

ANNA KAROLINE SILVEIRA FRANCO

Estudo de caso dos impactos da inserção de fontes renováveis intermitentes na  
rede de transmissão e distribuição elétrica

São Paulo  
2018



ANNA KAROLINE SILVEIRA FRANCO

Estudo de caso dos impactos da inserção de fontes renováveis intermitentes na  
rede de transmissão e distribuição elétrica

Monografia apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Especialista em Energias  
Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência  
Energética.

Orientador:

Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

Franco, Anna

Estudo de caso dos impactos da inserção de fontes renováveis intermitentes na rede de transmissão e distribuição elétrica / A. Franco -- São Paulo, 2018.

65 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Transmissão de energia elétrica 2.Energia solar 3.Energia eólica  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da  
responsabilidade coletiva por toda a humanidade

Marie Currie

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus pela vida e por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao meu marido Henrique pelo amor, paciência e companheirismo em todos os momentos e ser o meu apoio quando mais precisei.

Aos meus pais Andréa e Aurelino por todas as oportunidades que me deram e me trouxeram até aqui.

Aos amigos e familiares pela amizade e apoio que sempre posso contar.

Ao Professor Dr. José Aquiles Baesso Grimoni pela orientação ao longo do trabalho.

## **RESUMO**

Diante do crescimento das fontes intermitentes de energia, a segurança energética é uma grande preocupação para o setor elétrico como um todo. As fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, estão sujeitas aos recursos naturais para gerar energia elétrica. A presença das fontes despacháveis é fundamental para garantir os patamares de geração e, consequentemente, a confiabilidade do sistema elétrico.

Além dos sistemas de geração de energia, há também a necessidade de garantir a confiabilidade nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, principalmente nas regiões com alta penetrabilidade das fontes renováveis intermitentes. Tais fontes provocam diversos impactos nas redes e para integrá-las ao sistema elétrico são necessários planejamento prévio, dimensionamento das reservas operativas, além de tomar as devidas medidas operacionais para a flexibilização necessária do sistema.

Portanto, serão discutidos como a confiabilidade e a segurança operativa destes sistemas é garantida, abordando as práticas utilizadas nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Palavras-chaves: Energia solar. Energia eólica. Transmissão de energia elétrica.

## **ABSTRACT**

In front of the growth of the intermittent energy sources, the energetic security is a big concern for the electrical sector. The intermittent renewable sources, as solar and wind power, depends on the natural resources to generate electric energy. The presence of the dispatchable fonts are fundamental to guarantee the generation levels and, consequently, the reliability of the electrical power systems.

Besides the electrical generation systems, there is the necessity to guarantee the reliability of the transmission and distribution networks of electrical energy, mainly at the areas with high penetrability of intermittent renewable energy. These sources produce a large impact at the networks and for the integration to the electrical power systems is necessary previous planning, sizing the operational reserves and prepare the operational measures for the necessary flexibilization of the system.

Therefore, will be discussed how the reliability and the operational security of those systems are guaranteed, approaching the practices used at the transmission and distribution of electric systems.

**Keywords:** Solar energy. Wind energy. Transmission of electric energy.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO .....	3
2.2 FONTES INTERMITENTES.....	6
2.3 POTENCIAL EÓLICO E SOLAR NO BRASIL .....	9
2.4 PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO.....	12
<b>3. INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES NO SISTEMA ELÉTRICO .....</b>	<b>16</b>
3.1 DESAFIOS DA INSERÇÃO DE FONTES INTERMITENTES.....	16
3.1.1 Flutuações da geração intermitente .....	16
3.1.2 Previsibilidade da geração intermitente .....	18
3.1.3 Dependência da localização .....	19
3.1.4 Impactos na Qualidade de Energia .....	20
3.1.5 Controle de Frequência e Tensão.....	22
3.1.6 Impactos nas Redes de Distribuição .....	24
3.2 INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES .....	25
3.2.1 Complementaridade da Geração .....	25
3.2.2 Planejamento da Expansão da Transmissão.....	30
3.2.3 Dimensionamento da reserva operativa .....	33
3.2.4 Dimensionamento da Reserva de Potência Operativa Considerando a Influência da Geração Eólica .....	34
3.2.5 Medidas Operacionais para a Flexibilização do Sistema.....	35
<b>4. ESTUDOS DE CASOS DE SISTEMAS COM ALTA PENETRABILIDADE DE ENERGIAS RENOVÁVEIS INTERMITENTES.....</b>	<b>38</b>
4.1 Energia solar fotovoltaica .....	38
4.1.1 África do Sul .....	39
4.1.2 Ilha Lanai, Havaí.....	42
4.2 Energia eólica.....	44
4.3 Inserção da energia intermitente no Brasil.....	46
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2 - 1: Sistema de transmissão brasileiro em 2017 .....	3
Figura 2 - 2: Capacidade instalada no SIN – 2017/2022.....	4
Figura 2 - 3: Extensão da rede de transmissão – 2016/2019 .....	5
Figura 2 - 4: Curva diária de geração (MW) de fonte hidráulica .....	6
Figura 2 - 5: Curva diária de geração (MW) de fonte nuclear .....	7
Figura 2 - 6: Curva diária de geração (MW) de fonte térmica .....	7
Figura 2 - 7: Curva diária de geração (MW) de fonte eólica.....	8
Figura 2 - 8: Curva diária de geração (MW) de fonte solar .....	9
Figura 2 - 9: Potencial eólico brasileiro .....	10
Figura 2 - 10: Insolação diária média anual .....	11
Figura 2 - 11: Energia eólica no setor elétrico mundial .....	12
Figura 2 - 12: Representação da interligação entre Subsistemas do SEB .....	14
Figura 3 - 1: ventos de circulação global.....	17
Figura 3 - 2: Panorama da energia eólica no Brasil.....	20
Figura 3 - 3: Exemplo de flutuação de tensão .....	21
Figura 3 - 4: Exemplo de onda fundamental e componentes harmônicos.....	22
Figura 3 - 5: Exemplo de transitório.....	22
Figura 3 - 6: Complementaridade entre precipitação e vento no Brasil .....	26
Figura 3 - 7: Distribuição das usinas hidrelétricas existentes no Brasil .....	27
Figura 3 - 8: Distribuição das usinas eólicas existentes no Brasil.....	28
Figura 3 - 9: Distribuição das usinas fotovoltaicas existentes no Brasil .....	29
Figura 3 - 10: Complementaridade ideal entre solar e eólica .....	30
Figura 4 - 1: Regiões consideradas no estudo	40
Figura 4 - 2: produção de energia a partir de usinas fotovoltaicas combinadas ao meio dia ...	41
Figura 4 - 3: localização dos quatro locais de medição .....	42
Figura 4 - 4: Comparação entre capacidade instalada (vermelho) e geração medida (azul) ao longo do ano .....	43

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4- 1: geração e representatividade da fonte eólica.....	46
--	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SEB	Sistema elétrico brasileiro
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PD	Plano Decenal
PET	Planejamento da Expansão da Transmissão
RPO	Reserva de Potência Operativa

## **1. INTRODUÇÃO**

O Sistema Interligado Nacional (SIN) interliga todos os subsistemas do Brasil tanto na transmissão quanto na geração de energia e para o seu bom funcionamento ele deve ser planejado visando a sua segurança e confiabilidade como um todo.

O sistema elétrico brasileiro (SEB), tradicionalmente hidrotérmico composto principalmente por térmicas a gás e hidrelétricas com reservatório, tem passado por grandes transformações com a inserção das fontes renováveis intermitentes de energia, destaque para a solar fotovoltaica e, principalmente, para a eólica em franco crescimento. Tais fontes inserem imprevisibilidade ao sistema, pois dependem exclusivamente do vento e do sol para gerarem quantidades variáveis de energia.

As energias renováveis intermitentes como a solar fotovoltaica e a eólica têm ganhado cada vez um maior destaque mundial, por serem fontes limpas de energia, possuírem impacto reduzido no meio ambiente e reduzirem a dependência dos combustíveis fósseis. Seu crescimento é benéfico, porém é necessário ser planejado, afinal não produzem quantidades constantes de energia elétrica ao longo do dia e nem possuem sistemas de acumulação capazes de armazenar energia potencial, podendo causar instabilidades ao sistema.

Desta forma, há a necessidade de estudos nas áreas de transmissão e distribuição de energia elétrica para que as instabilidades causadas pela alta penetrabilidade de fontes renováveis nos sistemas elétricos sejam mensuradas e apresentadas soluções para flexibilizar o sistema elétrico desde a geração da energia até a distribuição para os consumidores.

Os principais objetivos desta pesquisa são apontar e discutir os desafios encontrados na inserção das fontes renováveis intermitentes no sistema elétrico e apresentar algumas das soluções disponíveis para a melhor integração destas fontes, de forma a reduzir os impactos causados nestas fontes e garantir a segurança e confiabilidade do sistema. Serão apresentados estudos de casos de sistemas com alta penetrabilidade de energias renováveis intermitentes, com destaque para a solar fotovoltaica e eólica.

A metodologia adotada neste estudo será a conceituação dos principais conceitos necessários para o entendimento do trabalho, em seguida será levantado os principais

impactos causados por esse tipo de geração nas redes de transmissão e distribuição e as soluções encontradas para mitigar os impactos de forma a garantir um sistema mais seguro e confiável. Por fim, serão pesquisados casos nos quais há grande participação de fontes renováveis intermitentes e verificar quais são os principais impactos causados e quais foram as ações mitigadoras aplicadas.

Este estudo está separado em cinco capítulos, primeiramente serão levantados os principais conceitos necessários para o entendimento do estudo. Em seguida serão discutidos como a integração das fontes renováveis intermitentes é realizada, abordando os principais desafios da inserção destas fontes e também as práticas necessárias para preparar o sistema elétrico, principalmente nos casos nos quais há grande participação destas fontes. Serão apresentados estudos de casos de sistemas com alta penetrabilidade e a resposta dos sistemas para as rampas de geração devido às flutuações características destas fontes.

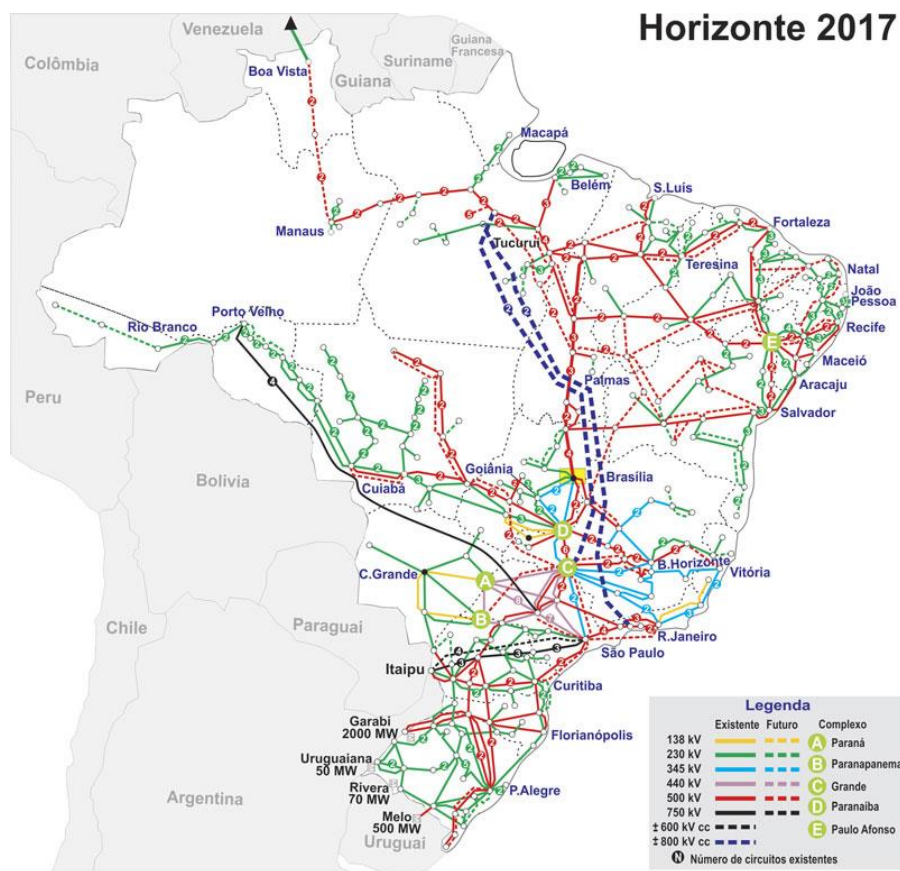
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o Brasil possui um sistema de produção e transmissão de energia elétrica do tipo hidro-termo-eólico de grande porte com destaque para as usinas hidrelétricas de múltiplos proprietários. O SIN é dividido em quatro subsistemas: Norte, Nordeste, Sul e Sudeste/Centro-Oeste.

A malha de transmissão, conforme Figura 2-1, é a responsável pela conexão do sistema elétrico e a transferência de energia entre os subsistemas. Desta forma, o mercado é atendido de forma mais segura e econômica devido aos ganhos de sinergia e a diversidade dos regimes hidrológicos das bacias.

Figura 2 - 1: Sistema de transmissão brasileiro em 2017

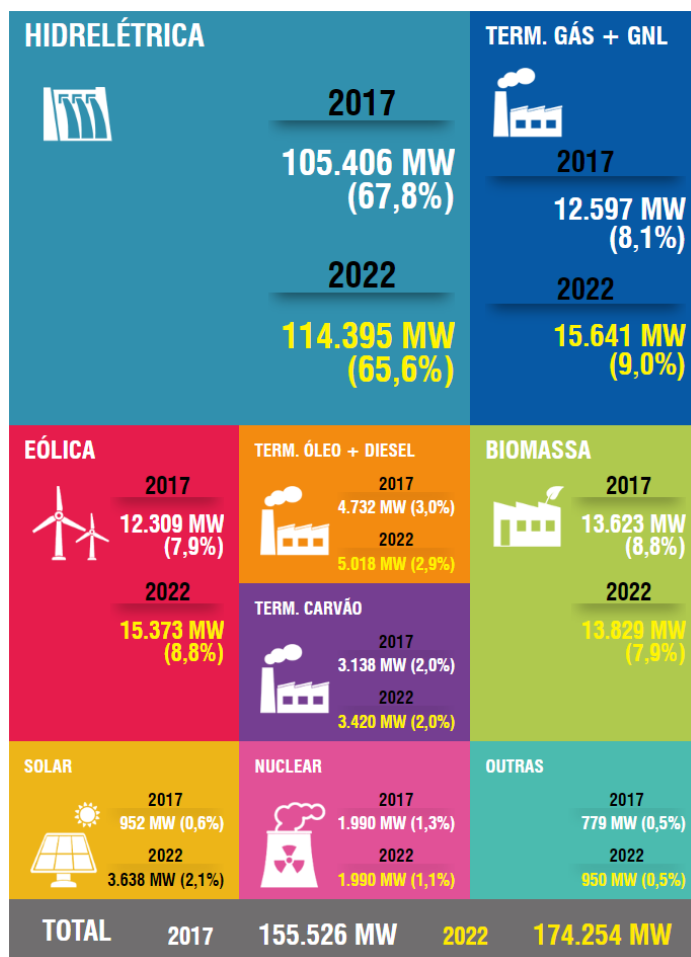


Fonte: ONS (2018)

No Brasil, segundo o ONS, a principal fonte de geração de energia elétrica é a hidrelétrica, seguido das térmicas a gás, eólica, térmicas a óleo e diesel, biomassa térmicas a carvão, solar, nuclear e outras, totalizando em 2017 um total de 155.526 MW de energia gerada.

Conforme Figura 2-2, em 2022 está previsto um aumento significativo na participação das energias renováveis no SIN, com destaque para as renováveis intermitentes como eólica com aumento de 7,9% para 8,8% de participação no SIN e a solar de 0,6% para 2,1%. As térmicas a gás também terão um aumento na sua participação de 8,1% para 9,0%.

Figura 2 - 2: Capacidade instalada no SIN – 2017/2022



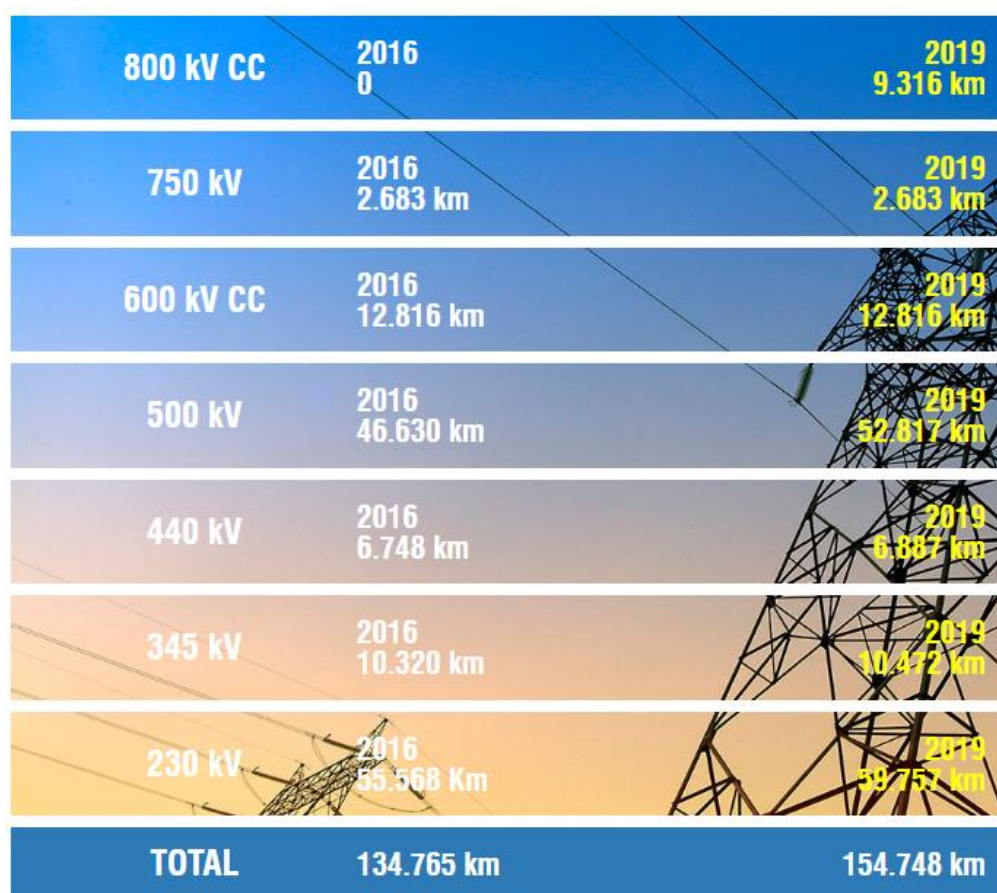
Fonte: ONS (2018)



Em termos de localização, as usinas hidrelétricas estão distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas ao longo do território brasileiro. As eólicas estão concentradas principalmente nas regiões Nordeste e Sul. As usinas térmicas estão estrategicamente próximas aos principais centros de carga.

O sistema de transmissão integra as fontes de geração de energia elétrica com o mercado consumidor. Atualmente o Brasil conta 134.765 km de linhas de transmissão que estão divididos em linhas entre 230 e 750 kV localizadas ao longo do território nacional. A previsão para 2019 é o aumento das linhas existentes, com exceção das linhas de 600 kV CC e 750 kV e do início da operação da linha de 800 kV CC que inicia no estado do Pará até Minas Gerais, conforme Figura 2-3.

Figura 2 - 3: Extensão da rede de transmissão – 2016/2019



<b>800 kV CC</b>	2016 0	2019 9.316 km
<b>750 kV</b>	2016 2.683 km	2019 2.683 km
<b>600 kV CC</b>	2016 12.816 km	2019 12.816 km
<b>500 kV</b>	2016 46.630 km	2019 52.617 km
<b>440 kV</b>	2016 6.748 km	2019 6.887 km
<b>345 kV</b>	2016 10.320 km	2019 10.472 km
<b>230 kV</b>	2016 55.568 Km	2019 59.757 km
<b>TOTAL</b>	<b>134.765 km</b>	<b>154.748 km</b>

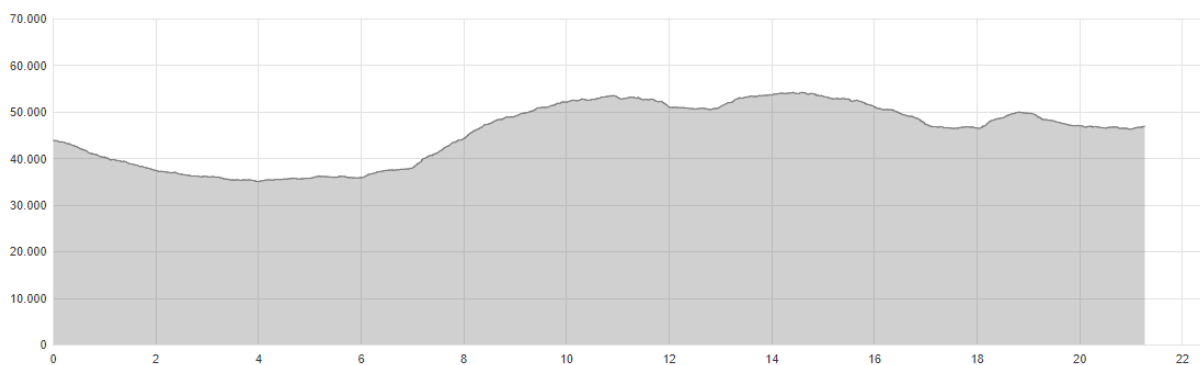
Fonte: ONS (2018)

## 2.2 FONTES INTERMITENTES

Na matriz elétrica brasileira é possível dividir as principais fontes de geração em duas categorias: as despacháveis e as intermitentes. As despacháveis são previsíveis e podem operar em qualquer momento com uma potência definida, nesta categoria estão as usinas térmicas, nucleares e hidrelétricas com reservatórios. As intermitentes não possuem essa mesma previsibilidade, elas dependem dos fatores climáticos para gerarem a sua energia que nem sempre é constante, como as hidrelétricas a fio d'água, as plantas fotovoltaicas e eólicas, sendo as duas últimas com maior destaque no mercado de energia mundial.

As fontes despacháveis possuem grande importância para o sistema elétrico, afinal sua previsibilidade está, segundo Gianelloni e Câmara (2016), na velocidade de ajuste do seu patamar de geração, podendo ser ligadas ou desligadas por um operador para que um determinado patamar de carga seja atingido. Sua previsibilidade pode ser vista nas três figuras.

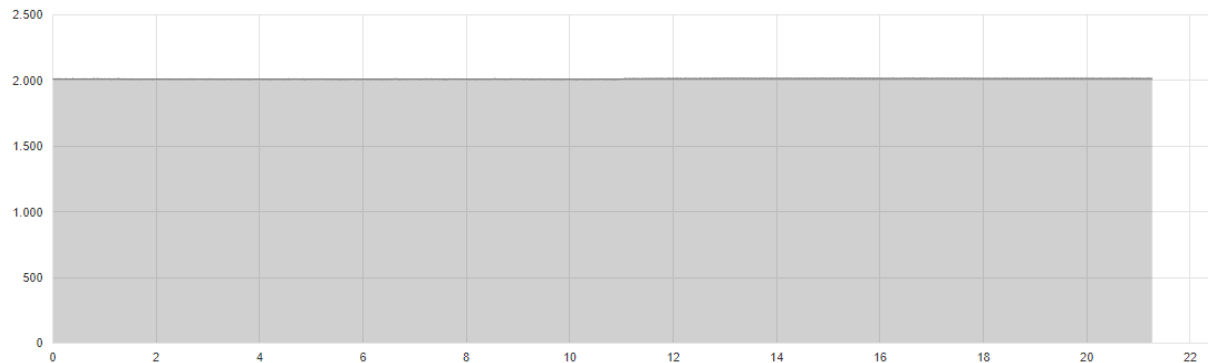
Figura 2 - 4: Curva diária de geração (MW) de fonte hidráulica



Fonte: ONS (2018)

Na curva da fonte hidráulica são consideradas tanto as hidrelétricas com reservatórios quanto as de fio d'água, por isso a sua curva de geração apresenta variações ao longo do dia, já que o fluxo de água e as cheias dos rios interferem na produção de energia, conforme Figura 2-4. Caso houvessem apenas as usinas com reservatórios no Brasil, a curva de geração teria uma característica muito mais constante, dependendo principalmente das chuvas para o enchimento dos reservatórios e aumentando a energia potencial das usinas.

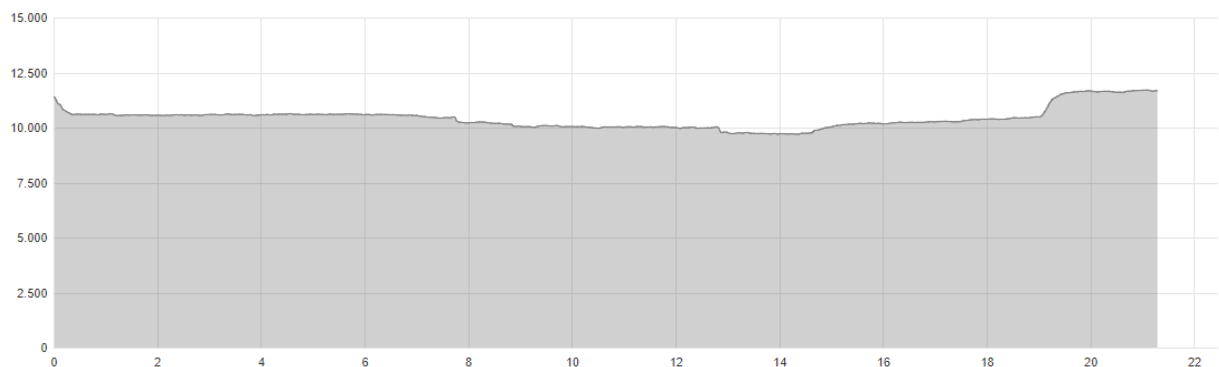
Figura 2 - 5: Curva diária de geração (MW) de fonte nuclear



Fonte: ONS (2018)

A fonte nuclear, representada na Figura 2-5, é a totalmente constante na sua geração, pois depende exclusivamente do combustível, no caso Urânio, para gerar energia. Ela não possui influência alguma das condições climáticas do local, sendo a fonte mais confiável eletricamente.

Figura 2 - 6: Curva diária de geração (MW) de fonte térmica



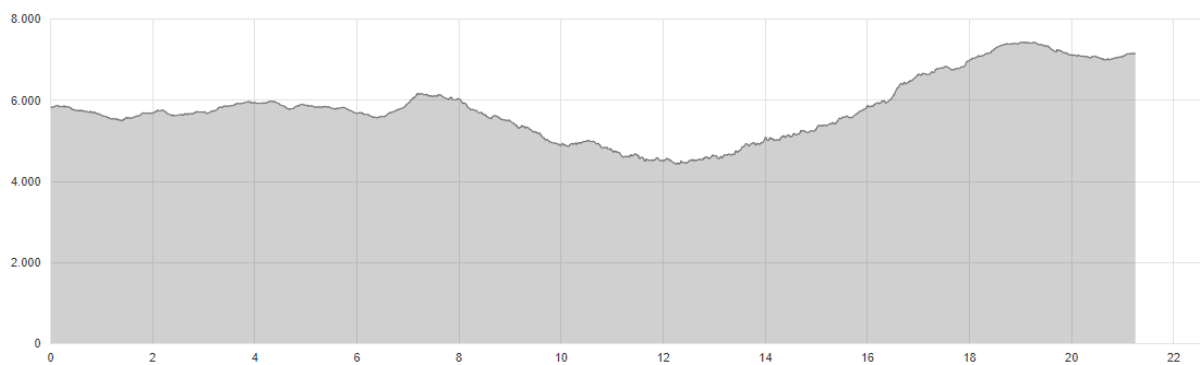
Fonte: ONS (2018)

Na curva da fonte térmica, conforme Figura 2-6, estão consideradas as térmicas a gás, carvão, óleo, diesel e biomassa. Essas diferentes usinas são despachadas em momentos

estratégicos quando há o aumento de carga no sistema após às 18h, causando assim uma maior variabilidade na sua curva de geração.

As fontes intermitentes variam a sua geração de energia conforme a disponibilidade dos recursos, podendo variar bruscamente de 0 a 100% no mesmo dia. As usinas eólicas dependem da velocidade do vento ao longo do dia, enquanto as usinas fotovoltaicas dependem da posição do sol, gerando energia mesmo em dias nublados já que opera tanto com a luz solar direta quanto a difusa. As características de geração destas duas fontes podem ser vistas nas figuras a seguir.

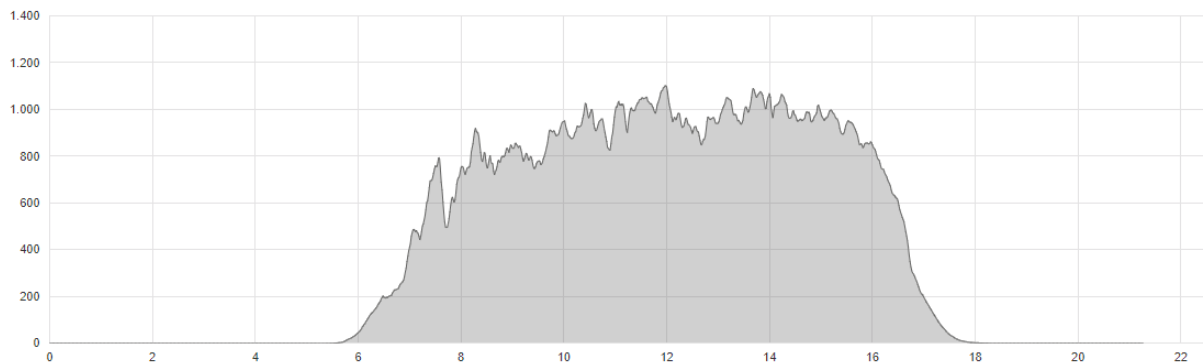
Figura 2 - 7: Curva diária de geração (MW) de fonte eólica



Fonte: ONS (2018)

A fonte eólica possui maior variação na geração ao longo do dia, alcançando os menores patamares próximos ao meio dia, quando há uma queda nos ventos, conforme Figura 2-7. Na curva solar da Figura 2-8 seguir, além da variação causada pelo movimento do sol ao longo do dia, há também grandes variações de geração no período de sol.

Figura 2 - 8: Curva diária de geração (MW) de fonte solar



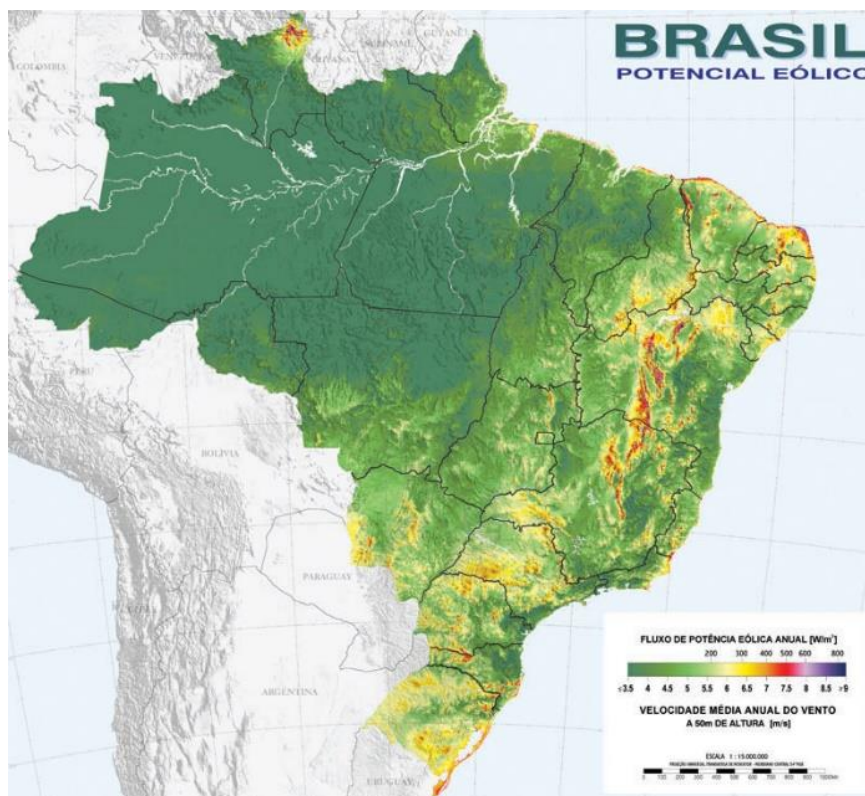
Fonte: ONS (2018)

As curvas apresentadas evidenciam as características principais das fontes despacháveis e intermitentes. Fica evidente que as fontes intermitentes possuem instabilidade maior do que as outras fontes, principalmente a solar. Um sistema com alta penetrabilidade destas fontes precisa ser planejado para suprir as variações intrínsecas ao tipo de geração destas fontes.

## 2.3 POTENCIAL EÓLICO E SOLAR NO BRASIL

Em 2001, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo CRESESB, estimou o potencial eólico brasileiro em 146 GW com torres de 50 m de altura, porém com os novos avanços no setor, já se estima que este potencial chegue a 350 GW. Como é possível verificar na Figura 2-9, o maior potencial eólico encontra-se nas Regiões Nordeste e Sul do Brasil, principalmente nos Estados do Rio Grande do Norte, da Bahia, do Ceará e do Rio Grande do Sul.

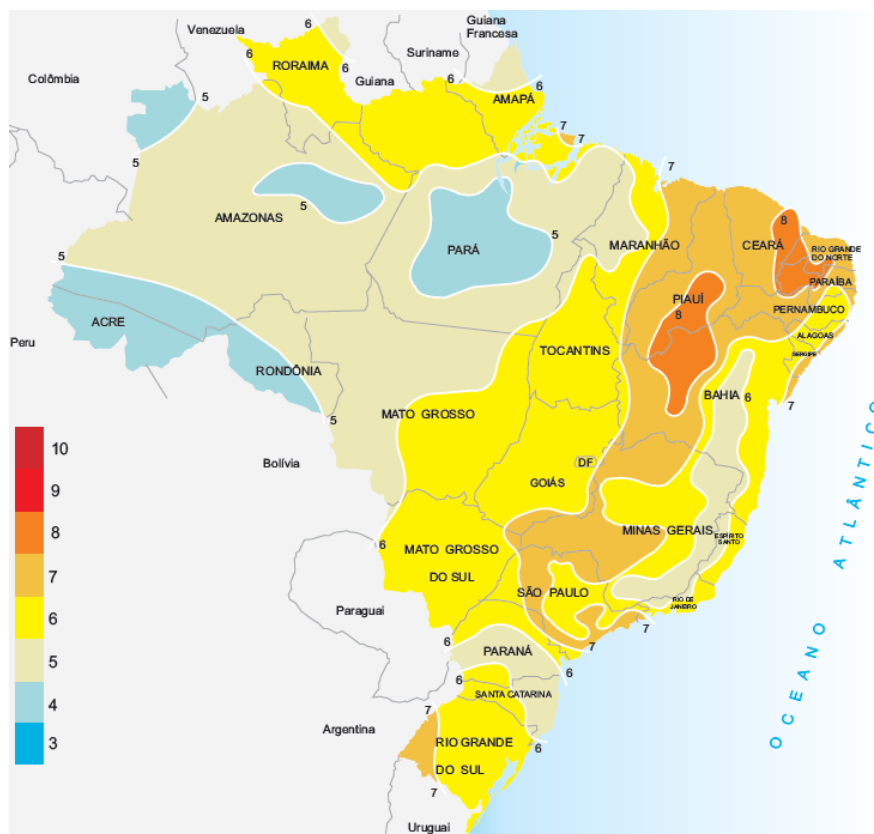
Figura 2 - 9: Potencial eólico brasileiro



Fonte: CRESESB (2001)

Em 2000, com o Atlas Solarimétrico do Brasil e as diversas medições realizadas e apresentadas, foi possível quantificar o potencial para a geração de energia solar no Brasil. O território brasileiro encontra-se, em maior parte, localizado na zonal intertropical com altas taxas de insolação ao longo do ano, conforme Figura 2-10. As regiões de maior destaque são a Sudeste e Nordeste, com destaque para os estados do Piauí, Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba com os maiores níveis do Brasil.

Figura 2 - 10: Insolação diária média anual



Fonte: TIBA (2000)

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa), segundo o MME (2004), foi instituído através do decreto nº 5.025 de 2004 com objetivo de promover a expansão eólica no Brasil. Em 2004 houve a primeira participação da fonte em leilões de energia. Em 2009 ocorreu seu primeiro leilão exclusivo, contribuindo para a queda dos preços e aumento de sua competitividade.

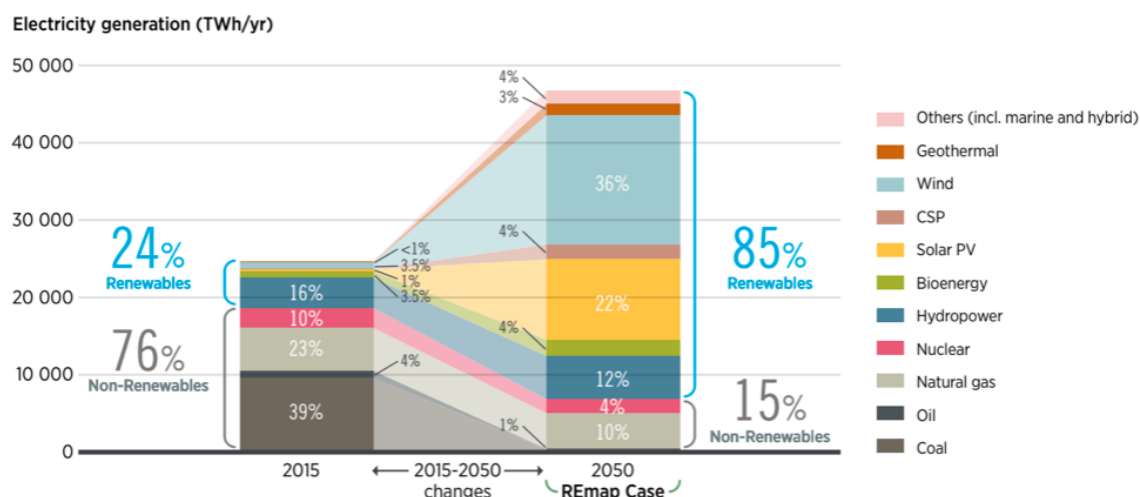
Existem propostas para o incentivo à geração fotovoltaica no Brasil, uma delas é a Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica (PRONOSOLAR), projeto de lei nº 10370 de 2018. Um dos itens propostos é zerar as alíquotas de PIS/Pasep e COFINS sobre a energia elétrica gerada a partir de um sistema fotovoltaico. Políticas como essa incentivam essa fonte em expansão.

Conforme a Figura 2-11, desde 2015 ocorre um movimento de mudanças quanto as fontes de geração de energia elétrica que deve durar até aproximadamente 2050 com o avanço

contínuo das energias renováveis. A partir de 2050 a geração de energia deve dobrar e a fonte eólica que representa cerca de 3,5% da energia elétrica gerada no mundo, passará a representar 36% e a solar fotovoltaica de 1% passará para 22%.

Esse avanço mostra as mudanças de investimento já que as energias renováveis sairão de 24% para 85% da energia elétrica gerada, com a geração fotovoltaica e eólica como destaques deste novo panorama.

Figura 2 - 11: Energia eólica no setor elétrico mundial



Fonte: Irena (2018)

## 2.4 PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO

O planejamento dos sistemas de geração e transmissão sempre foi bastante desafiador, pois para que haja o crescimento econômico do país, seu sistema elétrico tem que estar preparado para atender as novas demandas que surgirem. O aumento da participação das fontes renováveis intermitentes causa grande preocupação para os operadores e planejadores do sistema elétrico, pois sua geração volátil eleva a complexidade operacional do sistema. Desta forma, para garantir a confiabilidade do sistema é necessário realizar um grande planejamento do sistema como um todo, analisando não só o aumento da demanda, mas sim a garantia de que ela será atendida de forma segura e confiável.

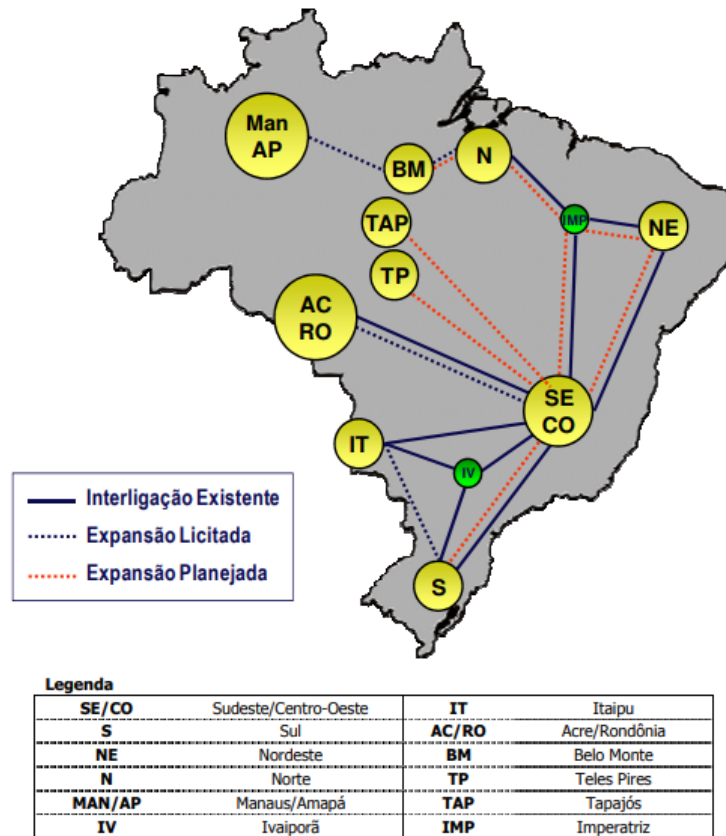


No sistema elétrico brasileiro (SEB), desde 2004 através do decreto nº 5.163, existe a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) responsável pelo planejamento do setor energético, cobrindo a energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados e os biocombustíveis.

É responsabilidade da EPE elaborar alternativas para a expansão da geração e transmissão de energia, elaborando estudos de planejamento de energia, analisando a previsão de aumento de carga e alternativas para o escoamento desta energia, de forma a atender a carga com o menor custo global.

O planejamento do aumento da oferta de energia elétrica e do aumento do sistema de transmissão dependem um do outro para garantir o bom funcionamento do SEB, tanto no aumento da carga necessário para o atendimento da demanda futura, como a garantia que essa produção extra será escoada de forma fluida e segura. Afinal, conforme apresentado na figura 2-12, todos os subsistemas são interligados, garantindo maior capacidade de escoamento da energia.

Figura 2 - 12: Representação da interligação entre Subsistemas do SEB



Fonte: EPE (2018)

Segundo Lopes (2013), para o planejamento do SEB, existem três principais estudos a serem feitos na área da transmissão:

- i. Plano decenal da expansão da transmissão: o plano decenal (PD) aponta a necessidade de expansão do SIN num horizonte de 10 anos. Ele apresenta um diagnóstico do sistema como um todo, apresentado a necessidade de intercambialidade entre os subsistemas necessária para o bom funcionamento do SIN como um todo.
- ii. Expansão da geração: são levantados todos os parques geradores previstos para iniciarem a sua operação e a sua conexão ao sistema de transmissão garantindo que a energia gerada seja escoada. Nesses estudos também são analisadas as sazonalidades das fontes de energia, sendo fundamental para a inserção das fontes renováveis intermitentes no SIN. Com esta análise é possível prever o atendimento da demanda em todos os patamares de carga leve, médio e pesado.

- iii. Aumento de demanda: esses estudos analisam as projeções de aumento de carga provocada pelo mercado de energia. Para esta análise são levadas em consideração os valores de carga para os patamares de carga leve, médio e pesado, considerando o submercado Norte como importador e exportador de energia e também a viabilidade econômica do parque gerador de forma a garantir o menor custo global.

Para a expansão dos sistemas de geração e transmissão, além dos estudos realizados para realizar o seu planejamento, também é extremamente importante garantir a sua confiabilidade, principalmente com o aumento da participação das fontes renováveis intermitentes no sistema. Com a inserção destas fontes se torna necessário avaliar as variações de potência que ocorrem ao longo do tempo durante a geração, dificultando a definição dos patamares de geração usados nos estudos supracitados.

As variações de potência ao longo do tempo são as chamadas séries temporais de carga e geração. Através delas é possível determinar os impactos que as variações de geração causam no sistema, além de ser possível detectar as complementaridades entre as fontes de energia e também a necessidade dos reforços tanto no sistema de geração quanto no de transmissão para o atendimento da carga de forma completa e segura.

Os estudos das séries temporais auxiliam a definir, segundo Flávio (2015), os períodos de sobrecarga nas linhas de transmissão decorrente de períodos de alta concentração de vento. Através destes estudos é possível planejar se uma rede de transmissão mais robusta e com operação mais flexível é necessária nas proximidades dos parques para garantir o escoamento desta produção ou então a necessidade do desligamento do parque eólico da rede nos períodos de elevada oferta.

### **3. INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES NO SISTEMA ELÉTRICO**

A integração das fontes intermitentes no SEB precisa ser planejada de forma a garantir que os sistemas de geração e transmissão estejam prontos para a entrada destas fontes. Conforme Holttinen (2009), sistemas com alta penetrabilidade de energias intermitentes precisam gerenciar a conexão das usinas ao sistema elétrico, integração da geração, planejamento da transmissão, além das operações de mercado de energia.

Grandes desafios são encontrados como a variabilidade na geração, principalmente na fotovoltaica e eólica, as incertezas da quantidade de energia gerada ao longo do dia e também a localização geográfica deve ser definida a partir da disponibilidade de recursos e não necessariamente coincide com a necessidade de consumo.

Para mitigar os impactos causados na inserção destas fontes são necessárias ações no sistema para permitir a sua operação de forma correta e confiável. É importante haver uma mudança na operação tradicional do sistema onde há o equilíbrio entre carga e geração para um modelo mais dinâmico para se ajustar às séries temporais destas fontes de energia.

#### **3.1 DESAFIOS DA INSERÇÃO DE FONTES INTERMITENTES**

##### **3.1.1 Flutuações da geração intermitente**

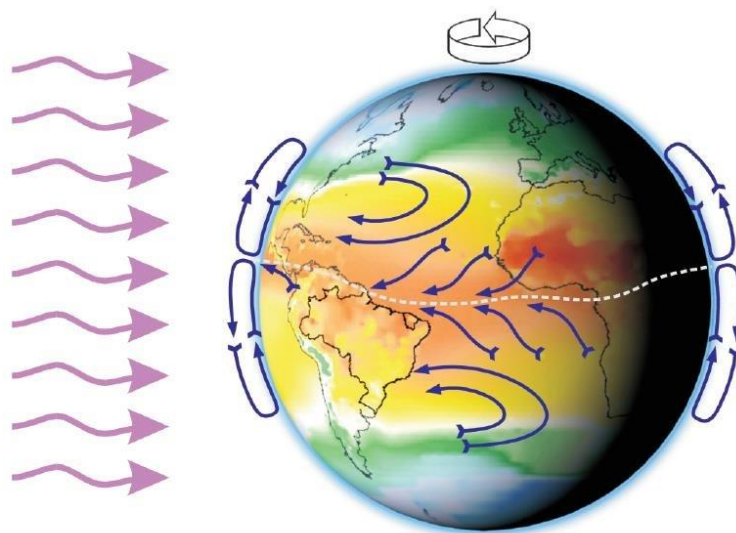
As flutuações da geração fotovoltaica ou eólica são intrínsecas ao tipo da fonte, já que geram energia a partir de recursos naturais não estocáveis que são o vento e a irradiância solar.

Conforme Almeida (2017), as flutuações da irradiância ocorrem e podem ser observadas a longo, médio e curto prazo. A longo prazo, com duração de várias horas, ocorre o movimento da relativo entre a Terra e o Sol que basicamente determina a duração da irradiância ao longo de um dia. A médio prazo, com a duração de horas ou minutos, ocorre o deslocamento em baixa velocidade das nuvens que provocam sombras em até grandes áreas. A curto prazo, com a duração de poucos minutos ou até mesmo milissegundos, ocorre o

deslocamento rápido de nuvens pequenas que causam sombras, muitas vezes imperceptíveis aos olhos.

As flutuações das eólicas são causadas, conforme Neto et al. (2017), pelo movimento das massas de ar na atmosfera. Os ventos podem ser classificados como locais ou globais, os locais ocorrem próximos à superfície da Terra e sofrem influências de parâmetros globais, tais como: obstáculos próximos aos locais de medição, rugosidade do terreno, relevo do local e estabilidade das temperaturas. Já os ventos globais são resultantes das diferenças de pressão, temperatura e densidade causada pela irradiação solar ao longo do planeta, variando por região geográfica, período do dia e ano, conforme figura 3-1.

Figura 3 - 1: ventos de circulação global



Fonte: Neto et al. (2018)

Os sistemas fotovoltaicos e eólicos possuem sensibilidades diferentes quanto às flutuações citadas anteriormente e manter usinas com alta sensibilidade às flutuações, porém capaz de manter os níveis de geração os mais estáveis possíveis, aumentam o seu custo, podendo inviabilizar novos projetos.

Segundo Tolmasquim (2017), a flexibilidade de operação é uma constante no setor elétrico, afinal é necessário lidar com o equilíbrio de carga e geração, além das possibilidades de falhas de equipamentos. O sistema precisa responder de forma rápida para garantir o bom funcionamento do sistema como um todo, desde da usina até o consumidor final. As fontes eólicas e solar causam um adicional de flutuação imprevisível ao sistema devido a sua dependência das condições climáticas locais, principalmente nas regiões que a sua participação é significativa.

As variações de geração das fontes renováveis intermitentes devem ser somadas às variações de carga líquida e desta forma ser analisadas como um só sistema variável. As demais cargas do sistema precisam rapidamente suprir estas variações na geração, independente da origem, lidando com o sistema como um todo e garantindo o seu equilíbrio e bom funcionamento.

### **3.1.2 Previsibilidade da geração intermitente**

O grau de previsibilidade também é um dos desafios encontrados na inserção das renováveis intermitentes nos sistemas elétricos, existem grandes incertezas quanto a velocidade do vento e irradiação solar e, consequentemente, nos níveis de geração em um determinado período. No geral, a previsibilidade da irradiação solar, nascer e pôr do sol e quantidade de nuvens é maior do que a disponibilidade de vento.

Apesar do sistema elétrico já lidar com modelos de previsibilidade que levam em consideração a demanda prevista e fatores climáticos, há fatores inesperados que podem ocorrer ao longo de um dia como por exemplo frentes frias que podem causar variações na geração ou então reações na demanda.

Existem reservas disponíveis no sistema elétrico capazes de suprir o fornecimento de energia em casos de eventos inesperados. Segundo Tolmasquim (2017), com o aumento da penetrabilidade das fontes intermitentes, a reserva precisa ser redimensionada de forma a garantir o suprimento, mesmo com as incertezas e flutuações inerentes ao tipo de geração.

Segundo a ANEEL, todos os consumidores do SEB contribuem com o valor mínimo faturável em sua fatura de energia, tal valor é o custo de disponibilidade do setor elétrico. Atualmente por se tratar de um sistema hidrotérmico, o SEB possui um alto grau de confiabilidade e previsibilidade e, com o aumento da participação das fontes fotovoltaica e eólica, a previsibilidade do sistema é reduzida e caso seja necessário rever as reservas atuais, esse custo será pago pelo próprio consumidor. Porém o dimensionamento da reserva fica mais complexo com uma geração incerta.

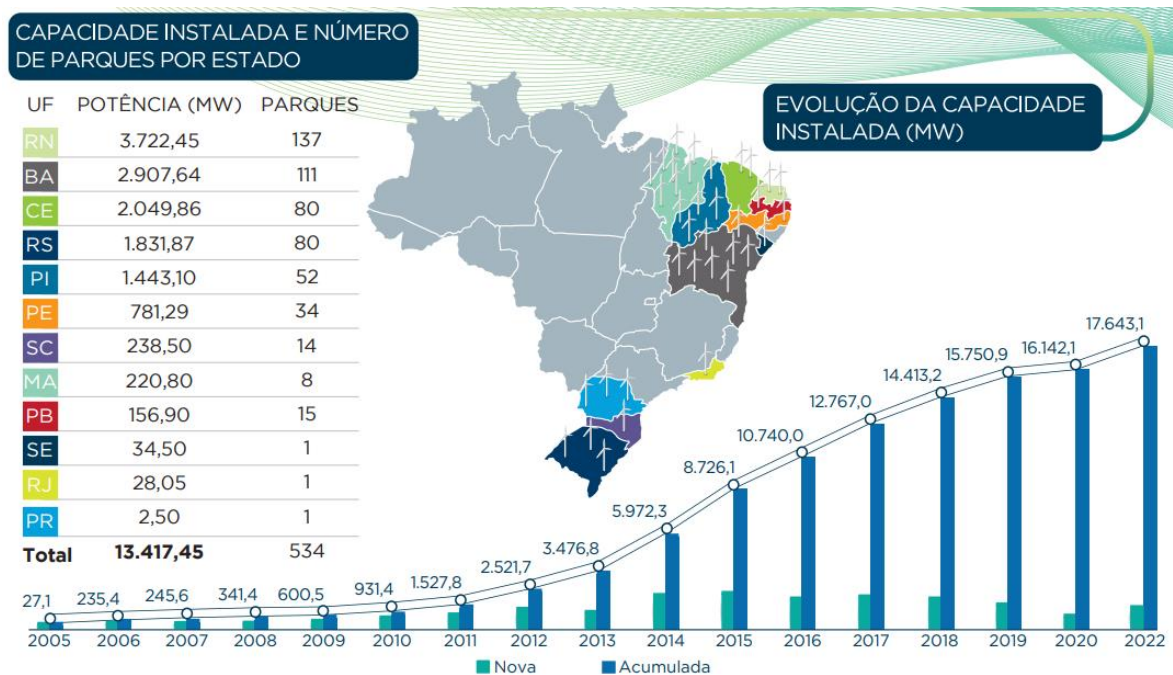
### **3.1.3 Dependência da localização**

As fontes renováveis de energia, independente se são despacháveis ou intermitentes, possuem o desafio inicial de determinar a sua localização geográfica a partir da disponibilidade e qualidade dos recursos naturais necessários para gerar energia. Por exemplo, as usinas hidrelétricas com reservatório precisam de um rio com queda d'água e grandes volumes de chuva para garantir o enchimento e manutenção dos níveis dos reservatórios; as fotovoltaicas precisam de altos níveis médios de irradiação solar ao longo do ano e as eólicas precisam de ventos constantes e previsíveis para melhor aproveitamento dos recursos.

Como dependem dos recursos naturais, as unidades geradoras não necessariamente estarão próximas aos locais que possuem maior demanda de eletricidade, podendo inclusive estar localizadas em locais isolados. Portanto, há a necessidade de maiores investimentos para a ampliação das redes de transmissão para que essa energia chegue aos maiores centros de carga.

Conforme ONS (2018), a energia fotovoltaica no Brasil ainda possui pouca participação na matriz elétrica do país com 952 MW instalados, já a energia eólica é mais representativa com 12.309 MW instalados, representando 7,9% da energia do SIN. As eólicas no Brasil, conforme figura 3-2, estão localizadas principalmente nas regiões geográficas Nordeste e Sul, sendo em maior quantidade na região Nordeste, sendo o maior centro de carga localizado na região Sudeste. Desta forma, foram necessários altos investimentos para levar a energia produzida para a região de maior demanda, além de aumentar a interligação entre as regiões.

Figura 3 - 2: Panorama da energia eólica no Brasil



Fonte: ABEEólica (2018)

Portanto há um trade-off entre a escolha da melhor localização da usina e os custos de transmissão para conectar a usina ao sistema elétrico. Para conectar usinas que estão distantes, são necessários maiores investimentos em redes mais robustas e confiáveis, conforme IEA (2014) esses custos podem ainda ser maiores e mais complexos devido ao baixo fator de capacidade destas usinas.

### 3.1.4 Impactos na Qualidade de Energia

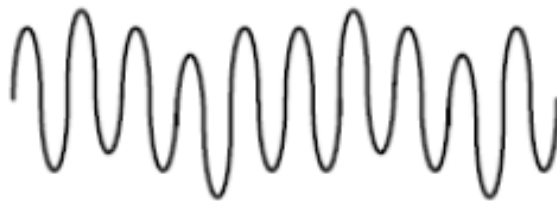
Um sistema elétrico que possui uma alta qualidade de energia elétrica significa, segundo Rocha (2016), que a tensão do sistema é uma onda senoidal pura e sem variações em sua amplitude ou frequência, porém nos sistemas elétricos a realidade é outra. Desvios na amplitude e frequência nas ondas de tensão são bastante frequentes, prejudicando o funcionamento e operação do sistema elétrico.



Os padrões de qualidade de energia garantem que a energia chegada ao consumidor esteja dentro dos padrões definidos pelo ONS. A presença de desvios na rede é comum, porém a intermitência da fonte eólica resultante da variação da velocidade do vento e da fotovoltaica resultante da variação da irradiação solar e presença de nuvens provocam principalmente flutuações de tensão, harmônicos na tensão e corrente e picos de tensão e potência ativa. Conforme Rampinelli e Rosa Junior (2012), os principais impactos destas fontes nos sistemas elétricos estão relacionados à variação de tensão e produção de harmônicos, conforme descrito a seguir:

- I. Variação de tensão: a geração de energia eólica ou fotovoltaica estão em constante variação, além dos possíveis desligamentos de emergência, estão sujeitos às condições climáticas do local. As variações da geração causam variações na tensão que por sua vez deixam o controle e operação do sistema elétrico mais complexo.

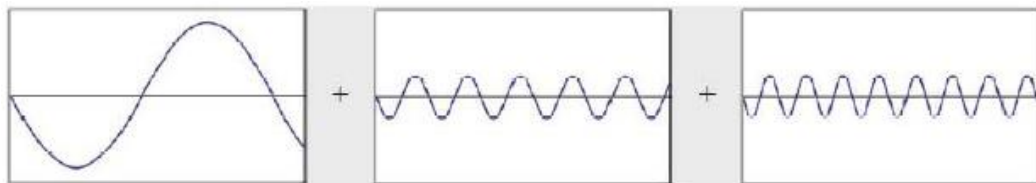
Figura 3 - 3: Exemplo de flutuação de tensão



Fonte: Rocha (2016)

- II. Harmônicas: a presença de harmônicas na rede significa que existem ondas com frequências múltiplas da fundamental decorrentes da distorção da corrente ou tensão. Elas aparecem na rede quando há variação na potência gerada, bastante comum na geração fotovoltaica e na eólica com turbina de velocidade variável. A presença das harmônicas aumenta as perdas do sistema como um todo.

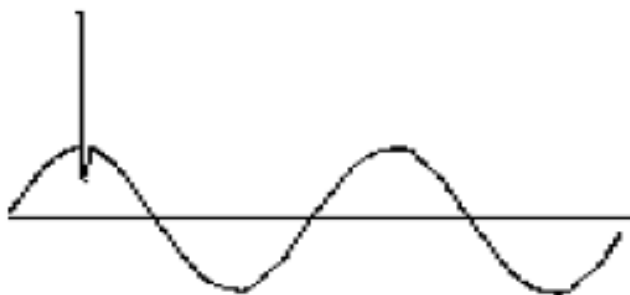
Figura 3 - 4: Exemplo de onda fundamental e componentes harmônicos



Fonte: Rocha (2016)

- III. Transitórios: os transitórios são perturbações nas ondas de tensão e/ou corrente cuja origem pode ser por efeito de descargas atmosféricas ou então chaveamento ou energização de grandes cargas. Quando há uma calmaria nos ventos ou então há a presença de nuvem muito grande sobre as placas fotovoltaicas, a geração destas usinas cai a patamares mínimos, podendo levar a geração a zero. Nesses casos, quando os níveis de geração são retomados, há um pico na corrente inicial, causando distúrbios na nos equipamentos mais sensíveis da rede.

Figura 3 - 5: Exemplo de transitório



Fonte: Rocha (2016)

### 3.1.5 Controle de Frequência e Tensão

Das grandezas elétricas presentes em um sistema, os principais parâmetros são a frequência e tensão. A frequência é a mais dependente do sistema de geração e a mais sensível às suas variações, pois sua variação está relacionada com o equilíbrio entre a geração e consumo, considerando as perdas do sistema elétrico.

O equilíbrio entre demanda e consumo no sistema elétrico é garantido através do controle na geração, quando há queda da frequência no sistema, as matrizes geradoras variam a potência gerada para manter a frequência em seu valor nominal. Esse controle é feito automaticamente pelo sistema.

Segundo Almeida (2017), o SIN suporta um patamar de variação entre demanda e consumo superior a 50% para o desligamento dos geradores. Quando há uma alta penetrabilidade das fontes renováveis intermitentes, o sistema elétrico precisa estar preparado, pois as suas flutuações típicas destas fontes são somadas às variações típicas de carga do sistema.

A geração eólica, segundo Rampinelli e Rosa Junior (2012), pode variar entre 10% e 15% da potência gerada, mesmo em operações normais e dependendo das condições climáticas, como uma calmaria repentina nos ventos, essa variação pode ser abrupta, defasando a geração e o consumo. Quando esta defasagem ocorre, ela pode ser resolvida de dois métodos diferentes:

- Variação da velocidade nominal dos aerogeradores: só é possível em máquinas de velocidade variável. Neste método é possível variar a velocidade de rotação dos aerogeradores de forma a equilibrar a geração com o consumo. A maior dificuldade da aplicação deste método é a possibilidade de ocorrer alguma variação brusca nos ventos e desequilibrar o sistema.
- Regulação da variação da frequência através da operação dos aerogeradores: essa regulação secundária tem como objetivo equilibrar a carga e demanda, ajustando a geração dos aerogeradores automaticamente de forma similar que acontece com as fontes despacháveis de energia.

O controle de tensão é realizado de forma local, nos próprios nós ou em sua vizinhança. Essa diferença ocorre pela corrente elétrica que circula entre dois nós. O controle de tensão é realizado pela capacitância, reatância e indutância resultante dos equipamentos interligado na própria rede. (RAMPINELLI e ROSA JUNIOR, 2012)

As fontes renováveis intermitentes interferem no trânsito da energia elétrica, devido às flutuações características da geração, afetando as tensões nos nós que são monitorados e

controlados pelas centrais de fontes despacháveis. Desta forma, essas flutuações são detectadas e logo supridas pelo sistema elétrico para níveis aceitáveis de tensão.

Portanto, as redes de transmissão nas quais usinas fotovoltaicas e eólicas forem ligadas, precisam ser robustas e de grande porte, pois essas redes estão mais preparadas para lidar com esse tipo de intermitência e compensar os impactos causados por essas fontes, garantindo que o sistema opere com níveis aceitáveis de tensão e frequência.

### **3.1.6 Impactos nas Redes de Distribuição**

O controle da variação de tensão, transitórios e harmônicos na rede é realizado através de ajustes na relação de transformação dos transformadores e equipamentos para consumo ou produção de potência reativa.

Com a expansão das renováveis intermitentes, o controle de tensão, normalmente realizado pelas redes de transmissão, acabam transferindo parte desta influência para as redes de distribuição. Desta forma, a estabilidade do sistema como um todo é prejudicada, pois a influência das fontes convencionais despacháveis é reduzida, dificultando ainda mais o controle do sistema. (RAMPINELLI e ROSA JUNIOR, 2012)

A geração de energia através de fontes fotovoltaicas e eólica, como abordado anteriormente, não são previsíveis e variam conforme a disponibilidade dos recursos naturais, portanto em momentos que é necessário controlar os parâmetros de qualidade de energia ou simplesmente atender a um pico de demanda, a potência proveniente destas fontes pode não estar disponíveis.

O controle de tensão do sistema elétrico, normalmente é realizado pelos geradores presentes nas redes de transmissão, mas o mesmo não ocorre nas redes de distribuição já que possuem menor capacidade de variação da potência reativa gerada (RAMPINELLI e ROSA JUNIOR, 2012). Esse motivo deve ser levado em consideração no planejamento, principalmente, de sistemas isolados que terão ainda mais dificuldades no controle de tensão e corrente, dificultando a garantia de uma energia elétrica de qualidade para os seus consumidores.

Com o objetivo de garantir a confiabilidade, estabilidade e qualidade do sistema devem ser estudadas maneiras de controle de tensão, corrente e frequência através de equipamentos para esse fim, como reguladores de energia, bancos de capacitores, além de um sistema de monitoramento mais sensível às variações. Logo, a inclusão destes novos equipamentos, as redes de distribuição devem receber maiores investimentos em sistemas com alta penetrabilidade de fontes renováveis intermitentes, além de possuir maior complexidade de controle, proteção e manutenção.

### 3.2 INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES

Cada vez mais fontes renováveis intermitentes ganharão importância dada a necessidade crescente dos mercados por uma energia limpa e com impactos ambientais reduzidos. Apesar dos desafios encontrados para inserção dessas fontes nos sistemas elétricos, há meios para preparar os sistemas para que a integração seja feita e ainda garantindo a estabilidade e confiabilidade dos locais que elas tiverem maior destaque.

Assim, serão apresentadas e discutidas a flexibilidade da geração, as medidas operacionais necessárias, métodos para o planejamento do sistema de transmissão e o dimensionamento da reserva operativa e como são utilizados como aliados no processo de integração destas fontes.

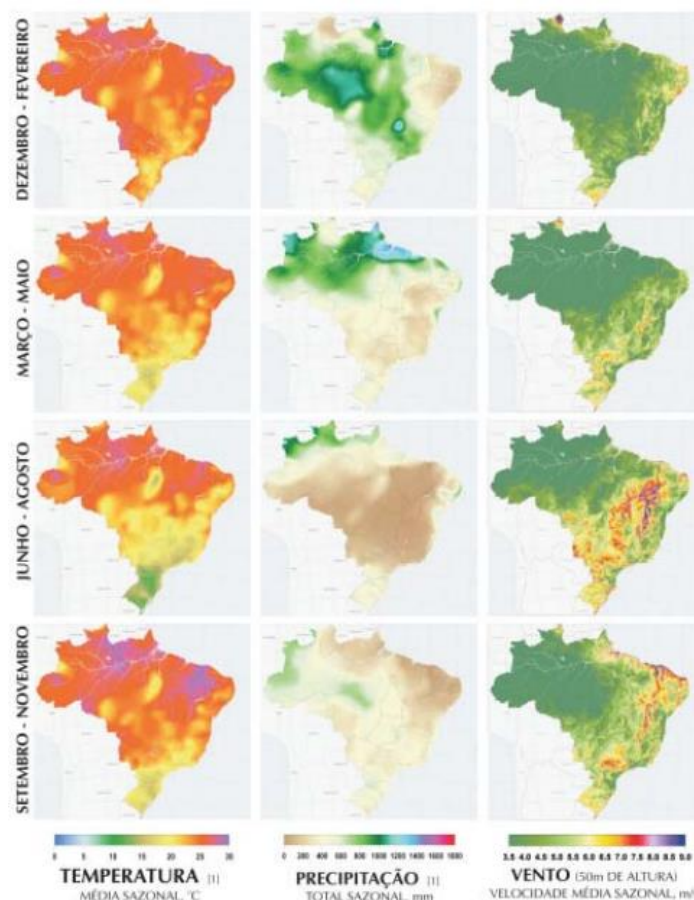
#### 3.2.1 Complementaridade da Geração

É possível estimar o comportamento dos recursos naturais ao longo do ano, apesar de ser mais complexo garantir a sua previsibilidade por dia. A seguir será discutido a complementaridade entre as fontes eólica e hidráulica e eólica e solar e como a combinação das fontes poderá auxiliar o sistema elétrico e aumentar a sua confiabilidade.

### 3.2.1.1 Geração complementar: eólica e hidráulica

No Brasil existe uma complementaridade entre os regimes hidrológicos e eólicos, conforme figura 3-6.

Figura 3 - 6: Complementaridade entre precipitação e vento no Brasil



Fonte: Lopes (2013)

Em linhas gerais, nos meses de dezembro a maio, há a maior quantidade de precipitação na maior parte dos estados brasileiros, principalmente nos estados do Norte, Centro Oeste e Sudeste. Nestes meses citados, os ventos estão com velocidades bastante baixas. Nos meses de junho a novembro há ventos com maior velocidade nas regiões Nordeste e Sul e nestes meses apresentam as menores taxas de precipitação nos estados brasileiros.



Figura 3 - 8: Distribuição das usinas eólicas existentes no Brasil



Fonte: EPE (2018)

Portanto, como visto anteriormente, é possível constatar a complementaridade da sazonalidade destas fontes, pois quando há ventos mais fortes, o volume de precipitação é mais baixo e quando há maior precipitação, os ventos são mais lentos.

Apesar das usinas eólicas e hidrelétricas não estarem localizadas na mesma região geográfica, a interligação do SIN permite o intercâmbio de energia ao longo do ano. Na região Sul, há complementaridade da geração hidrelétrica e eólica, pois a região é geradora de ambas as fontes, garantindo um aumento da potência gerada na região e maior capacidade de atender o SEB de forma confiável.

Portanto, há aumento da confiabilidade dos sistemas quando há grande presença de ambas as fontes no sistema, pois quando há maior velocidade de ventos e, consequentemente, maior geração eólica, é possível priorizar o seu despacho no sistema. Desta forma, é possível poupar o volume dos reservatórios e usá-los nos momentos de maior flutuação da geração eólica, de forma a amenizar o seu impacto no sistema. Assim, quando houver maior volume



de precipitações e consequentemente encher os reservatórios, usar a fonte hidráulica como prioridade no despacho de energia.

### 3.2.1.2 Geração complementar: eólica e solar

A fonte eólica e solar também são fontes complementares de geração de energia elétrica. A figura 3-9 apresenta a localização das usinas fotovoltaicas existentes no Brasil. As usinas, estão localizadas em maior parte na região Sudeste, Sul e Nordeste.

Figura 3 - 9: Distribuição das usinas fotovoltaicas existentes no Brasil

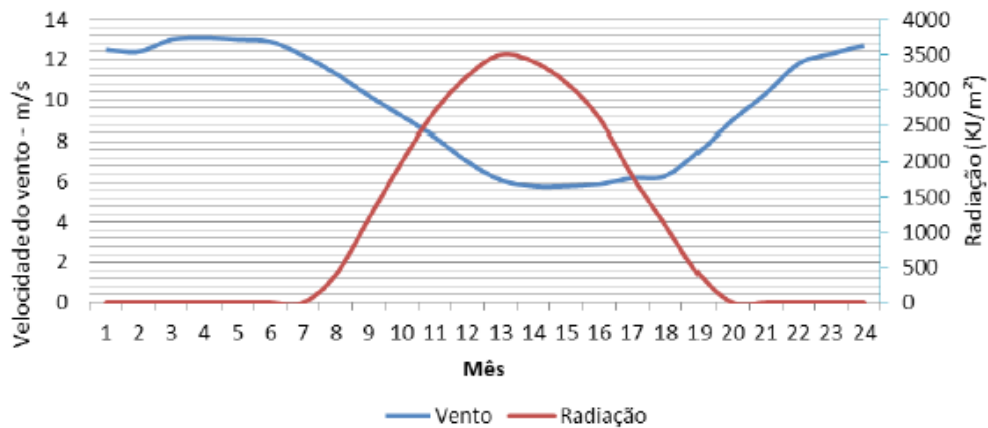


Fonte: EPE (2018)

A radiação solar é bastante previsível ao longo do dia, é crescente até atingir o seu pico ao meio dia e depois decresce até o final da tarde. A produção de energia pode flutuar ao longo do dia devido ao índice de nebulosidade que possui grande variação. A velocidade dos ventos segue a tendência de ser menor próximo ao meio dia e ser maior no final da tarde até o

início da manhã, conforme representado na figura 3-10 de forma ideal. (RAMPINELLI e ROSA JUNIOR, 2012)

Figura 3 - 10: Complementaridade ideal entre solar e eólica



Fonte: RAMPINELLI e ROSA JUNIOR (2012)

Como a velocidade do vento e a radiação solar são recursos naturais que possuem sazonalidade inversa, seu uso em conjunto é favorecido. O uso combinado destas fontes contribui com a confiabilidade do sistema elétrico, pois quando não haveria geração fotovoltaica no período noturno, a eólica garante que a energia elétrica esteja disponível no sistema em todas as horas do dia. Porém, devido a sua intermitência, a combinação destas fontes ainda está sujeita a flutuações ao longo do dia, sendo necessária a presença de fontes despacháveis no sistema para os momentos que há flutuações na geração.

### 3.2.2 Planejamento da Expansão da Transmissão

O planejamento da expansão da transmissão (PET) tem como objetivo definir a localização, quantidade e tempo de implantação de novos reforços na rede de transmissão. Além de definir os parâmetros técnicos do sistema de transmissão, também é necessário dimensionar os investimentos, de forma a garantir o melhor atendimento do sistema com o

menor custo possível. Um sistema com alta penetrabilidade de energias renováveis possui maiores desafios em seu planejamento já que são fontes com um alto grau de incerteza quanto à disponibilidade de energia. (FLÁVIO, 2015)

A expansão da transmissão, assim como da geração de energia elétrica de um determinado sistema, deve ser estudada de forma a propor a solução de maior qualidade e que atenda às necessidades futuras dos sistemas. Segundo Flávio (2015), para realizar o planejamento adequado do sistema de transmissão quando a geração é composta em sua maioria de fontes despacháveis de energia, é necessário levar em consideração a topologia do ano base, os circuitos de interesse para a inserção das novas usinas ou os que precisam de reforços, as previsões de demanda e oferta de energia para o ano base e, por fim, as restrições de investimento. Quando há a previsão de inserção de fontes renováveis no sistema, é necessário levar em consideração às incertezas quanto a disponibilidade de energia destas fontes.

O PET pode ser classificado quanto a necessidade do sistema. Os planejamentos de curto e médio prazo não possuem tempo para a execução de grandes obras, eles têm como objetivo ajuste das necessidades do sistema, principalmente quanto à instalação de novos equipamentos para ajuste da tensão ou potência gerada no sistema. Já a longo prazo, os horizontes são bem maiores e já conseguem prever a execução de grandes obras, os objetivos são quanto ao atendimento do crescimento da demanda, mudanças no mercado de energia e inserção de novas fontes. No Brasil, o planejamento a longo prazo é feito num horizonte de 10 anos pelo PD elaborado pela EPE.

O PET deve levar em consideração as incertezas quanto a disponibilidade dos equipamentos internos e sua taxa de falha, além das incertezas já citadas quanto a disponibilidade dos recursos naturais para as fontes renováveis, intermitentes ou despacháveis.

As usinas estão distribuídas no sistema, podendo estar próximas ou não do consumo. Usinas como as térmicas a gás ou nucleares possuem maior flexibilidade de instalação, pois podem estar localizadas próximo aos centros de carga, diferentemente de fontes que dependem de recursos naturais e sua disponibilidade para serem instaladas. Em regiões em

que há falta de infraestrutura elétrica para o atendimento das cargas, é necessário avaliar os investimentos em deixar a carga isolada do sistema ou então interligá-la.

O aumento das fontes intermitentes aumenta a complexidade operacional e incertezas do sistema elétrico como um todo. Essas fontes são instaladas em locais nos quais são mais favoráveis à fonte de energia explorada e desta forma acabam se concentrando em uma determinada região geográfica, como por exemplo as eólicas nas regiões Nordeste e Sul do Brasil. Como estas cargas estão distantes dos centros de consumo há um congestionamento das redes de transmissão da região.

Segundo Flávio (2015), o SEB suporta 140 GW de potência eólica instalada, usando apenas a geração hidráulica para compensar as flutuações da fonte. Como as usinas de fonte hidráulica estão distantes geograficamente das de fonte eólica, o impacto desta geração recai no sistema de transmissão interligado. A abordagem tradicional da operação do sistema de transmissão deve ser revista de forma a se tornar mais flexível. Linhas de transmissão com operação flexível permite o atendimento da carga quando a geração intermitente quando a oferta de energia está elevada e também o atendimento por outras fontes de energia quando a oferta está reduzida.

As metodologias de análise da confiabilidade do PET são de caráter determinísticas ou probabilísticas. Os meios determinísticos permitem que o planejamento do sistema seja realizado em cenários, severos ou não, levando em consideração falhas de equipamentos, carga de pico ou saída de uma unidade geradora de grande porte, porém sem levar em consideração a aleatoriedade das variáveis do sistema. Já as probabilísticas consideram, de modo geral, o risco de o sistema elétrico não atender à demanda em um determinado instante, levando em consideração as características do sistema. (FLÁVIO, 2015)

Atualmente as análises de confiabilidade são de caráter determinístico, porém com o avanço das renováveis é necessária uma mudança, passando a ter um caráter probabilístico devido à característica da carga, sendo capaz de estimar o impacto da volatilidade destas fontes no sistema elétrico.

### 3.2.3 Dimensionamento da reserva operativa

Juntamente com o PET, também é necessário o planejamento da reserva operativa do sistema, ou seja, a quantidade de energia disponível para atender às variações do sistema, tanto em caso de imprevisibilidades na oferta quanto em variações na demanda. Quando há grande penetrabilidade de fontes renováveis intermitentes, o dimensionamento da reserva operativa deve-se levar em consideração o atendimento às flutuações destas fontes. De modo geral, devido às flutuações, a geração eólica utiliza a reserva operativa na escala de minutos ou horas, enquanto a solar a utiliza na escala de minutos. (TOLMASQUIM, 2017)

A inserção das fontes renováveis intermitentes de energia no sistema elétrico aumenta a necessidade de um maior planejamento e um gerenciamento mais eficiente da reserva operativa para a garantia de um sistema com alto grau de confiabilidade. Segundo Tolmasquim (2017), existem alternativas para garantir o equilíbrio do sistema:

- Com o gerenciamento dinâmico da reserva, ela é dimensionada em função da carga do sistema e também a geração variável do sistema, ou seja, o sistema fica pronto para atender também as flutuações das fontes renováveis, despacháveis ou intermitentes.
- O intercâmbio de energia entre subsistemas do sistema elétrico permite o melhor aproveitamento da complementaridade das fontes.

Atualmente no Brasil, o sistema de transmissão ainda possui o modelo tradicional e as redes inteligentes ainda estão nas esferas teóricas ou em fase de testes, portanto a inserção das fontes intermitentes ainda é dependente da geração de energia através de fontes despacháveis e da interligação dos subsistemas.

No Brasil, a expansão das fontes despacháveis capazes de garantir a estabilidade do sistema dá-se por meio da construção de novas usinas termelétricas, pois são mais compactas e com menor investimento de implantação e conexão ao SIN devido a sua proximidade com a demanda. A quantidade de usinas hidrelétricas com reservatório possui poucas possibilidades de expansão devido às questões ambientais, restringindo o seu uso como fonte despachável de energia. (GIANELLONI e CÂMARA, 2016)

Portanto, a interligação dos subsistemas é o pilar mais importante para a flexibilidade de operação do SEB e para o gerenciamento da reserva operativa, pois é possível usar a complementaridade das fontes renováveis, não só para gerar energia elétrica para o SIN, mas também permitir que estas fontes sejam usadas como energia de reserva. Como por exemplo interligando a geração eólica do Nordeste com a hidráulica do Sudeste cujos recursos naturais se complementam.

### **3.2.4 Dimensionamento da Reserva de Potência Operativa Considerando a Influência da Geração Eólica**

Das fontes intermitentes, a eólica é a que possui maior destaque na matriz elétrica brasileira, portanto é a que maior impacta no SIN. Atualmente a reserva de potência operativa (RPO) é 5% da carga gerada no SIN (ONS, 2016). Com o aumento da participação desta fonte, foi necessário redefinir a reserva operativa considerando a influência da geração eólica. Segundo o ONS (2016), são três vetores que motivaram as mudanças da reserva operativa:

- Reserva operativa convencional: não consideram um sistema com alta flutuação na geração ou geração com alta probabilidade de perda de geradores.
- Programação de geração do SIN: atualmente é realizada a cada 30 minutos, caso mantido o tempo de atuação será necessário uma parcela adicional para atender à variabilidade da geração eólica.
- Desvios de geração: os grandes desvios devem ser avaliados no sistema, pois normalmente são maiores do que os de previsão de carga.

O cálculo da RPO do sistema elétrico leva em consideração, principalmente, o montante de energia de fonte intermitente, pois quanto menor for a sua participação no sistema, maior será o volume de energia de fonte despachável no sistema para o atendimento da demanda do sistema. Com o crescimento da presença da fonte eólica no SIN, quanto menor for o seu fator de capacidade que depende das condições dos ventos no local, maior será o volume da reserva operativa que é calculado probabilisticamente.

Dentre os fatores considerados no cálculo da reserva operativa é a variabilidade das fontes geradoras presentes no sistema e no caso do SEB, essa reserva é calculada em intervalos de 30 minutos. Quando há a inserção de uma fonte intermitente, é necessário levar em consideração as variações instantâneas, portanto uma reserva adicional deve ser estimada para atender às flutuações ao longo dos 30 minutos. (ONS, 2016)

Sob o ponto de vista das outras cargas do sistema elétrico, as usinas eólicas se comportam como carga negativa, pois quando elas decaem, as demais usinas precisam suprir essa geração no sistema, ou seja, para toda nova usina de fonte despachável no SIN deve-se considerar uma parcela adicional de geração de determinadas usinas para suprir a reserva de potência de forma a atender as variações instantâneas naturais de geração eólica. Conforme a ONS (2016), para essas usinas selecionadas, é necessário um volume em média de 2,5% da carga da área de controle para suprir as flutuações de geração e mais 1,5% para suprir as variações provenientes da fonte eólica.

Nos intervalos de geração, o ONS (2016) possui como meta um desvio máximo de 20%, porém são necessários diversos aperfeiçoamentos nos processos de previsão de geração eólica, levando em consideração as reservas girantes das usinas hidráulicas e térmica, intercâmbio de energia entre os sistemas e o quão favoráveis são as condições hidrológicas.

A tarefa do dimensionamento da reserva de potência operativa com o crescimento da geração intermitente, principalmente com o crescimento iminente das fontes eólicas, representa um grande desafio para os operadores do sistema elétrico. Muitas destas análises é realizada com complexas previsões probabilísticas nas quais a intermitência das fontes só dificulta ainda mais as análises feitas, desta forma, essas fontes devem ser inseridas no sistema de forma planejada para a garantia da confiabilidade e boa operação do SIN.

### **3.2.5 Medidas Operacionais para a Flexibilização do Sistema**

Existem diversas medidas operacionais que podem tomadas para auxiliar na integração das fontes renováveis intermitentes e garantir a confiabilidade do sistema elétrico. A seguir serão abordadas as algumas medidas de integração das fontes.

### **3.2.5.1 Redução do Tempo de Despacho e Maior Previsão do Perfil de Geração**

Muitas vezes para prevenir falhas no sistema elétrico, as usinas despacháveis são despachadas antes do necessário e a energia de reserva é utilizada antes do necessário. Como por exemplo em sistemas com alta penetrabilidade de fontes renováveis intermitentes e a tentativa de prever a real necessidade do sistema, porém, em muitos casos, é difícil antecipar com precisão o comportamento dos recursos naturais em um curto espaço de tempo.

A redução do intervalo de despacho permite uma melhor leitura da real necessidade de despacho das usinas, garantindo uma melhor eficiência do sistema. Quando ocorre o despacho prévio, o sistema de reserva é comprometido para o atendimento de uma determinada carga, ficando indisponível para o balanço entre a geração e o consumo, prejudicando assim a confiabilidade do sistema. (TOLMASQUIM, 2017)

A previsão do perfil de geração permite um planejamento mais eficiente do sistema elétrico, beneficiando a inserção das fontes renováveis intermitentes, pois permite um planejamento mais preciso do uso da reserva operativa do sistema, melhorando a utilização dos recursos disponíveis e, conseqüentemente, reduzindo custos. A seguir estão relacionadas algumas das medidas que podem ser aplicadas para a melhoria da previsibilidade de recursos intermitentes (TOLMASQUIM, 2017):

- Aperfeiçoamento de modelos e dados para melhor conhecimento dos recursos naturais disponíveis.
- Colaboração entre todos os setores para a coleta e processamento de dados em tempo real e séries históricas. Além da disponibilização dos mesmos publicamente para uso em estudos e na operação dos sistemas.
- Previsão das usinas em cada nó de entrega para melhoria no gerenciamento da transmissão, apesar das dificuldades em prever a variabilidade dos recursos intermitentes.
- Realização de previsões probabilísticas, auxiliando o operador a identificar os riscos de ocorrência de eventos extremos e avaliar os riscos inerentes a cada decisão de operação.



Com a maior participação das fontes intermitentes é de extrema importância investimentos de estações meteorológicas para a medição dos recursos solar e eólico nos locais de mais interesse para a instalação de usinas. Com a maior disponibilidade de dados reais é possível planejar o sistema elétrico como um todo para lidar com os impactos provenientes das flutuações inerentes às fontes intermitentes.

Portanto, uma redução do tempo de despacho em conjunto com uma previsão mais exata do perfil de geração é fundamental para uma aproximação dos níveis de carga e geração, permitindo uma preservação maior da reserva operativa e, conseqüentemente, o sistema elétrico se torna mais seguro e confiável.

#### **3.2.5.2 Infraestrutura de Rede de Transmissão e Distribuição**

A infraestrutura de rede, com destaque para as redes de transmissão e geração, é fundamental para a garantia de um sistema elétrico de alta confiabilidade. Conforme abordado no capítulo 3.2.1, as fontes eólica e hidráulica e eólica e solar são complementares, então um maior investimento para a construção de redes das redes permitem explorar essa sazonalidade.

A interconexão das usinas do setor elétrico com a carga, garantem uma maior correção das falhas. Desta forma o sistema trabalha com redundâncias para o atendimento das cargas, ou seja, quando há a necessidade do uso da energia de reserva em algum ponto do sistema, ele age rapidamente para a correção da falha. A medida que as energias renováveis intermitentes ganham destaque na matriz elétrica e, conseqüentemente, as suas flutuações de geração se tornam mais evidentes, a interligação do sistema consegue suprir essas necessidades pontuais de equilíbrio. (GIANELLONI e CÂMARA, 2016)

A expansão da infraestrutura contribui com interconexão dos subsistemas, melhor gestão dos recursos e redução de riscos operacionais, além de permitir uma maior participação das renováveis intermitentes no sistema.

#### **4. ESTUDOS DE CASOS DE SISTEMAS COM ALTA PENETRABILIDADE DE ENERGIAS RENOVÁVEIS INTERMITENTES**

Com o avanço da participação das fontes renováveis intermitentes nas matrizes elétricas do mundo, as flutuações características destas fontes são preocupações reais para os sistemas nos quais elas são inseridas. Desta forma, estudos são realizados com objetivo de preparar melhor os sistemas nos quais estas fontes terão maior participação.

Sua importância consiste tanto no levantamento das características principais do vento e irradiância local, quanto em estudos dos regimes dos ventos e nuvens, em ambos os casos garantem maior previsibilidade dos recursos natura e por consequência garantem um sistema mais confiável.

As rampas de geração são as variações nos níveis de potência gerada devido às flutuações climáticas ocorridas devido à calmaria nos ventos ou nuvens passantes que interferem na geração eólica e solar, respectivamente. Os locais com alta penetrabilidade de fontes renováveis intermitentes são as que mais sofrem as consequências desse tipo de geração.

A seguir serão apresentados estudos teóricos e registros reais do comportamento dos sistemas elétricos que possuem alta penetrabilidade das fontes renováveis intermitentes, tanto solar fotovoltaica quanto eólica e estão sujeitos às flutuações relativas às fontes. Tais estudos e registros são fundamentais para a implantação de usinas mais estáveis e com mais eficientes na produção de energia elétrica nos sistemas nos quais serão inseridos.

##### **4.1 Energia solar fotovoltaica**

Como citado anteriormente, as flutuações na geração fotovoltaica são geradas a partir de nuvens passantes que diminuem momentaneamente a irradiância solar incidente nos painéis solares, independentemente da localização. As condições climáticas normalmente consideradas nos estudos consiste em dias ensolarados com pouca ou nenhuma nuvem, dias com nuvens esparsas ou dias totalmente nublados.

Desta forma, serão abordados os principais efeitos encontrados em estudos e em casos reais nos quais houveram impactos na geração devido às nuvens passantes.

#### **4.1.1 África do Sul**

Conforme Suri, et al. (2014), três principais aspectos foram levados em consideração nos estudos relativos aos impactos encontrados pelas nuvens passantes na África do Sul, um dos maiores produtores de energia solar fotovoltaica no continente africano:

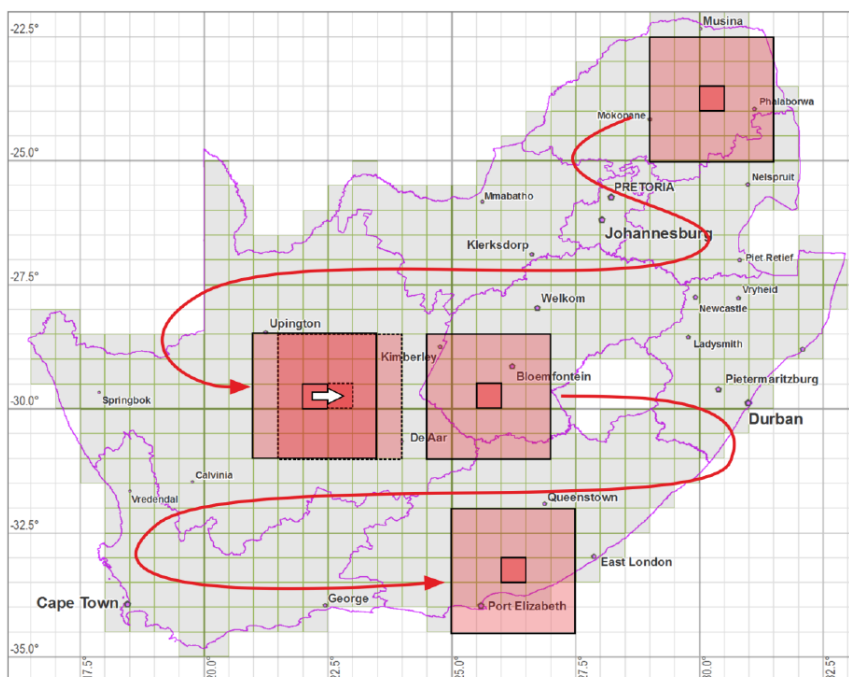
- i. Valores de geração fotovoltaica em 15 minutos: ocorrência estatística e física do perfil de geração a qualquer momento do dia.
- ii. Variações em intervalos de 15 minutos: frequência e magnitude de variações ou rampas de geração em 15 minutos.
- iii. Montante diário de ocorrências: ocorrência e estabilidade de três tipos de tempo em um dia: nublado, ensolarado sem nuvens e com nuvens esparsas.

Na África do Sul, os dias são predominantemente ensolarados e com poucas nuvens, mas as regiões Leste e Sudeste possuem maior influências das nuvens, com cerca de 120 dias ao ano com essas condições climáticas.

Nos estudos desenvolvidos, foram levados em consideração as configurações dos sistemas fotovoltaicos e das condições climáticas existentes. Desta forma, foi verificado que para grandes usinas ou conjuntos de usinas que possuem acima de 25 MW instalados, as variações inferiores a 1 minuto são absorvidas pela rede, enquanto as variações de 15 minutos são apresentam resultados significativos na potência gerada.

Na figura 4 – 1 estão destacadas as áreas consideradas no estudo, sendo as regiões que sofrem as maiores mudanças climáticas são Upington e Durban.

Figura 4 - 1: Regiões consideradas no estudo



Fonte: Suri, et al. (2014)

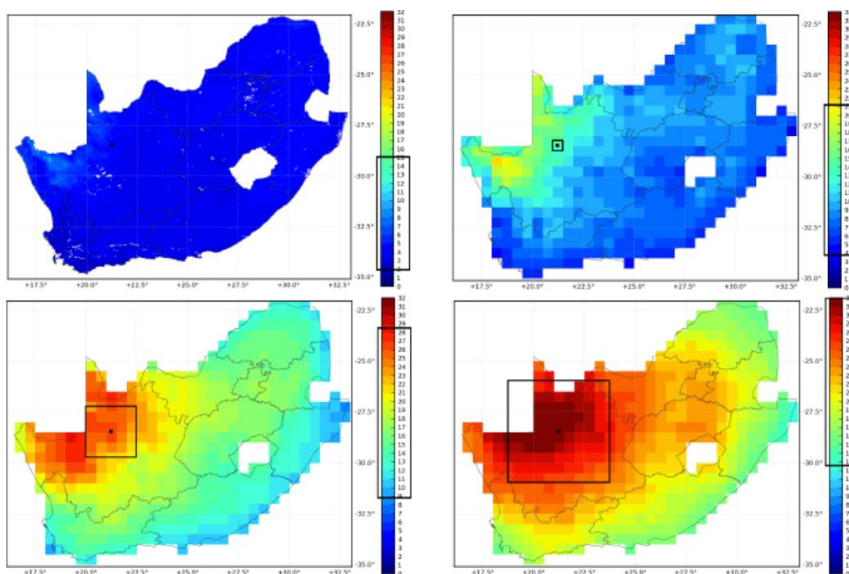
Em todo o país, quando há a ocorrência de dias totalmente nublados, a produção dos painéis fotovoltaicos chega de 2% a 15% da capacidade instalada nominal, variando conforme a região na qual se encontra. A exceção encontra-se nos meses de julho a setembro, principalmente na região da Cidade do Cabo, onde os níveis de produção nas condições citadas fica entre 30% e 50% da capacidade instalada.

Para dias ensolarados e sem nuvens, a maior produção ocorre ao meio dia com geração entre 78% e 92%, com destaque para as regiões montanhosas nos meses de março a setembro, enquanto os níveis mais baixos, no mesmo período, também ocorrem próximos à região nordeste da África do Sul.

No geral, pode-se observar que quando há um número maior de plantas fotovoltaicas numa determinada região, há uma estabilidade maior no sistema, pois os componentes determinísticos, tais como o movimento do sol, prevalecem aos componentes estocásticos como as nuvens passantes.

Como é possível verificar na Figura 4 – 2, quanto maior é a área, maior é a produção geral, pois no caso da África do Sul, há grande variabilidade de terrenos e climas ao longo do território. Desta forma, um sistema mais confiável e menos suscetível é garantido.

Figura 4 - 2: produção de energia a partir de usinas fotovoltaicas combinadas ao meio dia



Fonte: Suri, et al. (2014)

Em dias nublados, em intervalos de 15 minutos, podem causar rampas de variação da produção de energia elétrica de cerca de 40%, podendo até chegar aos 80% de variação. Nas regiões maiores que possuem maior número de usinas fotovoltaicas, as quedas de geração podem ser mitigadas, podendo ser reduzida para 24%.

Portanto, um número maior de usinas distribuídas em uma grande área garante uma maior estabilidade ao sistema elétrico como um todo, pois os valores mínimos de geração de energia elétrica são maiores, com rampas de geração menores e mais sutis e com riscos mitigados pela região. Desta forma, um sistema com maior estabilidade e confiabilidade é garantido.

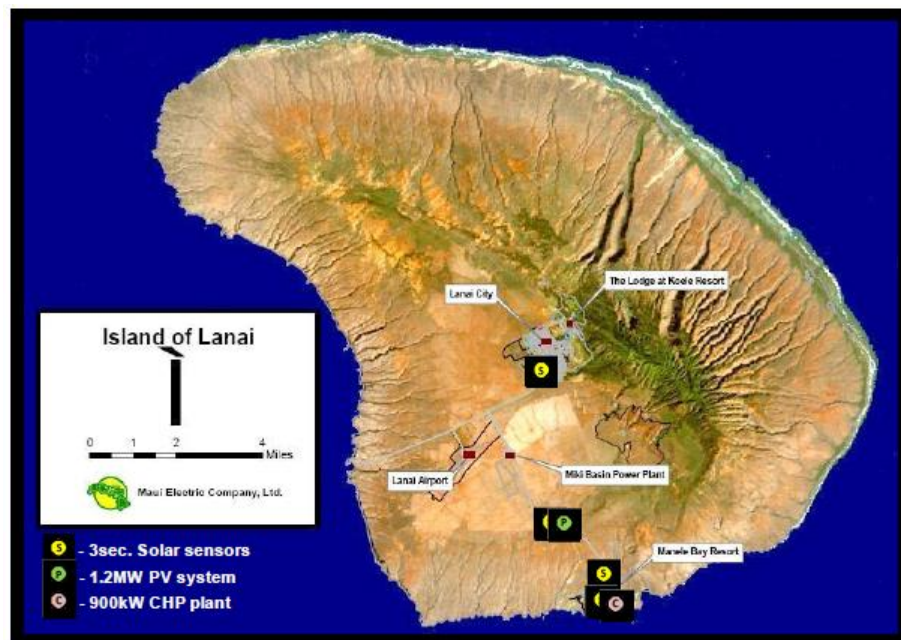
#### 4.1.2 Ilha Lanai, Havaí

No estudo de Sengupta e Keller (2011) apresenta os desafios da geração solar fotovoltaica na ilha de Lanai, Havaí e por se tratar de uma ilha com dimensões reduzidas, as rampas nos níveis de geração causados pelas nuvens passantes têm um impacto muito maior no sistema elétrico de uma ilha com grandes variações climáticas.

Lanai, uma das ilhas que compõe o estado americano do Havaí, possui o sistema elétrico baseado em geradores a diesel e recentemente que foi iniciado o planejamento e instalação de painéis fotovoltaicos na ilha com o objetivo de se obter uma matriz elétrica limpa e renovável. A ilha precisou contar com um banco de baterias para mitigar os impactos das flutuações inerentes à fonte.

Para que a geração fotovoltaica aumentasse na ilha o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) iniciou forte estudo na ilha, com monitoramento de quatro pontos de medição para a coleta de dados de irradiância solar, conforme figura 4 – 3.

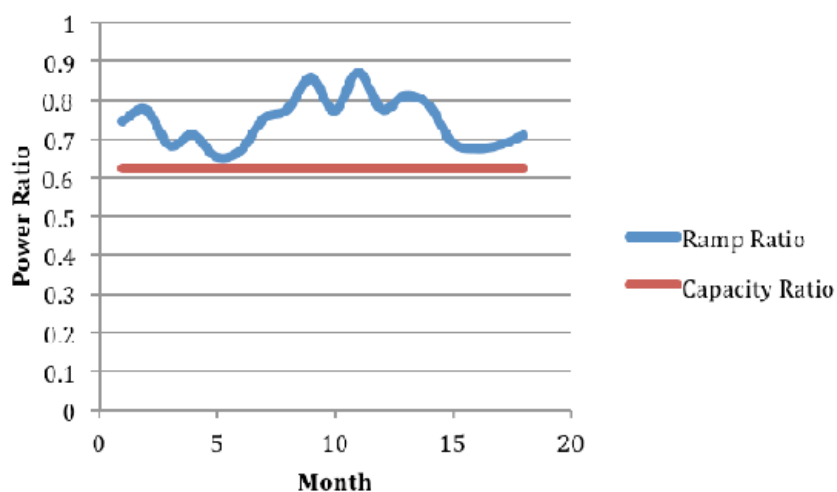
Figura 4 - 3: localização dos quatro locais de medição



Fonte: Sengupta e Keller (2011)

Nos resultados obtidos, foi verificado que a geração na ilha ficou por volta de 62,5% da capacidade instalada ao longo do ano, atingindo valores superiores apenas nos meses de verão em julho e agosto. Como pode-se verificar na figura 4 – 4, há uma grande variação na geração fotovoltaica na ilha ao longo do ano. Essa rampa de geração é esperada devido à localização geográfica da ilha com grande formação de nuvens ao longo do ano.

Figura 4 - 4: Comparação entre capacidade instalada (vermelho) e geração medida (azul) ao longo do ano



Fonte: Sengupta e Keller (2011)

No caso de Lanai, as mudanças climáticas são maiores nos meses de inverno, causando assim uma maior variação na produção de energia elétrica, enquanto nos meses de verão as condições climáticas são mais estáveis ao longo da ilha. Ao longo de seu território, é possível verificar que há redução da rampa de geração devido a distribuição e, conseqüentemente, influência das nuvens na geração fotovoltaica.

Portanto, apesar das grandes variações na geração ao longo do ano, é possível mitigar esses impactos distribuindo os painéis fotovoltaicos ao longo do território para um melhor aproveitamento dos recursos naturais disponíveis e também minimizar as rampas de geração. Assim, o planejamento do sistema elétrico e o conhecimento do local torna-se fundamental para um sistema com maior estabilidade e confiabilidade.

## 4.2 Energia eólica

No caso das usinas eólicas, as mudanças de velocidade nos ventos, ou até mesmo momentos de calmaria, impactam diretamente na geração eólica local originando grandes rampas de geração, tornando assim um grande desafio manter a estabilidade do sistema elétrico.

Serão apresentadas as diferenças encontradas em dois estudos que apresentam a importância da previsibilidade da direção e velocidade do vento para a geração eólica e as influências que as rampas de geração podem causar no sistema elétrico.

Com o aumento da participação das fontes eólicas nas matrizes elétricas ao redor do mundo, a previsibilidade dos ventos torna-se um ponto de extrema importância para o planejamento do sistema elétrico de um país e após instaladas, para a confiabilidade do sistema com o equilíbrio entre demanda e oferta de energia.

Conforme Couto (2013), no ano de 2013, a energia eólica em Portugal alcançou os 24% do total de energia da matriz elétrica do país, sendo a segunda maior da Europa, perdendo apenas para a Dinamarca com aproximadamente 42% de energia eólica em sua matriz (IRENA, 2017). Desta forma, a previsibilidade das condições atmosféricas em um horizonte de até 6 horas, além do diagnóstico correto para possíveis rampas de geração são estudos fundamentais para o bom funcionamento do sistema elétrico português.

Esse horizonte de 6 horas estabelecido por Couto (2013) permite uma estimativa média dos ventos de forma a contribuir para o gerenciamento do sistema elétrico, pois as rampas mais severas na geração em Portugal são variações médias de 40% no total de energia gerada, com detecção de cerca de 90%.

Segundo Potter (2006), no ano de 2006, a Tasmânia, ilha e estado da Austrália, possui um sistema elétrico independente, composto de 98,5% de fontes renováveis e com potencial de 50% de energia eólica. Com a aproximação de se interligar ao sistema elétrico australiano, a intermitência da fonte pode causar instabilidades tanto para a ilha, quanto para a parte continental do país. Desta forma, torna-se imprescindível uma previsibilidade muito maior da



característica dos ventos do local, com períodos de medição em intervalo muito curtos de poucos minutos.

As medições em poucos minutos, entre 2 e 3 minutos, proposta por Potter (2006) aumenta a precisão do sistema, reduzindo a porcentagem de erros em 30%. Esse ganho permite que as rampas de geração sejam detectadas em avanço e o sistema elétrico preparado para suprir essas necessidades.

Tanto em Couto (2013) quanto na Potter (2006), apresentam dois métodos de previsão utilizando de métodos numéricos e computacionais para a estimativa da direção e velocidade dos ventos, além de também se munir dos dados estatísticos computacionais. Apesar das diferenças geográfica, os sistemas com alta penetrabilidade de energia eólica, necessita da detecção de rampas na geração eólica é o seu controle e mitigação para garantir a estabilidade e flexibilidade de operação dos sistemas elétricos.

Segundo Kalantari (2010), um dos problemas causados pelo desencontro da demanda com a oferta de energia eólica é o horário da necessidade de energia no sistema, pois a energia pode ser gerada fora do horário de maior necessidade ou haver um momento de calmaria dos ventos no horário de pico de demanda. Desta forma, há a necessidade de maior planejamento e flexibilização da operação através do gerenciamento de possíveis rampas de energia detectados com horas de antecedência.

A medida que a participação da fonte eólica aumenta no sistema elétrico, a necessidade de dados estatísticos é cada vez maior para a estimativa das rampas de geração, tais como a sua duração e intensidade. A intensidade das rampas varia ao longo do dia, sendo necessário conhecer o local das usinas eólicas e as características climáticas da região para melhor utilização desta fonte. (KAMATH, 2010)

### 4.3 Inserção da energia intermitente no Brasil

Nos casos citados acima, pode-se perceber que a inserção das fontes intermitentes é possível, porém precisa ser planejada. Em países como a Dinamarca e Portugal que possuem cerca de 42% (IRENA, 2017) e 24% Couto (2013), respectivamente, de eólica em sua matriz elétrica a estabilidade das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica está relacionada com a previsibilidade dos ventos e o planejamento do sistema elétrico como um todo.

Na África do Sul e no Havaí, nos casos citados, a produção fotovoltaica é bastante significativa, a estabilidade do sistema é mais difícil de ser alcançada devido a intermitência típica da fonte. Essa instabilidade pode ser mitigada com o aumento da área utilizada para a geração de energia e assim como no caso da eólica, planejamento do sistema elétrico.

A energia fotovoltaica ainda não possui muita representatividade com apenas 0,6% da matriz elétrica do Brasil em 2017, porém a energia eólica já representa 7,9% da produção de energia do Brasil no mesmo ano (ONS, 2018). Conforme a ABEEólica (2018), a região brasileira com maior produção e consumo de energia eólica é o Nordeste com 84% da produção e em seu recorde de consumo de 70,45%. Desta forma, o Nordeste brasileiro é um sistema com grande penetrabilidade de energia eólica, tanto para consumo quanto para geração, conforme Tabela 4-1.

Tabela 4- 1: geração e representatividade da fonte eólica

Região	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	% de crescimento
		2016		2017	
Sudeste	0,07	0,2%	0,08	0,2%	13%
Sul	4,83	15,1%	5,84	14,4%	21%
Nordeste	21,17	84,7%	33,99	84,0%	25%
Norte	-	-	0,55	1,4%	-
Total	23,07	100,0%	40,46	100,0%	26,6%

Fonte: ABEEólica (2018)

Além de ser a região com maior presença das eólicas, também foi o que apresentou maior crescimento da fonte de 2017 para 2016, 25% de aumento da produção de energia. Essa concentração de fonte intermitente é um grande problema para a matriz elétrica brasileira, pois a região está sujeita a todos os desafios da inserção de fontes intermitentes abordados no capítulo 3.1 deste trabalho.

Com os dados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que é possível ter uma participação de 42% de eólica no sistema elétrico, porém esse número cai conforme aumenta a participação da fotovoltaica devido o seu alto grau de instabilidade ao longo do dia. O aumento da participação destas fontes demanda um grande planejamento do sistema como um todo, tanto a participação das fontes despacháveis para garantir a segurança e confiabilidade do sistema quanto das redes de transmissão para escoar a energia tanto gerada quanto a energia da reserva operativa para atender às rampas de geração típicas destas fontes.

O SEB por se tratar de um sistema interligado com alta participação grandes hidrelétricas com reservatório e térmicas, a concentração das eólicas na região Nordeste pouco impacta no sistema como um todo, pois existe energia despachável disponível no sistema para suprir as rampas de geração características da fonte.

Há também a necessidade do reforço das linhas de transmissão da região, conforme é visto nos últimos leilões de transmissão da ANEEL. Esse reforço contribui para a robustez necessária para o sistema, além de flexibilizá-lo conforme visto no item 3.2 deste trabalho.

A energia solar fotovoltaica, apesar de pouco presente na matriz elétrica, terá grande crescimento nos próximos anos, desta forma é o momento de planejar o sistema para receber mais uma fonte intermitente. Como visto nos casos estudados, o ideal é distribuir essa fonte ao longo do território brasileiro, evitando a região Nordeste que já possui uma alta penetrabilidade de fontes intermitentes.

Segundo a ABEEólica (2018) a região Sudeste possui uma baixa produção eólica, podendo ser uma boa alternativa para a instalação de usinas fotovoltaicas, seguindo já a mesma tendência atual, pois a maior parte destas usinas estão nesta região. Outra vantagem

em explorar o potencial solar da região Sudeste é a sua proximidade com a maior demanda e também com a maior rede de transmissão do Brasil.

Com a distribuição da produção de energia fotovoltaica é possível aproximar a geração da carga e assim reduzir os custos de transmissão para conectar a fonte com o consumo, tanto do uso das linhas de transmissão existentes quanto da necessidade de novas linhas, além de reduzir os impactos que grandes nuvens podem causar nas rampas de geração que ocorrem devido à intermitência desta fonte.

## 5. CONCLUSÕES

As fontes renováveis intermitentes estarão cada vez mais presentes nos sistemas elétricos, principalmente as fontes eólica e fotovoltaica. Porém a integração destas fontes deve ser feita de forma planejada para garantir o bom funcionamento dos sistemas e a entrega de uma energia de qualidade aos consumidores.

Por serem totalmente dependentes de recursos naturais, as variações da velocidade do vento e da irradiação solar ao longo do dia causam flutuações que precisam ser supridas pelas fontes despacháveis e o sistema elétrico como um todo. A localização das usinas de fonte intermitente, além da falta de previsibilidade dos recursos provocam grandes queda na qualidade de energia, dificuldades no controle de frequência e tensão, além de impactos nas redes de transmissão e distribuição.

Apesar dos desafios, quando bem planejada, a integração destas fontes garante um sistema confiável e com uma matriz elétrica limpa, com menor dependência de combustíveis fósseis. A integração das fontes renováveis, despacháveis ou não, geram uma complementaridade de geração benéfica ao sistema, pois enquanto há uma queda de produção de uma fonte, existe outra para suprir as necessidades da demanda. O planejamento a longo prazo consegue garantir que os sistemas de transmissão e geração estejam corretamente dimensionados para receber esse tipo de geração.

O sistema de geração precisa ser dimensionado de forma a garantir que as reservas operativas sejam suficientes para as variações típicas e também ter geração suficiente para as flutuações características das fontes. Já o sistema de transmissão precisa estar dimensionado para escoar a produção das fontes e também garantir que, quando haja flutuação na geração, ela seja atendida de forma rápida e segura, para isso as linhas de transmissão devem ter operação flexível para o atendimento do sistema.

Foram apresentados estudos de caso reais de sistemas com alta penetrabilidade das fontes intermitentes de energia e as consequências das flutuações causadas por calmarias nos ventos e também com a presença de nuvens passantes nas usinas eólicas e fotovoltaicas.

Para as fotovoltaicas, foram estudados os casos da África do Sul e da ilha de Lanai no Havaí, apesar das dimensões serem completamente diferentes, em ambos os casos se revelou a necessidade de um planejamento do sistema elétrico afim de mitigar os impactos das nuvens. A mitigação é realizada com o melhor aproveitamento da área disponível para que não haja a concentração das usinas em uma determinada área e, assim, reduzir os impactos das nuvens nos níveis de geração.

Para as eólicas, a previsibilidade da velocidade e direção dos ventos, é fundamental para a detecção de rampas de geração, permitindo que o sistema elétrico se prepare para suprir a variação da geração de energia elétrica, garantindo a sua flexibilização e, conseqüentemente, a sua confiabilidade, como nos casos de Portugal e Tasmânia.

Com os dados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que é possível ter uma participação de 42% de eólica no sistema elétrico, porém esse número cai conforme aumenta a participação da fotovoltaica devido ao seu alto grau de instabilidade ao longo do dia. O aumento da participação destas fontes demanda um grande planejamento do sistema como um todo, tanto a participação das fontes despacháveis para garantir a segurança e confiabilidade do sistema quanto das redes de transmissão para escoar a energia tanto gerada quanto a energia da reserva operativa para atender às rampas de geração típicas destas fontes.

Portanto, a presença destas fontes no sistema elétrico exige grande planejamento da geração e, principalmente, da transmissão, pois caso não sejam consideradas as flutuações inerentes à geração através das fontes renováveis intermitentes existirão grandes implicações financeiras e operacionais que colocarão em risco a segurança do sistema. Quando as medidas mitigadoras de risco são consideradas em avanço juntamente com o planejamento do sistema, o sistema elétrico garante, além de sua confiabilidade, o equilíbrio entre demanda e oferta de energia.

Para trabalhos futuros é possível dimensionar a quantidade de geração renovável intermitente no sistema elétrico brasileiro e o tamanho da reserva operativa necessária para manter o sistema com alto grau de confiabilidade, além da quantidade de linhas de transmissão necessárias para atender ao sistema de forma rápida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. P. **Implicações técnicas da inserção em grande escala da geração solar fotovoltaica na matriz elétrica**, 2017. 195 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Página institucional**. Disponível em: < <http://abeeolica.org.br/>>. Acesso em 04 jul. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Boletim anual de geração eólica 2017**. São Paulo, 2018. Disponível em: < <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em 21 dez. 2018.

BARROS, N. J. P. O. **Análise do impacto da integração de energias renováveis em redes de distribuição**, 2011. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica**. 2ª ed. Brasília, 2005. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>>. Acesso em 04 ago. 2018

BRASIL. **Projeto de lei nº 10370**, de 06 de junho de 2018. Institui a Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica-PRONASOLAR e dá outras providências. Brasília, 2018.

COUTO, A.; et al. Impact of Weather Regimes on the Wind Power Ramp Forecast in Portugal. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 6, n. 3, p. 934-942, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Página institucional**. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt>>. Acesso em 04 jul. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Web Map EPE**. Disponível em: < <https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>>. Acesso em 09 out. 2018.

FLÁVIO, S. A. **Planejamento da expansão de sistemas de transmissão com elevada participação de fontes renováveis**, 2015. 159 p. Tese (Doutorado) – Universidade federal de Itajubá, 2015.

GIANELLONI, F. T.; CÂMARA, L. S. C. Desafios da Difusão de Fontes de Geração não Controláveis no Brasil. In:– CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, CBPE, 10. **Anais...** Gramado, 2016.

HOLTTINEN, H. et al. Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration. *Wind Power*, v. 4, n. 2, p. 179-192, 2011. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON LARGE SCALE INTEGRATIONS OF WIND POWER INTO POWER SYSTEMS AS WELL AS ON TRANSMISSION NETWORKS OF OFFSHORES WIND FARMS, 8. **Proceedings...** Bramen, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/toc/10991824/2011/14/2>>. Acesso em 22 set. 2018

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **The power of transformation: wind, sun and the economics of flexible power systems**. Paris: IEA, 2014. 27-50 p.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Energy policies of IEA Countries – Denmark 2017 Reveiw**. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyPoliciesofIEACountriesDenmark2017Review.pdf>>. Acesso em 21 dez. 2018

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Global Energy Transformation – Roadmap to 2050**. Abu Dhabi, 2018. Disponível em:<<http://www.irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050>>. Acesso em 07 jul. 2018

KALANTARI, A.; GALIANAN, F. D. **The Impact of Wind Power Variability and Curtailment on Ramping Requirements**, p. 133-138, 2010.

KAMATH, C. Understanding Wind Ramp Events Through Analysis of Historical data. **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**, p. 1-6, 2010.



LAU, C. Y. et al. Passing-cloud Effects of Solar Photovoltaic System on Distribution Network Voltages. **Mechanics and Materials**, Suíça, v. 785, p. 551-555, 2015

LOPES, V. S. **Avaliação da influência da representação das séries temporais na geração hidrelétrica e eólica na confiabilidade composta do sistema elétrico**, 2013. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Página institucional**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em 04 jul. 2018.

NETO, A. H. et al. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 168-186 p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Página institucional**. Disponível em: <<http://ons.org.br/>>. Acesso em 04 jul. 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Metodologia para o dimensionamento da reserva de potência operativa do SIN face ao crescimento da geração eólica**. Rio de Janeiro, 2016.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Instituto Nacional de Pesquisas Especiais. São José dos Campos, 2006. 60 p.

POTTER, C. W. Very Short-Term Wind Forecasting for Tasmanian Power Generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 965-972, 2006.

RAMPINELLI, G. A.; ROSA JUNIOR, C. G. Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Criciúma, v. 14, n. 2, p. 247-302, 2012.

ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016. 37 p.

SENGUPTA, M.; KELLER, J. PV Ramping in a Distributed Generation Environment: a Study Using Solar Measurements. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, Golden, 2011.

SURI, M. et al. Cloud Cover Impact on Photovoltaic Power Production in Shouth Africa. **Engerati**, África do Sul, 2014.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2000. 111 p.

TOLMASQUIM, M. T. **Integração das fontes Renováveis Intermitentes na América Latina**. Banco de Desarrollo de América Latina, 2017. Disponível em <<http://scioteca.caf.com/>>. Acesso 04 set. 2018