partir do gás natural resultou no surgimento de alguns obstáculos. A principal dificuldade encontrada no mercado é a disponibilidade de gás, pois o número de produtores ainda é reduzido. O resultado desse cenário é uma política de preços elevada e uma baixa competitividade das usinas termelétricas a gás, sendo estas utilizadas somente para substituição parcial de hidrelétricas em situação de hidrologia desfavorável (CASTRO, 2015).

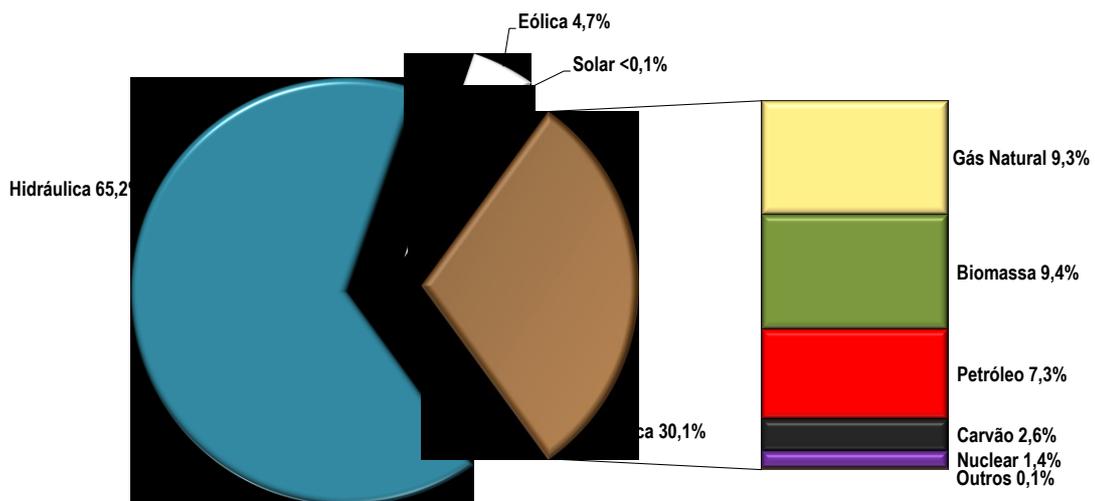
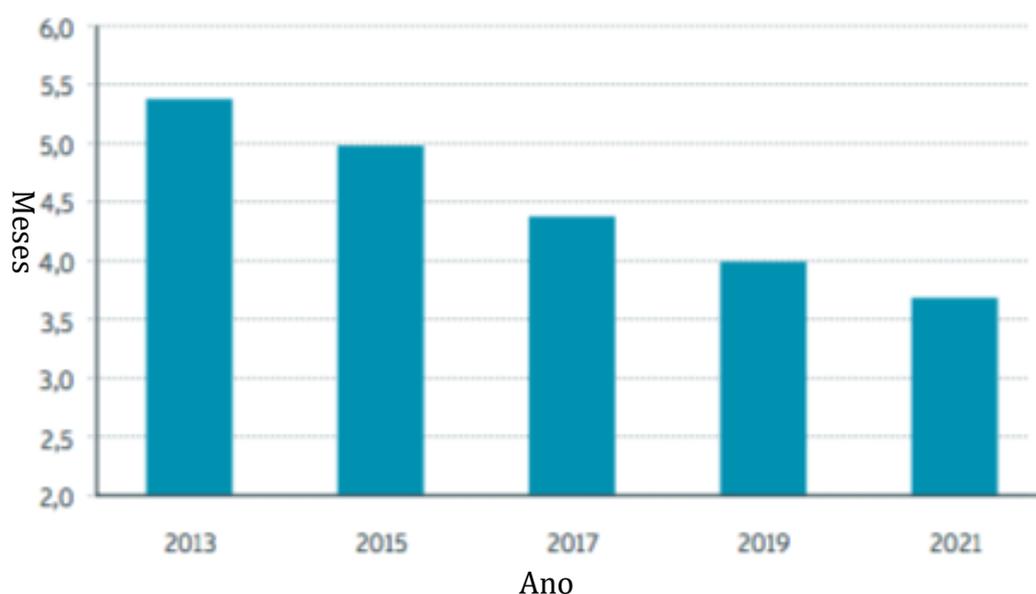


Figura 8: Matriz da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil (EPE, 2015)

A diversificação da matriz energética mostra-se essencial em um momento em que o cenário hídrico de geração passa por algumas reestruturações. Os impactos de uma hidrelétrica são conhecidos pela população brasileira e a inundação para criação de reservatórios é hoje a principal causa de protestos. O potencial hídrico a ser explorado encontra-se concentrado em regiões protegidas da Floresta Amazônica com populações indígenas (ANA, 2005). Para minimizar os impactos, está sendo adotado hoje uma política de diminuição dos reservatórios, como consta no Plano Decenal de Energia 2021 (EPE, 2006), onde não existe expectativa de construção de hidrelétricas capazes de armazenar água durante o período de um ano seco. Belo Monte, por exemplo, uma usina hidrelétrica com capacidade estimada para 11,2 GW está sendo construída utilizando a tecnologia “fio d’água”, ou seja, sem grande capacidade de armazenamento (BERMANN, 2012). As usinas “fio d’água” apresentam um risco maior devido à diminuição da capacidade de regularização dos reservatórios. A regularização dos reservatórios é a capacidade de controlar o volume de água estocado e tem grande importância do ponto de vista do planejamento. Por consequência dessa diminuição da capacidade de regularização e do aumento da demanda, é projetada uma diminuição no estoque na energia armazenável.

A diminuição no estoque de energia (passado e previsto) está apresentada na Figura 9. É possível observar que, para o caso de 2015, a capacidade de carga é de 5 meses. Essa capacidade de carga significa o tempo que seria possível gerar energia elétrica apenas com a energia estocada naquele momento. A previsão é de que esta capacidade diminua para pouco mais de 3,5 meses em 2021 (CHIPP 2013). A importância de tal fato é que o estoque de energia acontece basicamente em uma determinada época do ano, na estação chuvosa. A energia consumida na estação de seca é basicamente a energia estocada na época de maior pluviosidade. Portanto, se por algum motivo, a pluviosidade caísse a níveis muito abaixo do esperado em épocas chuvosas, seria necessário compensar a provável diminuição da geração hidrelétrica.



**Figura 9: Energia armazenada ao longo do tempo (CHIPP, 2013)**

É natural imaginar, portanto, um aumento da participação de outras fontes de energia na matriz energética para o futuro. Um fato apontado por Castro et al. (2015) deve ser levado em consideração devido à importância da expansão planejada. O Newave, software utilizado na

modelagem do sistema de geração elétrica para o PDE 2021 apresenta suposições que podem superestimar a capacidade real do sistema. Segundo Castro, existem dois problemas: “a suposição de um uso não realista dos reservatórios existentes e a modelagem da geração de pequenas centrais como energia firme”. O sistema modela, por exemplo, o sistema hídrico de um subsistema usando a metodologia das hidrelétricas equivalentes para simplificar os cálculos. Tal metodologia agrega a capacidade de armazenamento de todos os reservatórios de uma região. Uma prova da falta de precisão do referido método é o fato dele considerar uma operação normal para o cenário com níveis dos reservatórios de 2%, ou menos. No mencionado cenário, o operador nacional evitaria tal situação utilizando as termelétricas como energia complementar. Além disso, é considerada a geração média esperada para pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), eólicas e cogeração a biomassa. Apesar de razoável, essa aproximação não é veraz, pois em PCHs e usinas eólicas existem variações ao longo de estações que podem acarretar em dimensionamentos incorretos em determinadas situações. Com a construção de novas usinas hidrelétricas a “fio d’água”, as épocas de seca podem nos encaminhar para um cenário de crise de energética já que a necessidade de construção de novas UTEs está, provavelmente, subestimada.

É, portanto, clara a necessidade de uma complementariedade do sistema atual. Porém, a utilização de UTEs talvez não seja a única forma de complementar o sistema. Termelétricas também são extremamente dependentes da utilização de água para a torre de resfriamento. Além disso, diferentemente das hidrelétricas, grande parte da água utilizada pelas UTEs é perdida para o ambiente por evaporação, ou seja, não é reutilizável (LORA, 2001). O aumento da utilização de termelétricas também vem acompanhado de um aumento de emissões de gases poluentes e danosos ao meio ambiente. A tendência atual, porém, é uma busca pelo desenvolvimento sustentável que busca frear o impacto negativo gerado pelo homem no meio

ambiente. A melhor saída seria, portanto, um sistema de geração de energia elétrica baseado em fontes de energia renováveis e não prejudiciais ao planeta. As fontes de energia eólica e solar seriam ideais caso existisse uma maior estabilidade e segurança em tais sistemas de geração. Entretanto, é possível superar, mesmo que parcialmente, a descontinuidade dos referidos sistemas (PINHO, 2006).

A geração por painéis solares segue um padrão de capacidade de geração relativamente previsível. Quanto menor é a inclinação da incidência dos raios solares, maior é a capacidade de geração elétrica. Portanto, próximo ao meio dia a geração é máxima e no início ou fim do dia a geração tende a diminuir. Já para a energia eólica, existe uma maior imprevisibilidade, pois a intensidade dos ventos variam com inúmeros fatores. Todavia, um desses fatores é a incidência solar e velocidades maiores de vento são alcançadas quando a incidência é menor (PINHO, 2008). Para diminuir a descontinuidade dos sistemas citados poderia ser considerado a implementação de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico. “Considera-se um sistema híbrido, aquele em que duas ou mais tecnologias de geração de energia elétrica são conjugadas em função da disponibilidade local de recursos energéticos” (RIBEIRO, 2006). A Figura 10 mostra um exemplo de complementariedade para um sistema híbrido fotovoltaico-eólico.

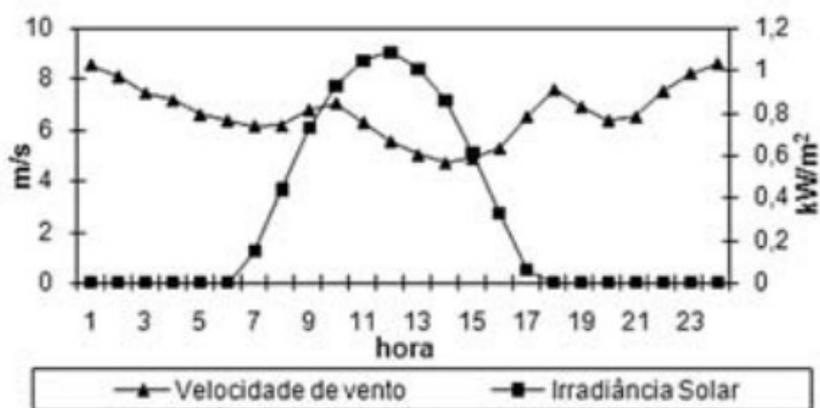
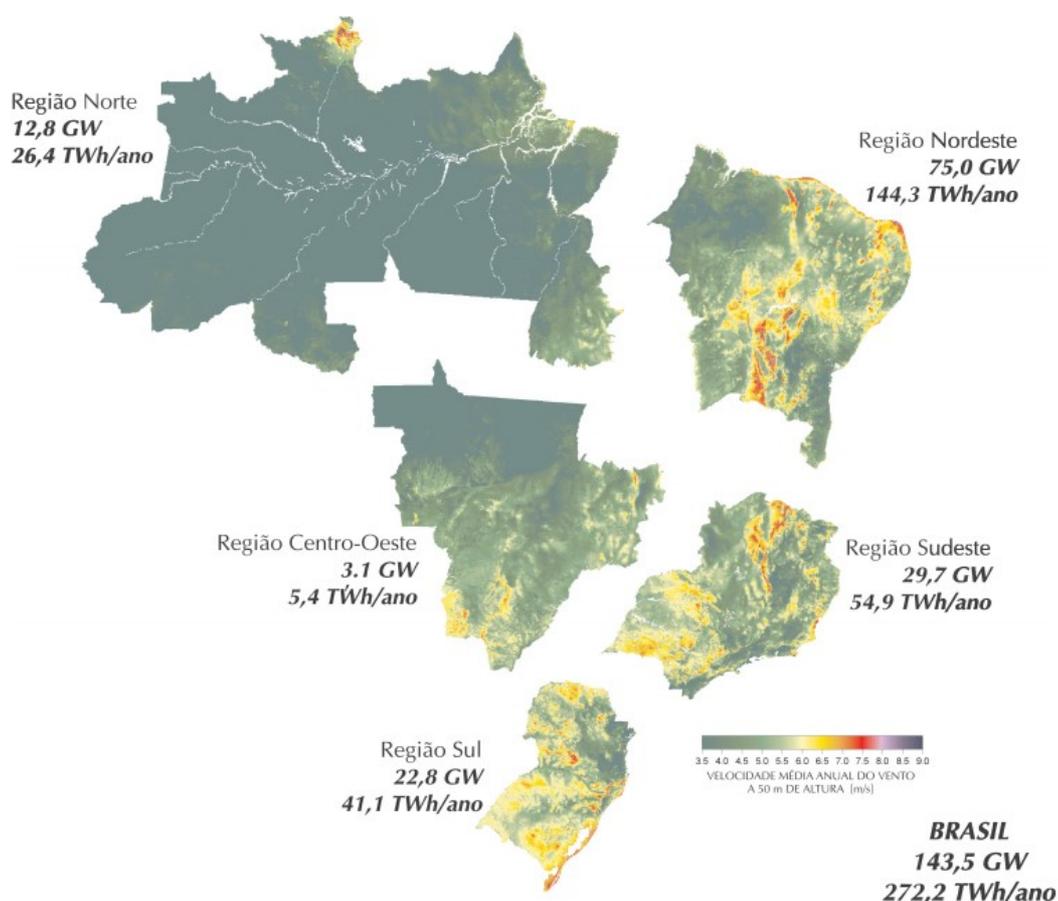


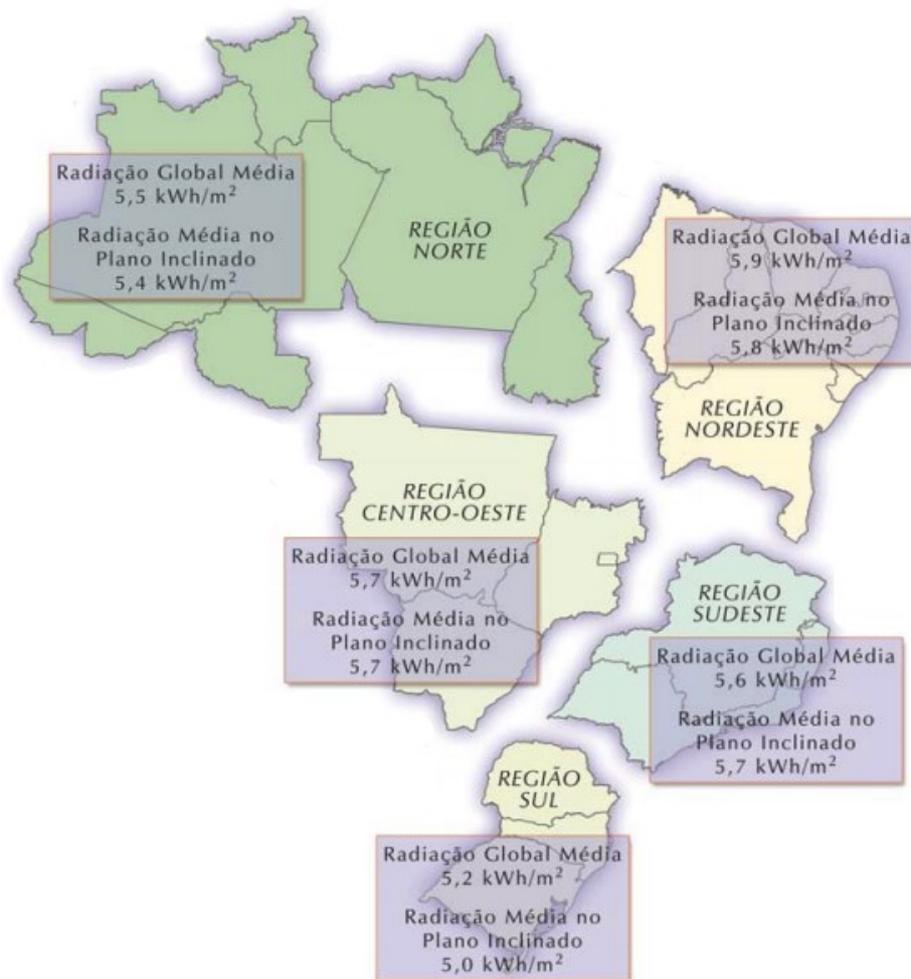
Figura 10: Exemplo de complementariedade entre as fontes solar e eólica (BLASQUES, 2005)

A Figura 11 mostra o potencial eólico disponível por região e total nacional estimado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (cresesb) e publicado no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE, 2001). Os cálculos foram realizados através da integração de mapas digitais considerando velocidade do vento e curvas de potência de turbinas eólicas existentes no mercado. Foi utilizada uma densidade média de ocupação de terreno considerada conservativa e descartadas áreas cobertas por água. A velocidade do vento médio anual utilizado foi 7 m/s. A potência nacional instalável estimada foi de 143,5 GW, sendo 75 GW apenas na região Nordeste (AMARANTE, 2001). Para se ter uma ideia da dimensão de tal potencial, a potência total de todas as fontes instaladas hoje no Brasil é de 138,7 GW (ANEEL, 2015).



**Figura 11: Potencial instalável de energia eólica total e por região brasileira (AMARANTE, 2001)**

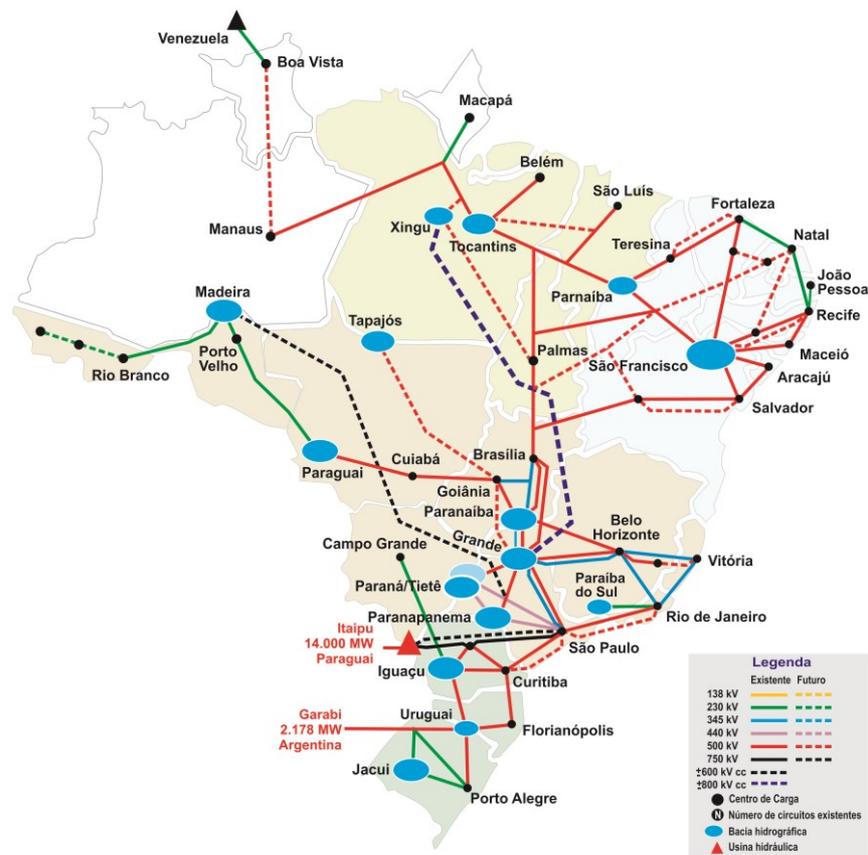
A Figura 12 apresenta o potencial anual médio de energia solar por região, para um período de 10 anos, publicado no Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA, 2006). A maior disponibilidade energética encontra-se na região Nordeste. A baixa disponibilidade na região Norte em relação ao Nordeste é explicado pelo alto índice evaporativo da Amazônia. É possível comprovar o grande potencial de energia solar no Brasil em uma análise comparativa com a Alemanha. A região mais ensolarada da Alemanha possui uma radiação global média menor que a região com menor incidência solar do Brasil (CABRAL, 2013). Ainda assim, no dia 9 de junho de 2014 o país europeu chegou a ter mais de 50% de toda a sua geração elétrica suprida por painéis solares (COSTA, 2014).



**Figura 12: Potencial anual médio de geração de energia solar por região brasileira (PEREIRA, 2006)**

## **Análise por região**

Faz-se necessário uma análise energética por região devido a complexidade e extensão do sistema elétrico nacional, além da peculiaridade de cada região. O Sistema Interligado Nacional (SIN), como é denominado o complexo elétrico no Brasil, é coordenado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) é responsável por fiscalizar e regular as ações da ONS perante o SIN. A distribuição da energia excedente é, portanto, uma responsabilidade do ONS, que visa equilibrar o fornecimento com a demanda de cada região, sendo necessário a integração do sistema como um todo (site da ONS). A Figura 13 mostra a integração eletroenergética do sistema, bem como as principais bacias hidrográficas em território brasileiro. Essa integração de usinas em diferentes bacias busca permitir o intercâmbio de energia entre todas as regiões. O objetivo é alcançar a máxima eficiência do sistema como um todo aproveitando as características hidrológicas de cada bacia e a sazonalidade dos rios (CHIPP, 2010). Existe uma defasagem nos períodos de maiores e menores vazões devido à grande extensão do território nacional e sua localização geográfica. O SIN busca, portanto, uma complementariedade e um ganho de sinergia por meio da integração dos sistemas hídricos (PNRH, 2006).



**Figura 13: Interligações do sistema elétrico nacional e principais bacias do Brasil (ONS, 2010)**

O Ministério de Minas e Energia (MME) divide o território nacional em 4 subsistemas. O subsistema Sudeste/Centro-Oeste é composto pelos estados das regiões Sudeste, Centro-Oeste, Acre e Rondônia. O subsistema Nordeste é composto pelos estados da região Nordeste, exceto o Maranhão. O subsistema Norte-Interligado é composto pelos estados do Pará, Tocantins, Maranhão, Amazonas e Amapá. E, por fim, o subsistema Sul é composto pelos estados da região Sul. Na Tabela 3 é possível observar a parcela de cada subsistema por fonte de geração em agosto de 2015, em GWh.

**Tabela 3: Geração de energia para cada fonte em cada subsistema em agosto de 2015 (ONS, 2015)**

Região	Geração Hidráulica (GWh)	Geração Térmica Convencional (GWh)	Geração Térmica Nuclear (GWh)	Geração Eólica (GWh)	Total por região (GWh)
SE/CO	10489	4985	1358	-	16832
Sul	8380	774	-	423	9577
NE	2104	2231	-	1909	6244
Norte	2739	1590	-	-	4329
Itaipu	6329	-	-	-	6329
Total	30041	9579	1358	2332	43310

É válido um destaque para a geração hidráulica do subsistema Sul, que apesar da baixa capacidade instalada em relação a outras regiões apresentou grande destaque, principalmente devido à situação atual dos reservatórios. Apesar de pequena em relação às gerações térmica e hidráulica, a geração eólica apresenta grande destaque no Rio Grande do Norte, onde representou 78,5% do total de energia do estado. Tal fato pode ser considerado um início da tentativa de diversificar a matriz energética.

Segundo o mais recente Anuário Estatístico de Energia Elétrica (AEEE) o subsistema SE/CO foi, em 2013, responsável por mais de 268 TWh de geração elétrica (EPE, 2014). Esse valor corresponde a 46% da energia total gerada no mesmo ano e, conseqüentemente, é o subsistema responsável pela maior fatia de geração. No mesmo ano, porém, apresentou o maior consumo nacional, 276 TWh, tendo sido, portanto, necessária a importação de energia de outros subsistemas.

Segundo o mesmo estudo, o subsistema Sul representou uma fatia de 27,4% da geração nacional. Gerou 156 TWh e consumiu apenas 80 TWh. Foi, portanto, capaz de fornecer energia para o SE/CO. O subsistema que mais importou energia de outras regiões foi o Nordeste. Essa região possui uma matriz bem equilibrada entre geração hidráulica, térmica e

eólica, porém apresenta um equilíbrio ambiental frágil com secas prolongadas, o que pode gerar um déficit energético.

## Energia Armazenada

Como cada região possui uma característica hidrológica diferente, é natural variar a quantidade de energia armazenada em diferentes proporções e épocas do ano. A Figura 14 apresenta uma série histórica da quantidade de energia armazenada por região de Janeiro de 1996 até Agosto de 2015. A energia armazenada é resultado do balanço entre a vazão afluente, defluente e vertida. A vazão afluente é a vazão que entra ou que flui no sentido de encher o reservatório. A vazão defluente é a vazão que deixa o reservatório com propósitos de geração elétrica, isto é, a vazão que passa pelas turbinas. A vazão vertida é a que deixa o reservatório apenas para nivelamento e não é aproveitada para nenhuma finalidade naquele determinado reservatório. Com tais vazões é possível determinar se os níveis de um reservatório estão subindo ou caindo.

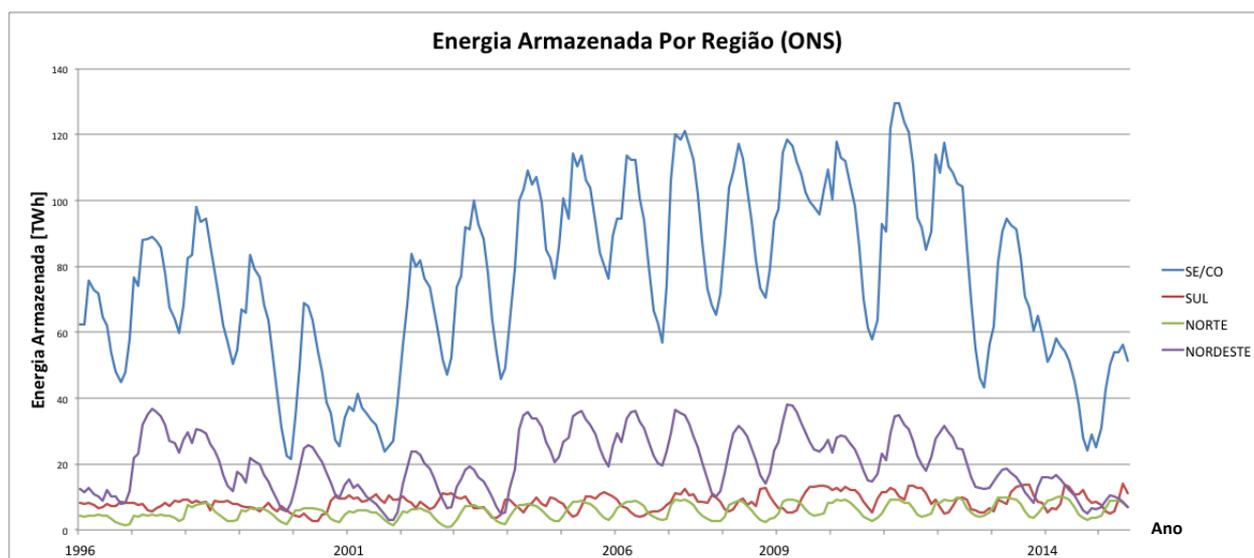
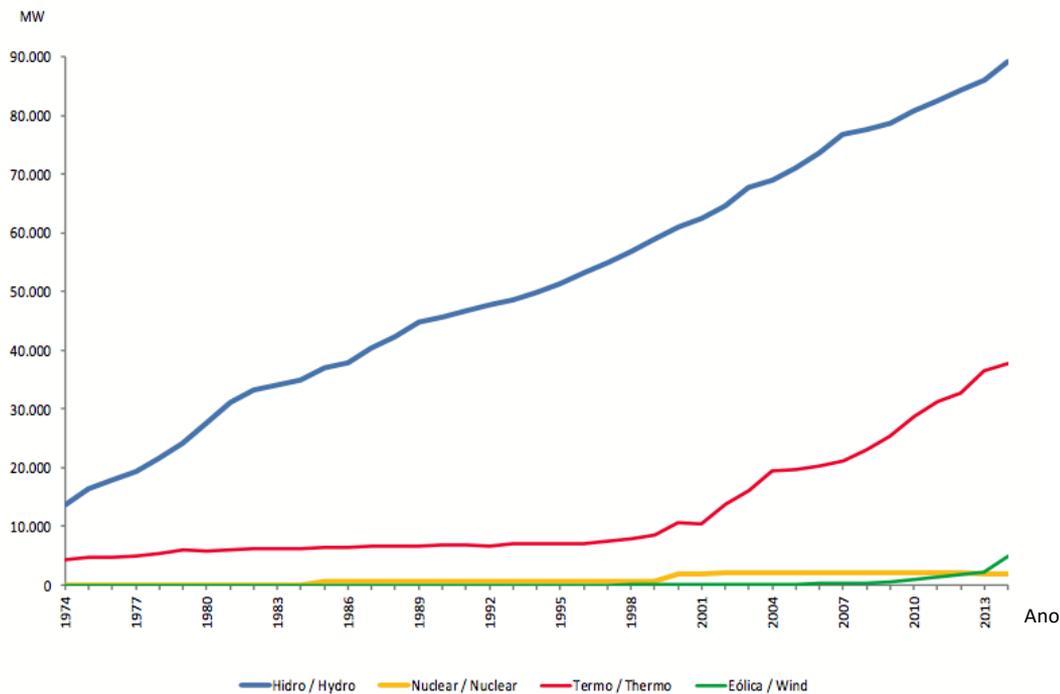


Figura 14: Energia armazenada nos reservatórios por região (ONS, 2015)

É possível observar três diferentes anos em que o estoque de energia aparece bem abaixo dos demais. O primeiro é o ano de 1996, com destaque para as regiões Norte e Nordeste. O segundo é o ano de 2001, com grande destaque para a região SE/CO. E o terceiro é o atual.

O ano de 2001 é conhecido pelo racionamento energético que impactou o crescimento econômico do país. De forma simples e direta, Tolmasquim (2000) alertou para a falta de investimento que resultaria em uma crise em 2001. É importante entender as causas da crise ocorrida para se prevenir contra novos casos no futuro. Tolmasquim prova que o crescimento da capacidade instalada não acompanhou o crescimento do consumo e que a gestão plurianual dos reservatórios foi abandonada. Mostra que o investimento insuficiente foi o grande causador da crise e não a falta de chuva. Além disso, atrasos na expansão da rede de transmissão fez com que parte da energia estocadas nas usinas na região Sul fosse impedida de ser aproveitada pelo Sudeste. Na época não havia capacidade de geração termelétrica instalada suficiente para suprir a pouca quantidade de energia estocada. Foi a partir desse momento que a participação de UTEs começou a ganhar fatia na matriz energética aumentando a segurança do sistema (TOLMASQUIM, 2000).

A Figura 14 mostra que os níveis atuais dos reservatórios são comparáveis aos da crise de 2001, tanto no SE/CO, como no Nordeste. Mas, além do desenvolvimento da rede de transmissão, há uma grande diferença na matriz energética brasileira atual. A fatia de geração termelétrica na matriz nacional em 2001 era de 14% e hoje é de 30% (EPE, 2015). A mudança do perfil de geração de energia elétrica no país está apresentado na Figura 15. Existe portanto uma maior segurança no sistema como um todo.



**Figura 15: Participação de diferentes fontes energéticas na matriz de energia elétrica ao longo do tempo (BEN, 2015)**

Apesar de apresentar uma maior segurança com o acréscimo da participação de termelétricas no setor, não seria possível suprir toda a demanda energética sem o uso da geração hidráulica. Segundo o AEEE, só em 2013 foi necessário, em todo o território nacional, uma geração de cerca de 570 TWh de energia elétrica (EPE, 2014). Portanto, seriam necessário, em média, 65 GW de capacidade instalada. A capacidade instalada total sem a participação das UHEs é hoje cerca de 45 GW (EPE, 2015). Pode-se concluir que as hidrelétricas devem ter seu estoque de energia planejados com cautela, pois sua participação na geração ainda é essencial e insubstituível.

### 3. Impacto do El Niño na geração elétrica brasileira

#### 3.1. Impactos climáticos nas regiões brasileiras

Eventos de El Niño impactam de formas diferentes as diversas regiões do mundo. A Figura 16 mostra o comportamento de diferentes regiões durante um evento de El Niño. Enquanto algumas áreas apresentam um clima mais chuvoso, outras apresentam um clima mais seco. Inúmeros fatores entram em questão e cada região deve ser analisada de forma individual para resultados mais precisos. No Brasil é possível observar um clima mais seco ao norte, enquanto que o sul do país apresenta um comportamento mais chuvoso, com temperaturas mais elevadas que o normal na zona central.

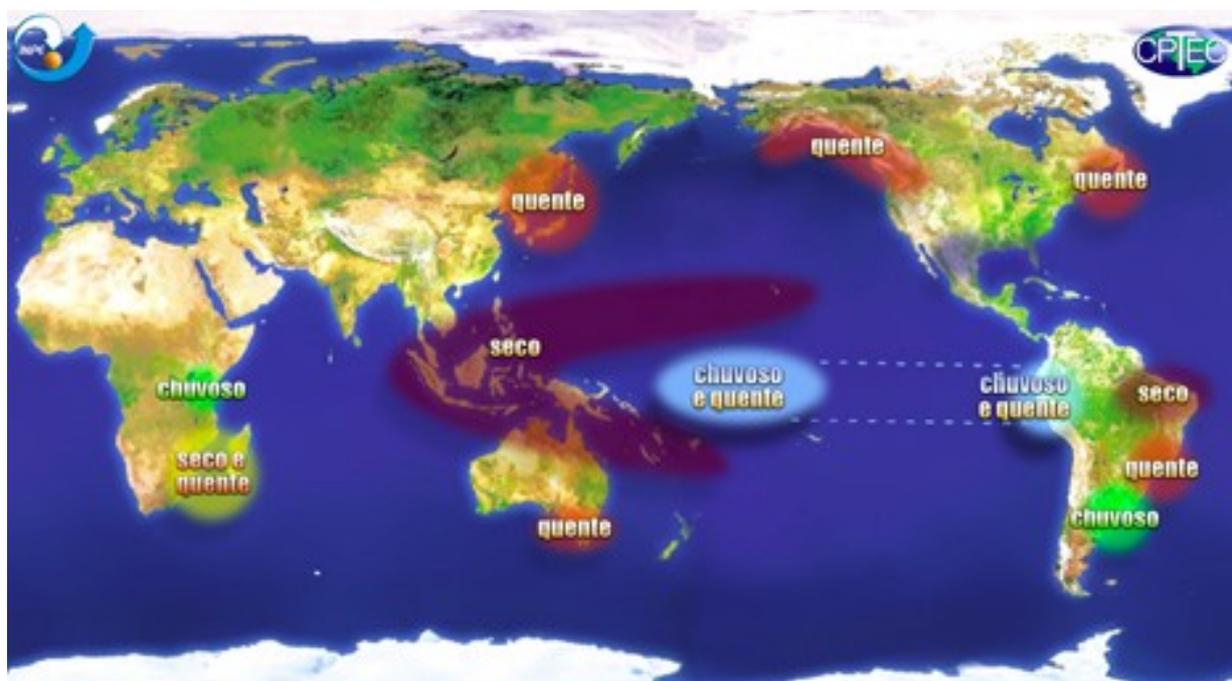
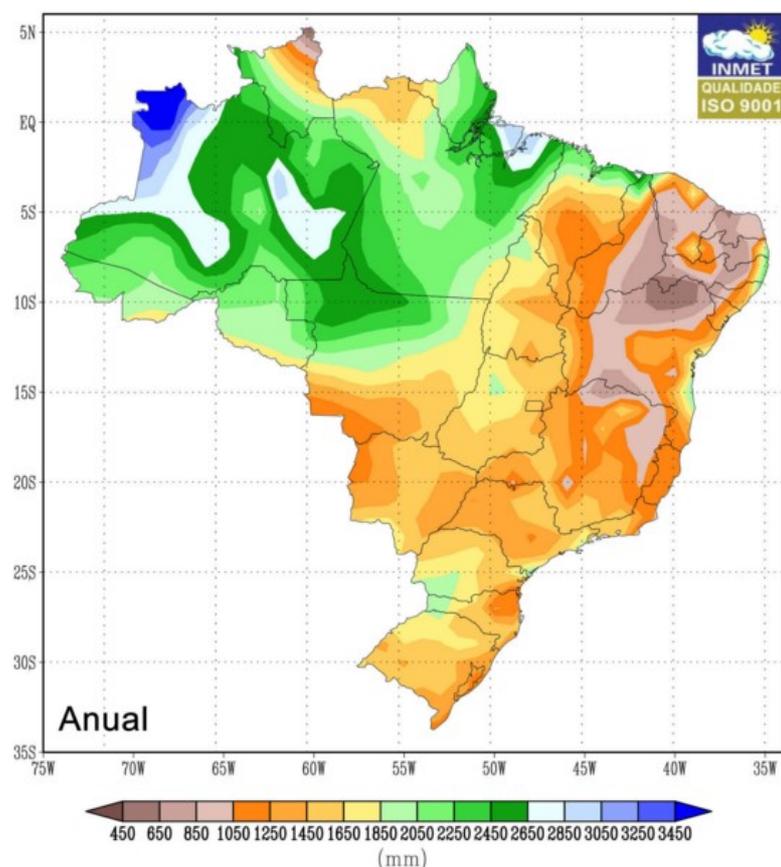


Figura 16: Impacto climático do El Niño em diferentes regiões do mundo (CPTEC, 2015)

Para se estimar o impacto do El Niño na geração elétrica faz-se necessário entrar no âmbito climatológico. Variações climáticas têm impacto na geração elétrica, podendo este ser moderado ou muito grande, dependendo das fontes principais de geração. Como já descrito no Capítulo 2, a fonte energética com principal participação no setor elétrico brasileiro é a hidráulica. Sua dependência às variações de precipitação torna o estudo meteorológico um fator essencial para o planejamento estratégico desse setor. A importância do planejamento se deve ao fato de que, uma crise hídrica não se instaura apenas a partir de taxas pluviométricas abaixo do esperado. O crescimento da oferta deve acompanhar a variação de demanda para diminuir os impactos em momentos críticos (ANA, 2014). Portanto, é de grande importância estimar o impacto do El Niño na precipitação de cada região do território nacional. Caso seja comprovado um impacto relevante, ignorar tal evento poderia resultar em erros graves no planejamento, não apenas no setor energético, mas também em outros setores dependentes de fontes hídricas.

Os regimes pluviométricos devem ser analisados com cuidado devido à grande extensão do território brasileiro. Cruzando tanto a Linha do Equador, quanto o Trópico de Capricórnio, o Brasil apresenta inúmeras classificações climáticas, cada uma com seu regime anual individual. A Figura 17 apresenta a precipitação anual acumulada em todo o Brasil de 01/01/1961 a 31/12/1990 calculada pelo INMET a partir de 414 estações meteorológicas (INMET, 2015). É possível observar algumas regiões com precipitação anual acumulada acima de 3000mm/ano e outras com precipitação abaixo de 450mm/ano, o que comprova a grande diversidade climatológica brasileira.



**Figura 17: Mapa da precipitação média anual de 30 anos (1961-1990) no território brasileiro em mm/ano (INMET, 2015)**

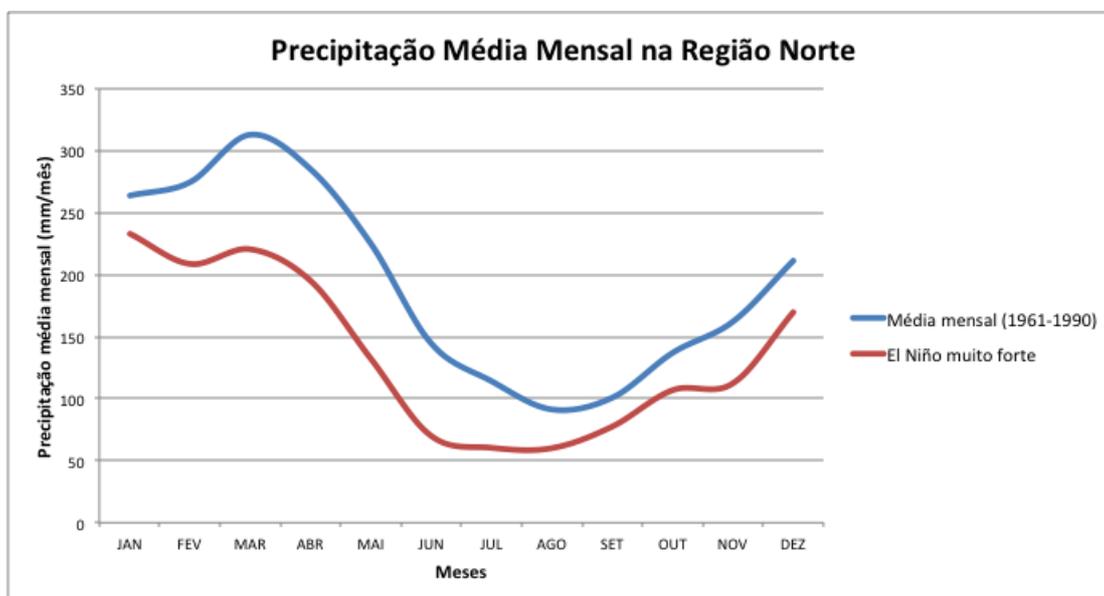
No Brasil existe uma grande variação de precipitação sazonal e são os períodos chuvosos que garantem o estoque hídrico de períodos secos. É de extrema importância, portanto, determinar os períodos chuvosos e suas intensidades médias para planejar o estoque anual e plurianual de determinada região (ANA, 2014). Pode-se observar na Figura 18 que a sazonalidade no Brasil se caracteriza por alta precipitação no primeiro trimestre, enquanto que o terceiro trimestre é considerado o mais seco.



**Figura 18: Sazonalidade pluviométrica trimestral no Brasil (ANA, 2014)**

A região Norte possui um clima predominantemente equatorial úmido (IBGE, 2015). É a região com maior índice pluviométrico anual do Brasil podendo exceder os 3000mm/ano em certas regiões. O grande volume de precipitação está associado à altas taxa evaporativas da região Amazônica, condensação de ventos úmidos trazidos dos Andes e circulação de brisa marítima próximo à Belém. Em consequência da alta nebulosidade causada pela umidade relativa, não é frequente o registro de temperaturas máximas excessivas na região (QUADRO, 2014).

A Figura 19 mostra a precipitação mensal média da região Norte de 1961 a 1990 em comparação com a precipitação mensal média dos anos de ocorrência de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98). A precipitação média anual, de 1961 a 1990, em toda a região é de 2320mm medido a partir de inúmeros pontos de medição do INMET. Já em anos de El Niño, essa média cai para 1650mm/ano.

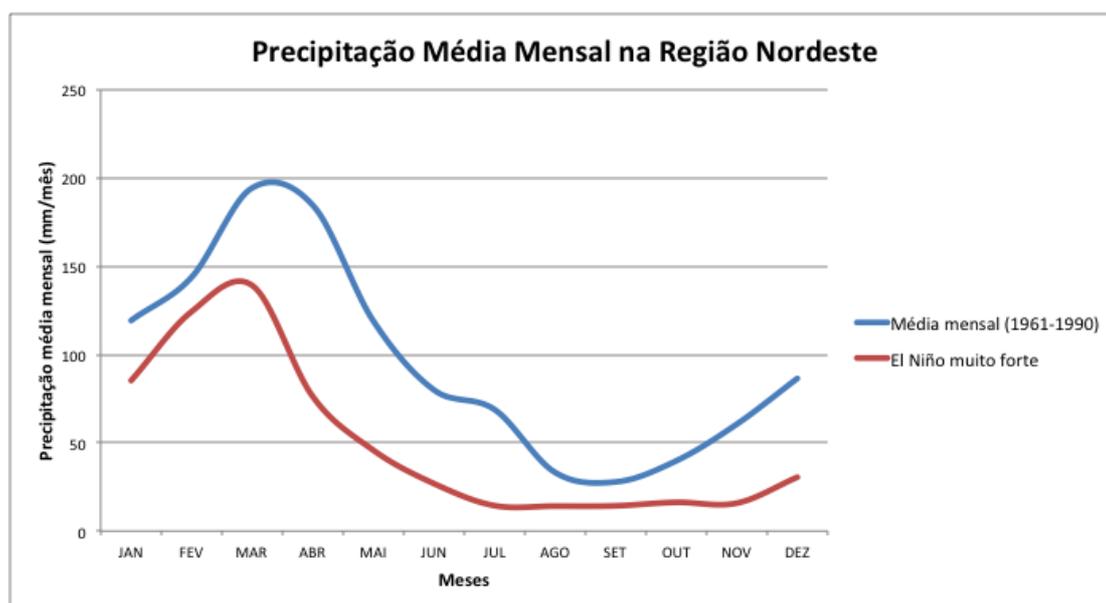


**Figura 19: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região Norte (1961-1990)**

O Nordeste é uma região com uma característica climática complexa. A costa do sul da Bahia ao Rio Grande do Norte apresenta um clima litorâneo úmido com precipitação anual

superior a 1500mm e é a área mais chuvosa da região. No sertão nordestino é observada a região com menor pluviosidade, sendo registrado anualmente uma precipitação inferior a 450mm. As outras áreas do Nordeste apresentam um clima tropical e uma taxa de precipitação intermediária (IBGE, 2015).

A Figura 20 faz a comparação da média de 30 anos (1961-1990) com anos de El Niño (1982-83 e 1997-98). A precipitação média da região, incluindo todos os diferentes climas, é de aproximadamente 1160mm/ano. Em contra partida, os anos de El Niño apresentam uma média de cerca de 600mm/ano, isto é, uma diminuição bastante significativa.

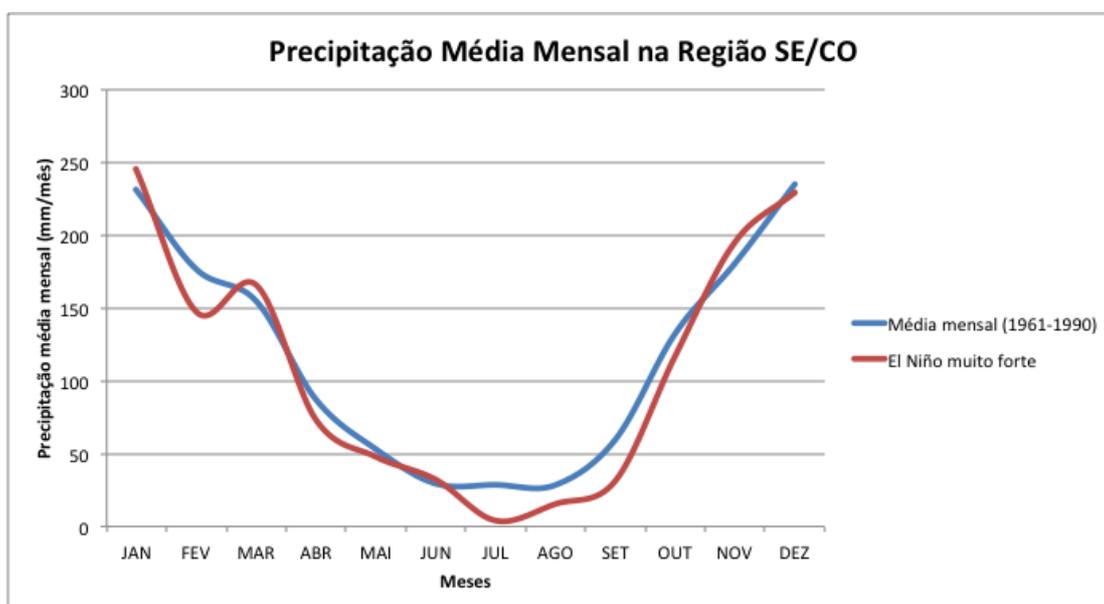


**Figura 20: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região Nordeste (1961-1990)**

Em sua grande parte, as regiões Sudeste e Centro-Oeste apresentam uma classificação de clima tropical. Nas áreas litorâneas, onde o clima é classificado como litorâneo úmido, são registradas altas médias de precipitação anual, podendo chegar à 2000mm/ano. Outra região com alto índice pluviométrico é o norte do Mato Grosso, com precipitação superior a

2000mm/ano, onde o clima é considerado tropical úmido. A região mais seca encontra-se no norte de Minas Gerais. Tal região apresenta uma relativa escassez em determinadas épocas do ano, apresentando uma média anual inferior à 900mm (QUADRO, 2014). O sul de São Paulo e de Mato Grosso do Sul apresenta um clima subtropical úmido e um regime de chuvas similar ao da região Sul (IBGE, 2015). Por ser uma região de transição entre os climas quentes de baixa latitude e temperado de latitudes médias, as regiões Sudeste e centro-Oeste são os mais imprevisíveis (MARENGO, 2015).

A comparação da precipitação média mensal de 30 anos com períodos de El Niño pode ser observada na Figura 21. Foi estimada uma precipitação de 1400mm/ano em uma média de todos os diferentes climas para os 30 anos entre 1961 e 1990. Para os anos de El Niño (1982-83 e 1997-98) foi encontrada uma média anual de 1300mm.

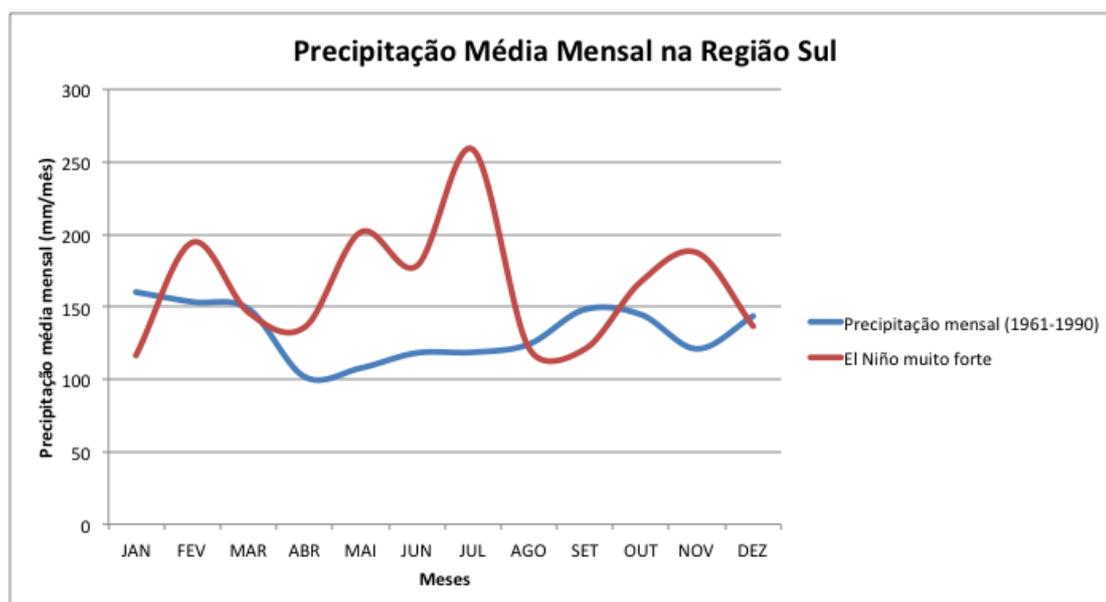


**Figura 21: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região SE/CO (1961-1990)**

A região Sul é a única região a apresentar um único clima, o subtropical úmido. Por tal motivo é a região que apresenta a distribuição de chuvas mais homogêneo variando entre

1250mm/ano e 2000mm/ano, com algumas poucas exceções. Alterações da precipitação causadas pelo El Niño nessa região são sugeridas por Grimm (1992), que apresenta variações positivas para o inverno e negativas para o verão.

A Figura 22 mostra como o El Niño afeta a precipitação da região da mesma forma como apresentado para as regiões já citadas. A precipitação média para a região, de 1961 a 1990, registrada foi de, aproximadamente 1590mm/ano. Já para as épocas de El Niño muito forte foi registrada uma média de 1970mm/ano.

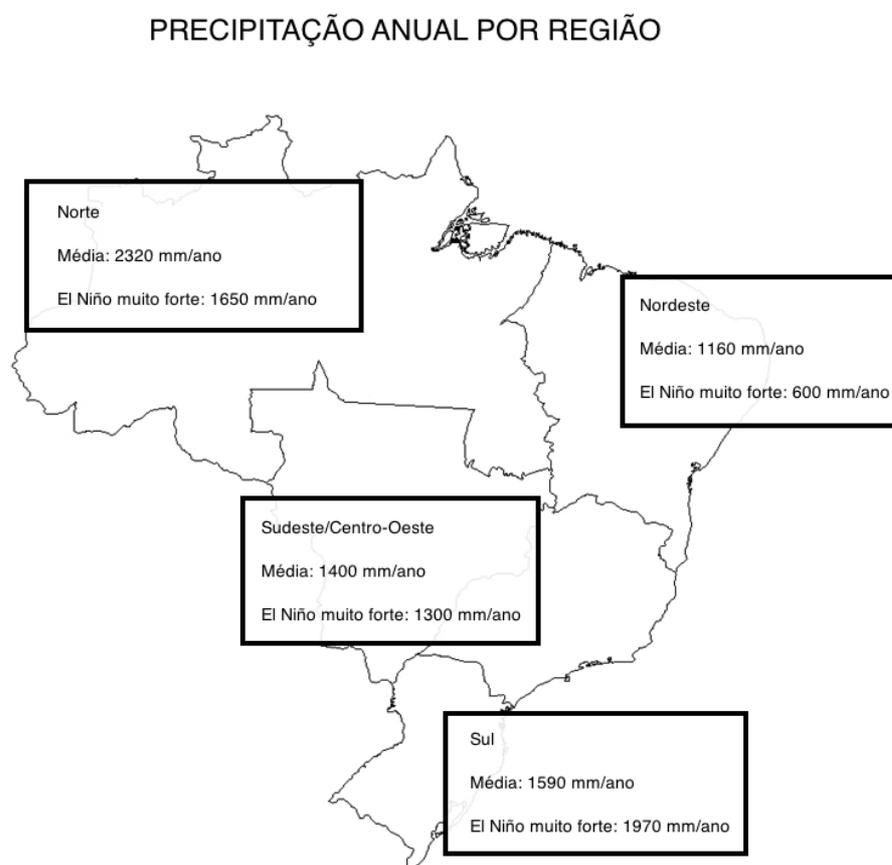


**Figura 22: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal da região Sul (1961-1990)**

As regiões ao norte do país apresentaram significativa diminuição da precipitação acumulada ao longo do ano em anos de El Niño muito forte. Na região SE/CO a queda de precipitação não foi tão significativa no acumulo total. Apesar de apresentar um leve aumento em alguns meses, é importante notar uma considerável diminuição de precipitação durante o inverno. Mais ao sul o efeito foi inverso. Como a precipitação varia de maneira mais uniforme

ao longo do ano, alguns meses apresentaram aumento e outros diminuição da mesma. É notável, porém, a grande variação positiva de abril a Julho, como esperado.

A Figura 23 apresenta o mapa do Brasil separado por região analisada. Cada região contém a precipitação média anual calculada de 1961 a 1990 e a precipitação média para os anos de 1982-83 e 1997-98, considerados anos de El Niño muito forte. É possível, assim, mostrar o impacto do El Niño no Brasil em um panorama geral.



**Figura 23: Impacto de El Niño muito forte (1982-83 e 1997-98) na precipitação média mensal por região brasileira (1961-1990)**

### **3.2. Consequências energéticas**

Com a grande participação de hidrelétricas na fatia de geração elétrica, a energia estocada nos reservatórios é um fator muito importante a ser analisado. Essa energia armazenada (ENA) é a “energia disponível em um sistema de reservatórios, calculada a partir da energia produzível pelo volume armazenado nos reservatórios em seus respectivos níveis operativos” (ONS, 2015). É esse o parâmetro mais afetado pelo El Niño, dado que varia, principalmente, com a precipitação. Ao afetar a precipitação, o El Niño afeta também a quantidade de energia hídrica armazenável e todo o sistema de geração hidráulica. Por ser muito significativa para o Brasil, a geração hidráulica tem um impacto muito grande na geração como um todo, pois, junto com a demanda, influencia em quanta energia deverá ser gerada por termelétricas. Tal fato impacta em todo o planejamento do sistema e nos preços de energia elétrica.

Antes de serem abordadas as consequências do El Niño na geração elétrica é importante ter em mente que a análise será feita apenas em relação a fatores climáticos. Outros fatores econômicos ou políticos não deverão entrar na análise, dado que cada momento apresenta um panorama diferente. É importante, porém, ressaltar que situações emergenciais no setor elétrico podem ser causadas, simplesmente, por falta de investimento no setor, como em 2001, nesse trabalho já citado. Vale citar que em momentos de crise hídrica existe um consequente aumento do custo da energia elétrica gerada. Isso se deve ao fato de que as termelétricas precisam ser acionadas para compensar a diminuição da energia hidráulica. Porém, os aumentos de preço nas tarifas geram desgastes políticos e em determinada situação poderá haver uma má gestão dos reservatórios a fim de diminuir a pressão imposta no setor. Essas inúmeras possibilidades são muito complexas para serem abordadas nas análises a serem

feitas e desvirtuariam o trabalho de seu real propósito. A intensão é mostrar como se comportaria o sistema de geração elétrica como um todo com a atual infraestrutura e capacidade instalada no caso de um período de estiagem.

Com a diminuição da precipitação de cerca de 30% e de 50% nas regiões Norte e Nordeste respectivamente é de se esperar um grande impacto na geração hidráulica dessas regiões em épocas de El Niño. O estoque hídrico deverá ser planejado com cautela nesses períodos. Isso porque, após utilizada, a água proveniente da pluviosidade de épocas chuvosas só retornará aos reservatórios no ano seguinte devido a sazonalidade apresentada no tópico anterior. Um período chuvoso, entretanto, poderia ser prejudicado durante o El Niño. Então, a precipitação esperada pode não ocorrer prejudicando o planejamento.

Foi mostrado, porém, que a região Sul apresenta aumento considerável de precipitação e, portanto, pode-se esperar épocas de reservatório cheio e até eventuais vertimentos nos reservatórios ao sul do Brasil. Também se assimila à tal característica, a região ao sul do subsistema SE/CO. Como essa região apresenta grande capacidade de energia hidráulica instalada, é possível que haja uma compensação com uma eventual transmissão energética para regiões prejudicadas. É importante ter em mente que existe um limite de estoque energético. Obviamente nenhum reservatório pode estocar mais do que 100% de sua capacidade. Então, ao alcançar 100% de energia armazenada, a região Sul, por exemplo, dificilmente seria beneficiado com as chuvas do El Niño.

Algumas premissas deverão ser adotadas a fim de tornar mais perceptível o impacto do El Niño nas análises. Como foi observado no Item 2.2, existe uma previsão de estabilidade de demanda energética para o próximo ano. Anos de El Niño, por serem consideravelmente mais quentes, resultam em maiores demandas. Porém, essa demanda seria compensada pelo cenário econômico atual, que tenderia a uma queda da mesma. Portanto, é uma premissa bem

coerente adotar para cada mês do próximo ano a mesma demanda do ano anterior. Isso porque a demanda apresenta uma variação considerável a cada mês, porém uma variação pequena em relação ao mesmo mês do ano anterior. Outra premissa importante é em relação a quantidade de energia gerada por termelétricas. Esse fator influencia diretamente no nível dos reservatórios, pois define quanta energia deverá ser gerada pelas hidrelétricas. Dois fatores têm grande influência na definição da geração termelétrica, o planejamento plurianual dos reservatórios e o custo energético. Seria coerente adotar um despacho energético seguindo a mesma linha de raciocínio da demanda. Dado que não haverá uma variação significativa da demanda e que o governo manterá a mesma política de preço de energia elétrica, apenas um fator apresenta clara variação significativa para um futuro próximo, a precipitação.

Tais premissas permitem chegar a uma importante conclusão. Prever o impacto do El Niño será essencial para estimar o nível da energia armazenada nos reservatórios brasileiros. Dado que a ENA irá variar basicamente com o El Niño e utilizando os impactos estimados para a precipitação no Item 3.1, é possível fazer uma projeção para um futuro a curto prazo. A variação a longo prazo é influenciada por fatores que fogem do âmbito abordado neste trabalho. Será feita, portanto, uma estimativa de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016.

Para se estimar a ENA é preciso saber a precipitação do período a ser analisado. Por se tratar de um ano de El Niño, será utilizada a análise do Item 3.1 para tal estimativa. Utilizando os valores calculados para a precipitação em anos de El Niño muito forte é possível calcular a variação percentual de precipitação em relação aos anos sem El Niño. Tal variação encontra-se na Tabela 4.

**Tabela 4: Variação percentual da precipitação para ano de El Niño muito forte em relação a um ano médio, sem tal evento**

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
NE	71%	86%	72%	41%	38%	34%	21%	42%	51%	41%	26%	35%	52%
Norte	88%	76%	70%	68%	59%	48%	53%	66%	77%	78%	69%	80%	71%
SE/CO	106%	83%	107%	84%	90%	110%	14%	54%	53%	88%	108%	98%	94%
Sul	73%	127%	98%	134%	187%	151%	218%	98%	82%	116%	155%	95%	124%

A ENA pode ser estimada em relação à precipitação de determinado momento. Ao analisar o histórico de energia armazenada, como na Figura 24, nota-se uma sazonalidade em relação aos períodos chuvosos. Para a estimativa da quantidade de ENA de um determinado mês será feita uma relação entre a precipitação dos três meses antecedentes com a ENA do mesmo mês no ano anterior. Ou seja, para o cálculo da ENA em Julho de 2016 será feita uma relação entre a energia armazenada em Julho de 2015 e as precipitações de Abril, Maio e Junho do mesmo ano. A partir de tal relação será calculada a ENA de Julho de 2016 em relação às precipitações de Abril, Maio e Junho de 2016. E, como citado anteriormente, as precipitações serão estimadas para um período de El Niño muito forte.

A Tabela 5, a seguir, apresenta a situação dos principais reservatórios do Brasil e será o ponto de partida para a estimativa dos níveis futuros.

**Tabela 5: Situação dos principais reservatórios de acumulação em 27 Out. 2015 (ONS, 2015)**

Bacia	Reservatório	Nível (m)	Volume Útil (%)	Afluência	Vazão (m³/s) Defluência	Vertida
<b>Região Sudeste / Centro-Oeste</b>						
<b>Grande</b>	Furnas	756	23	218	749	0
	M. Moraes	656	20	587	608	0
	Marimbondo	437	36	957	1.044	0
	Água Vermelha	379	51	1.002	1.251	0
<b>Paranaíba</b>	Emborcação	634	29	211	387	0
	Nova Ponte	788	19	91	320	0
	Itumbiara	506	30	908	1.324	0
	São Simão	393	23	1.401	1.454	0
<b>Paraná</b>	Ilha Solteira	320	0	3.588	4.550	0
	Jupia	280	90	5.874	5.980	0
	Itaipu	220	103	11.026	11.185	0
<b>Tiete</b>	Barra Bonita	449	69	340	401	43
	Promissão	382	58	704	878	0
	Três Irmãos	321	0	803	934	0
<b>Paranapanema</b>	Jurumirim	565	66	292	151	0
	Chavantes	473	84	494	405	0
	Capivara	334	97	1.741	1.675	197
<b>Região Sul</b>						
<b>Iguaçu</b>	G. B. Munhoz	741	96	2.03	1.463	429
	Salto Santiago	506	100	1.87	1.850	765
<b>Uruguai</b>	Machadinho	480	99	2.40	2.411	1.190
	Itá	369	91	3.12	2.808	1.566
	Passo Fundo	598	100	89.00	72	29
<b>Jacuí</b>	Passo Real	325	90	314.00	363	0
<b>Região Nordeste</b>						
<b>São Francisco</b>	Três Marias	555	15	2.00	502.00	0
	Sobradinho	382	5	500.00	946.00	0
	Luiz Gonzaga	300	11	873.00	873.00	0
<b>Região Norte</b>						
<b>Tocantins</b>	Serra da Mesa	432	20	14.00	736.00	0
	Tucuruí	61	25	2.48	4.772	0

O histórico da precipitação e ENA para o subsistema Norte está apresentado na Figura 23. É a região que apresenta a menor sazonalidade ao longo dos anos. Isso acontece devido a sua falta de integração com o SIN e a pequena demanda, o que facilita a projeção dos anos seguintes e o planejamento de estoque.

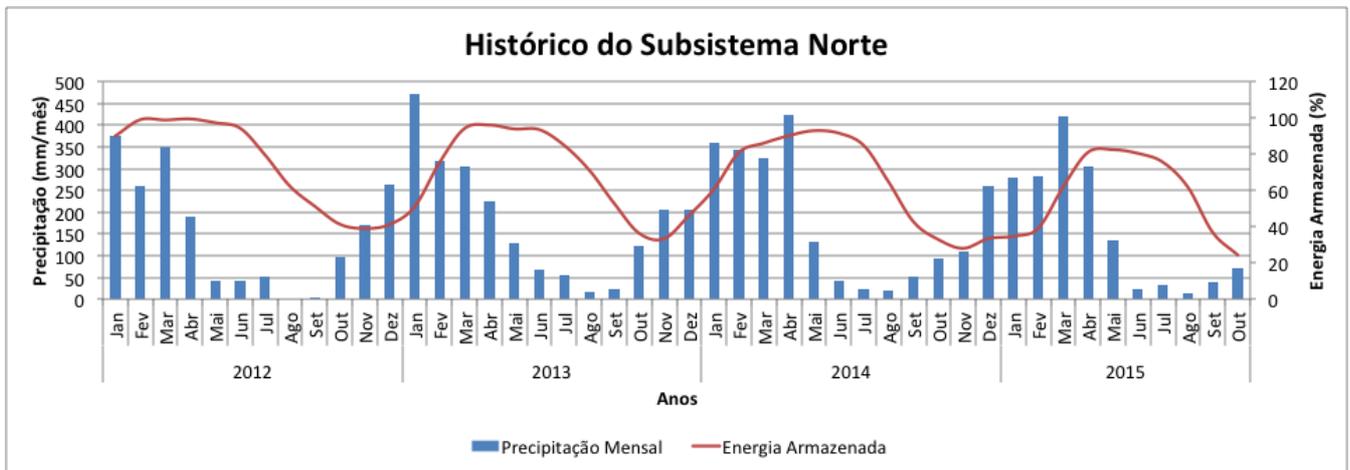


Figura 24: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema Norte

A estimativa para a ENA está apresentada na Figura 24. Por ser uma das regiões mais afetadas, apresenta, na projeção para Novembro de 2016, um nível próximo à 15%. Tal valor pode ser considerado o mais crítico dos últimos anos. A recuperação dos reservatórios após decaimentos à níveis tão drásticos pode ser considerada muito difícil dado que a região carece de integração com o SIN. A Figura 25 apresenta a variação da ENA nos últimos anos para o subsistema Norte e permite uma visualização em longo prazo.

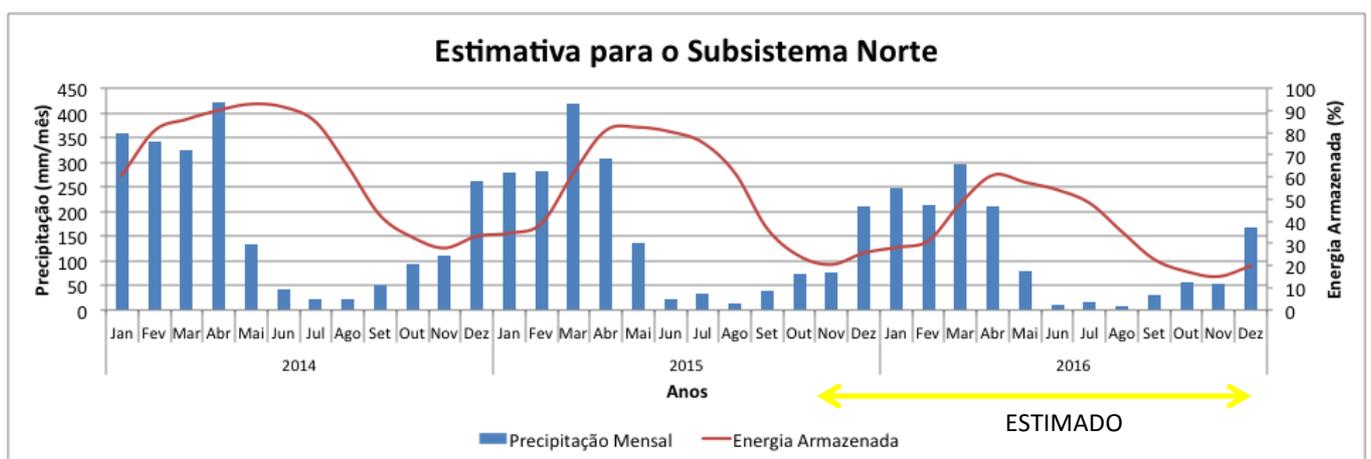
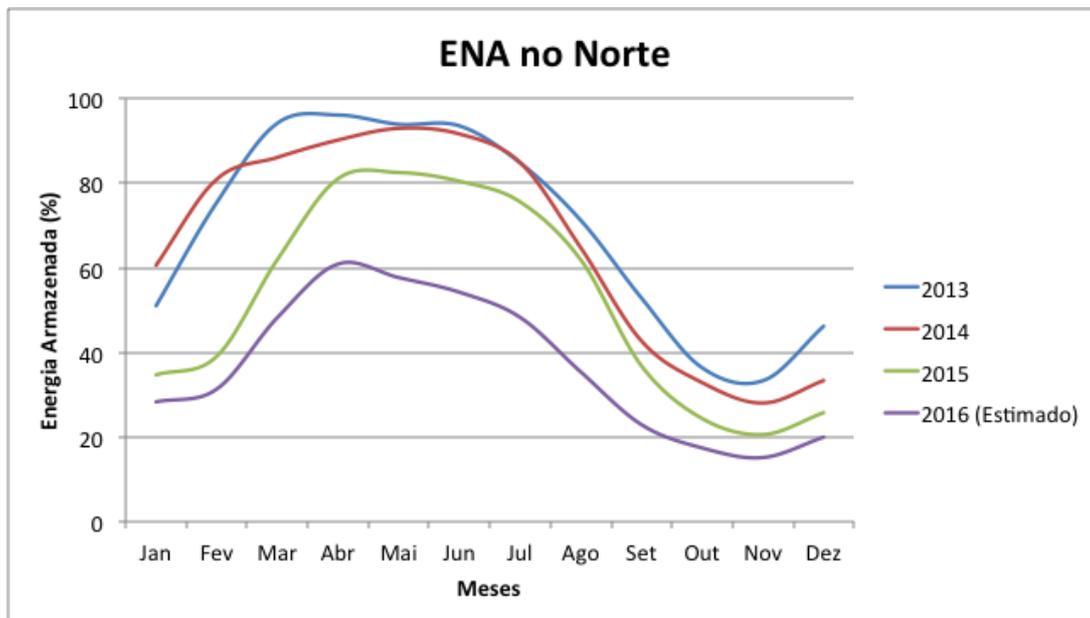


Figura 25: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema Norte e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015



**Figura 26: Comparação do ano projetado com outros anos na região Norte**

O Nordeste apresenta um histórico de precipitação e ENA representado pela Figura 27. Além da sazonalidade, é possível observar uma tendência decrescente no percentual de estoque. Isso significa que, anualmente, a vazão defluente é maior que a afluenta. Inúmeros fatores podem ser responsáveis por tal fato e não entrarão em consideração na análise aqui realizada, para que apenas a influência do El Niño seja estimada.

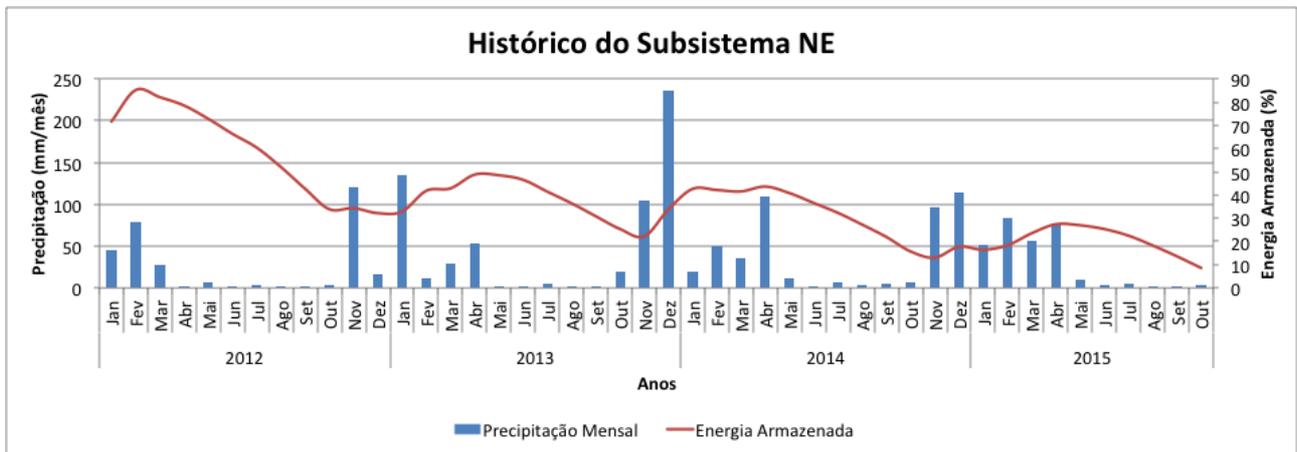


Figura 27: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema NE

A ENA estimada para o subsistema Nordeste está representada na Figura 28. Por ser o subsistema mais impactado pelo El Niño é também a região com maior queda nos níveis dos reservatórios. Um nível extremamente crítico foi estimado para Novembro de 2016, quando este chegará a um nível próximo de 1% de ENA. Nunca antes os reservatórios chegaram a tal nível e, caso a projeção se confirme, a região poderá enfrentar grave crise energética, impactando, inclusive, outras regiões. A Figura 29 apresenta a variação da ENA nos últimos anos para o subsistema Nordeste e permite uma comparação entre os anos sem e com El Niño (2016).

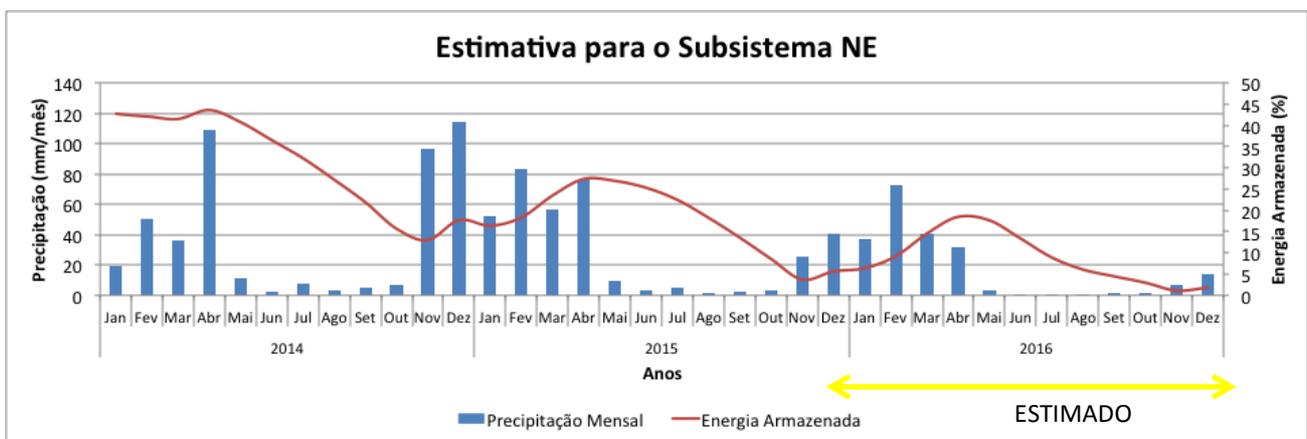
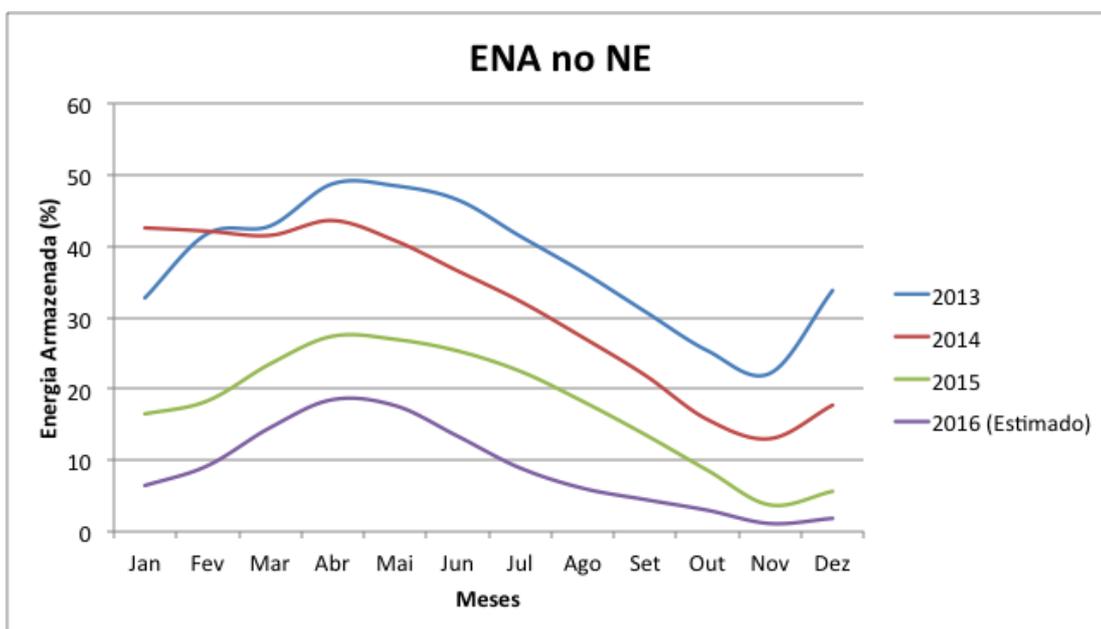


Figura 28: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema NE e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015



**Figura 29: Comparação do ano projetado com outros anos na região NE**

O nível de 1% estimado para o Nordeste pode ser considerado uma catástrofe do ponto de vista da geração de energia elétrica. As usinas hidrelétricas do Rio São Francisco, bacia responsável por cerca de 98% da geração do subsistema em questão (ONS), não seriam capazes de gerar energia elétrica com os reservatórios a tais níveis. Toda a região estaria dependente das gerações térmica e eólica, e da importação de energia de outras regiões.

A Figura 30 apresenta o histórico da ENA e da precipitação na região dos principais reservatórios do subsistema SE/CO. É possível observar uma clara relação de sazonalidade, como já mencionado.

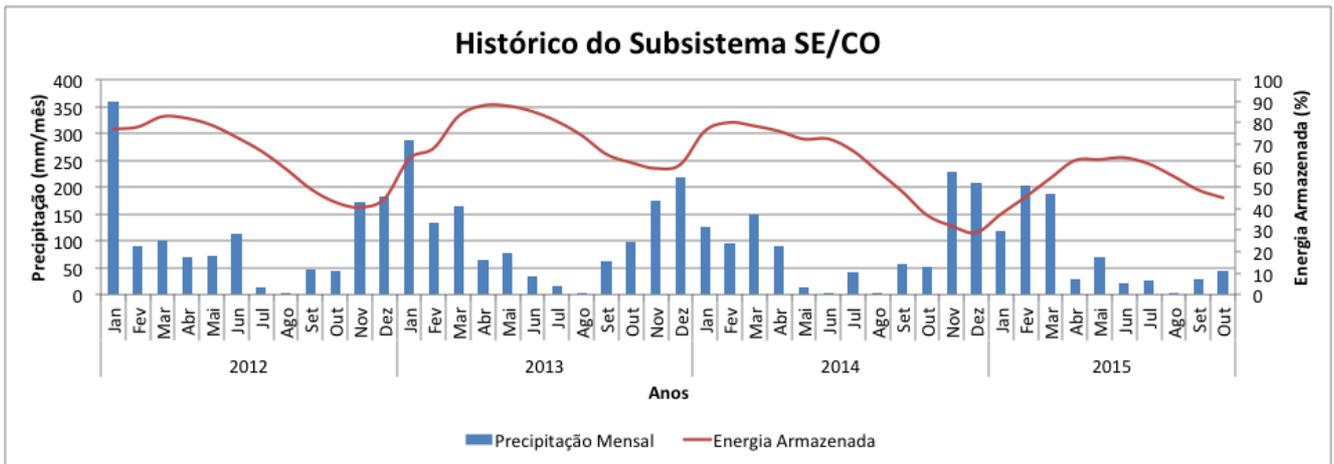


Figura 30: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema SE/CO

A Figura 31 mostra a estimativa da ENA variando com a precipitação de acordo com as premissas adotadas. Pode-se observar uma pequena variação negativa em relação ao ano anterior à estimativa para o SE/CO. Em Novembro de 2015 a ENA foi de 15% de sua capacidade total, já o estimado para Novembro de 2016 é de 13,5%. Tais níveis estão abaixo dos níveis dos reservatórios durante a crise de 2001. A Figura 32 apresenta a variação da ENA nos últimos anos e permite avaliar a situação em que se encontram os reservatórios desse subsistema.

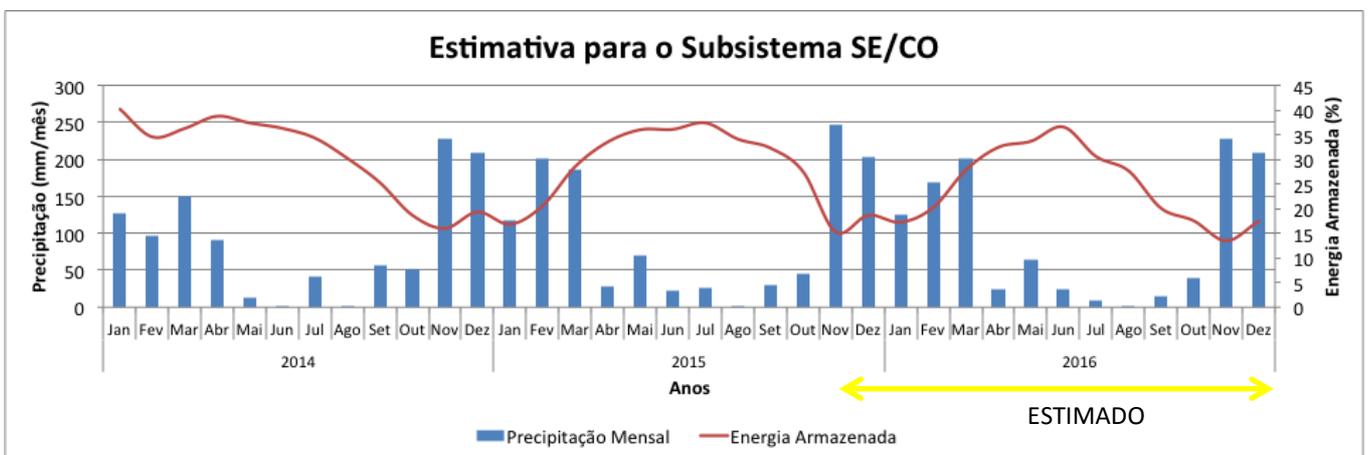
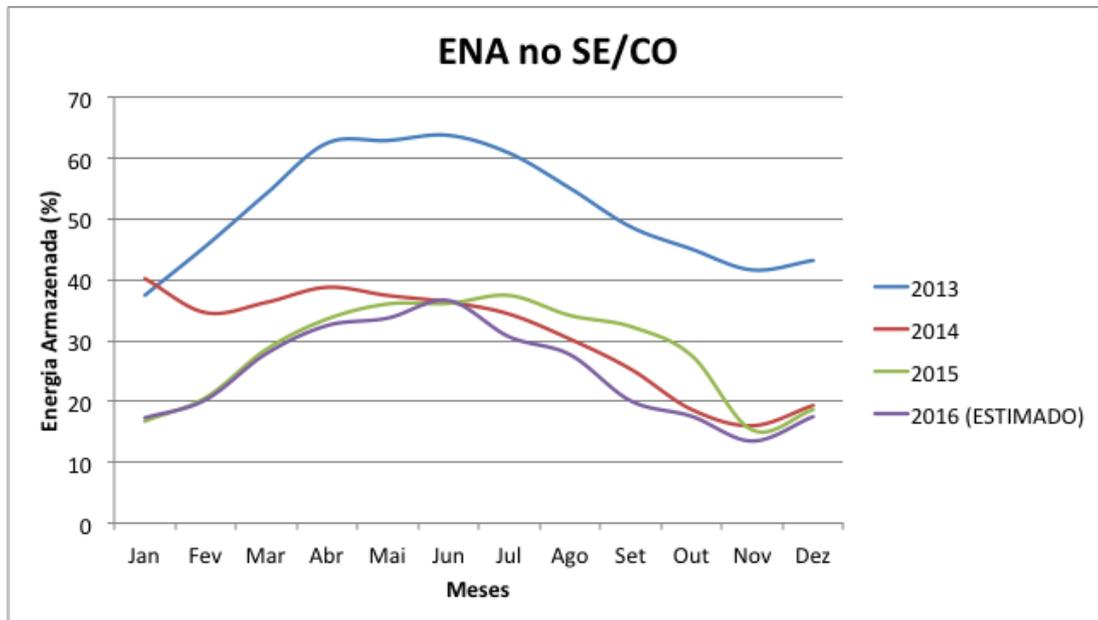


Figura 31: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema SE/CO e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015



**Figura 32: Comparação do ano projetado com outros anos da região SE/CO**

A Figura 33 apresenta o histórico de precipitação e ENA para o subsistema Sul. Entre todos, é o sistema com maior estoque hídrico. Não apresenta uma sazonalidade bem definida em relação à precipitação e a ENA também não apresenta uma homogeneidade. Porém, antes de ser considerado o subsistema de menor previsibilidade, deve-se levar em consideração o fato de que provavelmente deverá alcançar a sua capacidade máxima de armazenamento. Isso se deve ao fato de estar com sua capacidade próxima ao limite superior e apresentar uma tendência de aumento em sua precipitação durante um El Niño muito forte. Sendo assim, sua estimativa é facilitada.

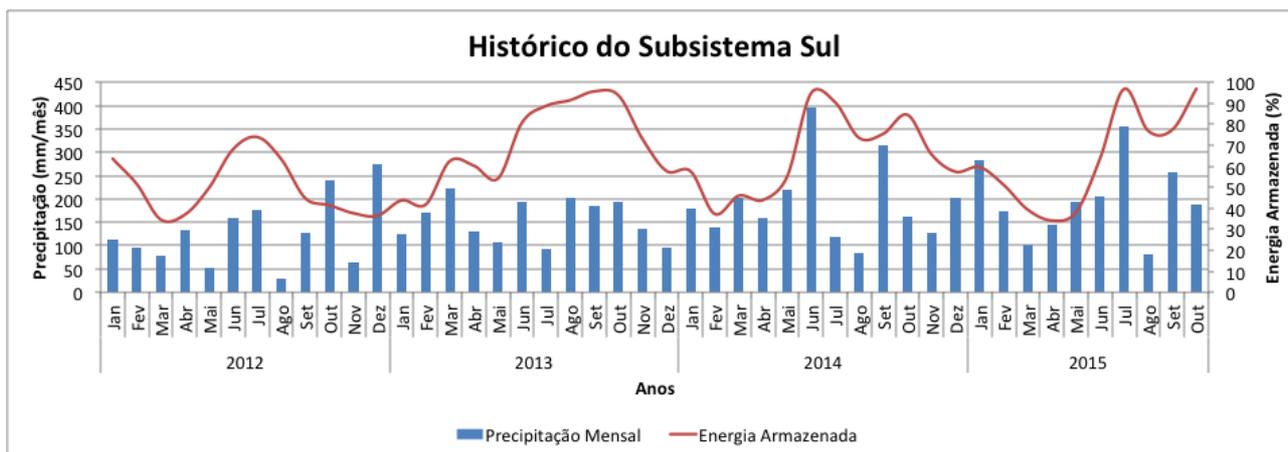


Figura 33: Histórico da precipitação e da ENA de Janeiro de 2012 a Outubro de 2015 para o subsistema Sul

A Figura 34, que apresenta a estimativa para a ENA, confirma as perspectivas sugeridas. Uma observação válida é o fato da ENA alcançar níveis acima de 90% de armazenamento um mês antes em relação ao ano anterior. A Figura 35 apresenta a variação da ENA nos últimos anos para o subsistema Sul. Pode-se verificar um comportamento similar aos outros anos durante o primeiro trimestre, e já no mês de Junho sua ENA se aproxima do limite máximo.

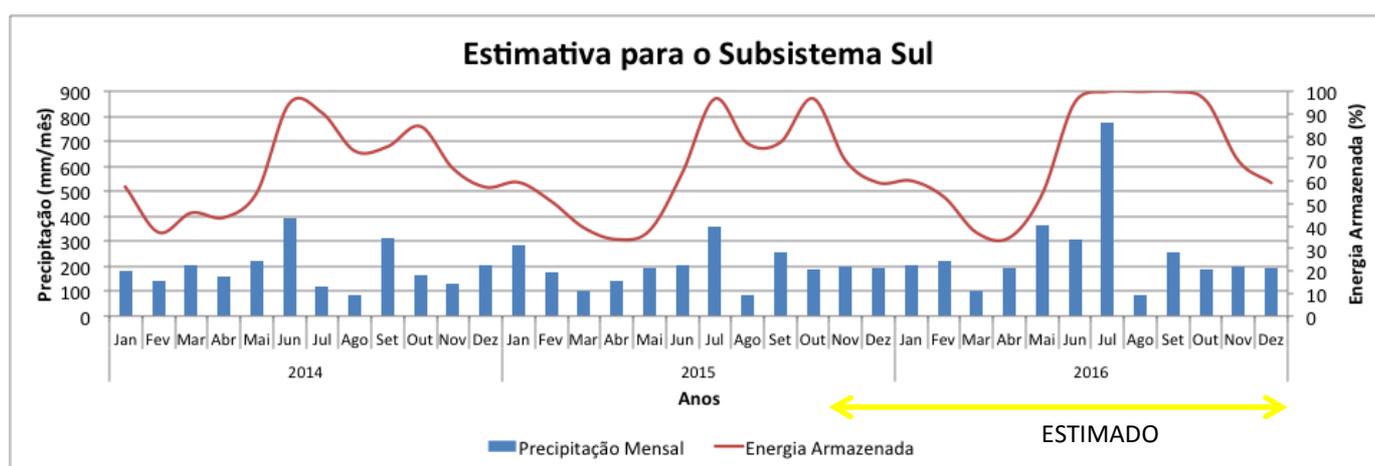
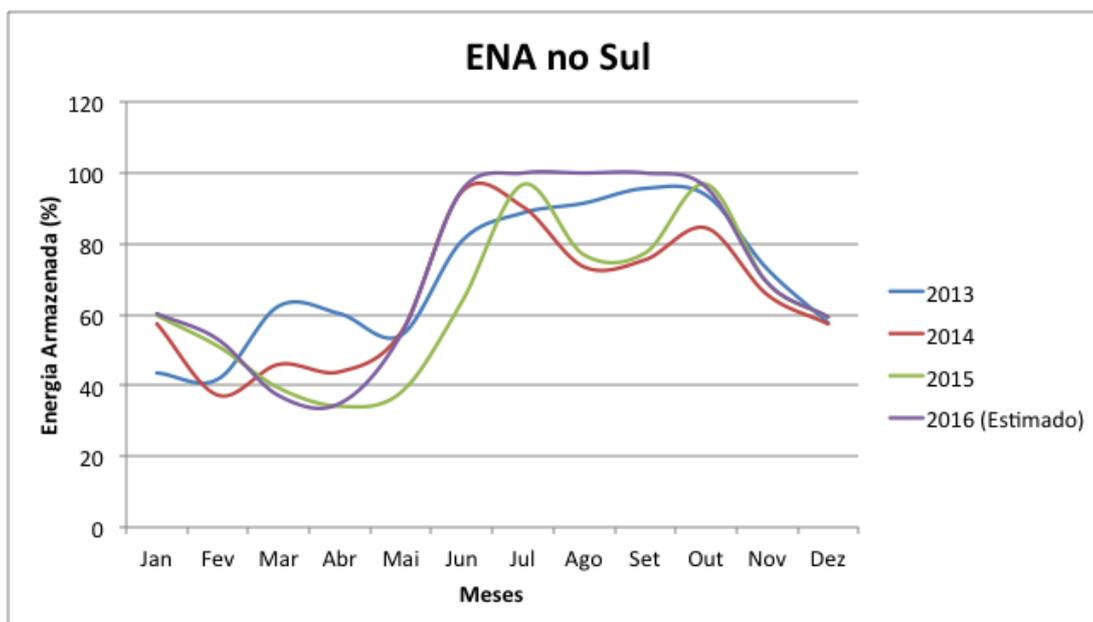


Figura 34: Estimativa da ENA de Novembro de 2015 a Dezembro de 2016 para o subsistema Sul e histórico de Janeiro de 2014 a Outubro de 2015



**Figura 35: Comparação do ano projetado com outros anos na região Sul**

Com os resultados anteriores (por região), pode-se perceber a criticidade dos reservatórios ao norte do país. A projeção de níveis nunca antes presenciados é compreensível pelo fato do Brasil estar vivendo hoje uma situação hídrica delicada. Somando tal fato a um evento de El Niño foi possível observar situações extremamente complicadas, principalmente na região Nordeste. Os próximos anos deverão ser, portanto, planejados com extrema cautela, para que a situação possa ser contornada.

## **4. Proposta de soluções**

Pode-se pensar em propostas de solução a longo e curto prazo. Elas se diferem pelo fato de que uma solução a curto prazo pode solucionar um caso emergencial, porém pode não ser sustentável, como, por exemplo, uma fonte energética esgotável. Outro fato é que alguns fatores são variáveis com o tempo, como, por exemplo, o custo do investimento em determinada tecnologia varia a medida em que a mesma é desenvolvida.

### **4.1. Curto prazo**

A curto prazo é improvável que haja o desenvolvimento de novas tecnologias e a construção de novos empreendimentos. Segundo a matriz energética apresentada no Item 2.2, a fatia de capacidade instalada de termelétricas é de cerca de 30%. Pode-se observar no Item 3.2, que essa energia deveria estar sendo aproveitada ao máximo. A situação dos reservatórios nas regiões no norte do Brasil já estão críticas e apresentam uma tendência de piora. O Sul, apesar de apresentar boas previsões de precipitação, possui um limite de transmissão de energia para as outras regiões. Na situação atual, parte de sua fonte hídrica armazenada já está sendo vertida e um cenário de mais chuvas nessa região não seria mais favorável.

Em 2014, 26% da energia gerada proveio de fontes térmicas e, em 2015 (até Outubro), essa fatia foi de 25,6%. Nota-se uma incoerência. A partir das análises, pode-se perceber que, desde Janeiro de 2014, a maioria dos subsistemas apresentaram uma queda considerável nos níveis dos reservatórios. O país deveria estar armazenando essa energia de fontes hidráulicas, dado o momento de crise hídrica atual.

Considerando o curto prazo sendo o ano de 2016, a medida mais coerente seria um despacho de todas as fontes térmicas para estocar a água, para o caso das estimativas pluviométricas se confirmarem. A consequência de tal ato seria aumento no preço de energia

elétrica. Esse aumento de preço momentâneo poderia trazer recompensas futuras para o país. Caso se faça um planejamento adequado para o futuro, os subsistemas poderão apresentar uma maior segurança quando os estoques de energia hidráulica voltarem a atingir níveis mais elevados.

#### **4.2. Eventos futuros**

Para o futuro outras soluções seriam mais benéficas. Como foi apresentado, o homem tem gerado grande impacto no comportamento dos inúmeros sistemas funcionais do planeta. Aumentar a geração térmica teria consequências ambientais e, para uma solução a longo prazo, torna-se uma sugestão paradoxal. A medida que o homem aumenta a emissão de gases poluentes, alguns eventos são intensificados (El Niño, por exemplo). Não seria sensato, portanto, aumentar a emissão de tais gases para compensar esses eventos prejudiciais.

Também foi mostrado que o potencial de energia hidráulica está se esgotando. A tendência é que os estoques energéticos de fontes hidráulicas apresentem uma diminuição na participação da matriz energética. A previsão de que, a cada ano as hidrelétricas apresentem uma diminuição no tempo de duração dos estoques em épocas de estiagens, reforça a ideia da diversificação da matriz. Seria então o caso se incrementar a geração através de novas fontes.

Como foi visto no Item 3.2, existe um grande potencial de energias renováveis. Tanto a energia eólica quanto a solar representam boas oportunidades para o Brasil. Porém a curto prazo, investir em tais tecnologias não é economicamente viável na maioria dos casos. A longo prazo, o cenário pode mudar. A medida que as tecnologias são melhor desenvolvidas, tornam-se mais viáveis sob o ponto de vista econômico. Sendo assim, poderá ser possível se investir em empreendimentos de fontes limpas e com grande potencial. Torna-se, portanto, essencial o investimento em melhorias tecnológicas para o setor elétrico.

Como existe uma tendência de eventos de El Niño mais extremos, é de extrema importância incluí-los no planejamento. Uma matriz energética diversificada apresenta uma maior segurança em eventos de impacto climático. Termelétricas aumentam a segurança do sistema e não devem ser descartadas do planejamento a longo prazo. Devem, todavia, ser utilizadas com cautela e nunca se atingir 100% de sua geração. Mantê-las prontas para operar em uma eventual situação extraordinária virá a ser extremamente benéfico.

## **5. Conclusão**

A matriz energética brasileira é composta, basicamente, por geração hidráulica e térmica. Ao mesclar essas fontes de energia, é possível acrescentar segurança ao sistema controlando os níveis dos reservatórios para suprir a demanda durante períodos secos. Caso as hidrelétricas apresentem um decaimento plurianual, as termelétricas devem ser acionadas garantindo assim o estoque energético para os anos seguintes. É importante manter o investimento em geração com novos empreendimentos para compensar o aumento de demanda e evitar tal decaimento. Entre as consequências de se substituir a geração hidráulica por térmica estão um significativo aumento do custo energético e o aumento das emissões de gases danosos ao meio ambiente. A emissão de gases provenientes da combustão de combustíveis fósseis pode tornar a complementariedade da geração elétrica por fontes térmicas paradoxal.

Os eventos de El Niño alteram significativamente o comportamento climático de muitas regiões ao redor do mundo. Um dos países mais afetados é o Brasil. Enquanto regiões ao norte do país sofrem com o aumento de temperatura e seca, as regiões ao sul sofrem com um significativo aumento da pluviosidade. Tais eventos vêm apresentando uma grande intensificação desde a época da revolução industrial, o que indica uma relação com as ações do homem. Portanto, a medida em que aumentamos as emissões dos gases danosos, aumentamos também os impactos gerado por eventos extraordinários. Essa relação é comprovada através de testemunhos de fósseis de corais de milhares de anos retirados do Oceano Pacífico. Os corais registram, por meio de isótopos de oxigênio, a variação da temperatura oceânica ao seu redor. E a principal forma de medição de um evento de El Niño/La Niña é através da variação da temperatura superficial do Oceano Pacífico. Sendo assim, os fósseis de corais são como bancos de dados, que podem nos informar as variações de temperatura na superfície dos oceanos.

Foi mostrado que o El Niño impacta de maneira negativa a geração elétrica no Brasil, visto que não é possível compensar a baixa precipitação das regiões Norte e Nordeste com a geração de outras regiões. Tal fato acelera a degradação da quantidade de energia armazenada em alguns reservatórios, enquanto que outros não são capazes de estocar o aumento da afluência. O Nordeste apresentou o pior desempenho para o próximo ano a partir do modelo proposto, tendendo a níveis críticos históricos (1% em Novembro de 2016). Tal situação seria prejudicial não apenas para o Nordeste, mas também para os outros sistemas do SIN, pois seria necessário transferir energia elétrica gerada em outras regiões.

Seria possível aumentar significativamente a quantidade de energia instalada proveniente de fontes limpas, como eólica e solar. Apesar do grande potencial de tais fontes no Brasil, o custo de investimento ainda torna tais fontes inviáveis economicamente. O investimento no desenvolvimento de tecnologias capazes de diminuir os custos seria uma importante medida estratégica para o futuro, sendo, então, possível complementar o sistema elétrico com fontes limpas. É essencial o constante investimento no aprimoramento de tecnologias já existentes e em novas tecnologias, para que seja possível construir um futuro melhor. Isso significa ser possível suprir as necessidades básicas de toda a população sem comprometer o equilíbrio da Terra para as gerações futuras.

## 6. Bibliografia

1. AMARANTE, O. A C., ZACK, M. B. J., SÁ, A. L., “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), 2001.
2. ANA. Agência Nacional de Águas. “Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água”. Disponível em:  
<<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%201%20-%20Panorama%20Nacional.pdf>> Acesso em: 23 out. 2015.
3. ANA. Agência Nacional de Águas. “Encarte Especial Sobre a Crise Hídrica”. Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil: Informe 2014. Disponível em:  
<<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>> Acesso em: 12 out. 2015.
4. ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. “BIG - Banco de Informação de Geração”. Disponível em:  
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 1 set. 2015.
5. BERMANN, C. “O projeto da Usina Hidrelétrica Belo Monte: a autocracia energética como paradigma”. Novos Cadernos NAEA v. 15, n. 1, p. 5-23, jun. 2012.
6. BLASQUES, L. C. M. “Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade”. Dissertação de Mestrado, UFPA. Belém, 2005
7. CABRAL, I. S., TORRES, A. C., SENNA, P. R. “Energia Solar - Análise Comparativa Entre Brasil e Alemanha”. IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador, 2013.

8. CAMPOS, M. L. “11 Fatos Que Você Precisa Saber Sobre A Crise Hídrica No Brasil”. Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br/2015/03/25/11-fatos-que-voce-precisa-saber-sobre-a-crise-hidrica-no-brasil/>>. Acesso em: 20 set. 2015.
9. CASTRO, N. J. “Visão 2030: Cenários, tendências e novos paradigmas do setor elétrico”. Editora Babilonia, 2015.
10. CHIPP, H. “O ONS, suas atribuições na operação do SIN e desafios para o futuro”. Palestra para MBA de Economia e Gestão de Energia. Rio de Janeiro, 2009.
11. CHIPP, H. “Perspectivas e importância da geração termoelétrica na matriz brasileira”. A energia na cidade do futuro: Workshop Perspectivas da matriz elétrica de fontes térmicas no mundo e no Brasil. Campinas, 2013.
12. COSTA, M. “Alemanha: O país em que a energia solar vingou até demais”. O Estado de S. Paulo. Berlim, 2014.
13. EMILE-GEAY, J. et al. “Estimating central equatorial Pacific SST variability over the past millennium. Part II: Reconstructions and implications”. Journal of Climate, v. 26, n. 7, p. 2329-2352, 2013.
14. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. “Climate Change Indicators in the United States, 2014”. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/climatechange/pdfs/climateindicators-full-2014.pdf>> Acesso em: 10 nov. 2015.
15. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014”. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio>> Acesso em: 2 out. 2015.

16. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. “Balanço Energético Nacional 2015”.  
Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 25 set. 2015.
17. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. “Plano Decenal de Expansão de Energia 2021”.  
Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx>>. Acesso em:  
25 set. 2015.
18. FAIRBANKS, R. G. et al. “Evaluating climate indices and their geochemical proxies measured in corals”. *Coral Reefs*, v. 16, n. 1, p. S93-S100, 1997.
19. FRITZ, A. “The ‘Driest Place On Earth’ Is Covered in Pink Flowers After A Crazy Year of Rain”. *The Washington Post*, 29 out. 2015. Disponível em:  
<<https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2015/10/29/the-driest-place-on-earth-is-covered-in-pink-flowers-after-a-crazy-year-of-rain/>> Acesso em: 1 nov. 2015.
20. GGWS. Golden Gate Weather Service. “El Niño and La Niña Years and Intensities”.  
Disponível em: <<http://ggweather.com/enso/oni.htm>> Acesso em: 22 set. 2015.
21. GODWIN, H. “Half-Life Of Radiocarbon. *Nature*”, v. 195, n. 4845, p. 984, 8 set. 1962.
22. Grimm, A.M. “Influência remota de fontes tropicais anômalas de calor”. Tese de Doutorado. Instituto Astronômico e Geofísico/USP. São Paulo, 1992, p. 216
23. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. “Mapa de Clima do Brasil”.  
Disponível em: <[ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/clima.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/clima.pdf)>  
Acesso em: 26 nov. 2015.
24. INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. “Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990”. Disponível em: <  
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>> Acesso em:  
5 nov. 2015.

25. LORA, E.E.S.; NASCIMENTO., M.A.R. “Geração Termelétrica - Planejamento, Projeto e Operação – vol. 1”. Editora Interciência, 1265p, 2004.
26. MARENGO, J. A., et al. “Início da est. chuvosa nas reg. SE/CO/S do NE do Brasil, afetadas pela crise de energia”. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos CPTEC/INPE. Disponível em: <<http://energia1.cptec.inpe.br/regiaoafetadas/pt>> Acesso em: 5 out. 2015.
27. MARK, A. C. “Oceanographic Events During El Niño”. Science, v. 222, n. 4629, 16 dez. 1983. Disponível em: <<http://academiccommons.columbia.edu/item/ac:145624>> Acesso em: 20 set. 2015.
28. MONTROYA, M. A., et al. “As Relações Intersetoriais do Setor Energético no Crescimento da Economia Brasileira: Uma Abordagem Insumo-Produto”. TD Nereus. São Paulo, 2013.
29. NHC. National Hurricane Center. “Hurricane Patricia”. Disponível em: <<http://www.nhc.noaa.gov/archive/2015/ep20/ep202015.discus.011.shtml>> Acesso em: 5 nov. 2015.
30. NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. “What are El Niño and La Niña?”. Disponível em: <<http://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html>> Acesso em: 18 set. 2015.
31. NWS. National Weather Service. “El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Diagnostic Discussion”. Disponível em: <[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/enso\\_disc\\_sep2015/ensodisc.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_disc_sep2015/ensodisc.html)>. Acesso em: 15 set. 2015.
32. OLIVEIRA, G. S. “O El Niño e Você: O Fenômeno Climático”. Editora Transtec, 2001. 116 p.

33. ONS. Operador Nacional do Sistema. “Acompanhamento Diário da Operação Hidroenergética do Sistema interligado Nacional”. Disponível em:  
<[http://www.ons.org.br/publicacao/ophen/2015/10\\_Outubro/ophen30-10-15.pdf](http://www.ons.org.br/publicacao/ophen/2015/10_Outubro/ophen30-10-15.pdf)>  
Acesso em: 13 nov. 2015.
34. ONS. Operador Nacional do Sistema. “Energia Armazenada”. Disponível em:  
<[http://www.ons.org.br/historico/energia\\_armazenada.aspx](http://www.ons.org.br/historico/energia_armazenada.aspx)> Acesso em: 15 set. 2015.
35. ONS. Operador Nacional do Sistema. “Geração de Energia”. Disponível em:  
<[http://www.ons.org.br/historico/geracao\\_energia.aspx](http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx)> Acesso em: 18 set. 2015.
36. ONS. Operador Nacional do Sistema. “Situação dos Principais Reservatórios de Acumulação”. Disponível em:  
<[http://www.ons.org.br/resultados\\_operacao/boletim\\_diario/index.htm](http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_diario/index.htm)> Acesso em: 27 out. 2015.
37. PEGORIM, J. “Chuva À Vista Para Quase Todos”. Climatempo, 19 out. 2015.  
Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/noticia/2015/10/19/chuva-a-vista-para-quase-todos-8920>> Acesso em: 30 out. 2015.
38. PENA, R. A. “Ventos Alísios: A Importância dos Ventos Alísios”. Disponível em:  
<[brasilecola.uol.com.br/geografia/ventos-alisios.htm](http://brasilecola.uol.com.br/geografia/ventos-alisios.htm)> Acesso em: 2 out. 2015.
39. PEREIRA, E. B., et al. “Atlas Brasileiro de Energia Solar”. INPE, 2006. Disponível em:  
<[http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas\\_solar.html](http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html)> Acesso em: 20 set. 2015.
40. PINHO, J. T., et al. “Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia”.  
Ministério de Minas e Energia. 22 ed. p. 396. Brasília, 2008.
41. PNRH. Plano Nacional dos Recursos Hídricos. “Panorama e Estado dos Recursos Hídricos do Brasil”. Vol. 1. Brasília, 2006.

42. QUADRO, M. F. L., et al. “Climatologia de Precipitação e Temperatura”. CPTEC/INPE, Climanálise: Boletim. v.29, n.02, Fevereiro 2014. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/chuesp.html>> Acesso em: 5 nov. 2015.
43. RIBEIRO, C. M., et al. “Implantação de Sistema híbrido para Eletrificação da Vila de Joanes (Pará)”. Coletânea de Artigos - Energia Solar e Eólica vol.1. CRESESB, 2003.
44. RODRIGUES, S. A., BATISTELA, G. C. “Uma Revisão Sobre a Disponibilidade Hídrica Brasileira para Geração de Energia Elétrica”. Revista Eletrônica do Curso de Geografia - Campus Jataí, UFG. Goiás, 2013.
45. RUSSEL, R. M. “Coral Reef Cores - Paleoclimate Proxy Records”. UCAR Office of Education and Outreach. 13 out. 2010.
46. SILVA, C. R. “Enchentes Afetam 30 mil Pessoas em Santa Catarina”. UOL, 23 out. 2015. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/10/23/enchentes-afetam-30-mil-pessas-em-santa-catarina.htm>> Acesso em: 30 out. 2015.
47. SOLOMON, S., et al. “IPCC (2007a) Climate Change 2007: The Physical Science Basis”. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations/ipcc-2007a-climate-change-2007>> Acesso em: 10 out. 2015.
48. TOLMASQUIM, M. “As origens da crise energética brasileira”. Ambient. soc., Campinas, n. 6-7, p. 179-183, Junho, 2000. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2000000100012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2000000100012&lng=en&nrm=iso)> Acesso em: 2 dez. 2015.

49. TOLMASQUIM, M. T. “Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil”. *Estudos Avançados*, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.
50. TUDHOPE, A. W. et al. “Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle”. *Science*, v. 291, n. 5508, p. 1511-1517, 2001.
51. UCAR. Center for Science Education. “Coral For Studying Past Climate Video”. Disponível em: <<http://scied.ucar.edu/coral-studying-past-climate-movie>> Acesso em: 2 set. 2015.