

# Energia Elétrica e Sustentabilidade

Jaqueline Oliveira Rezende  
(Organizadora)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

**JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE**

(Organizadora)

# **Energia Elétrica e Sustentabilidade**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-45-1 DOI 10.22533/at.ed.451180110  1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira.  CDD 338.4
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

**Jaqueline Oliveira Rezende**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
O PARADIGMA INTERDISCIPLINAR DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL	
<i>Tiago Borga</i>	
<i>Rodrigo Regert</i>	
<i>Ludimar Pegoraro</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
SUSTENTABILIDADE, RECICLAGEM E MEIO AMBIENTE: A RELEVÂNCIA DA LOGÍSTICA	
<i>Welleson Feitosa Gazel</i>	
<i>Wesley Gomes Feitosa</i>	
<i>Antônio Adriano Alves de Souza</i>	
<i>Jeremias Monteiro Vaillant Junior</i>	
<i>Maria de Nazaré Souza Nascimento</i>	
<i>Márcio Costa</i>	
<i>Marcos José Alves Pinto Junior</i>	
<i>Carlos Renato Montel</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>32</b>
A CONTRIBUIÇÃO DO SISTEMA DE CONTAS ECONÔMICAS E AMBIENTAIS PARA ESTIMAR OS CUSTOS AMBIENTAIS NOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Adriana Maria Dassie</i>	
<i>José Eustáquio Diniz Alves</i>	
<i>David Montero Dias</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>42</b>
LEVANTAMENTO DOS IMPACTOS INERENTES À IMPLANTAÇÃO DE PCHS E IDENTIFICAÇÃO DO CUSTO DE OPORTUNIDADE NO RIO COXIM, MS, BRASIL	
<i>Thiago Oliveira Barbosa</i>	
<i>Poliana Ferreira da Costa</i>	
<i>Bruna Souza dos Santos</i>	
<i>Adriana Maria Güntzel</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>57</b>
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AMPLIAÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS DISPONÍVEIS, E AS POSSÍVEIS ALTERAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO DE VERTEDORES	
<i>Marcos Vinicius Andriolo</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>66</b>
RECUPERAÇÃO SUSTENTÁVEL DO ENTORNO DE RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS: UM ESTUDO NA UHE CORUMBÁ IV	
<i>Jorge Santos Ribas Jr.</i>	
<i>José Roberto Ribas</i>	
<i>Tatiana Maria Soeltl</i>	
<i>André Nicolau Brylynskyi</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>81</b>
LT 500 KV ARA-TAU: COMO O LICENCIAMENTO AMBIENTAL PODE PROPICIAR A CONSERVAÇÃO DA ESPÉCIE AMEAÇADA <i>CALLITHRIX AURITA</i> (SAGUI-DA-SERRA-ESCURO)	
<i>Jéssica Motta Luiz Bom</i>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>95</b>
NOVAS DIMENSÕES DA GOVERNANÇA DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	
<i>Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.</i>	
<i>Ana Lúcia Rodrigues da Silva</i>	



<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>107</b>
A GOVERNANÇA COMO INSTRUMENTO DE POLÍTICA PÚBLICA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	
<i>Denise Pereira Barros</i>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>120</b>
O ACORDO DE PARIS E OS NOVOS CAMINHOS PARA A GESTÃO SOCIOAMBIENTAL: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA AS EMPRESAS DO SETOR ELÉTRICO	
<i>Gustavo André Santana de Sá</i> <i>Pedro Magalhães Sobrinho</i>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>133</b>
OS CRITÉRIOS ENERGÉTICO-ECONÔMICOS UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: REFLEXÕES SOBRE ALGUNS MITOS E A NECESSIDADE DE UMA NOVA AGENDA	
<i>Luiz Claudio Gutierrez Duarte</i>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>151</b>
MITIGAÇÃO DO RISCO HIDROLÓGICO- LEILÃO DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA NA MODALIDADE SWAP DA ELETRONORTE	
<i>Ivan Rezende</i> <i>Virginia Fernandes Feitosa</i> <i>João David Resende</i> <i>Dante de Castro Simplicio</i> <i>Rafael Capistrano dos Santos Stanzani</i> <i>Gervásio Nery De Albuquerque</i>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>159</b>
A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA COMO RESULTADO DO APROVEITAMENTO DO CAPITAL INTELECTUAL PROTEGIDO PELO DIREITO DA PROPIEDADE INTELECTUAL – UM VETOR DE AUMENTO DE RECEITA EM POTENCIAL	
<i>Fernando da Silva Jansen</i>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>174</b>
O CUSTO E A ESTRUTURA DE CAPITAL PARA A INDÚSTRIA DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA: ASPECTOS METODOLÓGICOS E APLICAÇÕES	
<i>Luiz Claudio Gutierrez Duarte</i> <i>Washington Blanco</i>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>188</b>
GESTÃO DE CUSTOS EMPRESARIAIS NO NEGÓCIO TRANSMISSÃO	
<i>Ana Rita Xavier Haj Mussi</i> <i>Marcos Paulo Boaventura Severino Rezende</i>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>202</b>
GESTÃO E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS EM GARANHUNS-PE	
<i>Rosalva Raimundo da Silva</i> <i>José Romenik de Almeida</i> <i>Marcela Caroline S F Azevedo</i> <i>Maria Claudjane J. L. Alves</i>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>213</b>
METODOLOGIA PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA EM LARGA ESCALA NA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL	
<i>Sérgio Pinheiro dos Santos</i> <i>Fernando Rodrigues Alves</i>	

*Antônio Roseval Ferreira Freire  
Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino  
Otoni Nóbrega Neto  
Pedro Alves de Melo*

**CAPÍTULO 18 ..... 225**

GRUPO GPT, GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS  
COMPARAÇÃO DE CÁLCULO DE PRODUÇÃO EÓLICA UTILIZANDO WASP, OPENWIND E WINDSIM EM  
TERRENO COMPLEXO NA BAHIA, BRASIL

*Daniel Agnese Ramos  
Vanessa Gonçalves Guedes  
Angelo Alberto Mustto Cabrera  
Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo  
Wady Abrahamo Cury Netto  
Tulio Anselmo dos Santos Valentim*

**CAPÍTULO 19 ..... 235**

A INFLUÊNCIA, SOB O ASPECTO DE CURTO-CIRCUITO, DE GERADORES EÓLICOS NO SISTEMA  
ELÉTRICO DE POTÊNCIA.

*Eloi Rufato Junior  
Lucas Marino Bianchessi Sganzeta  
William Da Veiga*

**CAPÍTULO 20 ..... 247**

PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE IOT INTEGRADO A SISTEMA DE GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA

*Caio Castro Rodrigues  
Joice Machado Martins  
Layse Pereira do Nascimento  
João Vitor Natal Silva Quincó Maciel  
Otavio Andre Chase  
José Felipe Souza de Almeida*

**CAPÍTULO 21 ..... 258**

DETERMINAÇÃO DE PROCESSOS PARA LEVANTAMENTO PRÁTICO DAS CURVAS  
CARACTERÍSTICAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

*Jaqueline Oliveira Rezende  
Sebastião Camargo Guimarães Júnior*

**CAPÍTULO 22 ..... 272**

ANÁLISE DO PAYBACK DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR  
NO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

*Samara Iasmim Schardong  
Andréia Balz  
Fábio Augusto Henkes Huppes  
Mauro Fonseca Rodrigues*

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 283**

## METODOLOGIA PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA EM LARGA ESCALA NA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL

### **Sérgio Pinheiro dos Santos**

Companhia Hidrelétrica do São Francisco,  
Departamento de Planejamento da Expansão  
Recife – Pernambuco

### **Fernando Rodrigues Alves**

Companhia Hidrelétrica do São Francisco,  
Departamento de Planejamento da Expansão  
Recife – Pernambuco

### **Antônio Roseval Ferreira Freire**

Companhia Hidrelétrica do São Francisco,  
Departamento de Manutenção de Subestações  
Recife – Pernambuco

### **Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino**

Universidade Federal do Pernambuco,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Recife – Pernambuco

### **Otoni Nóbrega Neto**

Universidade Federal do Pernambuco,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Recife – Pernambuco

### **Pedro Alves de Melo**

Consultor Recife – Pernambuco

instalada já contratada é superior à capacidade hidrelétrica instalada na região. Assim, faz-se necessário um aperfeiçoamento no processo de planejamento da expansão da oferta de energia elétrica, visando considerar de forma mais detalhada algumas das características específicas da geração eólica, especialmente, a sua variabilidade em escala diária e horária, cujos efeitos se propagarão por todo o Sistema Interligado Nacional. Este aperfeiçoamento procura explicitar os requisitos de flexibilidade operacional para o sistema planejado de forma a garantir a otimização energética e a segurança elétrica do SIN no momento da operação. Neste capítulo é apresentada uma proposta para a inclusão no processo atual de planejamento da expansão da geração de uma nova etapa relativa à alocação das usinas na curva de carga, para cada um dos subsistemas interligados. Com isto, será possível, no momento do planejamento, identificar questões associadas à flexibilidade operacional do sistema, minimizando os riscos de dificuldades para a otimização energética e a segurança elétrica do SIN no momento da operação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Planejamento integrado, Geração Eólica, Otimização Eletroenergética, Flexibilidade Operacional.

**RESUMO:** A inserção crescente da geração eólica na Matriz Elétrica Brasileira, com destaque para a Região Nordeste, que, com uma capacidade instalada superior a 10 GW, com potencial para atingir 26 GW, mostra a importância desta fonte para o futuro energético do país. É importante destacar que a capacidade



## 1 | INTRODUÇÃO

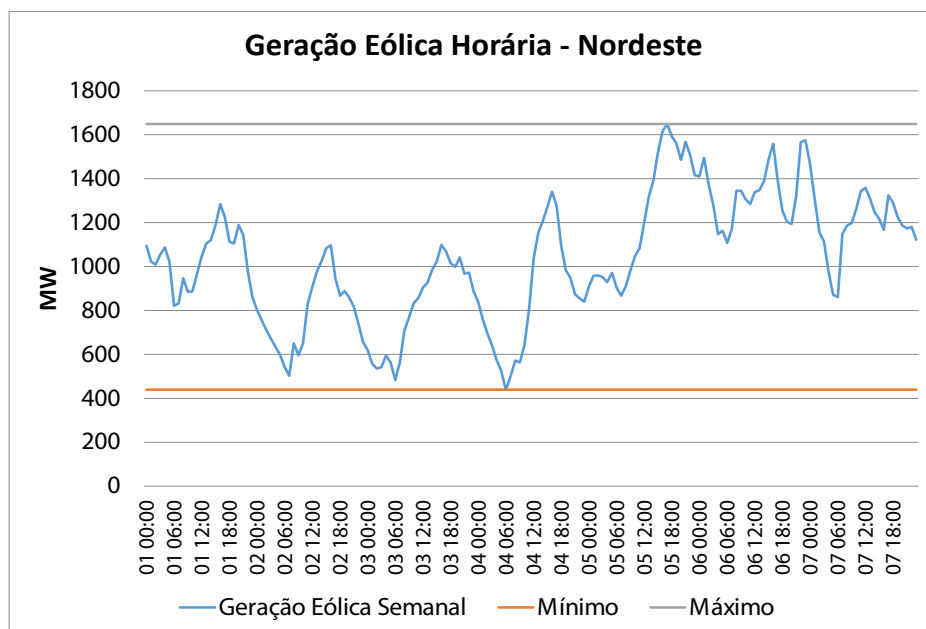
A complementaridade entre as fontes de geração renováveis, tais como a geração eólica, solar, e/ou a biomassa, e a geração hidroelétrica proporciona um notável ganho de capacidade de suprimento (CÉSAR et al., 2012), no entanto, a inserção de fontes não controláveis como a eólica e solar, poderá ocasionar um aumento nas variações (efeitos de rampa) em todos os horizontes (NYISO, 2010) (OLIVEIRA, 2014), impactando nos requisitos de confiabilidade, despachabilidade e desempenho do sistema de transmissão (LASHER, 2013) (CEÑA, 2013) (AHLSTROM, 2013).

Diversos estudos de integração que foram conduzidos com o objetivo de ajudar a entender e quantificar estes impactos (ELA et al., 2010) (HAGERTY, 2012), basicamente, consistem em simular o sistema futuro com grande penetração de eólica e avaliar impactos na rede e custos operacionais adicionais. Os estudos mostram que é necessária maior flexibilidade para a absorção dos efeitos de rampa (associados a erros de previsão dos ventos) e com participação ativa desses agentes na manutenção dos níveis de qualidade de energia adequados (CIGRE WG8, 2009) (BPA, 2007) (BPA, 2012) (BPA, 2011).

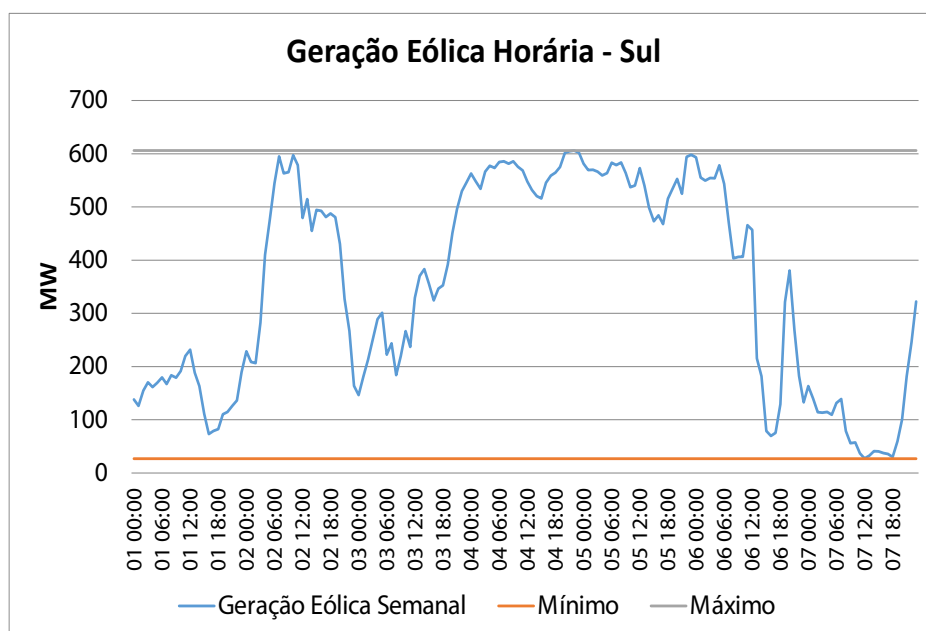
No Brasil, a variabilidade da geração eólica atual não parece, ainda, ser motivo de grande preocupação por parte do ONS, devido à capacidade instalada atual ser relativamente pequena. Naturalmente, com o crescimento desta capacidade, será necessário, em certas ocasiões, o desligamento de geradores para manter o equilíbrio carga-geração no sistema em operação.

Se tais geradores forem térmicas a gás ou a carvão, esta possibilidade de liga-desliga em períodos curtos de tempo poderá afetar a integridade, a vida útil e a economicidade da operação dessas usinas. Portanto, medidas técnicas e regulatórias serão necessárias para adequação dos despachos de geração segundo a ordem de mérito para garantir a operação econômica do SIN.

Assim, um fator de incentivo ao crescimento da participação da geração eólica no SIN será a flexibilidade operacional do sistema futuro (MCINTOSH, 2008), definida no momento do planejamento de forma a garantir a otimização energética e a segurança elétrica no momento da operação.



(a)



(b)

FIGURA 1 - Geração Eólica Agregada – Região Nordeste (a) e Sul (b).

É importante observar os elevados “swings” na geração eólica agregada que poderão ocorrer no dia a dia da operação, mostrando que flexibilidade operacional do sistema planejado deve passar a ser uma preocupação do planejamento da expansão do sistema, conforme Figuras 1 (a) e (b) obtidas a partir de dados do ONS para uma semana do mês de setembro de 2014.

Propõe-se uma análise integrada das questões de geração e transmissão, visando uma regulamentação técnico-econômica que possibilite a repartição dos custos e benefícios da geração eólica entre todos os agentes do mercado.

O restante do capítulo está organizado da seguinte forma: A seção 2 apresentará a proposta de aperfeiçoamento do planejamento da expansão. Já na Seção 3 será

demonstrado um estudo de caso em decorrência da aplicação da metodologia e na Seção 4 as considerações finais.

## **2 | PROPOSTA DE APERFEIÇOAMENTO NO PROCESSO DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO**

As datas de necessidade dos novos empreendimentos de geração e da ampliação da capacidade de transmissão entre os subsistemas interligados, que compõem o SIN, são estabelecidas de forma indicativa, segundo os critérios de custos marginais de operação e de expansão e para um risco de déficit inferior a 5,0%, podendo ser reavaliadas em função de novas condições de mercado e de políticas de governo para o setor elétrico. Este conjunto de empreendimentos constitui o Plano de Expansão Ajustado, segundo a ótica energético-econômica.

Como resultados deste plano são apresentadas, a nível mensal, as metas energéticas obtidas a partir de uma representação a subsistemas equivalentes. Nesta representação a geração eólica, que está cada vez mais importante como uma opção para a expansão da oferta sistêmica, é indicada de forma simplificada, como uma fonte não despachável e exógena ao processo de otimização. Embora nesse nível de análise esta abordagem seja perfeitamente aceitável, com o aumento da participação desta fonte geradora é importante a introdução no processo de planejamento de uma etapa adicional, que consiste na análise da alocação das usinas na curva de carga de cada subsistema interligado.

Com isto, será possível verificar a factibilidade da inserção dos montantes previstos para esta fonte no futuro, quando se considera a realidade do dia a dia da operação. Os despachos de referência associados à alocação das usinas na curva de carga são indicadores suficientes da otimização físico-operativa do sistema de geração planejado.

### **2.1 Análise Energética**

A Figura 2 apresenta o fluxograma do processo sugerido para a análise energética, ressaltando-se que a proposta está centrada nas ferramentas de análise energética já existentes usadas no dia a dia do setor. A seguir são apresentadas de forma resumida as principais etapas.

**Processo de Análise da Expansão da Oferta de Energia Elétrica Considerando Cenários de Expansão da Geração Eólica para o Sistema Interligado Nacional**

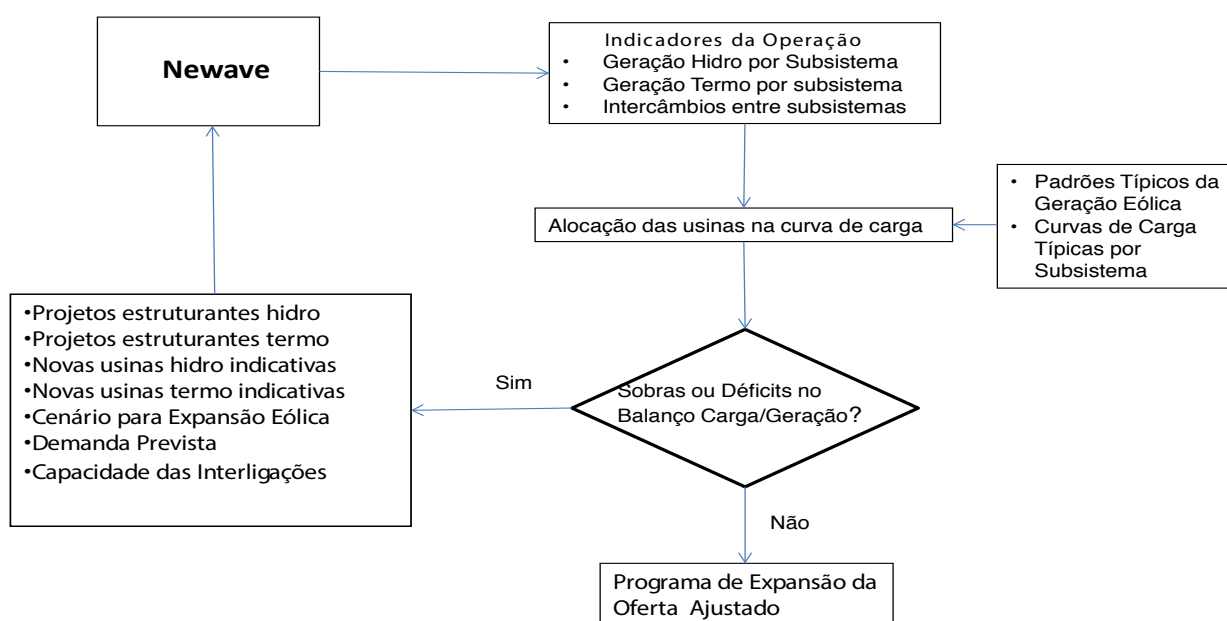


FIGURA 2 – Processo de Análise da Expansão da Oferta de Energia Elétrica considerando cenários da expansão da geração eólica para o Sistema interligado nacional.

- a. Considerar os cenários que sejam representativos da composição do Parque Gerador em um determinado instante, definidos pelo MME;
- b. Obter para cada um desses cenários, os principais parâmetros, representativos da dinâmica da operação do sistema de geração, tais como: intercâmbio entre subsistemas, geração hidráulica e geração térmica, por subsistema. Para isso, é usado o Modelo NEWAVE, através de simulações dinâmicas em base mensal. Nessas simulações as fontes, eólica, biomassa, PCH e solar são representadas como geração externa, considerando seu comportamento típico em termos sazonais;
- c. Simular com esses parâmetros, comumente chamados de metas energéticas, obtidas de uma representação a Subsistemas Equivalentes, a alocação das usinas na curva de carga, obtendo-se despachos para dois períodos típicos do ano (período úmido e período seco). São elaborados despachos horários e uma representação a usinas individualizadas. As fontes eólica, biomassa, PCH e solar são representadas, também como geração externa, através do seu comportamento típico, em um ciclo diário.
- d. Nessa etapa é considerado um aspecto da geração que é determinante para a expansão da transmissão, a questão da flexibilidade das usinas de poder variar o despacho ao longo do dia para acompanhar a curva de carga do sistema, levando em conta as seguintes restrições, dentre outras:
  - Geração hidráulica mínima obrigatória para atender as restrições de va-

ção mínima a jusante das usinas hidrelétricas;

- Variação máxima de vazão a jusante das usinas hidrelétricas ao longo de um ciclo diário;
- Inflexibilidade da geração hidráulica das usinas da região Norte;
- Nível de flexibilidade das usinas termelétricas ao longo de um ciclo diário;
- Nível de inflexibilidade das usinas a biomassa (bagaço de cana e biomassa florestal) ao longo de um ciclo diário;
- Limites de intercâmbio entre subsistemas.

## 2.2 Análise Elétrica

Simular, com os despachos de referência obtidos na etapa anterior, o desempenho da rede elétrica, usando os modelos de análise de redes em regime permanente (ANAREDE) e dinâmico (ANATEM). Para todos estes despachos devem ser consideradas as rotas existentes, bem como as rotas candidatas planejadas. As obras de transmissão associadas aos vários cenários de fontes de geração serão escolhidas com base nos indicadores de desempenho de rede previamente de definidos. Nesta análise, cujo processo é mostrado na figura a seguir, cabe destacar a formação dos “clusters eólicos”. Como se trata de uma visão sistêmica com foco nos elementos da Rede Básica e não em conexões específicas, os clusters eólicos representam conjuntos de plantas eólicas cujo efeito no desempenho elétrico do sistema pode ser obtido por uma fonte equivalente conectada a determinada barra da Rede Básica. Na formação destes clusters é fundamental o conhecimento e a sensibilidade com a operação da rede elétrica da região Nordeste.

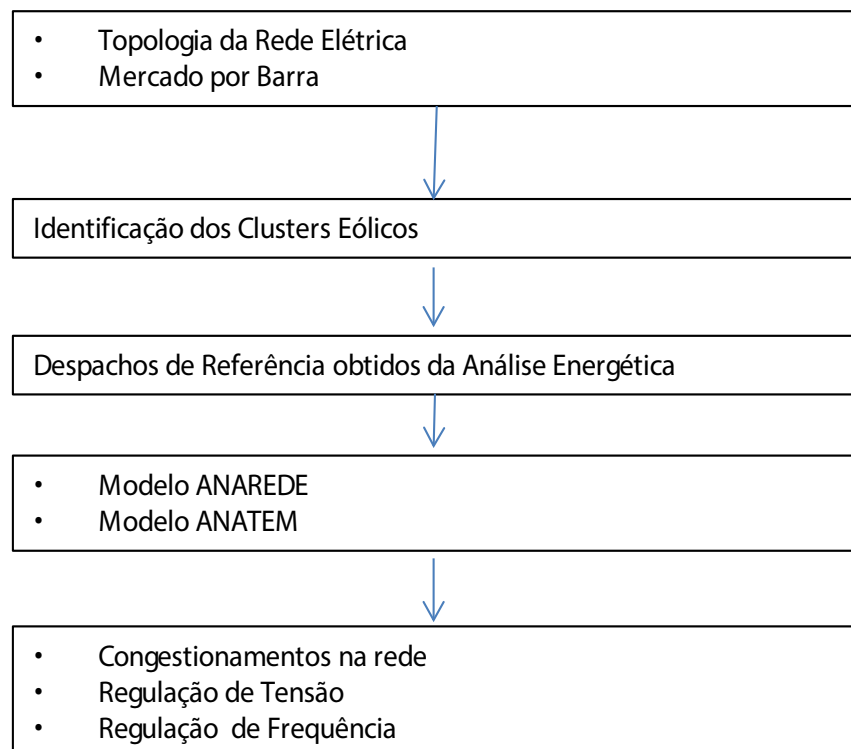


FIGURA 3 - Processo de Análise Elétrica.



### 3 | APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ALOCAÇÃO NA CURVA DE CARGA: ESTUDO DE CASO

#### 3.1 Premissas

Para demonstrar a aplicação da metodologia foram realizados dois estudos de casos para o ano de 2019, no período úmido (março) e seco (setembro). São mostrados apenas os resultados da região Nordeste onde os impactos serão mais significativos, entretanto, como há um acoplamento energético através do intercâmbio respeitando-se as metas energéticas, estes impactos se propagam para o restante do sistema interligado.

Os indicadores da otimização energética (as metas energéticas), geração hidro, geração térmica e intercâmbio, foram obtidos a partir de simulações com o modelo NEWAVE, usando dados do PMO – Janeiro de 2015 publicado pela CCEE.

Os dados para a etapa de alocação das usinas na curva de carga tais como: modulação da geração hidro, modulação da geração térmica, padrão típico da geração eólica e curva de carga típica, foram obtidos do Programa Diário de Produção – PDP, elaborado pela CHESF, para uma semana dos meses de março e setembro de 2014. Estes dados foram extrapolados para o ano de 2019, conforme expansão prevista no Programa Mensal da Operação PMO – Janeiro de 2015 elaborado pelo ONS. Já o atendimento ao Balanço Carga – Geração será feito através do intercâmbio. Isto é, despacha-se a geração hidro, a geração térmica, em seguida sobrepõe-se à soma destas a geração eólica, sendo o intercâmbio considerado para o fechamento do balanço.

MWmed	Cenário			
	Crítico		Favorável	
	Março	Setembro	Março	Setembro
G. Hidráulica	3.832	3.671	8.212	6.346
G. Térmica	2.737	3.556	619	619
G. Eólica	3.467	6.461	3.467	6.461
Mercado NE	12.298	12.048	12.298	12.048
Recebimento NE	2.262	-1.640	0	-1.379

TABELA 1 - Valores obtidos na etapa de otimização energética com o modelo NEWAVE.

#### 3.2 Alocação na curva de carga - região Nordeste, ano 2019, período úmido (Mês de Março)

Nas Figuras 4 e 5 são mostrados os resultados da alocação na curva de carga para o mês de março de 2019, considerando um cenário hidrológico crítico e um cenário hidrológico favorável, respectivamente.

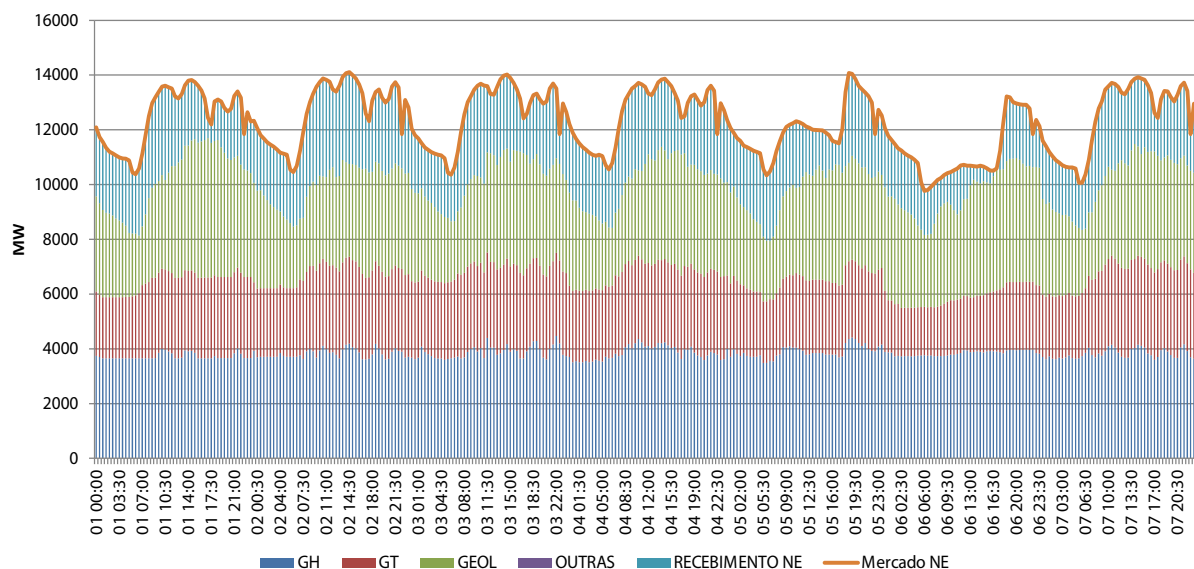


FIGURA 4 – Alocação na curva de carga da região Nordeste – Mês de Março – Cenário Hidrológico Crítico.

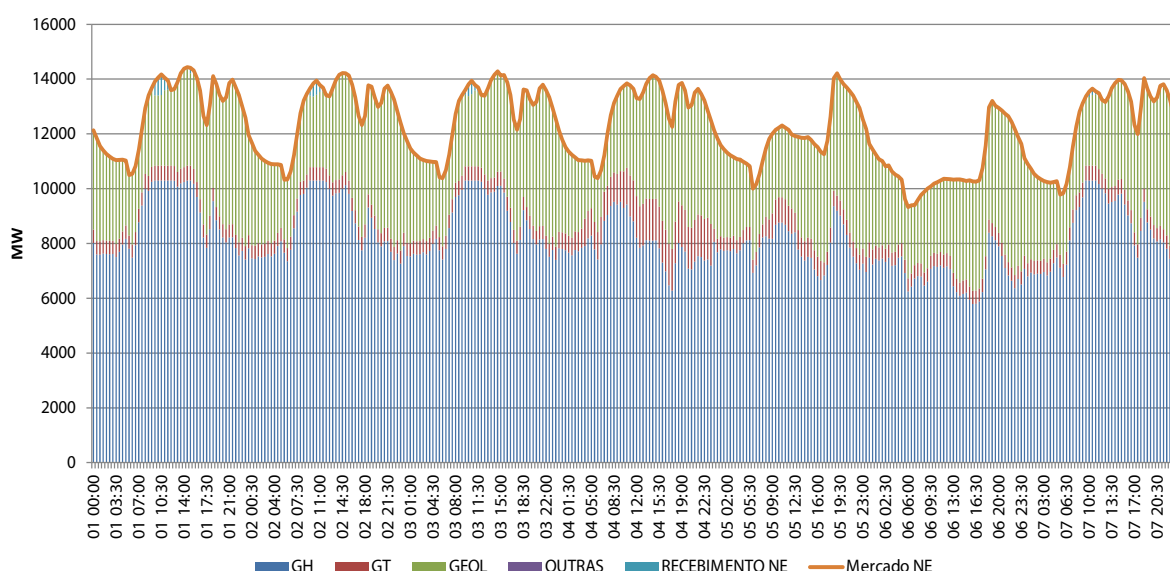


FIGURA 5 – Alocação na curva de carga da região Nordeste – Mês de Março – Cenário Hidrológico Favorável.

No período úmido de um cenário hidrológico crítico, a geração hidráulica permanecerá no mínimo, limitada pelas restrições hidráulicas e faixas operativas das unidades geradoras, enquanto a geração térmica é limitada pela meta energética. Nesse caso, o intercâmbio passa a seguir as variações da carga.

Neste mesmo período, de um cenário hidrológico favorável, em alguns momentos a geração hidráulica foi limitada pela capacidade máxima e a geração térmica mínima pela inflexibilidade. Nessa situação o intercâmbio foi alterado para o atendimento dessa carga.

### 3.3 Alocação na curva de carga - região Nordeste, ano 2019, período seco (Mês de Setembro)

Na Figura 6 é mostrada a alocação na curva de carga para o mês de setembro de 2019 em um cenário hidrológico crítico e na figura 7 a alocação considerando um cenário hidrológico favorável.

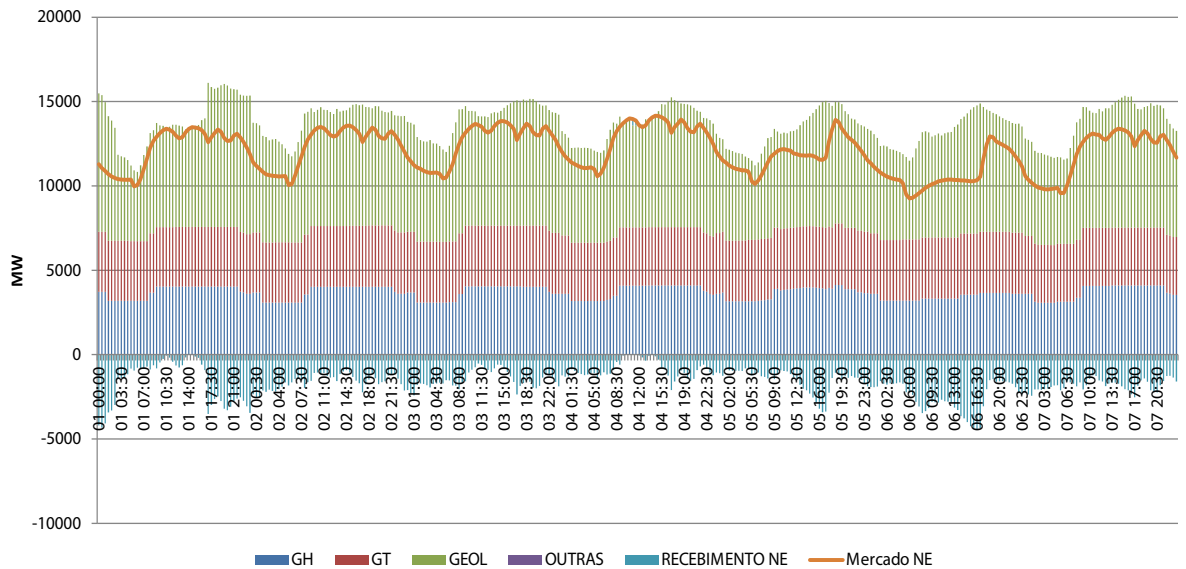


FIGURA 6 – Alocação na curva de carga na região Nordeste para o ano 2019, mês de setembro, cenário crítico (Período seco).

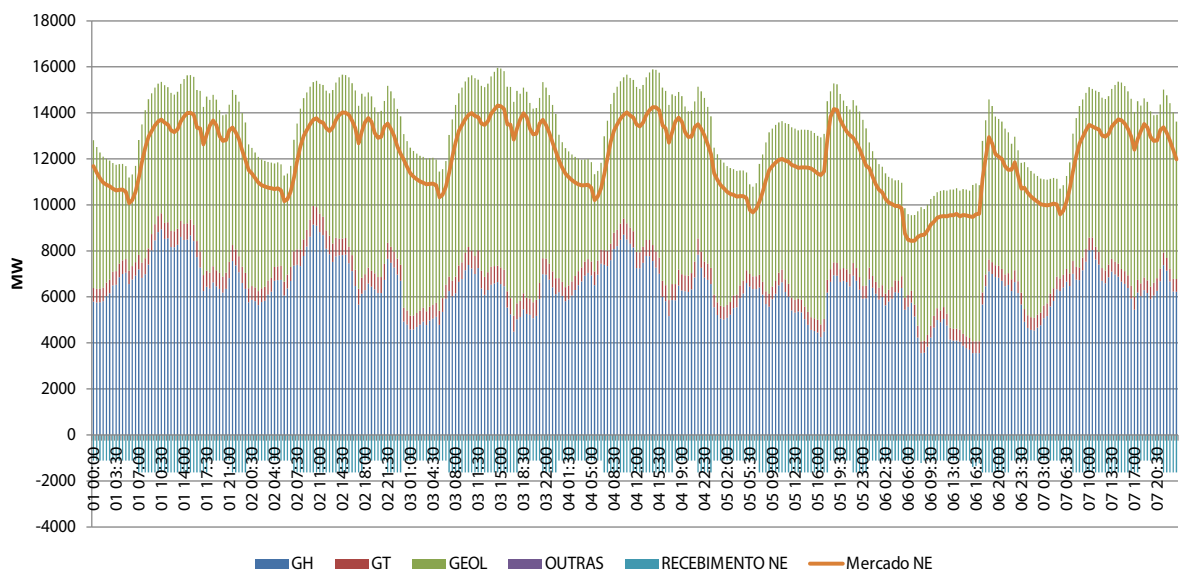


FIGURA 7 – Alocação na curva de carga na região Nordeste para o ano 2019, mês de setembro, cenário favorável.

Em um cenário Hidrológico crítico, as gerações hidráulica e térmica atendem às metas energéticas. Quanto às respectivas modulações para atender a curva de carga, a

geração hidro foi limitada pelas restrições hidráulicas e faixas operativas das unidades geradoras e a geração térmica pela inflexibilidade. A geração eólica complementa o atendimento a carga da região e gera excedentes exportáveis da ordem de 5.000 MW. No cenário hidrológico favorável as gerações hidro e termo atendem às metas energéticas. A geração eólica complementa o atendimento a carga da região e gera excedentes exportáveis, que poderiam ter sido reduzidos não fosse a inflexibilidade térmica.

### 3.4 Análises do sistema de transmissão

Nas Figuras 8 e 9 é mostrada uma comparação para os meses de março e setembro dos valores de intercâmbio esperados em 2019 e já realizados em 2014. Cabe observar dois aspectos importantes para o planejamento das interligações. O primeiro é a esperada tendência de crescimento da região Nordeste como exportadora à medida que expande a geração eólica na região. O segundo são as significativas variações nos intercâmbios em curtos intervalos de tempo, o que representa um desafio para o desempenho elétrico do sistema. Além disso, esse aspecto representará um importante desafio para a gestão da operação pelo ONS, já que significarão reprogramações frequentes nos demais subsistemas, especialmente, os subsistemas receptores dos grandes blocos de geração eólica exportados pela região Nordeste.

Nessas figuras ressalta-se, também, a necessidade de avaliar, entre outros aspectos, o controle dinâmico de frequência e estabilidade de tensão. A análise elétrica proposta vem a complementar os estudos de dimensionamento dos empreendimentos, onde são escolhidos cenários limites para determinação das alternativas mais econômicas e equipamentos adicionais.

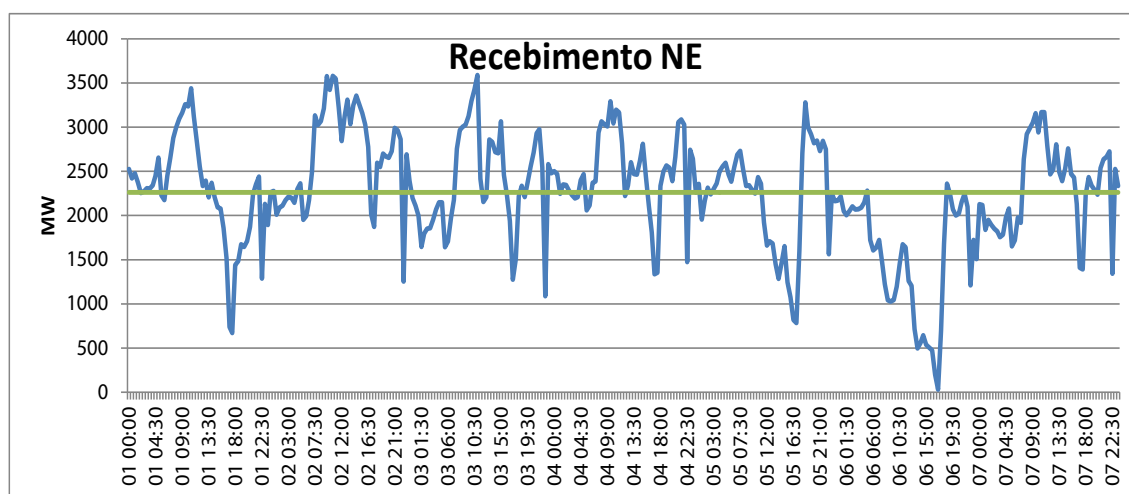


FIGURA 8 – Intercâmbio para região Nordeste para o ano 2019, mês de março, cenário crítico.

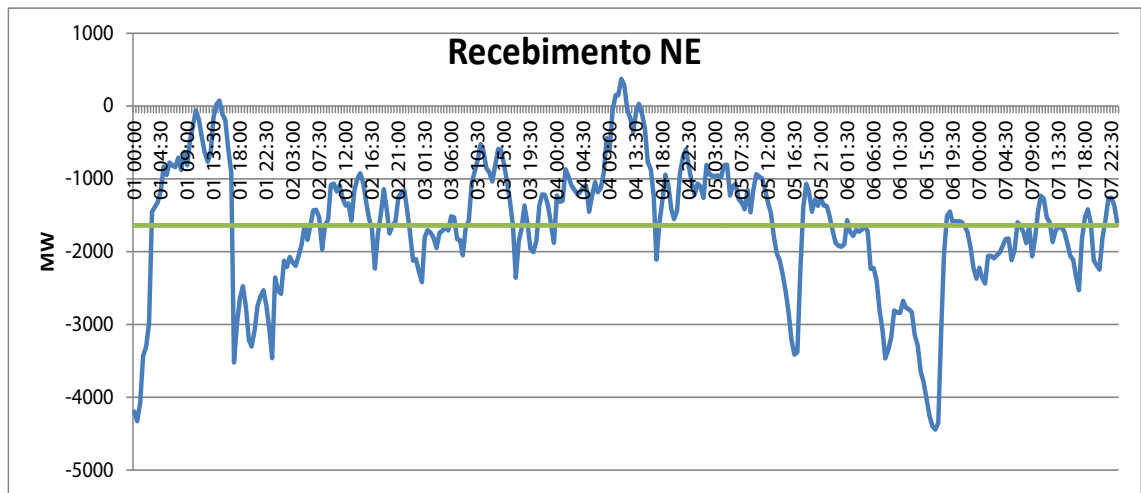


FIGURA 9 – Intercâmbio para região Nordeste para o ano 2019, mês de setembro, cenário crítico.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o extraordinário potencial eólico existente no país, um dos grandes desafios do planejamento da expansão da oferta de energia elétrica no Brasil é definir, no momento do planejamento, recursos de geração com flexibilidade operacional que incentivem a expansão da geração através de fontes renováveis e garantam a otimização e a segurança do sistema planejado, no momento da operação.

Nos cenários críticos e favorável para o mês de março serão frequentes as reprogramações de intercâmbio para atender o balanço energético. Já no mês de setembro, a geração total na região excede o mercado, sendo necessária capacidade de transmissão das interligações. Neste contexto será imprescindível avaliar a capacidade de absorção de energia nos sistemas receptores. Isto mostra a importância dessa análise no momento do planejamento.

Entretanto, este estudo tem um caráter qualitativo, pois, não é trivial nem o objetivo deste trabalho obter com precisão as curvas de carga e de geração eólica para este horizonte de análise. Há necessidade de um aprofundamento em nível regional como também uma análise mais ampla, considerando as restrições de recebimento em outros subsistemas.

Devido as grandes distâncias do SIN, recomenda-se uma absorção local dessas variações momentâneas da geração com fontes renováveis, podendo ser realizado pelo aumento da flexibilidade térmica local, ou instalação de hidrelétricas específicas para o fornecimento de potência, como a segunda etapa de Luiz Gonzaga (1.000 MW) e Xingó (2.100 MW) ou pela construção da usina de Paulo Afonso V (2.400 MW).

Os aspectos energéticos relacionados a inserção da eólica parecem bem equacionados. No entanto, sob o ponto de vista de potência o tema ainda necessita de um maior aprofundamento. Estudos estão sendo conduzidos com uma abordagem mais ampla, como previsão de curvas de geração e carga, controle dinâmico de



frequência, estabilidade de tensão e nível de curto-circuito.

## REFERÊNCIAS

AHLSTROM, MARK. **Evolution of Forecasting, Operations and Market Design for Wind Integration**. NAWEA 2013 Symposium Boulder, Colorado August 7, 2013.

BPA. **Northwest Wind Integration Action Plan**. Policy Steering Committee; Bonneville Power Administration – BPA – USA, March 2007.

BPA. **Wind Integration Program: Balancing the Future**. Bonneville Power Administration – BPA – USA. Initial Discussions, June 2012.

BPA.. **How BPA supports Northwest wind power Discussions**; Bonneville Power Administration – BPA – USA. May 2011.

CEÑA, ALBERTO. **Spanish Experience on wind energy integration into the grid**, Dirección técnica. Rio de Janeiro, October 1st, 2013.

CÉSAR, THIAGO C., PEDRO DAVID A. M-S., PEREIRA, AMARO O., SOUZA, RONALDO A., CARVALHO, RENATA N. F. Regularização do suprimento de energia – o papel da complementaridade. **Anais do XXI SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – GPL VII**, Florianópolis, 2011.

CIGRE WG8. **Technical Brochure on Grid Integration of Wind Generation**, Working Group 08 of Study Committee C6. International Conference on Large High Voltage Electric Systems. July 2009.

ELA, ERIK, et al. **Evolution of operating reserve determination in wind power integration studies**. Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010.

HAGERTY, J. MICHAEL. **The Role of Hydroelectric Generation in Electric Power Systems with Large Scale Wind Generation**, Massachusetts Institute of Technology, June 2012.

LASHER, WARREN.. **A Transmission Planning Case Study for Wind Integration – CREZ in ERCOT**, System Planning Electric Reliability Council of Texas, Inc. - NAWEA – 2013 Symposium.

MCINTOSH, JIM. **Wind Generation Integration**; NERC MRC/Alberta Electric System Operator. Meeting May 6, 2008.

NYISO. **Wind Generation Study**, NYISO – New York State Energy Research and Development Authority, August 2010. Disponível em: <http://www.uwig.org>. Acesso em 16 de maio de 2018..

OLIVEIRA, JOSÉ FRANCISCO ARTEIRO DE. Increasing Wind Power Generation Penetration Degree in Brazil: a Challenge for the Brazilian Interconnected Power System. **Anais do 5º Brazil WindPower**, Rio de Janeiro, 2014

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**Jaqueline Oliveira Rezende** Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-45-1

